

Wanderson Fernando Maia

**ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE BARRAS EM DUPLA
CANTONEIRA DE AÇO FORMADA A FRIO SUBMETIDAS À
COMPRESSÃO**

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Estruturas.

Orientador: Prof. Associado Maximiliano Malite

VERSÃO CORRIGIDA

A versão original encontra-se na Escola de Engenharia de São Carlos

**São Carlos
2012**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

M217a Maia, Wanderson Fernando
 Análise teórica e experimental de barras em dupla
 cantoneira de aço formada a frio submetidas à compressão
 / Wanderson Fernando Maia ; orientador Maximiliano
 Malite. – São Carlos, 2012.

 Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em
 Engenharia de Estruturas)-- Escola de Engenharia de
 Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.

 1. Estrutura de aço. 2. Estabilidade estrutural. 3.
 Perfis de aço formados a frio. 4. Dupla cantoneira de
 aço. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **WANDERSON FERNANDO MAIA**.

Título da tese: "Análise teórica e experimental de barras em dupla cantoneira de aço formada a frio submetidas à compressão".

Data da defesa: 24/08/2012

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Maximiliano Malite (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Rodrigo Ribeiro Paccola**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Luiz Carlos Marcos Vieira Júnior**
(University of New Haven)

APROVADO

Prof. Dr. **Júlio Fruchtengarten**
(Escola Politécnica/USP)

APROVADO

Prof. Associado **Eduardo de Miranda Batista**
(Escola Politécnica/USP)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas):

Profa. Associada **Ana Lucia Homce de Cresce El Debs**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

Aos meus pais, João e Maria José,
com amor e gratidão.

Agradecimentos

À Deus, por conseguir vencer mais essa etapa na minha vida e por estar sempre me guiando.

Aos meus pais João e Maria José pelo amor, compreensão e apoio irrestrito.

Ao meu irmão Rodrigo, minha cunhada Ana Cláudia e aos meus sobrinhos Guilherme e Gabriel pelo carinho e apoio constante.

Aos meus familiares pela torcida e pelo apoio: tios, primos e em especial aos meus avós: José (in memorian), Lêda, Sebastião e Maria.

À minha namorada Silmara pela paciência, pelo carinho e pelo apoio.

A algumas pessoas sem as quais certamente não teria chegado até aqui: Cláudia, Tia Ana Rita, Tio Benedito (in memorian), Catarina e Antônio (in memorian).

Ao professor Maximiliano Malite, pela confiança, amizade, orientação e principalmente pela paciência.

Ao Luiz Vieira pela recepção durante o estágio nos EUA e pela ajuda constante no trabalho.

Ao professor Ben Schafer pela orientação durante o estágio na The Johns Hopkins University.

Aos amigos Giovanni, Rodrigo Barros e Hugo, pelo apoio, amizade e pelos momentos de alegria e descontração.

Aos funcionários do Laboratório de Estruturas pela dedicação na realização dos ensaios.

Ao CNPq pelos recursos financeiros concedidos.

Enfim, a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para o trabalho.

Resumo

Maia, W. F. **Análise teórica e experimental de barras em dupla cantoneira de aço formada a frio submetidas à compressão.** Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

Barras compostas em dupla cantoneira são constituídas por duas seções idênticas dispostas paralelamente, afastadas entre si e ligadas uma a outra apenas em alguns pontos ao longo do comprimento, por meio de chapas separadoras. O sistema aqui apresentado é bastante utilizado, principalmente em estruturas treliçadas leves, no entanto, não existem estudos específicos sobre seu comportamento, como consequência as normas de cálculo não fornecem subsídios para o projeto desse componente estrutural. É relevante estudar o comportamento de barras em dupla cantoneira, já que neste caso, além dos modos de instabilidade associados à cantoneira isolada, poderão ocorrer modos de instabilidade associados à barra composta em função da presença das chapas separadoras, que tendem a modificar o comportamento do sistema. Apresenta-se no trabalho análises numérica e experimental sobre o comportamento de barras submetidas à compressão centrada e excêntrica. Nas análises variou-se o número de chapas separadoras buscando estudar a eficiência das mesmas na força normal resistente das barras. Os resultados mostraram que a introdução de chapas separadoras melhorou significativamente o comportamento das barras, principalmente para compressão excêntrica. Foram observados modos de instabilidade por flexo-torção, por flexão e combinação dos dois modos. Para comparação dos resultados, inicialmente foram adotadas duas hipóteses de cálculo com base no procedimento da ABNT NBR 14762: 2010, considerando compressão centrada. No primeiro procedimento considerou-se cada cantoneira como uma barra isolada independente da presença das chapas separadoras, admitiu-se instabilidades local, por flexo-torção e por flexão; no segundo considerou-se barra composta admitindo-se apenas instabilidades local e por flexão em relação ao eixo principal de menor inércia do conjunto. Em geral, os resultados das análises numérica e experimental apresentaram valores intermediários aos obtidos pelas duas hipóteses adotadas inicialmente. Com os resultados obtidos nas análises numérica e experimental são recomendados procedimentos para o dimensionamento desse componente estrutural.

Palavras-chave: estruturas de aço, estabilidade estrutural, perfis de aço formados a frio, dupla cantoneira de aço.

Abstract

Maia, W. F. **Theoretical and experimental analysis of cold-formed steel double angle members under compression.** Thesis – School of Engineering of Sao Carlos, University of Sao Paulo, Sao Carlos, 2012.

Double-angle members with batten plates consist of two identical angles set up in parallel, spaced apart, and connected to each other by batten plates at specified points along the length. The system presented herein is widely used, especially in light truss structures; however, there are no standard design procedures specific for the design of this structural component. Studying the behavior of double angle members is interesting, because in this case, besides the critical modes of the single angle, they also show critical modes, due to the presence of the batten plates that sometimes interfere with the behavior of the system. This work presents a numerical and experimental study of members under concentric and eccentric axial compression. The number of batten plates is changed to study the influence on the nominal axial strength. The use of batten plates significantly increases the strength of the system, especially for members under eccentric compression. The buckling modes observed were flexural-torsional, flexural and combination of the modes. Initially, two design hypotheses are compared to the results obtained: (i) non-composite action (no interaction between angles), with only local, flexural, and flexural-torsional buckling considered; (ii) composite action (full interaction between angles), and only considering local and minor-axis flexural buckling of the pair of angles. The two design hypotheses ignore load eccentricity. The hypotheses are based upon recommendations in ABNT NBR 14762: 2010. In general, numerical and experimental results for angles connected by bolted batten plates fall in between the design curves defined by methods (i) and (ii). With the results obtained in numerical and experimental analysis, procedures are recommended for the design of this structural component.

Keywords: steel structures, structural stability, cold-formed steel members, steel double angle.

Sumário

1. Introdução.....	15
2. Revisão bibliográfica.....	19
2.1 Previsões normativas.....	19
2.2 Modos de instabilidade.....	20
2.2.1 Instabilidade local.....	20
2.2.2 Instabilidade global de cantoneira isolada.....	24
2.2.3 Cantoneiras simples conectadas por uma aba.....	28
2.2.4 Instabilidade global de barra composta.....	30
2.3 Tensões residuais.....	39
2.4 Imperfeições geométricas iniciais.....	45
3. Análise numérica.....	49
3.1 Descrição dos elementos finitos utilizados.....	49
3.2 Análise numérica – Inicial.....	51
3.2.1 Procedimentos adotados na construção dos modelos.....	51
3.2.2 Consideração das imperfeições geométricas iniciais.....	54
3.2.3 Consideração do modelo reológico.....	56
3.3 Análise numérica – Final.....	58
3.3.1 Procedimentos adotados na construção dos modelos.....	58
3.4 Consideração da não-linearidade geométrica.....	64
4. Análise experimental.....	67
4.1 Caracterização dos materiais.....	67
4.2 Análise de conformidade dos perfis segundo a ABNT NBR 6355:2003.....	71
4.3 Descrição dos ensaios realizados.....	73
5. Resultados.....	79
5.1 Análise numérica – Inicial.....	79
5.1.1 Dupla cantoneira simples.....	79

5.1.2	Dupla cantoneira enrijecida	93
5.2	Análise numérica – Final	99
5.2.1	Dupla cantoneira simples	99
5.2.2	Dupla cantoneira enrijecida	113
5.2.3	Dupla cantoneira laminada	127
5.3	Análise experimental	133
5.3.1	Dupla cantoneira simples	133
5.3.2	Dupla cantoneira enrijecida	142
5.3.3	Dupla cantoneira laminada	152
6.	Conclusões	159
7.	Bibliografia	163
	Apêndice A – Resultados de análise numérica em dupla cantoneira.....	171
	Apêndice B – Resultados dos ensaios de barras em dupla cantoneira.....	183

Introdução

Capítulo 1

A busca por estruturas cada vez mais leves e arrojadas levam à utilização de componentes cada vez mais esbeltos, isso faz com que a engenharia estrutural necessite sempre de procedimentos de dimensionamento que acompanhem esta evolução.

A utilização de perfis de aço formados a frio é um exemplo de aplicação que necessita cada vez mais de pesquisas. Os grandes avanços nos processos de fabricação têm levado à utilização mais corrente de aços com elevada resistência mecânica e, por consequência, reduzida espessura das chapas que compõem os perfis. Com isso, diferentes modos de instabilidade que até então não eram observados passam a merecer atenção especial. Pesquisas teóricas e experimentais têm sido realizadas a fim de se caracterizar e descrever o comportamento estrutural destes elementos, buscando soluções de cálculo econômicas e seguras.

As cantoneiras de aço formadas a frio são exemplos de componentes que vem sendo cada vez mais utilizados como barras de estruturas treliçadas, barras de contraventamentos e elementos auxiliares em ligações.

As tradicionais cantoneiras laminadas a quente apresentam em geral abas compactas, portanto, não sujeitas ao modo de instabilidade local e pouco propensas ao modo de instabilidade global por flexo-torção para a faixa usual de comprimento. Entretanto, as cantoneiras simples formadas a frio, em geral com paredes delgadas (elevadas relações largura/espessura), apresentam dois modos de instabilidade: (i) modo global de flexão, dominante no caso de barras longas, e um modo coincidente local-chapa/global de flexo-torção, que é crítico para barras de menor comprimento (Figura 1.1).

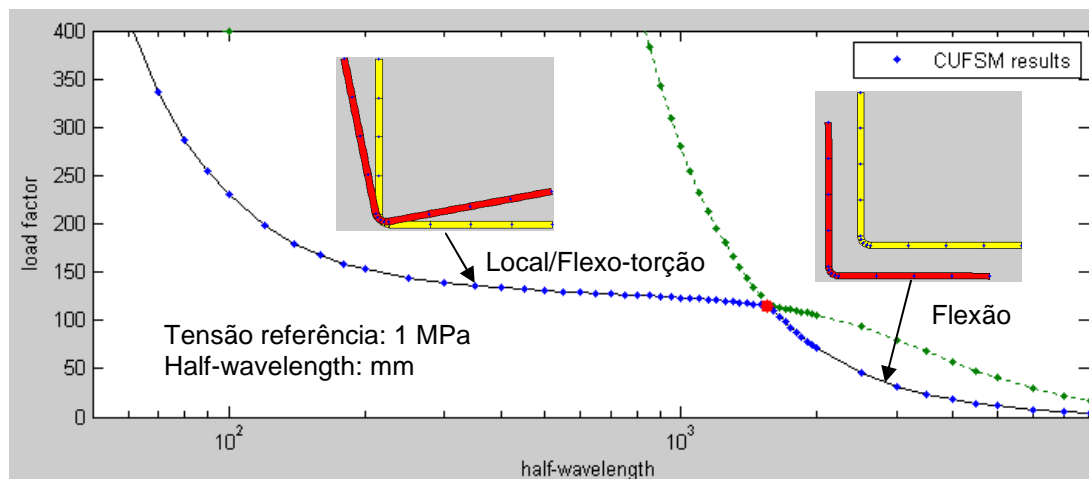


Figura 1.1 – Análise de estabilidade elástica via CUFMSM: perfil L 60x2,25 (compressão centrada)

Na Figura 1.2 apresenta-se o resultado da análise de estabilidade elástica de uma cantoneira enrijecida, onde se percebe a presença de um mínimo local e ainda a presença dos modos globais de flexo-torção e de flexão. A cantoneira enrijecida apresenta um melhor desempenho estrutural, principalmente quanto à instabilidade local.

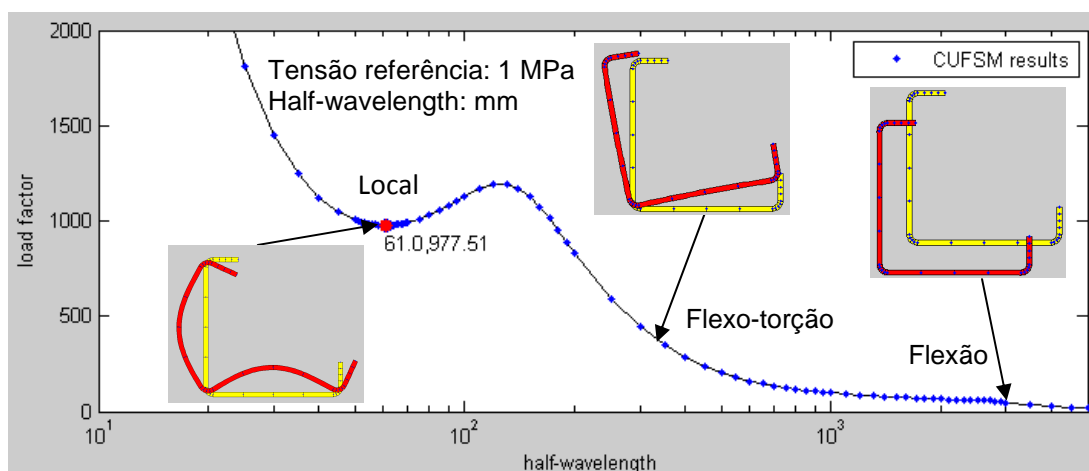


Figura 1.2 – Análise de estabilidade elástica via CUFMSM: perfil Le 60x15x2,00 (compressão centrada)

As barras compostas em dupla cantoneira, com travejamento em quadro, são constituídas por duas seções idênticas dispostas paralelamente, afastadas entre si e ligadas uma a outra apenas em alguns pontos ao longo do comprimento, por meio de chapas separadoras (Figura 1.3). Apesar de ser um sistema bastante utilizado, principalmente por cantoneira simples, não existem estudos específicos sobre seu comportamento, como consequência as normas de cálculo não fornecem subsídios para o projeto desse componente estrutural.



(a)



(b)

Figura 1.3 – Sistema em dupla cantoneira simples com chapas separadoras

É relevante estudar o comportamento de barras em dupla cantoneira, já que neste caso, além dos modos de instabilidade associados à cantoneira isolada, poderão ocorrer modos de instabilidade associados à barra composta em função da presença das chapas separadoras, que tendem a modificar o comportamento do sistema. A cantoneira enrijecida

surge como uma alternativa para ser utilizada em barras compostas por apresentar um comportamento estrutural bem definido, como ilustrado na Figura 1.2.

Apresenta-se no trabalho análises numérica e experimental sobre o comportamento de barras em dupla cantoneira simples e enrijecida com chapas separadoras. A análise numérica foi realizada no programa ANSYS v.13.0. Nas análises numérica e experimental variou-se o número de chapas separadoras buscando estudar a eficiência das mesmas na força resistente à compressão das barras. Além disso, variou-se também a forma de conexão entre chapas separadoras e cantoneiras (parafusadas e soldadas) bem como a rigidez das mesmas.

Para comparação dos resultados obtidos, inicialmente foram adotadas duas hipóteses de cálculo com base no procedimento da ABNT NBR 14762:2010 que é idêntico ao procedimento do ANSI/AISI S100:2007, considerando compressão centrada. Na primeira hipótese considerou-se cada cantoneira como uma barra isolada independente da presença das chapas separadoras, admitindo-se instabilidade local, global por flexo-torção e global por flexão, ou seja, o procedimento recomendado para o dimensionamento de cantoneira isolada. Na segunda hipótese, considerou-se barra composta admitindo-se apenas instabilidade local e global por flexão em relação ao eixo principal de menor inércia do conjunto. Com os resultados obtidos nas análises numérica e experimental são recomendados procedimentos para o dimensionamento desse elemento estrutural.

Revisão bibliográfica

2.1 Previsões normativas

Apresenta-se a seguir o procedimento geral de cálculo da ABNT NBR 14762:2010, que é idêntico ao procedimento apresentado pelo ANSI/AISI S100:2007.

A força normal resistente de uma barra submetida à compressão centrada é calculada de acordo com a Expressão 2.1.

$$N_{c,R} = \chi \cdot A_{ef} \cdot f_y \quad (2.1)$$

Onde:

χ é o fator de redução associado à resistência à compressão, calculado pela Expressão 2.2;

A_{ef} é a área efetiva da seção transversal da barra, calculada com base nas larguras efetivas dos elementos, determinadas pelas Expressões 2.10 e 2.11;

f_y é a resistência ao escoamento do aço.

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2} \quad \text{Para } \lambda_0 \leq 1,5$$

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad \text{Para } \lambda_0 > 1,5 \quad (2.2)$$

Onde:

λ_0 é índice de esbeltez reduzido, calculado pela Expressão 2.3.

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_e}} \quad (2.3)$$

Onde:

A é a área bruta da seção transversal da barra;

N_e é a força normal de flambagem elástica da barra.

2.2 Modos de instabilidade

A utilização de perfis de aço formados a frio pode resultar em problemas de projeto distintos dos conhecidos para os perfis soldados ou laminados. Portanto, é necessária a utilização de critérios de dimensionamento que levem em consideração os diferentes modos de instabilidade a que estão sujeitos estes perfis. Passa-se agora a uma abordagem quanto aos possíveis modos de instabilidade. Vale salientar que o termo “flambagem”, que será aqui utilizado, indica problemas de bifurcação do equilíbrio, ou seja, para sistemas ideais.

2.2.1 Instabilidade local

A instabilidade local de uma barra submetida à compressão caracteriza-se por um típico modo de instabilidade de chapa (Figura 2.1), que corresponde à formação de ondas nos elementos constituintes da seção transversal, sem que haja deslocamento ou mudança nos ângulos formados nas arestas comuns a tais elementos.

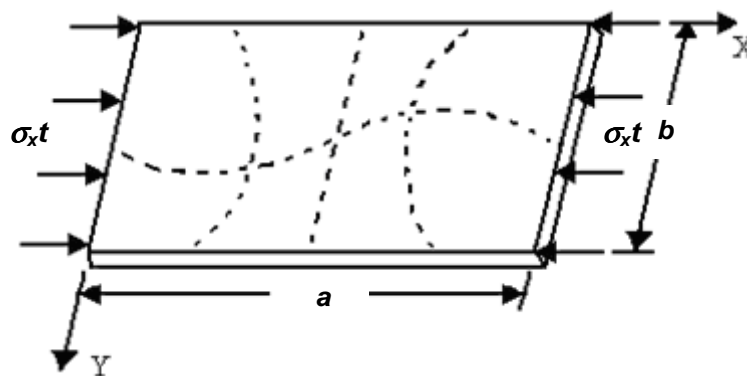


Figura 2.1 – Chapa retangular sujeita à tensão de compressão uniforme

O embasamento teórico referente às formulações desenvolvidas para o modo local está fundamentado na teoria de flambagem elástica de chapas.

A equação diferencial proposta por Bryan (1891) descreve o comportamento de uma chapa submetida à compressão supondo-se a hipótese de pequenos deslocamentos (Expressões 2.4 e 2.5).

$$\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} + \frac{\sigma_x t}{D} \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} = 0 \quad (2.4)$$

Onde:

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2.5)$$

E é o módulo de elasticidade do aço ($E = 200000$ MPa);

t é a espessura da chapa;

ν é o coeficiente de Poisson ($\nu = 0,3$ para aço em regime elástico);

ω é o deslocamento da chapa perpendicular à superfície;

σ_x é a tensão de compressão na direção X.

A força crítica elástica foi extensivamente investigada e resumida por Timoshenko e Gere (1961), apresentada pela Expressão 2.6.

$$N_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t^3}{b} \quad (2.6)$$

Onde:

k é o coeficiente de flambagem local, que para o caso geral depende das condições de vínculo das bordas da chapa, da relação a/b e da solicitação;

b é a largura da chapa;

a é o comprimento da chapa.

Ao contrário dos modos de instabilidade globais, a força crítica de chapa não caracteriza estado limite último. A solução deste fenômeno foi proposta inicialmente por von Karman, em 1910, e é representada por um sistema de equações diferenciais de equilíbrio.

O comportamento pós-flambagem (ou pós-crítico) pode ser visualizado na Figura 2.2, em que a tensão na chapa permanece uniforme até se atingir a tensão crítica de flambagem (σ_{cr}). Em seguida, ocorre uma redistribuição não-uniforme até que a tensão nas bordas da chapa (região mais rígida) atinja a resistência ao escoamento (f_y), caracterizando o fim da capacidade resistente da chapa.

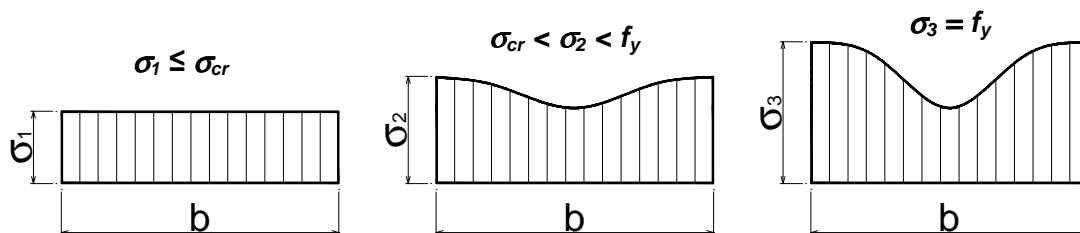


Figura 2.2 – Estágios do comportamento de chapa com bordas apoiadas submetida à compressão uniforme

De forma alternativa, foram estabelecidas expressões simplificadas para o tratamento das chapas em estado pós-crítico. Dentre os métodos simplificados, o que teve maior aceitação foi o método da largura efetiva. Este método, proposto por von Karman, em 1932, considera a redução de rigidez da chapa por meio da substituição da chapa original de largura b por uma chapa de largura efetiva b_{ef} , sendo $b_{ef} < b$ (Figura 2.3). A Expressão 2.7 mostra que a largura efetiva é obtida igualando-se a força resultante da distribuição de tensões não-uniforme à força resultante das distribuições uniformes de largura b_{ef} com intensidade de tensão σ_{max} .

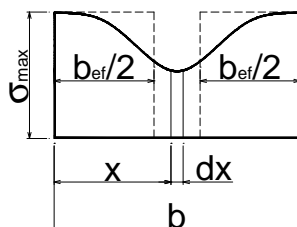


Figura 2.3 – Largura efetiva em chapa com bordas apoiadas submetida à compressão uniforme

$$\int_0^b \sigma(x) t dx = b_{ef} t \sigma_{max} \quad (2.7)$$

A partir da expressão original de von Karman (Expressão 2.8), várias outras foram desenvolvidas com o auxílio de estudos teóricos e experimentais, a fim de se considerar as imperfeições geométricas e de material. Ressalta-se que o trabalho experimental de Winter et al. (1947) conduziu à modificação da relação proposta por von Karman et al. (1932), relativa a largura efetiva de elementos com bordas apoiadas submetidas à compressão, sendo também generalizada para outras condições de vínculo e para $\sigma_{max} < f_y$ (Expressão 2.9).

$$b_{ef} = 1,9t \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (2.8)$$

$$b_{ef} = 0,95t \sqrt{\frac{kE}{\sigma}} \left(1 - 0,2075 \frac{t}{b} \sqrt{\frac{kE}{\sigma}} \right) \quad (2.9)$$

A expressão adotada pela ABNT NBR 14762:2010 e pelo ANSI/AISI S100:2007 é a expressão de Winter apresentada na forma parametrizada (Expressões 2.10 e 2.11).

$$b_{ef} = b \left(1 - 0,22 / \lambda_p \right) / \lambda_p \quad (2.10)$$

$$\lambda_p = \frac{b/t}{0,95(kE/\sigma)^{0,5}} \quad (2.11)$$

Onde:

b é a largura do elemento;

t é a espessura do elemento;

λ_p é o índice de esbeltez reduzido do elemento.

Na Figura 2.4 são ilustradas as curvas propostas por von Karman e Winter, apresentadas aqui na forma parametrizada.

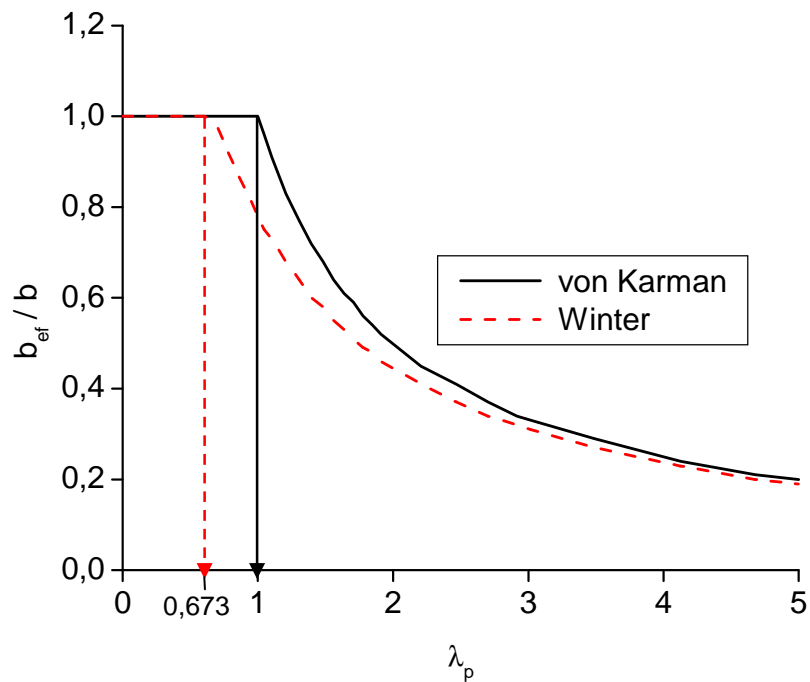


Figura 2.4 – Curvas propostas por von Karman e Winter

De acordo com Kalyanaraman et al. (1977) a formulação apresenta bons resultados também para elementos com borda livre (Figura 2.5).

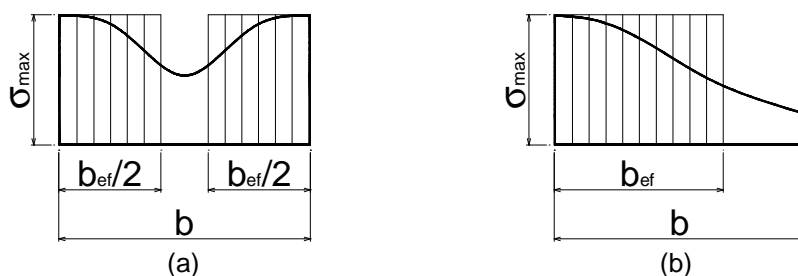


Figura 2.5 – Largura efetiva: (a) elemento com bordas apoiadas (b) elemento com borda livre

2.2.2 Instabilidade global de cantoneira isolada

As cantoneiras de aço formadas a frio de abas iguais constituem seções abertas monossimétricas (Figura 2.6), com isso, dois modos de instabilidade global devem ser considerados: o de flexão e o de flexo-torção.

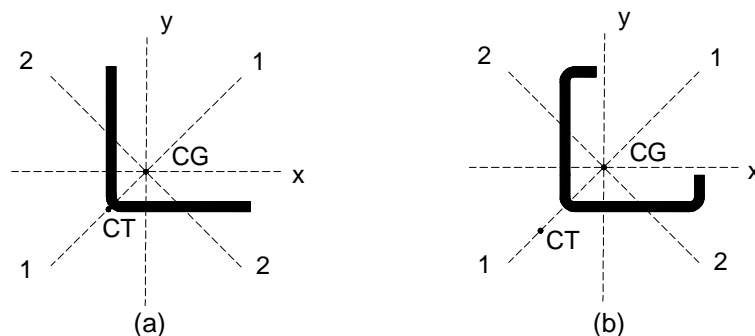


Figura 2.6 – Seção transversal (a) cantoneira simples (b) cantoneira enrijecida

2.2.2.1 Instabilidade por flexão

A instabilidade por flexão é caracterizada pelo movimento de corpo rígido da seção transversal em resposta ao deslocamento transversal do eixo da barra, o qual assume configuração curva (Figura 2.7). Trata-se de flexão em relação ao eixo principal de não-simetria (eixo 2).

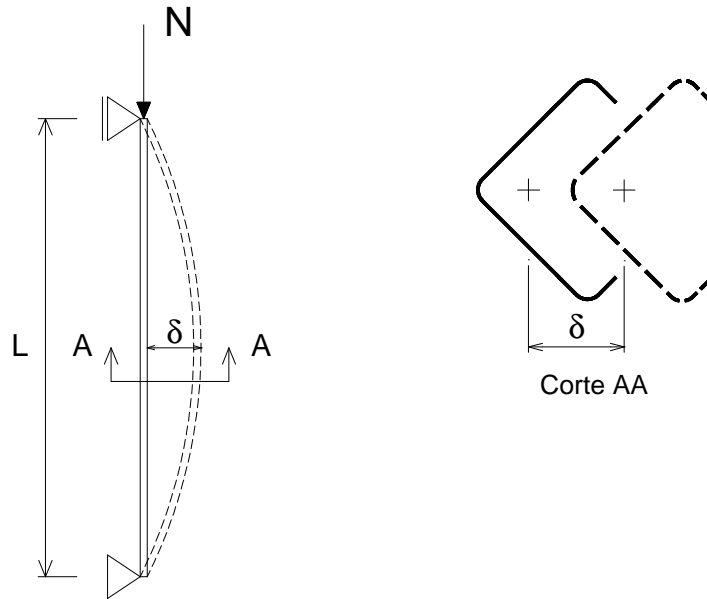


Figura 2.7 – Instabilidade por flexão

Nesse caso, a força normal de flambagem elástica (normal crítica de Euler) é dada pela clássica Expressão 2.12.

$$N_{e2} = \frac{\pi^2 EI_2}{(K_2 L)^2} \quad (2.12)$$

Onde:

E é o módulo de elasticidade;

I_2 é o momento de inércia em relação ao eixo 2;

$K_2 L$ é o comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo 2.

2.2.2.2 Instabilidade por flexo-torção

As barras com seções monossimétricas ou assimétricas, situação em que o CG não coincide com o CT, são mais susceptíveis ao modo de instabilidade por flexo-torção. Nesse caso, ocorre flexão em relação ao eixo de simetria (maior inércia nesse caso) e ao mesmo tempo torção da seção transversal em relação ao CT (Figura 2.8).

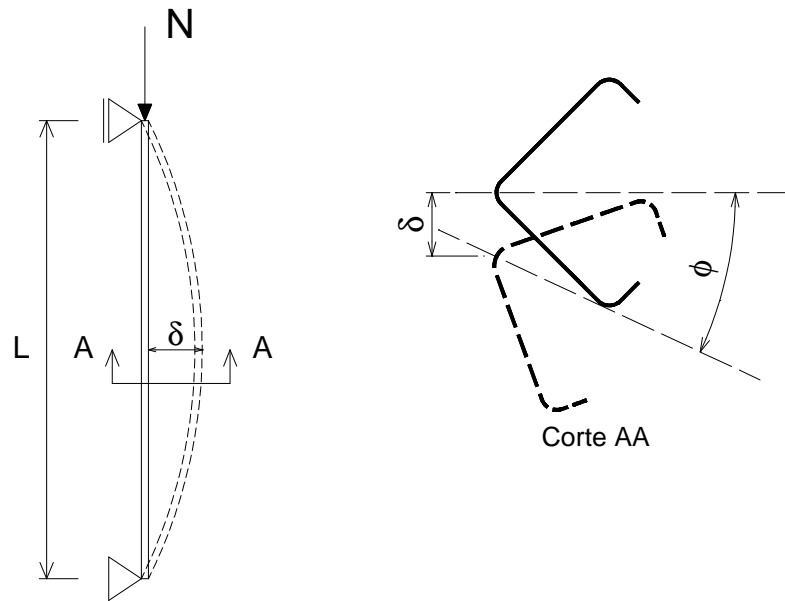


Figura 2.8 – Instabilidade por flexo-torção

De acordo com a Teoria da Estabilidade Elástica (Timoshenko e Gere 1961; Chajes e Winter 1965), a força normal de flambagem por flexo-torção de uma barra com seção monossimétrica carregada pelo centroide é dada pela Expressão 2.13.

$$N_{e1z} = \frac{N_{e1} + N_{ez}}{2[1 - (x_0/r_0)^2]} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{e1}N_{ez}[1 - (x_0/r_0)^2]}{(N_{e1} + N_{ez})^2}} \right] \quad (2.13)$$

$$N_{e1} = \frac{\pi^2 EI_1}{(K_1 L)^2} \quad (2.14)$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 EC_w}{(K_z L)^2} + GJ \right] \quad (2.15)$$

Onde:

N_{e1z} é a força normal de flambagem elástica por flexo-torção;

N_{e1} é a força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo 1;

N_{ez} é a força normal de flambagem elástica por torção;

x_0 é a distância do centro de gravidade ao centro de torção;

r_0 é o raio polar de giração;

I_1 é o momento de inércia em relação ao eixo 1;

$K_1 L$ é o comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo 1;

$K_z L$ é o comprimento efetivo de flambagem por torção;

J é o momento de inércia à torção uniforme;

C_w é a constante de empenamento da seção ($C_w \cong 0$ para as cantoneiras simples);

G é o módulo de elasticidade transversal.

Apresenta-se na Figura 2.9 o exemplo de análise global de estabilidade elástica de uma cantoneira simples (L 50x3,00) submetida à compressão centrada.

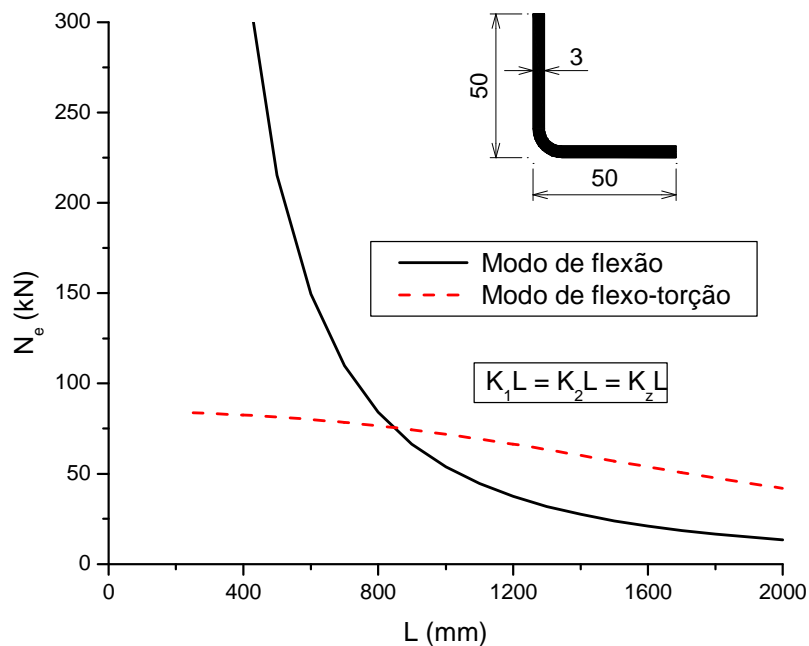


Figura 2.9 – Análise global de estabilidade elástica: perfil L 50x3,00

Observa-se na Figura 2.9 que até o comprimento de 845 mm ($\lambda_{\text{máx}} = 88$) o modo de flexo-torção comanda o dimensionamento, a partir desse ponto quem passa a comandar é o modo de flexão. Como $C_w \cong 0$ para cantoneira simples, N_{e_z} independe do comprimento da barra, com isso, para comprimentos mais curtos $N_{e_{1z}} \cong N_{e_z}$, tendendo assim para um valor constante. Rasmussen (2003) mostra matematicamente a coincidência entre as forças do modo local e do modo global de flexo-torção. Essa coincidência será aqui apresentada com algumas adaptações.

Como para comprimentos mais curtos $N_{e_{1z}} \cong N_{e_z}$, por simplicidade pode-se partir da Expressão 2.15.

Onde:

$$C_w \cong 0 \quad (2.16)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.17)$$

$$J = \frac{2}{3}bt^3 \quad (2.18)$$

$$A \cong 2bt \quad (2.19)$$

$$r_0^2 = \frac{b^2}{3} \quad (2.20)$$

Substituindo as Expressões 2.16 a 2.20 na Expressão 2.15, obtém a Expressão 2.21.

$$N_{ez} = \frac{Et^3}{b(1+\nu)} \quad (2.21)$$

Tomando $\nu = 0,3$; $k = 0,43$ e $A=2bt$ e substituindo nas Expressões 2.6 e 2.21 obtém-se as Expressões 2.22 e 2.23, respectivamente.

$$N_{cr} = 0,777 \frac{Et^3}{b} \quad (2.22)$$

$$N_{ez} = 0,769 \frac{Et^3}{b} \quad (2.23)$$

Observa-se que as Equações 2.22 e 2.23 são praticamente iguais, confirmando a coincidência entre as forças que levam à instabilidade local e por flexo-torção.

2.2.3 Cantoneiras simples conectadas por uma aba

A ABNT NBR 8800: 2008 apresenta equações para cálculo da força axial de flambagem elástica para cantoneiras simples conectadas pela aba (Figura 2.10), que será aqui apresentada. Os efeitos da excentricidade da força de compressão podem ser considerados por meio de um comprimento de flambagem equivalente (artifício de cálculo), desde que a cantoneira seja carregada nas extremidades pela mesma aba; seja conectada por solda ou por pelo menos dois parafusos na direção da solicitação e não esteja solicitada por ações transversais intermediárias. Nesse caso, a força axial de flambagem elástica é dada pela Expressão 2.24.

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} \quad (2.24)$$

Onde:

I_x é o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo que passa pelo centro geométrico e é paralelo à aba conectada;

$K_x L_x$ é o comprimento de flambagem equivalente, dado pelas equações 2.25 e 2.26.

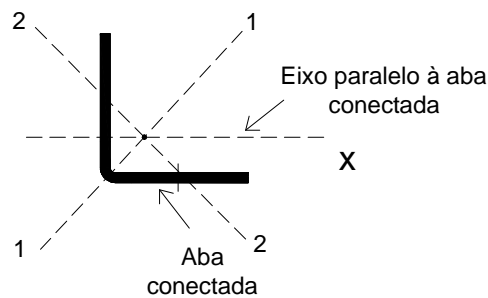


Figura 2.10 – Cantoneira simples conectada pela aba

Para cantoneiras de abas iguais ou de abas desiguais conectadas pela aba de maior largura, que são barras individuais ou diagonais ou montantes de treliças planas com as barras adjacentes conectadas do mesmo lado das chapas de nó ou das cordas, o valor de $K_x L_x$ é dado pela Expressão 2.25.

$$K_x L_x = 72r_x + 0,75L_x \quad \text{para} \quad 0 \leq \frac{L_x}{r_x} \leq 80$$

$$K_x L_x = 32r_x + 1,25L_x \quad \text{para} \quad \frac{L_x}{r_x} > 80 \quad (2.25)$$

Onde:

L_x é o comprimento da cantoneira, tomado entre os pontos de trabalho situados nos eixos longitudinais das cordas da treliça;

r_x é o raio de giração da seção transversal em relação ao eixo que passa pelo centro geométrico e é paralelo à aba conectada.

Para cantoneiras de abas iguais ou de abas desiguais conectadas pela aba de maior largura, que são diagonais ou montantes de treliças espaciais com as barras adjacentes

conectadas do mesmo lado das chapas de nó ou das cordas, o valor de $K_x L_x$ é dado pela Expressão 2.26.

$$\begin{aligned}
 K_x L_x &= 60r_x + 0,80L_x && \text{para } 0 \leq \frac{L_x}{r_x} \leq 75 \\
 K_x L_x &= 45r_x + L_x && \text{para } \frac{L_x}{r_x} > 75
 \end{aligned}
 \tag{2.26}$$

2.2.4 Instabilidade global de barra composta

Uma barra composta, formada por dois ou mais perfis conectados de forma intermitente, tem força resistente sempre menor que a de uma barra composta formada por perfis conectados continuamente. A força resistente depende dos detalhes de sua formação tais como: chapas separadoras inclinadas, chapas separadoras horizontais e chapas separadoras horizontais e inclinadas. Esta redução na força resistente é devido ao fato que, no caso das barras compostas formadas por perfis conectados de forma intermitente, a força cortante produz efeito muito maior nos deslocamentos que no caso das barras compostas formadas por perfis conectados continuamente.

Nos próximos itens serão apresentadas as principais equações utilizadas para considerar o efeito da força cortante na força normal resistente das barras compostas. No entanto, entende-se que essas equações são aplicadas a situações em que as barras compostas sejam propícias à flexão em relação ao eixo y (Figuras 2.11a a 2.11d), neste caso, o modo de flambagem mobiliza as conexões. No caso em estudo (Figuras 2.11e e 2.11f) a tendência é que não ocorra flexão em relação ao eixo y, já que a inércia em relação a este eixo é muito maior que a inércia em relação ao eixo x, que é crítico nesse caso.

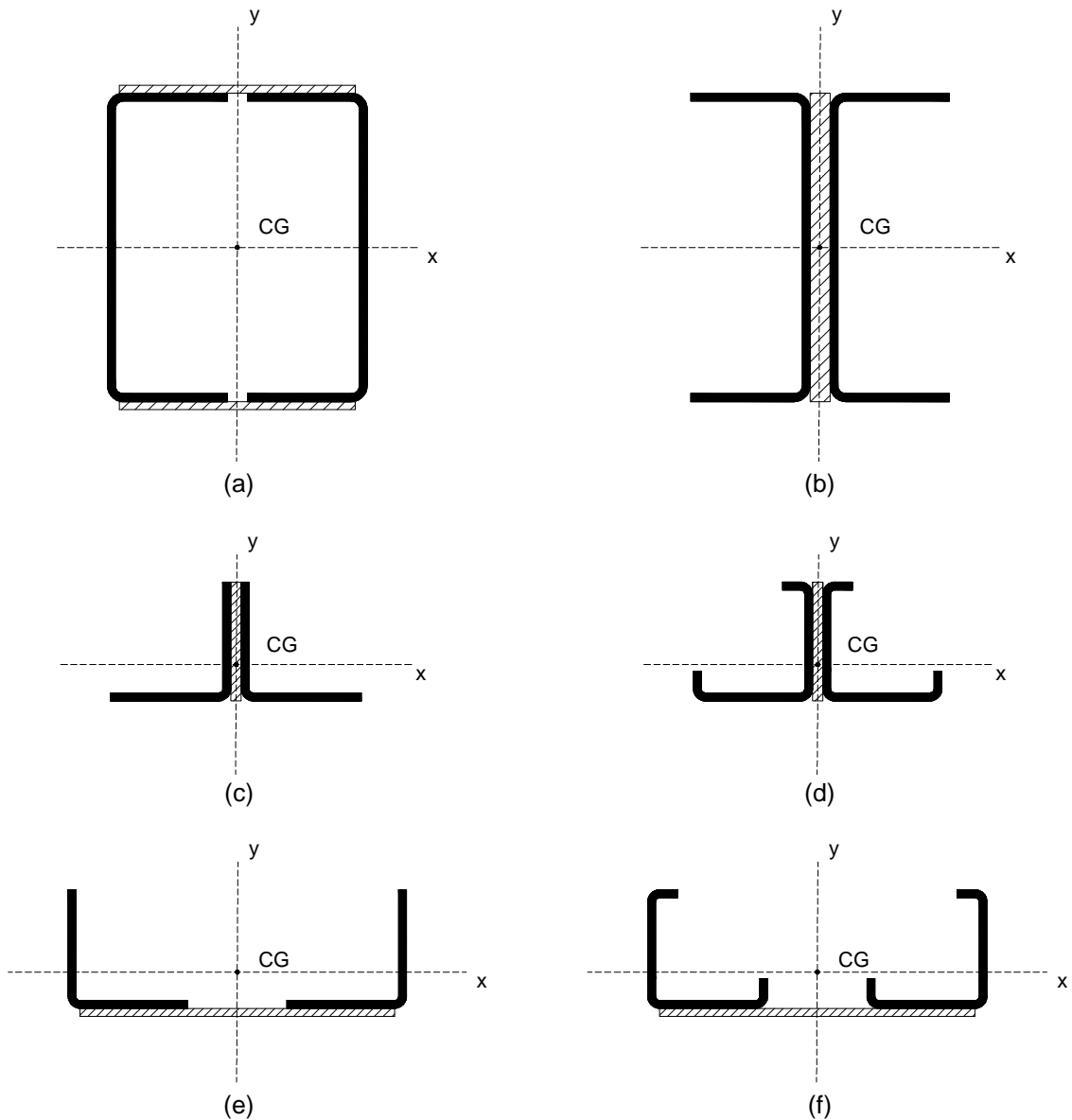


Figura 2.11 – Configurações de barras compostas

2.2.4.1 Teoria da Estabilidade Elástica (Timoshenko e Gere 1961)

Para determinar o efeito da força cortante sobre a força resistente, pode-se adaptar para as barras compostas a expressão deduzida para o caso geral (Expressão 2.27).

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \left(\frac{I}{1 + \frac{EI}{GA} \frac{c\pi^2}{L^2}} \right) \quad (2.27)$$

Onde:

E é o módulo de elasticidade;

I é o momento de inércia da seção;

L é o comprimento da barra;

c é um coeficiente que depende da forma da seção transversal;

G é o módulo de elasticidade transversal;

A é a área da seção transversal.

O termo entre parênteses na Expressão 2.27 corresponde a um fator de redução da força crítica de Euler.

Sendo:

$$N_e = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (2.28)$$

$$N_d = \frac{GA}{c} \quad (2.29)$$

Substituindo as Expressões 2.28 e 2.29 na Expressão 2.27 temos a Expressão 2.30.

$$N_{cr} = N_e \frac{1}{1 + \frac{N_e}{N_d}} \quad (2.30)$$

Para barras compostas formadas por perfis conectados continuamente N_d é muito grande na presença de N_e , com isso, o efeito da força cortante pode ser desprezado. No caso de barras compostas formadas por perfis conectados de forma intermitente, especialmente quando se utiliza apenas chapas separadoras horizontais (Figura 2.12), N_d pode se tornar da mesma ordem de grandeza de N_e , não podendo mais ser desprezado o efeito da força cortante neste caso.

Sendo N_e a força crítica de Euler, N_d tem na Expressão 2.30 um significado físico simples, isto é, V/N_d representa o deslocamento angular adicional (γ) da linha elástica devido à força cortante (V). N_d tem o mesmo significado, também, no caso das barras compostas formadas por perfis conectados de forma intermitente, desde que o número de painéis seja grande. Com isso, para se determinar o valor de N_d em qualquer caso particular, deve-se investigar o deslocamento lateral produzido pela força cortante.

No caso de barras compostas conectadas apenas por chapas separadoras horizontais (Figura 2.12a), para obter o deslocamento horizontal produzido pela força cortante (V) deve-se considerar a deformação de um elemento da barra composta, cortado pelas seções mn e m_1n_1 . Admitindo que as linhas elásticas das seções tenham ponto de inflexão nestas seções, a condição de flexão será a apresentada pela Figura 2.12b.

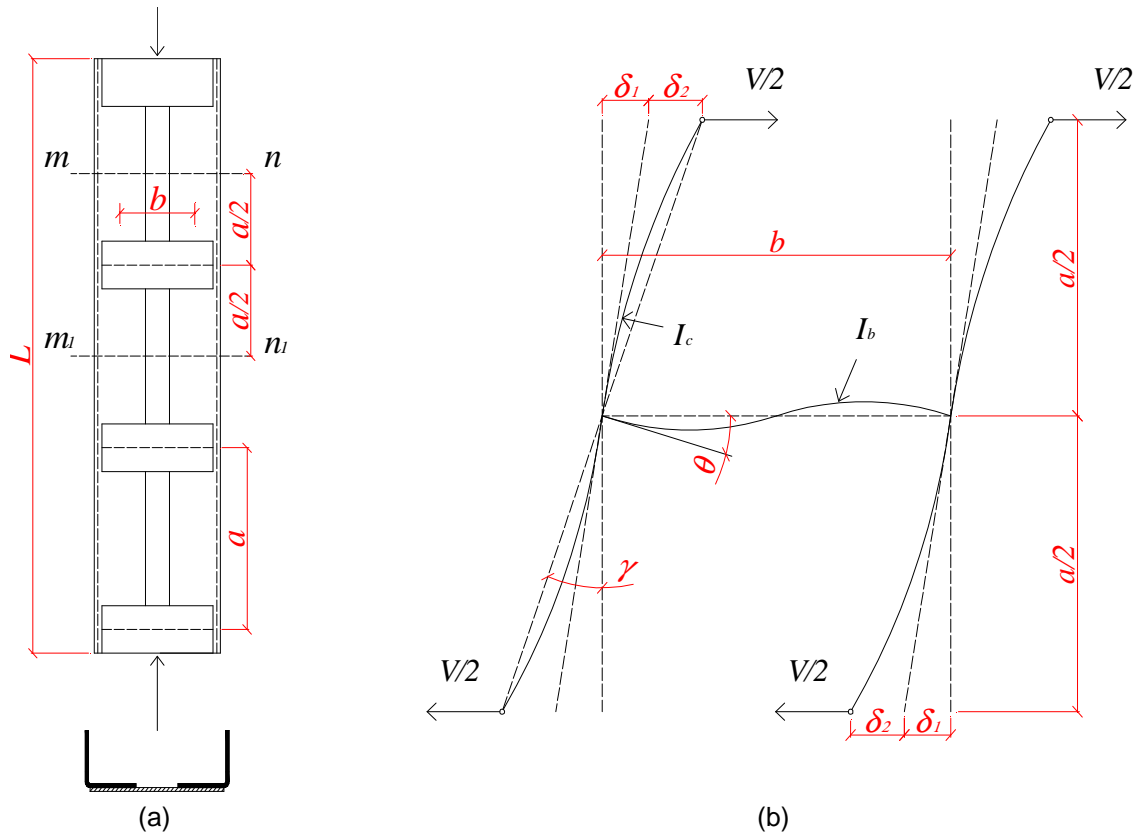


Figura 2.12 – (a) Barra composta com chapas separadoras horizontais (b) deslocamentos produzidos pela força cortante

O deslocamento horizontal consiste em duas partes: o deslocamento δ_1 , devido à flexão da chapa horizontal e o deslocamento δ_2 , devido à flexão das seções. Há conjugados $Va/2$ nas extremidades da chapa horizontal e o ângulo θ de rotação das extremidades da chapa horizontal é dado pela Expressão 2.31.

$$\theta = \frac{Vab}{12EI_b} \quad (2.31)$$

Onde:

V é a força cortante;

a é a distância entre chapas separadoras;

b é a distância entre os centroides das barras individuais;

I_b é o momento de inércia da chapa separadora.

O deslocamento lateral δ_1 produzido pela flexão da chapa separadora horizontal é dado pela Expressão 2.32.

$$\delta_1 = \theta \frac{a}{2} = \frac{Va^2b}{24EI_b} \quad (2.32)$$

O deslocamento lateral δ_2 pode ser calculado por meio da expressão de viga em balanço (Expressão 2.33).

$$\delta_2 = \frac{V \left(\frac{a}{2}\right)^3}{2 \cdot 3EI_c} = \frac{Va^3}{48EI_c} \quad (2.33)$$

Onde:

I_c é o momento de inércia de cada barra.

O deslocamento angular total γ , produzido pela força cortante V , é dado pela Expressão 2.34.

$$\gamma = \frac{\delta_1 + \delta_2}{\frac{a}{2}} = \frac{Vab}{12EI_b} + \frac{Va^2}{24EI_c} \quad (2.34)$$

Sabendo que $V/N_d = \gamma$, obtém-se a Expressão 2.35. Com isso, pode-se reescrever a Expressão 2.30 e obter a expressão para cálculo da força crítica elástica de barra composta com chapas separadoras horizontais (Expressão 2.36).

$$\frac{1}{N_d} = \frac{ab}{12EI_b} + \frac{a^2}{24EI_c} \quad (2.35)$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 EI}{L^2} \left(\frac{ab}{12EI_b} + \frac{a^2}{24EI_c} \right)} \quad (2.36)$$

Observa-se na Expressão 2.36 que para calcular a força crítica elástica de uma barra composta, o comprimento real da barra é substituído por um comprimento efetivo o qual pode ser determinado pela Expressão 2.37.

$$L_1 = L \sqrt{1 + \frac{\pi^2 EI}{L^2} \left(\frac{ab}{12EI_b} + \frac{a^2}{24EI_c} \right)} \quad (2.37)$$

As expressões apresentadas pelas normas são baseadas no conceito de esbeltez efetiva, onde se considera também as condições de vinculação das barras. A esbeltez inicial da barra composta é substituída por uma esbeltez modificada que leva em consideração a forma de conexão entre as barras. No item a seguir são apresentadas as principais expressões adotadas.

2.2.4.2 Índice de esbeltez modificado

Apesar da grande disponibilidade de resultados experimentais em barras submetidas à compressão, existem poucos estudos focados em barras compostas. Como resultado, a especificação AISC/ASD:1989 não previa procedimento específico para o dimensionamento dessas barras, com exceção da relação de esbeltez limite em que a esbeltez das barras isoladas não deveria ultrapassar 3/4 da máxima esbeltez da barra composta. A especificação AISC/LRFD:1986 foi a primeira publicação do AISC a introduzir expressões para cálculo da esbeltez modificada de barras compostas, no entanto, não considerava o afastamento entre as barras. Aslani e Goel (1991, 1992) apresentaram uma expressão teórica para cálculo da esbeltez modificada considerando o afastamento entre as barras. Essa expressão foi baseada no trabalho de Bleich (1952) e tem sido adotada pela especificação do AISC e do AISI. As principais expressões para cálculo do índice de esbeltez modificado são apresentadas a seguir.

Índice de esbeltez modificado segundo Bleich (1952)

A equação para cálculo da esbeltez modificada proposta por Bleich (1952) está apresentada a seguir (Expressão 2.38):

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_m = \sqrt{\left(\frac{L}{r}\right)_0^2 + \left(\frac{\pi^2}{12}\right)\left(\frac{a}{r_i}\right)^2} \quad (2.38)$$

Onde:

$\left(\frac{KL}{r}\right)_m$ é o índice de esbeltez modificado da barra composta;

$\left(\frac{L}{r}\right)_0$ é o índice de esbeltez da barra composta, considerando $K = 1$;

a é a distância entre conexões;

r_i é o raio de giração mínimo da barra individual.

Índice de esbeltez modificado segundo o AISC/LRFD:1986

O AISC/LRFD:1986 apresenta equações para cálculo da esbeltez modificada para diferentes formas de conexão entre as barras:

a) presilhas parafusadas – parafusos na condição de pré-torque (Expressão 2.39):

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_m = \sqrt{\left(\frac{KL}{r}\right)_0^2 + \left(\frac{a}{r_i}\right)^2} \quad (2.39)$$

Onde:

$\left(\frac{KL}{r}\right)_0$ é o índice de esbeltez da barra composta.

b) presilhas soldadas ou parafusadas com parafusos com protensão inicial (Expressão 2.40):

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_m = \left(\frac{KL}{r}\right)_0 \quad \text{para} \quad \left(\frac{a}{r_i}\right) \leq 50 \quad (2.40)$$

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_m = \sqrt{\left(\frac{KL}{r}\right)_0^2 + \left(\frac{a}{r_i} - 50\right)^2} \quad \text{para} \quad \left(\frac{a}{r_i}\right) > 50$$

Índice de esbeltez modificado segundo o AISC/LRFD:1993, 1999, 2005

Para barras conectadas por presilhas parafusadas com parafusos na condição de pré-torque a equação é a mesma apresentada pelo AISC/LRFD: 1986, apresentada pela Expressão 2.39. Para seções conectadas por presilhas soldadas ou parafusadas com parafusos com protensão inicial utiliza-se a Expressão 2.41.

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_m = \sqrt{\left(\frac{KL}{r}\right)_0^2 + 0,82 \frac{\alpha^2}{(1 + \alpha^2)} \left(\frac{a}{r_{ib}}\right)^2} \quad (2.41)$$

Onde:

α é a relação de afastamento entre as barras, calculado pela Expressão 2.42;

$$\alpha = \frac{b}{2r_{ib}} \quad (2.42)$$

Onde:

b é distância entre os centróides das barras isoladas que compõem a barra composta perpendicular ao eixo de flambagem;

r_{ib} é o raio de giração da barra isolada em relação ao seu eixo paralelo ao eixo de flambagem da barra composta.

Índice de esbeltez modificado segundo o ANSI/AISC 360:2010

O ANSI/AISC 360:2010 apresenta equações para cálculo da esbeltez modificada para barras compostas conectadas por presilhas soldadas ou parafusadas e seções abertas conectadas em pelo menos um dos lados por chapas de ligação. As equações apresentadas também consideram a forma de conexão entre as barras:

a) para barras conectadas por parafusos na condição de pré-torque a esbeltez modificada é calculada pela Expressão 2.39;

b) para barras conectadas por solda ou por parafusos com protensão inicial a esbeltez modificada é calculada pela Expressão 2.43.

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_m = \left(\frac{KL}{r}\right)_0 \quad \text{para} \quad \left(\frac{a}{r_i}\right) \leq 40$$

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_m = \sqrt{\left(\frac{KL}{r}\right)_0^2 + \left(\frac{K_i a}{r_i}\right)^2} \quad \text{para} \quad \left(\frac{a}{r_i}\right) > 40 \quad (2.43)$$

Onde:

$K_i = 0,50$ para dupla cantoneira (back-to-back);

$K_i = 0,75$ para duplo U (back-to-back);

$K_i = 0,86$ para outros casos.

Além disso, a força resistente e o espaçamento entre conexões deverão satisfazer às seguintes recomendações:

- (i) a distância entre conexões deverá ser limitada de tal forma que a relação a/r_i não exceda 3/4 do índice de esbeltez máximo da barra composta;
- (ii) nas extremidades todos os componentes devem ser conectados por solda com um comprimento não inferior à largura máxima da seção ou por parafusos espaçados longitudinalmente a uma distância não superior a quatro diâmetros, distribuídos por um comprimento igual a 1,5 vezes a largura máxima da seção;
- (iii) as conexões deverão ser capazes de resistir a uma força, em qualquer direção, de 2% da força resistente de compressão da barra composta.

Índice de esbeltez modificado segundo o ANSI/AISI S100:2007

O ANSI/AISI S100:2007 apresenta no item D 1.2 equações para cálculo da esbeltez modificada de barras compostas constituídas por duas seções em contato. A equação utilizada é a mesma do ANSI/AISC 360:2010 apresentada pela Expressão 2.39. Além disso, a força resistente e o espaçamento entre conexões deverão satisfazer às seguintes recomendações:

- (i) a distância entre conexões deverá ser limitada de tal forma que a relação a/r_i não exceda metade do índice de esbeltez máximo da barra composta;
- (ii) nas extremidades todos os componentes devem ser conectados por solda com um comprimento não inferior à largura máxima da seção ou por parafusos espaçados longitudinalmente a uma distância não superior a quatro diâmetros, distribuídos por um comprimento igual a 1,5 vezes a largura máxima da seção;
- (iii) as conexões deverão ser capazes de resistir a uma força, em qualquer direção, de 2,5% da força resistente de compressão da barra composta.

2.3 Tensões residuais

As tensões residuais estão presentes nos perfis mesmo antes destes serem colocados em uso. As principais causas do aparecimento destas tensões são: o resfriamento desigual das chapas de aço após a laminação a quente e os processos de fabricação, por exemplo, conformação a frio e soldagem. Sabe-se também que os valores e a distribuição das tensões residuais dependem basicamente da geometria da seção transversal, tipo de aço e dos processos de fabricação dos perfis.

Nos perfis laminados, as tensões residuais são de natureza térmica, pois terminado o processo de laminação as partes mais expostas dos perfis se resfriam mais rapidamente, e para conter o resfriamento do restante do perfil essas partes automaticamente resultam comprimidas e as demais conseqüentemente tracionadas. Nos perfis soldados as soldas causam um gradiente térmico adicional às tensões de fabricação das chapas, enquanto nos perfis formados a frio as tensões residuais são predominantemente de natureza mecânica. Com isso, observa-se que os diferentes modos de inserção de tensões residuais nos perfis laminados, soldados e formados a frio geram comportamento estrutural diferente. Vale ressaltar que os perfis laminados e soldados geralmente utilizam chapas com maior espessura em relação aos perfis formados a frio, com isso, apresentam uma variação

significativa no valor das tensões residuais ao longo da espessura, o que não ocorre nos perfis formados a frio.

As tensões residuais causam a redução da tensão de proporcionalidade (tensão máxima referente ao trecho linear do diagrama “tensão x deformação”), com isso, para tensões acima da tensão de proporcionalidade o regime elástico passa para o elasto-plástico. De acordo com Huber (1954), a presença de tensões residuais é a principal causa da não-linearidade do diagrama “tensão x deformação”.

Weng e Peköz (1990) concluíram a partir de resultados experimentais em perfis de aço formados a frio tipo U que a distribuição das tensões residuais apresenta algumas particularidades:

- (i) existem tensões residuais de tração na superfície externa e de compressão na superfície interna dos perfis;
- (ii) as tensões residuais nas regiões dos cantos da seção transversal devido ao trabalho a frio podem ser desconsideradas no cálculo, pois são compensadas pelo conseqüente aumento da resistência ao escoamento;
- (iii) os valores das tensões residuais estão entre 25% e 75% da resistência ao escoamento do aço virgem;
- (iv) a forma geral de distribuição das tensões residuais segue um mesmo padrão para todas as seções transversais.

Schafer e Peköz (1998) e Schafer (1997) enfatizam que as tensões residuais nos perfis formados a frio são constituídas por duas parcelas: uma de membrana e outra de flexão (Figura 2.13). Um dos motivos pelo qual se chegou a esta conclusão é o fato de que ao medir as tensões residuais em laboratório, extensômetros colocados na mesma posição (um interno e outro externo) geralmente fornecem leituras de compressão em uma face e tração na face oposta, porém com magnitudes diferentes. Por simplicidade da análise pode-se pensar em uma sobreposição entre uma tensão de compressão constante ao longo da espessura (tensão de membrana) e um gradiente simétrico de tensão ao longo da espessura com tração em uma face e compressão na face oposta (tensão de flexão).

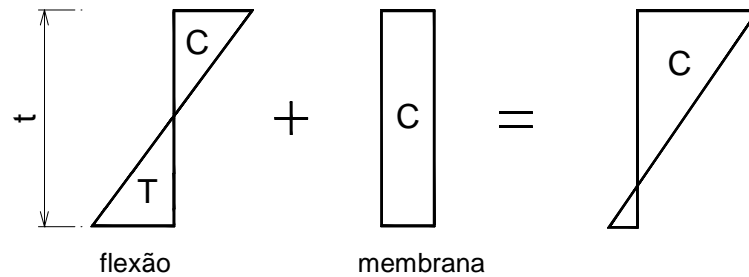


Figura 2.13 – Tensões residuais em perfis de aço formados a frio: de flexão e de membrana (Fonte: adaptado de Schafer e Peköz (1998))

Um fato importante observado é que, em geral, os perfis fabricados em mesa de roletes apresentam valores de tensões residuais mais uniformes ao longo da seção, porém com valores mais elevados nas partes planas se comparados com aqueles fabricados em prensas dobradeiras.

De acordo com Schafer (1997) a tensão residual de membrana é mais pronunciada nos perfis laminados e soldados, apresentando valores muito baixos nos formados a frio. Além disso, ocorre especialmente nas regiões das dobras dos perfis, o que torna justificável sua adoção nos modelos numéricos somente se for considerado também o efeito do trabalho a frio nestas regiões. Por outro lado, a tensão residual de flexão normalmente apresenta valores mais elevados em relação à de membrana para os perfis formados a frio. Segundo Schafer (1997) a adoção deste tipo de tensão residual nos modelos numéricos pode ser feita, por exemplo, utilizando valores médios como os apresentados nas Figuras 2.17 e 2.18.

Young (2005) apresenta resultados de medições de tensões residuais em cantoneiras simples e enrijecida. Na Figura 2.14 são apresentadas as posições em que foram realizadas as medições. É importante dizer que essas medições foram feitas junto à face interna dos perfis.

Nas Figuras 2.15 e 2.16 são apresentados os valores de tensões residuais obtidos por Young (2005) para cantoneiras simples e enrijecidas, respectivamente.

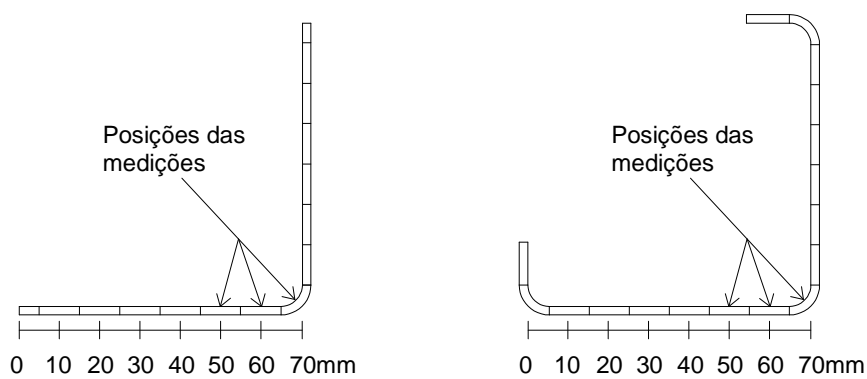


Figura 2.14 – Posições das medições de tensões residuais
(Fonte: adaptado de Young (2005))

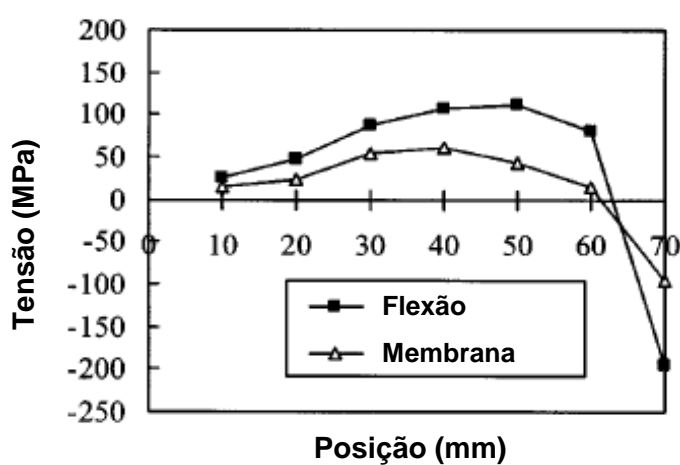


Figura 2.15 – Distribuição de tensões residuais ao longo da seção de cantoneira simples
(Fonte: Young (2005))

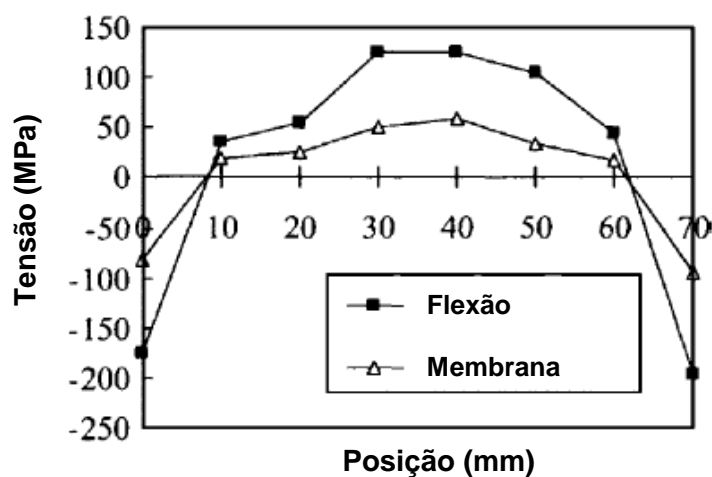


Figura 2.16 – Distribuição de tensões residuais ao longo da seção de cantoneira enrijecida
(Fonte: Young (2005))

Reescrevendo as tensões residuais em função da tensão de escoamento do aço e calculando os valores médios, tem-se as distribuições apresentadas nas Figuras 2.17 e

2.18. É importante lembrar que os valores aqui apresentados referem-se às medições realizadas na parte interna dos perfis, porém, para melhor visualização estão representados na face externa. O sinal positivo refere-se à tração e o negativo à compressão.

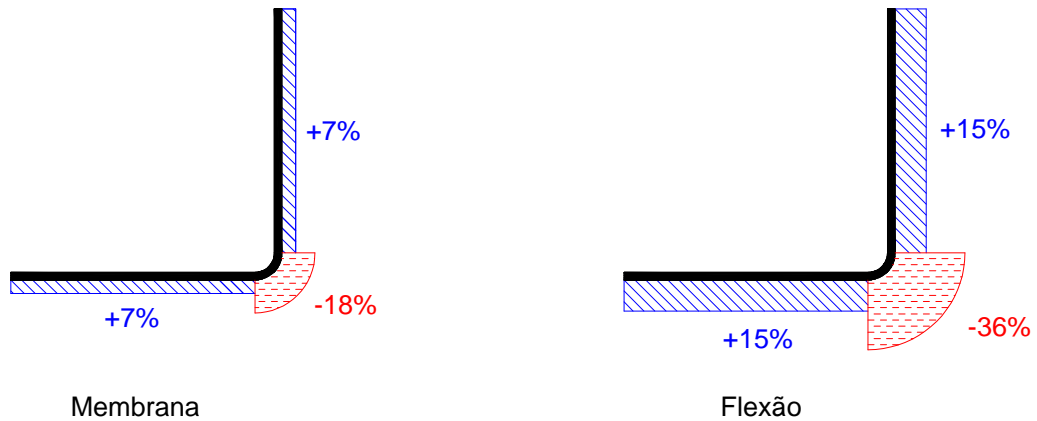


Figura 2.17 – Tensões residuais médias em cantoneira simples: porcentagem de f_y (Fonte: adaptado de Young (2005))

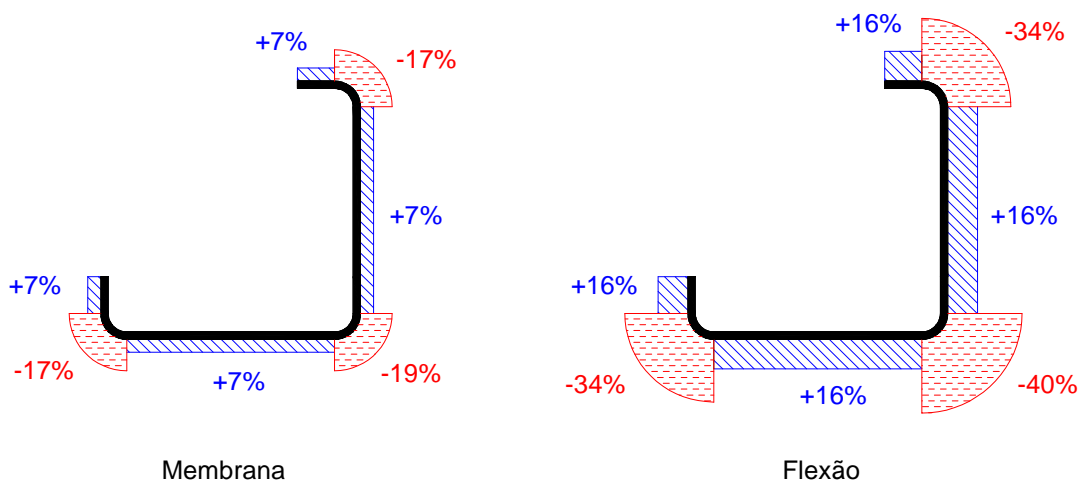


Figura 2.18 – Tensões residuais médias em cantoneira enrijecida: porcentagem de f_y (Fonte: adaptado de Young (2005))

Como alternativa para a inserção das tensões residuais de flexão, Schafer (1997) apresenta um diagrama “tensão x deformação” modificado a partir do modelo bilinear, para ser utilizado quando as tensões residuais não forem modeladas explicitamente (Figura 2.19).

O escoamento prematuro dos elementos no modelo numérico não será observado se for utilizado o diagrama aproximado, uma vez que ele sugere valores “tensão x deformação”

para a seção como um todo, enquanto as tensões residuais de flexão variam ao longo da espessura, conforme mostrado na Figura 2.13.

O fato é que não existe consenso quanto ao aspecto das tensões residuais, principalmente em decorrência da escassez de trabalhos sobre o assunto. Com isso, muitas vezes as tensões residuais são negligenciadas nos modelos, ou se utiliza diagramas “tensão x deformação” modificados tentando considerá-las de modo aproximado.

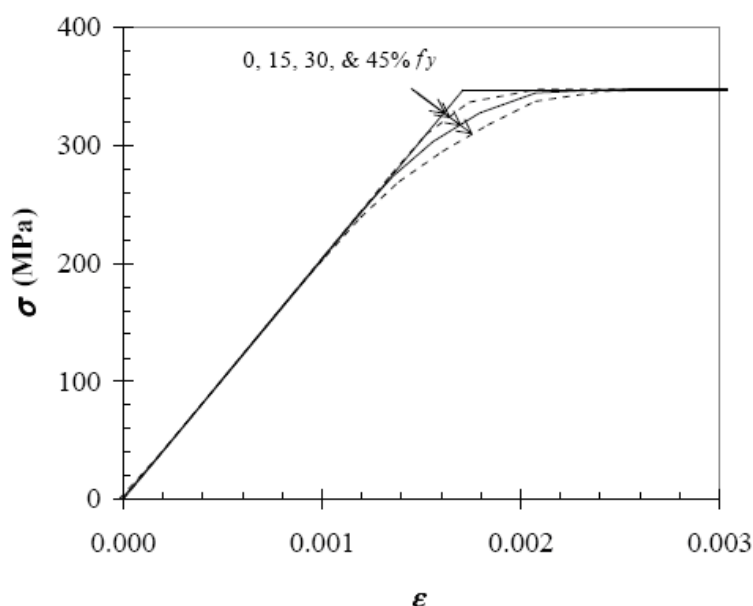


Figura 2.19 – Influência da tensão residual de flexão no diagrama “tensão x deformação”
(Fonte: Schafer (1997))

Chodraui (2006) realizou uma série de simulações inserindo tensões residuais nos modelos numéricos de cantoneira simples e dupla cantoneira simples, as quais serão aqui brevemente comentadas.

As tensões residuais de membrana foram ignoradas, pelo fato dos perfis terem sido fabricados por prensa dobradeira, apresentando valores muito baixos. As tensões residuais de flexão foram inseridas considerando valores médios ao longo da seção, como os apresentados nas Figuras 2.17 e 2.18. Porém, ignorou o aumento na região dos cantos por não ter sido considerado o aumento da resistência ao escoamento nestas regiões.

As simulações foram realizadas aplicando o gradiente simétrico de tensões em todos os elementos das barras, sendo tração na face externa e compressão na face interna com relação à superfície dos perfis. Concluiu-se que as forças máximas nas barras praticamente

não se alteraram ao se comparar modelos numéricos com e sem tensões residuais. Com isso, optou por não inserir nenhum tipo de tensão residual nos modelos numéricos aqui desenvolvidos.

2.4 Imperfeições geométricas iniciais

As imperfeições geométricas iniciais, assim como as tensões residuais, são geralmente oriundas do processo de fabricação dos perfis. Na prática, barras submetidas à compressão centrada resultam na verdade flexo-comprimidas. Em função dessas imperfeições podem ocorrer deslocamentos laterais nos elementos que constituem o perfil desde o início do carregamento, resultando assim em esforços adicionais que podem comprometer a resistência máxima de uma barra submetida à compressão.

Em 1807 Young propôs uma função senoidal para representar a imperfeição inicial global do eixo da barra, obviamente de modo aproximado, mas aceitável em muitos casos em virtude da variação das imperfeições verificada na prática. Vale lembrar que esta função aproximada é para representar a imperfeição global do eixo da barra, e não aborda as imperfeições localizadas dos elementos (chapas) que compõem a barra. A imperfeição máxima é admitida como localizada na metade do comprimento da barra que assume forma de uma senóide (Figura 2.20).

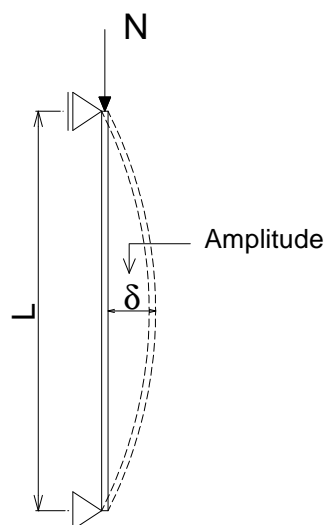


Figura 2.20 – Imperfeição global proposta por Young

Em Chodraui (2006) são apresentados resultados de medições de imperfeições realizadas em cantoneiras simples. As medidas foram efetuadas em quatro pontos da seção transversal, conforme mostrado na Figura 2.21. Porém, os deslocamentos máximos observados resultam da superposição de deslocamentos oriundos da configuração deformada do eixo da barra (global), da ondulação dos elementos (chapas) e torção da seção transversal, e não há uma maneira confiável para se desmembrar tais imperfeições relativas a cada modo. Segundo Chodraui (2006) uma maneira é fazer a leitura desse deslocamento máximo somente nos pontos referentes aos cantos da seção transversal, que por serem partes mais rígidas sofrem menos influência de deslocamentos associados aos modos localizados. Além disso, sabe-se que a função senoidal de Young é classicamente conhecida para se avaliar a imperfeição relativa ao modo global. Com essas informações foi criada uma estratégia para avaliar as imperfeições geométricas globais, que consistiu em minimizar o erro ao longo do comprimento das barras entre os valores medidos de imperfeição e a curva senoidal clássica de Young. Os valores obtidos variaram de $L/672$ a $L/11950$.

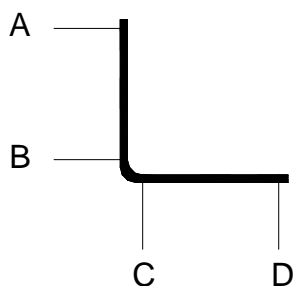


Figura 2.21 – Pontos das medições das imperfeições geométricas em cantoneira simples (Fonte: Chodraui (2006))

Em Young (2004) são apresentados resultados de imperfeições geométricas para três seções de cantoneira simples. As medições foram realizadas nas duas abas ao longo de todo comprimento, como mostrado na Figura 2.22. Os valores máximos observados foram $L/2950$, $L/2150$ e $L/1970$ para cada uma das seções.

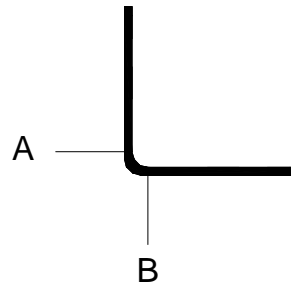


Figura 2.22 – Pontos das medições das imperfeições geométricas em cantoneira simples (Fonte: Young (2004))

Em Young (2005) são apresentados resultados de imperfeições geométricas para três seções de cantoneira enrijecida. As medições foram realizadas nas duas abas ao longo de todo comprimento, como mostrado na Figura 2.23. Os valores máximos observados foram $L/1970$, $L/1970$ e $L/1570$ para cada uma das seções.

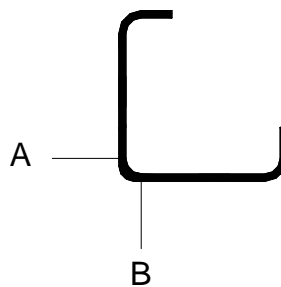


Figura 2.23 – Pontos das medições das imperfeições geométricas em cantoneira enrijecida (Fonte: Young (2005))

Para as imperfeições localizadas, Schafer & Peköz (1998) apresentam uma análise de dados coletados em vários trabalhos, referentes às imperfeições em elementos com bordas apoiadas e elementos com borda livre. Apresentam ainda uma análise probabilística elegendo quantis de probabilidade de excedência das imperfeições a serem adotadas em modelos numéricos $P(d > \Delta)$. Os valores das imperfeições aqui apresentados são os mesmos propostos por eles, porém optou-se por apresentar o conceito inverso $P(\Delta > d)$, que é mais lógica e é apresentada na Tabela 2.1. O valor típico é escrito como $P(\Delta > d)$ e indica a probabilidade de que um valor de imperfeição selecionado aleatoriamente (Δ) exceda um valor de imperfeição discreto determinístico (d), ou seja, probabilidade de que os valores de imperfeição geométrica inicial medidos e que constam desse banco de dados sejam maiores que os adotados nos modelos numéricos. Por exemplo, $P(\Delta > d) = 0,75$ corresponde na

Tabela 2.1 a um valor de d/t de 0,14 e 0,64 para os tipos 1 e 2 de imperfeição respectivamente, ou seja, adotando esses valores de relação d/t , que correspondem à imperfeições “baixas”, existe 75% de probabilidade de que o banco de dados de imperfeições coletados na literatura exceda os valores adotados para a análise numérica.

Tabela 2.1 – Análise probabilística CDF para imperfeições tipos 1 e 2
[adaptado de Schafer & Peköz (1998)]

P ($\Delta > d$)	Tipo 1 d_1/t	Tipo 2 d_2/t
0,75	0,14	0,64
0,50	0,34	0,94
0,25	0,66	1,55
0,05	1,35	3,44
0,01	3,87	4,47

Análise numérica

As simulações numéricas foram realizadas no programa ANSYS, elaborado com base no Método dos Elementos Finitos, o qual disponibiliza ao usuário os recursos necessários para a obtenção dos resultados de interesse. Inicialmente, foram realizadas análises elásticas de estabilidade com o objetivo de observar o comportamento de barras em dupla cantoneira buscando identificar os modos críticos presentes, com isso, partiu-se para a análise não-linear inserindo imperfeições geométricas e de material (física). Com os resultados obtidos definiu-se um programa experimental que permitisse confirmar e dar consistência aos resultados numéricos obtidos. A análise numérica final consistiu em simular os modelos ensaiados.

3.1 Descrição dos elementos finitos utilizados

Em todas as simulações foi utilizado o elemento SHELL 181 (Figura 3.1) para modelagem dos perfis, das chapas separadoras e dos dispositivos de aplicação de força. De acordo com as informações da biblioteca interna do ANSYS, o elemento é ideal para análise não-linear de cascas de pequena espessura sujeitas a grandes deformações e rotações. O elemento possui quatro nós com seis graus de liberdade por nó, translações nas direções dos eixos x , y e z (U_x , U_y e U_z) e rotações em relação aos mesmos eixos (ROT_x , ROT_y e ROT_z). O elemento permite adotar integração reduzida (default) ou completa. Foram realizadas algumas simulações para comparar as duas opções, no entanto, observou-se que não houve diferenças significativas para os casos aqui estudados, com isso, optou-se por utilizar integração reduzida (default).

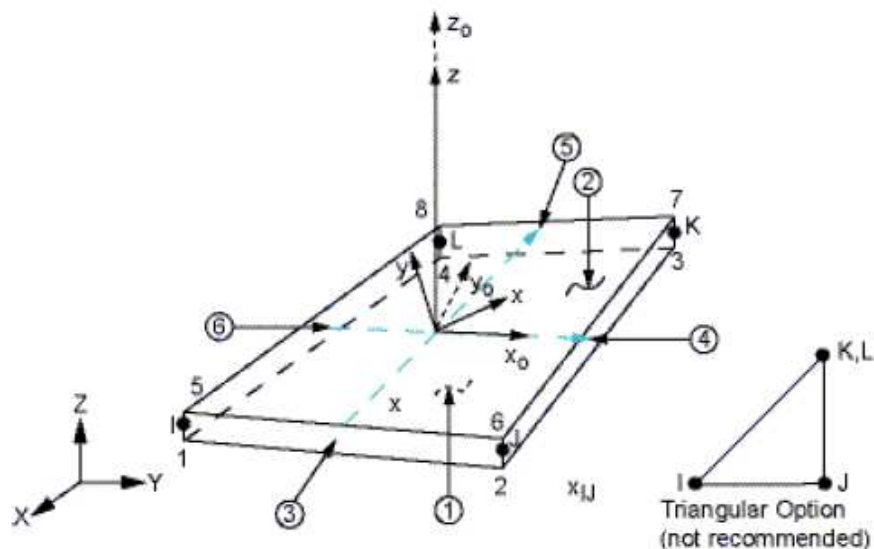


Figura 3.1 – Elemento finito SHELL181 (Fonte: Manual do ANSYS)

Na análise numérica final utilizou-se também o elemento SOLID45 (Figura 3.2) para modelagem dos dispositivos de extremidades da máquina de ensaios para os modelos ensaiados com rotação livre em relação ao eixo de menor inércia do conjunto. O elemento possui oito nós com três graus de liberdade por nó, translações nas direções dos eixos x , y e z (U_x , U_y e U_z).

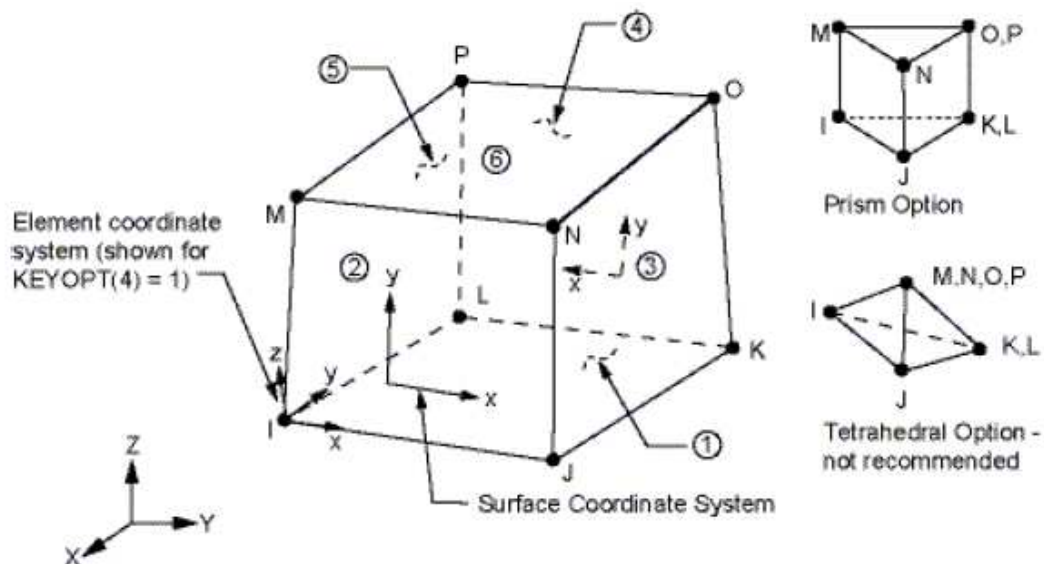


Figura 3.2 – Elemento finito SOLID45 (Fonte: Manual do ANSYS)

3.2 Análise numérica – Inicial

3.2.1 Procedimentos adotados na construção dos modelos

Na análise numérica inicial foram analisadas três seções em dupla cantoneira simples e uma em dupla cantoneira enrijecida. Foi analisada a sensibilidade da força normal resistente quanto às imperfeições geométricas iniciais. Também variou-se o número de chapas separadoras buscando estudar a eficiência das mesmas na força normal resistente das barras. As propriedades geométricas e mecânicas das seções individuais (uma cantoneira) estão apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Propriedades geométricas e mecânicas das seções individuais (uma cantoneira)

Seção	Aba (mm)	Enrijecedor (mm)	Espessura (mm)	Área (cm ²)	I _x =I _y (cm ⁴)	I ₁ (cm ⁴)	I ₂ (cm ⁴)	J (cm ⁴)	C _w (cm ⁶)
L 60x1,50	60	-	1,50	1,76	6,47	10,40	2,53	0,013	0,00
L 60x3,00	60	-	3,00	3,45	12,37	20,02	4,73	0,104	0,00
L 60x6,00	60	-	6,00	6,61	22,57	37,02	8,12	0,793	0,00
Le 50x15x1,50	50	15	1,50	1,84	6,01	9,05	2,97	0,014	5,04

$f_y = 273$ MPa (valor médio obtido em ensaios de tração (Maia (2008)))
 $E = 200000$ MPa (valor convencional)

Para as duplas cantoneiras simples foram realizadas duas simulações para representar as conexões entre as duas seções. Na primeira simulação prolongou-se a aba da cantoneira na posição das chapas separadoras, enquanto na segunda simulação adicionou-se chapas na face externa das abas. Para a simulação em que se prolongou a aba na posição das chapas separadoras, foi modelado também o perfil U equivalente como referência, ou seja, a chapa separadora foi prolongada por toda extensão das cantoneiras. Para a dupla cantoneira enrijecida foi realizada apenas a segunda simulação, ou seja, foram adicionadas chapas na face externa das abas. Na Figura 3.3 são ilustradas as simulações realizadas para as conexões entre as cantoneiras.

Para as duplas cantoneiras simples, inicialmente foram realizadas simulações com carregamento centrado para as duas simulações apresentadas para conexão entre as cantoneiras. Em seguida partiu-se para simulações com carregamento aplicado nas abas

por meio de um perfil U. Para a dupla cantoneira enrijecida foram realizadas apenas simulações com carregamento aplicado na aba por meio do perfil U (Figura 3.4).

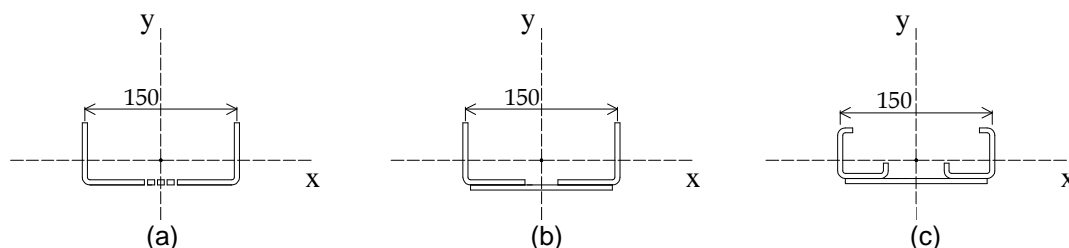


Figura 3.3 – Simulações realizadas para conexão entre as cantoneiras (a) prolongamento da aba (b) e (c) adição de chapas na face externa das abas

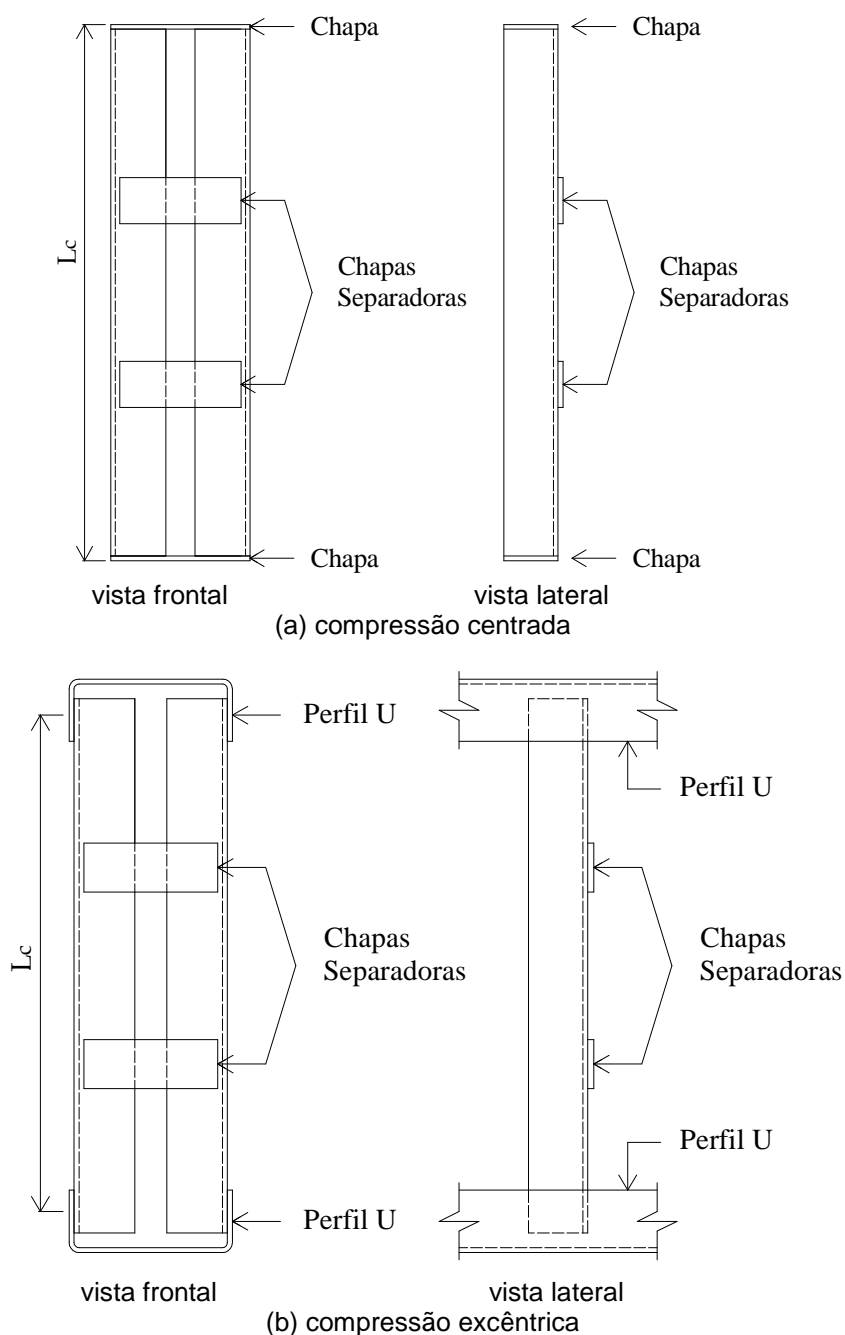


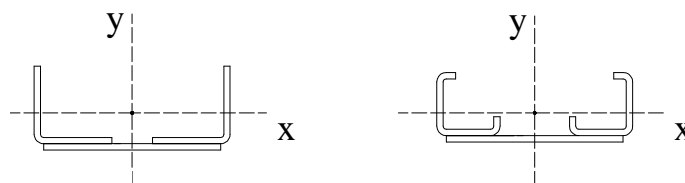
Figura 3.4 – Visão geral das simulações realizadas em dupla cantoneira simples e enrijecida

Nas simulações em que foram adicionadas chapas na face externa das abas fez-se coincidir os nós das chapas separadoras com os nós das cantoneiras, com isso promoveu-se a compatibilização de deslocamentos dos mesmos. O mesmo procedimento foi adotado para as cantoneiras submetidas à compressão excêntrica, ou seja, fez-se coincidir os nós do perfil U das extremidades com os nós das cantoneiras.

Todos os elementos foram adotados aproximadamente quadrados com lado aproximadamente de 1 cm, com exceção dos cantos e do enrijecedor que foram divididos em dois elementos cada. Todas as seções foram construídas utilizando as dimensões da linha de esqueleto e cantos arredondados com raio igual a 1,5 vezes a espessura. As chapas separadoras foram adotadas com largura e espessura iguais às dos perfis, também foi utilizado o mesmo material das cantoneiras. Os dispositivos de extremidade dos modelos foram construídos de modo que uma linha de nós da sua malha passasse pelo centro de gravidade da seção transversal composta, coincidindo com o eixo principal de menor inércia (eixo x – Figura 3.3). As simulações foram realizadas com todos os graus de liberdade restringidos, liberando apenas rotação em relação ao eixo de menor inércia do conjunto (eixo x). A Tabela 3.2 mostra as restrições adotadas nos dispositivos de extremidade.

Tabela 3.2 – Restrições adotadas nos dispositivos de extremidades

Posição	Graus de liberdades restringidos
Nós da extremidade das chapas de topo	Ux, ROTy, ROTz
Nós da linha que passa pelo CG (aplicação do deslocamento)	Ux, Uy, ROTy, ROTz Acoplamento Uz
Nós da linha que passa pelo CG (oposta à aplicação dos deslocamentos)	Ux, Uy, Uz, ROTy, ROTz



Nota: eixo z ao longo do comprimento da barra

3.2.2 Consideração das imperfeições geométricas iniciais

Um aspecto muito importante quanto à análise numérica não-linear de perfis de aço formados a frio consiste na consideração das imperfeições geométricas iniciais. Diferentes panoramas podem mudar completamente a resposta dos modelos. Além disso, não existe consenso dos pesquisadores quanto à magnitude, forma e modo de aplicação das imperfeições a serem utilizadas nos modelos numéricos.

A estratégia adotada para inserção das imperfeições geométricas iniciais foi a mesma utilizada por Maia (2008), Almeida (2007) e Chodraui (2006). Inicialmente foi realizada uma análise de autovalor utilizando-se o programa ANSYS, que fornece como resultado tanto o autovalor (valor de força crítica) como o autovetor (deformada da barra) para os modelos. Nesta análise buscou-se identificar os modos críticos isolados de interesse para cada seção: flexo-torção e flexão para dupla cantoneira simples (Figuras 3.5 e 3.6); local, flexo-torção e flexão para dupla cantoneira enrijecida (Figura 3.7).

A partir da configuração deformada referente a cada um dos modos críticos escolhidos para cada caso, foram adotadas imperfeições a fim de se aumentar ou reduzir esta amplitude, obtendo assim uma nova geometria de todos os nós da malha de elementos finitos da barra. Vale frisar que houve uma sobreposição das imperfeições, procurando sempre a combinação mais desfavorável.

Para dupla cantoneira simples foram adotadas imperfeições do tipo 2 associadas ao modo de flexo-torção, enquanto para dupla cantoneira enrijecida foram adotadas imperfeições do tipo 1 associada ao modo local e do tipo 2 associada ao modo de flexo-torção, conforme definido na Tabela 2.1. Para imperfeição de flexão foi adotado o valor de $L_c/1500$. No caso de compressão excêntrica, com força aplicada nas abas por meio do perfil “U”, também foram realizadas simulações sem a inserção de imperfeições geométricas iniciais.

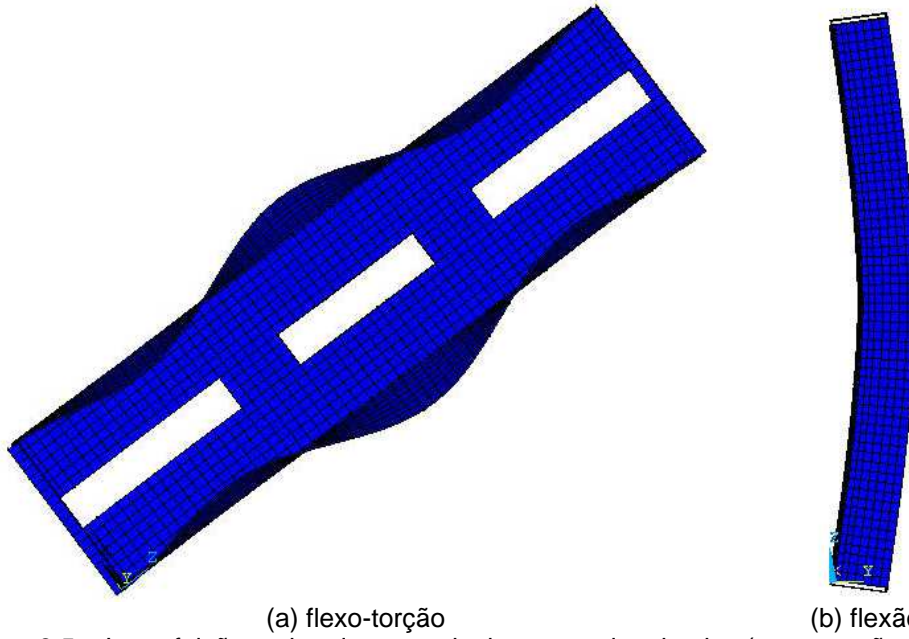


Figura 3.5 – Imperfeições adotadas para dupla cantoneira simples (compressão centrada)

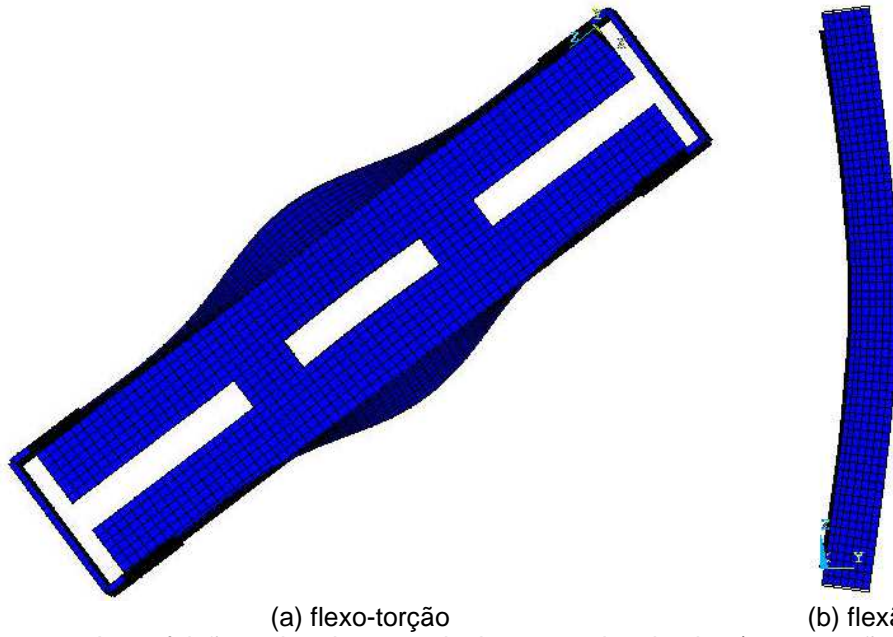


Figura 3.6 – Imperfeições adotadas para dupla cantoneira simples (compressão excêntrica)

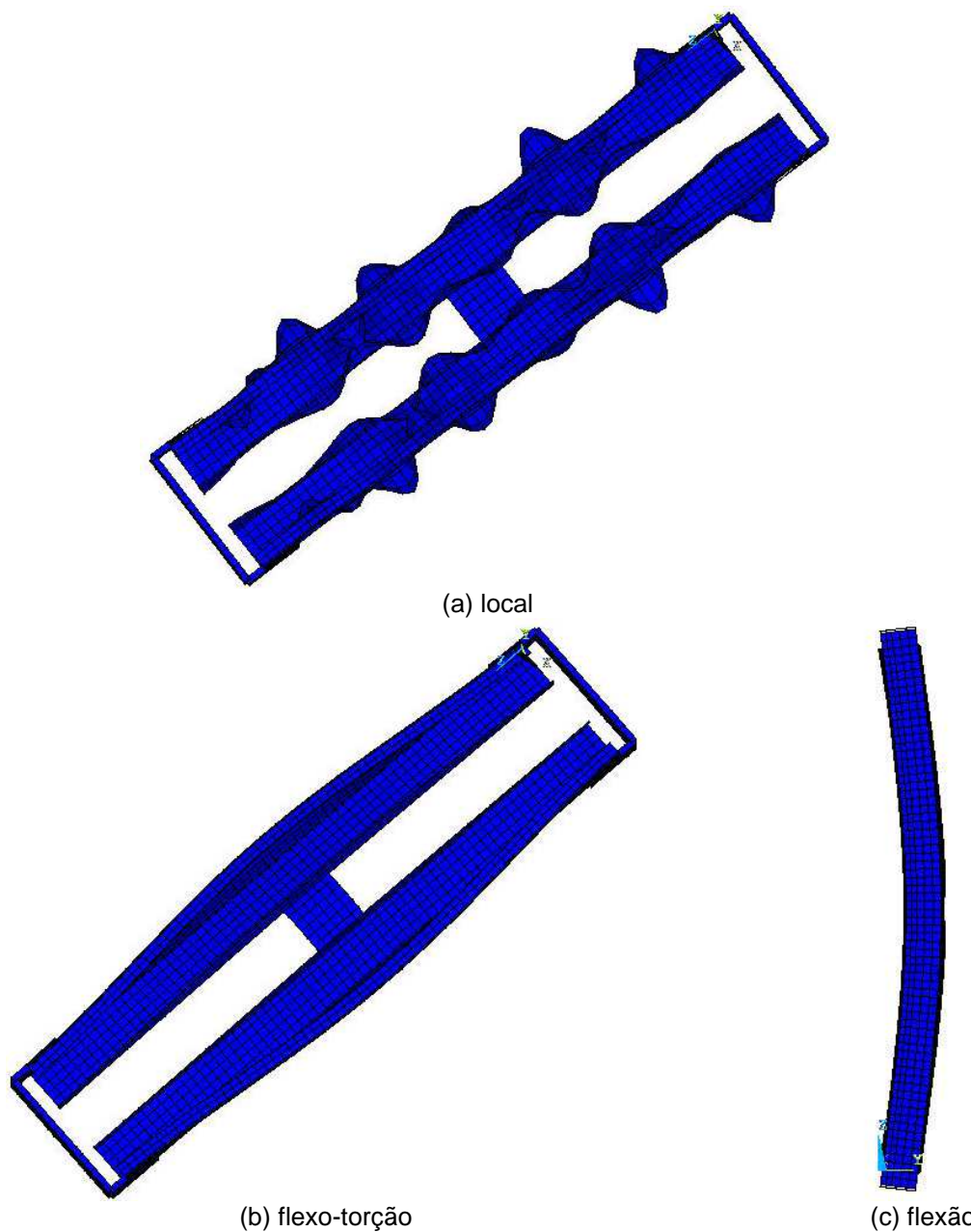


Figura 3.7 – Imperfeições adotadas para dupla cantoneira enrijecida (compressão excêntrica)

3.2.3 Consideração do modelo reológico

O diagrama “tensão x deformação” utilizado nas análises iniciais foi obtido por Maia (2008) referente a ensaios de caracterização de aço utilizado em ensaios de cantoneiras simples e enrijecidas (Figura 3.8). Vale salientar que os diagramas “tensão x deformação” obtidos nos ensaios de caracterização do aço são valores que se referem à área inicial dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios de tração, ou seja, não consideram a estricção que ocorre nos corpos-de-prova. Estes valores são denominados “convencionais” (engineering

values). Os programas em elementos finitos que fazem análise não-linear para grandes deformações utilizam rotinas para pares “tensão x deformação” denominados “valores corrigidos” (true values). De acordo com Hancock (2004) essa conversão de tensões e deformações convencionais para valores corrigidos considerando a variação sofrida pelo corpo-de-prova pode ser feita de acordo com as Expressões 3.1 e 3.2.

$$\sigma_t = \sigma_e (1 + \varepsilon_e) \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon_e) \quad (3.2)$$

Onde:

σ_t é a tensão corrigida (true);

ε_t é a deformação corrigida (true);

σ_e é a tensão convencional (engineering);

ε_e é a deformação convencional (engineering).

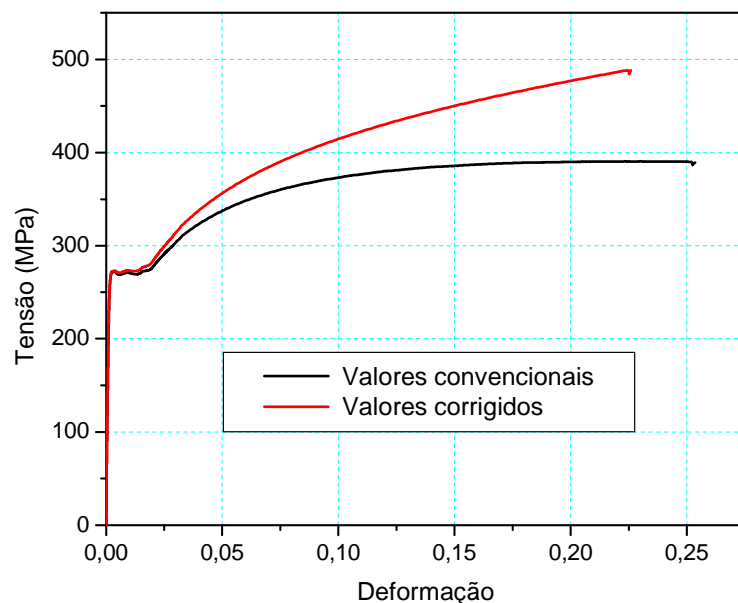


Figura 3.8 – Diagrama “tensão x deformação” utilizado nas análises numéricas

Observa-se que para pequenas deformações os valores convencionais e corrigidos praticamente se confundem, sendo mais acentuada a diferença para grandes deformações. Para as análises numéricas realizadas no trabalho verificou-se que as tensões máximas atingidas (tensões de von Mises) foram relativamente baixas, geralmente abaixo da tensão de escoamento (f_y), e portanto no campo das pequenas deformações. Porém, foram

utilizados os valores corrigidos do diagrama “tensão x deformação” por ser considerado o procedimento mais correto.

3.3 Análise numérica – Final

3.3.1 Procedimentos adotados na construção dos modelos

A análise numérica final consistiu em simular modelos utilizando as propriedades geométricas e mecânicas das seções adquiridas para realização da análise experimental. Com os resultados obtidos na análise numérica definiu-se a análise experimental buscando confirmar e dar consistência aos resultados aqui obtidos¹.

Foram utilizadas duas seções em dupla cantoneira simples, sendo uma formada a frio 2L 60x2,00 e outra laminada 2L 50x5 (2L 2"x3/16") e uma seção em dupla cantoneira enrijecida 2Le 50x13x2,00. As propriedades geométricas e mecânicas das seções das cantoneiras analisadas e do perfil “U” utilizado nas extremidades estão apresentadas nas Tabelas 3.3 e 3.4, respectivamente.

Tabela 3.3 – Propriedades geométricas e mecânicas das seções individuais (uma cantoneira)

Seção	Aba (mm)	Enrijecedor (mm)	Espessura (mm)	Área (cm ²)	I _x =I _y (cm ⁴)	I ₁ (cm ⁴)	I ₂ (cm ⁴)	J (cm ⁴)	C _w (cm ⁶)
L 60x2,00 ⁽¹⁾	60	-	2,00	2,33	8,50	13,69	3,30	0,031	0,00
L 51x5 ⁽²⁾	50,8	-	4,76	4,58	11,70	18,64	4,77	0,35	0,00
Le50x13x2,00 ⁽¹⁾	50	13	2,00	2,32	7,21	11,02	3,39	0,031	3,99

⁽¹⁾f_y = 350 MPa (valor médio obtido em ensaios de tração – Tabela 4.1)

⁽²⁾f_y = 307 MPa (valor médio obtido em ensaios de tração – Tabela 4.1)

E = 200000 MPa (valor convencional)

Tabela 3.4 – Propriedades geométricas e mecânicas do perfil “U”

Seção	Alma (mm)	Mesa (mm)	Espessura (mm)	Área (cm ²)	I _x (cm ⁴)	I _y (cm ⁴)	J (cm ⁴)	C _w (cm ⁶)
U 160x60x4,75	160	60	4,75	12,56	460,86	40,67	0,944	1761,39

f_y = 310 MPa (valor médio obtido em ensaios de tração – Tabela 4.1)

E = 200000 MPa (valor convencional)

¹ Etapa do trabalho desenvolvida em parceria com o Professor Ben Schafer, que teve início durante estágio realizado na “The Johns Hopkins University” no período de Setembro a Novembro de 2010.

Assim como na análise numérica inicial, foram realizadas simulações em modelos com força aplicada nas abas por meio do perfil “U” e também em modelos com carregamento centrado. Algumas modificações em relação à análise numérica inicial foram adotadas nessa etapa, no que se refere à adoção dos modos críticos para inserção das imperfeições geométricas iniciais e na simulação das chapas separadoras.

Quanto aos modos críticos, para adoção das imperfeições geométricas iniciais, aqui o modelo foi construído e foi realizada uma análise de autovalor/autovetor para o modelo sem chapas separadoras, ou seja, duas barras independentes. As imperfeições adotadas para todos os modelos, independente do número de chapas separadoras foram sempre adotadas em relação à deformada das barras isoladas. As Figuras 3.9 a 3.12 mostram os modos críticos adotados para inserção das imperfeições geométricas iniciais, para dupla cantoneira simples e enrijecida.

Com relação às chapas separadoras, foram realizadas duas simulações: na primeira foi adotado o mesmo procedimento da análise inicial, ou seja, foram adicionadas chapas na face externa das abas fazendo coincidir os nós das chapas separadoras com os nós das cantoneiras, com isso promoveu-se a compatibilização de deslocamentos dos mesmos (Figura 3.13). Na segunda simulação, optou-se por fazer acoplamento de nós na posição das chapas separadoras (Figura 3.14). Foram acoplados dois nós de cada cantoneira localizados no centro da aba. Os nós tiveram as translações acopladas nas três direções (U_x , U_y e U_z). Todas as simulações foram realizadas com todos os graus de liberdade restringidos nas extremidades (extremidades fixas), ou seja, nas extremidades dos perfis “U” no caso de compressão excêntrica e nas chapas de topo no caso de compressão centrada.

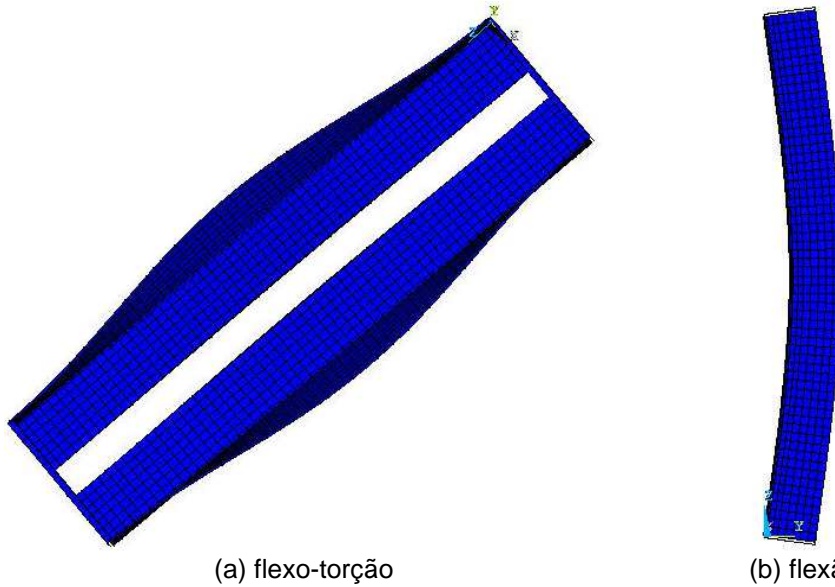
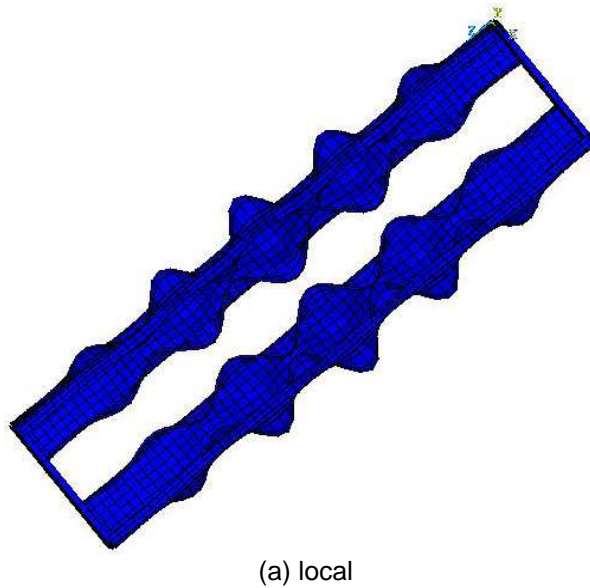


Figura 3.9 – Imperfeições adotadas para dupla cantoneira simples (compressão centrada)



Figura 3.10 – Imperfeições adotadas para dupla cantoneira simples (compressão excêntrica)



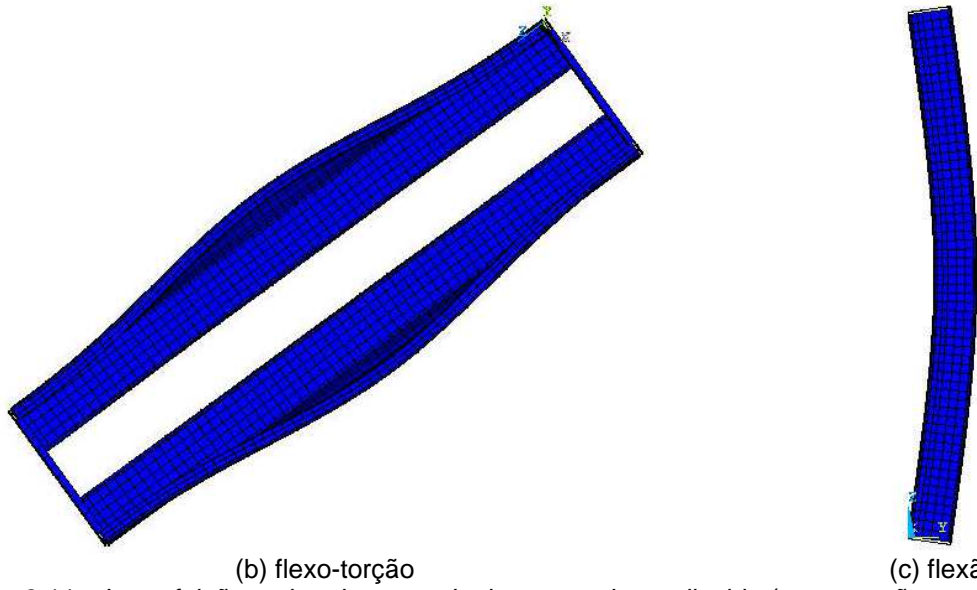


Figura 3.11 – Imperfeições adotadas para dupla cantoneira enrijecida (compressão centrada)

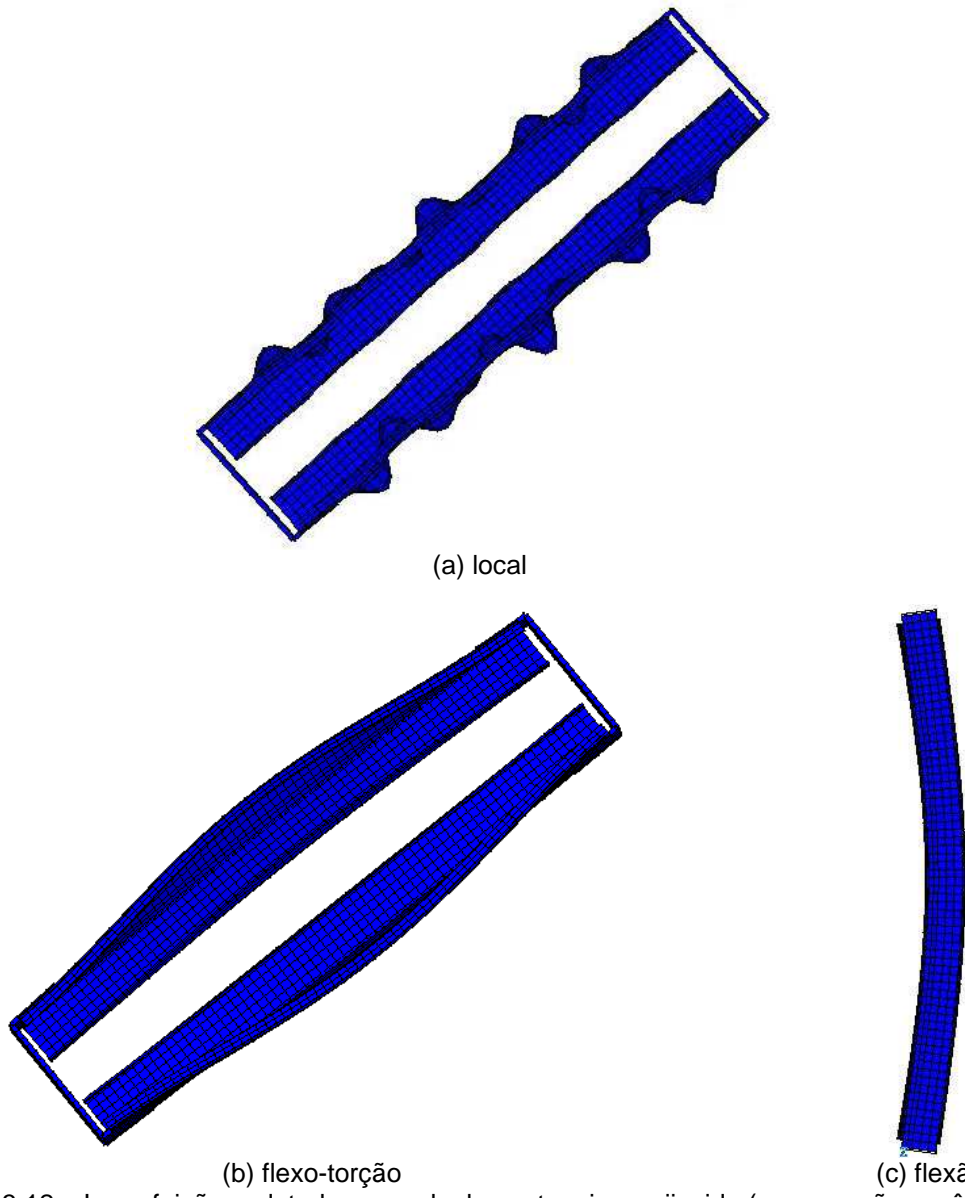


Figura 3.12 – Imperfeições adotadas para dupla cantoneira enrijecida (compressão excêntrica)

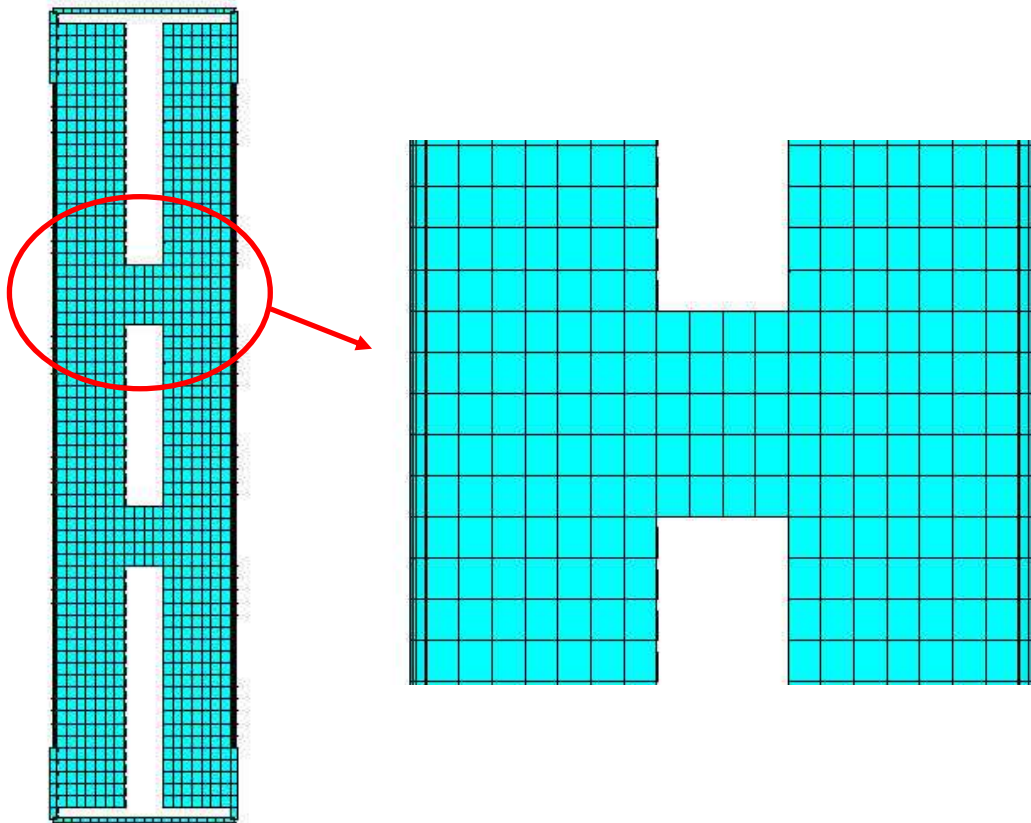


Figura 3.13 – Construção das chapas separadoras

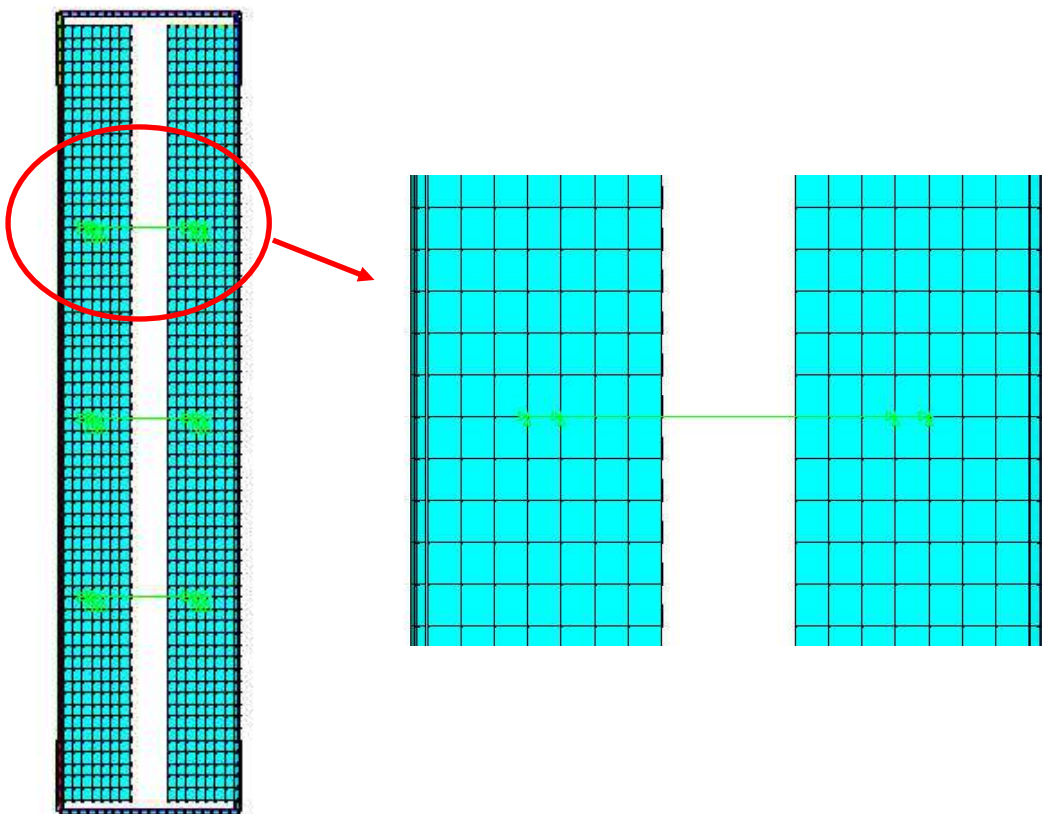


Figura 3.14 – Acoplamento dos nós na posição das chapas separadoras

Nas Figuras 3.15 a 3.17 são apresentados os diagramas “tensão x deformação” utilizados na análise numérica, referentes a ensaios de caracterização dos aços utilizados nos ensaios experimentais. Nessa etapa também foram utilizados os valores corrigidos dos diagramas “tensão x deformação”.

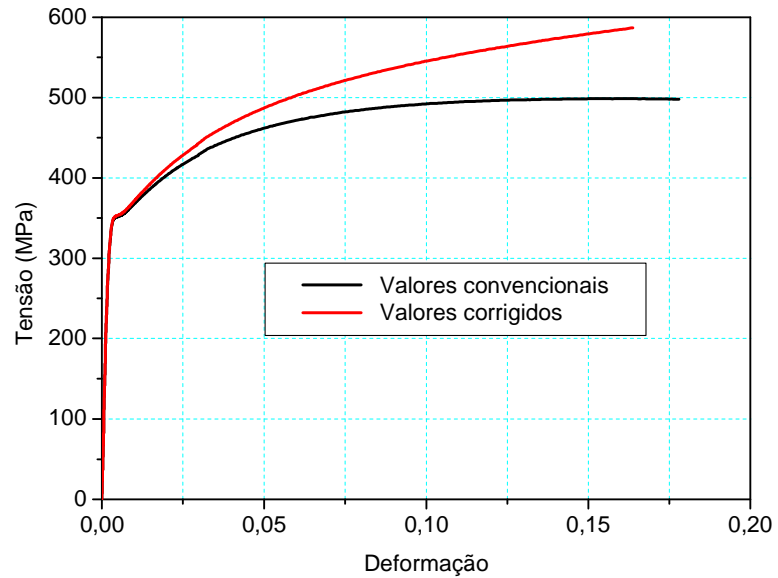


Figura 3.15 – Diagrama “tensão x deformação”: seções 2L 60x2,00 e 2Le 50x13x2,00

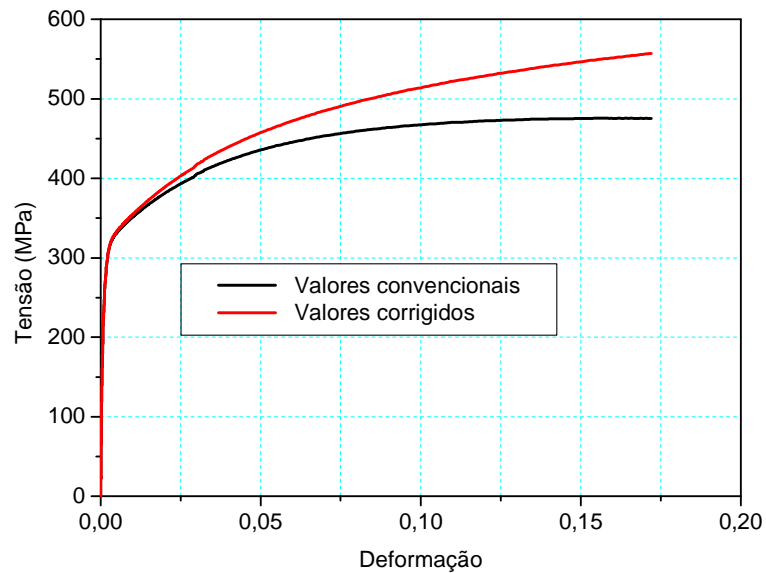


Figura 3.16 – Diagrama “tensão x deformação”: seção U 160x60x4,75

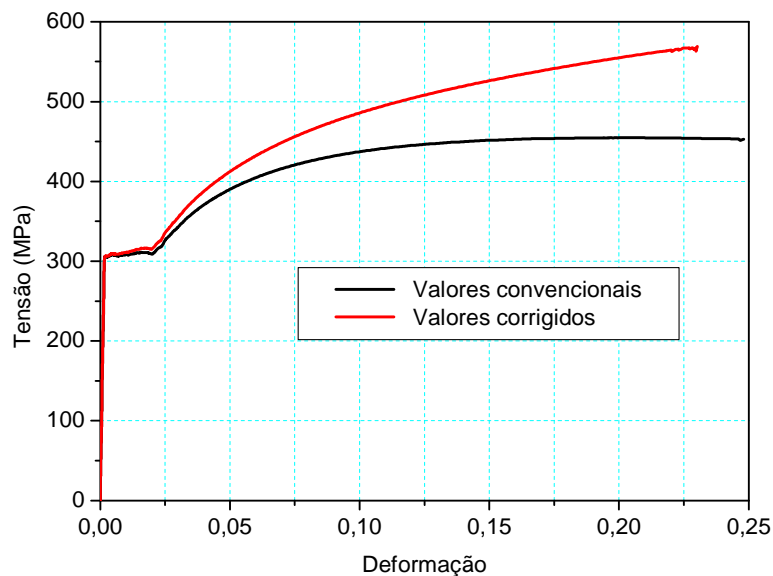


Figura 3.17 – Diagrama “tensão x deformação”: seção 2L 50x5 (2”x3/16”)

3.4 Consideração da não-linearidade geométrica

Na análise não-linear geométrica o equilíbrio é estudado considerando-se a configuração atual da estrutura, isto é, levando-se em conta os deslocamentos e deformações ocorridas, independente de serem grandes ou pequenas. O objetivo básico é a descrição da chamada trajetória de equilíbrio pela representação das configurações equilibradas em correspondência aos sucessivos níveis de força aplicada.

Para a resolução do sistema não-linear foi utilizado o método iterativo e incremental Newton-Raphson Completo (“Newton-Raphson Full”) que atualiza a matriz de rigidez tangente a cada iteração. O carregamento foi aplicado de forma incremental utilizando-se a ferramenta do ANSYS conhecida como “Automatic Load Stepping”. Esta ferramenta faz com que o programa atualize automaticamente o incremento de deslocamento a ser acrescido, porém foram introduzidos limites superior e inferior de incrementos.

Foi utilizado o critério de convergência em termos de deslocamentos. O critério de convergência verifica se a solução obtida possui a precisão julgada suficiente. Segundo Lourenço (1999), o critério de convergência em termos de deslocamentos é dado por $\|\delta u\| < \beta \|u\|$ em que δu é a correção iterativa do deslocamento, u é o deslocamento total

e β é a tolerância ou erro máximo admitido. No presente trabalho foi adotado como tolerância (β) o valor 0,001.

Para Lourenço (1999) uma limitação dos processos iterativos é o fato deles não serem globalmente convergentes, isto é, convergentes para alguma solução do sistema de equações não-lineares a partir de praticamente qualquer solução inicial. Para melhor convergência dos modelos foi adotada a ferramenta “Line-Search”, que faz a estimativa de uma solução exterior ao raio de convergência do método de Newton-Raphson.

Análise experimental

4.1 Caracterização dos materiais

As cantoneiras simples L 60x2,00 e enrijecida Le 50x13x2,00 formadas a frio foram fabricadas com chapas oriundas de uma bobina com espessura nominal de 2,00 mm e o perfil U 160x60x4,75 utilizado nas extremidades com espessura nominal de 4,75 mm. Ambos foram obtidos por dobramento. O aço foi adquirido como sendo o aço CSN COR 420. Para os ensaios de referência foi analisada uma seção de cantoneira laminada L 50x5 (2"x3/16"). Com relação às chapas separadoras, foram utilizadas barras de ferro chato com dimensões 50x3 (2"x1/8").

Para caracterização dos aços das seções formadas a frio foram selecionadas duas barras de cantoneira simples, duas barras de cantoneira enrijecida e uma barra do perfil U. Para a cantoneira laminada foram extraídos corpos-de-prova de todas as barras utilizadas. Para as cantoneiras foram extraídos dois corpos-de-prova de cada barra e para o perfil U três corpos-de-prova como mostrado nas Figuras 4.1 a 4.4. Os corpos-de-prova foram extraídos e ensaiados de acordo com a norma ASTM A370:2009. As dimensões dos corpos-de-prova estão indicadas na Figura 4.5.

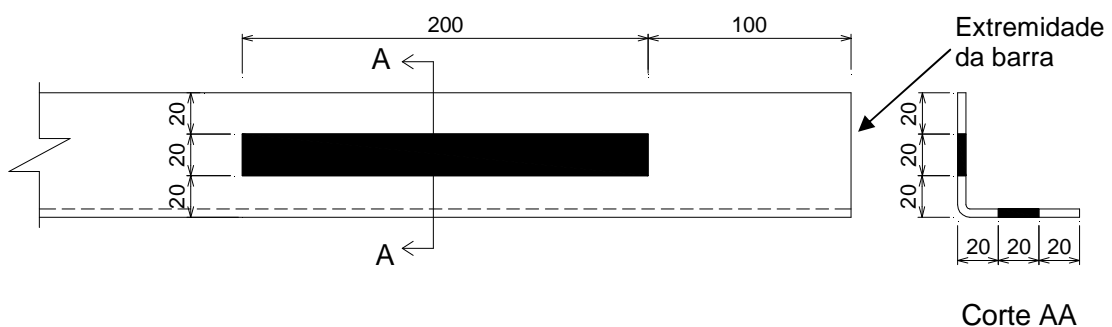
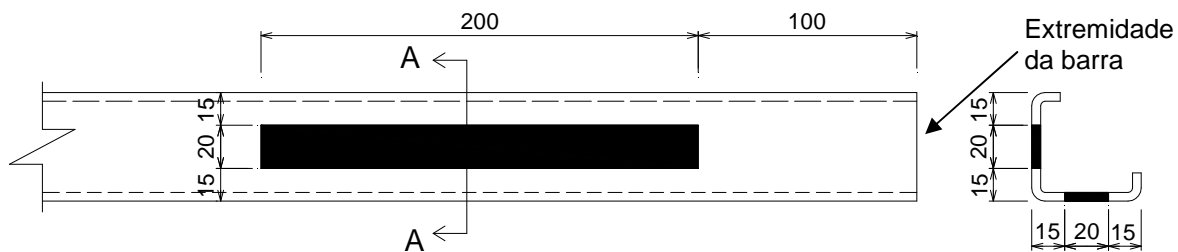
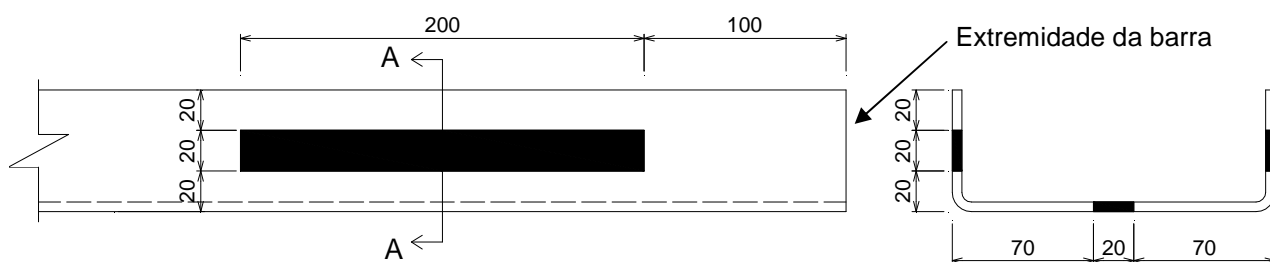


Figura 4.1 – Localização dos corpos-de-prova na barra: perfil L 60x2,00 (dimensões em mm)



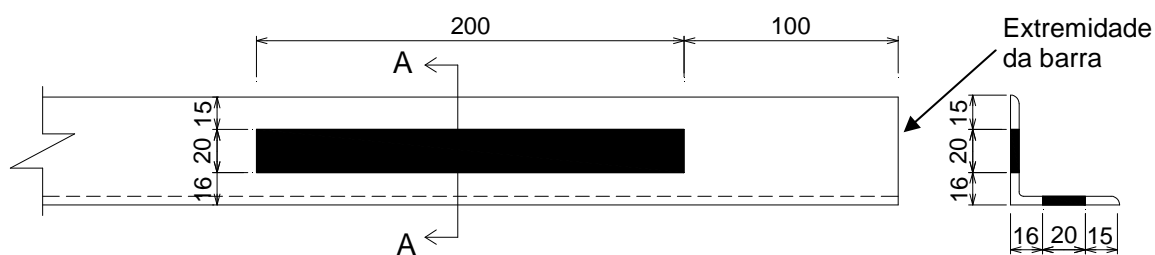
Corte AA

Figura 4.2 – Localização dos corpos-de-prova na barra: perfil Le 50x13x2,00 (dimensões em mm)



Corte AA

Figura 4.3 – Localização dos corpos-de-prova na barra: perfil U 160x60x4,75 (dimensões em mm)



Corte AA

Figura 4.4 – Localização dos corpos-de-prova na barra: perfil L 50x5 (2"x3/16") (dimensões em mm)

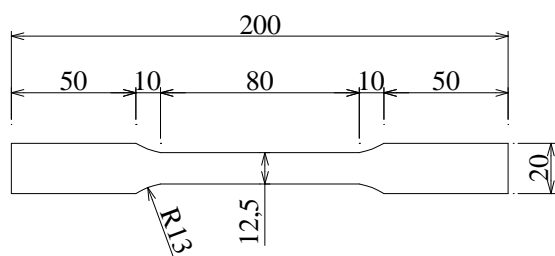


Figura 4.5 – Dimensões dos corpos-de-prova conforme ASTM A370:2009 (dimensões em mm)

Os resultados (resistência ao escoamento e à ruptura, e também o alongamento dos corpos-de-prova com base de medida de 50 mm) são apresentados na Tabela 4.1 e nas Figuras 4.6 a 4.8.

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de caracterização dos aços

Perfil	Área do CP (cm ²)	Escoamento			Ruptura			Alongamento (%) (L = 50mm)
		Força (kN)	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)	Força (kN)	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)	
L 60x2,00	0,248	9,00	363,0		12,68	511,3		29,0
	0,248	8,94	360,5		12,59	507,7		29,6
	0,248	8,39	338,3		12,16	490,3		30,6
	0,248	8,47	341,5		12,20	492,0		27,4
Le 50x13x2,00	0,248	8,63	348,0	350,5	12,30	496,0	498,7	29,0
	0,248	8,77	353,6		12,40	500,0		28,3
	0,248	8,71	351,2		12,39	499,6		28,6
	0,248	8,62	347,6		12,22	492,7		29,8
U 160x60x4,75	0,582	18,20	312,7		28,26	485,6		30,9
	0,588	18,37	312,4	310,2	27,91	474,7	475,9	31,2
	0,588	17,97	305,6		27,48	467,3		32,2
L 50x5 (2"x3/16")	0,586	18,18	310,2		26,02	444,0		38,0
	0,582	17,64	303,1		25,75	442,4		39,7
	0,584	17,78	304,5		26,80	458,9		38,5
	0,586	17,90	305,5		27,10	462,4		38,4
	0,585	18,54	316,9		26,84	458,8		37,0
	0,580	18,15	312,9		26,45	456,0		36,7
	0,584	17,96	307,5	307,4	26,96	461,6	454,8	36,0
	0,593	18,54	312,6		27,37	461,6		37,2
	0,576	17,70	307,3		26,61	462,0		38,1
	0,581	18,12	311,9		27,16	467,5		35,7
	0,585	17,58	300,5		25,93	443,2		36,0
	0,592	17,50	295,6		26,02	439,5		36,2

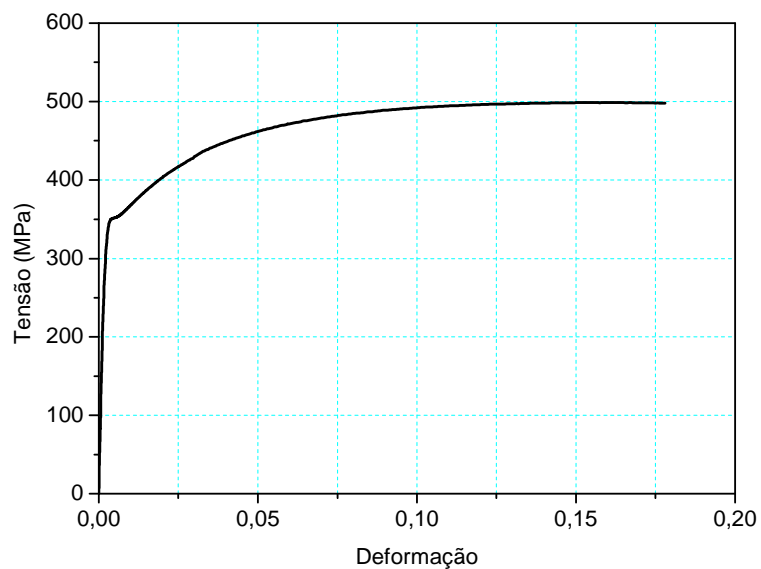


Figura 4.6 – Curva média “tensão x deformação”: corpos-de-prova extraídos dos perfis L 60x2,00 e Le 50x13x1,50

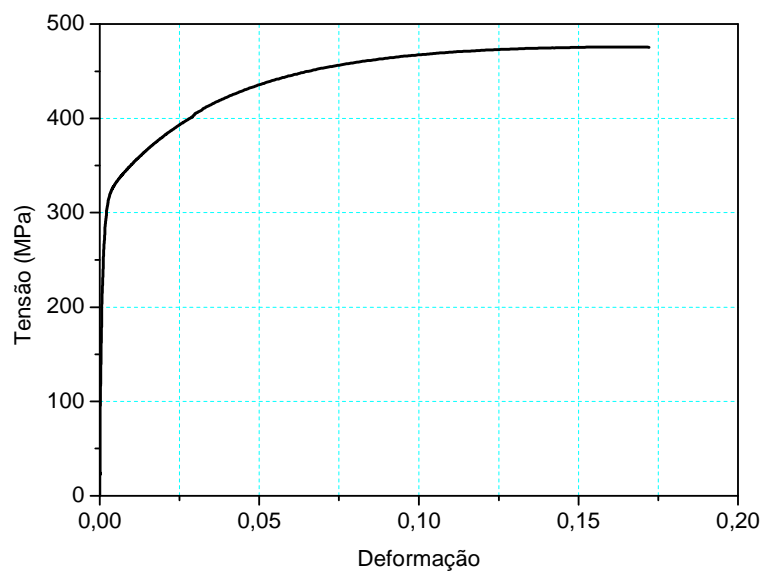


Figura 4.7 – Curva média “tensão x deformação”: corpos-de-prova extraídos do perfil U 160x60x4,75

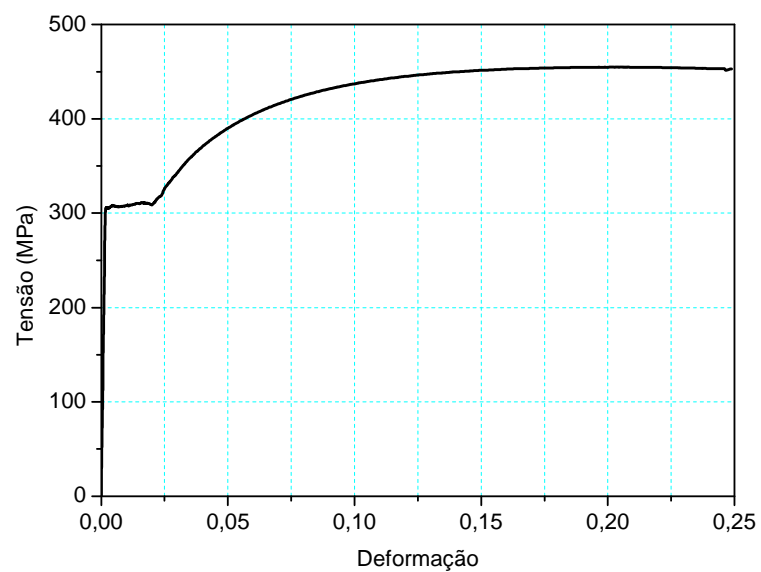


Figura 4.8 – Curva média “tensão x deformação”: corpos-de-prova extraídos do perfil L 50x5

4.2 Análise de conformidade dos perfis segundo a ABNT NBR 6355:2003

Foram realizadas medições nas formas e dimensões dos perfis formados a frio utilizados nos ensaios. As dimensões foram verificadas em três seções: duas próximas às extremidades e uma no centro da barra. Nas Figuras 4.9 a 4.14 são ilustradas as dimensões e imperfeições verificadas. Os valores médios estão apresentados na Tabela 4.2 e são comparados com as tolerâncias estabelecidas na ABNT NBR 6355:2003, onde pode-se notar que todos os requisitos foram atendidos.

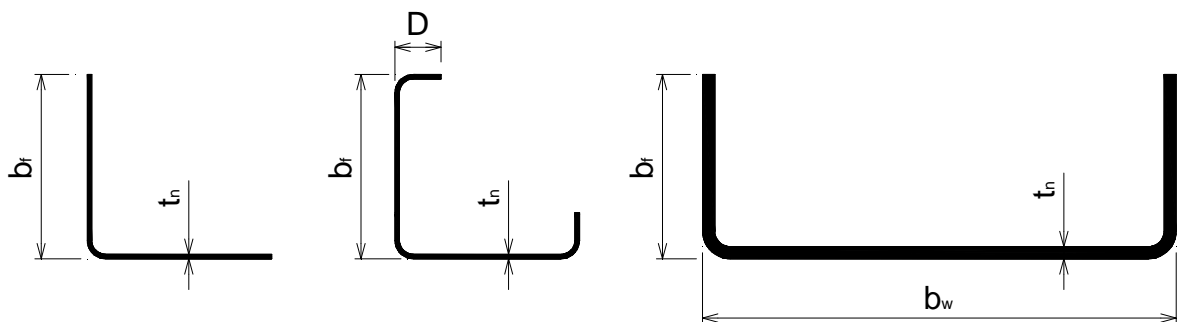


Figura 4.9 – Dimensões da seção transversal

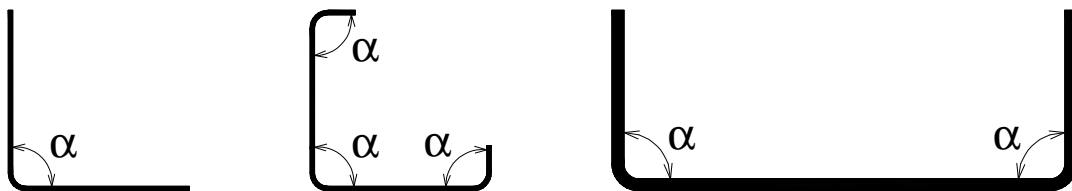


Figura 4.10 – Ângulo formado por elementos adjacentes

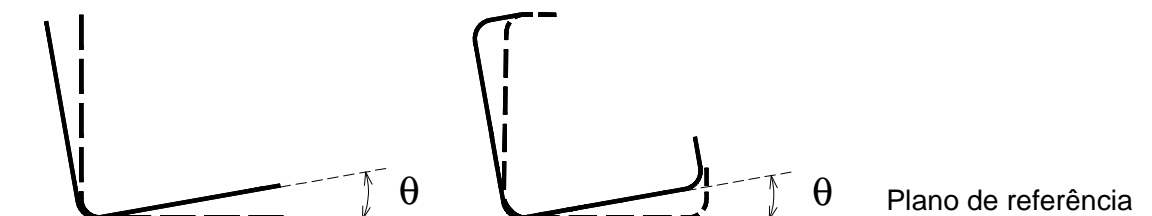


Figura 4.11 – Torção do perfil

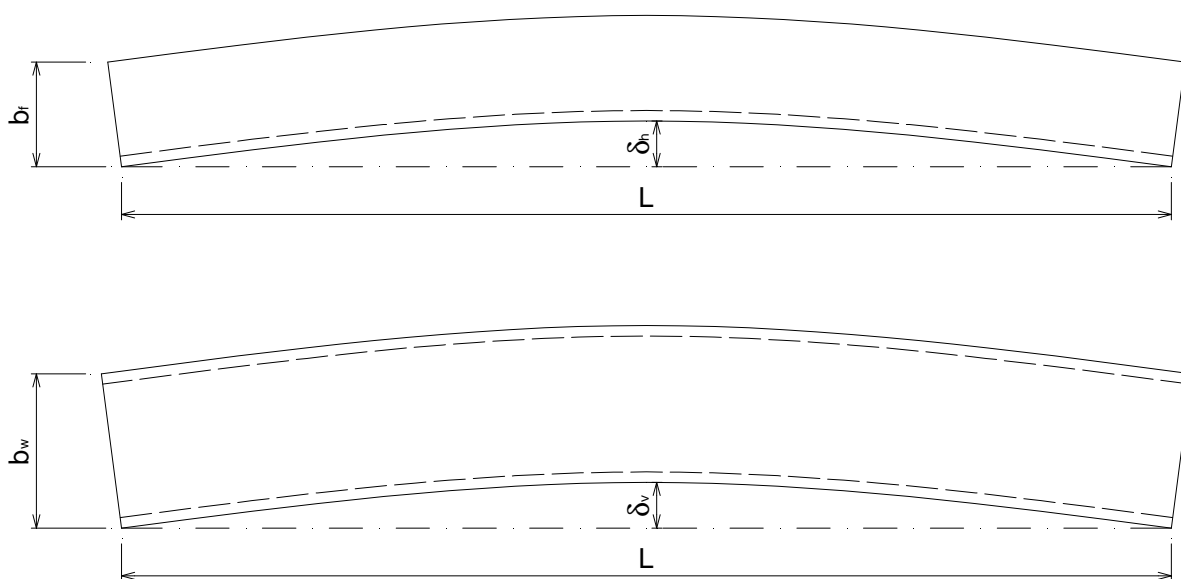


Figura 4.12 – Flecha do perfil

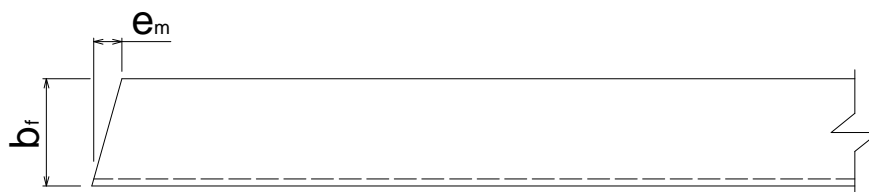


Figura 4.13 – Esquadro da extremidade do perfil no plano da mesa

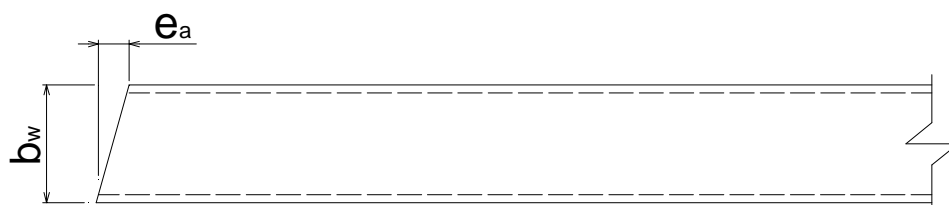


Figura 4.14 – Esquadro da extremidade do perfil no plano da alma

Tabela 4.2 – Análise de conformidade dos perfis segundo a ABNT NBR 6355:2003

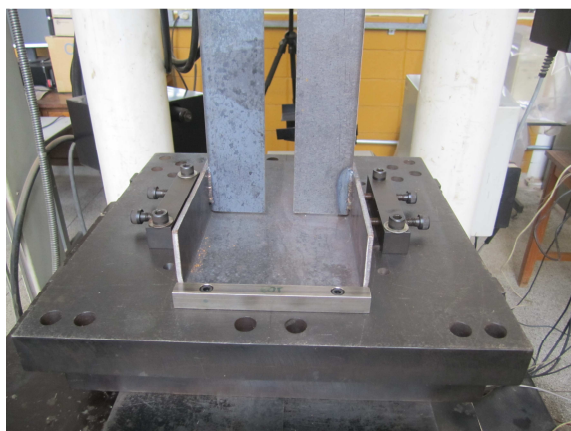
Tipo	Seção	Variável	Parâmetro	Valor médio	Tolerância
Dimensões da seção transversal	L 60x2,00	b_f		59,9 mm	$(60 \pm 1,5)$ mm
	Le 50x13x2,00	b_f	$t_n \leq 4,75$ mm	49,8 mm	$(50 \pm 1,5)$ mm
		D		12,8 mm	$(13 \pm 2,0)$ mm
	U 160x60x4,75	b_w		160,0 mm	$(160 \pm 1,5)$ mm
		b_f		59,5 mm	$(60 \pm 1,5)$ mm
Espessura da parte plana⁽¹⁾	L 60x2,00			2,03 mm	2,18 mm
	Le 50x13x2,00	t_n	-	2,03 mm	2,18 mm
	U 160x60x4,75			4,78 mm	5,00 mm
Ângulo formado por elementos adjacentes	L 60x2,00			89,6°	
	Le 50x13x2,00	α	Qualquer	90,7°	$(90 \pm 1)^\circ$
	U 160x60x4,75			89,8°	
Comprimento do perfil	L 60x2,00			3002 mm	
	Le 50x13x2,00	L	Qualquer	3004 mm	3010 mm
	U 160x60x4,75			3003 mm	
Flecha do perfil	L 60x2,00	δ_h	Qualquer	1,3 mm	6,0 mm
	Le 50x13x2,00			1,0 mm	
	U 160x60x4,75	δ_h		1,3 mm	
		δ_v		1,8 mm	
Torção do perfil	L 60x2,00			0,5°/m	
	Le 50x13x2,00	θ	Qualquer	0,4°/m	1°/m
	U 160x60x4,75			0,5°/m	
Esquadro de extremidade	L 60x2,00	e_m	Qualquer	0,5 mm	0,6 mm
	Le 50x13x2,00			0,5 mm	0,5 mm
	U 160x60x4,75	e_m		0,5 mm	0,6 mm
		e_a		1,0 mm	1,6 mm

⁽¹⁾ Conforme ABNT NBR 11888:2008 – Bobinas e chapas finas a frio e a quente de aço-carbono e aço de baixa liga e alta resistência – Requisitos gerais

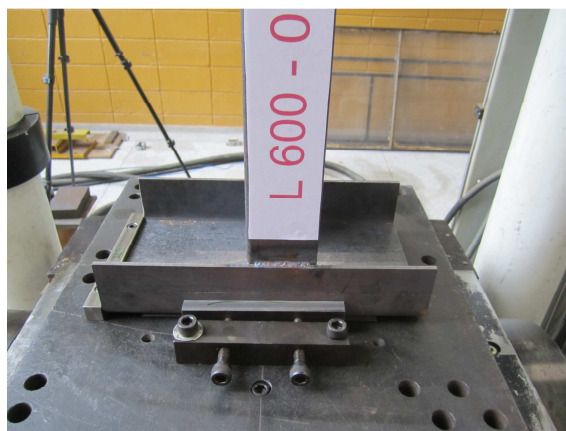
4.3 Descrição dos ensaios realizados

Foi realizada uma série de ensaios em dupla cantoneira simples 2L 60x2,00 e enrijecida 2Le 50x13x2,00 formadas a frio e cantoneira laminada 2L 50x5 (2"x3/16"), totalizando 78 (setenta e oito) ensaios. Foram ensaiadas barras com força centrada aplicada

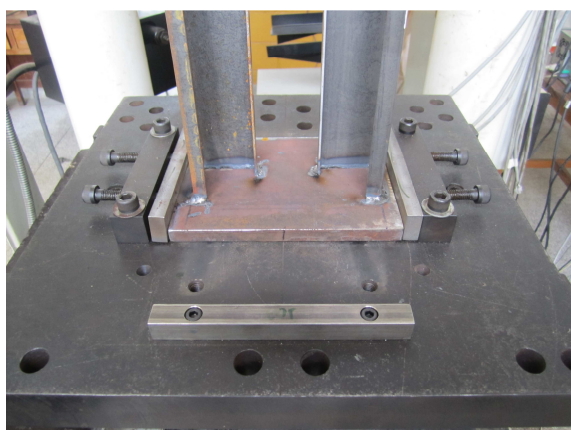
por meio de uma chapa espessa (12,5 mm) soldada nas extremidades e barras com força excêntrica, aplicada nas abas por meio de um perfil U (Figura 4.15).



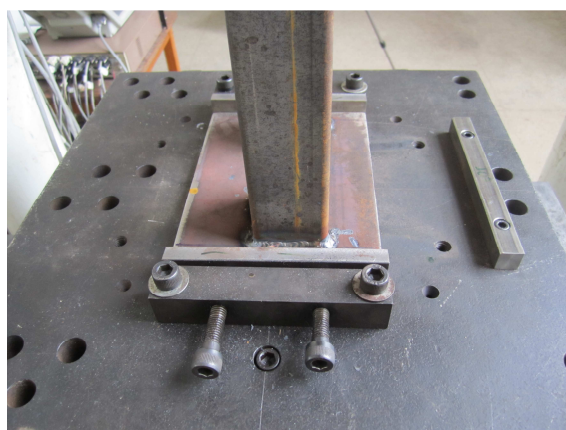
(a) vista frontal



(b) vista lateral



(c) vista frontal



(d) vista lateral

Figura 4.15 – Descrição dos ensaios realizados: (a) e (b) compressão excêntrica em dupla cantoneira simples; (c) e (d) compressão centrada em dupla cantoneira enrijecida

Todas as barras em dupla cantoneira enrijecida formada a frio 2Le 50x13x2,00 e laminada 2L 50x5 (2"x3/16") foram ensaiadas com extremidades fixas (rotação e empenamento impedidos). No caso da dupla cantoneira simples formada a frio 2L 60x2,00 também foram ensaiadas barras com rotação livre em relação ao eixo de menor inércia do conjunto, neste caso, o comprimento teórico (L_c) foi admitido como sendo $L_{\text{barra}} + 135$ mm, correspondendo à distância entre os eixos de rotação dos dispositivos de apoio inferior e superior da máquina de ensaios.

Foram ensaiadas barras com diferentes índices de esbeltez variando-se também o número de chapas separadoras. Na maioria dos ensaios foram utilizadas chapas separadoras parafusadas, o que permitiu sua reutilização. Em alguns ensaios foram

adotadas chapas separadoras soldadas, além disso, também variou-se a largura das chapas com o objetivo de se comparar os resultados em função da rigidez à flexão destas chapas (Figura 4.16).

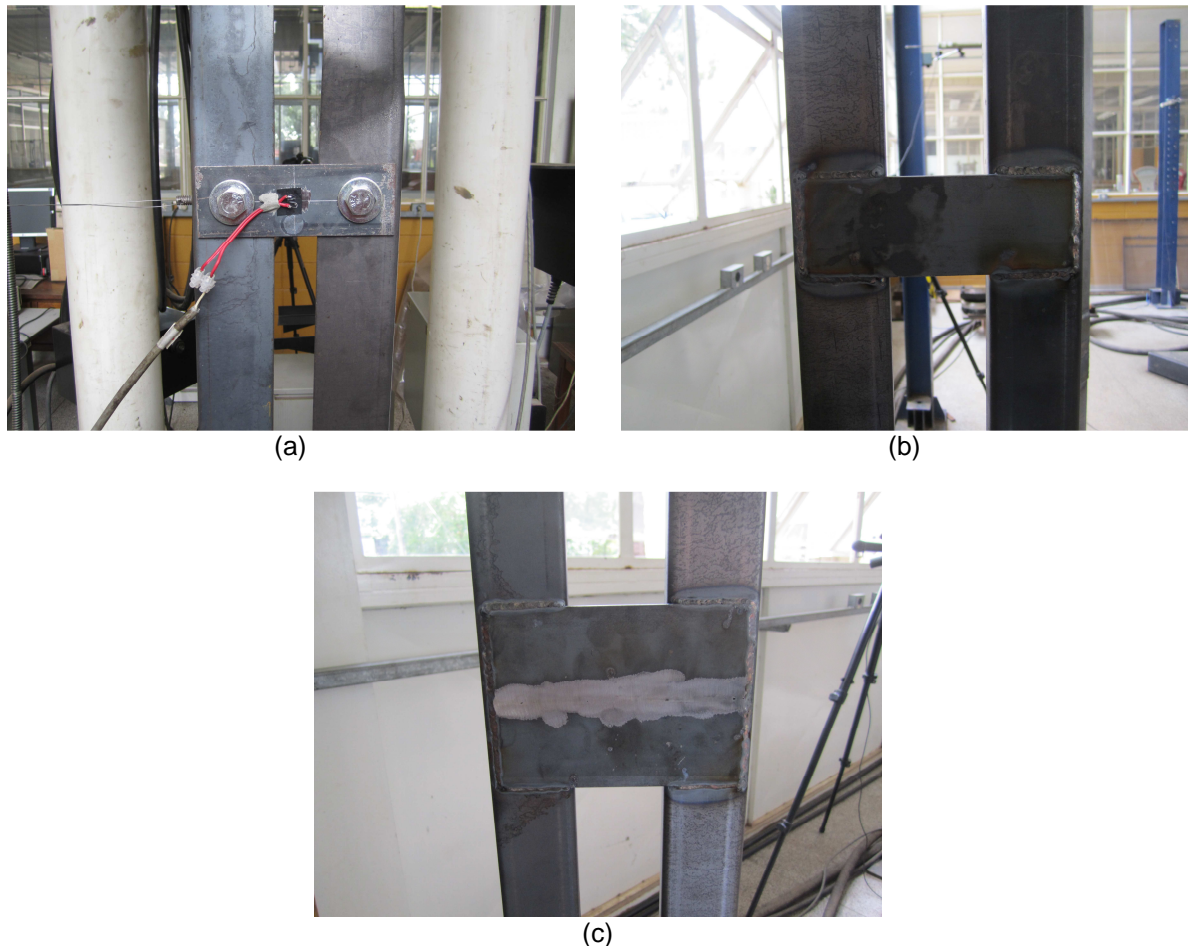


Figura 4.16 – Chapas separadoras (a) parafusada; (b) e (c) soldadas

Os ensaios foram realizados na máquina servo-controlada INSTRON 8506 com capacidade nominal de 2.500 kN. Foi aplicado carregamento monotônico, utilizando-se para as leituras o sistema de aquisição de dados SYSTEM 5000. Os ensaios foram realizados com controle de deslocamento a uma taxa de 0,01 mm/segundo.

Quanto à instrumentação, foram utilizados extensômetros elétricos de resistência com base de medida de 5 mm em algumas barras, para medição das deformações específicas, e transdutores de deslocamento com curso de 100 mm, fixados na metade do comprimento das barras, para medição de deslocamentos transversais. Além disso,

instrumentou-se também as chapas separadoras na face externa. As Figuras 4.17 a 4.20 mostram as instrumentações adotadas.

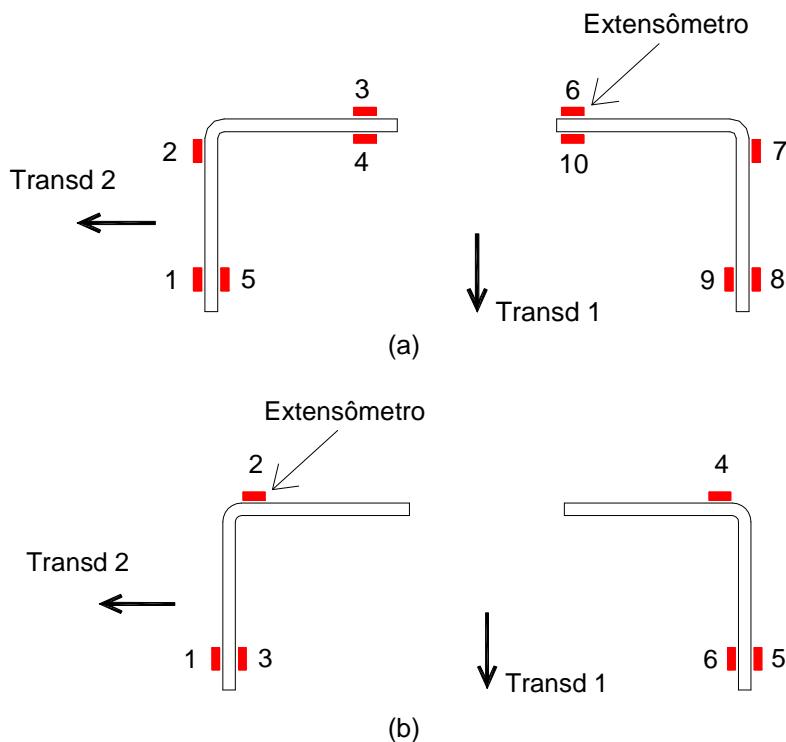


Figura 4.17 – Posição dos extensômetros e transdutores de deslocamento no perfil 2L 60x2,00: (a) barras sem chapas separadoras; (b) barras com chapas separadoras

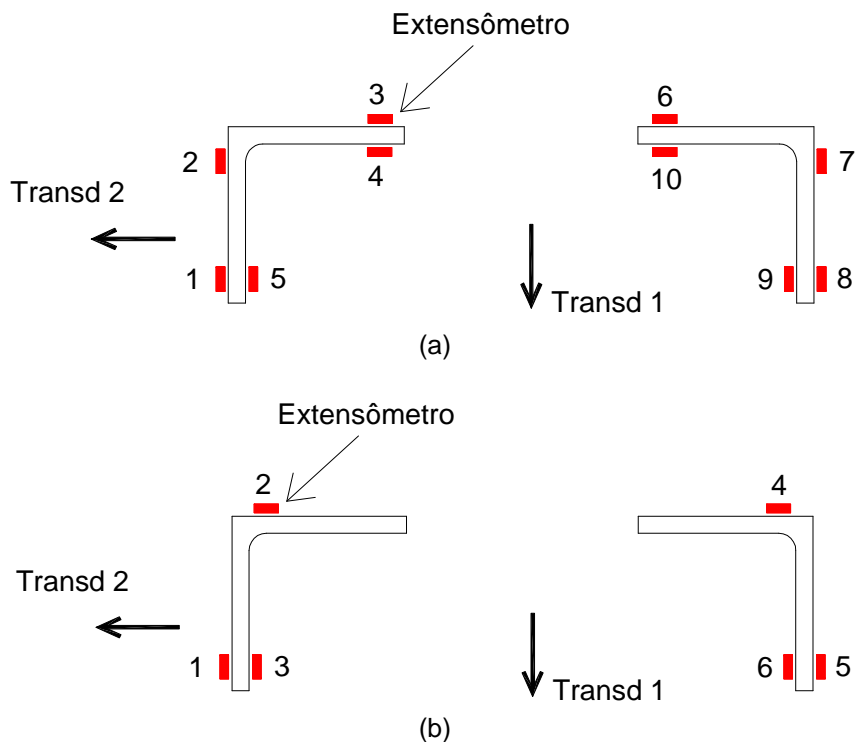


Figura 4.18 – Posição dos extensômetros e transdutores de deslocamento no perfil 2L 50x5 (2"x3/16") (a) barras sem chapas separadoras; (b) barras com chapas separadoras

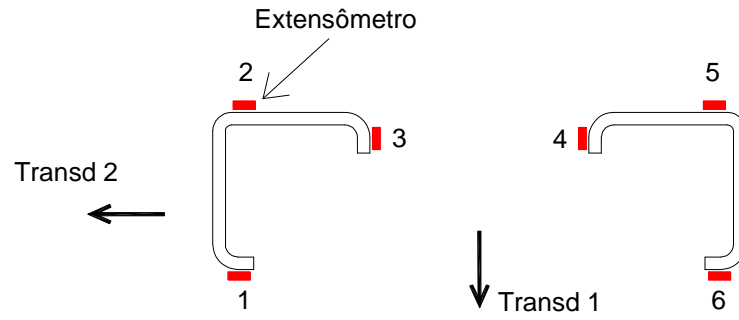


Figura 4.19 – Posição dos extensômetros e transdutores de deslocamento no perfil 2Le 50x13x2,00

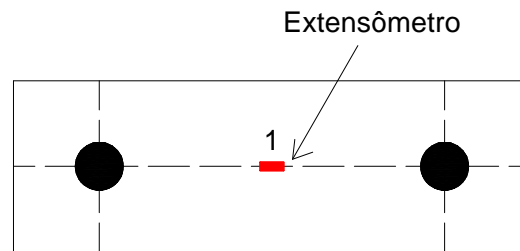


Figura 4.20 – Posição do extensômetro nas chapas separadoras

Resultados

Capítulo 5

Para comparação dos resultados das análises numérica e experimental, inicialmente, foram adotadas duas hipóteses de cálculo com base no procedimento da ABNT NBR 14762:2010, considerando compressão centrada.

Na primeira hipótese considerou-se cada cantoneira como uma barra isolada, independente da presença das chapas separadoras, admitiu-se instabilidade local, global por flexo-torção e global por flexão, ou seja, o procedimento recomendado para o dimensionamento de cantoneira isolada.

Na segunda hipótese considerou-se barra composta admitindo-se apenas instabilidade local e global por flexão em relação ao eixo principal de menor inércia do conjunto. Para as duas hipóteses adotadas foram realizados cálculos com valores de coeficiente de flambagem (K) igual a 1,0 e 0,5.

5.1 Análise numérica – Inicial

5.1.1 Dupla cantoneira simples

Nas Tabelas 5.1 a 5.3 são apresentados alguns resultados obtidos na análise de sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais em dupla cantoneira simples. Foram realizadas simulações em modelos sem e com imperfeições geométricas iniciais. Nos modelos em que foram adotadas imperfeições associadas ao modo de flexo-torção também foi adotada imperfeição associada ao modo de flexão no valor de $L_c/1500$.

É importante lembrar que foram feitas duas simulações para as chapas separadoras: em uma prolongou-se a aba da cantoneira na posição das chapas separadoras, enquanto

na outra foram adicionadas chapas na face externa da aba fazendo a compatibilização de deslocamentos. Como os resultados das duas simulações foram muito próximos, aqui são apresentados apenas os resultados referentes à simulação em que foram adicionadas chapas na face externa das abas. Os Resultados da outra simulação estão apresentados no Apêndice A.

Tabela 5.1 – Análise de sensibilidade às imperfeições: perfil 2L 60x1,50

L_c (mm)	Número de chapas separadoras	Imperfeições: flexo-torção e flexão	Compressão centrada			Compressão excêntrica		
			N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y	N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y
600 ($\lambda_x=31$)	0	0 e 0	-	-	-	41,7	FT/F*	0,43
		0,14t e $L_c/1500$	33,6	FT	0,35	-	-	-
		0,64t e $L_c/1500$	33,6	FT	0,35	39,8	FT/F*	0,41
		1,55t e $L_c/1500$	33,5	FT	0,35	34,5	FT/F*	0,36
	2	0 e 0	-	-	-	34,8	FT	0,36
		0,14t e $L_c/1500$	35,0	FT	0,36	-	-	-
		0,64t e $L_c/1500$	-	-	-	33,0	FT	0,34
		1,55t e $L_c/1500$	32,4	FT	0,34	31,6	FT	0,33
	4	0 e 0	-	-	-	35,3	FT	0,37
		0,14t e $L_c/1500$	34,9	FT	0,36	-	-	-
		0,64t e $L_c/1500$	-	-	-	32,5	FT	0,34
		1,55t e $L_c/1500$	31,4	FT	0,33	30,3	FT	0,31
	$N_{c,R}^{(1)} = 12,8$ kN		$N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,13$					
	$N_{c,R}^{(2)} = 39,0$ kN		$N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,40$					
	1200 ($\lambda_x=63$)	0	0 e 0	-	-	-	29,4	FT/F*
0,14t e $L_c/1500$			31,1	FT	0,32	-	-	-
0,64t e $L_c/1500$			23,2	FT	0,24	29,3	FT/F*	0,30
1,55t e $L_c/1500$			23,1	FT	0,24	29,4	FT/F*	0,30
2		0 e 0	-	-	-	30,2	FT/F	0,31
		0,14t e $L_c/1500$	29,8	FT/F	0,31	-	-	-
		0,64t e $L_c/1500$	-	-	-	27,9	FT/F	0,29
		1,55t e $L_c/1500$	28,4	FT/F	0,29	26,9	FT/F	0,28
5		0 e 0	-	-	-	30,0	FT/F	0,31
		0,14t e $L_c/1500$	28,8	FT/F	0,30	-	-	-
		0,64t e $L_c/1500$	27,2	FT/F	0,28	26,8	FT/F	0,28
		1,55t e $L_c/1500$	24,7	FT/F	0,26	24,4	FT/F	0,25
7		0 e 0	-	-	-	31,1	FT/F	0,32
		0,14t e $L_c/1500$	28,5	FT/F	0,30	-	-	-
		0,64t e $L_c/1500$	-	-	-	25,4	FT/F	0,26
	1,55t e $L_c/1500$	23,4	FT/F	0,24	22,3	FT/F	0,23	
$N_{c,R}^{(1)} = 12,8$ kN		$N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,13$						
$N_{c,R}^{(2)} = 35,2$ kN		$N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,37$						

continua na próxima página...

...continuação Tabela 5.1

L_c (mm)	Número de chapas separadoras	Imperfeições: flexo-torção e flexão	Compressão centrada			Compressão excêntrica		
			N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y	N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y
1800 ($\lambda_x=94$)	0	0 e 0	-	-	-	19,8	FT/F*	0,21
		0,14t e $L_c/1500$	24,7	FT/F*	0,26	-	-	-
		0,64t e $L_c/1500$	18,3	FT/F*	0,19	19,8	FT/F	0,21
		1,55t e $L_c/1500$	18,2	FT/F*	0,19	19,7	FT/F	0,20
	1	0 e 0	-	-	-	23,9	FT/F	0,25
		0,14t e $L_c/1500$	25,1	FT/F	0,26	-	-	-
		0,64t e $L_c/1500$	23,8	FT/F	0,25	23,2	FT/F	0,24
		1,55t e $L_c/1500$	23,1	FT/F	0,24	22,6	FT/F	0,23
	2	0 e 0	-	-	-	25,0	FT/F	0,26
		0,14t e $L_c/1500$	23,8	FT/F	0,25	-	-	-
		0,64t e $L_c/1500$	23,4	FT/F	0,24	22,7	FT/F	0,24
		1,55t e $L_c/1500$	22,7	FT/F	0,24	21,9	FT/F	0,23
	6	0 e 0	-	-	-	26,0	FT/F	0,27
		0,14t e $L_c/1500$	24,6	FT/F	0,26	-	-	-
		0,64t e $L_c/1500$	23,0	FT/F	0,24	22,4	FT/F	0,23
		1,55t e $L_c/1500$	20,7	FT/F	0,21	20,0	FT/F	0,21
	11	0 e 0	-	-	-	27,1	FT/F	0,28
		0,14t e $L_c/1500$	24,6	FT/F	0,26	-	-	-
		0,64t e $L_c/1500$	21,3	FT/F	0,22	20,5	FT/F	0,21
		1,55t e $L_c/1500$	17,8	FT/F	0,18	16,9	FT/F	0,18
	$N_{c,R}^{(1)} = 12,7$ kN		$N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,13$					
	$N_{c,R}^{(2)} = 29,8$ kN		$N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,31$					

$N_y = 96,4$ kN (dupla cantoneira) ($f_y = 273$ MPa).

N_{EF} – força de compressão resistente obtida via MEF.

L_c – comprimento da barra ($\lambda_x=L_c/r_x$).

FT – instabilidade por flexo-torção de cantoneira individual.

F – instabilidade por flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

F* – instabilidade por flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada.

$N_{c,R}^{(1)}$ – calculado com base na ABNT NBR 14762:2010 admitindo cantoneira isolada.

$N_{c,R}^{(2)}$ – calculado com base na ABNT NBR 14762:2010 admitindo flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

Nas Figuras 5.1 a 5.10 são apresentados os resultados obtidos na análise numérica comparados com os resultados das hipóteses de cálculo adotadas.

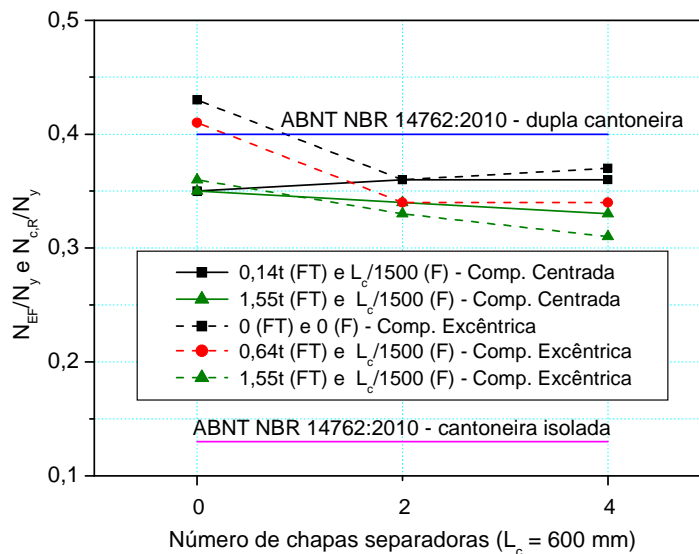


Figura 5.1 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2L 60x1,50

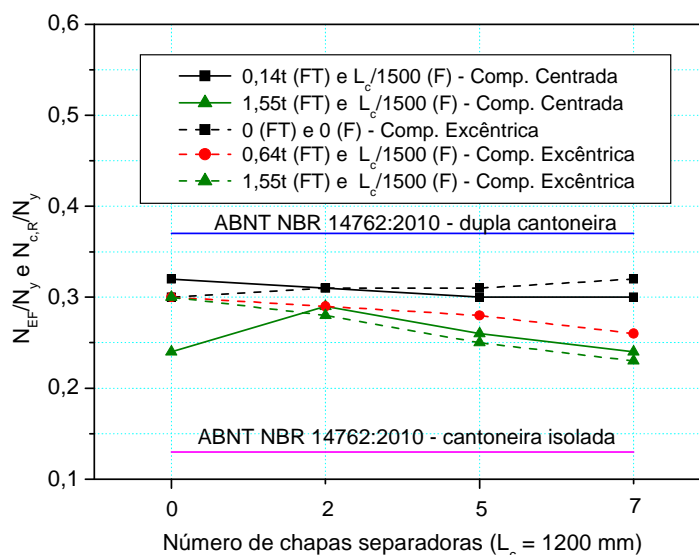


Figura 5.2 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2L 60x1,50

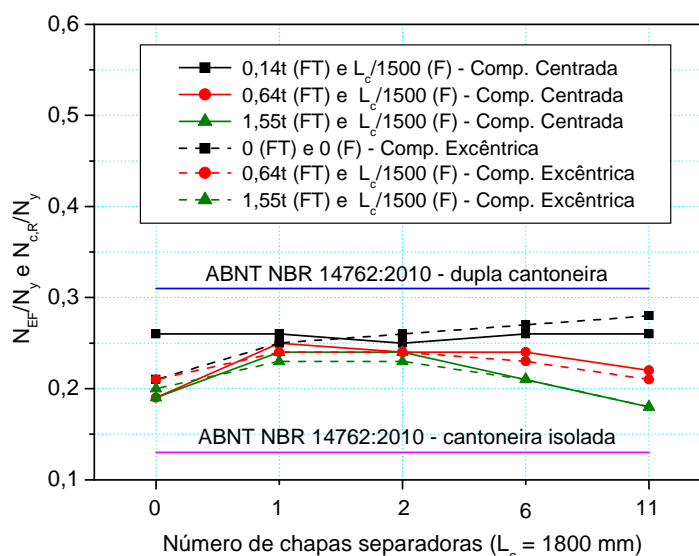


Figura 5.3 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2L 60x1,50

Tabela 5.2 – Análise de sensibilidade às imperfeições: perfil 2L 60x3,00

L_c (mm)	Número de chapas separadoras	Imperfeições: flexo-torção e flexão	Compressão centrada			Compressão excêntrica			
			N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y	N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y	
600 ($\lambda_x=32$)	0	0 e 0	-	-	-	94,6	FT/F*	0,50	
		0,14t e $L_c/1500$	135,8	FT	0,72	-	-	0,50	
		0,64t e $L_c/1500$	121,6	FT	0,65	94,6	FT/F*	0,50	
		1,55t e $L_c/1500$	112,3	FT	0,60	95,0	FT/F*	0,50	
	1	0 e 0	-	-	-	133,1	FT/F	0,71	
		0,14t e $L_c/1500$	142,0	FT	0,75	-	-	-	
		0,64t e $L_c/1500$	122,2	FT	0,65	111,6	FT/F	0,59	
		1,55t e $L_c/1500$	109,1	FT	0,58	96,8	FT/F	0,51	
	2	0 e 0	-	-	-	143,5	FT/F	0,76	
		0,14t e $L_c/1500$	146,7	FT	0,78	-	-	-	
		0,64t e $L_c/1500$	123,9	FT	0,66	126,4	FT/F	0,67	
		1,55t e $L_c/1500$	104,4	FT	0,55	108,8	FT/F	0,58	
	4	0 e 0	-	-	-	150,9	FT/F	0,80	
		0,14t e $L_c/1500$	150,6	FT	0,80	-	-	-	
		0,64t e $L_c/1500$	122,7	FT	0,65	122,0	FT/F	0,65	
		1,55t e $L_c/1500$	98,3	FT	0,52	96,9	FT/F	0,51	
	$N_{c,R}^{(1)} = 96,5$ kN		$N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,51$						
	$N_{c,R}^{(2)} = 137,7$ kN		$N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,73$						
	1200 ($\lambda_x=63$)	0	0 e 0	-	-	-	67,8	FT/F*	0,36
			0,14t e $L_c/1500$	120,5	FT/F*	0,64	-	-	-
0,64t e $L_c/1500$			120,9	FT/F*	0,64	66,3	FT/F*	0,35	
1,55t e $L_c/1500$			111,0	FT/F*	0,59	65,8	FT/F*	0,35	
1		0 e 0	-	-	-	118,2	FT/F	0,63	
		0,14t e $L_c/1500$	128,1	FT/F	0,68	-	-	-	
		0,64t e $L_c/1500$	117,4	FT/F	0,62	102,2	FT/F	0,54	
		1,55t e $L_c/1500$	107,6	FT/F	0,57	92,9	FT/F	0,49	
2		0 e 0	-	-	-	127,5	FT/F	0,68	
		0,14t e $L_c/1500$	131,3	FT/F	0,70	-	-	-	
		0,64t e $L_c/1500$	116,4	FT/F	0,62	112,5	FT/F	0,60	
		1,55t e $L_c/1500$	103,3	FT/F	0,55	99,9	FT/F	0,53	
5		0 e 0	-	-	-	142,6	F	0,76	
		0,14t e $L_c/1500$	127,6	FT/F	0,68	-	-	-	
		0,64t e $L_c/1500$	103,8	FT/F	0,55	103,5	FT/F	0,55	
		1,55t e $L_c/1500$	81,5	FT/F	0,43	81,4	FT/F	0,43	
7		0 e 0	-	-	-	145,4	F	0,77	
		0,14t e $L_c/1500$	125,8	FT/F	0,67	-	-	-	
		0,64t e $L_c/1500$	99,0	FT/F	0,53	97,0	FT/F	0,51	
		1,55t e $L_c/1500$	74,2	FT/F	0,39	71,9	FT/F	0,38	
$N_{c,R}^{(1)} = 94,4$ kN		$N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,50$							
$N_{c,R}^{(2)} = 122,5$ kN		$N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,65$							

continua na próxima página...

...continuação Tabela 5.2

L_c (mm)	Número de chapas separadoras	Imperfeições: flexo-torção e flexão	Compressão centrada			Compressão excêntrica		
			N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y	N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y
1800 ($\lambda_x=95$)	0	0 e 0	-	-	-	47,1	FT/F*	0,25
		0,14t e $L_c/1500$	89,3	FT/F*	0,47	-	-	-
		0,64t e $L_c/1500$	78,6	FT/F*	0,42	45,3	FT/F*	0,24
		1,55t e $L_c/1500$	68,7	FT/F*	0,36	44,4	FT/F*	0,24
	1	0 e 0	-	-	-	97,4	FT/F	0,52
		0,14t e $L_c/1500$	98,1	FT/F	0,52	-	-	-
		0,64t e $L_c/1500$	94,5	FT/F	0,50	88,8	FT/F	0,47
		1,55t e $L_c/1500$	87,5	FT/F	0,46	83,9	FT/F	0,45
	2	0 e 0	-	-	-	111,0	FT/F	0,59
		0,14t e $L_c/1500$	101,9	FT/F	0,54	-	-	-
		0,64t e $L_c/1500$	98,0	FT/F	0,52	94,3	FT/F	0,50
		1,55t e $L_c/1500$	91,2	FT/F	0,48	85,9	FT/F	0,46
	4	0 e 0	-	-	-	112,9	F	0,60
		0,14t e $L_c/1500$	100,2	FT/F	0,53	-	-	-
		0,64t e $L_c/1500$	90,4	FT/F	0,48	91,7	FT/F	0,49
		1,55t e $L_c/1500$	81,2	FT/F	0,43	81,8	FT/F	0,43
	6	0 e 0	-	-	-	108,8	F	0,58
		0,14t e $L_c/1500$	99,0	FT/F	0,53	-	-	-
		0,64t e $L_c/1500$	86,4	FT/F	0,46	84,1	FT/F	0,45
		1,55t e $L_c/1500$	68,8	FT/F	0,37	67,9	FT/F	0,36
	11	0 e 0	-	-	-	102,4	F	0,54
		0,14t e $L_c/1500$	95,2	FT/F	0,51	-	-	-
		0,64t e $L_c/1500$	78,5	FT/F	0,42	74,4	FT/F	0,39
		1,55t e $L_c/1500$	57,0	FT/F	0,30	53,0	FT/F	0,28
		$N_{c,R}^{(1)} = 50,5$ kN	$N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,27$					
		$N_{c,R}^{(2)} = 100,3$ kN	$N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,53$					
2400 ($\lambda_x=127$)	0	0 e 0	-	-	-	33,1	F*	0,18
		0,64t e $L_c/1500$	-	-	-	31,4	FT/F*	0,17
		1,55t e $L_c/1500$	-	-	-	30,4	FT/F*	0,16
	1	0 e 0	-	-	-	68,0	FT/F	0,36
		0,64t e $L_c/1500$	-	-	-	61,8	FT/F	0,33
		1,55t e $L_c/1500$	-	-	-	61,9	FT/F	0,33
	2	0 e 0	-	-	-	76,5	FT/F	0,41
		0,64t e $L_c/1500$	-	-	-	67,2	FT/F	0,36
		1,55t e $L_c/1500$	-	-	-	65,6	FT/F	0,35
	4	0 e 0	-	-	-	75,1	F	0,40
		0,64t e $L_c/1500$	-	-	-	63,8	FT/F	0,34
		1,55t e $L_c/1500$	-	-	-	57,3	FT/F	0,30

continua na próxima página...

...continuação Tabela 5.2

L_c (mm)	Número de chapas separadoras	Imperfeições: flexo-torção e flexão	Compressão centrada			Compressão excêntrica		
			N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y	N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y
2400 ($\lambda_x=127$)	8	0 e 0	-	-	-	72,9	F	0,39
		0,64t e $L_c/1500$	-	-	-	60,7	FT/F	0,32
		1,55t e $L_c/1500$	-	-	-	50,8	FT/F	0,27
		$N_{c,R}^{(1)} = 28,4$ kN	$N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,15$					
		$N_{c,R}^{(2)} = 74,4$ kN	$N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,39$					

$N_y = 188,4$ kN (dupla cantoneira) ($f_y = 273$ MPa).

N_{EF} – força de compressão resistente obtida via MEF.

L_c – comprimento da barra ($\lambda_x=L_c/r_x$).

FT – instabilidade por flexo-torção de cantoneira individual; F – instabilidade por flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto; F* – instabilidade por flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada.

$N_{c,R}^{(1)}$ – calculado com base na ABNT NBR 14762:2010 admitindo cantoneira isolada.

$N_{c,R}^{(2)}$ – calculado com base na ABNT NBR 14762:2010 admitindo flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

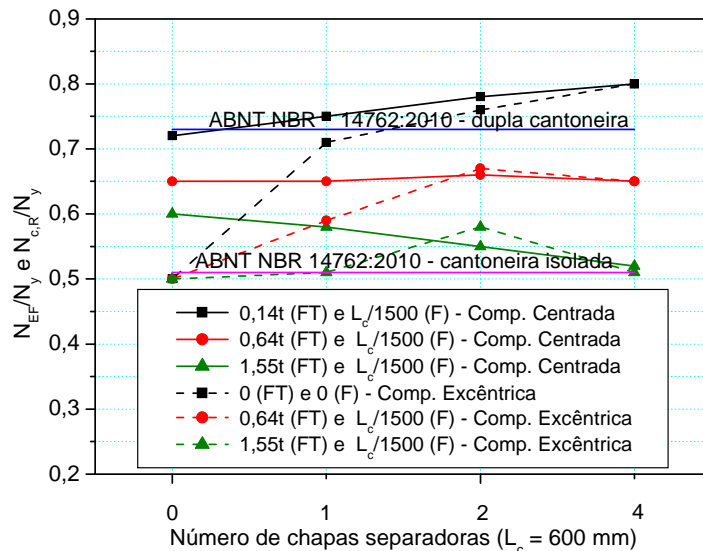


Figura 5.4 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2L 60x3,00

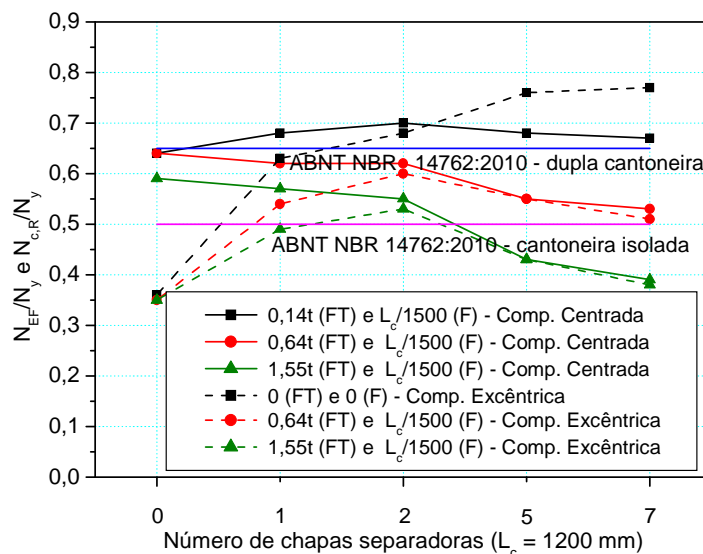


Figura 5.5 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2L 60x3,00

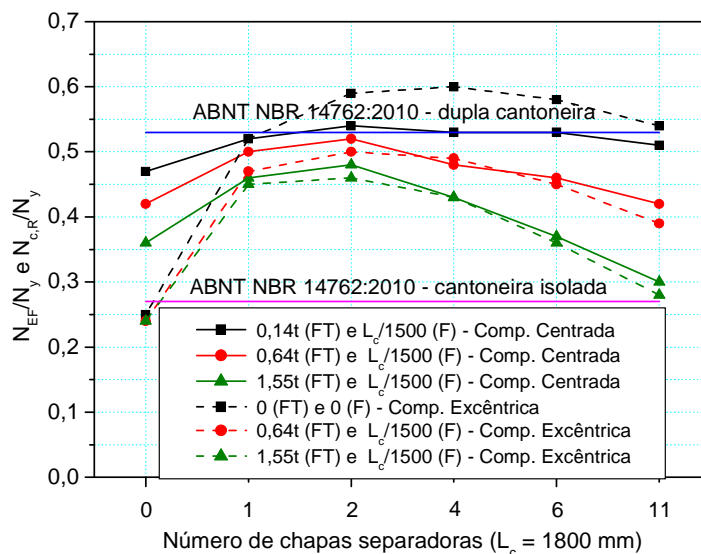


Figura 5.6 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2L 60x3,00

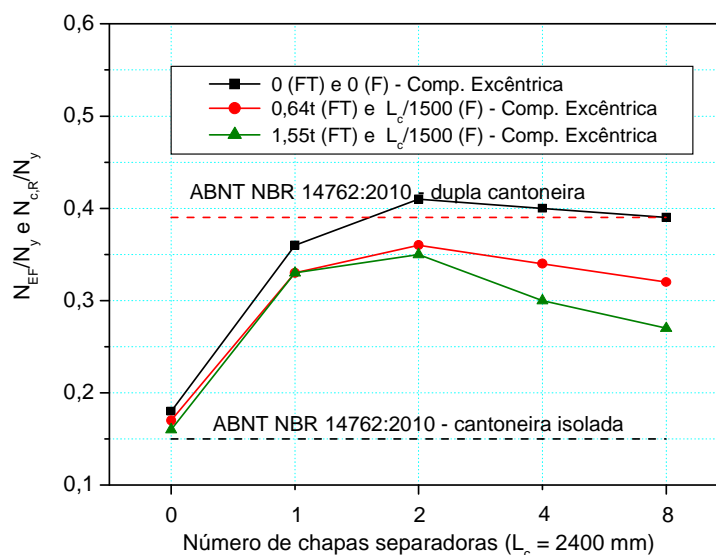


Figura 5.7 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2L 60x3,00

Tabela 5.3 – Análise de sensibilidade às imperfeições: perfil 2L 60x6,00

L_c (mm)	Número de chapas separadoras	Imperfeições: flexo-torção e flexão	Compressão centrada			Compressão excêntrica		
			N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y	N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y
600 ($\lambda_x=32$)	0	0 e 0	-	-	-	170,2	FT/F*	0,47
		0,14t e $L_c/1500$	338,9	FT/F*	0,94	-	-	-
		0,64t e $L_c/1500$	317,7	FT/F*	0,88	149,4	FT/F*	0,41
	2	0 e 0	340,6	F	0,94	272,2	FT/F	0,75
		0,14t e $L_c/1500$	332,5	FT/F	0,92	-	-	-
		0,64t e $L_c/1500$	314,3	FT/F	0,87	269,8	FT/F	0,75
	4	0 e 0	336,4	F	0,93	294,7	FT/F	0,82
		0,14t e $L_c/1500$	326,5	F	0,90	-	-	-
		0,64t e $L_c/1500$	314,0	FT/F	0,87	283,7	FT/F	0,79
	$N_{c,R}^{(1)} = 304,5$ kN		$N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,84$					
$N_{c,R}^{(2)} = 339,4$ kN		$N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,94$						

continua na próxima página...

...continuação Tabela 5.3

L_c (mm)	Número de chapas separadoras	Imperfeições: flexo-torção e flexão	Compressão centrada			Compressão excêntrica			
			N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y	N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y	
1200 ($\lambda_x=65$)	0	0 e 0	-	-	-	118,0	FT/F*	0,33	
		0,14t e $L_c/1500$	275,8	FT/F*	0,76	-	-	-	
		0,64t e $L_c/1500$	233,3	FT/F*	0,65	101,9	FT/F*	0,28	
	2	0 e 0	294,5	F	0,82	235,9	F	0,65	
		0,14t e $L_c/1500$	270,7	F	0,75	-	-	-	
		0,64t e $L_c/1500$	264,0	FT/F	0,73	231,6	F	0,64	
	5	0 e 0	287,5	F	0,80	264,3	F	0,73	
		0,14t e $L_c/1500$	264,5	F	0,73	-	-	-	
		0,64t e $L_c/1500$	247,6	FT/F	0,69	257,5	FT/F	0,71	
	7	0 e 0	283,5	F	0,79	269,1	F	0,75	
		0,14t e $L_c/1500$	261,7	F	0,73	-	-	-	
		0,64t e $L_c/1500$	246,0	FT/F	0,68	239,7	FT/F	0,66	
			$N_{c,R}^{(1)} = 183,1$ kN	$N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,51$					
			$N_{c,R}^{(2)} = 282,7$ kN	$N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,78$					
	1800 ($\lambda_x=97$)	0	0 e 0	-	-	-	80,0	FT/F*	0,22
			0,14t e $L_c/1500$	186,8	FT/F*	0,52	-	-	-
			0,64t e $L_c/1500$	153,2	FT/F*	0,42	68,9	FT/F*	0,19
		2	0 e 0	234,1	F	0,65	201,4	FT/F	0,56
0,14t e $L_c/1500$			197,4	F	0,55	-	-	-	
0,64t e $L_c/1500$			196,4	F	0,54	158,5	FT/F	0,44	
6		0 e 0	222,3	F	0,62	219,7	F	0,61	
		0,14t e $L_c/1500$	192,9	F	0,53	-	-	-	
		0,64t e $L_c/1500$	184,1	FT/F	0,51	181,0	FT/F	0,50	
11		0 e 0	213,5	F	0,59	222,3	F	0,62	
		0,14t e $L_c/1500$	188,9	F	0,52	-	-	-	
		0,64t e $L_c/1500$	177,4	FT/F	0,49	167,6	FT/F	0,46	
		$N_{c,R}^{(1)} = 86,8$ kN	$N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,24$						
		$N_{c,R}^{(2)} = 208,3$ kN	$N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,58$						

$N_y = 360,9$ kN (dupla cantoneira) ($f_y = 273$ MPa).

N_{EF} – força de compressão resistente obtida via MEF.

L_c – comprimento da barra ($\lambda_x = L_c / r_x$).

FT – instabilidade por flexo-torção de cantoneira individual.

F – instabilidade por flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

F* – instabilidade por flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada.

$N_{c,R}^{(1)}$ – calculado com base na ABNT NBR 14762:2010 admitindo cantoneira isolada.

$N_{c,R}^{(2)}$ – calculado com base na ABNT NBR 14762:2010 admitindo flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

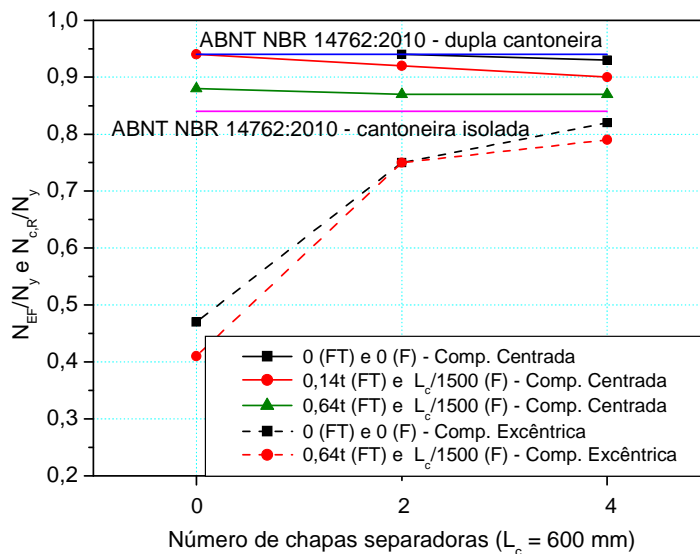


Figura 5.8 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2L 60x6,00

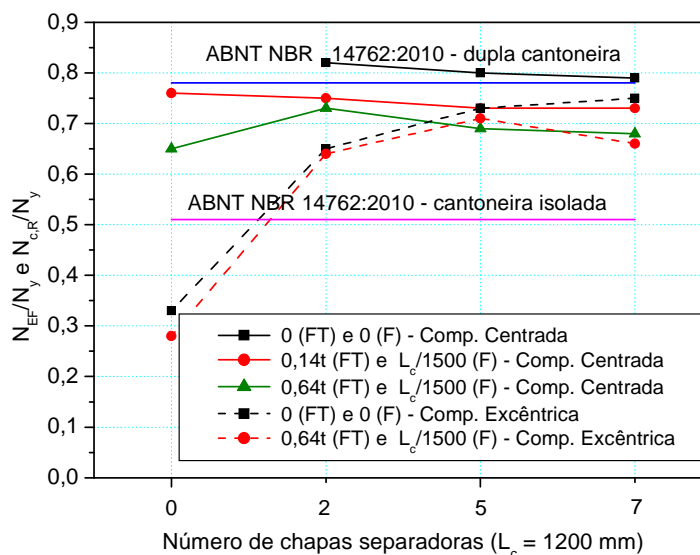


Figura 5.9 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2L 60x6,00

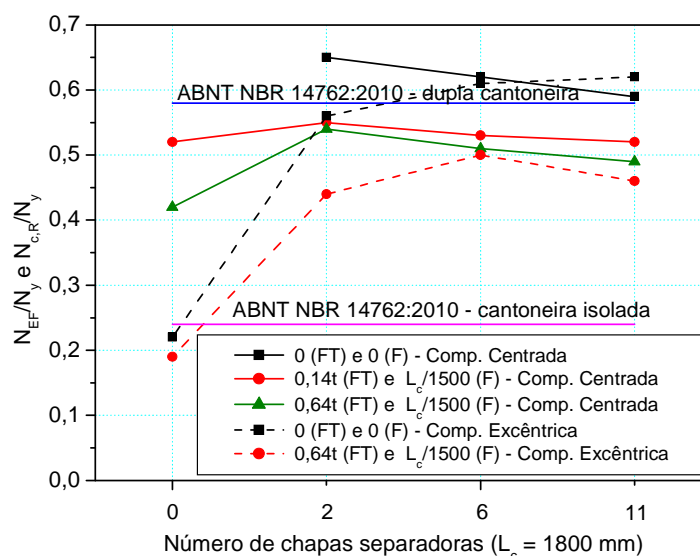


Figura 5.10 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2L 60x6,00

Nas Figuras 5.11 a 5.20 são ilustrados modos de instabilidade e a distribuição de tensões de von Mises observados na análise numérica da dupla cantoneira simples 2L 60x3,00 para o comprimento $L_c = 1200$ mm. São apresentados resultados para compressão centrada e excêntrica para a simulação em que foram modeladas chapas separadoras na face externa das cantoneiras, variando-se o número de chapas separadoras. Todos os modos apresentados foram observados para o nível de imperfeições 0,64t associado ao modo de flexo-torção e $L_c/1500$ associado ao modo de flexão.

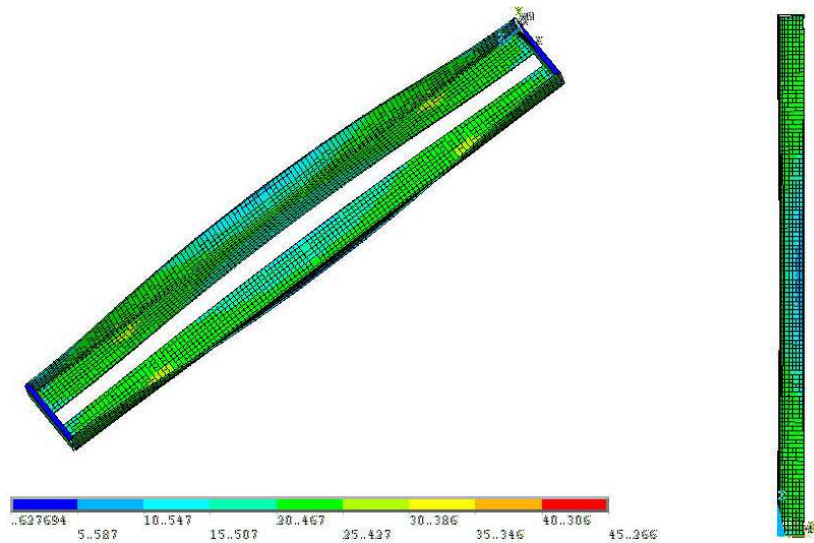


Figura 5.11 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão centrada)

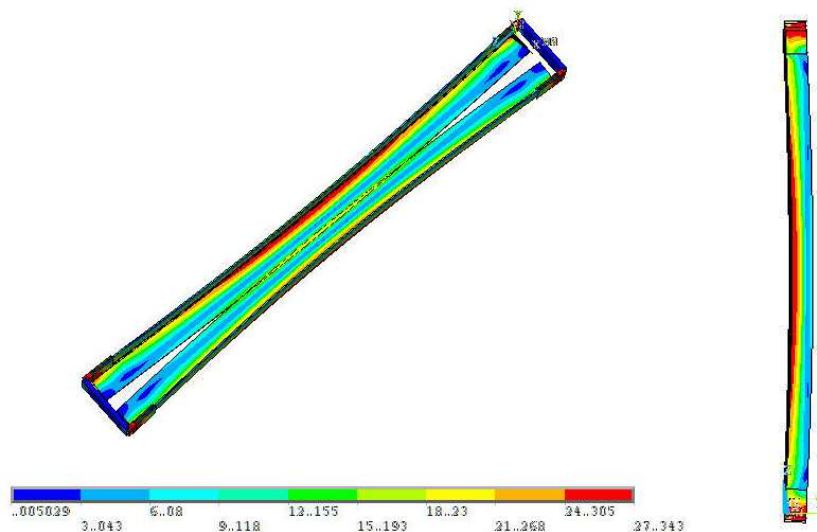


Figura 5.12 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão excêntrica)

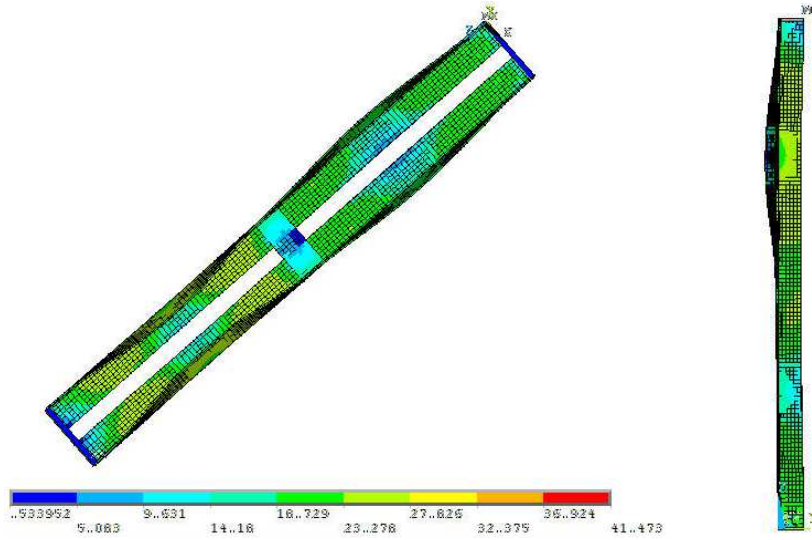


Figura 5.13 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão centrada)

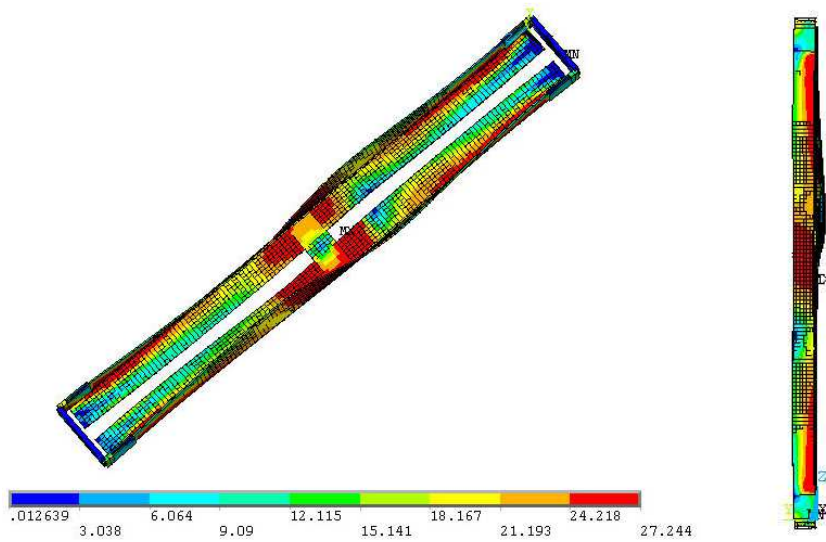


Figura 5.14 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão excêntrica)

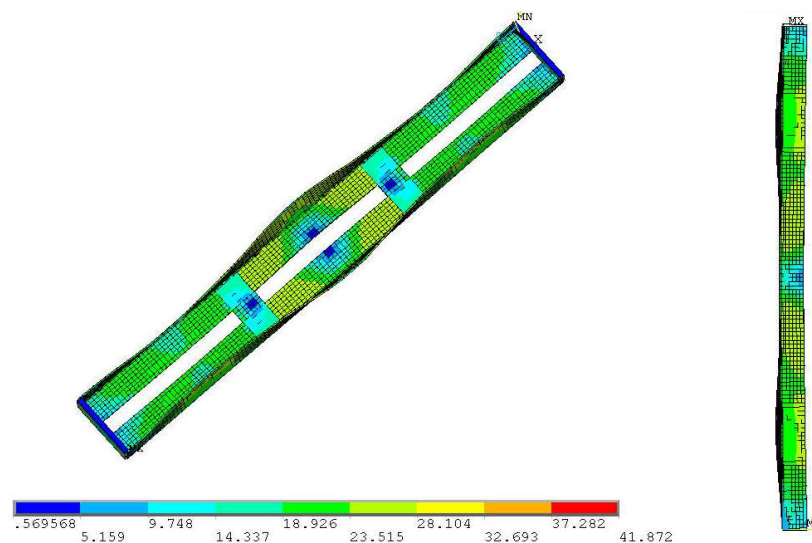


Figura 5.15 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão centrada)

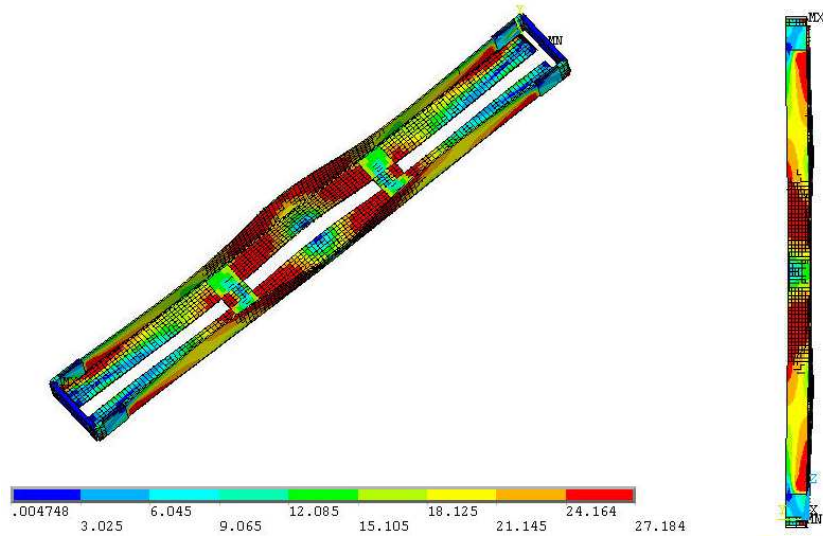


Figura 5.16 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão excêntrica)

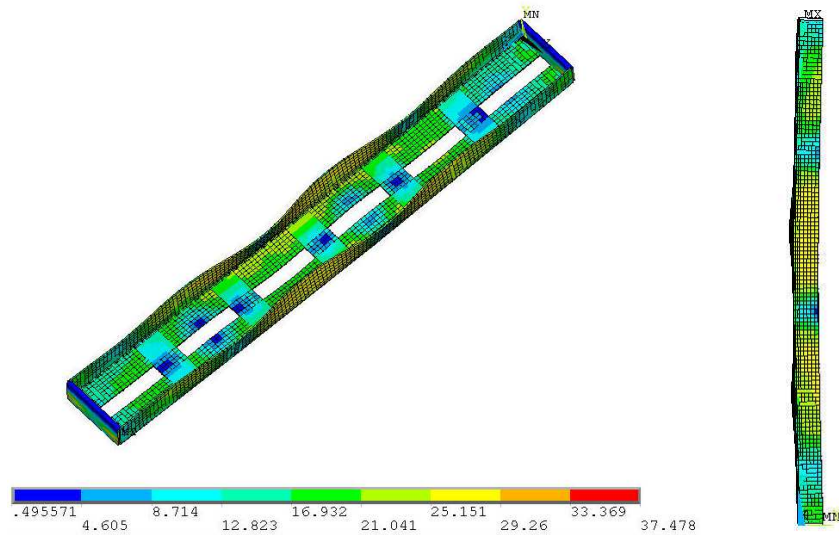


Figura 5.17 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão centrada)

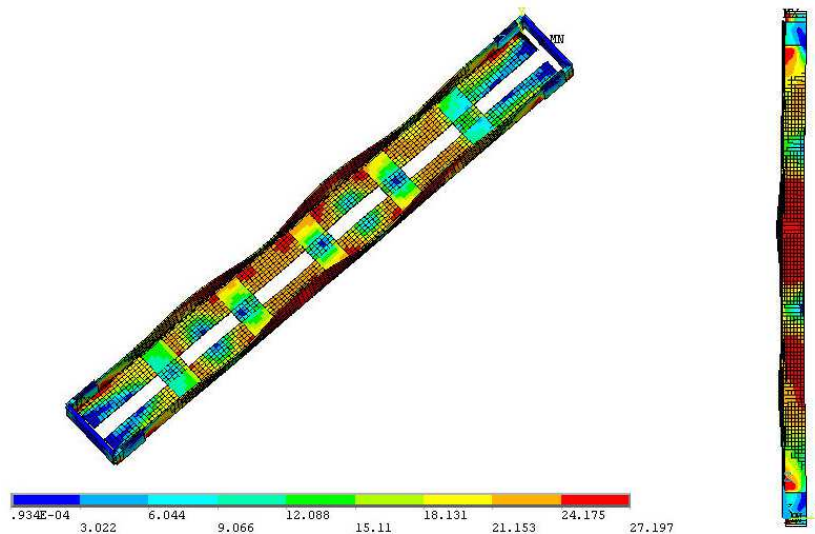


Figura 5.18 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão excêntrica)

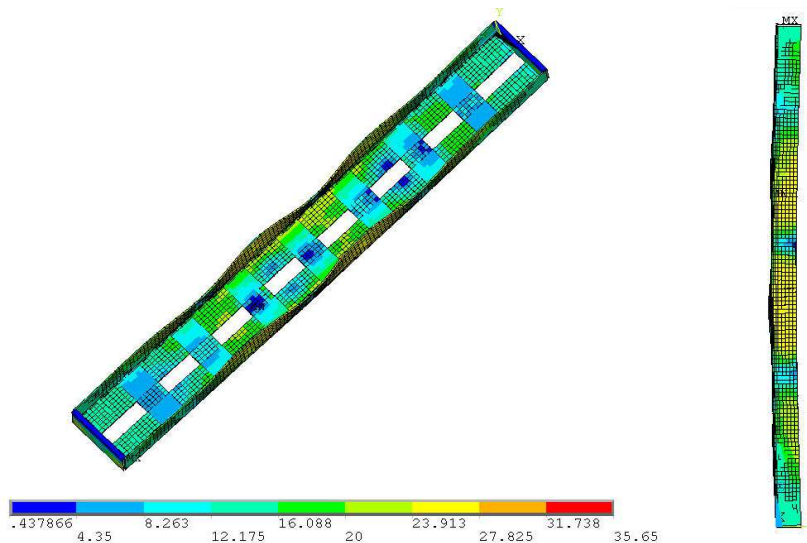


Figura 5.19 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão centrada)

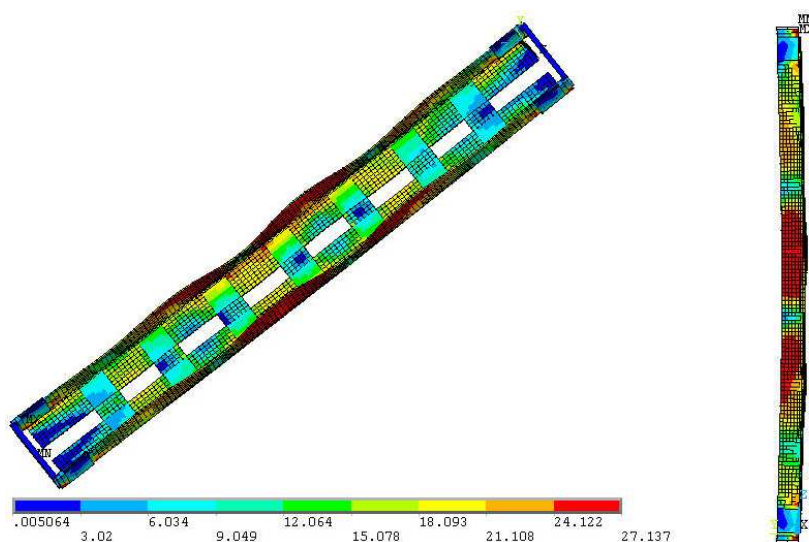


Figura 5.20 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão excêntrica)

Observa-se nos resultados da análise numérica das barras em dupla cantoneira simples 2L 60x1,50 que a inserção de chapas separadoras, em geral, não melhorou o comportamento das barras, pelo contrário, em alguns casos até prejudicou, principalmente no caso de barras com maiores imperfeições associadas ao modo de flexo-torção. Esse comportamento pode ser justificado pelo fato de se tratar de uma seção com elevada relação largura/espessura (b/t). Observa-se que o modo de instabilidade predominante foi flexo-torção, com isso, um aumento da imperfeição geométrica associada a esse modo pode ter induzido a ocorrência de instabilidade de forma mais precoce. Além disso, com o aumento do número de chapas separadoras houve um maior deslocamento do centróide da

seção, com isso gerou-se uma soma de efeitos, ou seja, a imperfeição geométrica inicial inserida e o deslocamento do centroide da seção. Nas análises sempre trabalhou-se com a combinação mais desfavorável.

Para as seções 2L 60x3,00 e 2L 60x6,00 a inserção de chapas separadoras aumentou de forma significativa a força resistente à compressão das barras, principalmente para compressão excêntrica, no entanto, a partir de certo número observa-se que a força permaneceu praticamente constante, para barras com imperfeições baixas. No caso de barras com maiores imperfeições, a partir de certo número de chapas separadoras observou-se uma tendência de redução na força resistente à compressão.

Em geral, os resultados da análise numérica apresentaram valores intermediários aos valores obtidos pelas hipóteses teóricas adotadas inicialmente. Para as barras submetidas à compressão centrada, em geral, os valores foram conservadores se comparados aos resultados da hipótese de cálculo que considerou cantoneira isolada, mesmo nos casos de barras sem chapas separadoras. Com o aumento do número de chapas separadoras os valores da análise numérica tenderam para os valores da hipótese que considerou barra composta, principalmente no caso de barras com baixas imperfeições geométricas iniciais e para as seções menos susceptíveis ao modo de instabilidade por flexo-torção (2L 60x3,00 e 2L 60x6,00). Em alguns casos até ultrapassou esse valor, principalmente nos casos em que houve predominância de instabilidade por flexão.

5.1.2 Dupla cantoneira enrijecida

Na Tabela 5.4 são apresentados os resultados obtidos para a análise de sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais da dupla cantoneira enrijecida 2L 50x15x1,50. Foram realizadas simulações em modelos sem e com imperfeições geométricas iniciais. Nos modelos em que foram adotadas imperfeições associadas aos modos local e de flexo-torção também foi adotada imperfeição associada ao modo de flexão no valor de $L_y/1500$. Foram realizadas simulações apenas para barras submetidas à

compressão excêntrica e para a simulação em que foram modeladas chapas separadoras na face externa da aba. Nas Figuras 5.21 a 5.24 são apresentados os resultados obtidos na análise numérica comparados com os resultados das hipóteses de cálculo adotadas.

Tabela 5.4 – Análise de sensibilidade às imperfeições: perfil 2Le 50x15x1,50

L_c (mm)	Número de chapas separadoras	Imperfeições: local; flexo-torção e flexão	Compressão excêntrica		
			N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y
600 ($\lambda_x=33$)	0	0; 0 e 0	47,7	FT/F*	0,47
		0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	47,2	FT/F*	0,47
	1	0; 0 e 0	62,0	FT/F	0,62
		0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	58,5	FT/F	0,58
	2	0; 0 e 0	64,0	FT/F	0,64
		0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	61,1	FT/F	0,61
	4	0; 0 e 0	65,3	FT/F	0,65
		0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	62,4	FT/F	0,62
			$N_{c,R}^{(1)} = 78,9$ kN $N_{c,R}^{(2)} = 94,2$ kN	$N_{c,R}^{(1)}/N_y = 0,79$ $N_{c,R}^{(2)}/N_y = 0,94$	
	1200 ($\lambda_x=66$)	0	0; 0 e 0	34,3	FT/F*
0,14t; 0,64t e $L_c/1500$			33,3	FT/F*	0,33
1		0; 0 e 0	46,5	FT/F	0,46
		0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	44,5	FT/F	0,44
2		0; 0 e 0	54,7	FT/F	0,54
		0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	48,4	FT/F	0,48
4		0; 0 e 0	62,6	FT/F	0,62
		0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	59,7	FT/F	0,59
6		0; 0 e 0	64,0	FT/F	0,64
		0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	62,4	FT/F	0,62
		$N_{c,R}^{(1)} = 46,6$ kN $N_{c,R}^{(2)} = 77,8$ kN	$N_{c,R}^{(1)}/N_y = 0,46$ $N_{c,R}^{(2)}/N_y = 0,77$		
1800 ($\lambda_x=100$)	0	0; 0 e 0	23,8	FT/F*	0,24
		0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	22,9	FT/F*	0,23
	1	0; 0 e 0	38,2	FT/F	0,38
		0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	30,1	FT/F	0,30
	2	0; 0 e 0	45,3	FT/F	0,45
		0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	36,3	FT/F	0,36
	4	0; 0 e 0	56,4	FT/F	0,56
		0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	47,6	FT/F	0,47
	6	0; 0 e 0	54,5	F	0,54
		0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	47,1	F	0,47
8	0; 0 e 0	53,4	F	0,53	
	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	46,7	F	0,46	
		$N_{c,R}^{(1)} = 28,5$ kN $N_{c,R}^{(2)} = 56,6$ kN	$N_{c,R}^{(1)}/N_y = 0,28$ $N_{c,R}^{(2)}/N_y = 0,56$		

...continua na próxima página

...continuação – Tabela 5.4

L_c (mm)	Número de chapas separadoras	Imperfeições: local; flexo-torção e flexão	Compressão excêntrica			
			N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y	
2400 ($\lambda_x=133$)	0	0; 0 e 0	16,6	FT/F*	0,17	
		0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	16,0	FT/F*	0,16	
	1	0; 0 e 0	29,4	FT/F	0,29	
		0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	26,7	FT/F	0,27	
	2	0; 0 e 0	32,8	FT/F	0,33	
		0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	29,7	FT/F	0,30	
	4	0; 0 e 0	36,1	F	0,36	
		0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	31,0	F	0,31	
	6	0; 0 e 0	36,0	F	0,36	
		0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	32,7	F	0,33	
	8	0; 0 e 0	35,8	F	0,36	
		0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	32,7	F	0,33	
			$N_{c,R}^{(1)} = 17,9$ kN	$N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,18$		
			$N_{c,R}^{(2)} = 36,1$ kN	$N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,36$		

$N_y = 100,5$ kN (dupla cantoneira) ($f_y = 273$ MPa).

N_{EF} – força de compressão resistente obtida via MEF.

L_c – comprimento da barra ($\lambda_x=L_c/r_x$).

FT – instabilidade por flexo-torção de cantoneira individual.

F – instabilidade por flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

F* – instabilidade por flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada.

$N_{c,R}^{(1)}$ – calculado com base na ABNT NBR 14762:2010 admitindo cantoneira isolada.

$N_{c,R}^{(2)}$ – calculado com base na ABNT NBR 14762:2010 admitindo flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

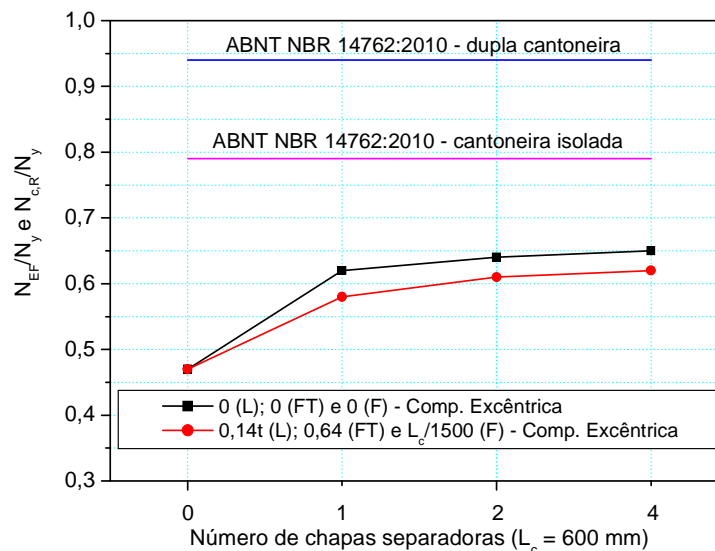


Figura 5.21 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2Le 50x15x1,50

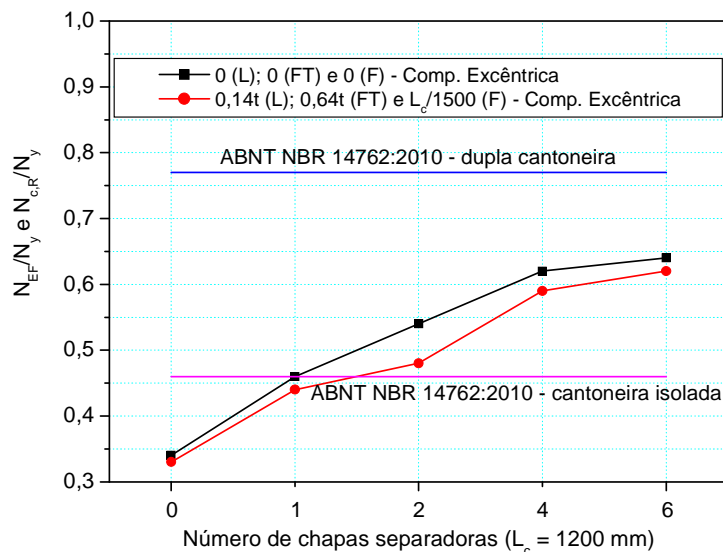


Figura 5.22 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2Le 50x15x1,50

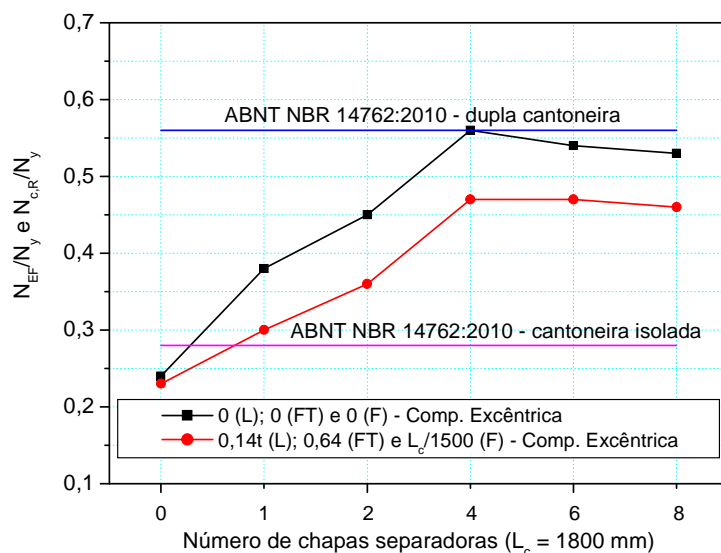


Figura 5.23 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2Le 50x15x1,50

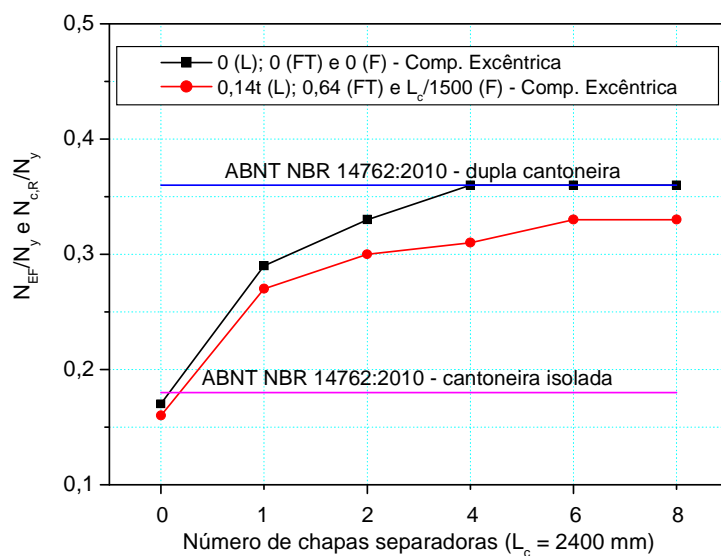


Figura 5.24 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2Le 50x15x1,50

Nas Figuras 5.25 a 5.29 são ilustrados modos de instabilidade e a distribuição de tensões de von Mises observados na análise numérica da dupla cantoneira enrijecida 2Le 50x15x1,50 para o comprimento $L_c = 1200$ mm, variando-se o número de chapas separadoras. Todos os modos observados são para o nível de imperfeições 0,14t associado ao modo local; 0,64t associado ao modo de flexo-torção e $L_c/1500$ associado ao modo de flexão.

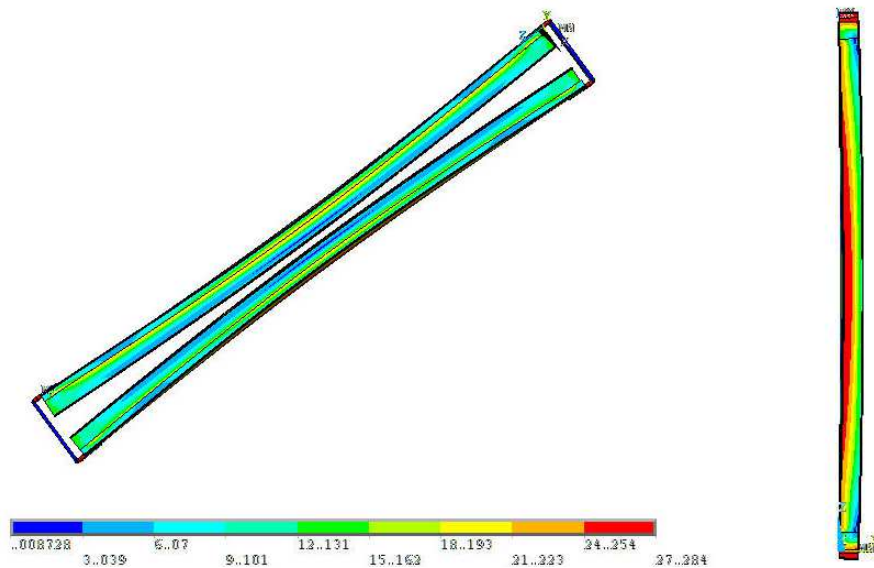


Figura 5.25 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises

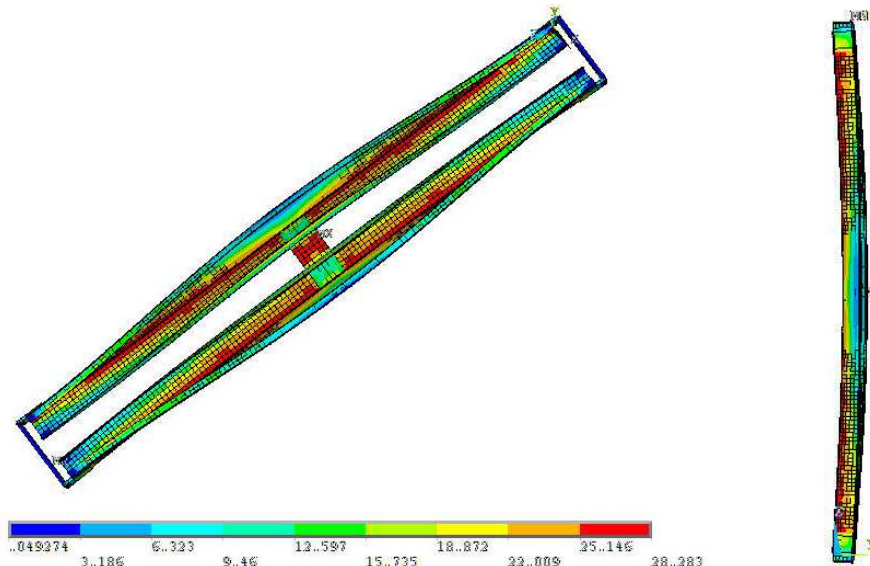


Figura 5.26 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises

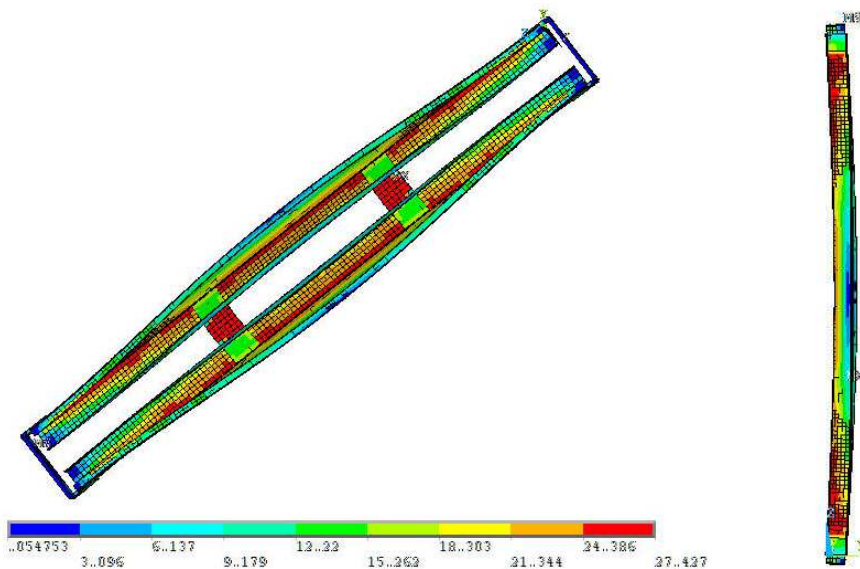


Figura 5.27 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises

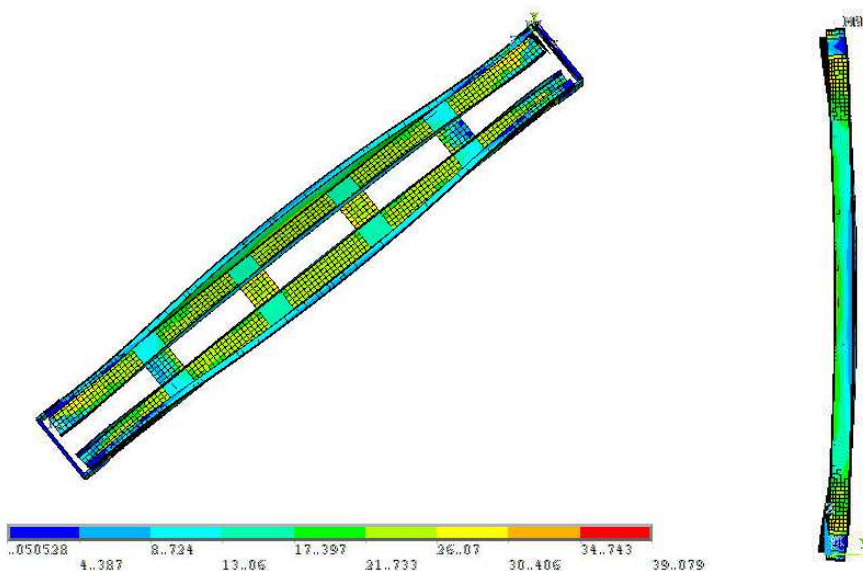


Figura 5.28 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises

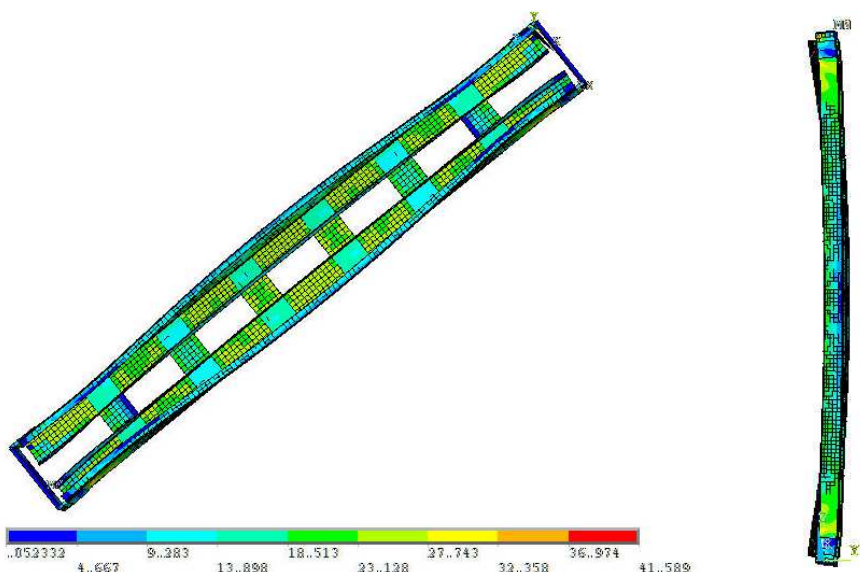


Figura 5.29 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises

Para a dupla cantoneira enrijecida 2Le 50x15x1,50 observa-se que a inserção de chapas separadoras também aumentou de forma significativa a força resistente à compressão das barras, no entanto, assim como no caso das duplas cantoneiras simples, a partir de um certo número a força resistente permaneceu praticamente constante. Neste caso, as barras não apresentaram tendência de redução na força resistente à compressão.

Em geral, as barras isoladas apresentaram valores inferiores aos obtidos pela hipótese que considerou cantoneira isolada, no entanto, com o aumento do número de chapas separadoras os valores da análise numérica tenderam para valores intermediários, e em alguns casos tendendo para os valores da hipótese que considerou barra composta, principalmente para barras mais longas, ou seja, casos em que houve predominância de instabilidade por flexão.

5.2 Análise numérica – Final

5.2.1 Dupla cantoneira simples

Nas Tabelas 5.5 e 5.6 são apresentados os resultados obtidos na análise de sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais da dupla cantoneira simples 2L 60x2,00. Nos modelos em que foram adotadas imperfeições associadas ao modo de flexo-torção também foi adotada imperfeição associada ao modo de flexão no valor de $L_0/1500$. Para compressão excêntrica em alguns modelos não se adotou imperfeição associada ao modo de flexo-torção, neste caso, também não se adotou imperfeição associada ao modo de flexão, ou seja, o modelo foi considerado sem imperfeições. Os resultados apresentados na Tabela 5.5 referem-se às simulações em que na posição das chapas separadoras foi feito o acoplamento de deslocamentos dos nós. Na Tabela 5.6 são apresentados os resultados obtidos na análise em que foram modeladas as chapas separadoras, neste caso, foi feita a compatibilização de deslocamentos dos nós das chapas separadoras e das cantoneiras. Nas Figuras 5.30 a 5.37 são apresentados os resultados obtidos na análise numérica comparados com os resultados das hipóteses teóricas adotadas.

Tabela 5.5 – Análise de sensibilidade às imperfeições: perfil 2L 60x2,00 – Acoplamento de nós

L_c (mm)	Comprimento destravado (NCH)	Imperfeições: flexo-torção e flexão	Compressão centrada			Compressão excêntrica		
			N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y	N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y
600 ($\lambda_x=31$)	600	0 e 0	-	-	-	71,6	FT	0,44
	(0)	0,64t e $L_c/1500$	84,0	FT	0,51	71,9	FT	0,44
	300	0 e 0	-	-	-	73,1	FT	0,45
	(1)	0,64t e $L_c/1500$	86,9	FT	0,53	72,2	FT	0,44
	200	0 e 0	-	-	-	76,9	FT	0,47
	(2)	0,64t e $L_c/1500$	85,8	FT	0,52	75,1	FT	0,46
	150	0 e 0	-	-	-	77,3	FT	0,47
	(3)	0,64t e $L_c/1500$	84,5	FT	0,52	74,9	FT	0,46
	120	0 e 0	-	-	-	78,2	FT	0,48
	(4)	0,64t e $L_c/1500$	85,5	FT	0,52	75,3	FT	0,46
	100	0 e 0	-	-	-	79,0	FT	0,48
	(5)	0,64t e $L_c/1500$	85,2	FT	0,52	76,7	FT	0,47
	54,5	0 e 0	-	-	-	-	-	-
	(10)	0,64t e $L_c/1500$	87,6	FT	0,54	-	-	-
	37,5	0 e 0	-	-	-	82,6	FT	0,51
(15)	0,64t e $L_c/1500$	92,3	FT	0,56	80,6	FT	0,49	
K = 0,5: $N_{c,R}^{(1)} = 30,7$ kN $N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,19$			K = 1,0: $N_{c,R}^{(1)} = 30,5$ kN $N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,19$					
$N_{c,R}^{(2)} = 79,3$ kN $N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,49$			$N_{c,R}^{(2)} = 76,8$ kN $N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,47$					
1200 ($\lambda_x=63$)	1200	0 e 0	-	-	-	48,8	FT/F*	0,30
	(0)	0,64t e $L_c/1500$	48,8	FT	0,30	49,2	FT/F*	0,30
	600	0 e 0	-	-	-	54,3	FT/F	0,33
	(1)	0,64t e $L_c/1500$	74,0	FT	0,45	52,6	FT/F	0,32
	400	0 e 0	-	-	-	60,7	FT/F	0,37
	(2)	0,64t e $L_c/1500$	79,9	FT	0,49	59,5	FT/F	0,36
	300	0 e 0	-	-	-	72,5	FT/F	0,44
	(3)	0,64t e $L_c/1500$	79,3	FT	0,48	67,0	FT/F	0,41
	240	0 e 0	-	-	-	75,3	FT/F	0,46
	(4)	0,64t e $L_c/1500$	83,7	FT	0,51	70,9	FT/F	0,43
	200	0 e 0	-	-	-	72,2	FT/F	0,44
	(5)	0,64t e $L_c/1500$	82,1	FT	0,50	69,8	FT/F	0,43
	171	0 e 0	-	-	-	74,8	FT/F	0,46
	(6)	0,64t e $L_c/1500$	81,0	FT	0,50	73,3	FT/F	0,45
	150	0 e 0	-	-	-	73,1	FT/F	0,45
(7)	0,64t e $L_c/1500$	79,8	FT	0,49	71,9	FT/F	0,44	
133	0 e 0	-	-	-	72,3	FT/F	0,44	
(8)	0,64t e $L_c/1500$	80,7	FT	0,49	71,3	FT/F	0,44	
120	0 e 0	-	-	-	71,6	FT/F	0,44	
(9)	0,64t e $L_c/1500$	78,8	FT	0,48	71,3	FT/F	0,44	

...continua na próxima página

...continuação – Tabela 5.5

L _c (mm)	Comprimento destravado (NCH)	Imperfeições: flexo-torção e flexão	Compressão centrada			Compressão excêntrica		
			N _{EF} (kN)	Modo de falha	N _{EF} /N _y	N _{EF} (kN)	Modo de falha	N _{EF} /N _y
1200 (λ _x =63)	109	0 e 0	-	-	-	71,6	FT/F	0,44
	(10)	0,64t e L ₀ /1500	79,9	FT	0,49	71,9	FT/F	0,44
	75	0 e 0	-	-	-	71,6	FT/F	0,44
	(15)	0,64t e L ₀ /1500	79,7	FT	0,49	71,7	FT/F	0,44
	57	0 e 0	-	-	-	-	-	-
	(20)	0,64t e L ₀ /1500	81,0	FT	0,50	-	-	-
	39	0 e 0	-	-	-	-	-	-
	(30)	0,64t e L ₀ /1500	82,4	FT	0,50	-	-	-
	33	0 e 0	-	-	-	73,7	FT/F	0,45
	(35)	0,64t e L ₀ /1500	85,5	FT	0,52	74,7	FT/F	0,46
K = 0,5: N _{c,R} ⁽¹⁾ = 30,5 kN N _{c,R} ⁽¹⁾ / N _y = 0,19 N _{c,R} ⁽²⁾ = 76,8 kN N _{c,R} ⁽²⁾ / N _y = 0,47			K = 1,0: N _{c,R} ⁽¹⁾ = 29,8 kN N _{c,R} ⁽¹⁾ / N _y = 0,18 N _{c,R} ⁽²⁾ = 67,2 kN N _{c,R} ⁽²⁾ / N _y = 0,41					
1800 (λ _x =94)	1800	0 e 0	-	-	-	33,4	FT/F*	0,20
	(0)	0,64t e L ₀ /1500	38,9	FT	0,24	33,8	FT/F*	0,20
	900	0 e 0	-	-	-	43,2	FT/F	0,26
	(1)	0,64t e L ₀ /1500	66,8	FT	0,41	41,6	FT/F	0,25
	600	0 e 0	-	-	-	47,8	FT/F	0,29
	(2)	0,64t e L ₀ /1500	68,9	FT	0,42	47,0	FT/F	0,29
	450	0 e 0	-	-	-	57,8	FT/F	0,35
	(3)	0,64t e L ₀ /1500	71,6	FT	0,44	56,8	FT/F	0,35
	360	0 e 0	-	-	-	64,5	FT/F	0,39
	(4)	0,64t e L ₀ /1500	67,4	FT/F	0,41	60,9	FT/F	0,37
	300	0 e 0	-	-	-	66,2	FT/F	0,41
	(5)	0,64t e L ₀ /1500	73,2	FT/F	0,45	60,2	FT/F	0,37
	257	0 e 0	-	-	-	66,2	FT/F	0,41
	(6)	0,64t e L ₀ /1500	74,6	FT/F	0,46	60,4	FT/F	0,37
	225	0 e 0	-	-	-	67,0	FT/F	0,41
	(7)	0,64t e L ₀ /1500	74,5	FT/F	0,46	61,6	FT/F	0,38
	200	0 e 0	-	-	-	66,1	FT/F	0,40
	(8)	0,64t e L ₀ /1500	72,1	FT/F	0,44	63,4	FT/F	0,39
180	0 e 0	-	-	-	66,1	FT/F	0,40	
(9)	0,64t e L ₀ /1500	72,5	FT/F	0,44	63,0	FT/F	0,39	
164	0 e 0	-	-	-	65,7	FT/F	0,40	
(10)	0,64t e L ₀ /1500	73,1	FT/F	0,45	63,4	FT/F	0,39	
150	0 e 0	-	-	-	65,3	FT/F	0,40	
(11)	0,64t e L ₀ /1500	70,8	FT/F	0,43	63,3	FT/F	0,39	
113	0 e 0	-	-	-	65,1	FT/F	0,40	
(15)	0,64t e L ₀ /1500	70,2	FT/F	0,43	62,9	FT/F	0,38	
50	0 e 0	-	-	-	65,7	FT/F	0,40	
(35)	0,64t e L ₀ /1500	74,1	FT/F	0,45	64,7	FT/F	0,40	

...continua na próxima página

...continuação – Tabela 5.5

L_c (mm)	Comprimento destravado (NCH)	Imperfeições: flexo-torção e flexão	Compressão centrada			Compressão excêntrica		
			N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y	N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y
1800 ($\lambda_x=94$)	39	0 e 0	-	-	-	66,3	FT/F	0,41
	(45)	0,64t e $L_c/1500$	74,2	FT/F	0,45	65,2	FT/F	0,40
	K =0,5: $N_{c,R}^{(1)} = 30,2$ kN $N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,19$ $N_{c,R}^{(2)} = 72,6$ kN $N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,44$		K =1,0: $N_{c,R}^{(1)} = 28,7$ kN $N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,18$ $N_{c,R}^{(2)} = 53,6$ kN $N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,33$					
2400 ($\lambda_x=126$)	2400	0 e 0	-	-	-	24,4	FT/F*	0,15
	(0)	0,64t e $L_c/1500$	34,8	FT	0,21	24,8	FT/F*	0,15
	1200	0 e 0	-	-	-	35,0	FT/F	0,21
	(1)	0,64t e $L_c/1500$	37,2	FT	0,23	33,7	FT/F	0,21
	800	0 e 0	-	-	-	37,0	FT/F	0,23
	(2)	0,64t e $L_c/1500$	58,3	FT/F	0,36	34,9	FT/F	0,21
	600	0 e 0	-	-	-	45,4	FT/F	0,28
	(3)	0,64t e $L_c/1500$	59,6	FT/F	0,36	46,1	FT/F	0,28
	480	0 e 0	-	-	-	53,3	FT/F	0,33
	(4)	0,64t e $L_c/1500$	59,6	FT/F	0,36	50,9	FT/F	0,31
	400	0 e 0	-	-	-	56,2	FT/F	0,34
	(5)	0,64t e $L_c/1500$	65,6	FT/F	0,40	51,5	FT/F	0,32
	343	0 e 0	-	-	-	56,1	FT/F	0,34
	(6)	0,64t e $L_c/1500$	67,1	FT/F	0,41	50,6	FT/F	0,31
	300	0 e 0	-	-	-	58,2	FT/F	0,36
	(7)	0,64t e $L_c/1500$	63,7	FT/F	0,39	52,1	FT/F	0,32
	267	0 e 0	-	-	-	58,7	FT/F	0,36
	(8)	0,64t e $L_c/1500$	64,8	FT/F	0,40	53,7	FT/F	0,33
	240	0 e 0	-	-	-	58,6	FT/F	0,36
	(9)	0,64t e $L_c/1500$	64,5	FT/F	0,39	53,2	FT/F	0,33
	218	0 e 0	-	-	-	58,0	FT/F	0,35
	(10)	0,64t e $L_c/1500$	63,5	FT/F	0,39	54,2	FT/F	0,33
	150	0 e 0	-	-	-	57,3	FT/F	0,35
	(15)	0,64t e $L_c/1500$	61,2	FT/F	0,37	54,7	FT/F	0,33
67	0 e 0	-	-	-	61,6	F	0,38	
(35)	0,64t e $L_c/1500$	67,4	FT/F	0,41	55,6	FT/F	0,34	
52	0 e 0	-	-	-	63,4	F	0,39	
(45)	0,64t e $L_c/1500$	70,9	FT/F	0,43	56,0	FT/F	0,34	
K =0,5: $N_{c,R}^{(1)} = 29,8$ kN $N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,18$ $N_{c,R}^{(2)} = 67,2$ kN $N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,41$		K =1,0: $N_{c,R}^{(1)} = 19,9$ kN $N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,12$ $N_{c,R}^{(2)} = 38,9$ kN $N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,24$						

$N_y = 163,5$ kN (dupla cantoneira) ($f_y = 350$ MPa).

N_{EF} – força de compressão resistente obtida via MEF.

L_c – comprimento da barra ($\lambda_x = L_c / r_x$).

FT – instabilidade por flexo-torção de cantoneira individual.

F – instabilidade por flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

F* – instabilidade por flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada.

$N_{c,R}^{(1)}$ – calculado com base na ABNT NBR 14762:2010 admitindo cantoneira isolada.

$N_{c,R}^{(2)}$ – calculado com base na ABNT NBR 14762:2010 admitindo flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

NCH – número de chapas separadoras.

Tabela 5.6 – Análise de sensibilidade às imperfeições: perfil 2L 60x2,00 – Chapas separadoras

L_c (mm)	Comprimento destravado (NCH)	Imperfeições: flexo-torção e flexão	Compressão excêntrica		
			N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y
600 ($\lambda_x=31$)	600	0 e 0	71,6	FT/F	0,44
	(0)	0,64t e $L_c/1500$	71,9	FT/F	0,44
	300	0 e 0	81,8	FT/F	0,50
	(1)	0,64t e $L_c/1500$	81,4	FT/F	0,50
	200	0 e 0	84,8	FT/F	0,52
	(2)	0,64t e $L_c/1500$	80,6	FT/F	0,49
K =0,5: $N_{c,R}^{(1)} = 30,7$ kN $N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,19$ $N_{c,R}^{(2)} = 79,3$ kN $N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,49$			K =1,0: $N_{c,R}^{(1)} = 30,5$ kN $N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,19$ $N_{c,R}^{(2)} = 76,8$ kN $N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,47$		
1200 ($\lambda_x=63$)	1200	0 e 0	48,8	FT/F*	0,30
	(0)	0,64t e $L_c/1500$	49,2	FT/F*	0,30
	600	0 e 0	67,0	FT/F	0,41
	(1)	0,64t e $L_c/1500$	66,3	FT/F	0,41
	400	0 e 0	68,0	FT/F	0,42
	(2)	0,64t e $L_c/1500$	67,3	FT/F	0,41
	300	0 e 0	82,1	FT/F	0,50
	(3)	0,64t e $L_c/1500$	75,5	FT/F	0,46
	240	0 e 0	79,4	FT/F	0,49
	(4)	0,64t e $L_c/1500$	80,4	FT/F	0,49
	200	0 e 0	81,4	FT/F	0,50
	(5)	0,64t e $L_c/1500$	81,3	FT/F	0,50
K =0,5: $N_{c,R}^{(1)} = 30,5$ kN $N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,19$ $N_{c,R}^{(2)} = 76,8$ kN $N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,47$			K =1,0: $N_{c,R}^{(1)} = 29,8$ kN $N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,18$ $N_{c,R}^{(2)} = 67,2$ kN $N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,41$		
1800 ($\lambda_x=94$)	1800	0 e 0	33,4	FT/F*	0,20
	(0)	0,64t e $L_c/1500$	33,8	FT/F*	0,20
	900	0 e 0	52,9	FT/F	0,32
	(1)	0,64t e $L_c/1500$	52,1	FT/F	0,32
	600	0 e 0	60,1	FT/F	0,37
	(2)	0,64t e $L_c/1500$	54,2	FT/F	0,33
	450	0 e 0	60,4	FT/F	0,37
	(3)	0,64t e $L_c/1500$	57,0	FT/F	0,35
360	0 e 0	68,1	FT/F	0,42	
(4)	0,64t e $L_c/1500$	66,8	FT/F	0,41	
K =0,5: $N_{c,R}^{(1)} = 30,2$ kN $N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,19$ $N_{c,R}^{(2)} = 72,6$ kN $N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,44$			K =1,0: $N_{c,R}^{(1)} = 28,7$ kN $N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,18$ $N_{c,R}^{(2)} = 53,6$ kN $N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,33$		
2400 ($\lambda_x=126$)	2400	0 e 0	24,4	FT/F*	0,15
	(0)	0,64t e $L_c/1500$	24,8	FT/F*	0,15
	1200	0 e 0	42,2	FT/F	0,26
	(1)	0,64t e $L_c/1500$	40,4	FT/F	0,25

...continua na próxima página

...continuação – Tabela 5.6

L_c (mm)	Comprimento destravado (NCH)	Imperfeições: flexo-torção e flexão	Compressão excêntrica		
			N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y
		0,64t e $L_c/1500$	40,4	FT/F	0,25
	800	0 e 0	43,1	FT/F	0,26
	(2)	0,64t e $L_c/1500$	42,5	FT/F	0,26
2400	400	0 e 0	60,4	FT/F	0,37
($\lambda_x=126$)	(5)	0,64t e $L_c/1500$	57,7	FT/F	0,35
K=0,5: $N_{c,R}^{(1)} = 29,8$ kN $N_{c,R}^{(1)}/N_y = 0,18$ K=1,0: $N_{c,R}^{(1)} = 19,9$ kN $N_{c,R}^{(1)}/N_y = 0,12$					
$N_{c,R}^{(2)} = 67,2$ kN $N_{c,R}^{(2)}/N_y = 0,41$			$N_{c,R}^{(2)} = 38,9$ kN $N_{c,R}^{(2)}/N_y = 0,24$		

$N_y = 163,5$ kN (dupla cantoneira) ($f_y = 350$ MPa).

N_{EF} – força de compressão resistente obtida via MEF.

L_c – comprimento da barra ($\lambda_x=L_c/r_x$).

FT – instabilidade por flexo-torção de cantoneira individual.

F – instabilidade por flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

F* – instabilidade por flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada.

NCH – número de chapas separadoras.

$N_{c,R}^{(1)}$ – calculado com base na ABNT NBR 14762:2010 admitindo cantoneira isolada.

$N_{c,R}^{(2)}$ – calculado com base na ABNT NBR 14762:2010 admitindo flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

NCH – número de chapas separadoras.

Nas Figuras 5.38 a 5.52 são ilustrados modos de instabilidade e a distribuição de tensões de von Mises observados na análise numérica da dupla cantoneira simples 2L 60x2,00 para o comprimento $L_c = 1200$ mm, variando-se o número de chapas separadoras. Todos os modos observados são para o nível de imperfeições 0,64t associado ao modo de flexo-torção e $L_c/1500$ associado ao modo de flexão.

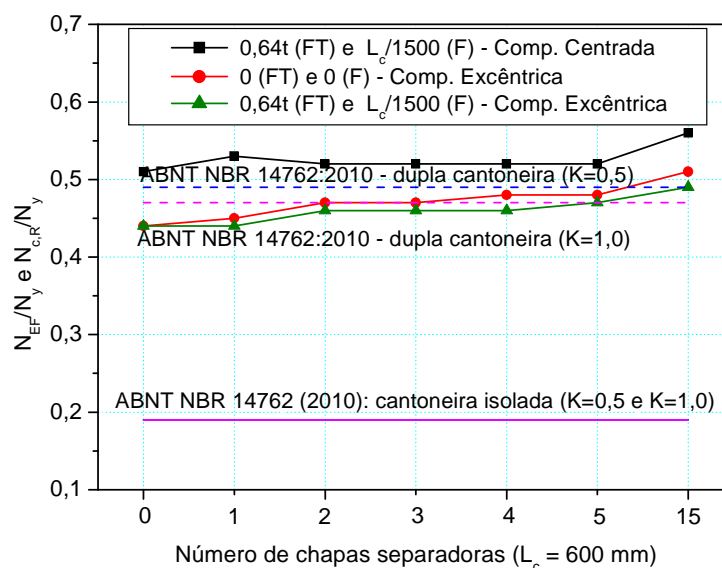


Figura 5.30 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2L 60x2,00 (Acoplamento de nós)

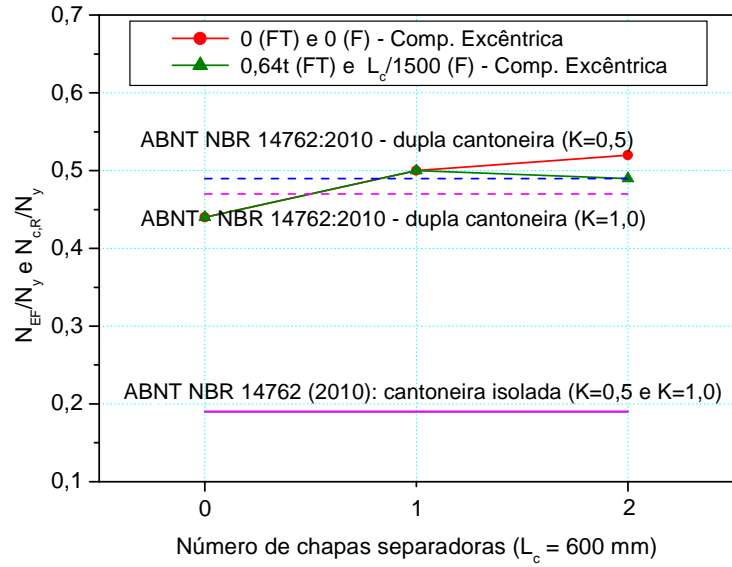


Figura 5.31 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2L 60x2,00 (Chapas separadoras)

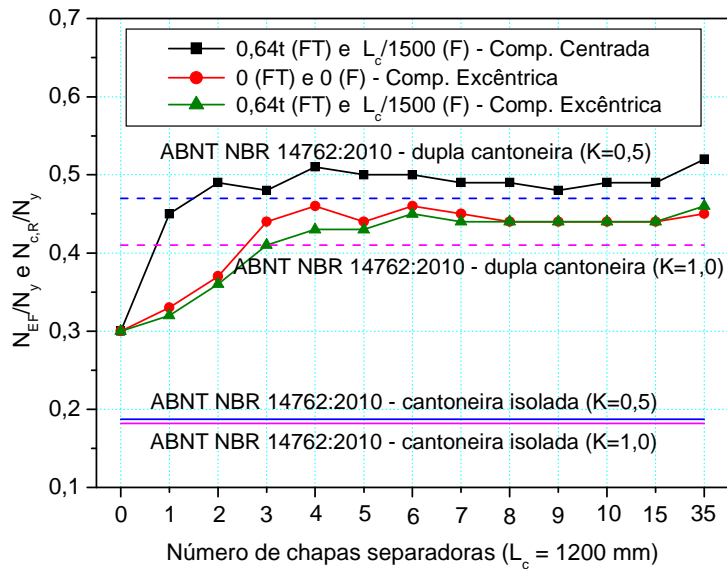


Figura 5.32 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2L 60x2,00 (Acoplamento de nós)

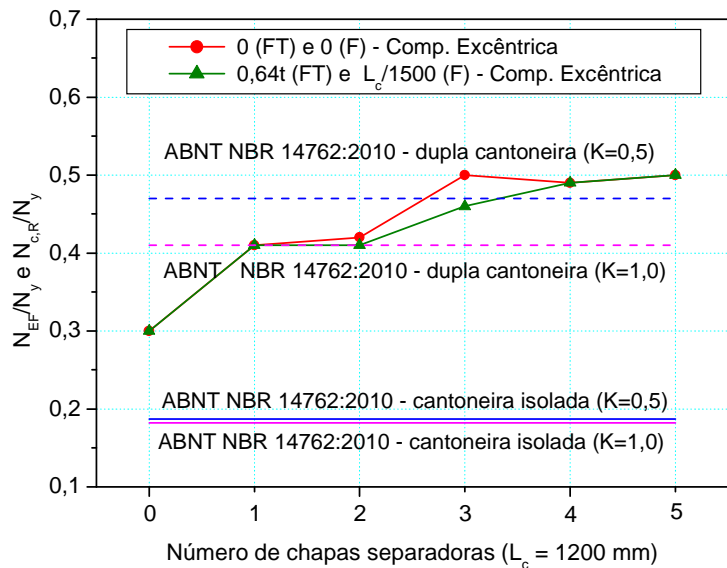


Figura 5.33 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2L 60x2,00 (Chapas separadoras)

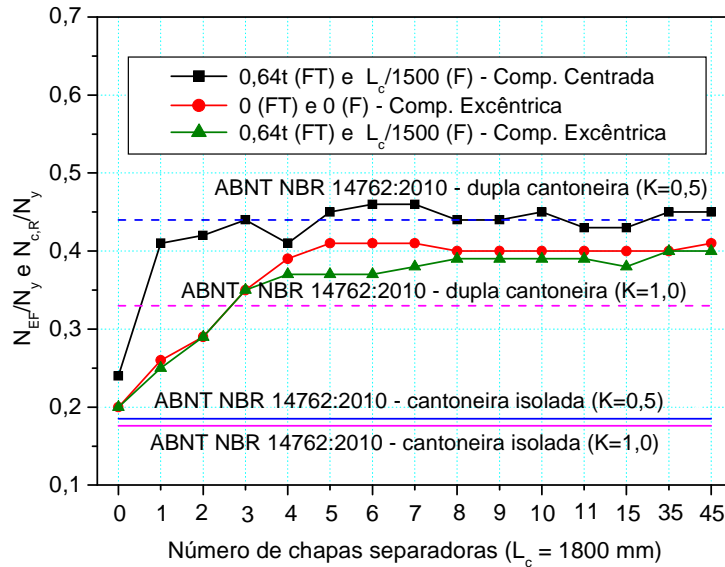


Figura 5.34 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2L 60x2,00 (Acoplamento de nós)

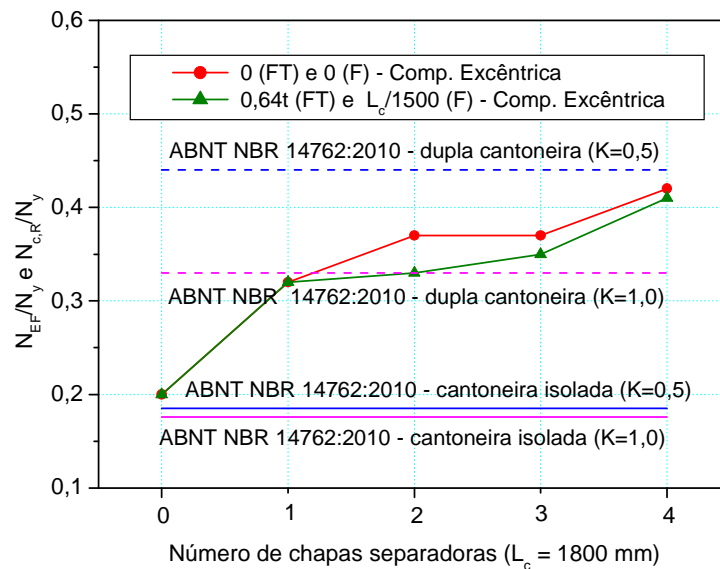


Figura 5.35 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2L 60x2,00 (Chapas separadoras)

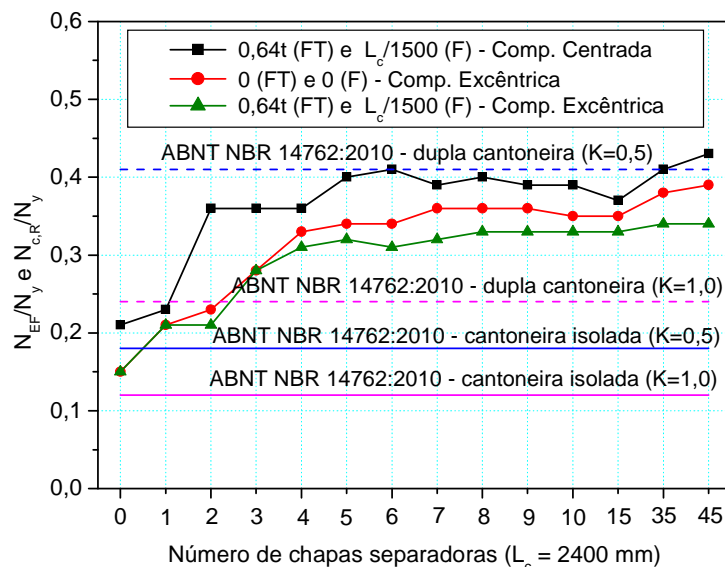


Figura 5.36 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2L 60x2,00 (Acoplamento de nós)

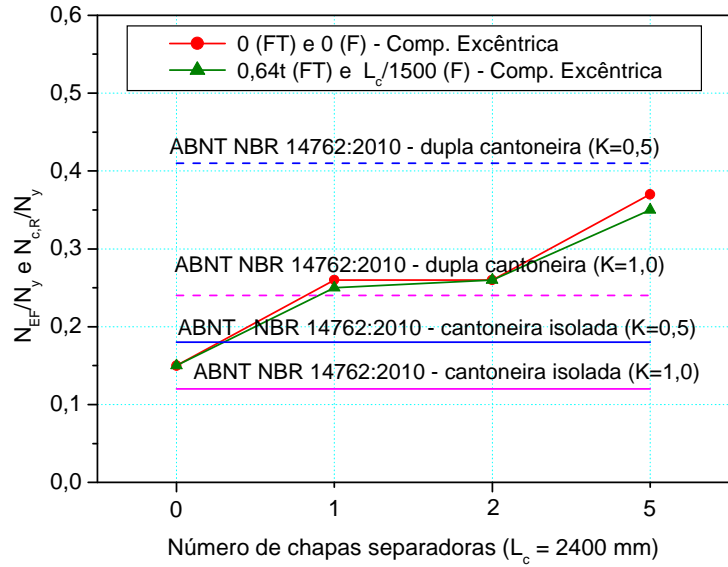


Figura 5.37 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2L 60x2,00 (Chapas separadoras)

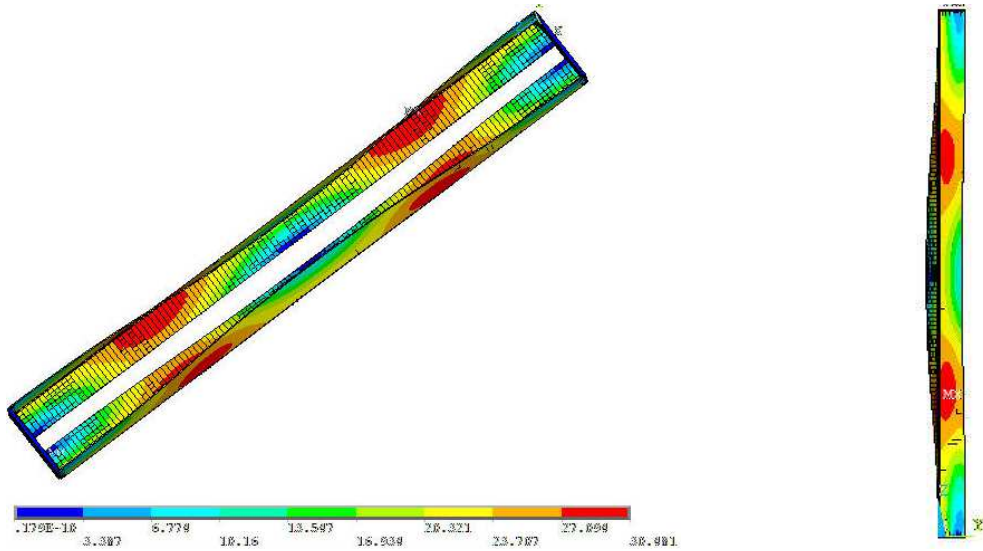


Figura 5.38 – Instabilidade por flexo-torção e distribuição de tensões de von Mises (Compressão centrada)

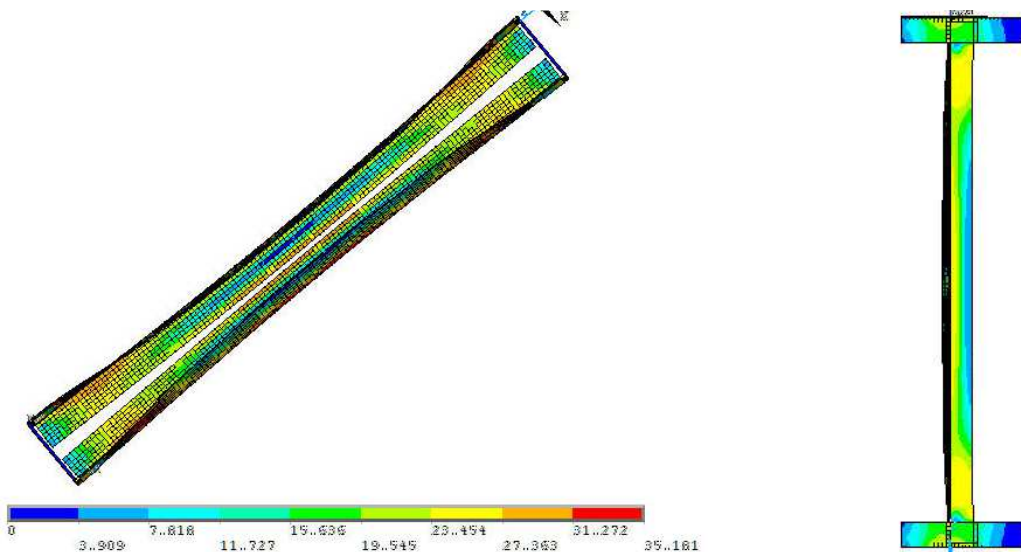


Figura 5.39 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão excêntrica)

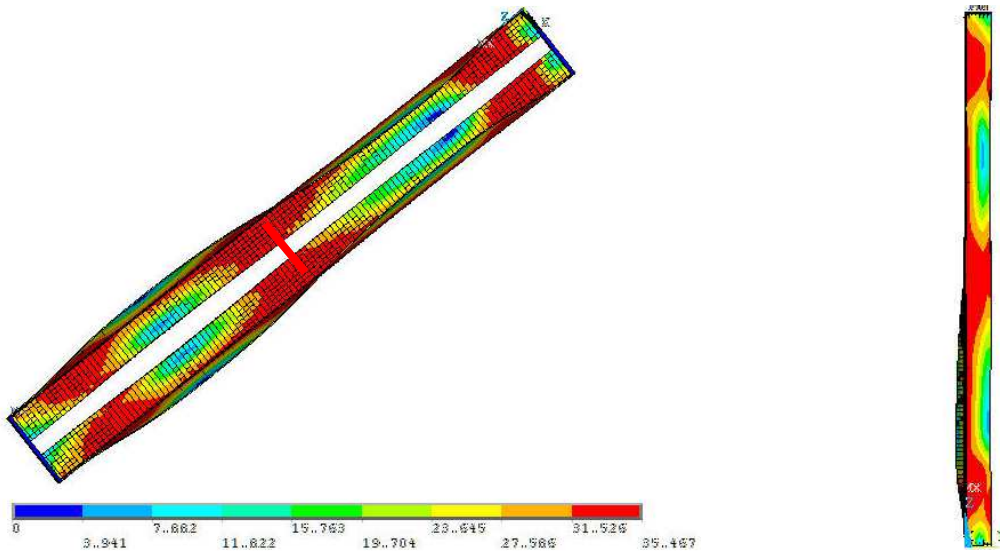


Figura 5.40 – Instabilidade por flexo-torção e distribuição de tensões de von Mises (Compressão centrada – acoplamento de nós)

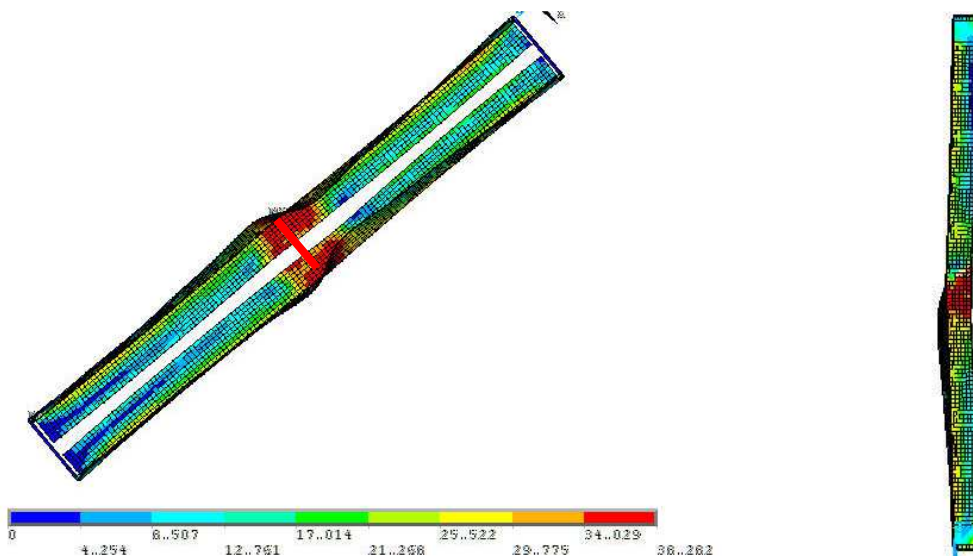


Figura 5.41 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão excêntrica – acoplamento de nós)

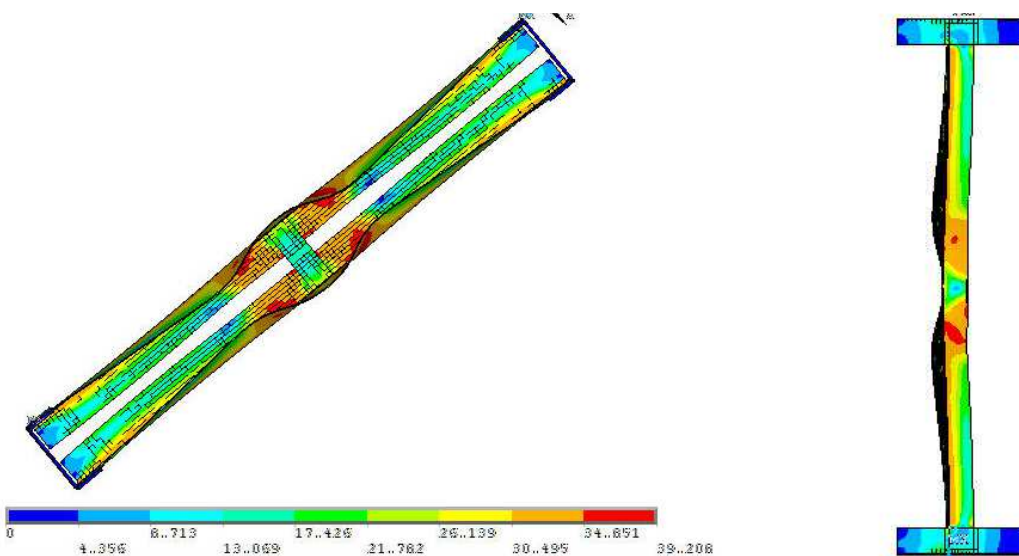


Figura 5.42 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão excêntrica – chapas separadoras)

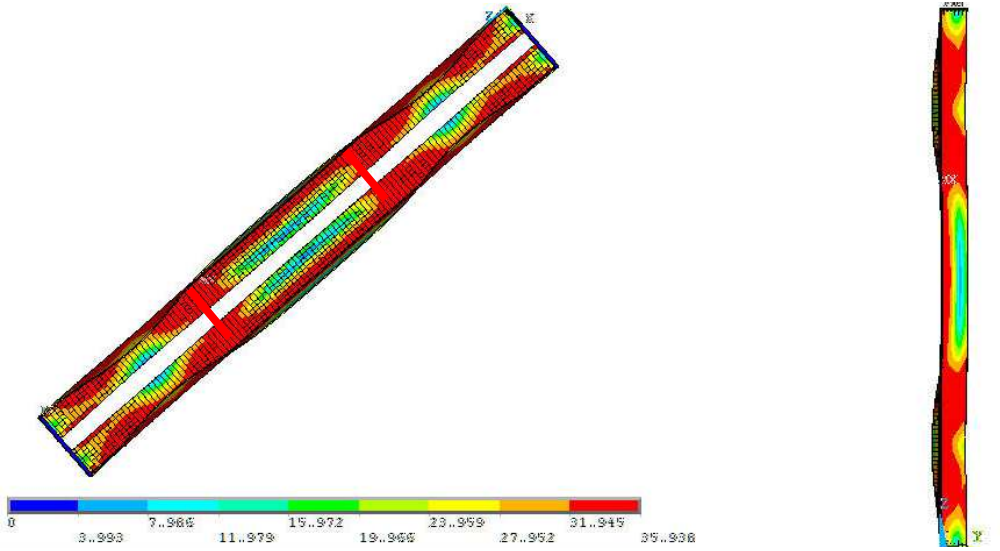


Figura 5.43 – Instabilidade por flexo-torção e distribuição de tensões de von Mises (Compressão centrada – acoplamento de nós)

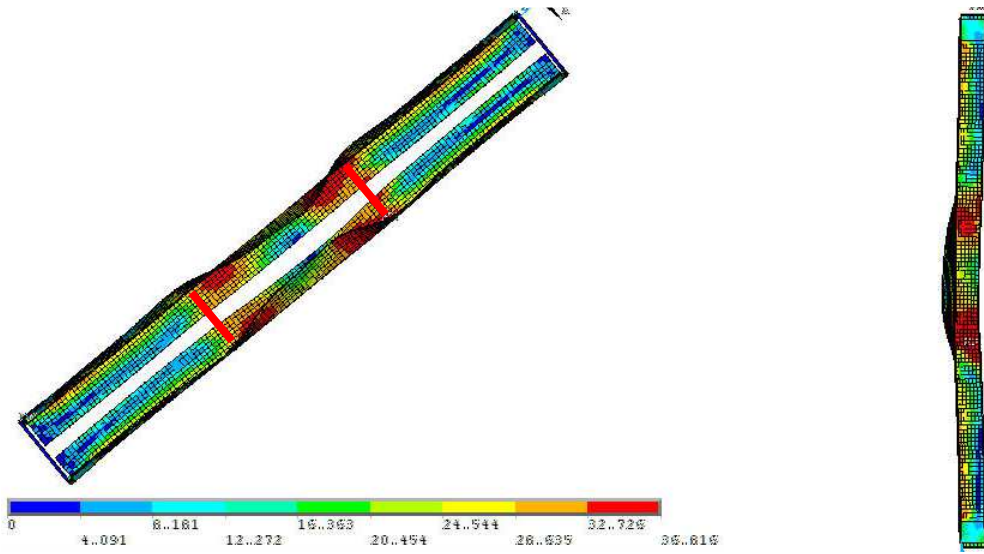


Figura 5.44 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão excêntrica – acoplamento de nós)

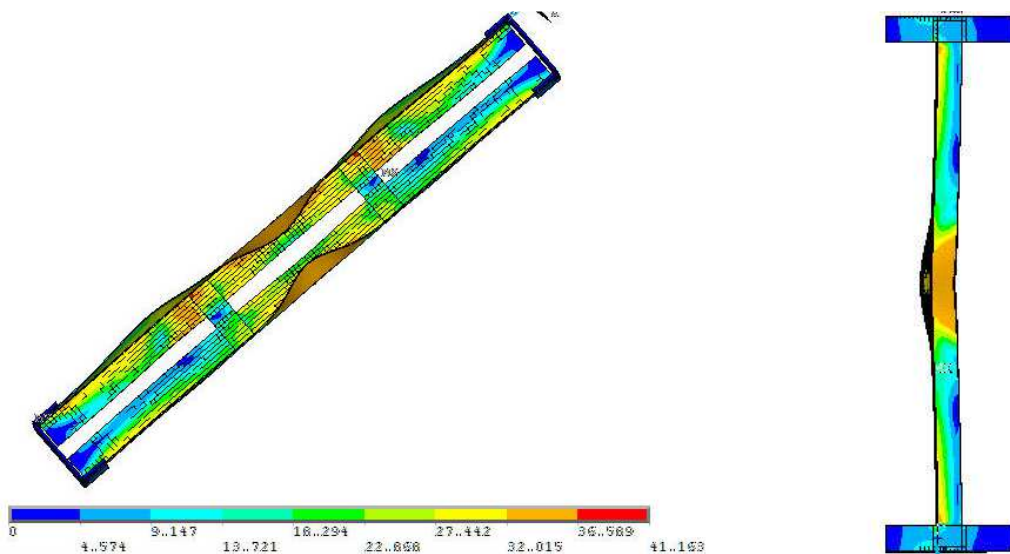


Figura 5.45 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão excêntrica – chapas separadoras)

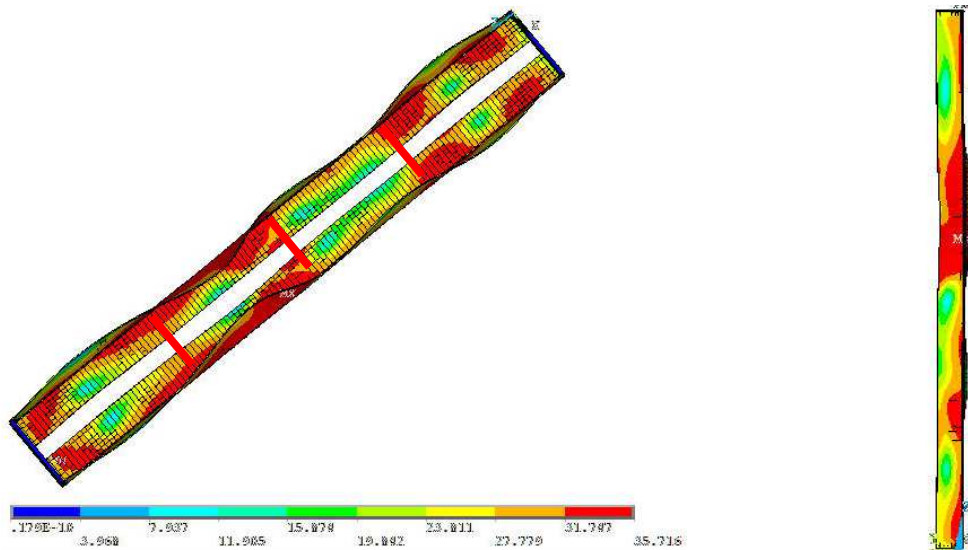


Figura 5.46 – Instabilidade por flexo-torção e distribuição de tensões de von Mises (Compressão centrada – acoplamento de nós)

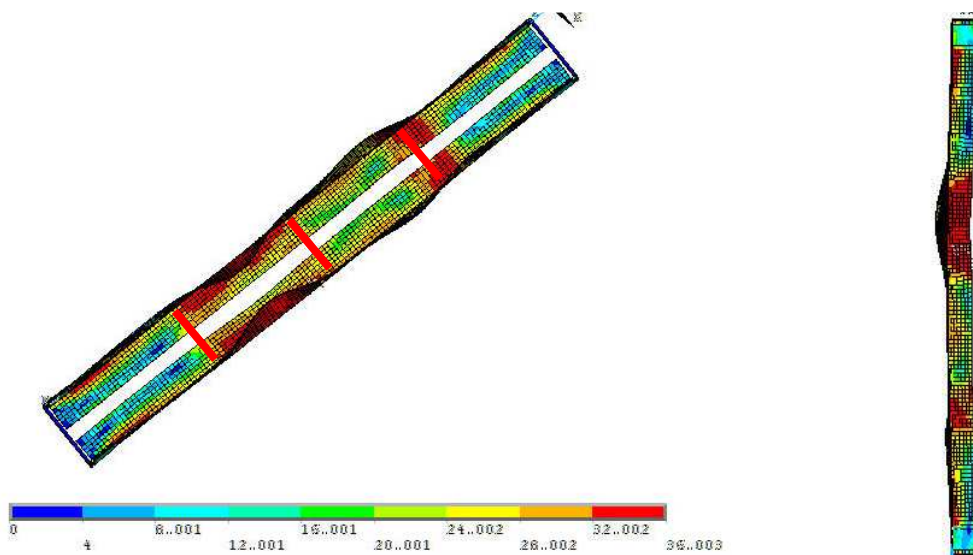


Figura 5.47 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão excêntrica – acoplamento de nós)

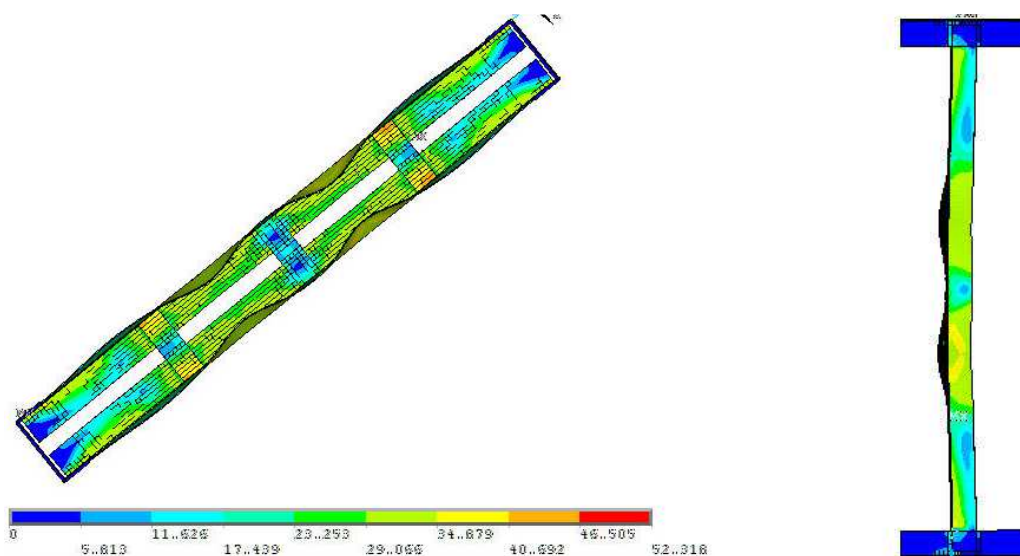


Figura 5.48 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão excêntrica – chapas separadoras)

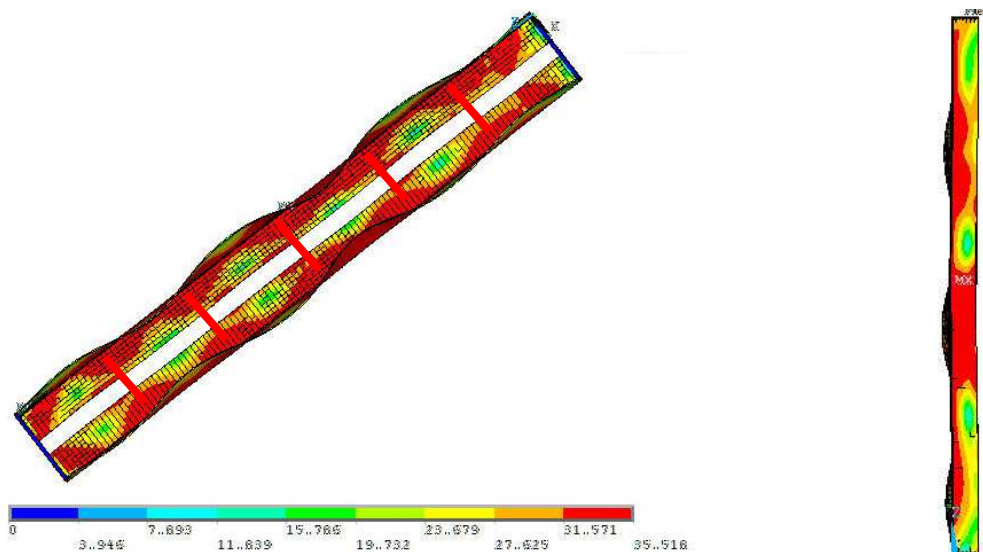


Figura 5.49 – Instabilidade por flexo-torção e distribuição de tensões de von Mises (Compressão centrada – acoplamento de nós)

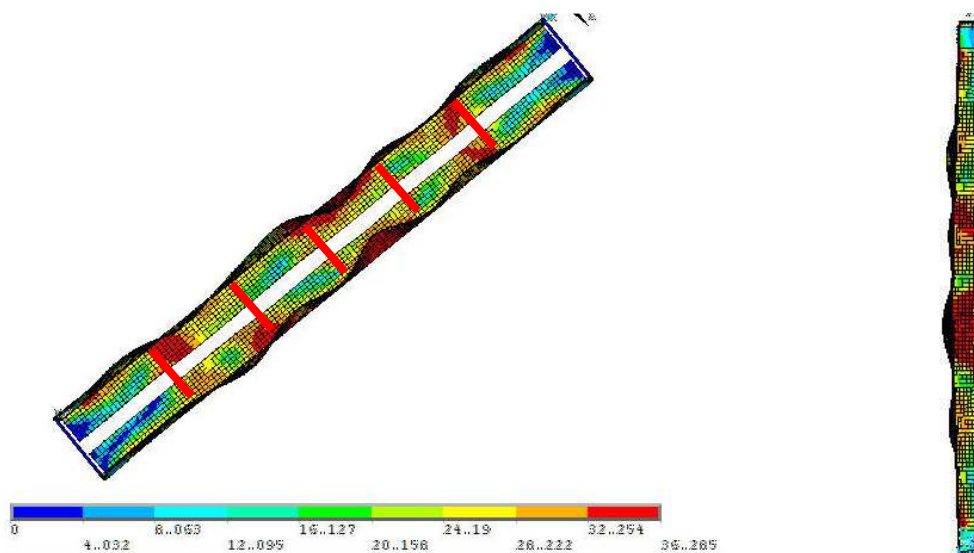


Figura 5.50 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão excêntrica – acoplamento de nós)

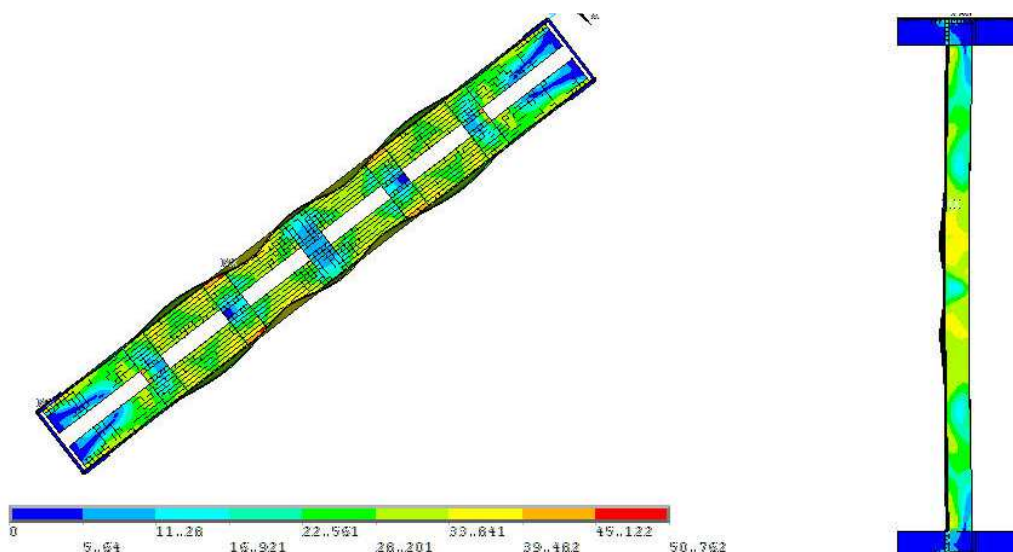


Figura 5.51 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão excêntrica – chapas separadoras)

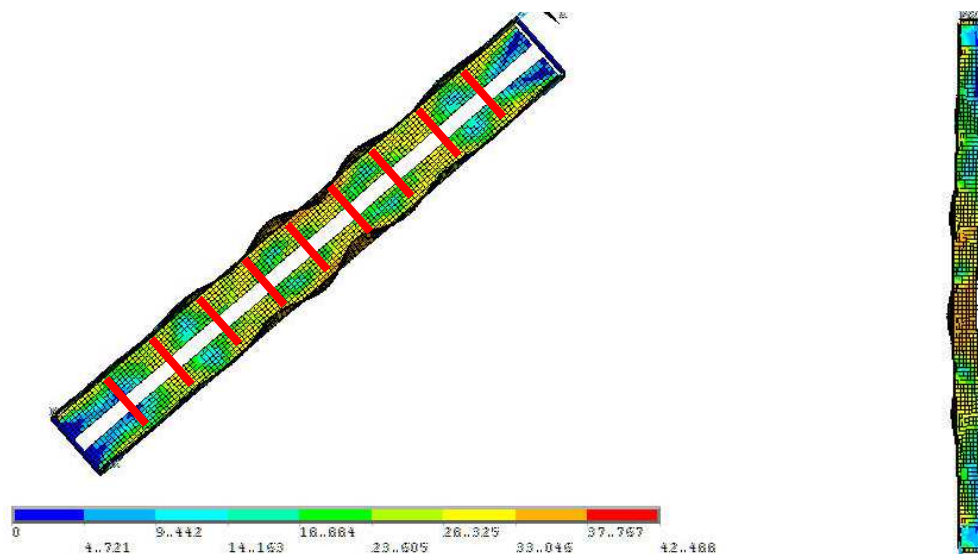


Figura 5.52 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão excêntrica – acoplamento de nós)

Os resultados da análise numérica da dupla cantoneira simples 2L 60x2,00 apresentaram a mesma tendência dos resultados da análise numérica inicial. Para compressão excêntrica a inserção de chapas separadoras aumentou de forma significativa a força resistente à compressão das barras, no entanto, a partir de 3 chapas separadoras, e em alguns casos 4, a força tende a permanecer constante. Em todos os casos, com o aumento das chapas separadoras, os resultados ultrapassaram os valores obtidos pela hipótese de cálculo teórica que considerou barra composta ($K=1,0$).

No caso da compressão centrada a partir de 2 chapas separadoras a força resistente tende a permanecer constante. Para barras isoladas, os resultados numéricos foram conservadores ao serem comparados com os obtidos pela hipótese teórica que considerou barra isolada ($K=0,5$), e com a inserção de chapas separadoras os resultados atingiram os valores obtidos pela hipótese de cálculo teórica que considerou barra composta ($K=0,5$).

Observa-se que o aumento na resistência das barras foi maior com a inserção da primeira chapa separadora. Para as barras mais curtas a inserção de chapas separadoras pouco interferiu nos resultados. Neste caso, o modo de instabilidade predominante foi o de flexo-torção, e no caso da cantoneira simples a força que tende a causar flexo-torção independe do comprimento, com isso a redução do comprimento destravado das barras pouco interfere nos resultados. No caso de barras mais longas, além do modo de flexo-

torção também observou-se modo de flexão, com isso, o aumento das chapas separadoras levou a uma maior interferência nos valores de força resistente.

Nas simulações em que foram modeladas as chapas separadoras, os valores obtidos foram maiores que aqueles obtidos nas simulações em que foi feito acoplamento de nós na posição das chapas separadoras. Esse aumento dos valores pode ser justificado pelo fato de que ao se modelar as chapas há um aumento da rigidez em uma região muito maior que no caso de simplesmente se acoplar dois nós na posição das chapas separadoras. Com relação aos modos de instabilidade, observou-se os mesmos modos nas duas simulações realizadas.

5.2.2 Dupla cantoneira enrijecida

Nas Tabelas 5.7 e 5.8 são apresentados os resultados obtidos na análise de sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais da dupla cantoneira enrijecida 2Le 50x13x2,00. Nos modelos em que foram adotadas imperfeições associadas aos modos local e de flexo-torção também foi adotada imperfeição associada ao modo de flexão no valor de $L_c/1500$. Para compressão excêntrica, em alguns modelos não se adotou imperfeições associadas aos modo local e de flexo-torção, neste caso, também não se adotou imperfeição associada ao modo de flexão, ou seja, o modelo foi considerado sem imperfeições. Os resultados apresentados na Tabela 5.7 referem-se às simulações em que na posição das chapas separadoras foi feito o acoplamento de deslocamentos dos nós. Na Tabela 5.8 são apresentados os resultados obtidos na análise em que foram modeladas as chapas separadoras, neste caso, foi feito a compatibilização de deslocamentos dos nós das chapas separadoras e das cantoneiras. Nas Figuras 5.53 a 5.60 são apresentados os resultados obtidos na análise numérica comparados com os resultados das hipóteses teóricas adotadas.

Tabela 5.7 – Análise de sensibilidade às imperfeições: perfil 2Le 50x13x2,00 – Acoplamento de nós

L_c (mm)	Comprimento destravado (NCH)	Imperfeições: local, flexo-torção e flexão	Compressão centrada			Compressão excêntrica		
			N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y	N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y
600 ($\lambda_x=34$)	600	0; 0 e 0	-	-	-	80,3	FT/F*	0,49
	(0)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	102,5	FT	0,63	78,4	FT/F*	0,48
	300	0; 0 e 0	-	-	-	102,8	FT	0,63
	(1)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	129,0	FT	0,79	98,3	FT	0,60
	200	0; 0 e 0	-	-	-	105,0	FT	0,64
	(2)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	128,3	FT	0,79	102,6	FT	0,63
	150	0; 0 e 0	-	-	-	108,3	FT	0,67
	(3)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	136,5	FT	0,84	106,0	FT	0,65
	120	0; 0 e 0	-	-	-	109,9	FT	0,67
	(4)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	138,4	FT	0,85	107,5	FT	0,66
	100	0; 0 e 0	-	-	-	110,3	FT	0,68
	(5)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	140,9	FT	0,87	107,9	FT	0,66
	37,5	0; 0 e 0	-	-	-	112,8	FT	0,69
	(15)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	145,3	FT	0,89	110,6	FT	0,68
	K=0,5: $N_{c,R}^{(1)} = 111,2$ kN $N_{c,R}^{(1)}/N_y = 0,68$ $N_{c,R}^{(2)} = 159,1$ kN $N_{c,R}^{(2)}/N_y = 0,98$			K=1,0: $N_{c,R}^{(1)} = 63,7$ kN $N_{c,R}^{(1)}/N_y = 0,39$ $N_{c,R}^{(2)} = 149,2$ kN $N_{c,R}^{(2)}/N_y = 0,92$				
1200 ($\lambda_x=68$)	1200	0; 0 e 0	-	-	-	54,3	FT/F*	0,33
	(0)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	76,1	FT/F*	0,47	52,4	FT/F*	0,32
	600	0; 0 e 0	-	-	-	72,3	FT/F	0,44
	(1)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	88,9	FT	0,55	71,5	FT/F	0,44
	400	0; 0 e 0	-	-	-	78,9	FT/F	0,48
	(2)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	95,6	FT	0,59	77,3	FT/F	0,47
	300	0; 0 e 0	-	-	-	95,2	FT/F	0,58
	(3)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	114,0	FT	0,70	93,3	FT/F	0,57
	240	0; 0 e 0	-	-	-	98,2	FT/F	0,60
	(4)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	118,6	FT	0,73	95,1	FT/F	0,58
	200	0; 0 e 0	-	-	-	101,3	FT/F	0,62
	(5)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	127,6	FT/F	0,78	97,9	FT/F	0,60
	171	0; 0 e 0	-	-	-	102,2	FT/F	0,63
	(6)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	129,6	FT/F	0,80	98,9	FT/F	0,61
	150	0; 0 e 0	-	-	-	102,8	FT/F	0,63
(7)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	133,4	FT/F	0,82	99,4	FT/F	0,61	
133	0; 0 e 0	-	-	-	103,1	FT/F	0,63	
(8)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	133,7	FT/F	0,82	99,7	FT/F	0,61	
120	0; 0 e 0	-	-	-	103,3	F	0,63	
(9)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	136,0	FT/F	0,84	99,8	FT/F	0,61	
109	0; 0 e 0	-	-	-	103,5	F	0,64	
(10)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	136,1	FT/F	0,84	100,0	FT/F	0,61	

...continua na próxima página

...continuação – Tabela 5.7

L_c (mm)	Comprimento destravado (NCH)	Imperfeições: local, flexo-torção e flexão	Compressão centrada			Compressão excêntrica			
			N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y	N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y	
1200 ($\lambda_x=68$)	75	0; 0 e 0	-	-	-	103,9	F	0,64	
	(15)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	138,8	FT/F	0,85	100,3	F	0,62	
	33	0; 0 e 0	-	-	-	105,0	F	0,65	
	(35)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	140,7	FT/F	0,86	101,5	F	0,62	
	K=0,5: $N_{c,R}^{(1)} = 63,7$ kN $N_{c,R}^{(1)}/N_y = 0,39$ $N_{c,R}^{(2)} = 149,2$ kN $N_{c,R}^{(2)}/N_y = 0,92$			K=1,0: $N_{c,R}^{(1)} = 38,8$ kN $N_{c,R}^{(1)}/N_y = 0,24$ $N_{c,R}^{(2)} = 115,2$ kN $N_{c,R}^{(2)}/N_y = 0,71$					
	1800	0; 0 e 0	-	-	-	37,6	FT/F*	0,23	
	(0)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	62,3	FT/F*	0,38	36,1	FT/F*	0,22	
	900	0; 0 e 0	-	-	-	54,7	FT/F	0,34	
	(1)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	75,8	FT/F	0,47	54,3	FT/F	0,33	
	600	0; 0 e 0	-	-	-	60,7	FT/F	0,37	
(2)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	76,1	FT/F	0,47	59,3	FT/F	0,36		
450	0; 0 e 0	-	-	-	75,2	FT/F	0,46		
(3)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	86,6	FT/F	0,53	72,8	FT/F	0,45		
360	0; 0 e 0	-	-	-	80,9	FT/F	0,50		
(4)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	94,5	FT/F	0,58	78,3	FT/F	0,48		
300	0; 0 e 0	-	-	-	87,1	FT/F	0,54		
(5)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	109,1	FT/F	0,67	83,9	F	0,52		
257	0; 0 e 0	-	-	-	88,4	F	0,54		
(6)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	115,1	FT/F	0,71	84,9	F	0,52		
225	0; 0 e 0	-	-	-	89,0	F	0,55		
(7)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	118,0	F	0,72	85,4	F	0,52		
200	0; 0 e 0	-	-	-	89,3	F	0,55		
(8)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	120,3	F	0,74	85,6	F	0,53		
180	0; 0 e 0	-	-	-	89,4	F	0,55		
(9)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	120,9	F	0,74	85,7	F	0,53		
164	0; 0 e 0	-	-	-	89,5	F	0,55		
(10)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	120,9	F	0,74	85,8	F	0,53		
150	0; 0 e 0	-	-	-	89,5	F	0,55		
(11)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	121,6	F	0,75	85,8	F	0,53		
113	0; 0 e 0	-	-	-	89,6	F	0,55		
(15)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	121,8	F	0,75	85,8	F	0,53		
50	0; 0 e 0	-	-	-	90,0	F	0,55		
(35)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	122,5	F	0,75	86,3	F	0,53		
39	0; 0 e 0	-	-	-	90,3	F	0,55		
(45)	0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	122,7	F	0,75	86,5	F	0,53		
K=0,5: $N_{c,R}^{(1)} = 45,8$ kN $N_{c,R}^{(1)}/N_y = 0,28$ $N_{c,R}^{(2)} = 133,9$ kN $N_{c,R}^{(2)}/N_y = 0,82$			K=1,0: $N_{c,R}^{(1)} = 31,9$ kN $N_{c,R}^{(1)}/N_y = 0,20$ $N_{c,R}^{(2)} = 74,9$ kN $N_{c,R}^{(2)}/N_y = 0,46$						

...continua na próxima página

...continuação – Tabela 5.7

L_c (mm)	Comprimento destravado (NCH)	Imperfeições: local, flexo-torção e flexão	Compressão centrada			Compressão excêntrica		
			N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y	N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y
2400 ($\lambda_x=136$)	2400 (0)	0; 0 e 0 0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	- 47,1	- FT/F*	- 0,29	27,5 26,0	FT/F* FT/F*	0,17 0,16
	1200 (1)	0; 0 e 0 0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	- 64,4	- FT/F	- 0,40	40,5 40,2	FT/F FT/F	0,25 0,25
	800 (2)	0; 0 e 0 0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	- 63,2	- FT/F	- 0,39	48,3 46,9	FT/F FT/F	0,30 0,29
	600 (3)	0; 0 e 0 0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	- 72,0	- FT/F	- 0,44	59,5 57,7	FT/F FT/F	0,37 0,35
	480 (4)	0; 0 e 0 0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	- 77,6	- FT/F	- 0,48	65,8 63,4	FT/F FT/F	0,40 0,39
	400 (5)	0; 0 e 0 0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	- 86,6	- FT/F	- 0,53	72,3 68,9	F F	0,44 0,42
	343 (6)	0; 0 e 0 0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	- 92,8	- F	- 0,57	73,8 70,0	F F	0,45 0,43
	300 (7)	0; 0 e 0 0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	- 96,9	- F	- 0,60	74,7 70,8	F F	0,46 0,43
	267 (8)	0; 0 e 0 0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	- 97,3	- F	- 0,60	75,4 71,3	F F	0,46 0,44
	240 (9)	0; 0 e 0 0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	- 97,9	- F	- 0,60	75,7 71,6	F F	0,47 0,44
	218 (10)	0; 0 e 0 0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	- 98,0	- F	- 0,60	76,0 71,8	F F	0,47 0,44
	150 (15)	0; 0 e 0 0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	- 98,4	- F	- 0,60	76,3 72,0	F F	0,47 0,44
	67 (35)	0; 0 e 0 0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	- 98,7	- F	- 0,61	76,5 72,2	F F	0,47 0,44
	52 (45)	0; 0 e 0 0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	- 98,8	- F	- 0,61	76,9 72,5	F F	0,47 0,45
	K=0,5: $N_{c,R}^{(1)}=38,8$ kN $N_{c,R}^{(1)}/N_y = 0,24$ $N_{c,R}^{(2)} = 115,2$ kN $N_{c,R}^{(2)}/N_y = 0,71$			K=1,0: $N_{c,R}^{(1)} = 20,4$ kN $N_{c,R}^{(1)}/N_y = 0,13$ $N_{c,R}^{(2)} = 43,3$ kN $N_{c,R}^{(2)}/N_y = 0,27$				

$N_y = 162,8$ kN (dupla cantoneira) ($f_y = 350$ MPa).

N_{EF} – força de compressão resistente obtida via MEF.

L_c – comprimento da barra ($\lambda_x=L_c/r_x$).

FT – instabilidade por flexo-torção de cantoneira individual.

F – instabilidade por flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

F* – instabilidade por flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada.

NCH – número de chapas separadoras.

$N_{c,R}^{(1)}$ – calculado com base na ABNT NBR 14762:2010 admitindo cantoneira isolada.

$N_{c,R}^{(2)}$ – calculado com base na ABNT NBR 14762:2010 admitindo flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

NCH – número de chapas separadoras.

Tabela 5.8 – Análise de sensibilidade às imperfeições: perfil 2Le 50x13x2,00 – Chapas separadoras

L_c (mm)	Comprimento destravado (NCH)	Imperfeições: local, flexo-torção e flexão	Compressão excêntrica		
			N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y
600 ($\lambda_x=34$)	600 (0)	0; 0 e 0 0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	80,3 78,4	FT/F* FT/F*	0,49 0,48
	300 (1)	0; 0 e 0 0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	112,3 99,6	FT FT	0,69 0,61
	200 (2)	0; 0 e 0 0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	116,4 104,1	FT FT	0,71 0,64
	K = 0,5: $N_{c,R}^{(1)} = 111,2$ kN $N_{c,R}^{(1)}/N_y = 0,68$ $N_{c,R}^{(2)} = 159,1$ kN $N_{c,R}^{(2)}/N_y = 0,98$			K = 1,0: $N_{c,R}^{(1)} = 63,7$ kN $N_{c,R}^{(1)}/N_y = 0,39$ $N_{c,R}^{(2)} = 149,2$ kN $N_{c,R}^{(2)}/N_y = 0,92$	
	1200 (0)	0; 0 e 0 0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	54,3 52,4	FT/F* FT/F*	0,33 0,32
	600 (1)	0; 0 e 0 0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	80,9 80,2	FT/F FT/F	0,50 0,49
1200 ($\lambda_x=68$)	400 (2)	0; 0 e 0 0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	95,0 94,6	FT/F FT/F	0,58 0,58
	300 (3)	0; 0 e 0 0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	105,8 103,6	FT/F FT/F	0,65 0,64
	240 (4)	0; 0 e 0 0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	107,1 105,0	FT/F FT/F	0,66 0,64
	K = 0,5: $N_{c,R}^{(1)} = 63,7$ kN $N_{c,R}^{(1)}/N_y = 0,39$ $N_{c,R}^{(2)} = 149,2$ kN $N_{c,R}^{(2)}/N_y = 0,92$			K = 1,0: $N_{c,R}^{(1)} = 38,8$ kN $N_{c,R}^{(1)}/N_y = 0,24$ $N_{c,R}^{(2)} = 115,2$ kN $N_{c,R}^{(2)}/N_y = 0,71$	
	1800 (0)	0; 0 e 0 0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	37,6 36,1	FT/F* FT/F*	0,23 0,22
	900 (1)	0; 0 e 0 0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	58,9 55,2	FT/F FT/F	0,36 0,34
1800 ($\lambda_x=102$)	600 (2)	0; 0 e 0 0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	72,3 70,3	FT/F FT/F	0,44 0,43
	450 (3)	0; 0 e 0 0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	85,9 82,4	FT/F FT/F	0,53 0,51
	360 (4)	0; 0 e 0 0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	91,6 87,6	FT/F FT/F	0,56 0,54
	K = 0,5: $N_{c,R}^{(1)} = 45,8$ kN $N_{c,R}^{(1)}/N_y = 0,28$ $N_{c,R}^{(2)} = 133,9$ kN $N_{c,R}^{(2)}/N_y = 0,82$			K = 1,0: $N_{c,R}^{(1)} = 31,9$ kN $N_{c,R}^{(1)}/N_y = 0,20$ $N_{c,R}^{(2)} = 74,9$ kN $N_{c,R}^{(2)}/N_y = 0,46$	
	2400 (0)	0; 0 e 0 0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	27,5 26,0	FT/F* FT/F*	0,17 0,16
	1200 (1)	0; 0 e 0 0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	45,6 45,0	FT/F FT/F	0,28 0,28
2400 ($\lambda_x=136$)	800 (2)	0; 0 e 0 0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	58,5 56,9	FT/F FT/F	0,36 0,35
	400 (5)	0; 0 e 0 0,14t; 0,64t e $L_c/1500$	81,1 77,0	FT/F FT/F	0,50 0,47
	K = 0,5: $N_{c,R}^{(1)} = 38,8$ kN $N_{c,R}^{(1)}/N_y = 0,24$ $N_{c,R}^{(2)} = 115,2$ kN $N_{c,R}^{(2)}/N_y = 0,71$			K = 1,0: $N_{c,R}^{(1)} = 20,4$ kN $N_{c,R}^{(1)}/N_y = 0,13$ $N_{c,R}^{(2)} = 43,3$ kN $N_{c,R}^{(2)}/N_y = 0,27$	

$N_y = 162,8$ kN (dupla cantoneira) ($f_y = 350$ MPa).

N_{EF} – força de compressão resistente obtida via MEF.

L_c – comprimento da barra ($\lambda_x = L_c/r_x$).

FT – instabilidade por flexo-torção de cantoneira individual; F – instabilidade por flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto; F* – instabilidade por flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada.

NCH – número de chapas separadoras

$N_{c,R}^{(1)}$ – calculado com base na ABNT NBR 14762:2010 admitindo cantoneira isolada.

$N_{c,R}^{(2)}$ – calculado com base na ABNT NBR 14762:2010 admitindo flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

NCH – número de chapas separadoras.

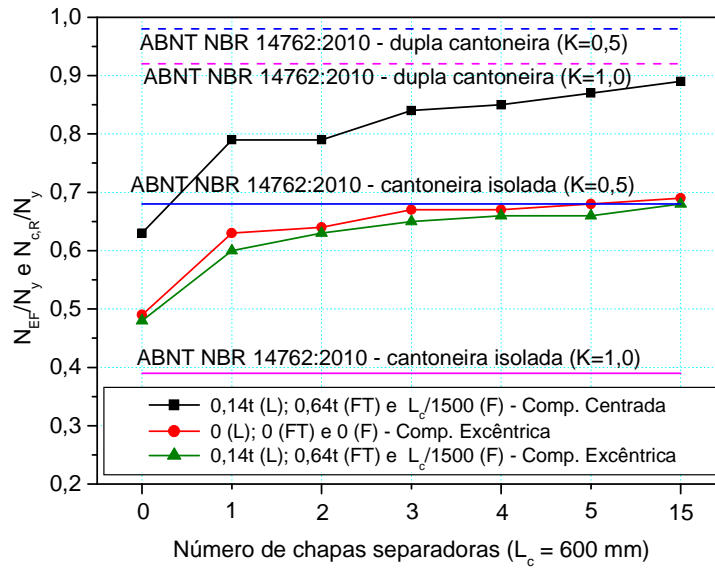


Figura 5.53 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2Le 50x13x2,00 (Acoplamento de nós)

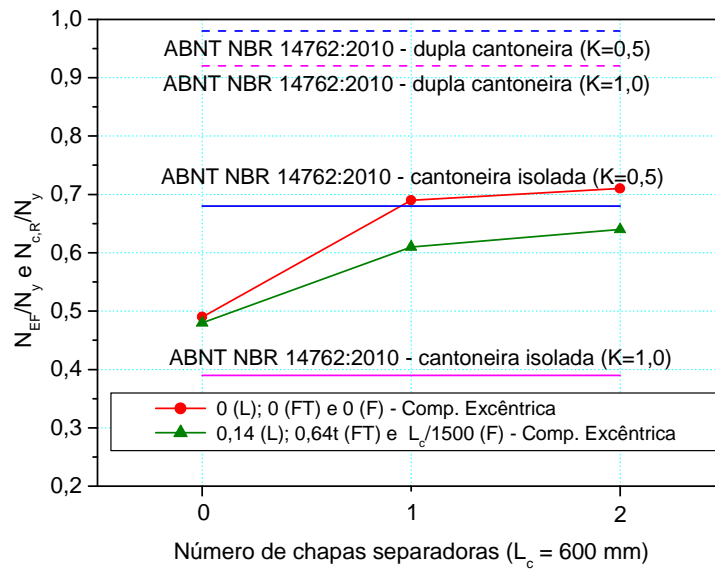


Figura 5.54 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2Le 50x13x2,00 (Chapas separadoras)

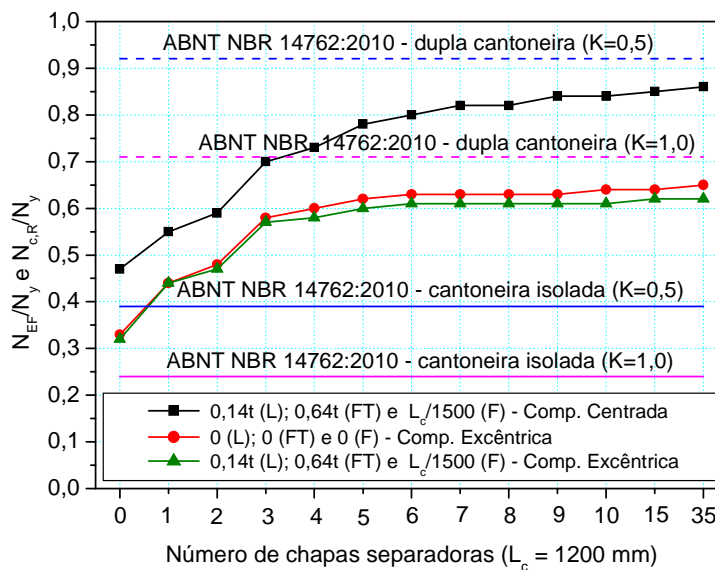


Figura 5.55 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2Le 50x13x2,00 (Acoplamento de nós)

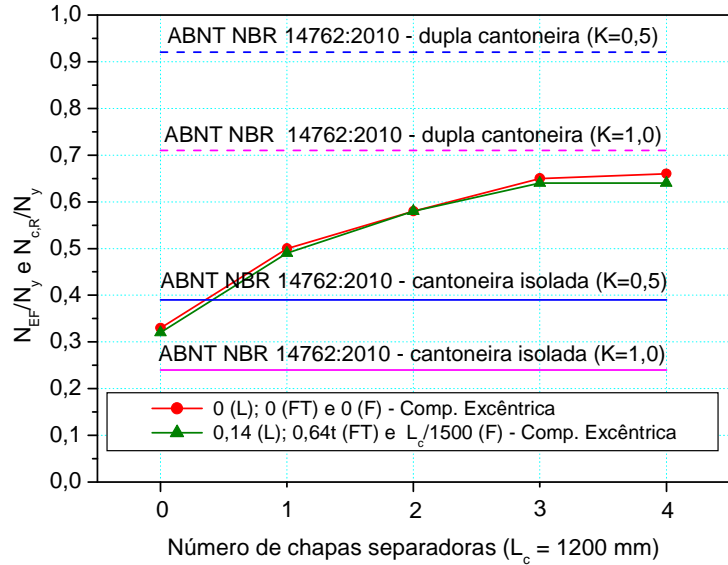


Figura 5.56 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2Le 50x13x2,00 (Chapas separadoras)

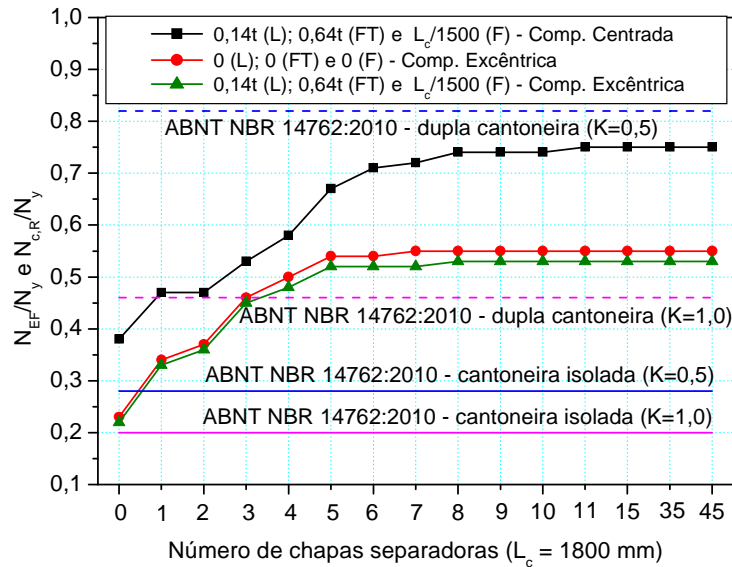


Figura 5.57 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2Le 50x13x2,00 (Acoplamento de nós)

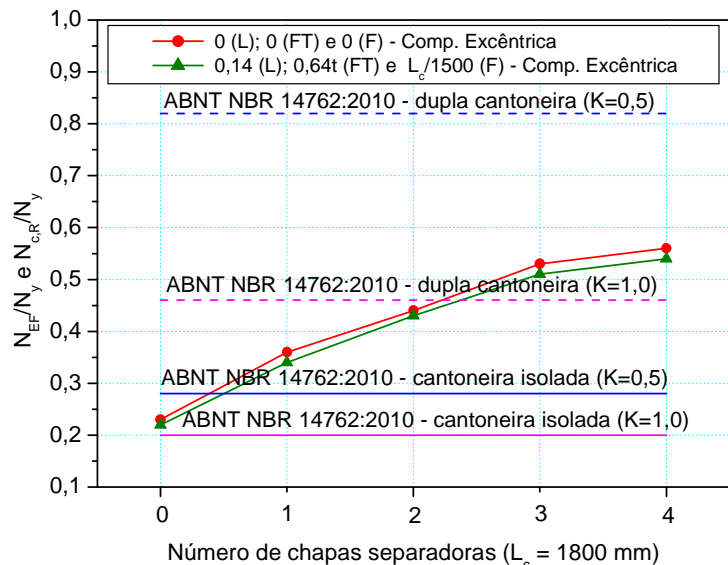


Figura 5.58 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2Le 50x13x2,00 (Chapas separadoras)

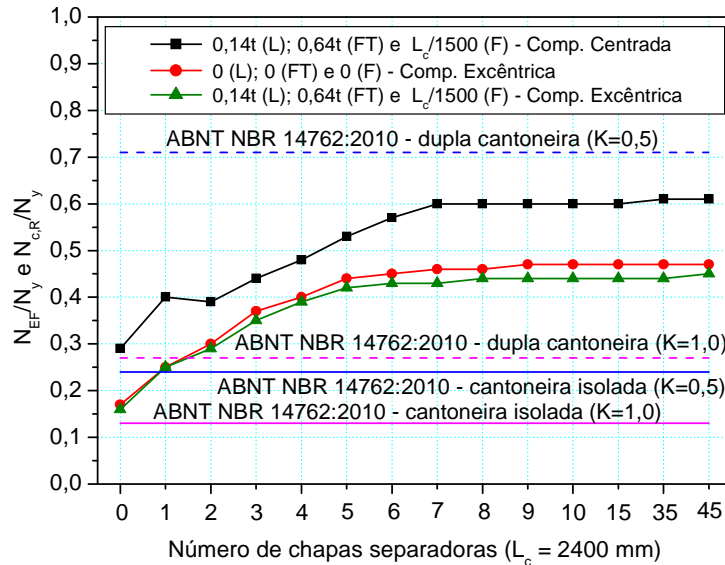


Figura 5.59 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2Le 50x13x2,00 (Acoplamento de nós)

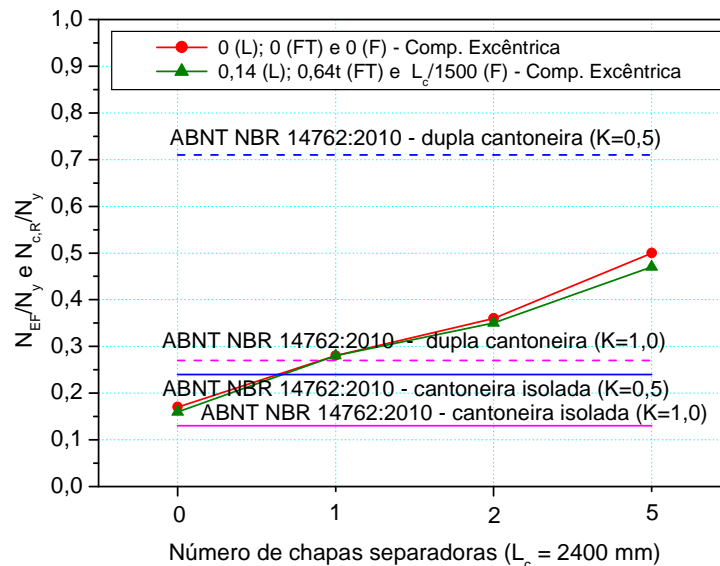


Figura 5.60 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2Le 50x13x2,00 (Chapas separadoras)

Nas Figuras 5.61 a 5.75 são ilustrados modos de instabilidade e a distribuição de tensões de von Mises observados na análise numérica da dupla cantoneira enrijecida 2Le 50x13x2,00 para o comprimento $L_c = 1200$ mm. São apresentados resultados para compressão centrada e excêntrica variando-se o número de chapas separadoras. Todos os modos apresentados foram observados para o nível de imperfeições 0,14t associado ao modo local, 0,64t associado ao modo de flexo-torção e $L_c/1500$ associado ao modo de flexão.

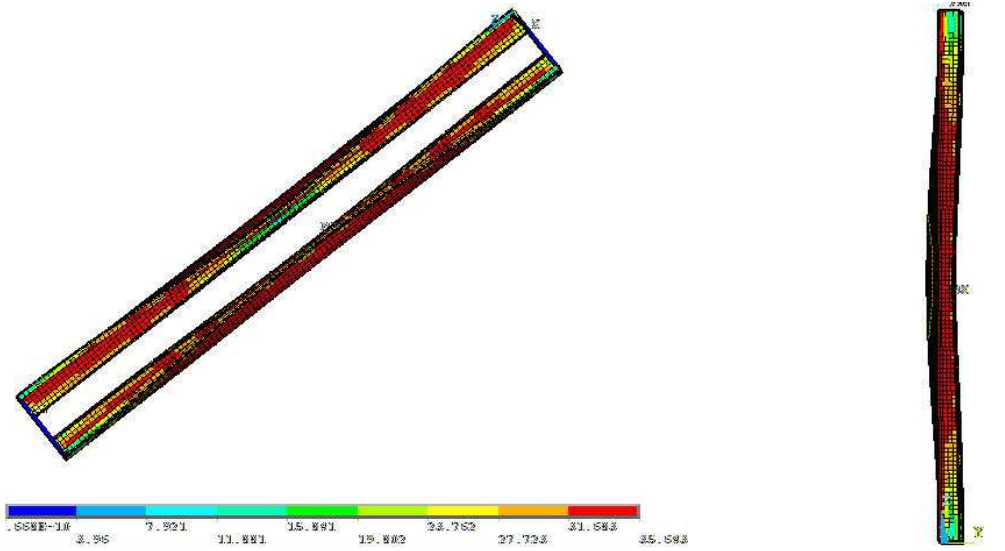


Figura 5.61 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão centrada)

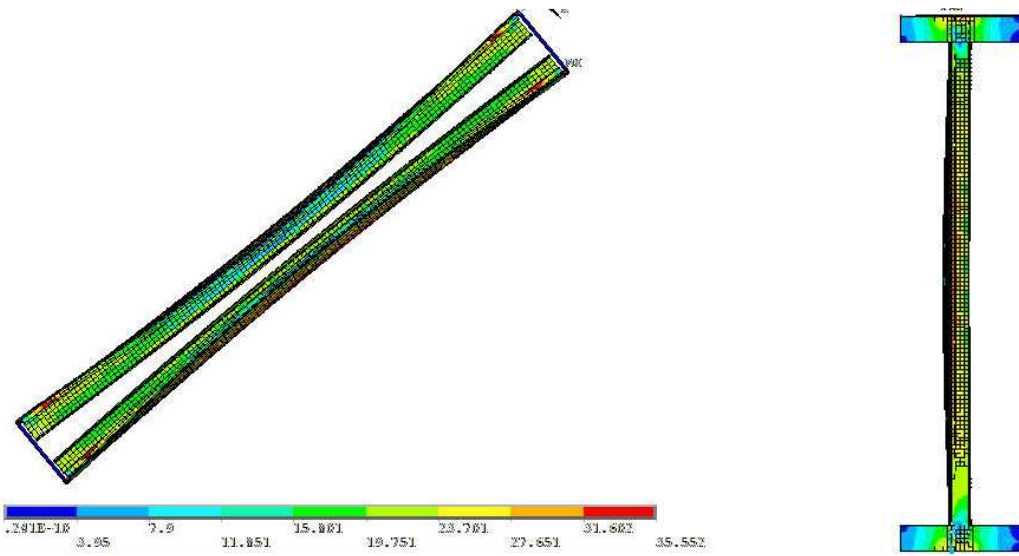


Figura 5.62 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão excêntrica)

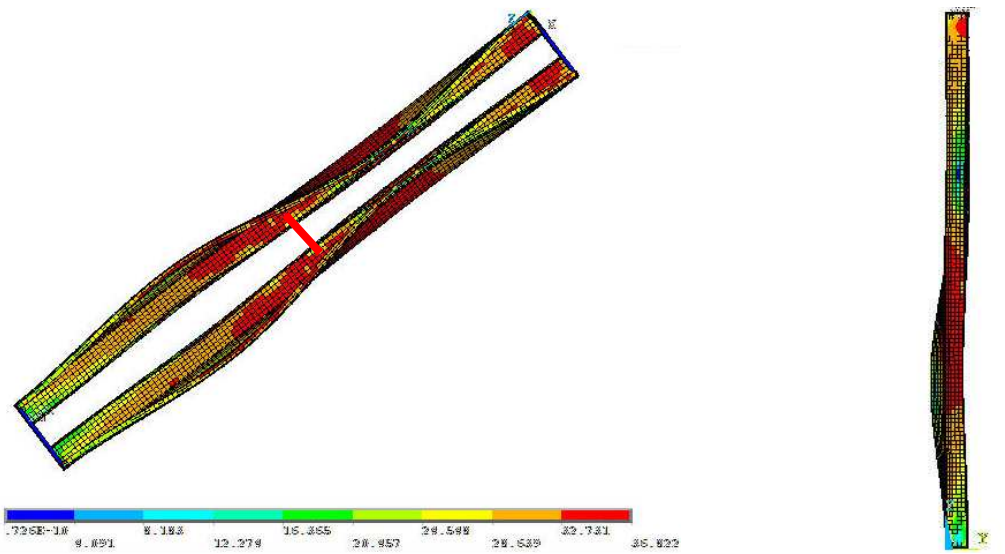


Figura 5.63 – Instabilidade por flexo-torção e distribuição de tensões de von Mises (Compressão centrada – acoplamento de nós)

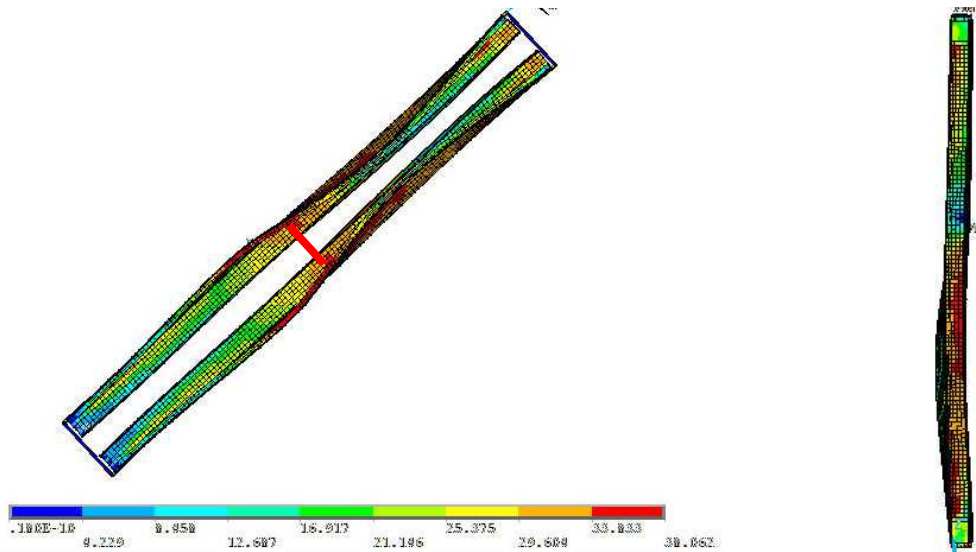


Figura 5.64 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão excêntrica – acoplamento de nós)

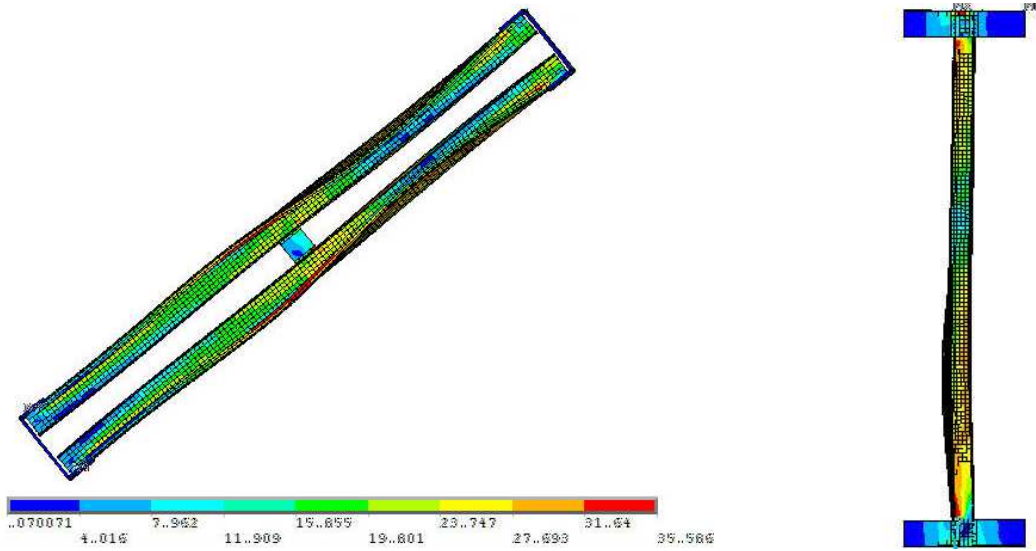


Figura 5.65 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão excêntrica – chapas separadoras)

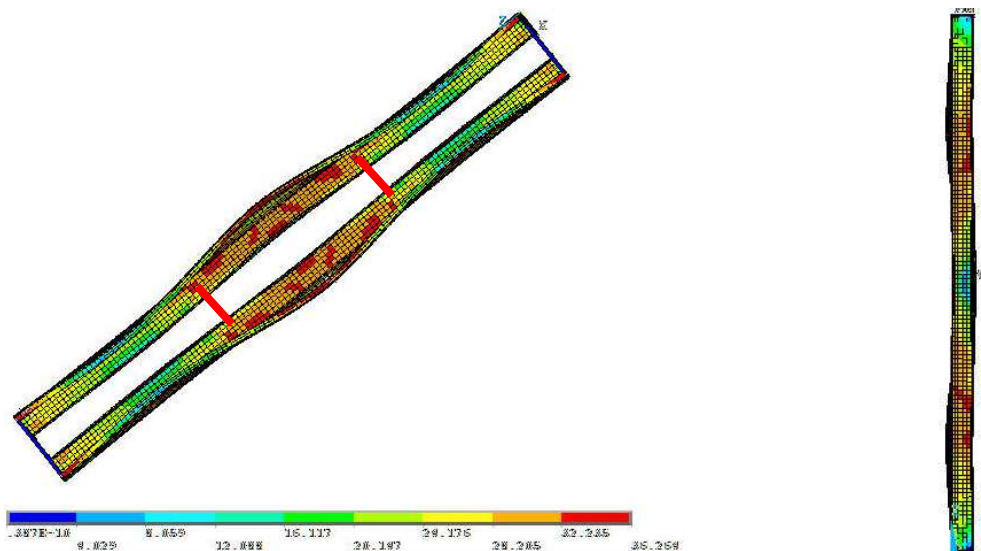


Figura 5.66 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão centrada – acoplamento de nós)

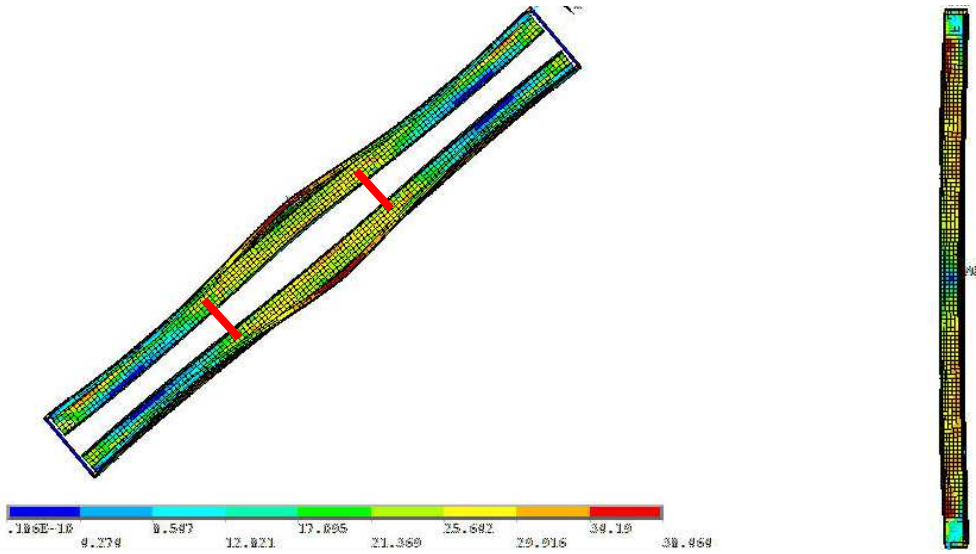


Figura 5.67 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão excêntrica – acoplamento de nós)

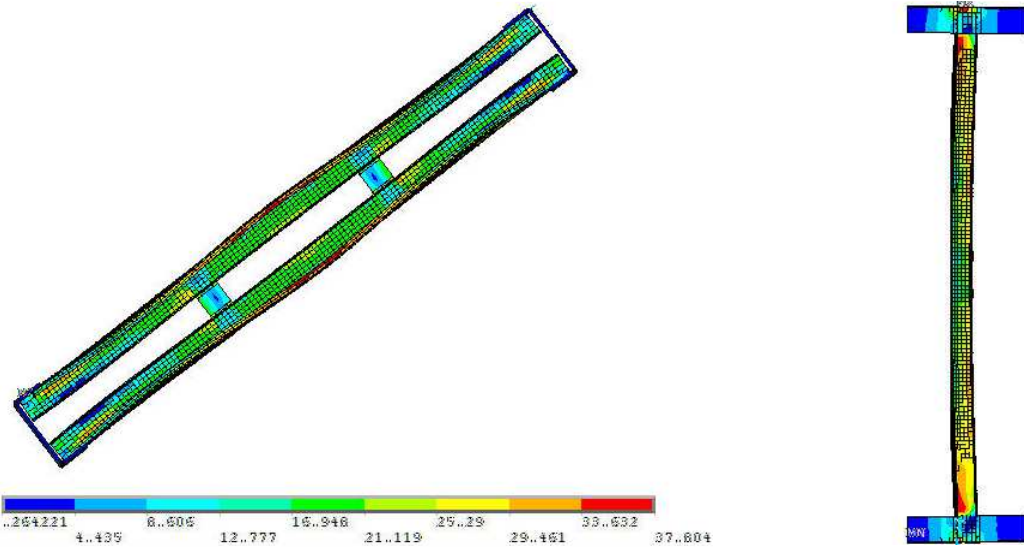


Figura 5.68 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão excêntrica – chapas separadoras)

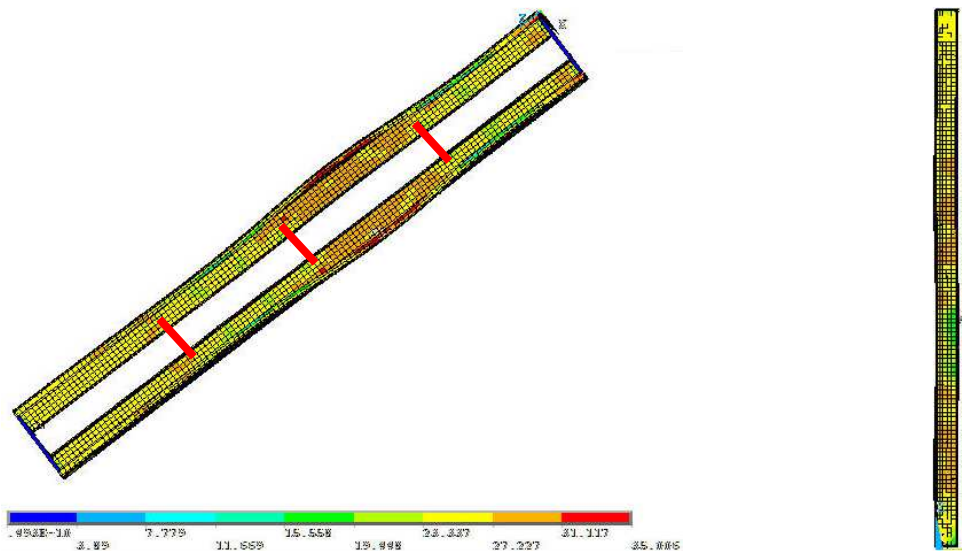


Figura 5.69 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão centrada – acoplamento de nós)

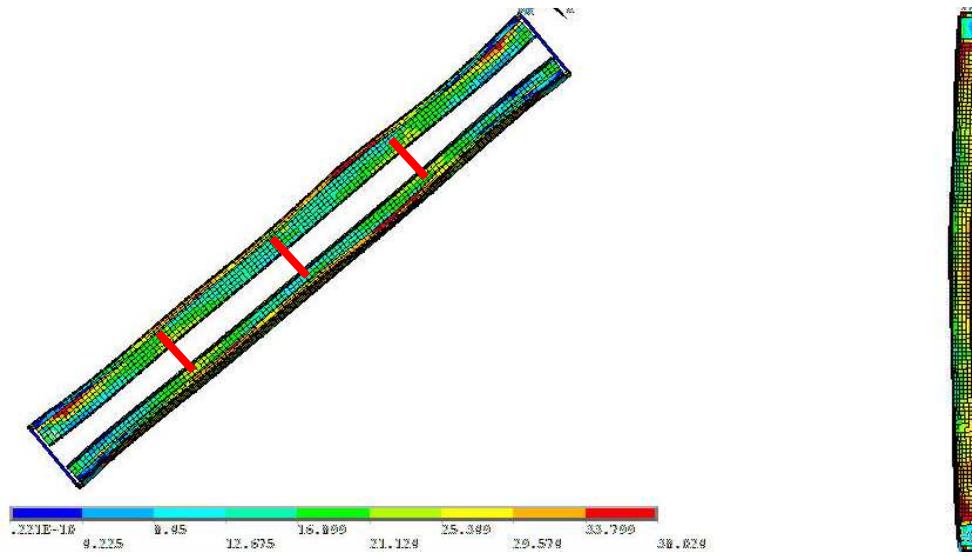


Figura 5.70 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão excêntrica – acoplamento de nós)

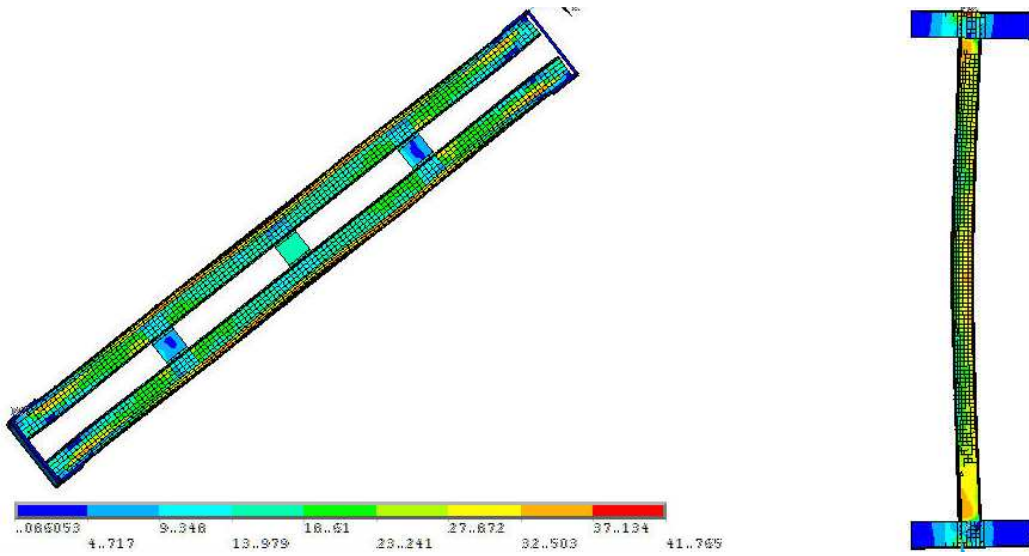


Figura 5.71 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão excêntrica – chapas separadoras)

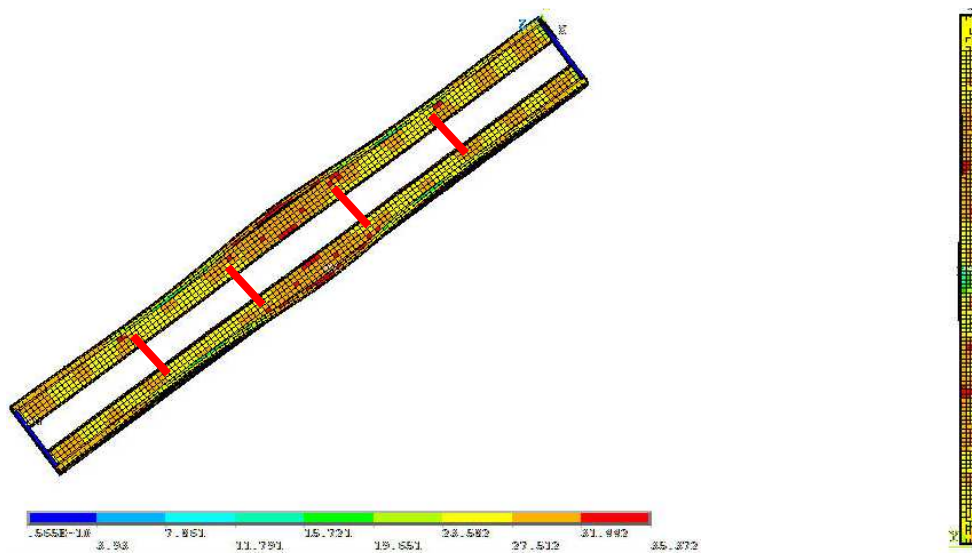


Figura 5.72 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão centrada – acoplamento de nós)

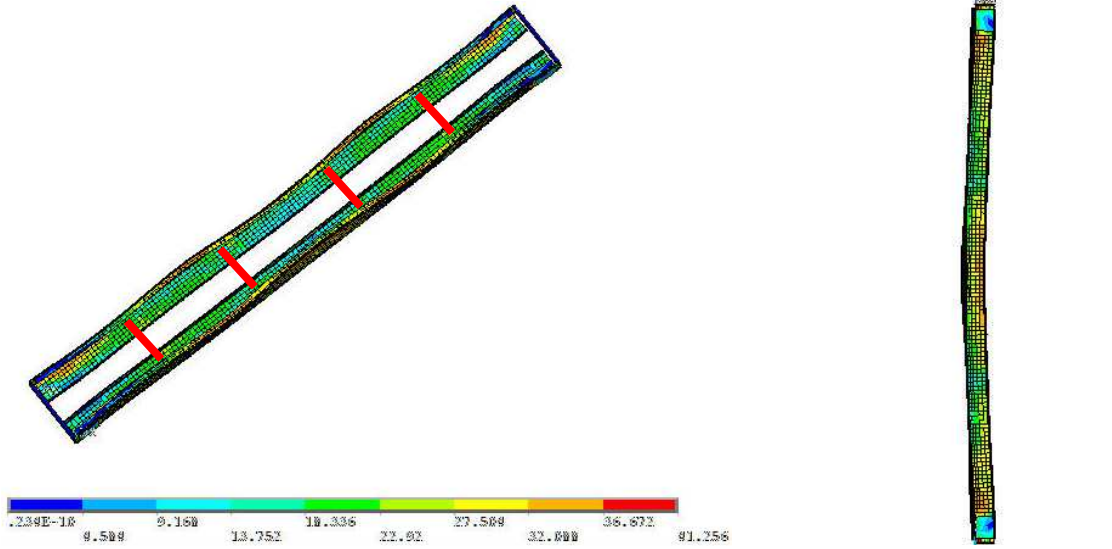


Figura 5.73 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão excêntrica – acoplamento de nós)

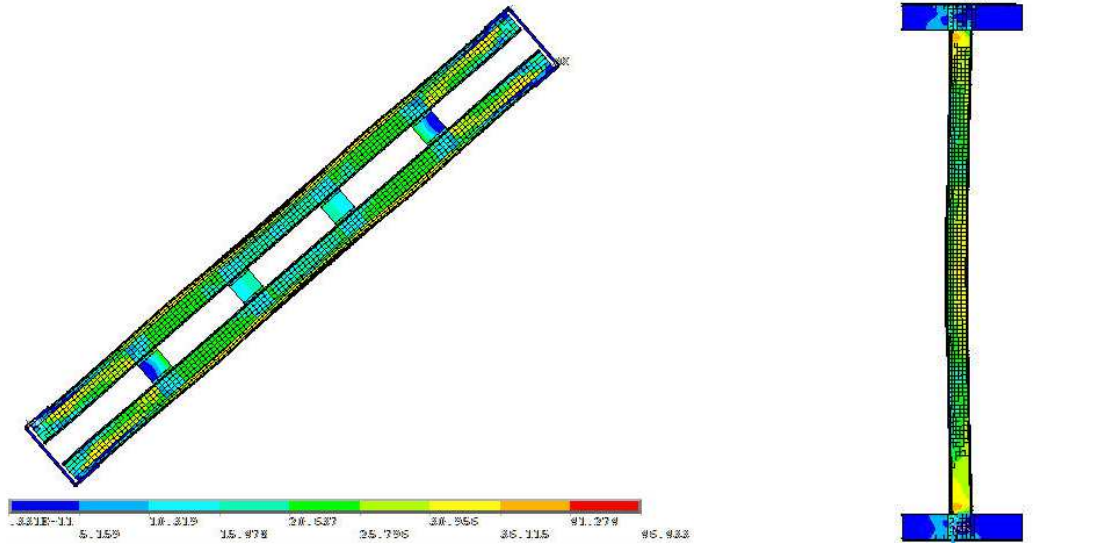


Figura 5.74 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão excêntrica – chapas separadoras)

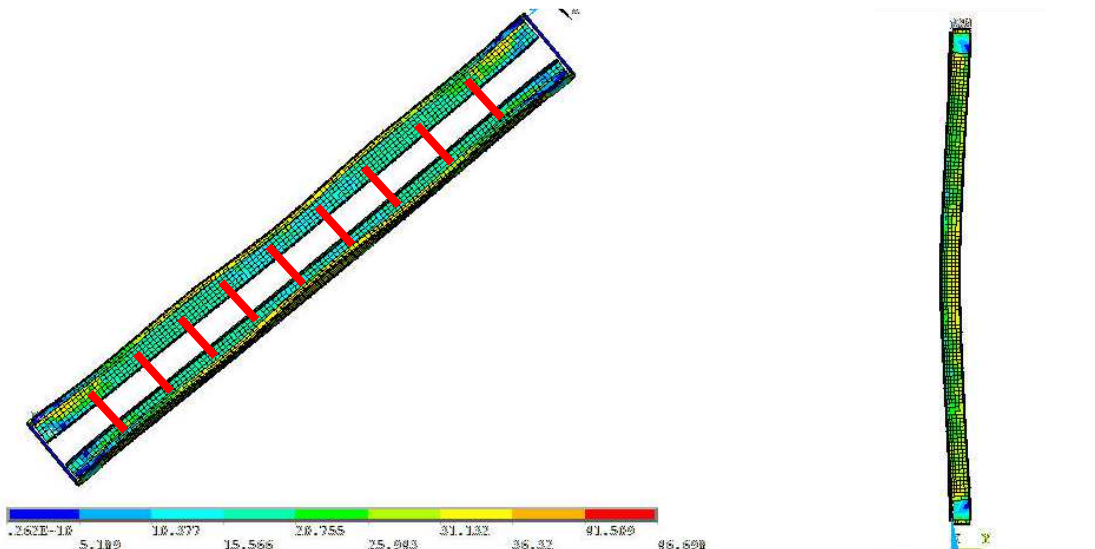


Figura 5.75 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão excêntrica – acoplamento de nós)

Os resultados da análise numérica da dupla cantoneira enrijecida 2Le 50x13x2,00 apresentaram a mesma tendência dos resultados da análise numérica inicial. Para compressão excêntrica a inserção de chapas separadoras melhorou de forma significativa a força resistente à compressão das barras, no entanto, a partir de 3 chapas, e em alguns casos 5, a força tende a permanecer constante. Para barras mais curtas os resultados apresentaram valores intermediários aos obtidos pelas hipóteses teóricas adotadas ($K=1$), no entanto, para barras mais longas, com o aumento das chapas separadoras, os resultados ultrapassaram os valores obtidos pelo procedimento teórico que considerou barra composta ($K=1$). Observa-se que o modo de instabilidade predominante no caso das barras mais curtas foi o de flexo-torção, com o aumento do comprimento e do número de chapas separadoras o modo de instabilidade predominante passou a ser o de flexão, fato que pode justificar a aproximação dos resultados numéricos com aqueles obtidos pela hipótese de cálculo teórica que admitiu barra composta.

Para compressão centrada, mesmo com o aumento das chapas separadoras, os valores numéricos não atingiram os valores da hipótese teórica que considerou barra composta ($K=0,5$). Neste caso, mesmo para barras mais longas, o modo de instabilidade predominante foi o de flexo-torção, o que justifica os valores menores que aqueles obtidos pela hipótese teórica que considerou barra composta, já que neste caso, admitiu-se apenas instabilidade local e global por flexão em relação ao eixo principal de menor inércia do conjunto.

Assim como no caso da dupla cantoneira simples, nas simulações em que foram modeladas as chapas separadoras, os valores obtidos foram maiores que aqueles obtidos nas simulações em que foi feito acoplamento dos nós na posição das chapas separadoras. Esse aumento dos valores pode ser justificado pelo fato de que ao se modelar as chapas há um aumento da rigidez em uma região muito maior que no caso de simplesmente se acoplar dois nós na posição das chapas separadoras. Com relação aos modos de instabilidade, observou-se os mesmos modos nas duas simulações realizadas.

5.2.3 Dupla cantoneira laminada

Nas Tabelas 5.9 e 5.10 são apresentados os resultados obtidos na análise de sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais da dupla cantoneira laminada 2L 50x5 (2"x3/16"). Nos modelos em que foram adotadas imperfeições associadas ao modo de flexo-torção também foi adotada imperfeição associada ao modo de flexão no valor de $L_c/1500$. Para compressão excêntrica em alguns modelos não se adotou imperfeição associada ao modo de flexo-torção, neste caso, também não se adotou imperfeição associada ao modo de flexão, ou seja, o modelo foi considerado sem imperfeições. Os resultados apresentados na Tabela 5.9 referem-se às simulações em que na posição das chapas separadoras foi feito o acoplamento de deslocamentos dos nós. Na Tabela 5.10 são apresentados os resultados obtidos na análise em que foram modeladas as chapas separadoras, neste caso, foi feito a compatibilização de deslocamentos dos nós das chapas separadoras e das cantoneiras.

Tabela 5.9 – Análise de sensibilidade às imperfeições: perfil 2L 50x5 (2"x3/16") – Acoplamento de nós

L_c (mm)	Comprimento destravado (NCH)	Imperfeições: flexo-torção e flexão	Compressão centrada			Compressão excêntrica			
			N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y	N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y	
1200 ($\lambda_x=75,1$)	1200 (0)	0 e 0	-	-	-	125,7	F*	0,45	
		0,14t e $L_c/1500$	233,9	F*	0,83	126,0	F*	0,45	
	600 (1)	0 e 0	-	-	-	176,1	F	0,63	
		0,14t e $L_c/1500$	253,1	F	0,90	172,7	F	0,61	
	400 (2)	0 e 0	-	-	-	180,6	F	0,64	
		0,14t e $L_c/1500$	250,6	F	0,89	176,3	F	0,63	
	300 (3)	0 e 0	-	-	-	194,1	F	0,69	
		0,14t e $L_c/1500$	253,4	F	0,90	190,0	F	0,68	
	240 (4)	0 e 0	-	-	-	200,7	F	0,71	
		0,14t e $L_c/1500$	253,3	F	0,90	196,4	F	0,70	
	K =0,5: $N_{c,R}^{(1)} = 224,5$ kN $N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,80$			K =1,0: $N_{c,R}^{(1)} = 114,2$ kN $N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,41$					
	$N_{c,R}^{(2)} = 256,6$ kN $N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,91$			$N_{c,R}^{(2)} = 194,8$ kN $N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,69$					

$N_y = 281,2$ kN (dupla cantoneira) ($f_y = 307$ MPa).

N_{EF} – força de compressão resistente obtida via MEF.

L_c – comprimento da barra ($\lambda_x = L_c / r_x$).

F – instabilidade por flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

F* – instabilidade por flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada.

NCH – número de chapas separadoras.

$N_{c,R}^{(1)}$ – calculado com base na ABNT NBR 8800:2008 admitindo cantoneira isolada.

$N_{c,R}^{(2)}$ – calculado com base na ABNT NBR 8800:2008 admitindo flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

NCH – número de chapas separadoras.

Tabela 5.10 – Análise de sensibilidade às imperfeições: perfil 2L 50x5 (2"x3/16") – Chapas separadoras

L _c (mm)	Comprimento destravado (NCH)	Imperfeições: flexo-torção e flexão	Compressão excêntrica			
			N _{EF} (kN)	Modo de falha	N _{EF} /N _y	
600 (λ _x =37,5)	600 (0)	0 e 0	172,1	F*	0,61	
	300 (1)	0 e 0	207,0	F	0,74	
	200 (2)	0 e 0	217,8	F	0,77	
	K = 0,5: N _{c,R} ⁽¹⁾ = 234,2 kN N _{c,R} ⁽¹⁾ / N _y = 0,83 N _{c,R} ⁽²⁾ = 274,8 kN N _{c,R} ⁽²⁾ / N _y = 0,98		K = 1,0: N _{c,R} ⁽¹⁾ = 224,5 kN N _{c,R} ⁽¹⁾ / N _y = 0,80 N _{c,R} ⁽²⁾ = 256,6 kN N _{c,R} ⁽²⁾ / N _y = 0,91			
1200 (λ _x =75,1)	1200 (0)	0 e 0	125,7	F*	0,45	
	(0)	0,14t e L _c /1500	126,0	F*	0,45	
	600 (1)	0 e 0	176,0	F	0,63	
	(1)	0,14t e L _c /1500	172,2	F	0,61	
	400 (2)	0 e 0	186,2	F	0,66	
	(2)	0,14t e L _c /1500	181,7	F	0,65	
	300 (3)	0 e 0	196,1	F	0,70	
	(3)	0,14t e L _c /1500	192,5	F	0,68	
	240 (4)	0 e 0	202,8	F	0,72	
	(4)	0,14t e L _c /1500	199,1	F	0,71	
	K = 0,5: N _{c,R} ⁽¹⁾ = 224,5 kN N _{c,R} ⁽¹⁾ / N _y = 0,80 N _{c,R} ⁽²⁾ = 256,6 kN N _{c,R} ⁽²⁾ / N _y = 0,91		K = 1,0: N _{c,R} ⁽¹⁾ = 114,2 kN N _{c,R} ⁽¹⁾ / N _y = 0,41 N _{c,R} ⁽²⁾ = 194,8 kN N _{c,R} ⁽²⁾ / N _y = 0,69			
	1800 (λ _x =112,6)	1800 (0)	0 e 0	81,3	F*	0,29
900 (1)		0 e 0	146,7	F	0,52	
600 (2)		0 e 0	159,3	F	0,57	
450 (3)		0 e 0	170,2	F	0,61	
360 (4)		0 e 0	176,9	F	0,63	
K = 0,5: N _{c,R} ⁽¹⁾ = 169,4 kN N _{c,R} ⁽¹⁾ / N _y = 0,60 N _{c,R} ⁽²⁾ = 228,8 kN N _{c,R} ⁽²⁾ / N _y = 0,81		K = 1,0: N _{c,R} ⁽¹⁾ = 50,9 kN N _{c,R} ⁽¹⁾ / N _y = 0,18 N _{c,R} ⁽²⁾ = 123,2 kN N _{c,R} ⁽²⁾ / N _y = 0,44				

N_y = 281,2 kN (dupla cantoneira) (f_y = 307 MPa).
N_{EF} – força de compressão resistente obtida via MEF.
L_c – comprimento da barra (λ_x=L_c/r_x).
F – instabilidade por flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.
F* – instabilidade por flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada.
NCH – número de chapas separadoras.
N_{c,R}⁽¹⁾ – calculado com base na ABNT NBR 8800:2008 admitindo cantoneira isolada.
N_{c,R}⁽²⁾ – calculado com base na ABNT NBR 8800:2008 admitindo flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.
NCH – número de chapas separadoras.

Nas Figuras 5.76 e 5.79 são apresentados os resultados obtidos na análise numérica comparados com os resultados das hipóteses teóricas adotadas. Nas Figuras 5.80 a 5.87 são ilustrados modos de instabilidade e a distribuição de tensões de von Mises observados na análise numérica da dupla cantoneira laminada 2L 50x5 (2"x3/16"). São apresentados resultados para compressão centrada e excêntrica variando-se o número de chapas separadoras. Todos os modos apresentados foram observados para o nível de imperfeições 0,14t associado ao modo de flexo-torção e L_c/1500 associado ao modo de flexão.

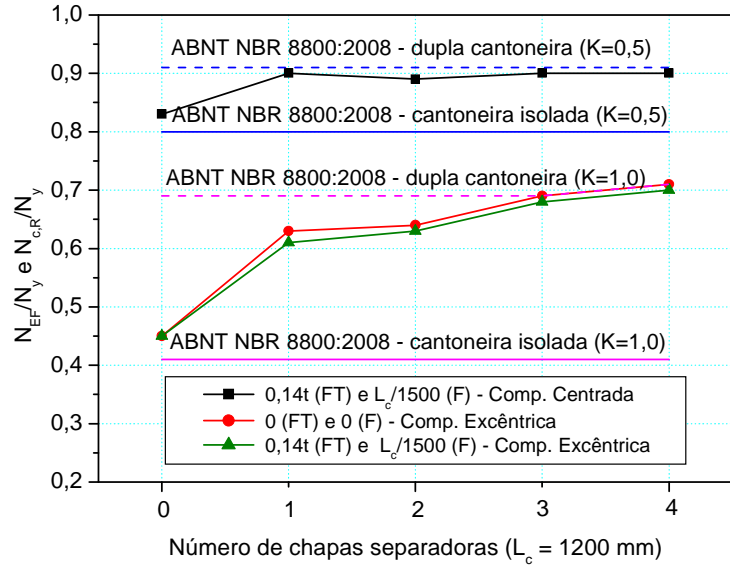


Figura 5.76 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2L 50x5 (2"x3/16") (Acoplamento de nós)

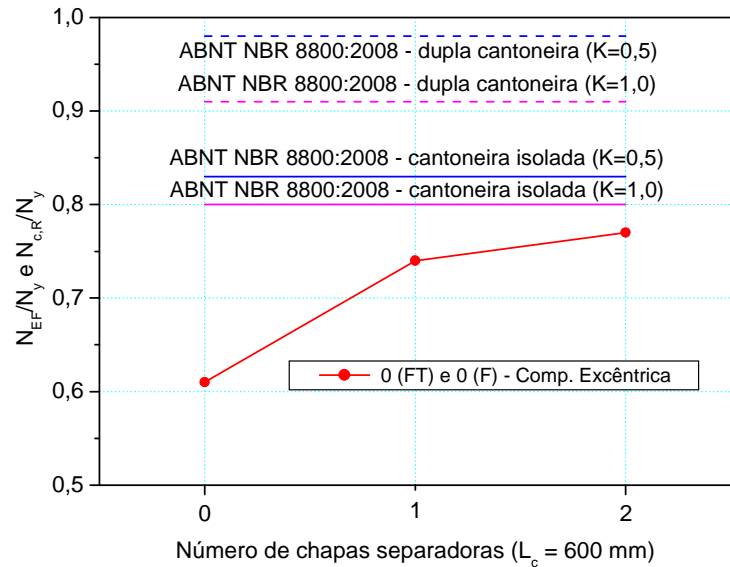


Figura 5.77 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2L 50x5 (2"x3/16") (Chapas separadoras)

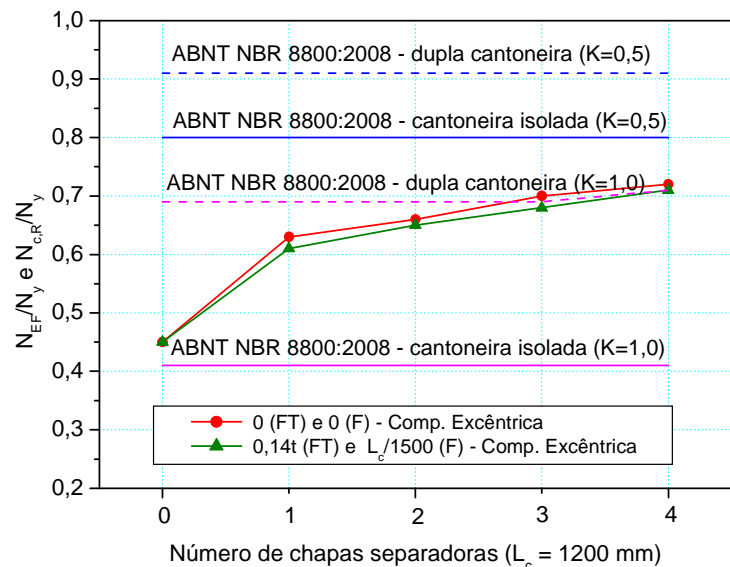


Figura 5.78 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2L 50x5 (2"x3/16") (Chapas separadoras)

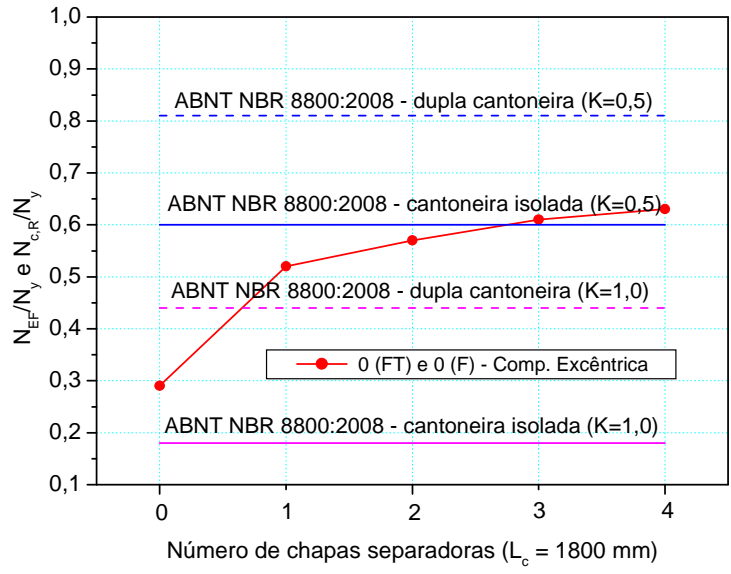


Figura 5.79 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2L 50x5 (2"x3/16") (Chapas separadoras)

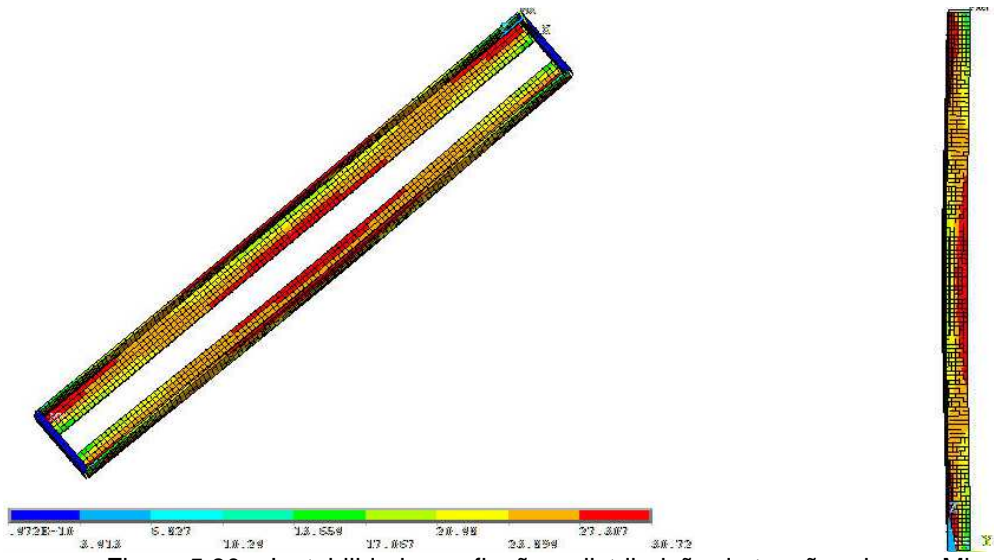


Figura 5.80 – Instabilidade por flexão e distribuição de tensões de von Mises (compressão centrada)

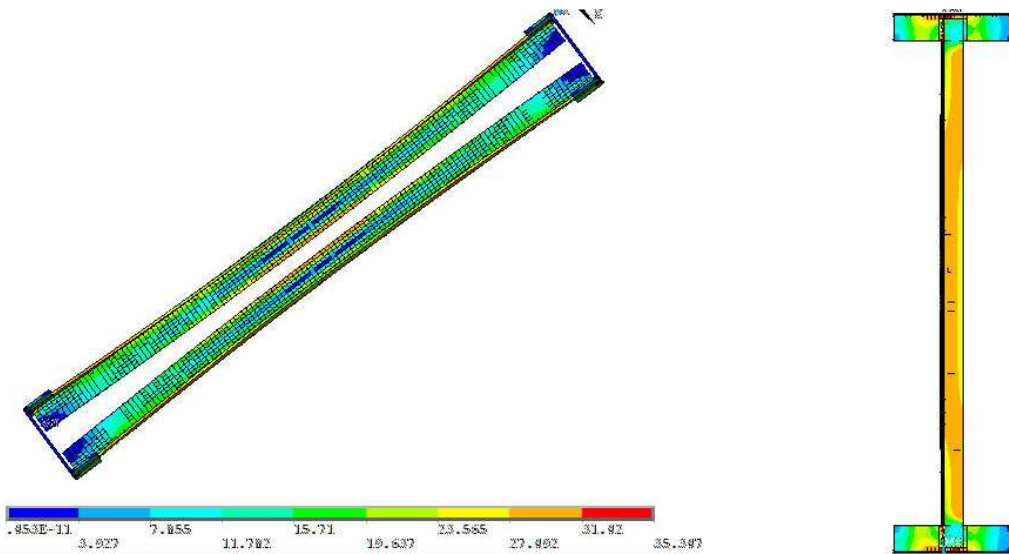


Figura 5.81 – Instabilidade por flexão e distribuição de tensões de von Mises (compressão excêntrica)

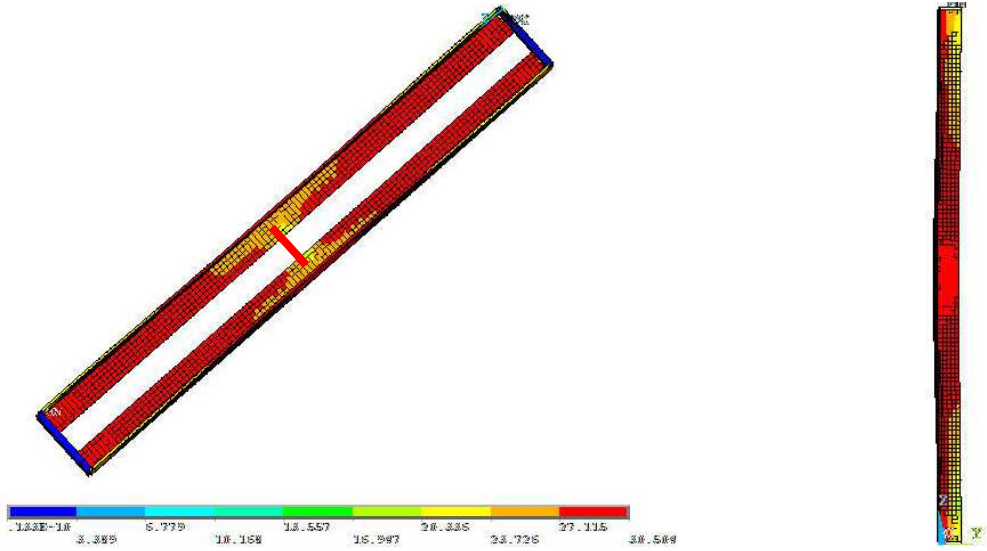


Figura 5.82 – Instabilidade por flexão e distribuição de tensões de von Mises (compressão centrada – acoplamento de nós)

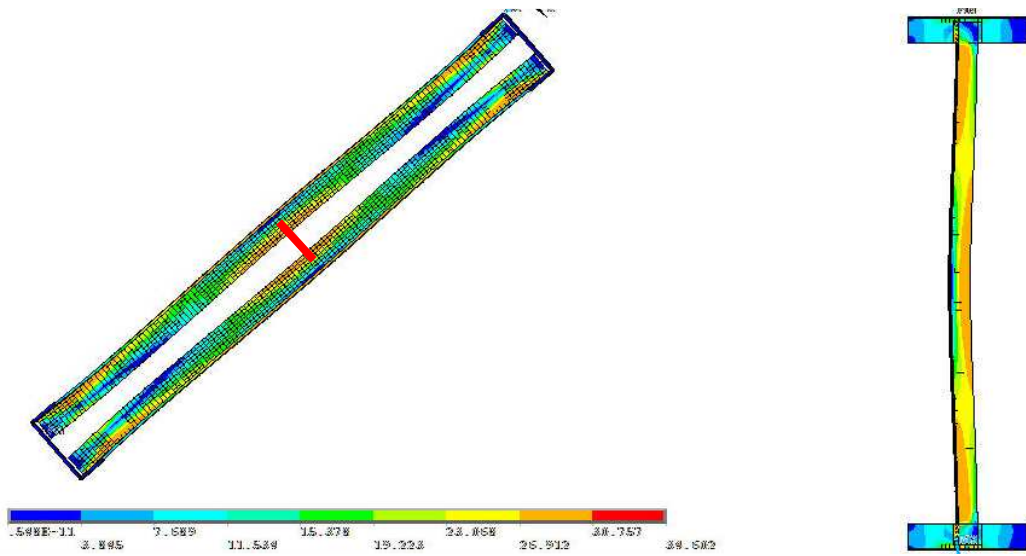


Figura 5.83 – Instabilidade por flexão e distribuição de tensões de von Mises (compressão excêntrica – acoplamento de nós)

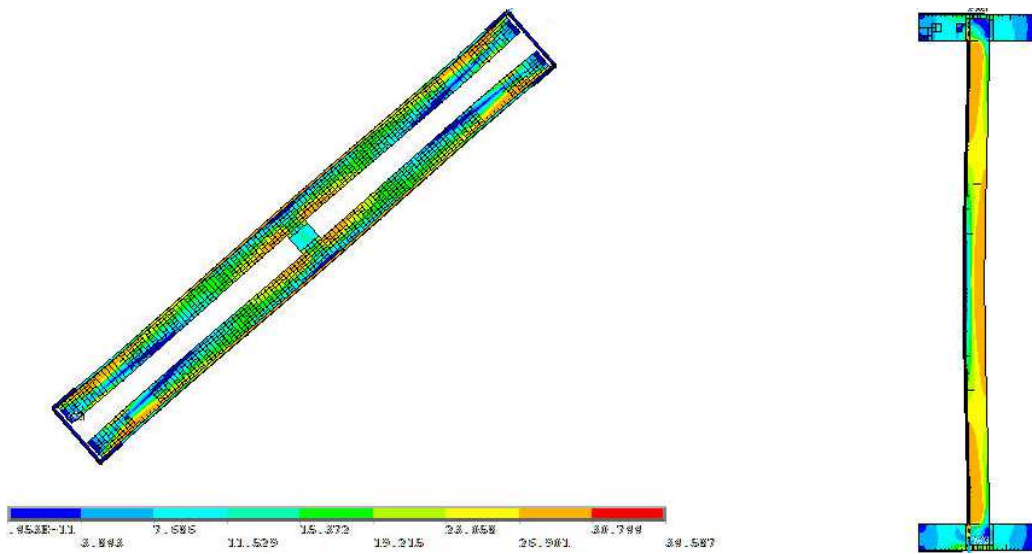


Figura 5.84 – Instabilidade por flexão e distribuição de tensões de von Mises (compressão excêntrica – chapas separadoras)

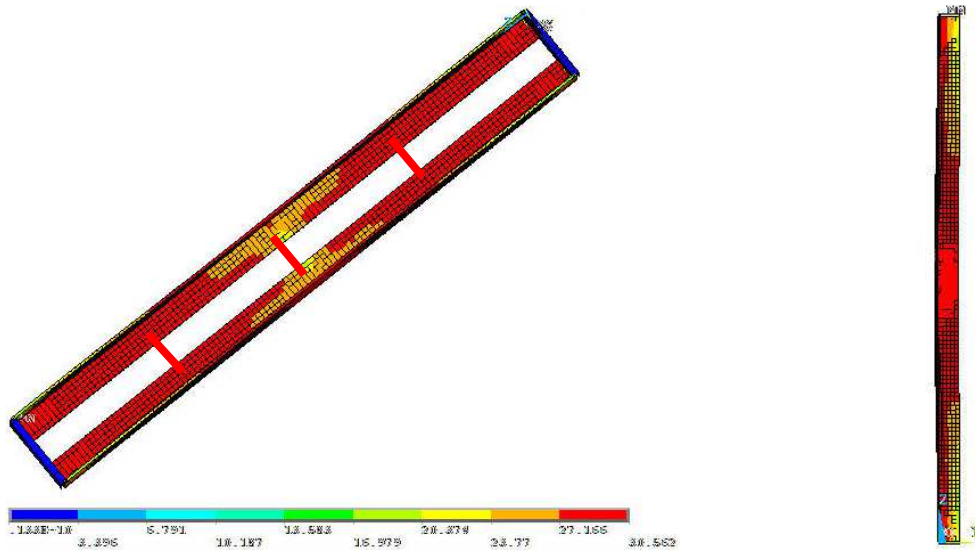


Figura 5.85 – Instabilidade por flexão e distribuição de tensões de von Mises (compressão centrada – acoplamento de nós)

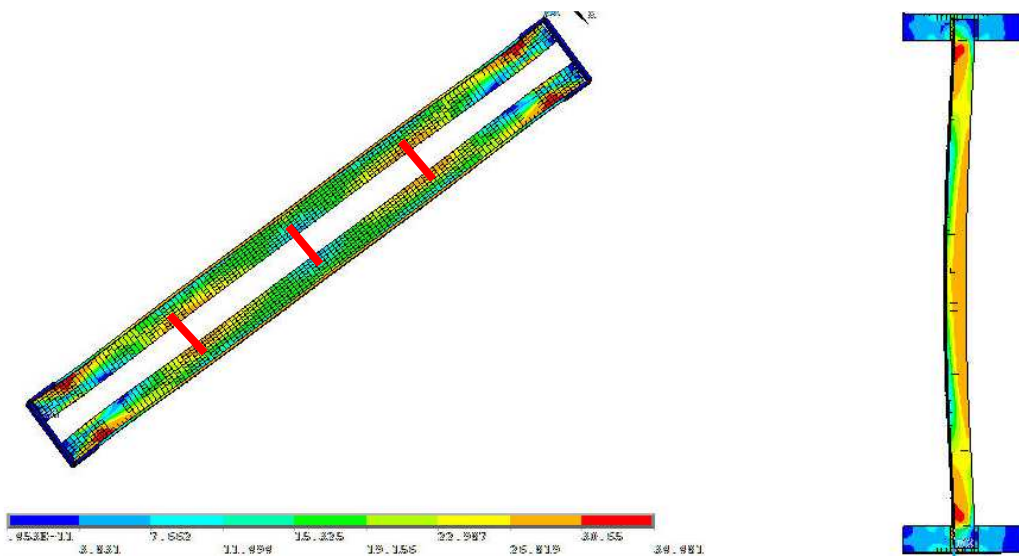


Figura 5.86 – Instabilidade por flexão e distribuição de tensões de von Mises (compressão excêntrica – acoplamento de nós)

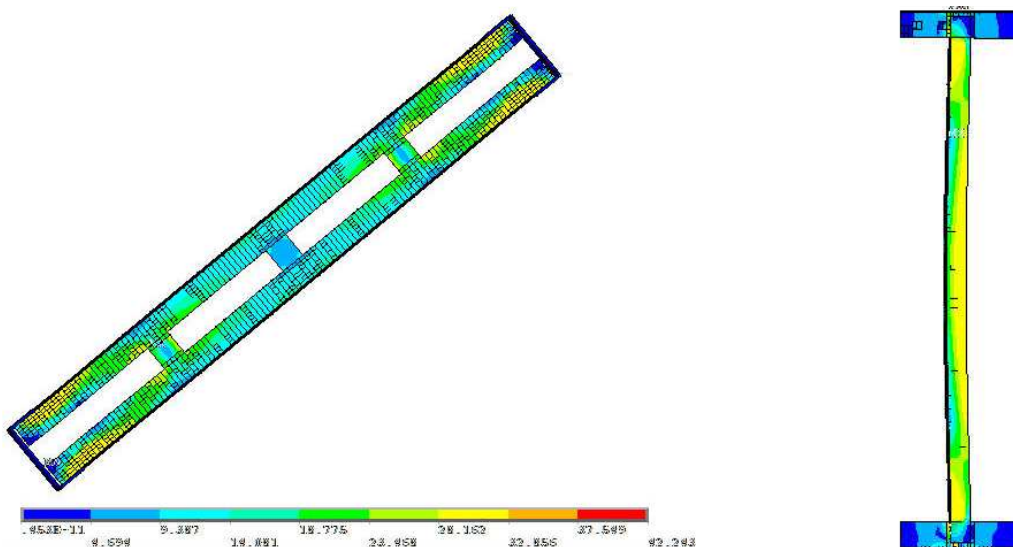


Figura 5.87 – Instabilidade por flexão e distribuição de tensões de von Mises (compressão excêntrica – chapas separadoras)

Os resultados da análise numérica da dupla cantoneira laminada apresentaram a mesma tendência dos resultados das duplas cantoneiras formadas a frio, em geral, resultados numéricos com valores intermediários aos obtidos pelas hipóteses teóricas adotadas. Resultados numéricos de barras isoladas tenderam para a hipótese teórica que considerou barra isolada e com o aumento das chapas separadoras os resultados tenderam para a hipótese que considerou barra composta, ultrapassando no caso de barras mais longas. Nesse caso, barras sob compressão centrada e excêntrica apresentaram modo de instabilidade predominante por flexão, como esperado, já que se trata de uma seção pouco propensa ao modo de flexo-torção.

As duas simulações realizadas apresentaram resultados muito próximos, ou seja, não houve diferença significativa em modelar as chapas separadoras ou fazer acoplamento de deslocamento de nós na posição das mesmas.

5.3 Análise experimental

5.3.1 Dupla cantoneira simples

Na Tabela 5.11 são apresentados os resultados da análise experimental da dupla cantoneira simples 2L 60x2,00 comparados com os resultados da análise numérica e das hipóteses teóricas adotadas. Os resultados da análise experimental das barras com chapas separadoras parafusadas são comparados com os resultados da análise numérica em que foi feito o acoplamento de deslocamentos de nós na posição das chapas separadoras. Os resultados da análise experimental das barras com chapas separadoras soldadas são comparados com os resultados da análise numérica em que foram modeladas as chapas separadoras. Nas Figuras 5.88 a 5.91 os resultados das análises experimental e numérica são comparados com os resultados das hipóteses teóricas adotadas. Além das hipóteses adotadas inicialmente, os resultados são comparados com os obtidos pelo procedimento apresentado pela ABNT NBR 8800: 2008 para cantoneiras simples conectadas pela aba (cálculo de força normal de flambagem elástica).

Tabela 5.11 – Resultados da análise experimental comparados com os resultados das simulações numéricas e das hipóteses teóricas adotadas: perfil 2L 60x2,00 ($f_y = 350$ MPa)

Barra	Análise experimental		Análise numérica					
	N_{Exp} (kN)	Modo de falha	0 (FT) e 0 (F)			0,64t (FT) e $L_c/1500$ (F)		
			N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{Exp}/N_{EF}	N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{Exp}/N_{EF}
Extremidades fixas (compressão excêntrica)								
Chapas separadoras parafusadas								
L 600-0	72,2	FT/F*	71,6	FT/F*	1,01	71,9	FT/F*	1,00
L 600-1P	74,0	FT	73,1	FT/F	1,01	72,2	FT/F	1,02
L 600-2P	76,0	FT	76,9	FT/F	0,99	75,1	FT/F	1,01
$N_{c,R}^{(1)} = 30,5$ kN		$N_{c,R}^{(2)} = 76,8$ kN						
L 1200-0	58,5	FT/F*	48,8	FT/F*	1,20	49,2	FT/F*	1,19
L 1200-0	50,4	FT/F*	48,8	FT/F*	1,03	49,2	FT/F*	1,02
L 1200-1P	55,4	FT/F*	54,3	FT/F	1,02	52,6	FT/F	1,05
L 1200-2P	50,6	FT/F/F*	60,7	FT/F	0,83	59,5	FT/F	0,85
L 1200-3P	56,2	FT/F/F*	72,5	FT/F	0,78	67,0	FT/F	0,84
L 1200-4P	62,5	FT/F/F*	75,3	FT/F	0,83	70,9	FT/F	0,88
L 1200-5P	72,9	FT/F	72,2	FT/F	1,01	69,8	FT/F	1,04
$N_{c,R}^{(1)} = 29,8$ kN		$N_{c,R}^{(2)} = 67,2$ kN						
L 1800-0	34,1	FT/F*	33,4	FT/F*	1,02	33,8	FT/F*	1,01
L 1800-1P	45,0	FT/F/F*	43,2	FT/F	1,04	41,6	FT/F	1,08
L 1800-2P	42,8	FT/F/F*	47,8	FT/F	0,90	47,0	FT/F	0,91
L 1800-3P	41,1	FT/F/F*	57,8	FT/F	0,71	56,8	FT/F	0,72
L 1800-4P	53,5	FT/F/F*	64,5	FT/F	0,83	60,9	FT/F	0,88
$N_{c,R}^{(1)} = 28,7$ kN		$N_{c,R}^{(2)} = 53,6$ kN						
L 2400-0	28,8	FT/F*	24,4	FT/F*	1,18	24,8	FT/F*	1,16
L 2400-1P	36,5	FT/F/F*	35,0	FT/F	1,04	33,7	FT/F	1,08
L 2400-2P	40,4	FT/F/F*	37,0	FT/F	1,09	34,9	FT/F	1,16
L 2400-5P	34,8	FT/F/F*	56,2	FT/F	0,62	51,5	FT/F	0,68
$N_{c,R}^{(1)} = 19,9$ kN		$N_{c,R}^{(2)} = 38,9$ kN						
Chapas separadoras soldadas								
L 1800-1S	46,9	FT/F/F*	52,9	FT/F	0,89	52,1	FT/F	0,90
L 1800-2S	53,3	FT/F/F*	60,1	FT/F	0,89	54,2	FT/F	0,98
L 1800-3S	64,5	FT/F	60,4	FT/F	1,07	57,0	FT/F	1,13
L 1800-4S	56,1	FT/F	68,1	FT/F	0,82	66,8	FT/F	0,84
$N_{c,R}^{(1)} = 28,7$ kN		$N_{c,R}^{(2)} = 53,6$ kN						
L 2400-1S	29,3	FT/F/F*	42,2	FT/F	0,69	40,4	FT/F	0,73
L 2400-1SR	34,8	FT/F/F*	42,2	FT/F	0,82	40,4	FT/F	0,86
L 2400-2S	43,7	FT/F/F*	43,1	FT/F	1,01	42,5	FT/F	1,03
L 2400-5S	52,0	FT/F	60,4	FT/F	0,86	57,7	FT/F	0,90
$N_{c,R}^{(1)} = 19,9$ kN		$N_{c,R}^{(2)} = 38,9$ kN						

...continua na próxima página

...continuação – Tabela 5.11

Barra	Análise experimental		Análise numérica					
	N _{Exp} (kN)	Modo de falha	0 (FT) e 0 (F)		0,64t (FT) e L _c /1500 (F)			
			N _{EF} (kN)	Modo de falha	N _{Exp} /N _{EF}	N _{EF} (kN)	Modo de falha	N _{Exp} /N _{EF}
Extremidades fixas (compressão centrada)								
Chapas separadoras parafusadas								
LC 1200-0	58,0	FT	-	-	-	48,8	FT	1,19
LC 1200-1P	61,7	FT	-	-	-	74,0	FT	0,83
LC 1200-2P	69,6	FT	-	-	-	79,9	FT	0,87
LC 1200-3P	68,1	FT	-	-	-	79,3	FT	0,86
LC 1200-4P	70,4	FT	-	-	-	83,7	FT	0,84
N _{c,R} ⁽¹⁾ = 30,5 kN		N _{c,R} ⁽²⁾ = 76,8 kN						
Flexão livre em relação ao eixo de menor inércia do conjunto (compressão excêntrica)								
Chapas separadoras parafusadas								
L 1200-0	35,5	FT/F*	32,7	FT/F*	1,09	33,1	FT/F*	1,07
L 1200-1P	42,5	FT/F	45,6	FT/F	0,93	43,8	FT/F	0,97
L 1200-2P	39,4	FT/F	44,6	FT/F	0,88	42,0	FT/F	0,94
L 1200-3P	44,0	FT/F	48,6	FT/F	0,91	47,0	FT/F	0,94
L 1200-4P	52,8	FT/F	49,1	FT/F	1,08	47,5	FT/F	1,11
N _{c,R} ⁽¹⁾ = 29,6 kN		N _{c,R} ⁽²⁾ = 64,4 kN						

Legenda:

LC X – N

L – cantoneira simples; C – compressão centrada; X – comprimento da barra; N – número de chapas separadoras.

FT – instabilidade por flexo-torção de cantoneira individual.

F – instabilidade por flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

F* – instabilidade por flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada.

N_{c,R}⁽¹⁾ – calculado com base na ABNT NBR 14762:2010 admitindo cantoneira isolada.

N_{c,R}⁽²⁾ – calculado com base na ABNT NBR 14762:2010 admitindo flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

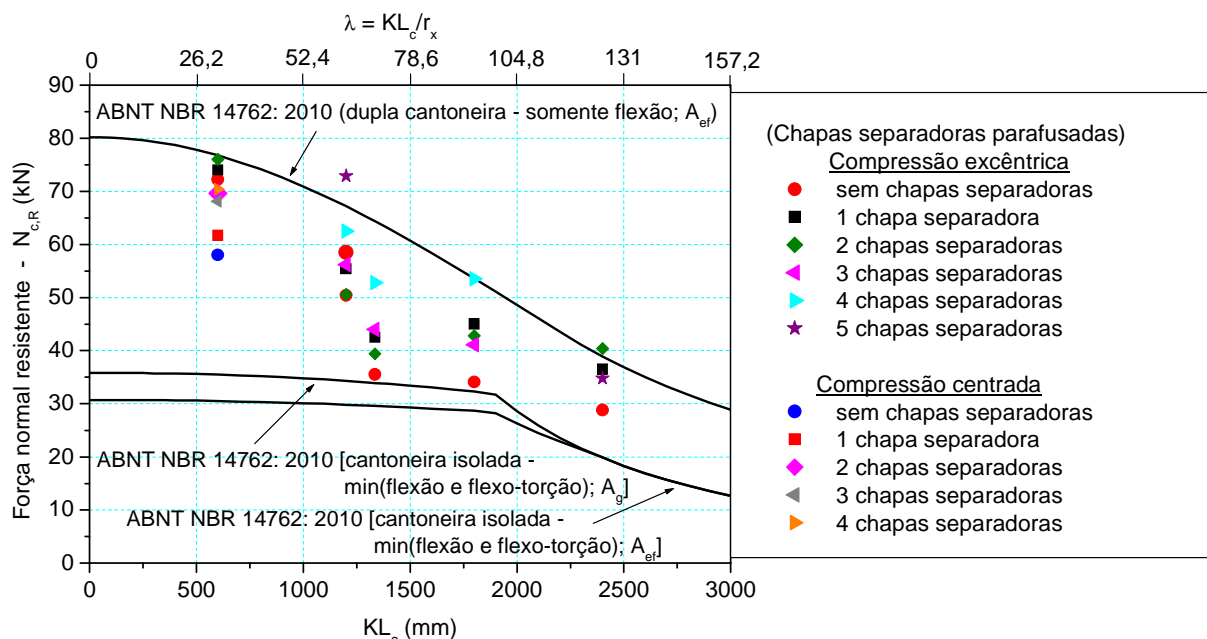


Figura 5.88 – Resultados da análise experimental comparados com os resultados das hipóteses teóricas adotadas (perfil: 2L 60x2,00) – Chapas separadoras parafusadas

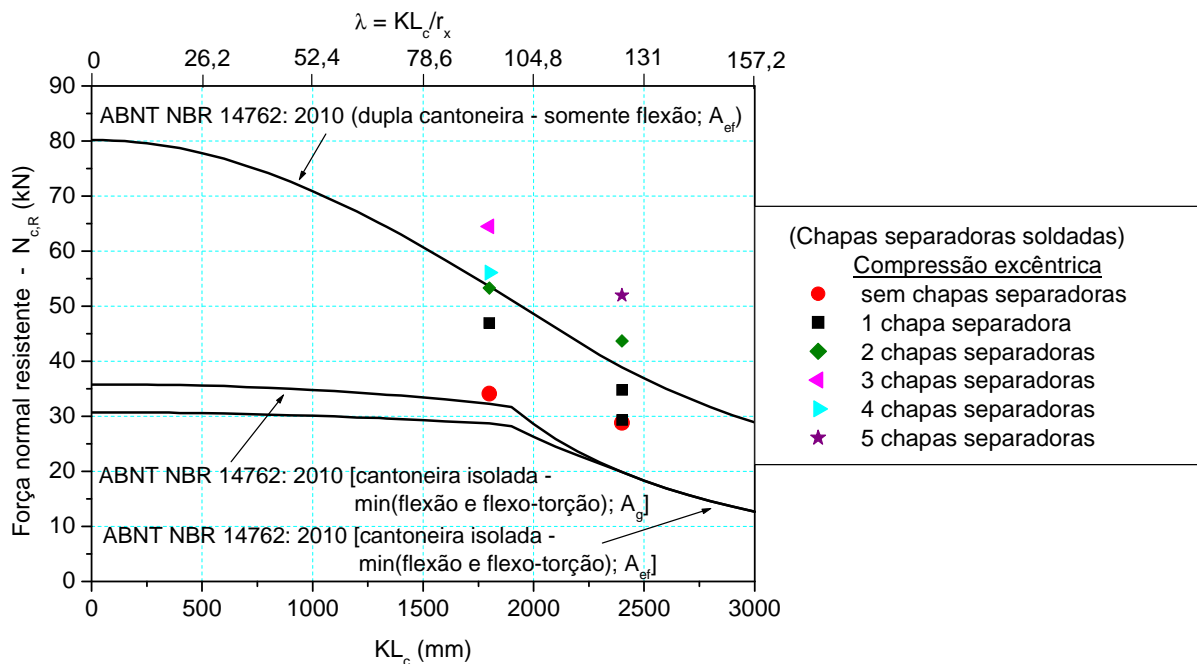


Figura 5.89 – Resultados da análise experimental comparados com os resultados das hipóteses teóricas adotadas (perfil: 2L 60x2,00) – Chapas separadoras soldadas

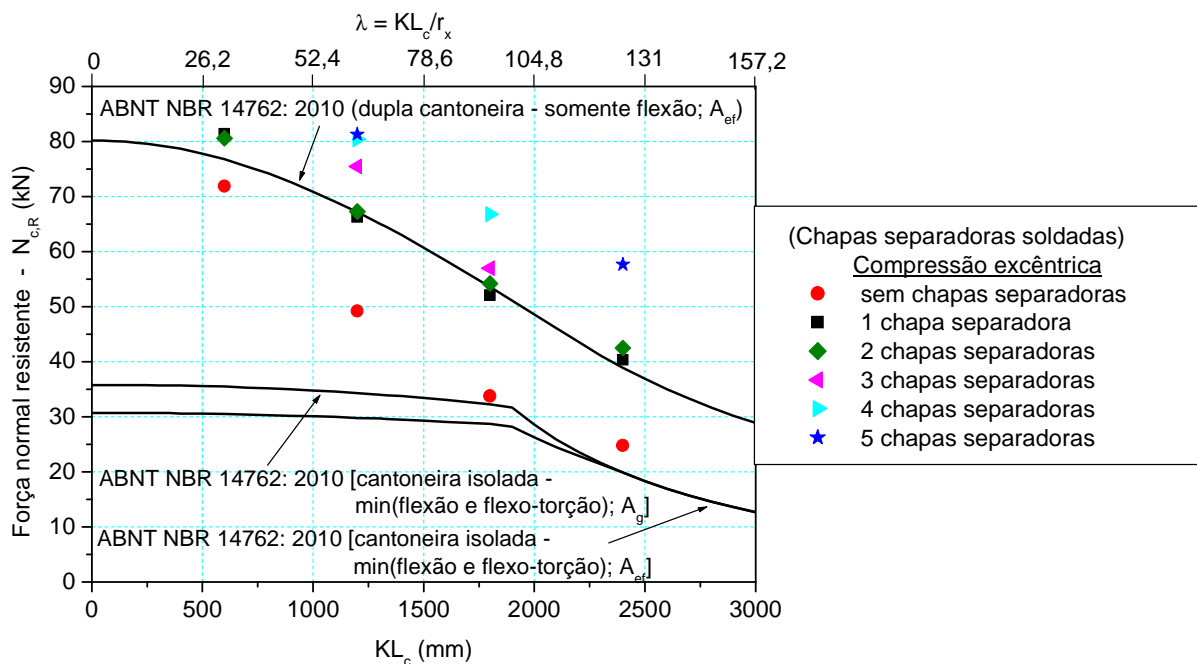


Figura 5.90 – Resultados da análise numérica comparados com os resultados das hipóteses teóricas adotadas (perfil: 2L 60x2,00) – Chapas separadoras soldadas – Imperfeições: 0,64t (FT) e $L_c/1500$ (F)

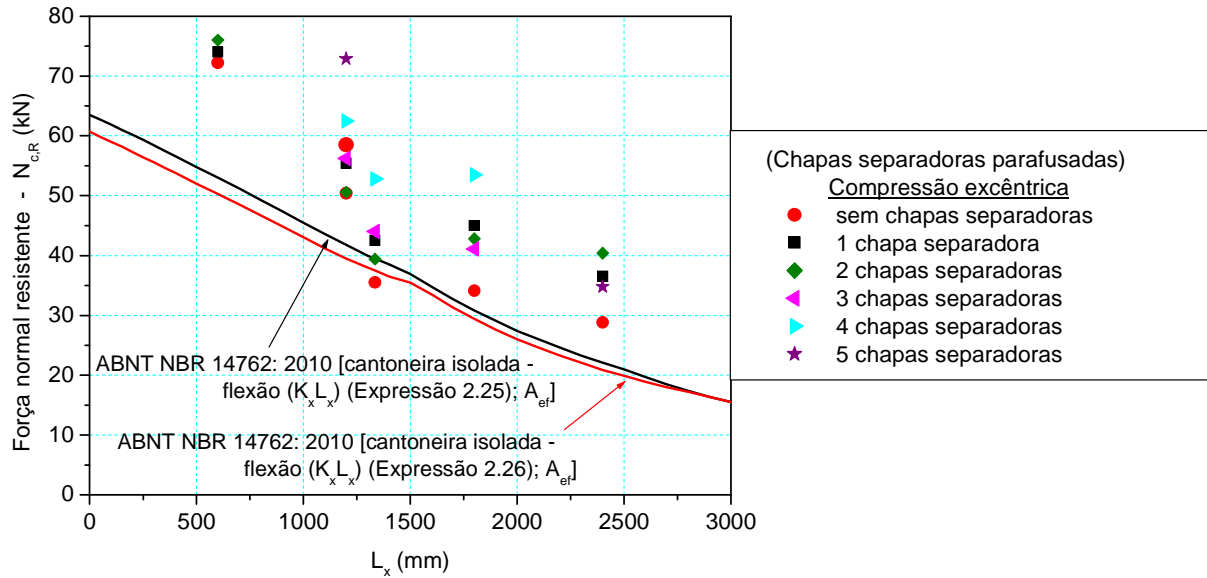


Figura 5.91 – Resultados da análise experimental comparados com os resultados das hipóteses teóricas calculados com comprimento de flambagem equivalente ($K_x L_x$) (Expressões 2.25 e 2.26) (perfil: 2L 60x2,00) – Chapas separadoras parafusadas

Nas Figuras 5.92 a 5.97 são apresentados típicos modos de instabilidade observados na análise experimental da dupla cantoneira simples 2L 60x2,00. Os modos de instabilidade de todos os ensaios são apresentados no Apêndice B.



Figura 5.92 – Instabilidade por flexo-torção (FT)/flexão de cantoneira individual (F^*) ($L_c = 1200$ mm – sem chapas separadoras – compressão excêntrica)

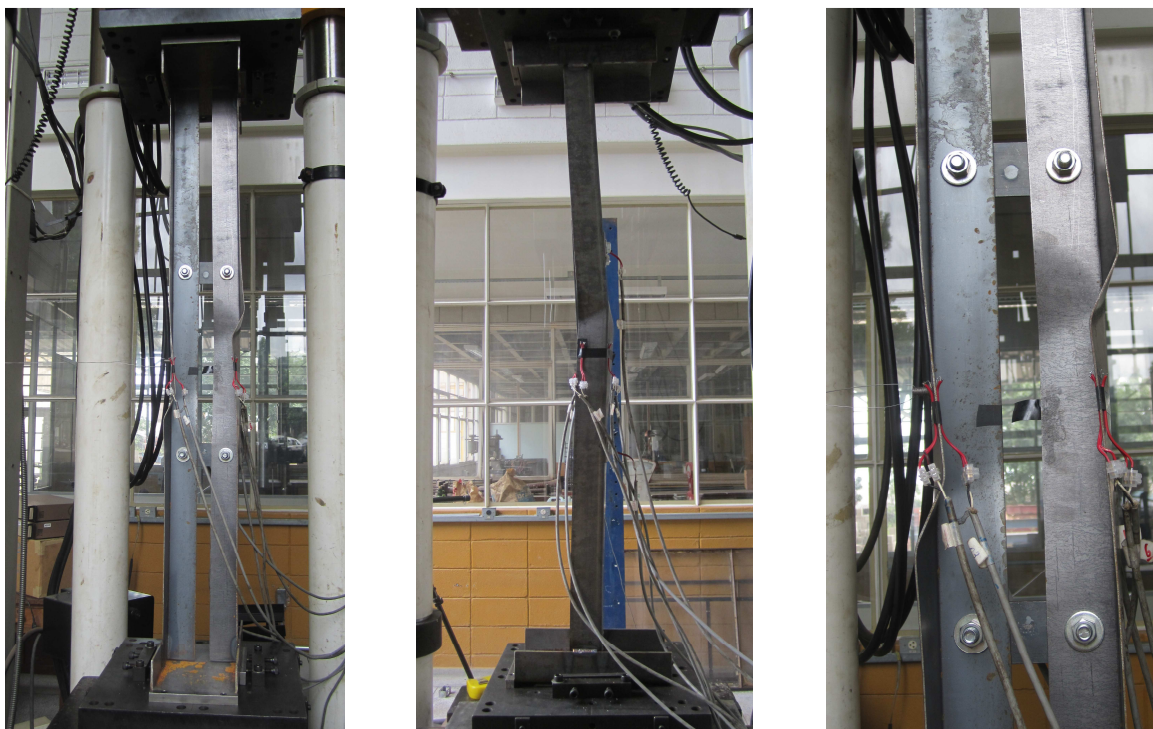


Figura 5.93 – Instabilidade por flexo-torção (FT)/flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto (F) ($L_c = 1200$ mm – 2 chapas separadoras parafusadas – compressão excêntrica)

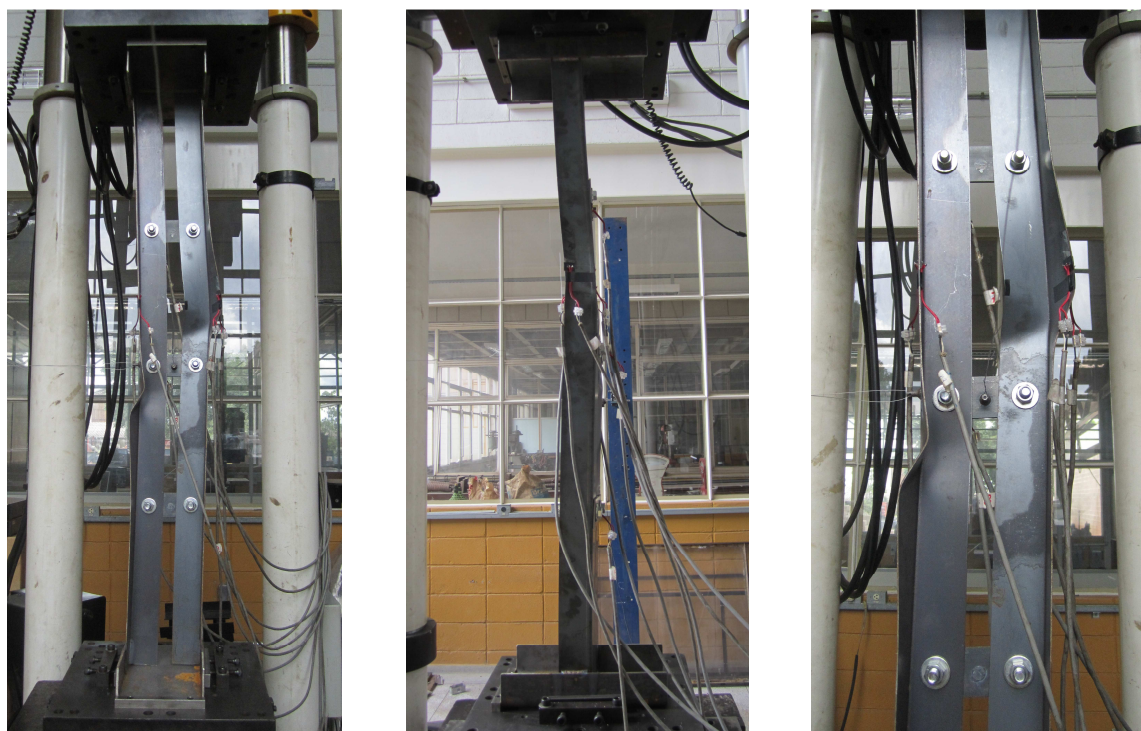


Figura 5.94 – Instabilidade por flexo-torção (FT)/flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto (F)/flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada (F*) ($L_c = 1200$ mm – 3 chapas separadoras parafusadas – compressão excêntrica)



Figura 5.95 – Instabilidade por flexo-torção (FT) ($L_c = 1200$ mm – 2 chapas separadoras parafusadas – compressão centrada)



Figura 5.96 – Instabilidade por flexo-torção (FT)/flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto (F)/flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada (F^*) ($L_c = 1800$ mm – 2 chapas separadoras soldadas – compressão excêntrica)



Figura 5.97 – Instabilidade por flexo-torção (FT)/flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto (F) ($L_c = 1800$ mm – 3 chapas separadoras soldadas – compressão excêntrica)

O modo de instabilidade predominante na análise experimental da dupla cantoneira simples 2L 60x2,00 foi flexo-torção de barra isolada com comprimento de semi-onda limitado pelas chapas separadoras. Para as barras mais curtas a inserção de chapas separadoras pouco interferiu na força resistente das barras, assim como observado na análise numérica, isso pode ser função do modo de instabilidade, já que neste caso, observou-se apenas flexo-torção e sabe-se que para cantoneira simples a força que tende a causar instabilidade por flexo-torção independe do comprimento da barra. Para comprimentos maiores a inserção de chapas separadoras melhorou de forma significativa o comportamento das barras. Neste caso, além do modo de flexo-torção também observou-se modo de flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto. Algumas barras com chapas separadoras parafusadas apresentaram deformada por flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada, neste caso, as ligações parafusadas não fornecem restrição ao giro, com isso quando há instabilidade de uma das barras a tendência é que a outra acompanhe. Para barras com chapas separadoras soldadas também observou-se essa tendência em alguns

casos, principalmente para 1 e 2 chapas separadoras, mas de forma menos pronunciada, já que neste caso, a ligação das chapas fornece restrição ao giro.

Na análise numérica os modos de instabilidade observados foram flexo-torção e flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto. Em geral, os resultados da simulação numérica em que foi feito o acoplamento de deslocamento de nós na posição das chapas separadoras foram bastante coerentes com os resultados da análise experimental de barras com chapas separadoras parafusadas. Os resultados da análise numérica em que foram modeladas as chapas separadoras foram muito próximos dos resultados da análise experimental das barras com chapas separadoras soldadas. Com relação às imperfeições geométricas iniciais, observa-se que a adoção das mesmas pouco interferiu nos resultados já que os valores são muito baixos se comparados ao valor da excêntricidade imposta pela aplicação da força nas abas.

No caso de barras com chapas separadoras parafusadas, alguns resultados da análise experimental foram muito baixos ao serem comparados com os resultados da análise numérica. Como na análise numérica procurou-se trabalhar com modelos simples, as simplificações adotadas para simular a ligação entre chapas separadoras e cantoneiras não permitiu o giro, fato que ocorreu na análise experimental.

Comparando os resultados da análise experimental de barras com chapas separadoras parafusadas com os valores das hipóteses teóricas adotadas, observou-se a mesma tendência dos resultados da análise numérica (modelos com acoplamento de deslocamentos de nós na posição das chapas separadoras), ou seja, valores intermediários aos obtidos nas hipóteses teóricas adotadas inicialmente. Resultados experimentais de barras isoladas tenderam para a hipótese que considerou barra isolada e com o aumento do número de chapas separadoras os valores tenderam para a hipótese que considerou flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto. Observa-se que apenas nos casos onde houve predominância de instabilidade por flexão os valores da análise experimental ultrapassaram os resultados obtidos pela hipótese que considerou barra composta.

Para as barras com chapas separadoras soldadas observou-se um significativo aumento na força normal resistente, além disso, para 2 chapas separadoras os valores experimentais e numéricos (modelos com chapas separadoras) já ultrapassam a hipótese teórica que considerou flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

Com os resultados obtidos, entende-se que quando as chapas separadoras restringirem o giro (soldadas ou conectadas por 2 parafusos) pode-se adotar como procedimento de cálculo a hipótese que considera apenas modo global de flexão e modo local. No caso das chapas separadoras parafusadas (1 parafuso) entende-se que seria contra a segunça adotar o mesmo procedimento, com isso, o mais correto seria adotar o procedimento que considera barras isoladas. No entanto, como alternativa e a favor da economia, entende-se que ao considerar os modos globais de flexão e flexo-torção pode-se considerar a área efetiva igual a área bruta. Outra alternativa seria a utilização do procedimento proposto pela ABNT NBR 8800: 2008 para cantoneiras simples conectadas pela aba, em que no cálculo da força axial de flambagem elástica considera apenas o modo global de flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada, mas com um comprimento de flambagem equivalente (Figura 5.91). Neste caso, deve considerar o cálculo da área efetiva.

5.3.2 Dupla cantoneira enrijecida

Na Tabela 5.12 são apresentados os resultados da análise experimental da dupla cantoneira enrijecida 2Le 50x13x2,00 comparados com os resultados da análise numérica e das hipóteses teóricas adotadas. Os resultados da análise experimental das barras com chapas separadoras parafusadas são comparados com os resultados da análise numérica em que foi feito o acoplamento de deslocamentos de nós na posição das chapas separadoras. Os resultados da análise experimental das barras com chapas separadoras soldadas são comparados com os resultados da análise numérica em que foram modeladas as chapas separadoras. Nas Figuras 5.98 a 5.102 os resultados das análises experimental e numérica são comparados com os resultados das hipóteses teóricas adotadas. Além das

hipóteses adotadas inicialmente, os resultados são comparados com os obtidos pelo procedimento apresentado pela ABNT NBR 8800: 2008 para cantoneiras simples conectadas pela aba.

Tabela 5.12 – Resultados da análise experimental comparados com os resultados das simulações numéricas e das hipóteses teóricas adotadas: perfil 2Le 50x13x2,00 ($f_y = 350$ MPa)

Barra	Análise experimental		Análise numérica					
			0 (L); 0 (FT) e 0 (F)		0,14t (L); 0,64t (FT) e $L_c/1500$ (F)			
	N_{Exp} (kN)	Modo de falha	N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{Exp}/N_{EF}	N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{Exp}/N_{EF}
Extremidades fixas (compressão excêntrica)								
Chapas separadoras parafusadas								
Le 600-0	81,8	FT/F*	80,3	FT/F*	1,02	78,4	FT/F*	1,04
Le 600-1P	111,3	FT	102,8	FT	1,08	98,3	FT	1,13
Le 600-2P	113,6	FT	105,0	FT	1,08	102,6	FT	1,11
$N_{c,R}^{(1)} = 63,7$ kN	$N_{c,R}^{(2)} = 149,2$ kN							
Le 1200-0	57,0	FT/F*	54,3	FT/F*	1,05	52,4	FT/F*	1,09
Le 1200-1P	81,1	FT/F/F*	72,3	FT/F	1,12	71,5	FT/F	1,13
Le 1200-2P	83,4	FT/F*	78,9	FT/F	1,06	77,3	FT/F	1,08
Le 1200-3P	102,2	FT/F/F*	95,2	FT/F	1,07	93,3	FT/F	1,09
Le 1200-4P	108,4	FT/F	98,2	FT/F	1,10	95,1	FT/F	1,14
$N_{c,R}^{(1)} = 38,8$ kN	$N_{c,R}^{(2)} = 115,2$ kN							
Le 1800-0	36,4	FT/F*	37,6	FT/F*	0,97	36,1	FT/F*	1,00
Le 1800-1P	62,0	FT/F/F*	54,7	FT/F	1,13	54,3	FT/F	1,14
Le 1800-2P	63,2	FT/F/F*	60,7	FT/F	1,04	59,3	FT/F	1,07
Le 1800-3P	73,9	FT/F/F*	75,2	FT/F	0,98	72,8	FT/F	1,02
Le 1800-4P	69,3	FT/F/F*	80,9	FT/F	0,86	78,3	FT/F	0,89
$N_{c,R}^{(1)} = 31,9$ kN	$N_{c,R}^{(2)} = 74,9$ kN							
Le 2400-0	18,7	FT/F*	27,5	FT/F*	0,68	26,0	FT/F*	0,72
Le 2400-0R	24,0	FT/F*	27,5	FT/F*	0,87	26,0	FT/F*	0,92
Le 2400-1P	44,4	FT/F/F*	40,5	FT/F	1,10	40,2	FT/F	1,10
Le 2400-2P	52,9	FT/F/F*	48,3	FT/F	1,10	46,9	FT/F	1,13
Le 2400-5P	45,7	FT/F/F*	72,3	FT/F	0,63	68,9	FT/F	0,66
$N_{c,R}^{(1)} = 20,4$ kN	$N_{c,R}^{(2)} = 43,3$ kN							
Chapas separadoras soldadas								
Le 1800-1S	61,5	FT/F/F*	58,9	FT/F	1,04	55,2	FT/F	1,11
Le 1800-2S(1)	78,3	FT/F/F*	72,1	FT/F	1,09	70,3	FT/F	1,11
Le 1800-2S(2)	83,4	FT/F/F*	76,1	FT/F	1,10	73,7	FT/F	1,13
Le 1800-3S	95,6	FT/F/F*	85,9	FT/F	1,11	82,4	FT/F	1,16
Le 1800-41S	96,2	FT/F	91,6	FT/F	1,05	87,6	FT/F	1,10
Le 1800-42S	102,4	FT/F	95,2	FT/F	1,08	91,7	FT/F	1,12
$N_{c,R}^{(1)} = 31,9$ kN	$N_{c,R}^{(2)} = 74,9$ kN							
Le 2400-1S	45,0	FT/F/F*	45,6	FT/F	0,99	45,0	FT/F	1,00
Le 2400-2S	66,2	FT/F	58,5	FT/F	1,13	56,9	FT/F	1,16
Le 2400-5S	80,2	FT/F/F*	81,1	FT/F	0,99	77,0	FT/F	1,04
$N_{c,R}^{(1)} = 20,4$ kN	$N_{c,R}^{(2)} = 43,3$ kN							

...continua na próxima página

...continuação – Tabela 5.12

Barra	Análise experimental		Análise numérica					
	N_{Exp} (kN)	Modo de falha	0 (L); 0 (FT) e 0 (F)		0,14t (L); 0,64t (FT) e $L_c/1500$ (F)			
			N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{Exp}/N_{EF}	N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{Exp}/N_{EF}
Extremidades fixas (compressão centrada)								
Chapas separadoras parafusadas								
LeC 1200-0	77,1	FT	-	-	-	76,1	FT/F*	1,01
LeC 1200-1P	91,3	FT	-	-	-	88,9	FT	1,03
LeC 1200-2P	108,9	FT	-	-	-	95,6	FT	1,14
LeC 1200-3P	115,0	FT	-	-	-	114,0	FT	1,01
LeC 1200-4P	107,6	FT	-	-	-	118,6	FT	0,91
$N_{c,R}^{(1)} = 63,7$ kN	$N_{c,R}^{(2)} = 149,2$ kN							

Legenda:

LeC X – N(M)

Le – cantoneira enrijecida; C – compressão centrada; X – comprimento da barra; N – número de chapas separadoras; (M) – chapas separadoras soldadas – (1): chapa com 50 mm de largura; (2): chapa com 100 mm de largura.

FT – Instabilidade por flexo-torção de cantoneira individual.

F – instabilidade por flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

F* – instabilidade por flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada.

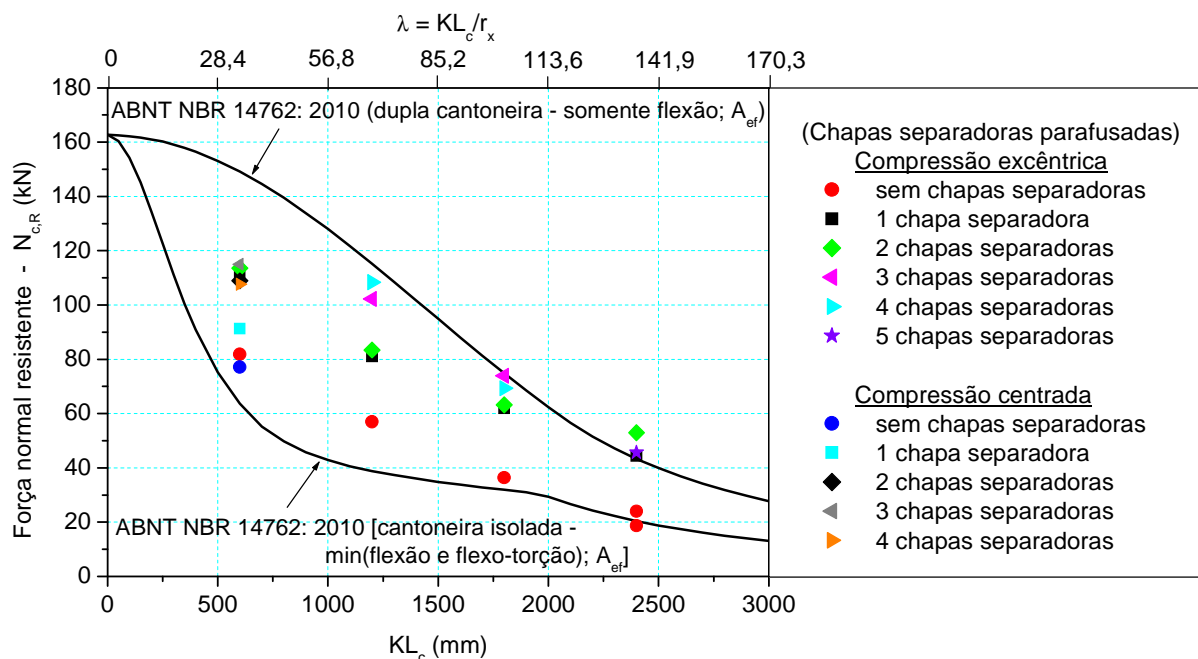
 $N_{c,R}^{(1)}$ – calculado com base na ABNT NBR 14762:2010 admitindo cantoneira isolada. $N_{c,R}^{(2)}$ – calculado com base na ABNT NBR 14762:2010 admitindo flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

Figura 5.98 – Resultados da análise experimental comparados com os resultados das hipóteses teóricas adotadas (perfil: 2Le 50x13x2,00) – Chapas separadoras parafusadas

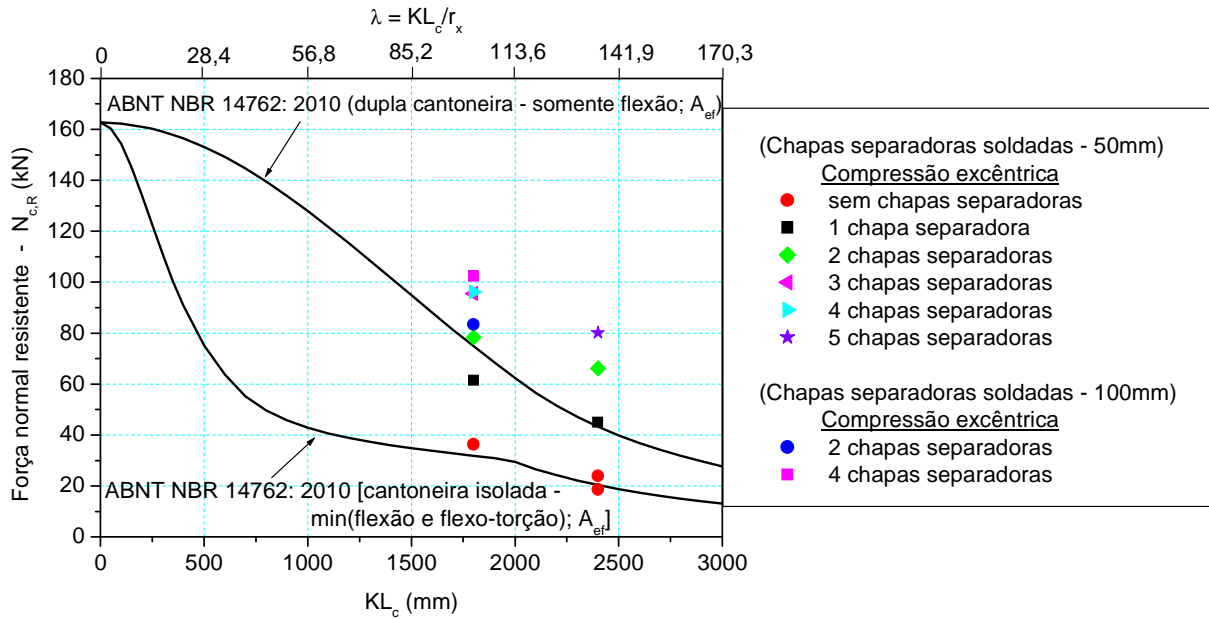


Figura 5.99 – Resultados da análise experimental comparados com os resultados das hipóteses teóricas adotadas (perfil: 2Le 50x13x2,00) – Chapas separadoras soldadas

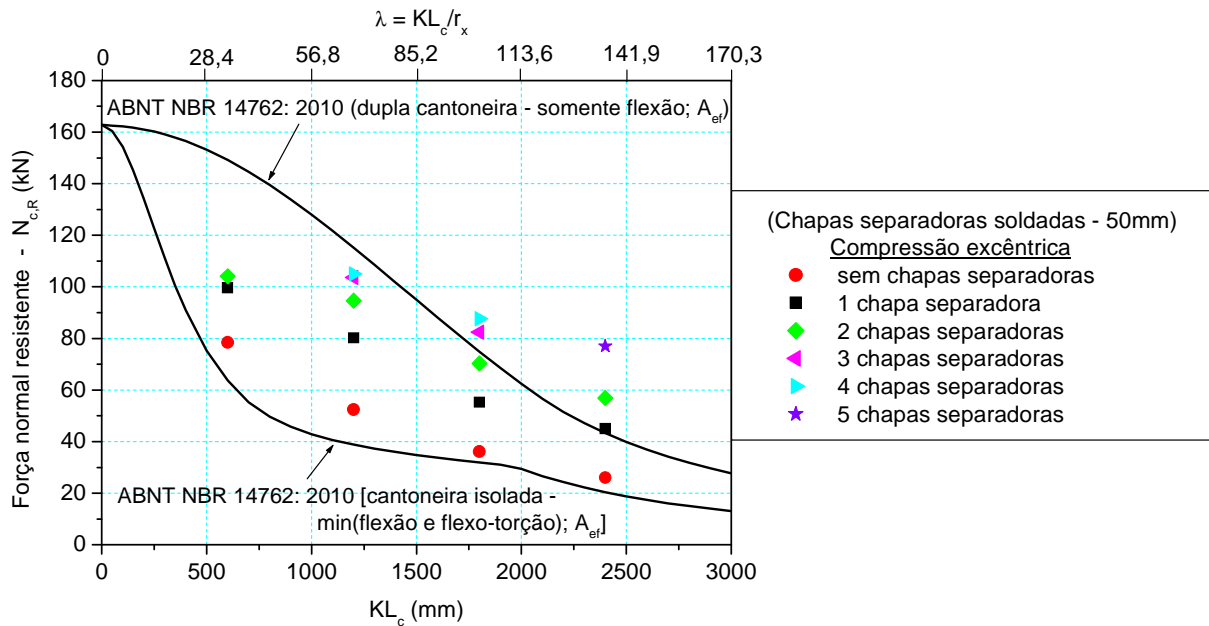


Figura 5.100 – Resultados da análise numérica comparados com os resultados das hipóteses teóricas adotadas (perfil: 2Le 50x13x2,00) – Chapas separadoras soldadas – Imperfeições: 0,14t (L); 0,64t (FT) e $L_c/1500$ (F)

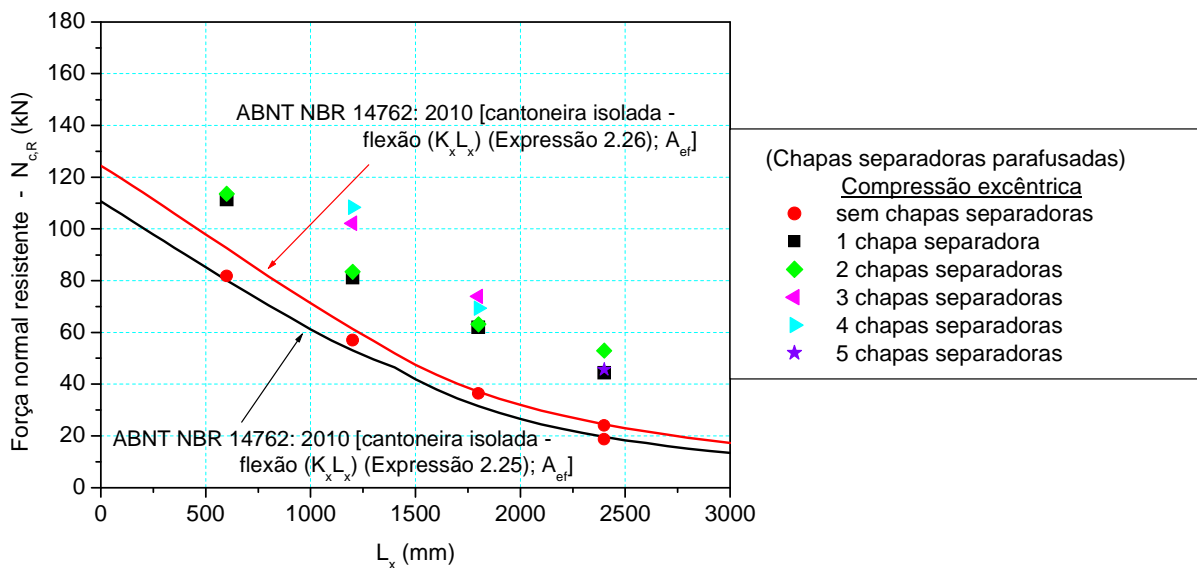


Figura 5.101 – Resultados da análise experimental comparados com os resultados das hipóteses teóricas calculados com comprimento de flambagem modificado ($K_x L_x$) (Expressões 2.25 e 2.26) (perfil: 2Le 50x213x,00) – Chapas separadoras parafusadas

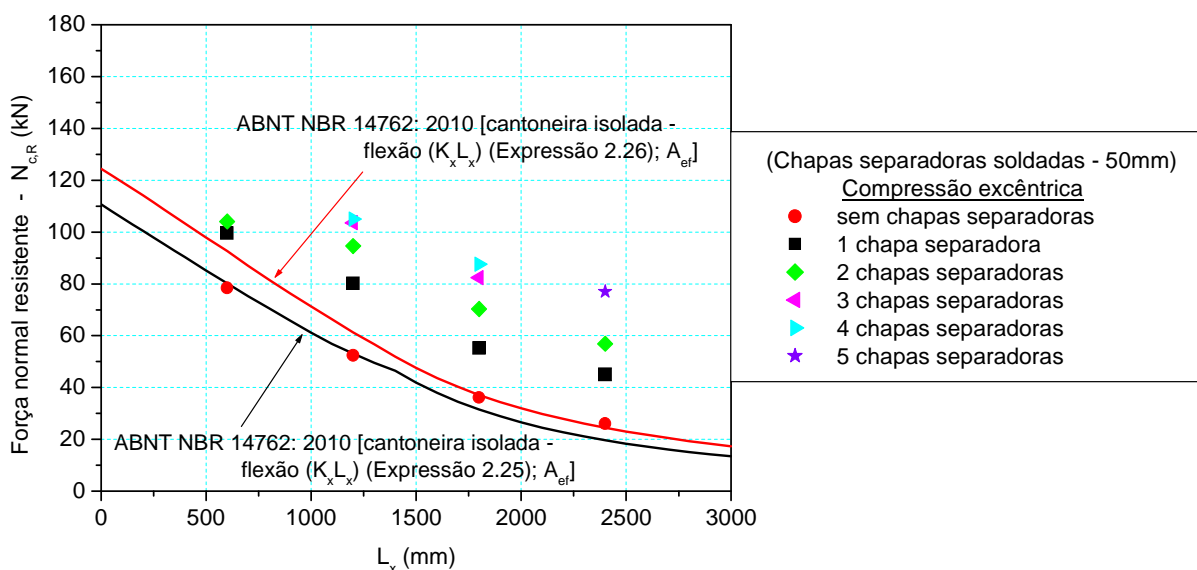


Figura 5.102 – Resultados da análise numérica comparados com os resultados das hipóteses teóricas calculados com comprimento de flambagem modificado ($K_x L_x$) (Expressões 2.25 e 2.26) (perfil: 2Le 50x13x2,00) – Chapas separadoras soldadas – Imperfeições: 0,14t (L); 0,64t (FT) e $L_c/1500$ (F)

Nas Figuras 5.103 a 5.107 são apresentados típicos modos de instabilidade observados na análise experimental da dupla cantoneira enrijecida 2Le 50x13x2,00. Os modos de instabilidade de todos os ensaios são apresentados no Apêndice B.



Figura 5.103 – Instabilidade por flexo-torção (FT)/flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada (F^*) ($L_c = 600$ mm – sem chapas separadoras – compressão excêntrica)



Figura 5.104 – Instabilidade por flexo-torção (FT)/flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto (F)/flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada (F^*) ($L_c = 1800$ mm – 2 chapas separadoras parafusadas – compressão excêntrica)

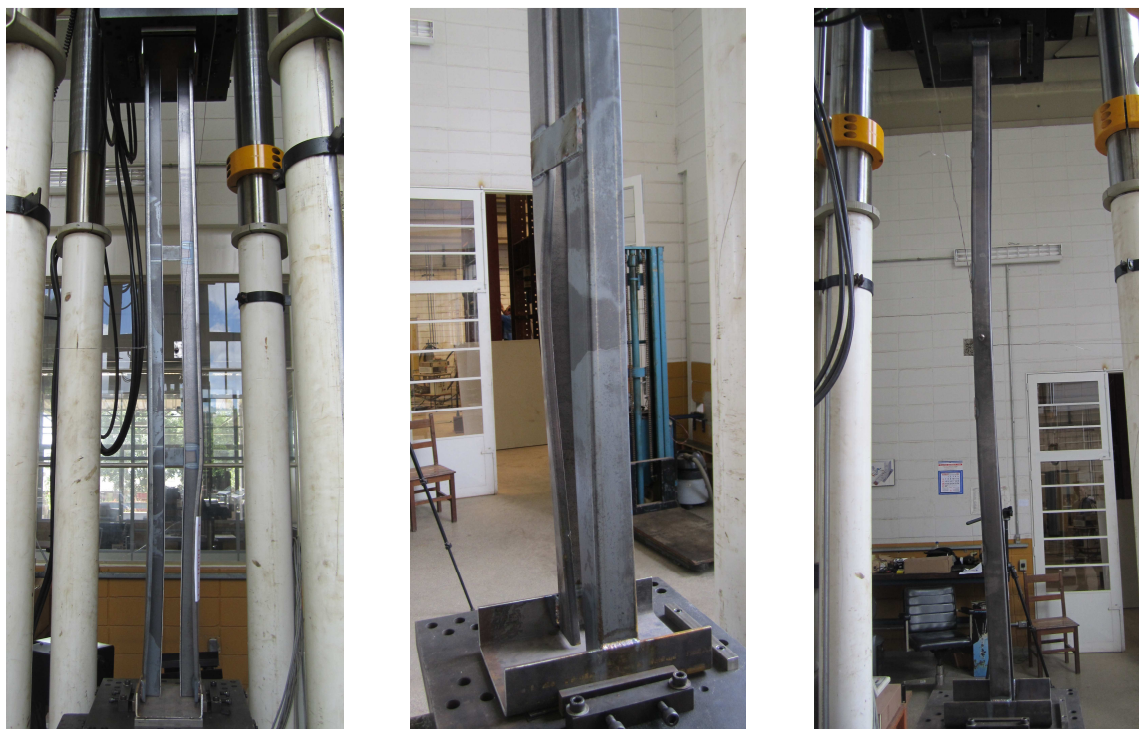


Figura 5.105 – Instabilidade por flexo-torção (FT)/flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto (F)/flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada (F*) ($L_c = 1800$ mm – 2 chapas separadoras soldadas (50mm) – compressão excêntrica)



Figura 5.106 – Instabilidade por flexo-torção (FT)/flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto (F)/flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada (F*) ($L_c = 1800$ mm – 2 chapas separadoras soldadas (100mm) – compressão excêntrica)



Figura 5.107 – Instabilidade por flexo-torção (FT)
($L_c = 1200$ mm – 2 chapas separadoras parafusadas – compressão centrada)

Nos resultados da análise experimental da dupla cantoneira enrijecida 2Le 50x13x2,00 observou-se que o modo de instabilidade predominante também foi o de flexo-torção, no entanto, a inserção de chapas separadoras melhorou de forma significativa o comportamento das barras, inclusive no caso das barras mais curtas, já que no caso da cantoneira enrijecida a força que tende a causar instabilidade por flexo-torção depende do comprimento. Assim como ocorreu na análise experimental da dupla cantoneira simples, algumas barras com chapas separadoras parafusadas também apresentaram deformada por flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada. Assim como no caso da dupla cantoneira simples, o fato também ocorreu para as barras mais longas, ou seja, barras com tendência de instabilidade por flexão. Os resultados também foram baixos ao serem comparados com os resultados da análise numérica. Para barras com chapas separadoras soldadas também observou-se essa tendência em alguns casos, principalmente para 1 e 2 chapas separadoras, mas de forma menos pronunciada, já que neste caso, a ligação das chapas fornece restrição ao giro.

Da mesma forma que aconteceu na análise da dupla cantoneira simples, os resultados da simulação numérica em que foi feito o acoplamento de deslocamento de nós na posição das chapas separadoras foram bastante coerentes com os resultados da análise experimental de barras com chapas separadoras parafusadas. Os resultados da análise numérica em que foram modeladas as chapas separadoras foram muito próximos dos resultados da análise experimental das barras com chapas separadoras soldadas. Com relação às imperfeições geométricas iniciais, também observou-se que a adoção das mesmas pouco interferiu nos resultados já que os valores são muito baixos se comparados ao valor da excêntrica imposta pela aplicação da força nas abas.

Comparando os resultados da análise experimental com os valores das hipóteses teóricas adotadas, observou-se a mesma tendência dos resultados da análises numérica, ou seja, valores intermediários aos obtidos nas hipóteses teóricas. Resultados experimentais de barras isoladas tenderam para a hipótese que considerou barra isolada e com o aumento do número de chapas separadoras os valores tenderam para a hipótese que considerou flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto. Observa-se que apenas nos casos onde houve predominância de instabilidade por flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto os valores das análises numérica e experimental ultrapassaram os resultados obtidos pela hipótese que considerou barra composta. O mesmo comportamento foi observado tanto no caso de barras com chapas separadoras parafusadas quanto soldadas. No entanto, observou-se um significativo aumento na força normal resistente no caso de barras com chapas separadoras soldadas, principalmente para as barras que apresentaram tendência de flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada.

Para o comprimento de 1800 mm foram realizados dois ensaios com chapas separadoras soldadas com o dobro da lagura (100 mm) e a mesma espessura visando observar a sua influência na força normal resistente. Observou-se que isso pouco interferiu nos resultados, mostrando que o tipo de ligação entre chapas e perfis é bem mais importante que as dimensões das chapas separadoras.

Para comprimentos mais curtos, observou-se resultados das análises experimental e numérica com valores bem abaixo daqueles obtidos pela hipótese de cálculo que considerou apenas instabilidades local e global por flexão. Com o intuito de estudar o efeito da rigidez das chapas separadoras na força normal resistente, foram realizadas algumas simulações para os comprimentos de 600 e 1200 mm sem imperfeições geométricas iniciais. Para esses comprimentos observou-se flexão nas chapas separadoras e conseqüentemente grandes tensões e deformações, principalmente para uma e duas chapas separadoras. No ponto das chapas separadoras modelou-se cantoneiras com dimensões de 50x3,00.

Para o comprimento de 600 mm, os modelos com chapas separadoras apresentaram valores de força normal resistente para uma e duas chapas separadoras de 112,3 kN e 116,4 kN, respectivamente, enquanto para os modelos aqui apresentados foram 111,6 kN e 116,7 kN, respectivamente. Para o comprimento de 1200 mm os valores foram 80,9 kN e 95,0 kN para uma e duas chapas separadoras, respectivamente, para o modelo com chapas separadoras, enquanto para os modelos aqui apresentados foram 82,5 kN e 96,5 kN, respectivamente. Com isso, conclui-se que não há nenhum ganho aumentando a rigidez das chapas, pois haverá mudança apenas nos modos de instabilidade, mas a força normal resistente continuará sendo a mesma. Na Figura 5.108 é apresentado um típico modo observado nas simulações realizadas.

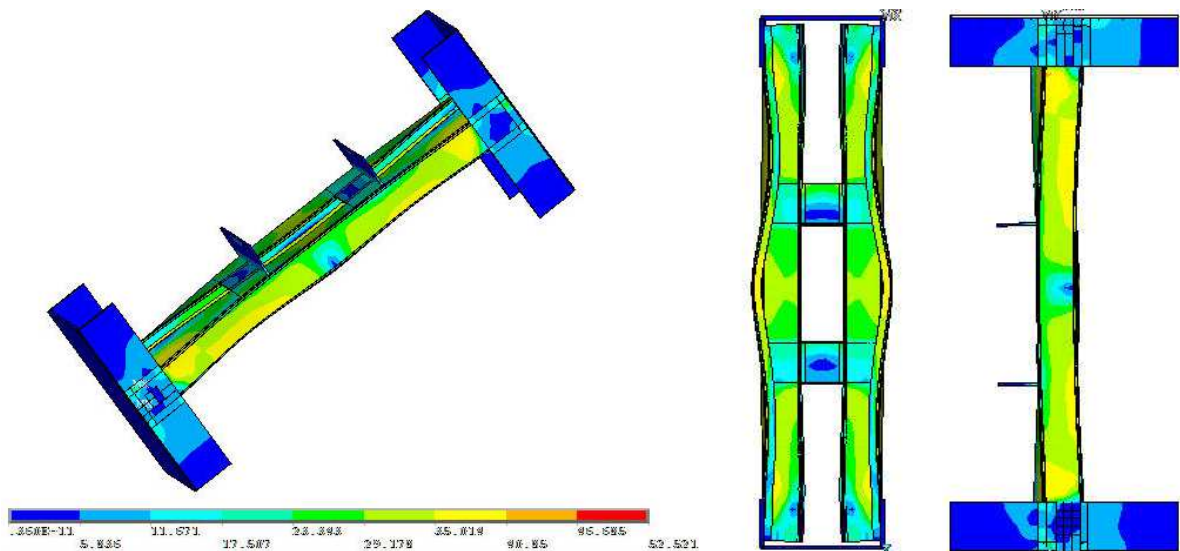


Figura 5.108 – Instabilidade por distorção e distribuição de tensões de von Mises

Observa-se que as abas conectadas permanecem praticamente na mesma posição, enquanto as abas não conectadas sofrem uma rotação, configurando um típico modo de instabilidade por distorção observado em seções com enrijecedores de borda.

Com os resultados obtidos entende-se que, a favor da segurança, o mais correto seria adotar como procedimento de cálculo a hipótese que considera barras isoladas. Como alternativa poderia-se utilizar o procedimento proposto pela ABNT NBR 8800: 2008 para cantoneiras conectadas pela aba, em que no cálculo da força axial de flambagem elástica considera apenas o modo global de flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada, mas com um comprimento de flambagem equivalente (Figuras 5.101 e 5.102). Mesmo no caso das barras com chapas separadoras soldadas, observa-se que os resultados das análises numérica e experimental só atingem os valores obtidos pela hipótese que considerou barra composta para o comprimento de 1800 mm ($\lambda_x = 102,2$) com duas chapas separadoras.

5.3.3 Dupla cantoneira laminada

Na Tabela 5.13 são apresentados os resultados da análise experimental da dupla cantoneira laminada 2L 50x5 (2"x3/16") comparados com os resultados da análise numérica e das hipóteses teóricas adotadas. Para a dupla cantoneira laminada foram realizados ensaios apenas para um comprimento de barra ($L_c = 1200$ mm) com chapas separadoras parafusadas. Os resultados da análise numérica aqui apresentados se referem à simulação em foi feito o acoplamento de deslocamentos de nós na posição das chapas separadoras.

Nas Figuras 5.109 a 5.112 os resultados das análises experimental e numérica são comparados com resultados das hipóteses teóricas adotadas. Além das hipóteses adotadas inicialmente, os resultados são comparados com os resultados obtidos pelo procedimento apresentado pela ABNT NBR 8800: 2008 para cantoneiras simples conectadas pela aba.

Tabela 5.13 – Resultados da análise experimental comparados com os resultados dos procedimentos teóricos adotados: perfil 2L 50x5 (2"x3/16") ($f_y = 307$ MPa)

Barra	Análise experimental		Análise numérica					
	N_{Exp} (kN)	Modo de falha	0 (FT) e 0 (F)		0,14t (FT) e $L_c/1500$ (F)			
			N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{Exp}/N_{EF}	N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{Exp}/N_{EF}
Extremidades fixas (compressão excêntrica)								
Chapas separadoras parafusadas								
LL 1200-0	109,0	F*	125,7	F*	0,87	126,0	F*	0,87
LL 1200-1P	157,7	F/F*	176,1	F	0,90	172,7	F	0,91
LL 1200-2P	173,9	F	180,6	F	0,96	176,3	F	0,99
LL 1200-3P	169,5	F	194,1	F	0,87	190,0	F	0,89
LL 1200-4P	179,7	F	200,7	F	0,90	196,4	F	0,91
$N_{c,R}^{(1)} = 114,2$ kN			$N_{c,R}^{(2)} = 194,8$ kN					
Extremidades fixas (compressão centrada)								
Chapas separadoras parafusadas								
LLC 1200-0	182,1	F/F*	-	-	-	233,9	F*	0,78
LLC 1200-1P	235,2	F/F*	-	-	-	253,1	F	0,93
LLC 1200-2P	224,3	F/F*	-	-	-	250,6	F	0,90
LLC 1200-4P	246,7	F/F*	-	-	-	253,3	F	0,97
$N_{c,R}^{(1)} = 224,5$ kN			$N_{c,R}^{(2)} = 256,6$ kN					

Legenda:

LLC X – N

LL – cantoneira simples laminada.

C – compressão centrada.

X – comprimento da barra.

N – número de chapas separadoras.

F – instabilidade por flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

F* – instabilidade por flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada.

$N_{c,R}^{(1)}$ – calculado com base na ABNT NBR 8800:2008 admitindo cantoneira isolada.

$N_{c,R}^{(2)}$ – calculado com base na ABNT NBR 8800:2008 admitindo flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

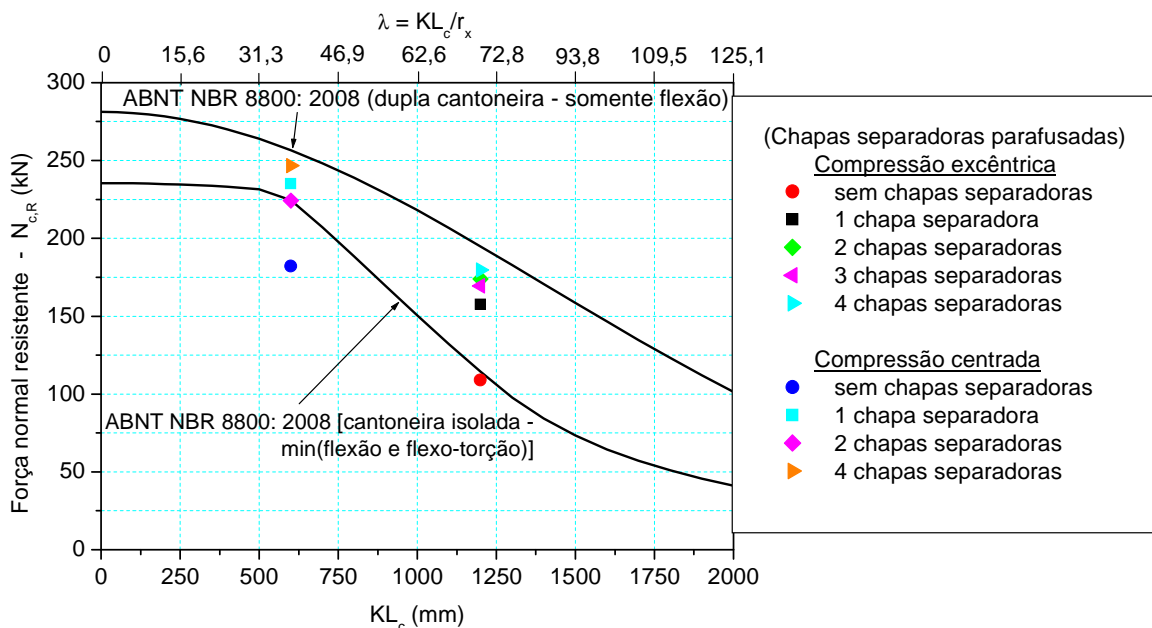


Figura 5.109 – Resultados da análise experimental comparados com os resultados das hipóteses teóricas adotadas (perfil: 2L 50x5 (2"x3/16")) – Chapas separadoras parafusadas

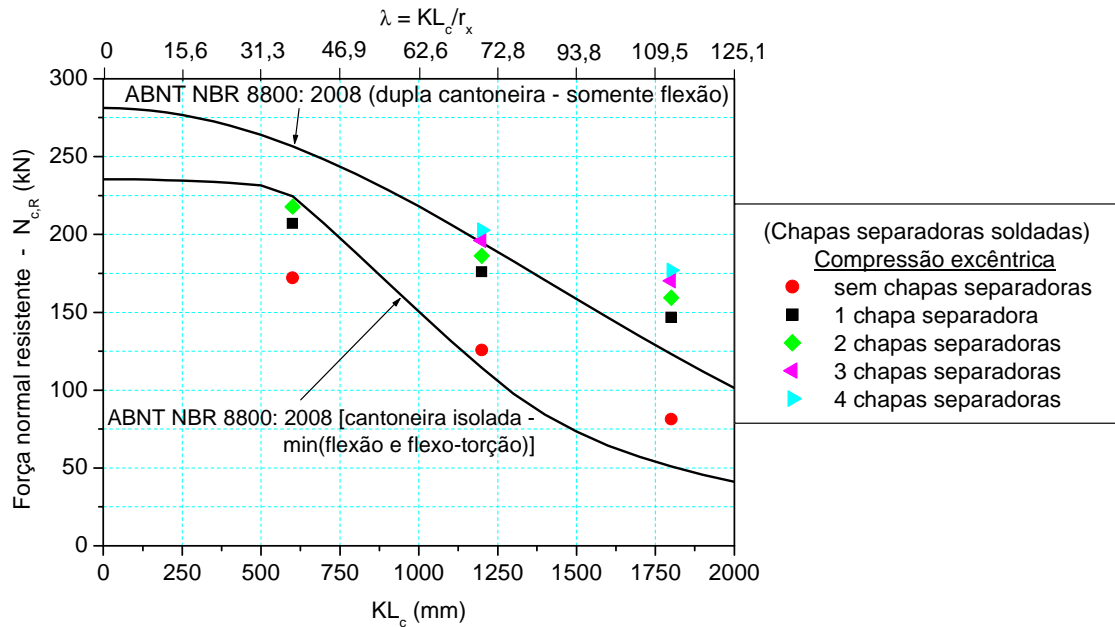


Figura 5.110 – Resultados da análise numérica comparados com os resultados das hipóteses teóricas adotadas (perfil: 2L 50x5 (2"x3/16")) – Chapas separadoras soldadas – Sem imperfeições

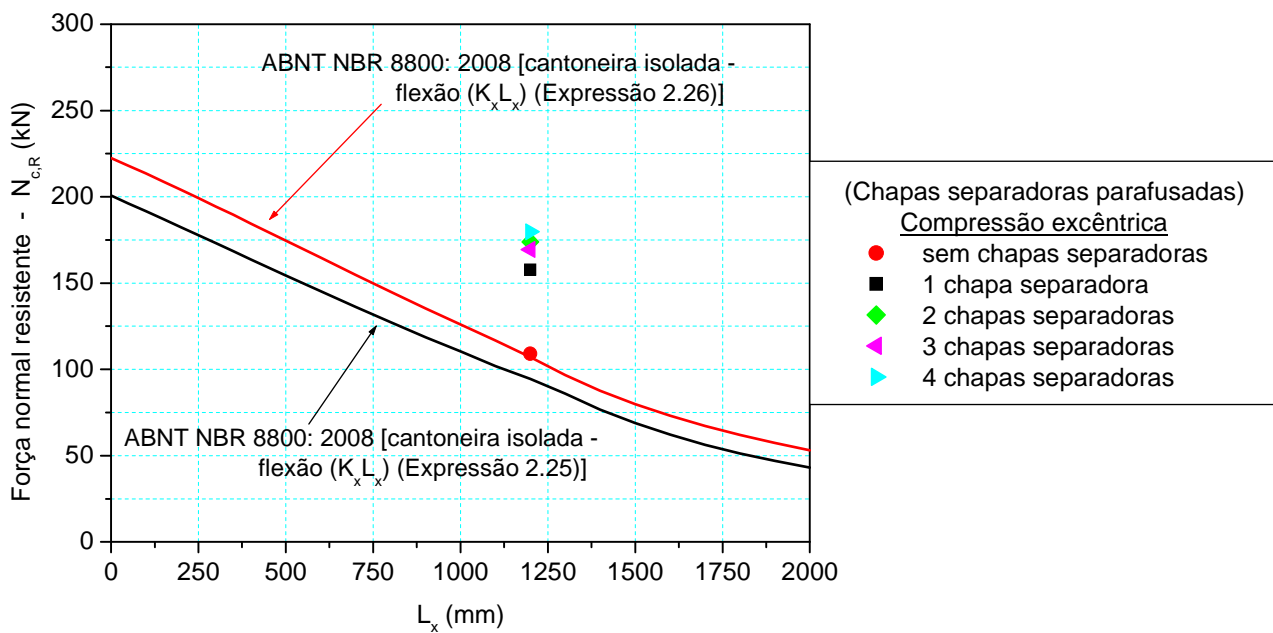


Figura 5.111 – Resultados da análise experimental comparados com os resultados das hipóteses teóricas calculados com comprimento de flambagem modificado ($K_x L_x$) (Expressões 2.25 e 2.26) (perfil: 2L 50x5 (2"x3/16")) – Chapas separadoras parafusadas

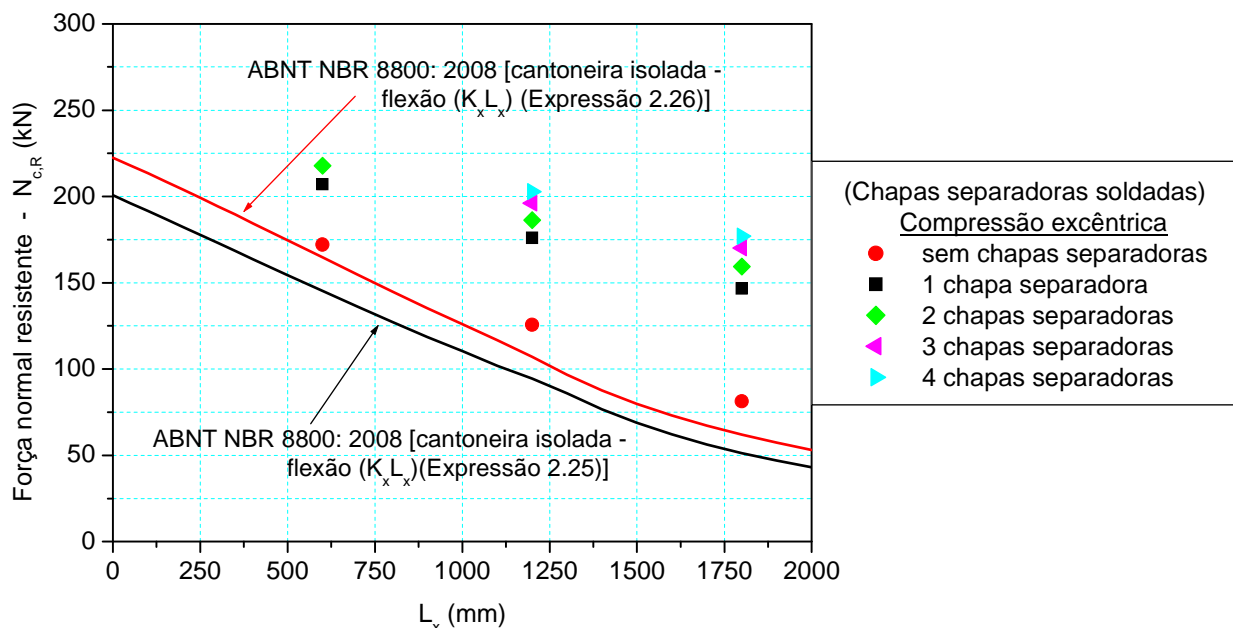


Figura 5.112 – Resultados da análise numérica comparados com os resultados das hipóteses teóricas calculados com comprimento de flambagem modificado ($K_x L_x$) (Expressões 2.25 e 2.26) (perfil: 2L 50x5 (2"x3/16")) – Chapas separadoras soldadas – Sem imperfeições

Nas Figuras 5.113 a 5.115 são apresentados típicos modos de instabilidade observados na análise experimental da dupla cantoneira laminada 2L 50x5 (2"x3/16"). Os modos de instabilidade de todos os ensaios são apresentados no Apêndice B.

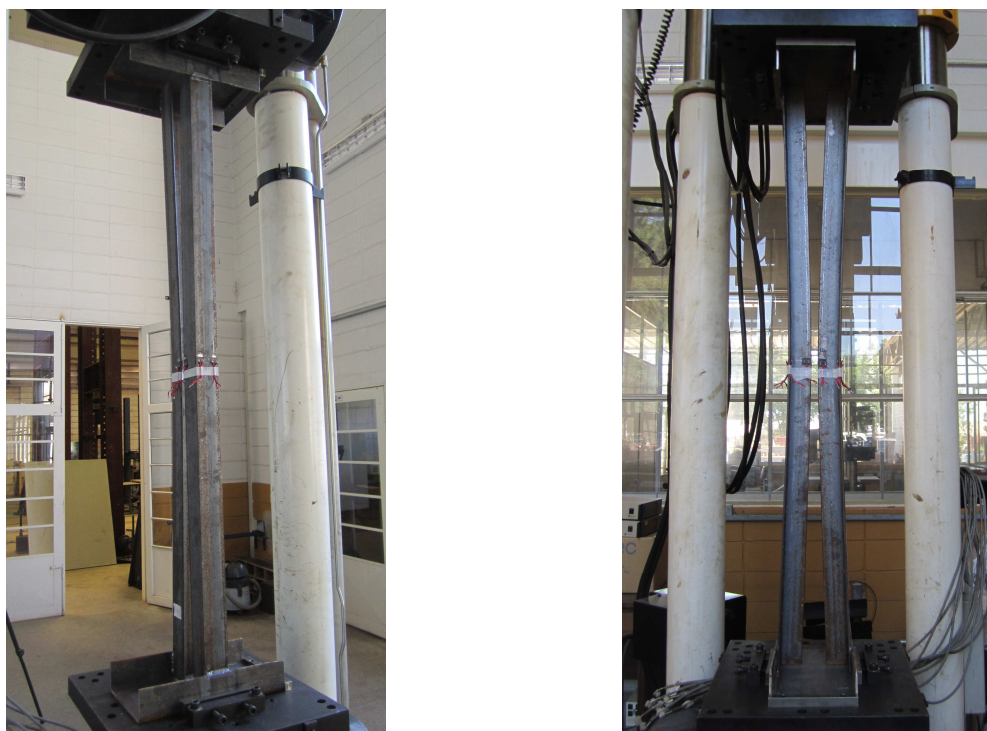


Figura 5.113 – Instabilidade por flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto (F)/flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada (F^*) ($L_c = 1200$ mm – sem chapas separadoras – compressão excêntrica)



Figura 5.114 – Instabilidade por flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto (F) ($L_c = 1200$ mm – 2 chapas separadoras – compressão excêntrica)



Figura 5.115 – Instabilidade por flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto (F)/flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada (F^*) ($L_c = 1200$ mm – 2 chapas separadoras – compressão centrada)

Os ensaios de cantoneira laminada foram realizados com o objetivo de serem utilizados como referência, já que neste caso, por se tratar de uma seção compacta, não está sujeita ao modo de instabilidade local e é pouco propensa ao modo de instabilidade global por flexo-torção. Como esperado, foram observados modos de instabilidade por flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada e flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto. A inserção das chapas separadoras melhorou de forma significativa o comportamento das barras, no entanto, o aumento do número de chapas praticamente não alterou o valor da força resistente.

Os valores de força normal resistente das análises numérica e experimental foram muitos próximos, além disso, apresentaram também os mesmos modos de instabilidade. Ao comparar os resultados da análise experimental com os resultados das hipóteses teóricas adotadas inicialmente, observou-se a mesma tendência dos resultados das cantoneiras simples e enrijecida formadas a frio, ou seja, resultados experimentais com valores intermediários aos valores das hipóteses teóricas. No entanto, foram realizados ensaios apenas para um comprimento (1200 mm) e com chapas separadoras parafusadas.

Com o modelo numérico definido, partiu-se para a análise de mais comprimentos e com chapas separadoras soldadas, observa-se que o comportamento foi o mesmo (Figura 5.110). Para o comprimento de 600 mm ($\lambda_x = 37,5$) os resultados da análise numérica foram todos abaixo do resultado obtido pela hipótese teórica que considerou barra composta, aumentando o comprimento os valores da análise numérica já atingem e em alguns casos ultrapassam esses valores. Para o comprimento de 1200 mm ($\lambda_x = 75,1$) a partir de três chapas separadoras e para o comprimento de 1800 mm ($\lambda_x = 112,6$) a partir de uma chapa separadora.

Com os resultados obtidos, entende-se que para barras com chapas separadoras parafusadas (1 parafuso), a favor da segurança, o mais correto seria adotar como procedimento de cálculo a hipótese que considera barras isoladas. Como alternativa pode-se utilizar o procedimento proposto pela ABNT NBR 8800: 2008 para cantoneiras simples

conectadas pela aba, em que no cálculo da força axial de flambagem elástica considera apenas o modo global de flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada, mas com um comprimento de flambagem equivalente (Figuras 5.111 e 5.112). Para barras com chapas separadoras que restringem o giro (soldadas ou conectadas por 2 parafusos) poderia-se adotar como procedimento de cálculo a hipótese que considera barra composta, no entanto, deve-se fazer uma avaliação do número de chapas separadoras e da esbeltez da barra.

Conclusões

Em geral os resultados das análises numérica e experimental de dupla cantoneira simples e enrijecida apresentaram valores intermediários aos obtidos com base nas duas hipóteses teóricas adotados inicialmente, ou seja, considerando cantoneira isolada (modos local e mínimo entre global de flexão e global de flexo-torção) e dupla cantoneira (modos local e global de flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto). Com a inserção das chapas separadoras, os resultados tenderam para a hipótese que considerou barra composta.

Barras submetidas à compressão centrada apresentaram instabilidade predominante por flexo-torção com comprimento de semi-onda limitado pelas chapas separadoras, tanto na análise numérica quanto na experimental. Com isso, observou-se que todos os resultados foram abaixo dos valores obtidos pela hipótese teórica que considerou barra composta, mesmo para barras com elevado número de chapas separadoras.

Para barras submetidas à compressão excêntrica foi observada instabilidade por flexo-torção e por flexão. No caso das barras mais curtas, o modo predominante foi o de flexo-torção com comprimento de semi-onda limitado pelas chapas separadoras, enquanto as barras mais longas apresentaram modo de instabilidade por flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto. Em alguns casos, observou-se também a tendência de flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada. No caso das chapas separadoras parafusadas esse fato foi mais pronunciado já que a ligação entre as chapas e os perfis não restringiu o giro, fato atenuado pelas presilhas soldadas que, por sua vez, restringiram esse giro.

Com relação à análise numérica, foi importante para observar os modos críticos presentes em dupla cantoneira simples e enrijecida e, com isso, definir um programa experimental que pudesse confirmar e dar consistência aos resultados obtidos. O modelo numérico adotado mostrou-se adequado, observou-se que de uma forma geral ele conseguiu reproduzir satisfatoriamente os resultados obtidos na análise experimental, tanto no caso de chapas separadoras parafusadas quanto nas chapas separadoras soldadas. Com isso, entende-se que o modelo pode ser extrapolado para outras seções, no sentido de investigar barras com diferentes índices de esbeltez local e global.

Com relação ao procedimento de cálculo, para barras em dupla cantoneira simples, entende-se que, se forem adotadas chapas separadoras que restringem o giro (chapas separadoras soldadas ou com dois parafusos na direção da solicitação), pode-se adotar a hipótese que considera apenas modos local e global de flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto. Nesse caso, entende-se que a não consideração do modo global de flexo-torção é suprida pela consideração da área efetiva da seção. Para duas chapas separadoras, os valores das análises numérica e experimental já atingem os valores teóricos de barra composta.

Para as barras com chapas separadoras parafusadas (que não restringem o giro) os valores das análises numérica e experimental apresentaram valores intermediários aos obtidos nas duas hipóteses teóricas adotadas inicialmente, atingindo os valores da hipótese que considerou modos local e global por flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto apenas para barras mais longas com um número elevado de chapas separadoras. Com isso, a favor da segurança, recomenda-se adotar como procedimento de cálculo a hipótese que considera barra isolada, no entanto algumas alternativas poderiam ser adotadas. A primeira seria a desconsideração da área efetiva no cálculo da força normal resistente, por entender que esse fenômeno já é considerado no modo global de flexo-torção, pela coincidência entre esses modos. Outra alternativa seria adotar o procedimento proposto pela ABNT NBR 8800:2008 para cantoneiras submetidas à compressão conectadas pela aba, que considera apenas o modo global de flexão, mas uma flexão em

relação ao eixo paralelo à aba conectada calculada em função de um comprimento de flambagem modificado. Nesse caso, deve-se considerar a área efetiva no cálculo da força normal resistente, já que o modo de flexo-torção é desconsiderado. Essa hipótese de cálculo apresenta resultados mais coerentes com os resultados obtidos nas análises numérica e experimental, principalmente para as barras mais curtas.

Para a dupla cantoneira enrijecida os resultados das análises numérica e experimental foram intermediários aos valores obtidos pelas duas hipóteses de cálculo adotadas inicialmente, atingindo os valores do procedimento que considerou apenas modo local e global por flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto apenas para barras mais longas, ou seja, barras que apresentaram tendência de instabilidade por flexão. O comportamento foi observado tanto para barras com chapas separadoras soldadas quanto parafusadas. Além disso, também variou-se a rigidez das chapas separadoras, no entanto observou-se que isso praticamente não mudou os valores de força normal resistente, mudando apenas o modo de instabilidade. Com isso, entende-se que o mais correto é adotar como procedimento de cálculo a hipótese que considera barra isolada, e como alternativa, o procedimento proposto pela ABNT NBR 8800:2008 para cantoneiras submetidas à compressão conectadas pela aba. Assim, como no caso da dupla cantoneira simples, apresentaram resultados mais coerentes com os obtidos nas análises numérica e experimental, principalmente para as barras mais curtas.

Um fato interessante observado nas análises numérica e experimental de barras em dupla cantoneira simples e enrijecida é que, em muitos casos, barras com uma chapa separadora apresentou força axial resistente superior às barras com duas chapas separadoras, mostrando a importância de se ter uma chapa separadora no meio do comprimento. Com isso, sugere-se adotar um número ímpar de chapas separadoras, de modo a se prever uma conexão no meio do comprimento.

De uma forma geral, a força axial resistente obtida nas análises numérica e experimental seguiu o padrão de uma curva de dimensionamento que varia em função do comprimento (como no modo de flexão), mas com valores abaixo da mesma. Entende-se

que seja necessária a definição de uma curva de dimensionamento que leve em consideração de forma direta o modo de flexo-torção, já que as curvas adotadas pelas normas foram propostas especificamente para o modo de flexão.

Bibliografia

ALMEIDA, S. J. C. (2007). Análise numérica de perfis de aço formados a frio comprimidos considerando imperfeições geométricas iniciais. São Carlos. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE (1996). Cold-Formed Steel Design Manual. Washington, DC: AISI.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE (2001). North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. Washington, DC: AISI.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE (2006). Direct Strength Method (DSM) Design Guide CF06-1. Washington, DC: AISI.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE, ANSI/AISI S100 (2007). North American specification for the design of cold-formed steel structural members. Washington, DC: AISI.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM A370 (2009). Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products. Pennsylvania.

ANGST, A. J. (2003). Estudo crítico das metodologias de cálculo para perfis dobrados a frio de vigas tipo canal sem enrijecedores de borda. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ANSYS (2011). Structural nonlinearities: user's guide for revision 13.0. Houston. v.1.

ASLANI, F.; GOEL, S. C. (1991). An analytical criteria for buckling strength of built-up compression members. Engineering Journal, AISC, v. 28(4), p. 159–168.

ASLANI, F.; GOEL, S. C. (1991). Stitch spacing and local buckling in seismic-resistant double-angle braces. Journal of Structural Engineering, v. 117(8), p. 2442-2463.

ASLANI, F.; GOEL, S. C. (1989). Experimental and analytical study of the inelastic behavior of double angle bracing members under cyclic loading. Report N° UMCE 89-5, Department of Civil Engineering, University of Michigan.

ASTANEH-ASI, A.; GOEL, S. C.; HANSON, R. D. (1982). Cyclic behavior of double angle bracing members with end gusset plates, *Report N° UMEE 82R7*. Department of Civil Engineering, University of Michigan.

ASTANEH-ASI, A.; GOEL, S. C. (1984). Cyclic in-plane buckling of double angle bracing. *Journal of Structural Engineering, ASCE*. v. 110, n° 9, p. 2036-2055.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 6355: 2003. Perfis estruturais de aço formados a frio. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 11888: 2008. Bobinas e chapas finas a frio e a quente de aço-carbono e aço de baixa liga e alta resistência – Requisitos gerais. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 8800: 2008. Projeto e execução de estruturas de aço e de estruturas mistas aço-concreto de edifícios – Procedimento. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 14762: 2010. Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro.

BATISTA, E. M. (2000) Reliability and Progress in design Codes, in Proceedings of the Third Int. Conference on Coupled Instabilities in Metal Structures - CIMS'2000, Ed. Camotim, D; Dubina, D. e Rondal, J., Imperial College Press, Lisboa, 661-671.

BATISTA, E. M. et al. (2000). Estudos dos modos de instabilidade local de placa e distorcional em perfis de chapa dobrada de aço. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 29, Punta Del Este, Uruguay, nov. 2000. Memorias. 14p.

BATISTA, E. M. et al. (2001). Curso paralelo de perfis formados a frio. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL O USO DE ESTRUTURAS METÁLICAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 4./ CONGRESSO INTERNACIONAL DA CONSTRUÇÃO METÁLICA, 1., nov. 2001, São Paulo.

BATISTA, E. M. et al. (2002). Stability analysis of cold-formed members: finite element and finite strip method results. In: INT. COLLOQUIUM. Budapest, 2002. 8p.

BATISTA, E. M.; CAMOTIM, D.; PROLA, L. C.; VAZQUEZ, E. (1998). On the stability and strength of steel columns affected by distortional buckling. *Journal of Constructional Steel Research*, v.46, n.1-3, p.129-131.

BRUEGGEN, B.; RAMSEYER, C. (2005). Capacity of built-up cold-formed steel axial compression members. Structural stability research council. In: Proceedings of the annual stability conference, Rolla, Missouri.

CHAJES, A.; FANG, P.J.; WINTER, G. (1966). Torsional-flexural buckling, elastic and inelastic, of cold-formed thin-walled columns. *Cornell University, Engineering Research Bulletin* 66-1.

CHAJES, A.; WINTER, G. (1965). Torsional-flexural buckling of thin-walled members. *Journal of the Structural Division, ASCE*, v. 91.

CHEUNG, Y.K. (1976). *Finite strip method in structural analysis*. New York, Pergamon Press.

CHODRAUI, G. M. B. (2003). Flambagem por distorção da seção transversal em perfis de aço formados a frio submetidos à compressão centrada e à flexão. São Carlos. 173p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

CHODRAUI, G. M. B. (2006). Análise teórica e experimental de perfis de aço formados a frio submetidos à compressão. São Carlos. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

CHODRAUI et al. (2006). Cold-formed steel angles under axial compression”, In: LaBOUBE, R.A.; YU, W.W. (Ed.). *Recent research and developments in cold-formed steel design and construction (18th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, Orlando, USA, Oct. 26-27, Rolla, University of Missouri-Rolla.*

DAVIES, J. M. (2000). Recent research advances in cold-formed steel structures. *Journal of Constructional Steel Research*, v.55, p.267-288.

DESMOND, T. P.; PEKÖZ, T.; WINTER, G. (1981). Edge stiffeners for thin-walled members. *Journal of the Structural Division, ASCE*.

DUAN, L.; CHEN, W. F. (1988). Design rules of built-up members in load and resistance factor design. *Journal of Structural Engineering, ASCE*; v. 114(11), p. 2544–2554.

DUAN, L.; RENO, M.; UANG, C. (2002). Effect of compound buckling on compression strength of built-up members. *Engineering Journal*, v. 39(1), p. 30-37.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (1996). ENV 1993-1-3: Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1.3: General rules, Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. Brussels.

ELLOBODY, E.; YOUNG, B. (2005). Behavior of cold-formed steel plain angle columns. *Journal of Structural Engineering*, v. 131, n. 3, p. 457-466.

FRUCHTENGARTEN, J. (1995) Sobre a estabilidade de perfis de seção aberta. Tese de Doutorado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

HANCOCK, G. J.; MURRAY, T. M.; ELLIFRITT, D. S. (2001). Cold-formed steel structures to the AISI specification. New York: Marcel Dekker.

HANCOCK, G. J. (2003). Cold-formed steel structures – Review article. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 59, p.473-487.

HUBER, A. W.; BEEDLE, L. S. (1992). Residual stress and compressive strength of steel. *Welding Journal*, v. 33, n. 12, p. 589s-614s.

LIBOVE, C. (1985). Sparsely connected built-up columns. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, v. 111, p. 609-627.

LUE, D. M.; YEN, T.; LIU, J. L.; HSU, Y. T. (2004). Experimental investigation for buckling strength of double-channel columns. Structural stability research council. In: Proceedings of the annual stability conference, Long Beach, CA.

MAIA, W. F. (2008). Sobre a estabilidade de cantoneiras de aço formadas a frio submetidas à compressão. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

MAIA, W. F.; MUNAIAR NETO, J.; MALITE, M. (2008). Stability of cold-formed steel simple and lipped angles under compression. In: LaBoube, R.A.; Yu, W.W. (Ed). Recent research and developments in cold-formed steel design and construction (19th International Specialty

Conference on Cold-Formed Steel Structures, St. Louis, USA, October 14 & 15, 2008). Missouri University of Science & Technology, Rolla, Missouri, USA, v. 1, p. 111-125.

MAIA, W. F.; MUNAIAR NETO, J.; MALITE, M. (2010). Theoretical analysis of cold-formed steel battened double angle members under compression. In: LaBoube, R.A.; Yu, W.W. (Ed). Recent research and developments in cold-formed steel design and construction (20th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, St. Louis, USA, November 3 & 4, 2010). Missouri University of Science & Technology, Rolla, Missouri, USA, v. 1. p. 121-135.

MALITE, M.; SÁLES, J. J. (1993). Estruturas de aço constituídas por perfis de chapa dobrada: dimensionamento de barras. São Carlos: EESC-USP. 97p.

POPOVIC, D.; HANCOCK, G. J. and RASMUSSEN, K. J. R. (1999). Axial compression tests of cold-formed angles. *Journal of Structural Engineering*, American Society of Engineers, v. 125, n. 5, p. 515-523.

RASMUSSEN, K. J. R.; YOUNG, B. (2000). Inelastic bifurcation of cold-formed singly symmetric columns. *Thin Walled Structures*, v. 36, p. 213-230.

RASMUSSEN, K. J. R. (2003). Design of angle columns with locally unstable legs. Department of Civil Engineering, Research Report No. R830, University of Sydney. Australia.

RASMUSSEN, K. J. R. (2005). "Design of angle columns with locally unstable legs." *ASCE, Journal of Structural Engineering*, v. 131, n. 10, p. 1553-1560.

SCHAFFER, B.W. (1997). Cold-formed steel behavior and design: analytical and numerical modeling of elements and members with longitudinal stiffeners. PhD. dissertation, Cornell University, Ithaca

SCHAFFER, B. W.; PEKÖZ, T. (1998). Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 47, p. 193-210.

SCHAFFER, B.W. (2001). Finite strip analysis of thin-walled members. In: CUFSM: Cornell University – Finite Strip Method.

SCHAFFER, B. W. (2002). Design manual for direct strength method of cold-formed steel design. Draft for American Iron and Steel Institute – Committee on Specifications.

SILVESTRE, N.; CAMOTIM, D. (2003). "Nonlinear generalized beam theory for cold-formed steel members". *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 3 (4): 461-490.

SHERMAN, D. R.; YURA, J. A. (1998). Bolted double angle compression members. *Journal Construct Steel Res*, v. 46(1-3), p. 470-471.

STONE, T. A.; LABOUBE, R. A. (2005). Behavior of cold-formed steel built-up I sections. *Thin Walled Structures*, v. 43, p. 1805-1817.

TEMPLE, M. C.; ELMAHDY, G. (1993). Buckling of built-up compression members in the plane of the connectors. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v 20, p. 895-909.

TEMPLE, M. C.; ELMAHDY, G. (1995). Local effective length factor in equivalent slenderness ratio. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 22, p. 1164-1170.

TEMPLE, M. C.; ELMAHDY, G. (1996). Slenderness ratio of main members between interconnectors of built-up compression members. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 23, p. 1295-1302.

TIMOSHENKO, S. P.; GERE, J. M. (1961). *Theory of elastic stability*. 2. ed. New York: McGraw-Hill. 541p.

VAZQUEZ, E. G. (2002). Análise teórica e experimental da instabilidade torsional de perfis formados a frio sob compressão centrada. Tese (Doutorado) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

VAZQUEZ, E.G. (1998). Estudo do comportamento pós-crítico de paredes esbeltas de perfis metálicos. Dissertação (Mestrado) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

VLASOV, V. Z. (1961). *Thin-walled elastic beams*. 2. ed. Jerusalem, Israel Program for Scientific Translations.

Von KARMAN, T.; SECHLER, E. E.; DONNELL, L. H. (1932). Strength of thin plates in compression. *Transactions of the ASME*, v. 54, p. 53-57.

WENG, C. C.; PEKÖZ, T. (1990). Residual stresses in cold-formed steel members. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, v. 116, n. 6, p. 1230-1246.

WILHOITE, G.; ZANDONINI, R. and ZAVELANI, A. (1984). "Behaviour and strength of angles in compression: An experimental investigation." ASCE, Proceedings of the Structures Congress, San Francisco.

YOUNG, B.; RASMUSSEN, KIM, J. R. (2000). Inelastic bifurcation of cold-formed singly symmetric columns. *Thin Walled Structures*, v. 36, p. 213-230.

YOUNG, B. (2004). Tests and design of fixed-ended cold-formed steel plain angle columns. *Journal of Structural Engineering*, v. 130, n. 12, p. 1931-1940.

YOUNG, B. (2005). Experimental investigation of cold-formed steel lipped angle concentrically loaded compression members. *Journal of Structural Engineering*, v. 131, n. 9, p. 1390-1396.

YOUNG, B.; ELLOBODY, E. (2005). Buckling analysis of cold-formed steel lipped angle columns. *Journal of Structural Engineering*, v. 131, n. 10, p. 1570-1579.

ZAHN, C. J.; HAAIJER, G. (1988). Effect of connector spacing and flexural-torsional buckling on double-angle compressive strength. *Engineering Journal, AISC*, v. 25(3), p. 109–118.

ZANDONINI, R. (1985). Stability of compact built-up struts: experimental Investigation and numerical simulation. *Costruzioni Metalliche*, N°. 4.

Apêndice A

Resultados de análise numérica em dupla cantoneira

(Análise inicial: prolongamento da aba na posição das chapas separadoras)

Tabela A.1 – Análise de sensibilidade às imperfeições: perfil 2L 60x1,50

L_c (mm)	Número de chapas separadoras	Imperfeições: flexo-torção e flexão	Compressão centrada			Compressão excêntrica			
			N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y	N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y	
600 ($\lambda_x=31$)	0	0 e 0	-	-	-	41,7	FT/F*	0,43	
		0,14t e $L_c/1500$	33,6	FT	0,35	-	-	-	
		0,64t e $L_c/1500$	33,6	FT	0,35	39,8	FT/F*	0,41	
		1,55t e $L_c/1500$	33,5	FT	0,35	34,5	FT/F*	0,36	
	2	0 e 0	-	-	-	37,1	FT	0,38	
		0,14t e $L_c/1500$	35,0	FT	0,36	-	-	-	
		0,64t e $L_c/1500$	34,3	FT	0,36	35,3	FT	0,37	
		1,55t e $L_c/1500$	33,0	FT	0,34	33,9	FT	0,35	
	4	0 e 0	-	-	-	35,0	FT	0,36	
		0,14t e $L_c/1500$	34,6	FT	0,36	-	-	-	
		0,64t e $L_c/1500$	33,3	FT	0,35	33,5	FT	0,35	
		1,55t e $L_c/1500$	31,3	FT	0,32	31,7	FT	0,33	
	U	0 e 0	-	-	-	38,6	L	0,40	
		0,14t e $L_c/1500$	37,9	L	0,39	-	-	-	
		0,64t e $L_c/1500$	36,4	L	0,38	35,4	L	0,37	
		1,55t e $L_c/1500$	34,0	L	0,35	32,9	L	0,34	
	$N_{c,R}^{(1)} = 12,8$ kN		$N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,13$						
	$N_{c,R}^{(2)} = 39,0$ kN		$N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,40$						
	1200 ($\lambda_x=63$)	0	0 e 0	-	-	-	29,4	FT/F*	0,30
			0,14t e $L_c/1500$	31,1	FT/F*	0,32	-	-	-
			0,64t e $L_c/1500$	23,2	FT/F*	0,24	29,3	FT/F*	0,30
			1,55t e $L_c/1500$	23,1	FT/F*	0,24	29,4	FT/F*	0,30
		2	0 e 0	-	-	-	30,3	FT	0,31
			0,14t e $L_c/1500$	30,1	FT/F	0,31	-	-	-
0,64t e $L_c/1500$			29,7	FT/F	0,31	28,1	FT/F	0,29	
1,55t e $L_c/1500$			28,9	FT/F	0,30	27,1	FT/F	0,28	
5		0 e 0	-	-	-	30,1	FT	0,31	
		0,14t e $L_c/1500$	28,3	FT/F	0,29	-	-	-	
		0,64t e $L_c/1500$	27,0	FT/F	0,28	27,2	FT/F	0,28	
		1,55t e $L_c/1500$	24,8	FT/F	0,26	25,0	FT/F	0,26	
7		0 e 0	-	-	-	30,7	FT	0,32	
		0,14t e $L_c/1500$	27,9	FT/F	0,29	-	-	-	
		0,64t e $L_c/1500$	25,9	FT/F	0,27	25,7	FT/F	0,27	
		1,55t e $L_c/1500$	23,0	FT/F	0,24	22,8	FT/F	0,24	
U		0 e 0	-	-	-	33,1	L/F	0,34	
		0,14t e $L_c/1500$	31,2	L/F	0,32	-	-	-	
		0,64t e $L_c/1500$	28,7	L/F	0,30	27,8	L/F	0,29	
		1,55t e $L_c/1500$	25,4	L/F	0,26	24,2	L/F	0,25	
$N_{c,R}^{(1)} = 12,8$ kN		$N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,13$							
$N_{c,R}^{(2)} = 35,2$ kN		$N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,37$							

continua na próxima página...

...continuação Tabela A.1

L_c (mm)	Número de chapas separadoras	Imperfeições: flexo-torção e flexão	Compressão centrada			Compressão excêntrica		
			N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y	N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y
1800 ($\lambda_x=94$)	0	0 e 0	-	-	-	19,8	FT/F*	0,21
		0,14t e $L_c/1500$	24,7	FT/F*	0,26	-	-	-
		0,64t e $L_c/1500$	18,3	FT/F*	0,19	19,8	FT/F	0,21
		1,55t e $L_c/1500$	18,2	FT/F*	0,19	19,7	FT/F	0,20
	2	0 e 0	-	-	-	25,2	FT/F	0,26
		0,14t e $L_c/1500$	24,1	FT/F	0,25	-	-	-
		0,64t e $L_c/1500$	23,9	FT/F	0,25	22,9	FT/F	0,24
		1,55t e $L_c/1500$	23,2	FT/F	0,24	22,1	FT/F	0,23
	6	0 e 0	-	-	-	26,0	FT/F	0,27
		0,14t e $L_c/1500$	24,0	FT/F	0,25	-	-	-
		0,64t e $L_c/1500$	22,7	FT/F	0,24	22,5	FT/F	0,23
		1,55t e $L_c/1500$	20,6	FT/F	0,21	20,3	FT/F	0,21
	11	0 e 0	-	-	-	26,3	FT/F	0,27
		0,14t e $L_c/1500$	23,7	FT/F	0,25	-	-	-
		0,64t e $L_c/1500$	20,8	FT/F	0,22	20,4	FT/F	0,21
		1,55t e $L_c/1500$	17,5	FT/F	0,18	16,9	FT/F	0,18
	U	0 e 0	-	-	-	29,5	L	0,31
		0,14t e $L_c/1500$	26,1	L/F	0,27	-	-	-
		0,64t e $L_c/1500$	22,3	L/F	0,23	21,8	L/F	0,23
		1,55t e $L_c/1500$	18,2	L/F	0,19	17,7	L/F	0,18
$N_{c,R}^{(1)} = 12,7$ kN		$N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,13$						
$N_{c,R}^{(2)} = 29,8$ kN		$N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,31$						

$N_y = 96,4$ kN (dupla cantoneira) ($f_y = 273$ MPa).

N_{EF} – força de compressão resistente obtida via MEF.

L_c – comprimento da barra ($\lambda_x = L_c / r_x$).

L – instabilidade local.

FT – instabilidade por flexo-torção de cantoneira individual.

F – instabilidade por flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

F* – instabilidade por flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada.

Obs.: para o perfil U foi adotada imperfeição associada ao modo local.

$N_{c,R}^{(1)}$ – calculado com base na ABNT NBR 14762:2010 admitindo cantoneira isolada.

$N_{c,R}^{(2)}$ – calculado com base na ABNT NBR 14762:2010 admitindo flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

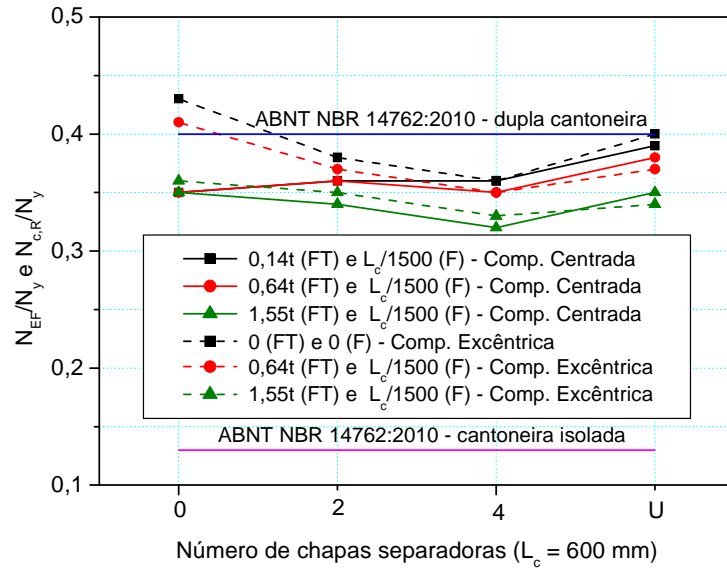


Figura A.1 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2L 60x1,50

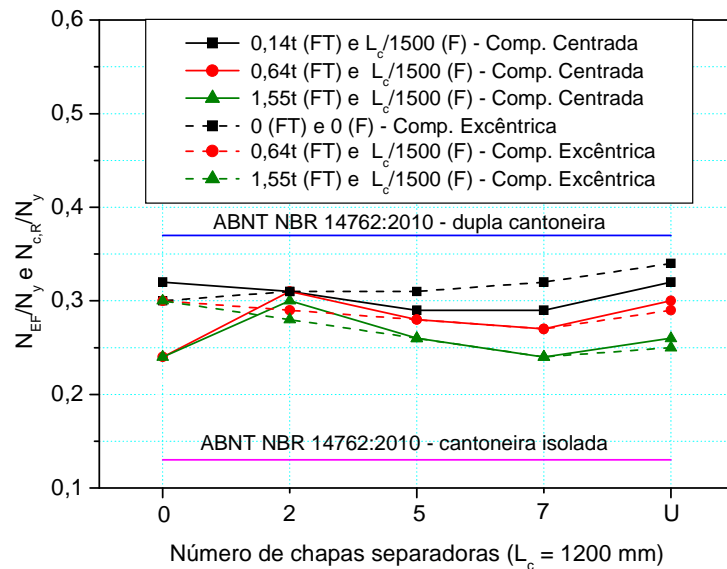


Figura A.2 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2L 60x1,50

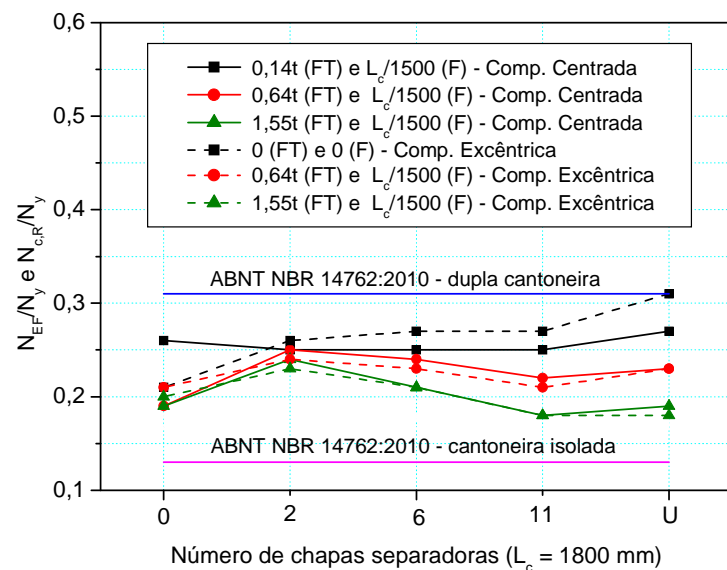


Figura A.3 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2L 60x1,50

Tabela A.2 – Análise de sensibilidade às imperfeições: perfil 2L 60x3,00

L_c (mm)	Número de chapas separadoras	Imperfeições: flexo-torção e flexão	Compressão centrada			Compressão excêntrica			
			N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y	N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y	
600 ($\lambda_x=32$)	0	0 e 0	-	-	-	94,6	FT/F*	0,50	
		0,14t e $L/1500$	135,8	FT	0,72	-	-	0,50	
		0,64t e $L/1500$	121,6	FT	0,65	94,6	FT/F*	0,50	
		1,55t e $L/1500$	112,3	FT	0,60	95,0	FT/F*	0,50	
	1	0 e 0	138,1	FT	0,73	131,6	FT/F	0,70	
		0,64t e $L/1500$	121,0	FT	0,64	106,5	FT/F	0,57	
		1,55t e $L/1500$	107,5	FT	0,57	94,2	FT/F	0,50	
	2	0 e 0	-	-	-	140,8	FT/F	0,75	
		0,14t e $L/1500$	140,0	FT	0,74	-	-	-	
		0,64t e $L/1500$	120,6	FT	0,64	123,4	FT	0,65	
		1,55t e $L/1500$	104,5	FT	0,55	109,8	FT	0,58	
	4	0 e 0	-	-	-	147,8	FT/F	0,78	
		0,14t e $L/1500$	144,1	FT	0,76	-	-	-	
		0,64t e $L/1500$	118,0	FT	0,63	118,5	FT	0,63	
		1,55t e $L/1500$	96,0	FT	0,51	96,6	FT	0,51	
	U	0 e 0	-	-	-	161,3	L/F	0,86	
		0,14t e $L/1500$	163,4	L	0,87	-	-	-	
		0,64t e $L/1500$	133,0	L	0,71	131,1	L	0,70	
		1,55t e $L/1500$	107,8	L	0,57	103,9	L	0,55	
	$N_{c,R}^{(1)} = 96,5$ kN		$N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,51$						
	$N_{c,R}^{(2)} = 137,7$ kN		$N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,73$						
	1200 ($\lambda_x=63$)	0	0 e 0	-	-	-	67,8	FT/F*	0,36
			0,14t e $L/1500$	120,5	FT/F*	0,64	-	-	-
			0,64t e $L/1500$	120,9	FT/F*	0,64	66,3	FT/F*	0,35
1,55t e $L/1500$			111,0	FT/F*	0,59	65,8	FT/F*	0,35	
1		0 e 0	-	-	-	117,5	FT/F	0,62	
		0,14t e $L/1500$	126,0	FT	0,67	-	-	-	
		0,64t e $L/1500$	117,1	FT/F	0,62	93,0	FT/F	0,49	
		1,55t e $L/1500$	107,0	FT/F	0,57	84,9	FT/F	0,45	
2		0 e 0	-	-	-	125,2	FT/F	0,66	
		0,14t e $L/1500$	128,2	FT	0,68	-	-	-	
		0,64t e $L/1500$	113,9	FT/F	0,60	107,7	FT/F	0,57	
		1,55t e $L/1500$	102,2	FT/F	0,54	96,7	FT/F	0,51	
5		0 e 0	-	-	-	139,3	FT/F	0,74	
		0,14t e $L/1500$	125,5	FT	0,67	-	-	-	
		0,64t e $L/1500$	101,8	FT/F	0,54	101,3	FT/F	0,54	
		1,55t e $L/1500$	81,6	FT/F	0,43	81,0	FT/F	0,43	

continua na próxima página...

...continuação Tabela A.2

L_c (mm)	Número de chapas separadoras	Imperfeições: flexo-torção e flexão	Compressão centrada			Compressão excêntrica			
			N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y	N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y	
1200 ($\lambda_x=63$)	7	0 e 0	-	-	-	141,7	FT/F	0,75	
		0,14t e $L_c/1500$	126,1	FT	0,67	-	-	-	
		0,64t e $L_c/1500$	97,7	FT/F	0,52	96,4	FT/F	0,51	
		1,55t e $L_c/1500$	73,6	FT/F	0,39	72,0	FT/F	0,38	
	U	0 e 0	-	-	-	156,0	F	0,83	
		0,14t e $L_c/1500$	143,9	L/F	0,76	-	-	-	
		0,64t e $L_c/1500$	110,7	L/F	0,59	108,2	L/F	0,57	
		1,55t e $L_c/1500$	81,9	L/F	0,43	78,6	L/F	0,42	
	$N_{c,R}^{(1)} = 94,4$ kN		$N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,50$						
	$N_{c,R}^{(2)} = 122,5$ kN		$N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,65$						
	1800 ($\lambda_x=95$)	0	0 e 0	-	-	-	47,1	FT/F*	0,25
			0,14t e $L_c/1500$	89,3	FT/F*	0,47	-	-	-
0,64t e $L_c/1500$			78,6	FT/F*	0,42	45,3	FT/F*	0,24	
1,55t e $L_c/1500$			68,7	FT/F*	0,36	44,4	FT/F*	0,24	
1		0 e 0	-	-	-	95,7	FT/F	0,51	
		0,14t e $L_c/1500$	103,1	FT/F	0,54	-	-	-	
		0,64t e $L_c/1500$	91,3	FT/F	0,48	85,9	FT/F	0,46	
		1,55t e $L_c/1500$	85,5	FT/F	0,45	80,8	FT/F	0,43	
2		0 e 0	-	-	-	107,3	F	0,57	
		0,14t e $L_c/1500$	106,9	FT/F	0,57	-	-	-	
		0,64t e $L_c/1500$	99,8	FT/F	0,53	98,3	FT/F	0,52	
		1,55t e $L_c/1500$	90,4	FT/F	0,48	88,7	FT/F	0,47	
6		0 e 0	-	-	-	118,6	F	0,63	
		0,14t e $L_c/1500$	103,9	FT/F	0,55	-	-	-	
		0,64t e $L_c/1500$	90,9	FT/F	0,48	84,1	FT/F	0,45	
		1,55t e $L_c/1500$	76,1	FT/F	0,40	67,6	FT/F	0,36	
11		0 e 0	-	-	-	120,9	F	0,64	
		0,14t e $L_c/1500$	100,8	FT/F	0,54	-	-	-	
		0,64t e $L_c/1500$	79,4	FT/F	0,42	75,0	FT/F	0,40	
		1,55t e $L_c/1500$	56,9	FT/F	0,30	52,6	FT/F	0,28	
U		0 e 0	-	-	-	130,9	F	0,69	
		0,14t e $L_c/1500$	109,7	F	0,58	-	-	-	
		0,64t e $L_c/1500$	85,3	L/F	0,45	81,2	L/F	0,43	
		1,55t e $L_c/1500$	59,5	L/F	0,32	55,9	L/F	0,30	
$N_{c,R}^{(1)} = 50,5$ kN		$N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,27$							
$N_{c,R}^{(2)} = 100,3$ kN		$N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,53$							

continua na próxima página...

...continuação Tabela A.2

L_c (mm)	Número de chapas separadoras	Imperfeições: flexo-torção e flexão	Compressão centrada			Compressão excêntrica			
			N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y	N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y	
2400 ($\lambda_x=127$)	0	0 e 0	-	-	-	33,1	F*	0,18	
		0,64t e $L_c/1500$	-	-	-	31,4	FT/F*	0,17	
		1,55t e $L_c/1500$	-	-	-	30,4	FT/F*	0,16	
	1	0 e 0	-	-	-	66,6	F	0,35	
		0,64t e $L_c/1500$	-	-	-	60,6	FT/F	0,32	
		1,55t e $L_c/1500$	-	-	-	60,8	FT/F	0,32	
	2	0 e 0	-	-	-	72,7	F	0,39	
		0,64t e $L_c/1500$	-	-	-	64,2	FT/F	0,34	
		1,55t e $L_c/1500$	-	-	-	57,9	FT/F	0,31	
	4	0 e 0	-	-	-	75,9	F	0,40	
		0,64t e $L_c/1500$	-	-	-	65,5	FT/F	0,35	
		1,55t e $L_c/1500$	-	-	-	60,0	FT/F	0,32	
	8	0 e 0	-	-	-	77,8	F	0,41	
		0,64t e $L_c/1500$	-	-	-	60,7	FT/F	0,32	
		1,55t e $L_c/1500$	-	-	-	49,8	FT/F	0,26	
	U	0 e 0	-	-	-	84,2	F	0,45	
		0,64t e $L_c/1500$	-	-	-	57,7	L/F	0,31	
		1,55t e $L_c/1500$	-	-	-	39,6	L/F	0,21	
	$N_{c,R}^{(1)} = 28,4$ kN		$N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,15$						
	$N_{c,R}^{(2)} = 74,4$ kN		$N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,39$						

$N_y = 188,4$ kN (dupla cantoneira) ($f_y = 273$ MPa).

N_{EF} – força de compressão resistente obtida via MEF.

L_c – comprimento da barra ($\lambda_x=L_c/r_x$).

L – instabilidade local.

FT – instabilidade por flexo-torção de cantoneira individual.

F – instabilidade por flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

F* – instabilidade por flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada.

Obs.: para o perfil U foi adotada imperfeição associada ao modo local.

$N_{c,R}^{(1)}$ – calculado com base na ABNT NBR 14762:2010 admitindo cantoneira isolada.

$N_{c,R}^{(2)}$ – calculado com base na ABNT NBR 14762:2010 admitindo flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

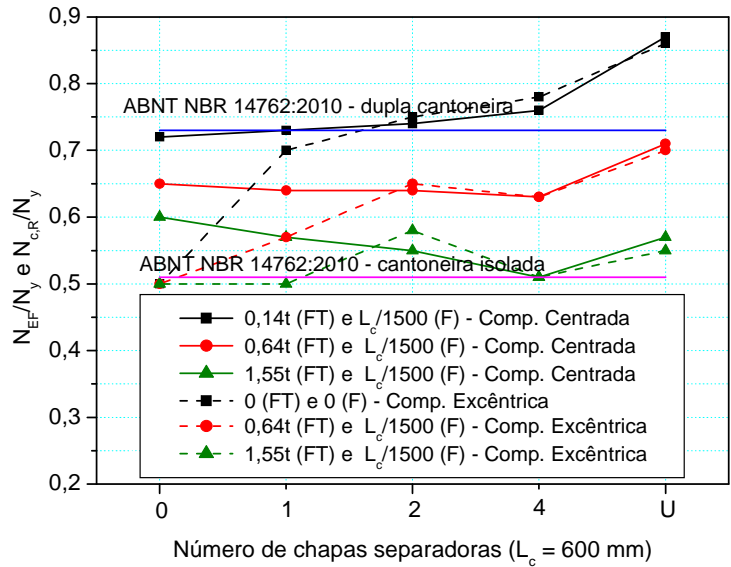


Figura A.4 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2L 60x3,00

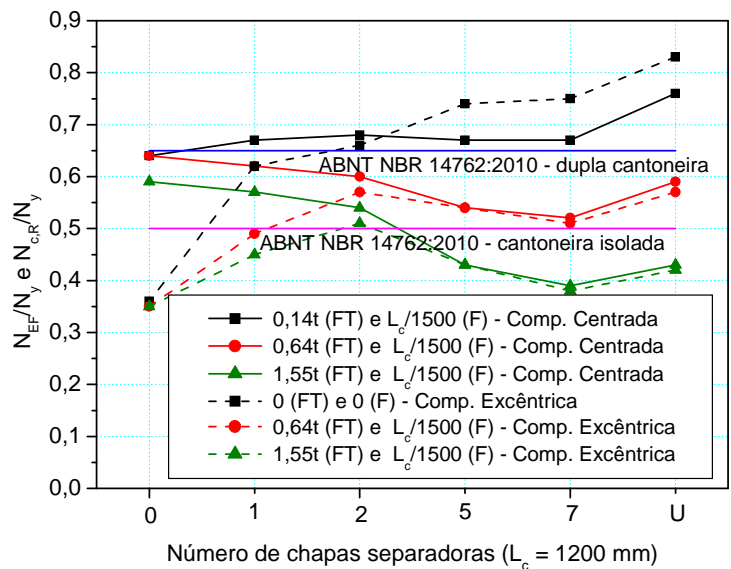


Figura A.5 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2L 60x3,00

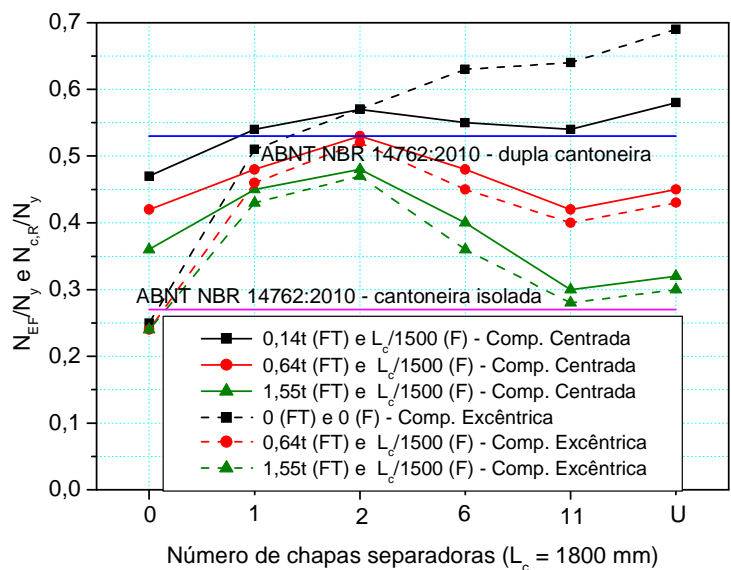


Figura A.6 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2L 60x3,00

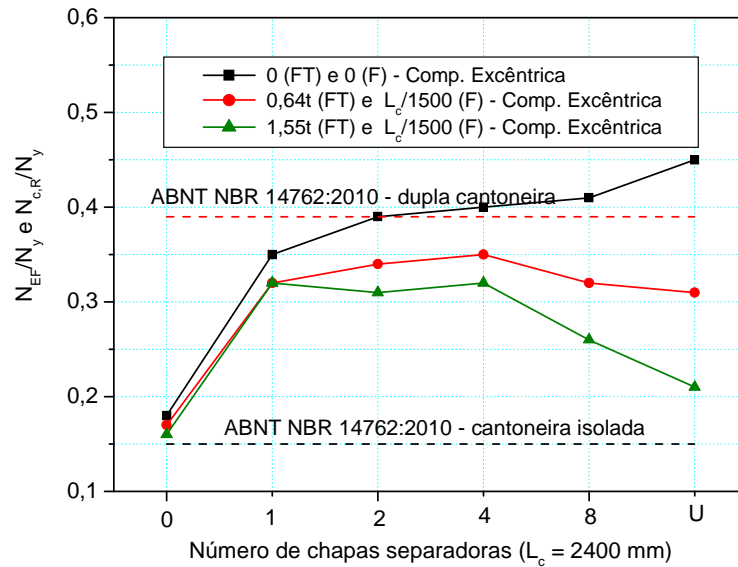


Figura A.7 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2L 60x3,00

Tabela A.3 – Análise de sensibilidade às imperfeições: perfil 2L 60x6,00

L_c (mm)	Número de chapas separadoras	Imperfeições: flexo-torção e flexão	Compressão centrada		
			N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y
600 ($\lambda_x=32$)	0	0,14t e $L_c/1500$	338,9	FT/F*	0,94
		0,64t e $L_c/1500$	317,7	FT/F*	0,88
		1,55t e $L_c/1500$	281,4	FT/F*	0,78
	2	0,14t e $L_c/1500$	334,8	FT/F	0,93
		0,64t e $L_c/1500$	316,6	FT/F	0,88
		1,55t e $L_c/1500$	272,3	FT/F	0,75
	4	0,14t e $L_c/1500$	328,9	FT/F	0,91
		0,64t e $L_c/1500$	298,6	FT/F	0,83
		1,55t e $L_c/1500$	238,8	FT/F	0,66
	U	0,14t e $L_c/1500$	357,2	L/F	0,99
		0,64t e $L_c/1500$	340,8	L/F	0,94
		1,55t e $L_c/1500$	272,8	L/F	0,76
		$N_{c,R}^{(1)} = 304,5$ kN	$N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,84$		
		$N_{c,R}^{(2)} = 339,4$ kN	$N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,94$		
1200 ($\lambda_x=65$)	0	0,14t e $L_c/1500$	275,8	FT/F*	0,76
		0,64t e $L_c/1500$	233,3	FT/F*	0,65
		1,55t e $L_c/1500$	185,6	FT/F*	0,51
	2	0,14t e $L_c/1500$	272,6	FT/F	0,76
		0,64t e $L_c/1500$	264,4	FT/F	0,73
		1,55t e $L_c/1500$	238,2	FT/F	0,66

continua na próxima página...

...continuação Tabela A.3

L_c (mm)	Número de chapas separadoras	Imperfeições: flexo-torção e flexão	Compressão centrada			
			N_{EF} (kN)	Modo de falha	N_{EF}/N_y	
1200 ($\lambda_x=65$)	5	0,14t e $L_c/1500$	269,1	FT/F	0,75	
		0,64t e $L_c/1500$	248,0	FT/F	0,69	
		1,55t e $L_c/1500$	196,9	FT/F	0,55	
	7	0,14t e $L_c/1500$	267,7	FT/F	0,74	
		0,64t e $L_c/1500$	237,4	FT/F	0,66	
		1,55t e $L_c/1500$	175,9	FT/F	0,49	
	U	0,14t e $L_c/1500$	294,1	L/F	0,81	
		0,64t e $L_c/1500$	265,9	L/F	0,74	
		1,55t e $L_c/1500$	198,7	L/F	0,55	
	$N_{c,R}^{(1)} = 183,1$ kN		$N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,51$			
	$N_{c,R}^{(2)} = 282,7$ kN		$N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,78$			
	1800 ($\lambda_x=97$)	0	0,14t e $L_c/1500$	186,8	FT/F*	0,52
0,64t e $L_c/1500$			153,2	FT/F*	0,42	
1,55t e $L_c/1500$			121,8	FT/F*	0,34	
2		0,14t e $L_c/1500$	198,7	F	0,55	
		0,64t e $L_c/1500$	197,4	FT/F	0,55	
		1,55t e $L_c/1500$	190,7	FT/F	0,53	
6		0,14t e $L_c/1500$	196,6	F	0,54	
		0,64t e $L_c/1500$	186,6	FT/F	0,52	
		1,55t e $L_c/1500$	157,4	FT/F	0,44	
11		0,14t e $L_c/1500$	194,6	F	0,54	
		0,64t e $L_c/1500$	175,4	FT/F	0,49	
		1,55t e $L_c/1500$	131,3	FT/F	0,36	
U		0,14t e $L_c/1500$	209,7	F	0,58	
		0,64t e $L_c/1500$	187,9	L/F	0,52	
		1,55t e $L_c/1500$	136,4	L/F	0,38	
$N_{c,R}^{(1)} = 86,8$ kN		$N_{c,R}^{(1)} / N_y = 0,24$				
$N_{c,R}^{(2)} = 208,3$ kN		$N_{c,R}^{(2)} / N_y = 0,58$				

$N_y = 360,9$ kN (dupla cantoneira) ($f_y = 273$ MPa).

N_{EF} – força de compressão resistente obtida via MEF.

L_c – comprimento da barra ($\lambda_x=L_c/r_x$).

L – instabilidade local

FT – instabilidade por flexo-torção de cantoneira individual.

F – instabilidade por flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

F* – instabilidade por flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada.

Obs.: para o perfil U foi adotada imperfeição associada ao modo local.

$N_{c,R}^{(1)}$ – calculado com base na ABNT NBR 14762:2010 admitindo cantoneira isolada.

$N_{c,R}^{(2)}$ – calculado com base na ABNT NBR 14762:2010 admitindo flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

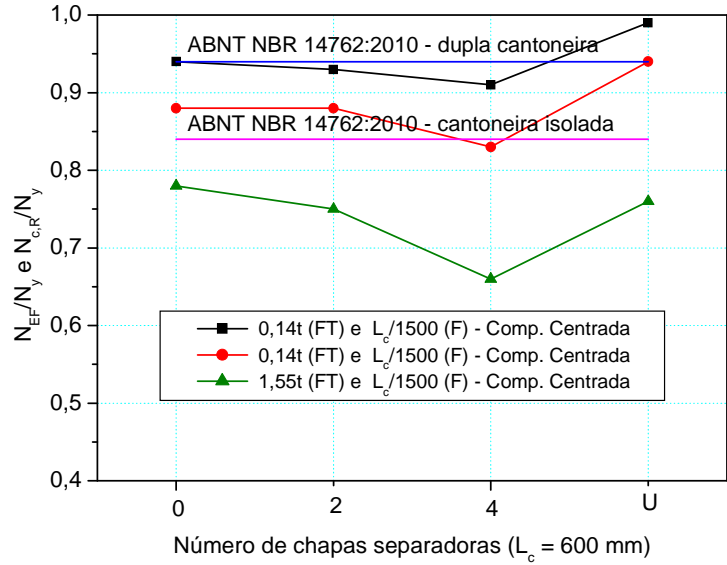


Figura A.8 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2L 60x6,00

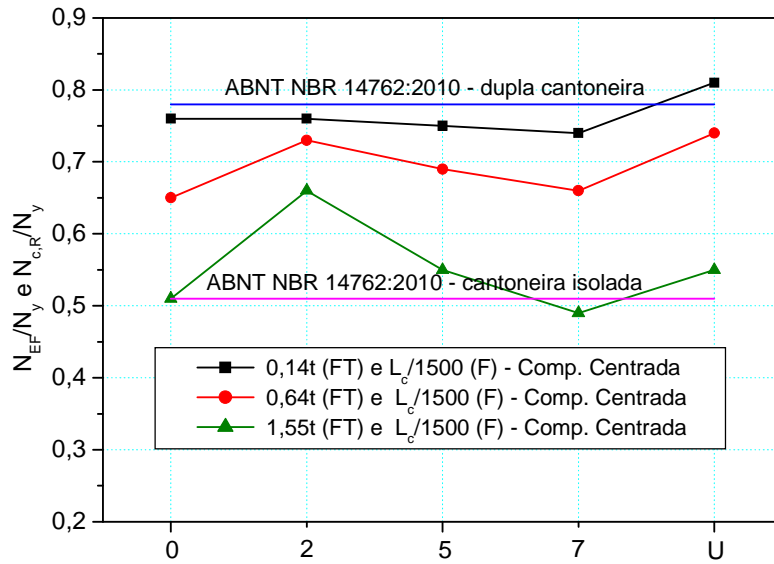


Figura A.9 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2L 60x6,00

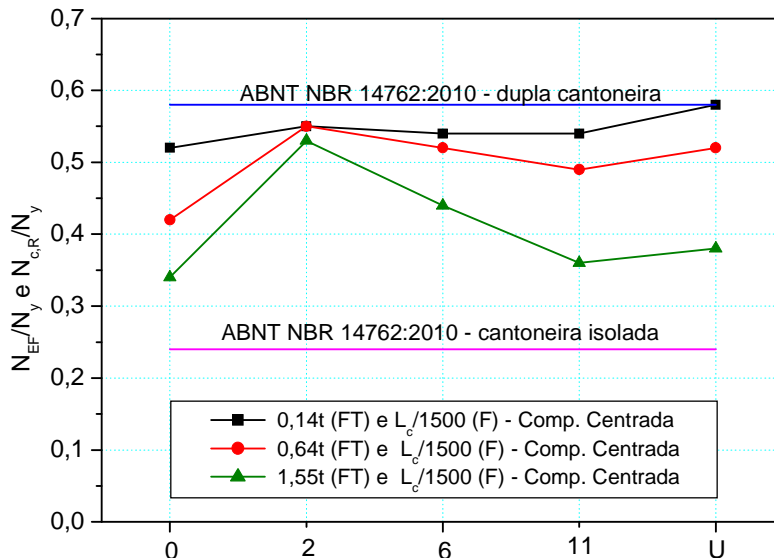


Figura A.10 – Sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais: perfil 2L 60x6,00

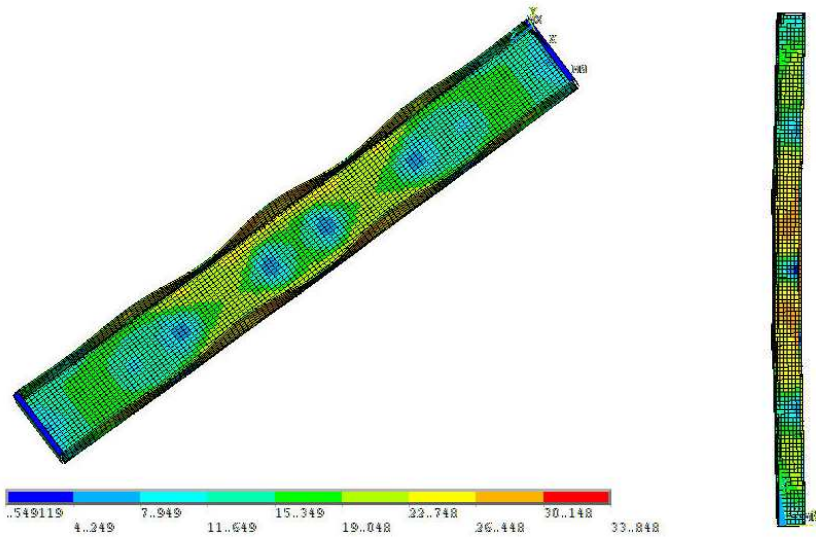


Figura A.11 – Instabilidade local/flexão e distribuição de tensões de von Mises (compressão centrada – perfil U equivalente – $L_c = 1200\text{mm}$)

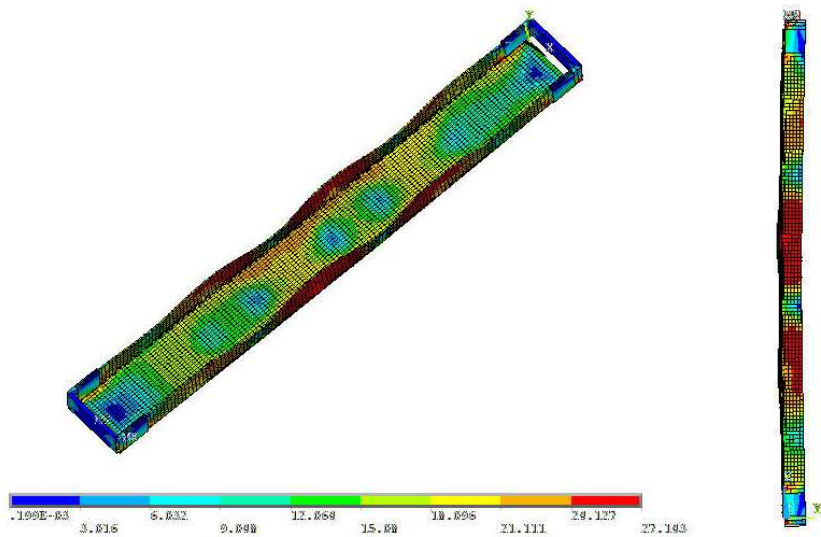
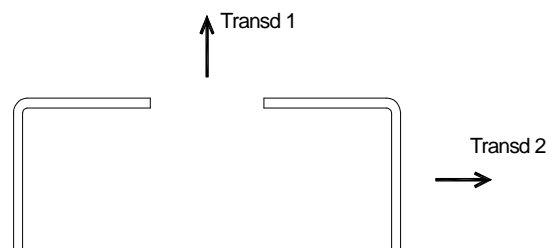
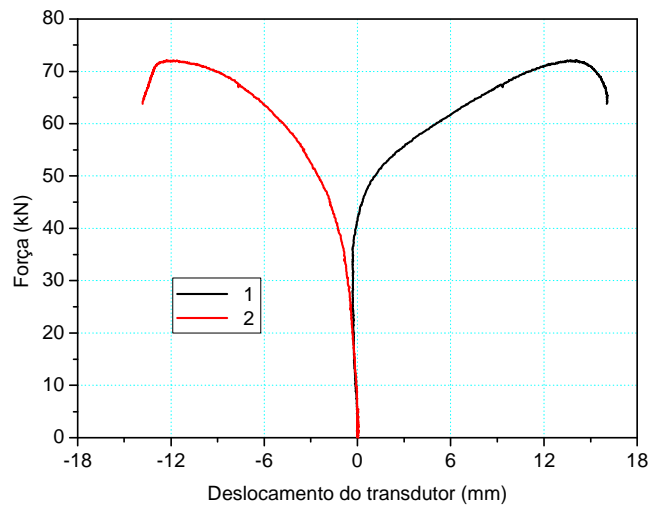
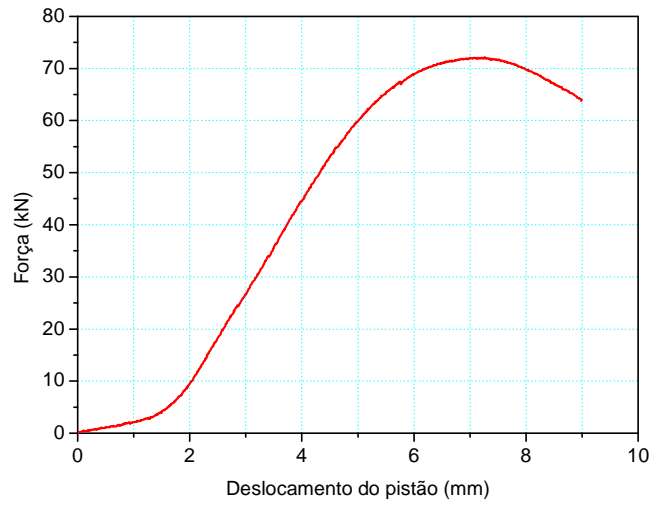


Figura A.12 – Instabilidade local/flexão e distribuição de tensões de von Mises (compressão excêntrica – perfil U equivalente – $L_c = 1200\text{mm}$)

Apêndice B

Resultados dos ensaios de barras em dupla cantoneira

Perfil 2L 60x2,00
Extremidades fixas (compressão excêntrica)



Transdutores
 Figura B.1 – Barra L600-0

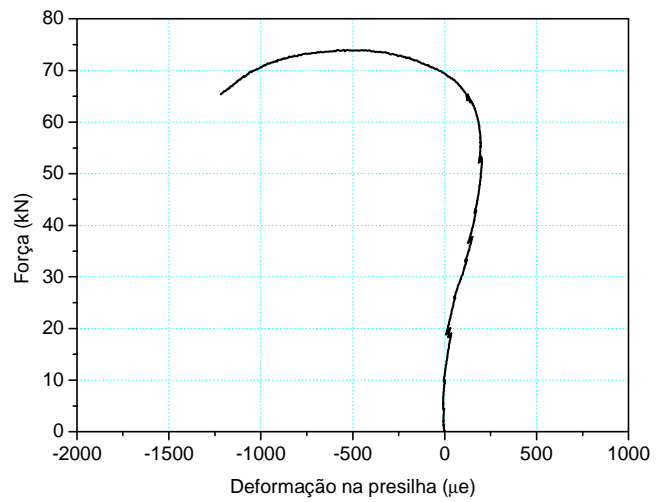
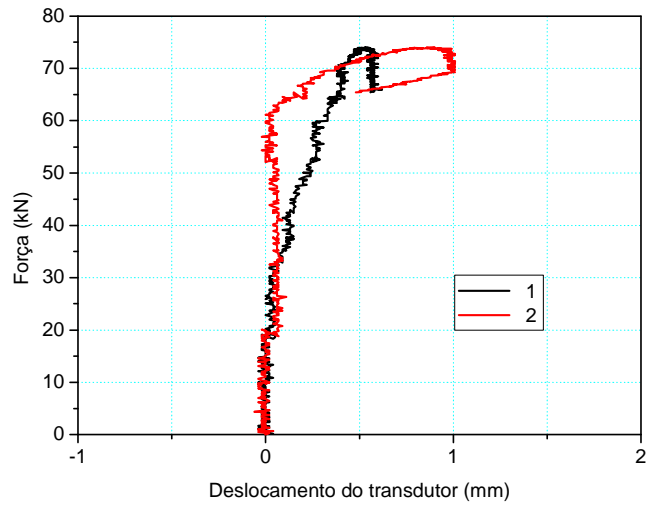
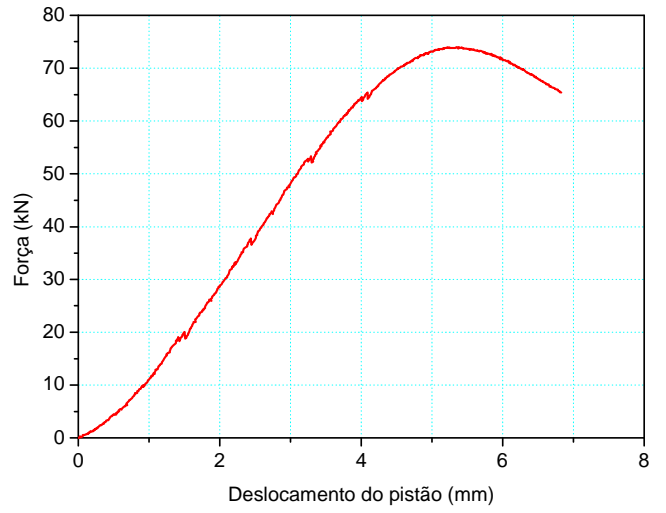
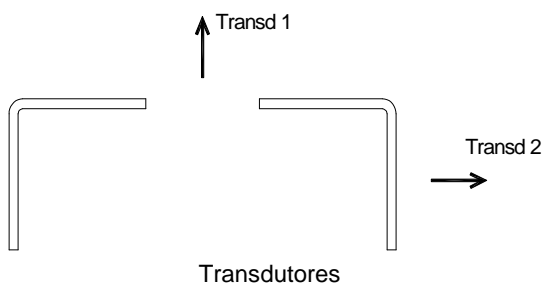


Figura B.2 – Barra L600-1P

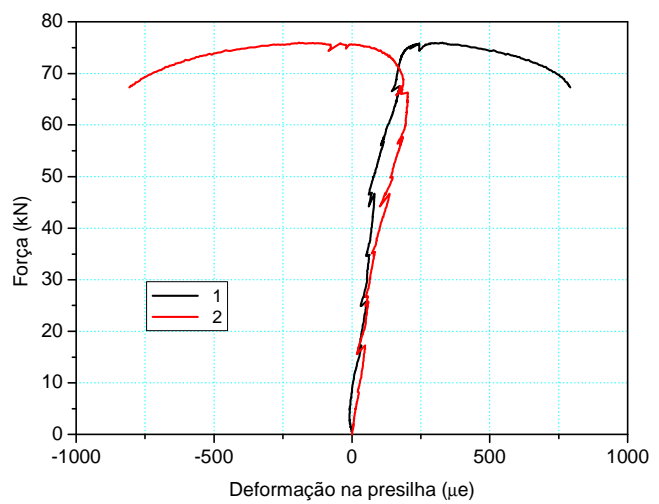
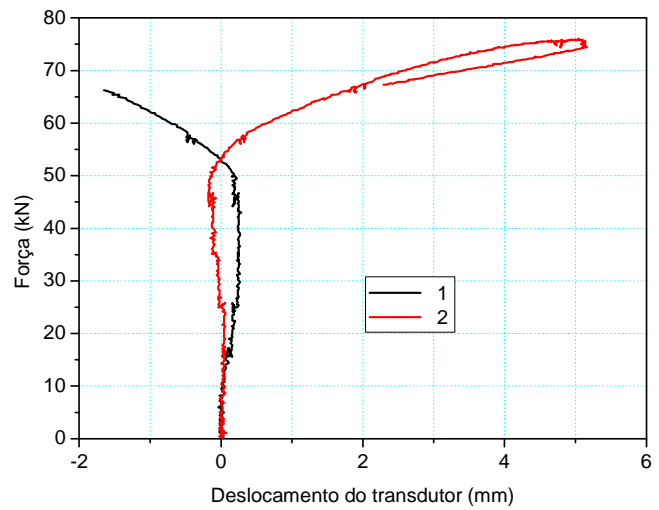
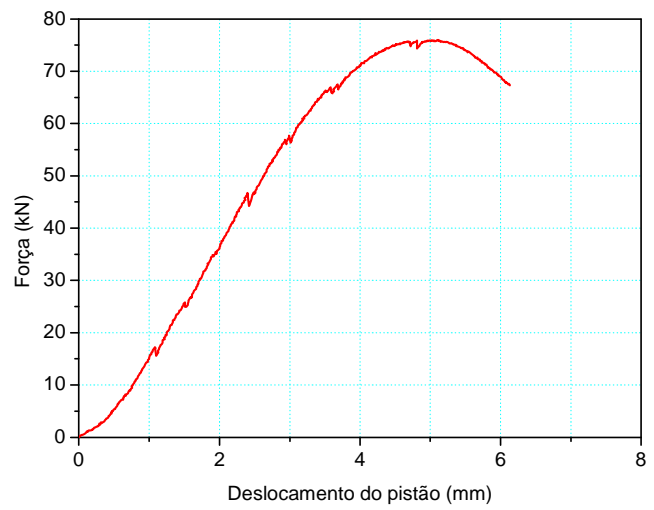
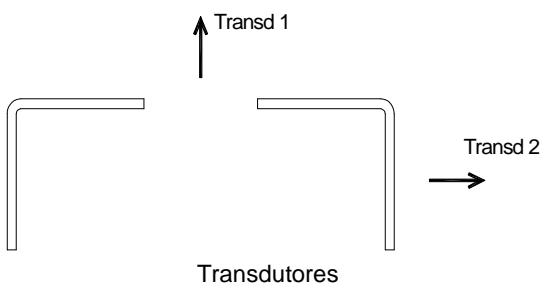
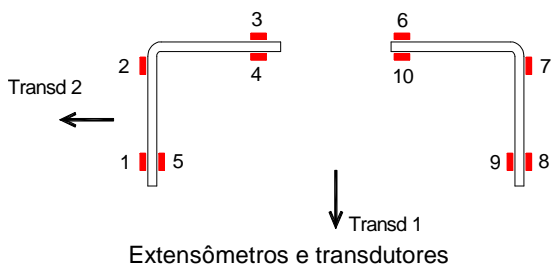
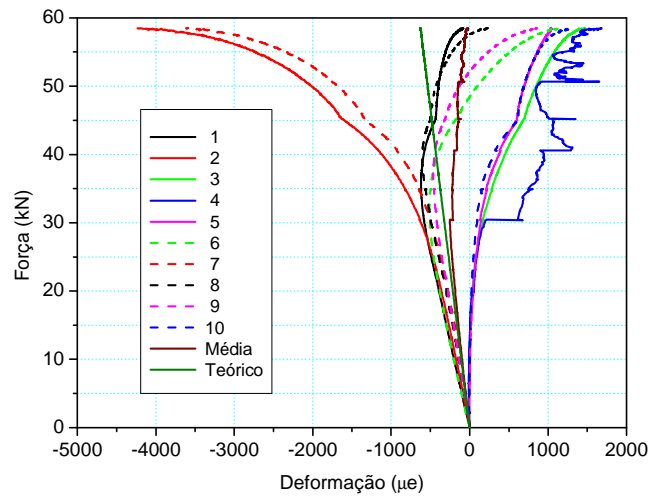
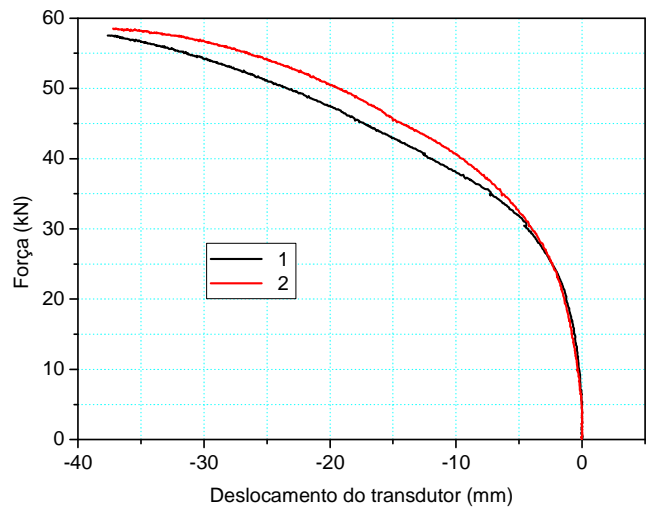
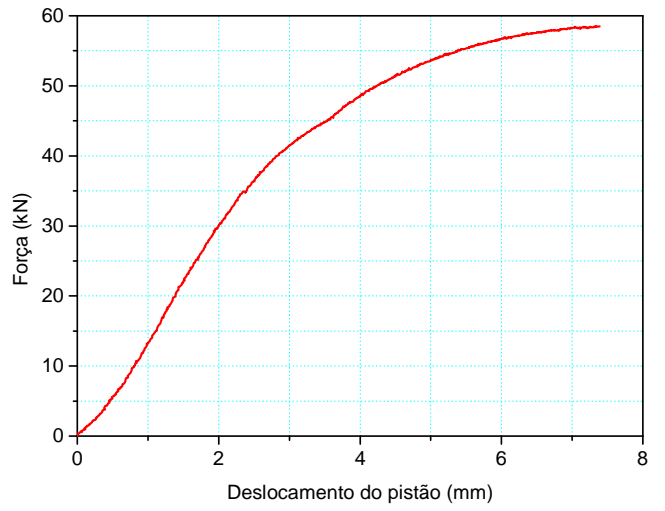
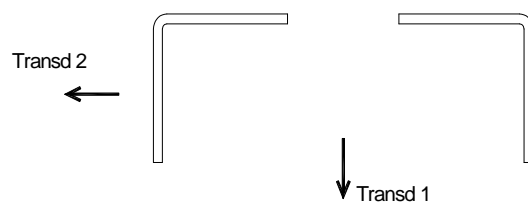
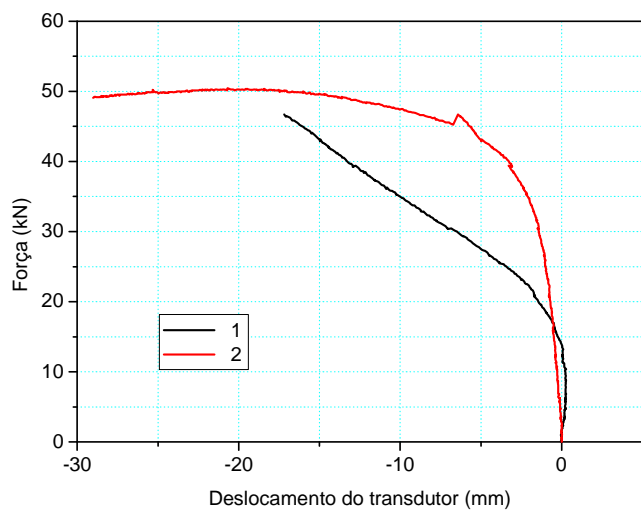
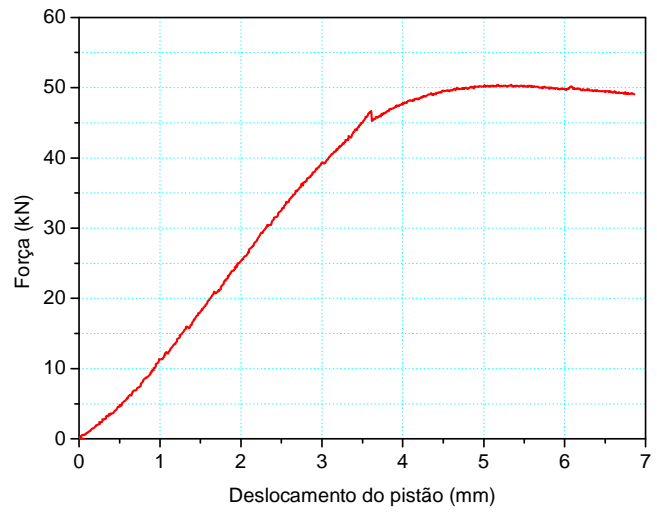


Figura B.3 – Barra L600-2P



$$\text{Teórico: } \epsilon = \frac{N}{E.A}$$

Figura B.4 – Barra L1200-0



Transdutores
 Figura B.5 – Barra L1200-0R

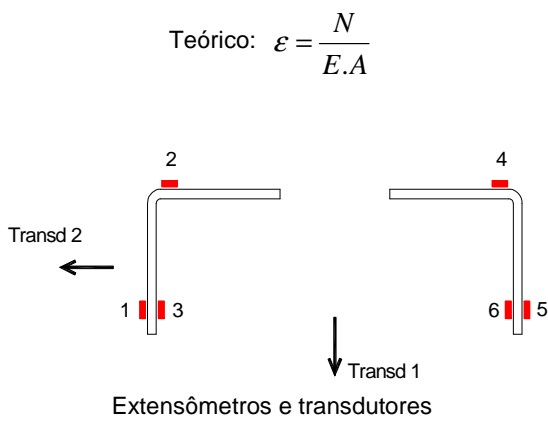
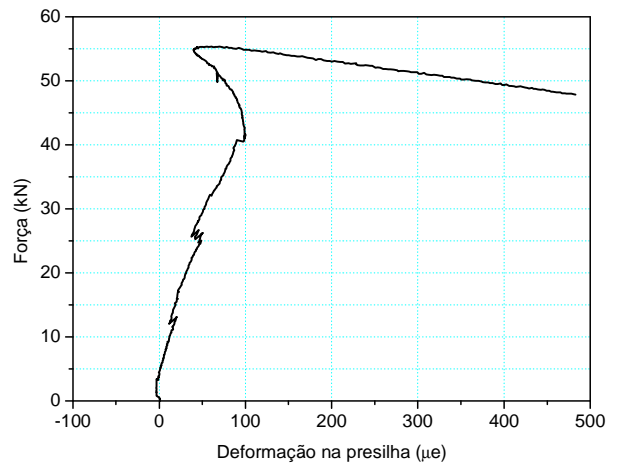
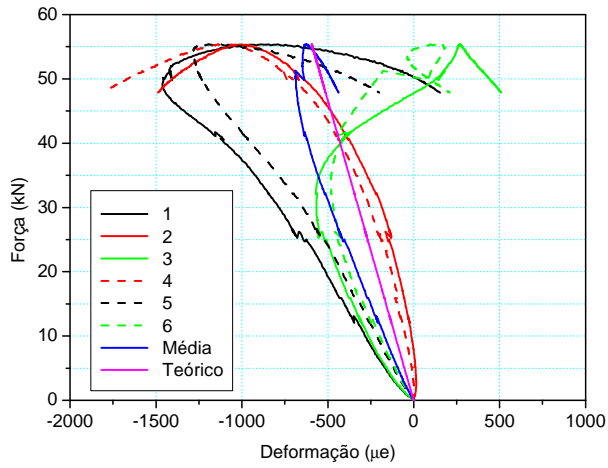
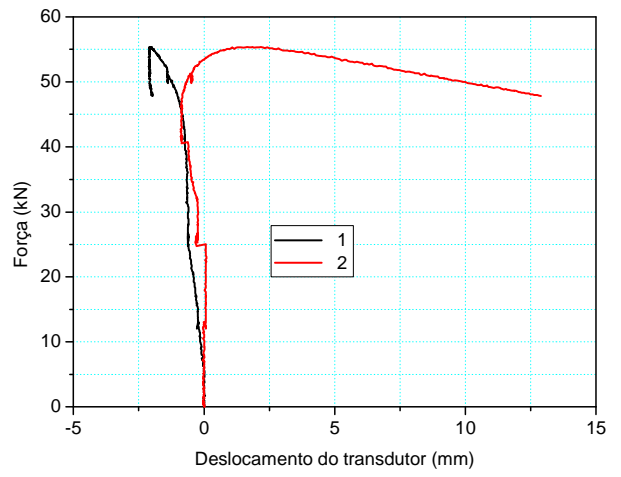
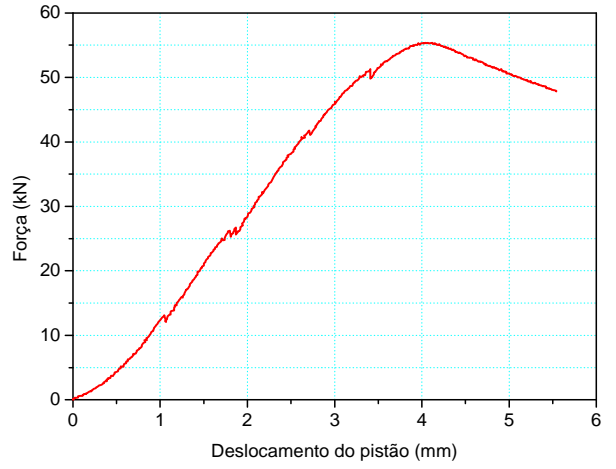
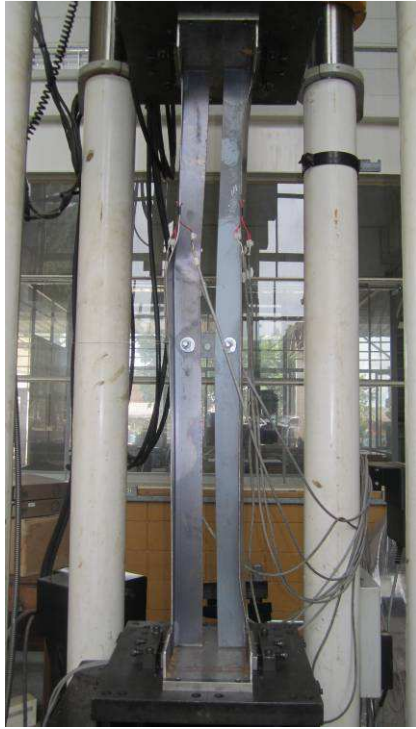
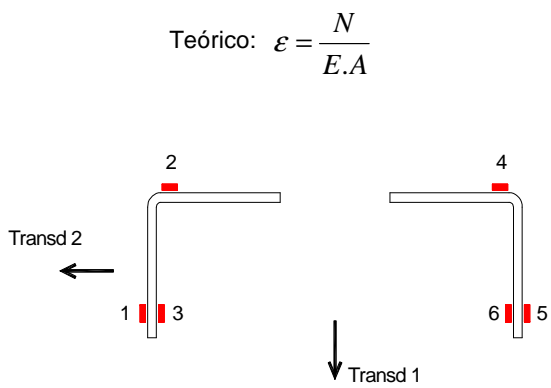
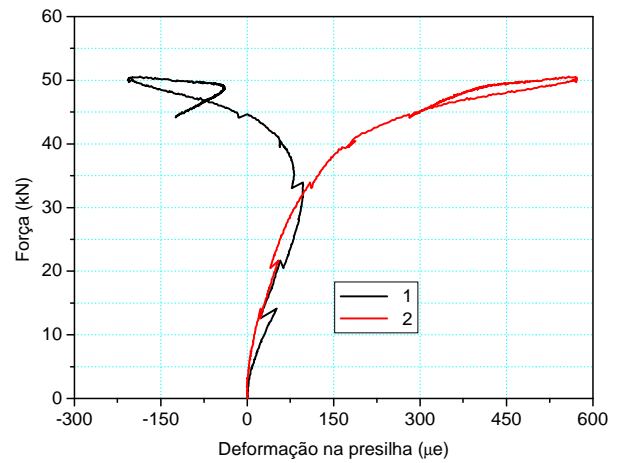
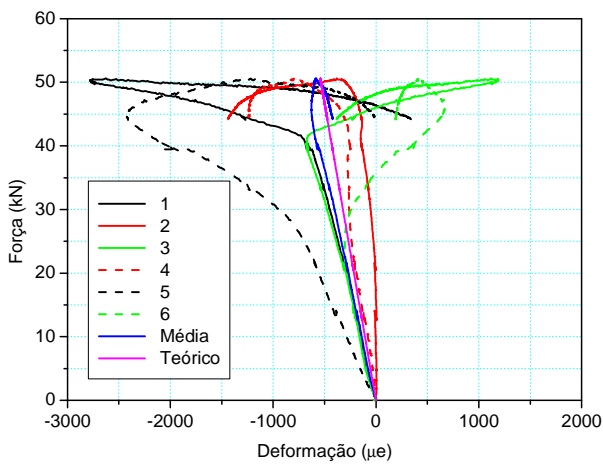
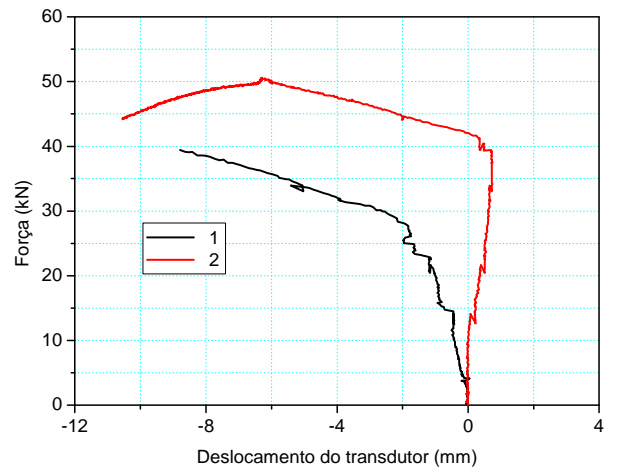
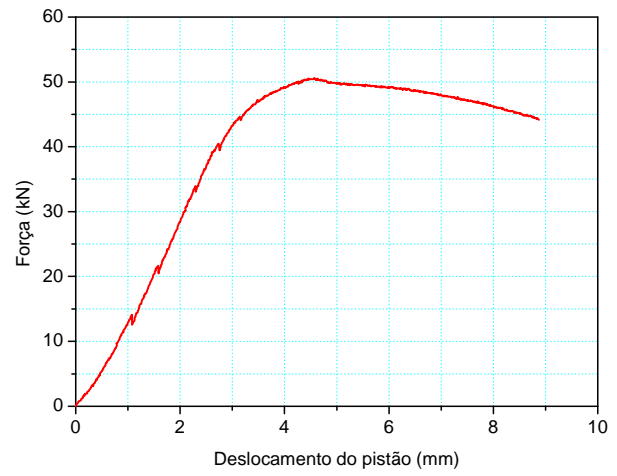
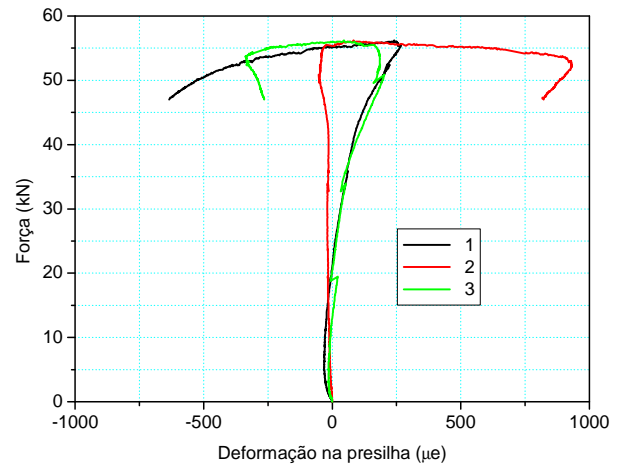
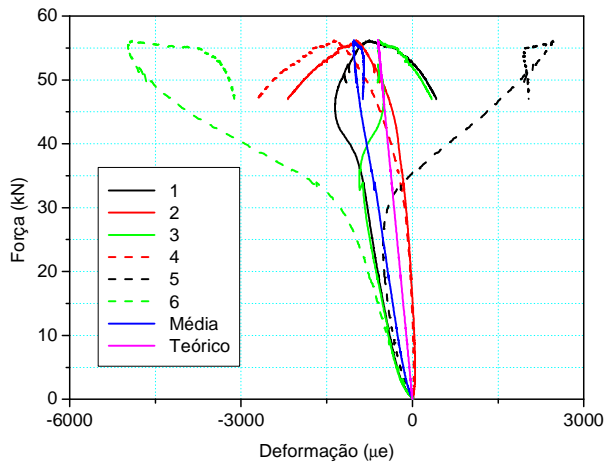
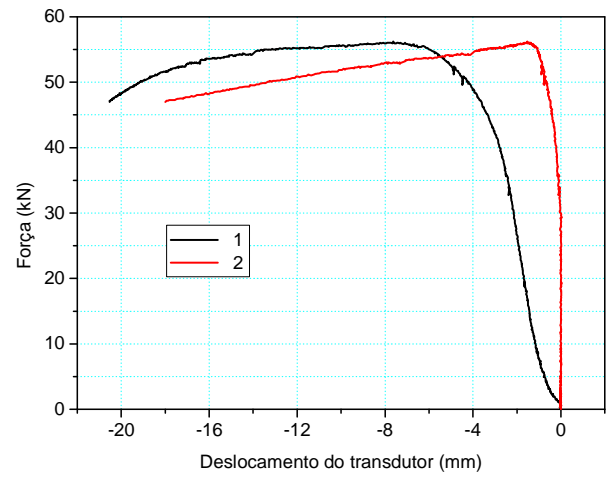
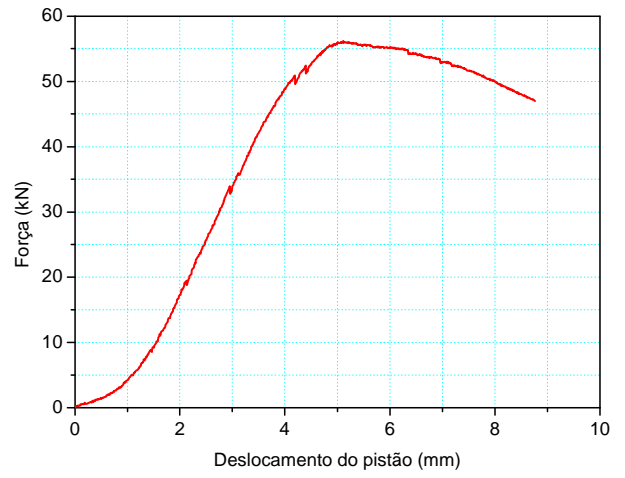


Figura B.6 – Barra L1200-1P

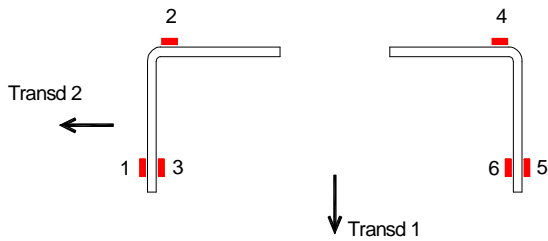


Extensômetros e transdutores

Figura B.7 – Barra L1200-2P

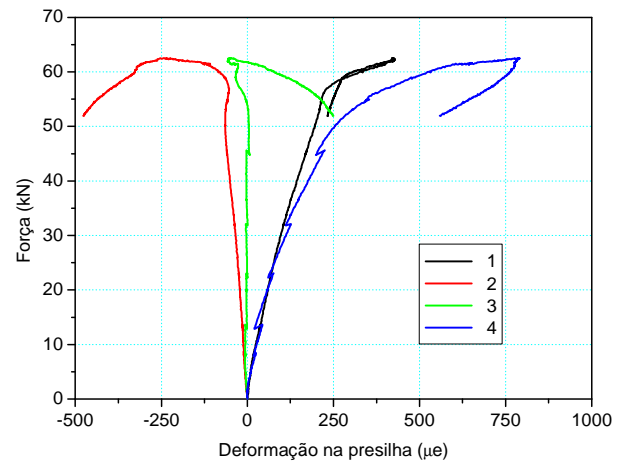
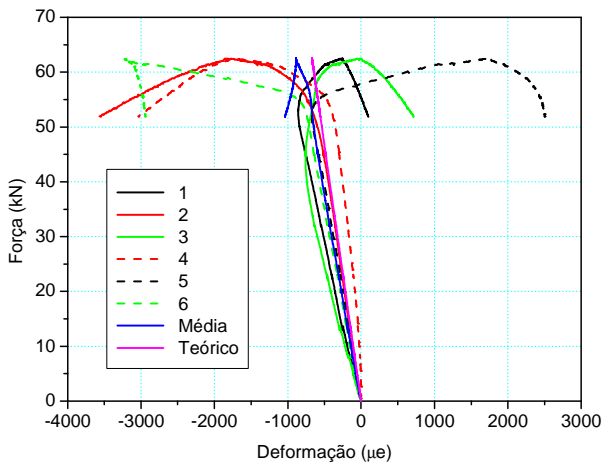
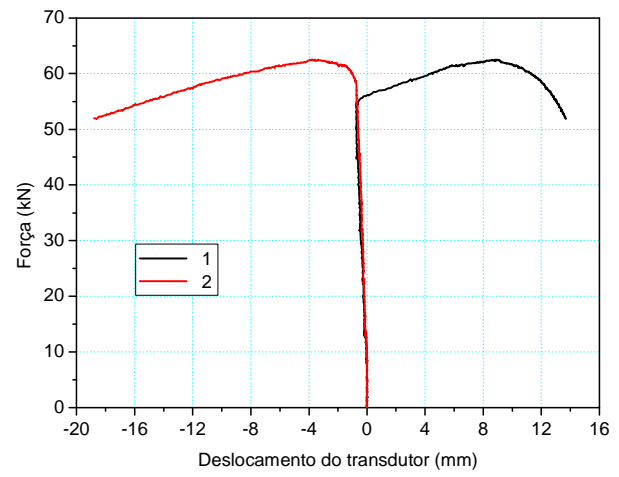
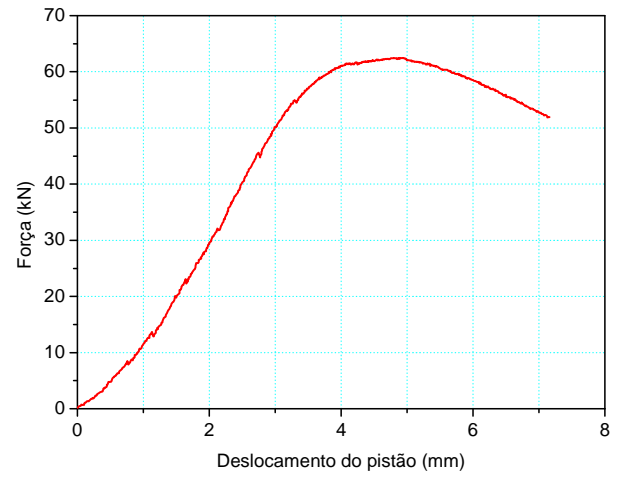


$$\text{Teórico: } \epsilon = \frac{N}{E.A}$$

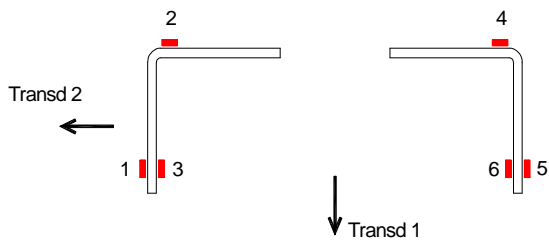


Extensômetros e transdutores

Figura B.8 – Barra L1200-3P

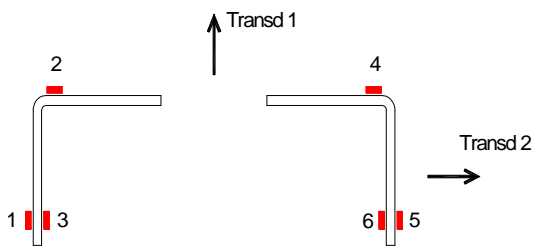
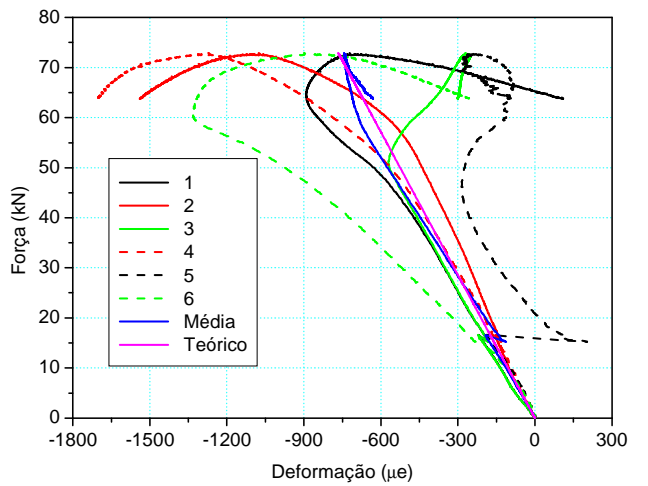
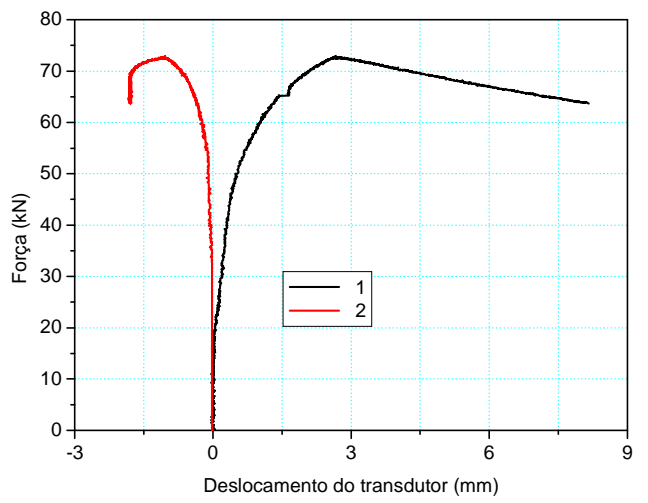
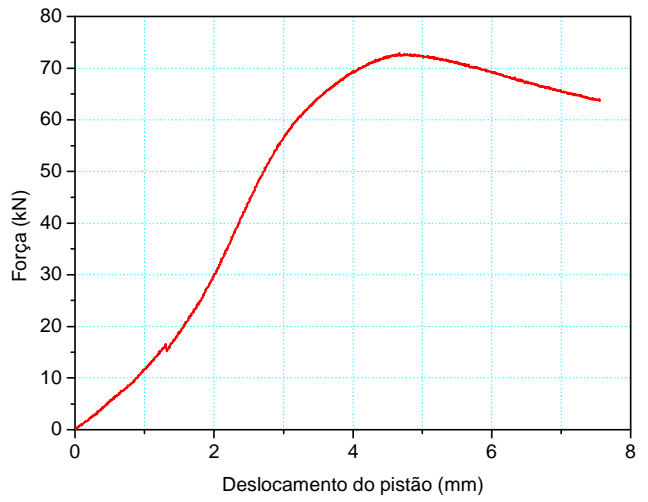


Teórico: $\epsilon = \frac{N}{E.A}$



Extensômetros e transdutores

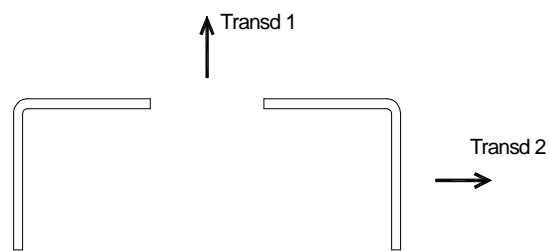
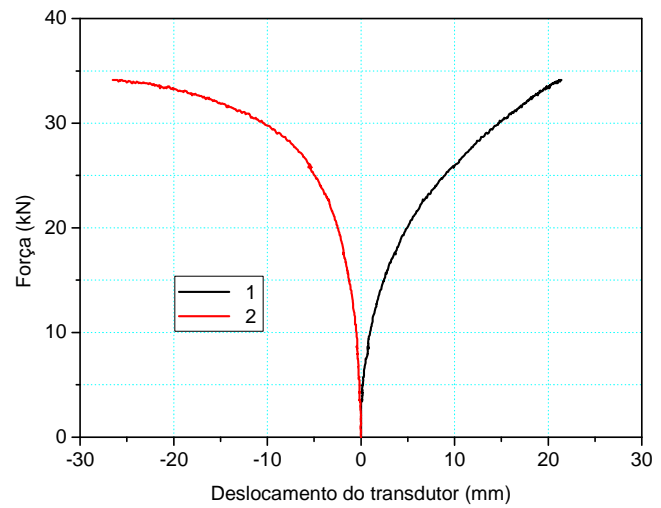
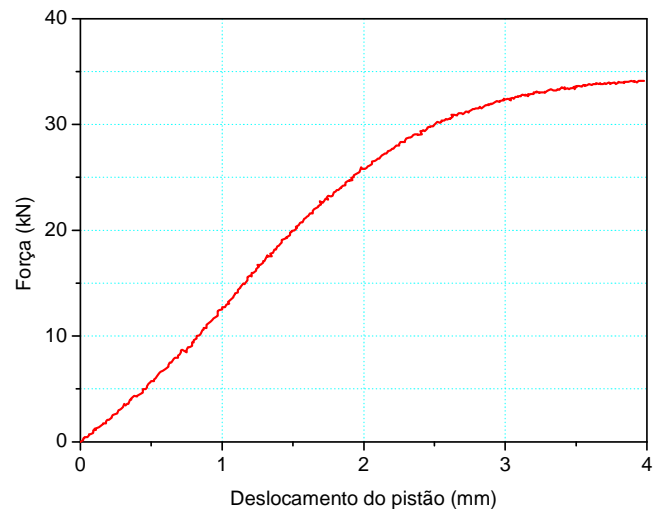
Figura B.9 – Barra L1200-4P



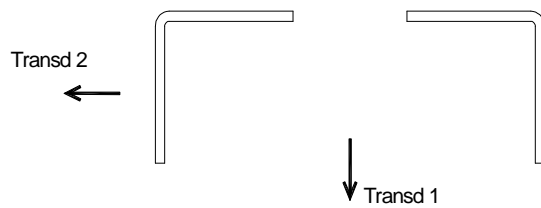
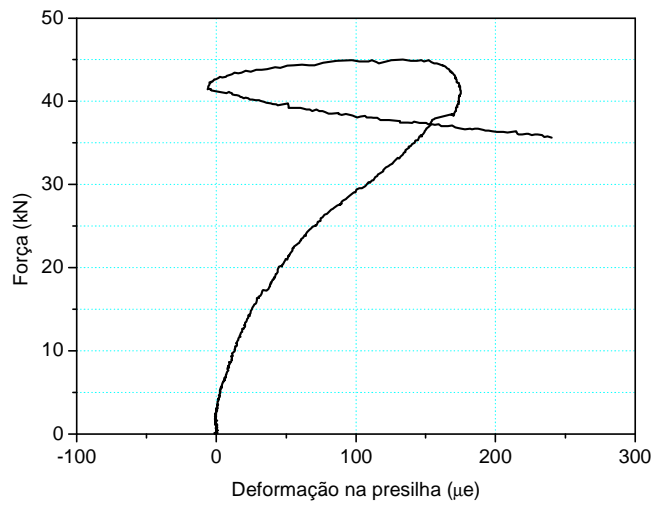
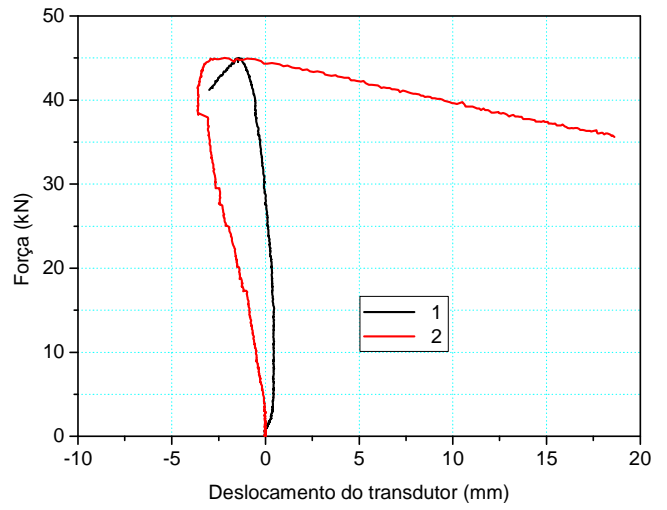
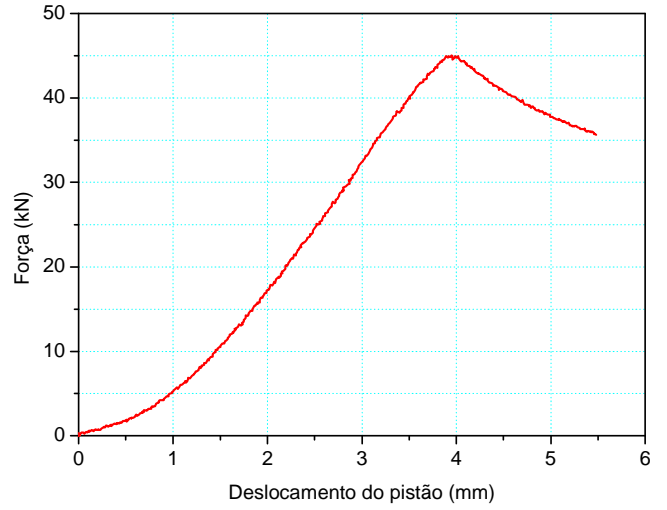
$$\text{Teórico: } \epsilon = \frac{N}{E \cdot A}$$

Extensômetros e transdutores

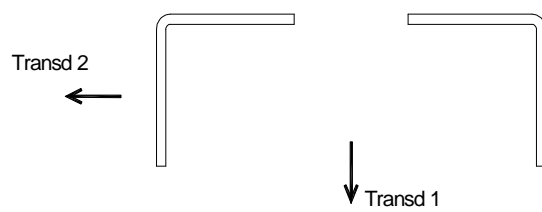
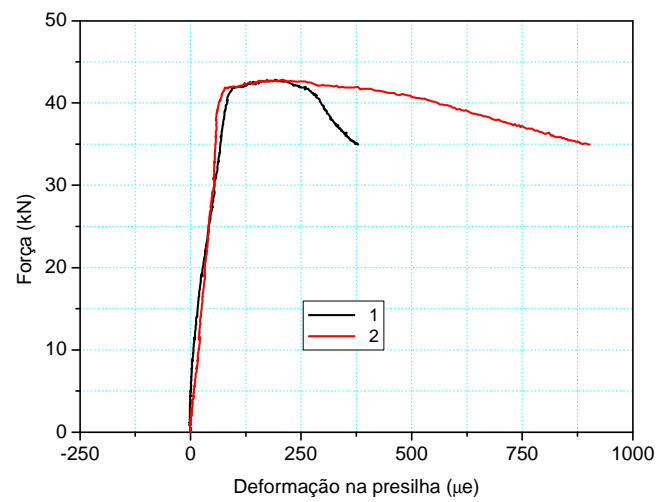
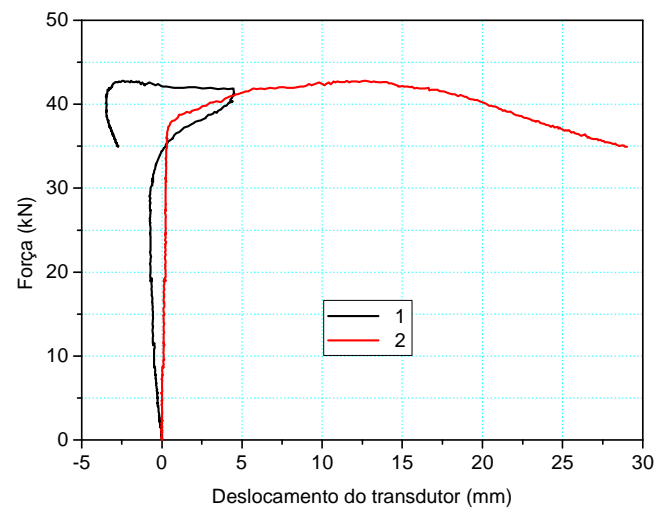
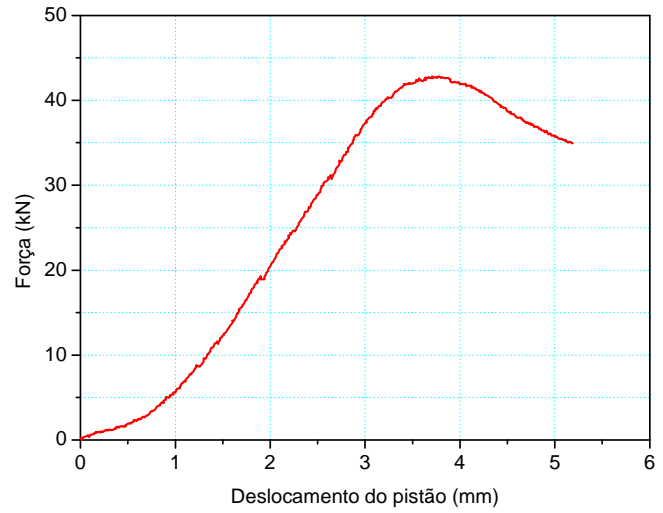
Figura B.10 – Barra L1200-5P



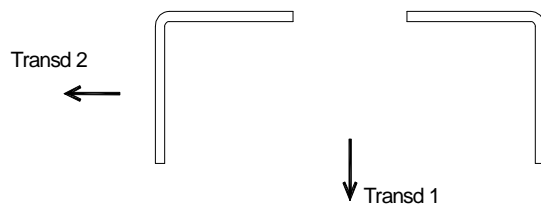
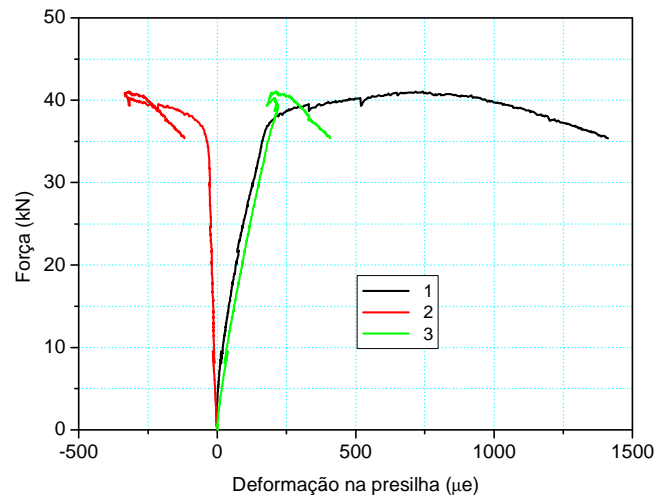
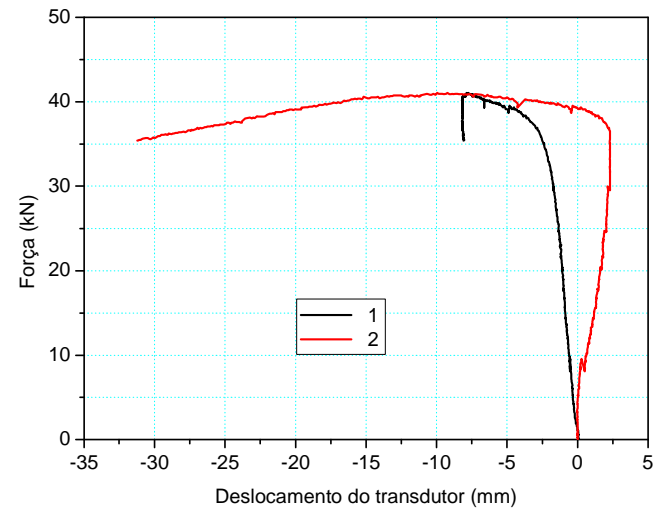
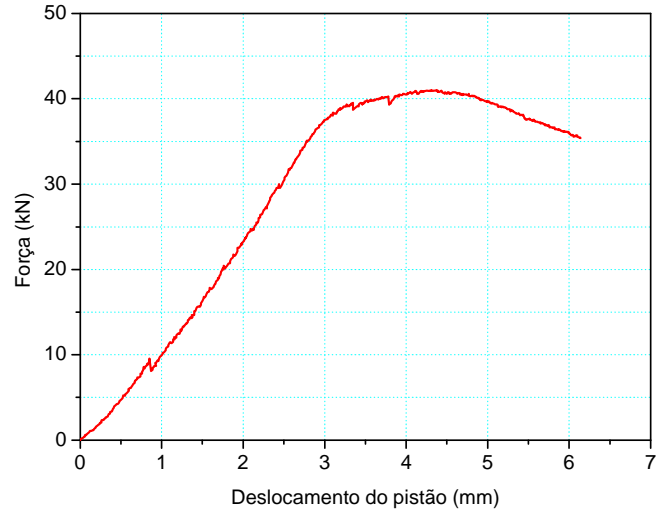
Transdutores
 Figura B.11 – Barra L1800-0



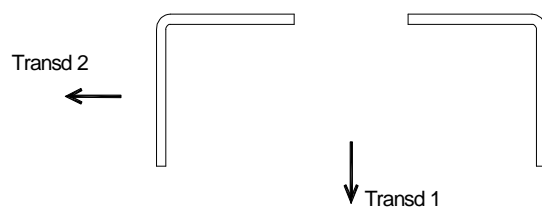
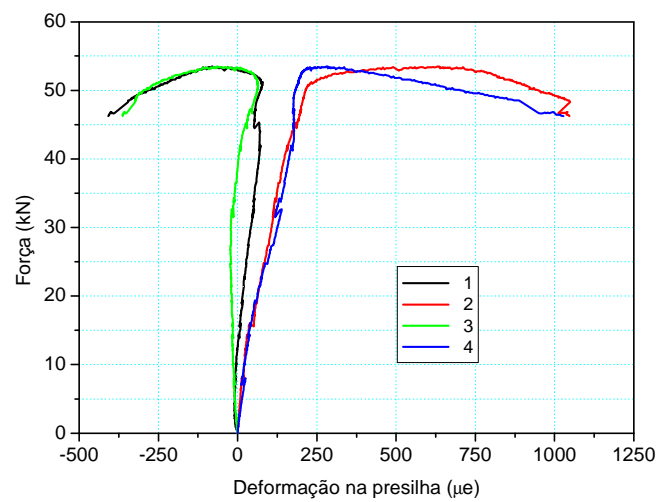
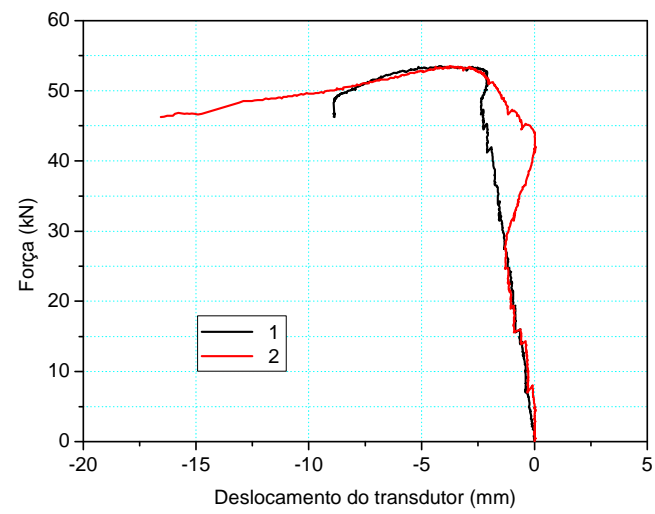
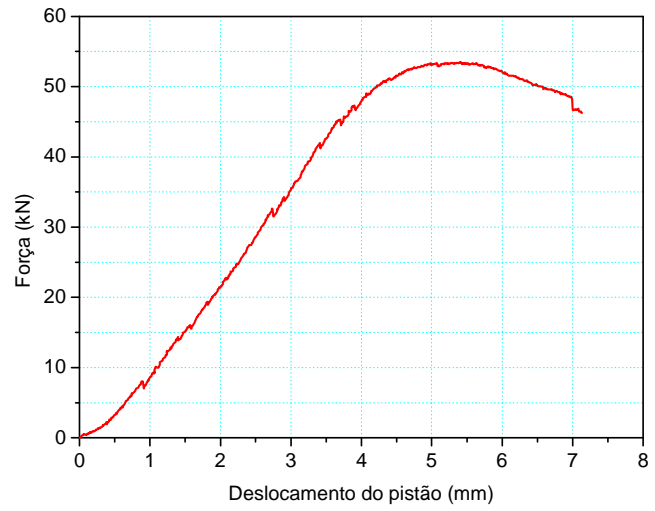
Transdutores
 Figura B.12 – Barra L1800-1P



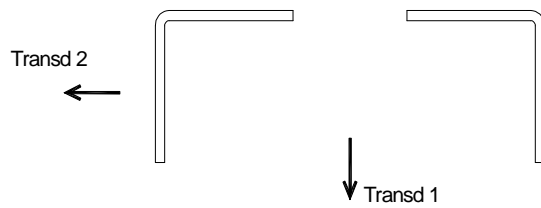
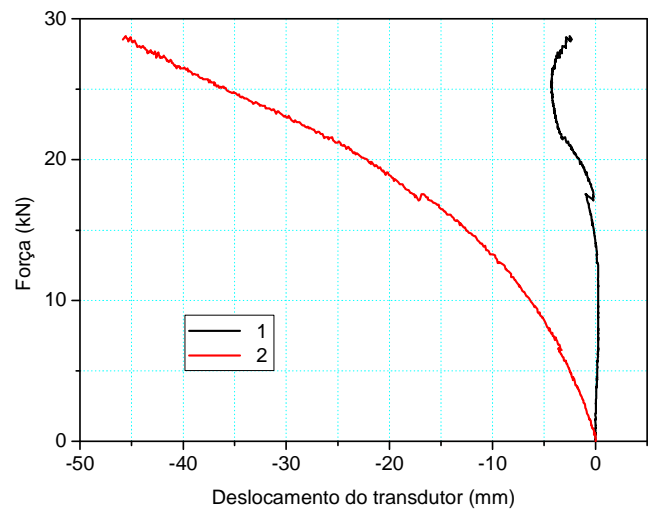
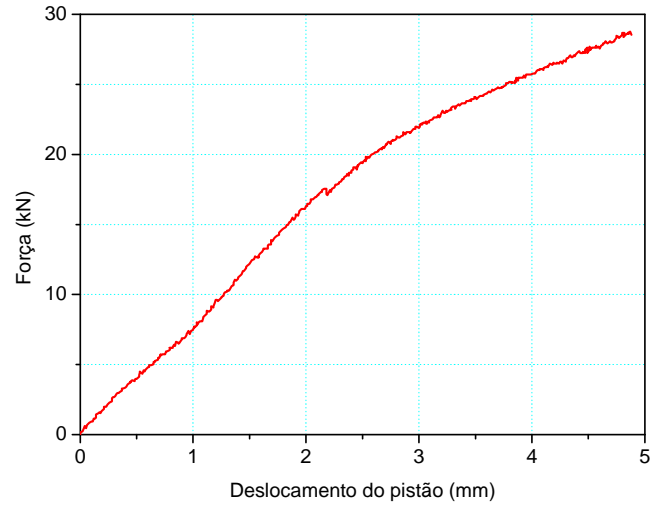
Transdutores
 Figura B.13 – Barra L1800-2P



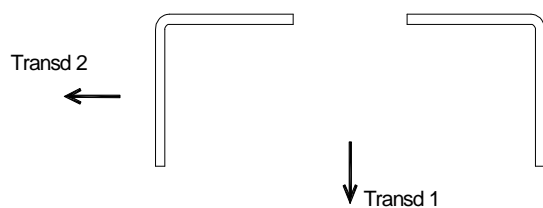
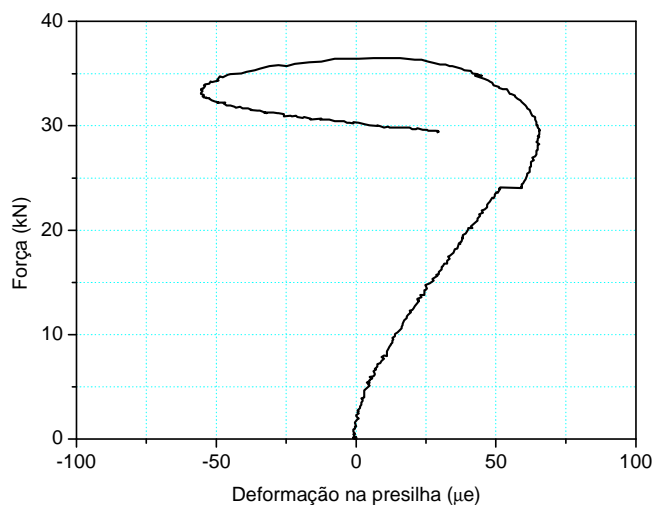
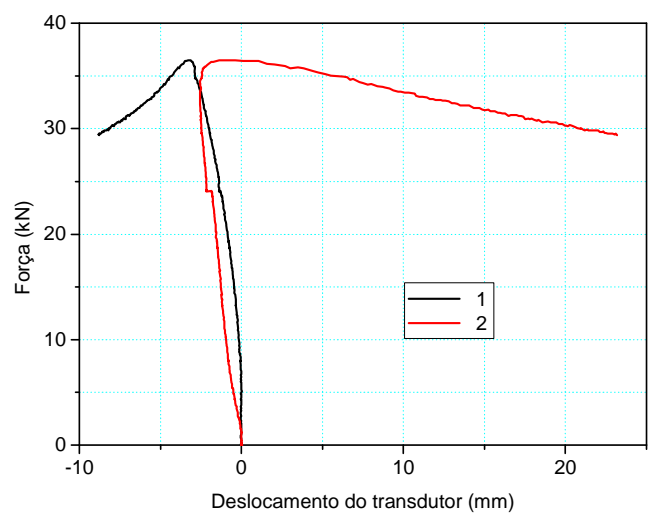
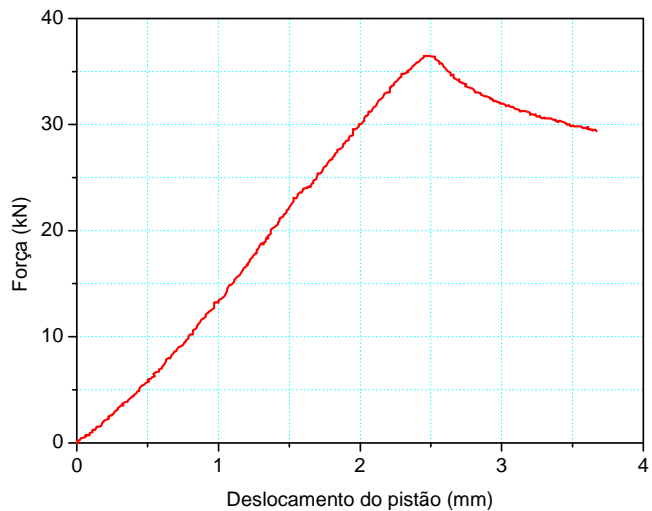
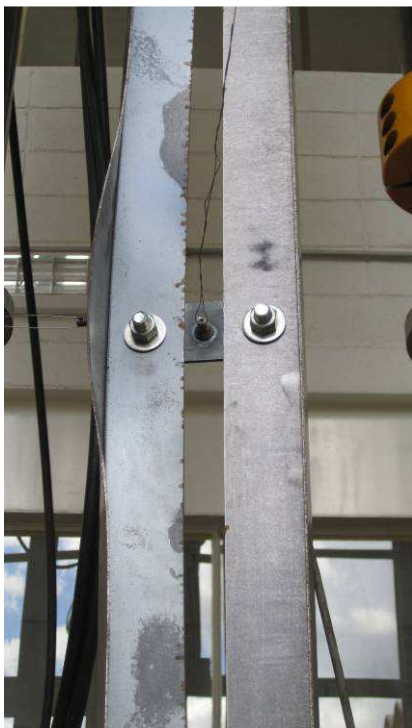
Transdutores
 Figura B.14 – Barra L1800-3P



Transdutores
 Figura B.15 – Barra L1800-4P

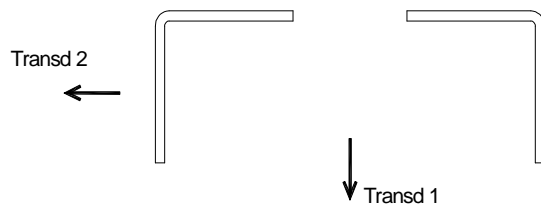
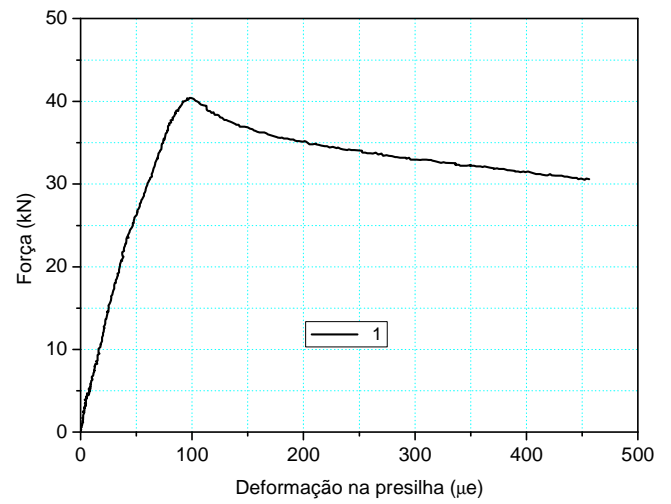
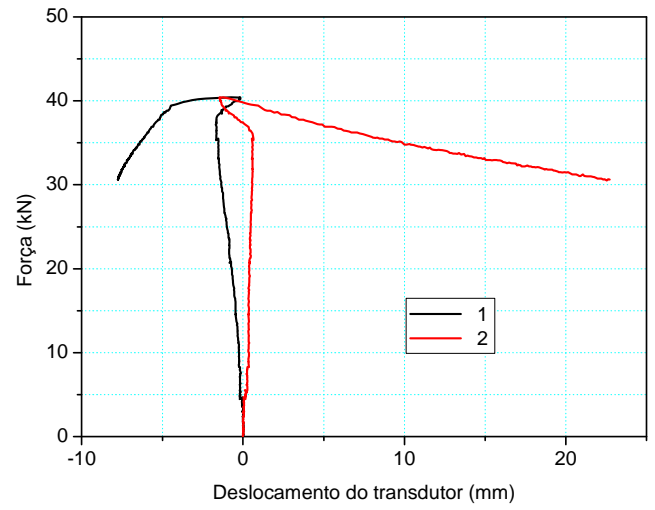
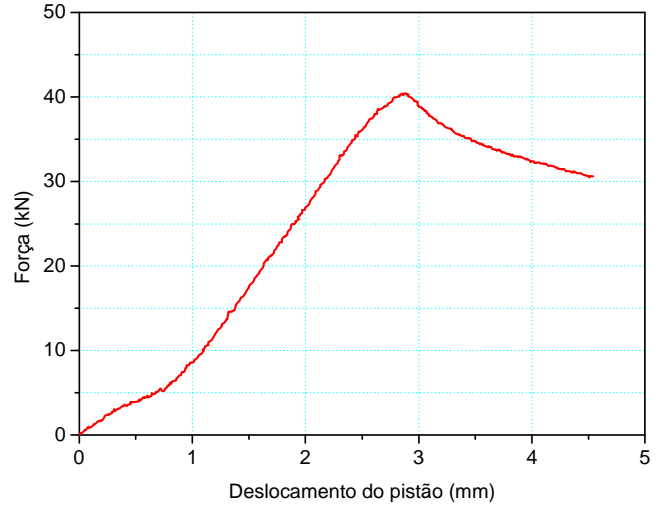


Transdutores
 Figura B.16 – Barra L2400-0



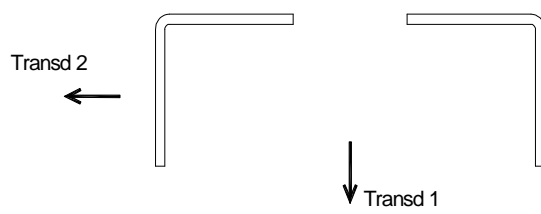
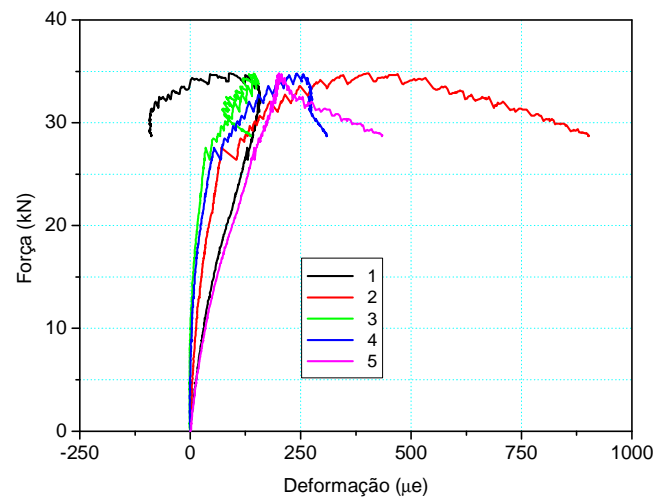
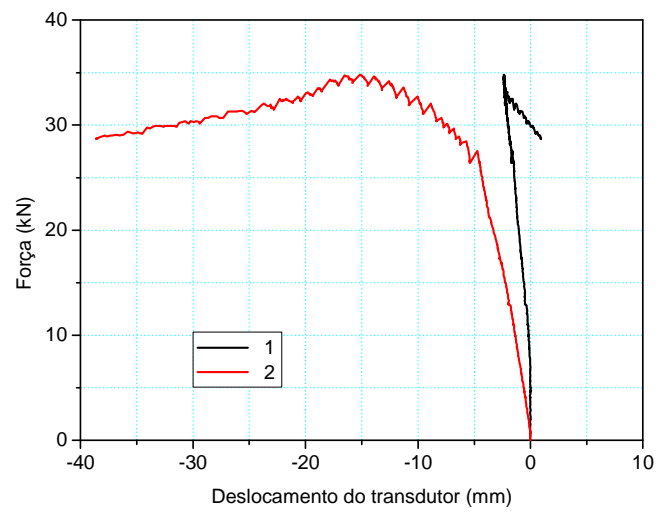
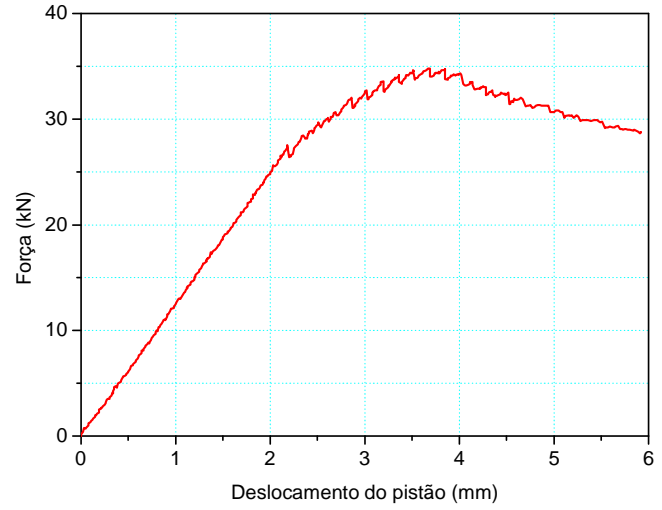
Transdutores

Figura B.17 – Barra L2400-1P

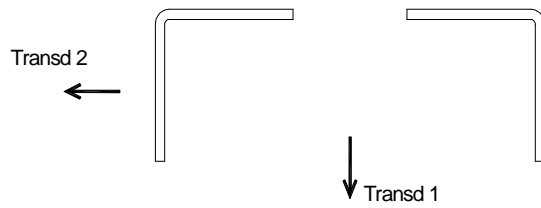
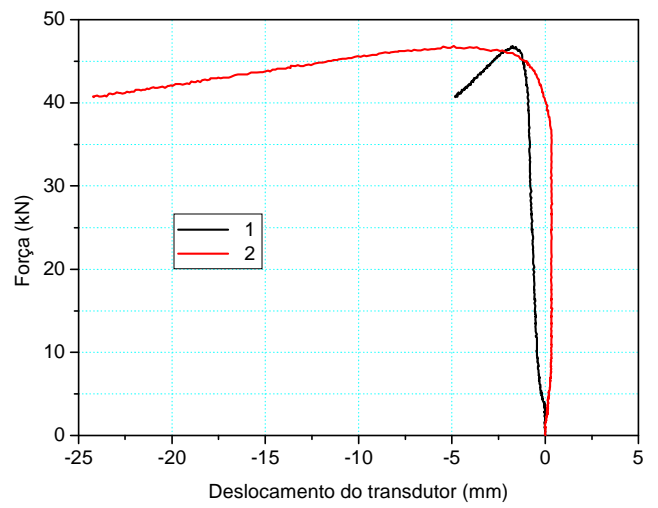
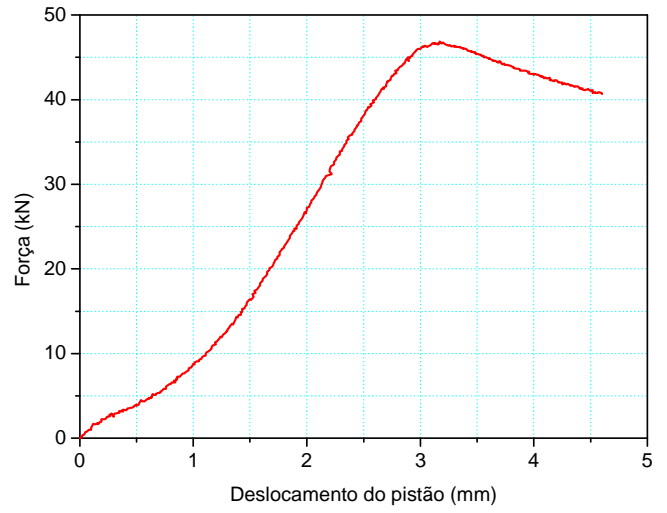


Transdutores

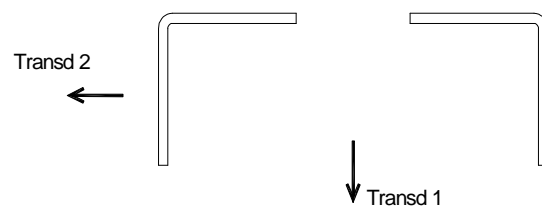
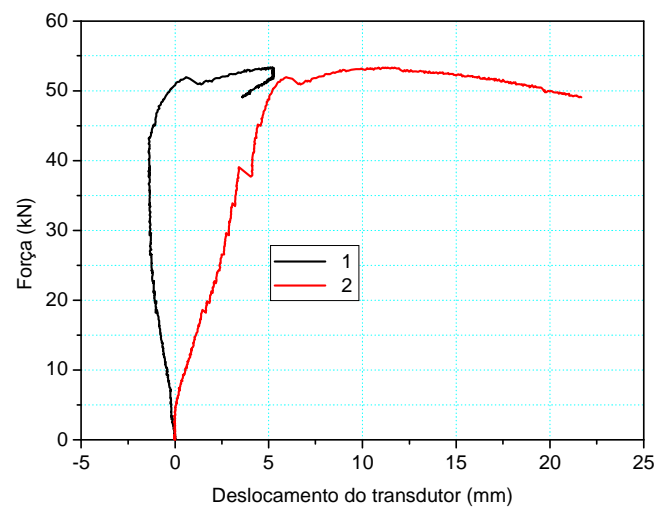
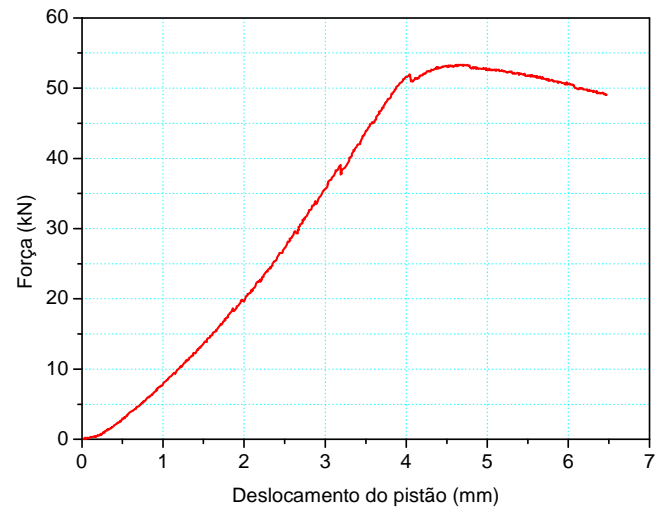
Figura B.18 – Barra L2400-2P



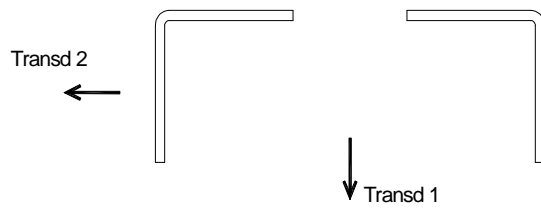
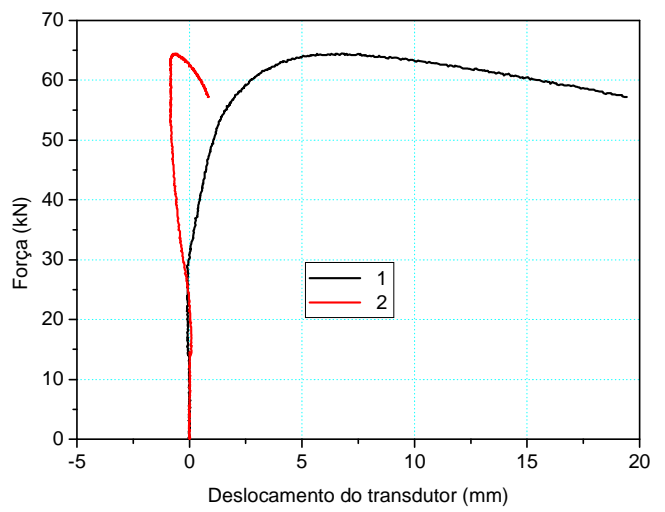
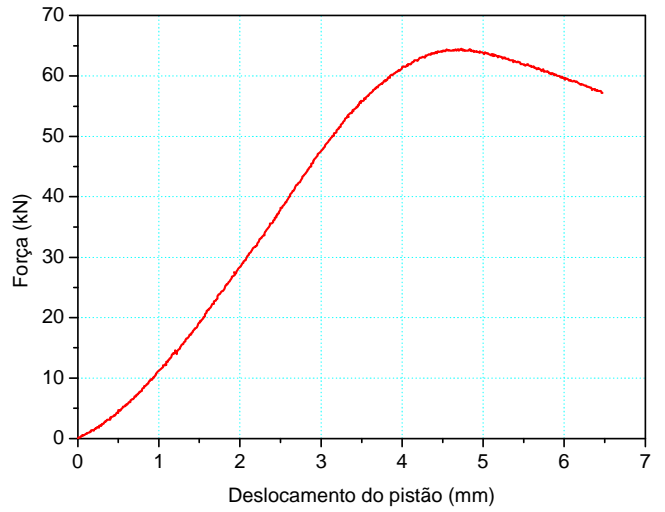
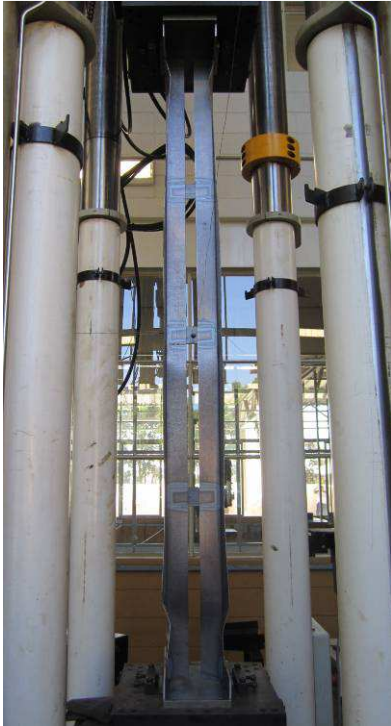
Transdutores
 Figura B.19 – Barra L2400-5P



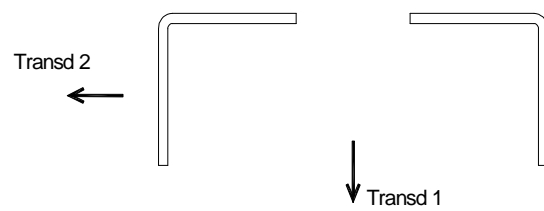
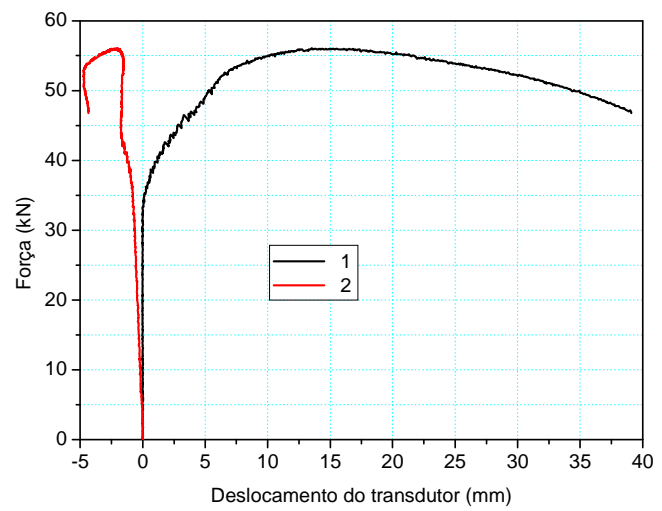
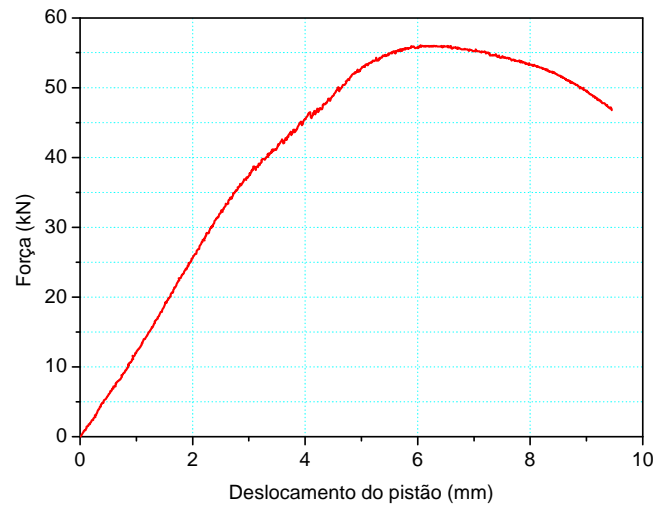
Transdutores
 Figura B.20 – Barra L1800-1S



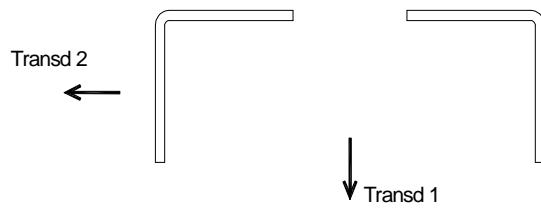
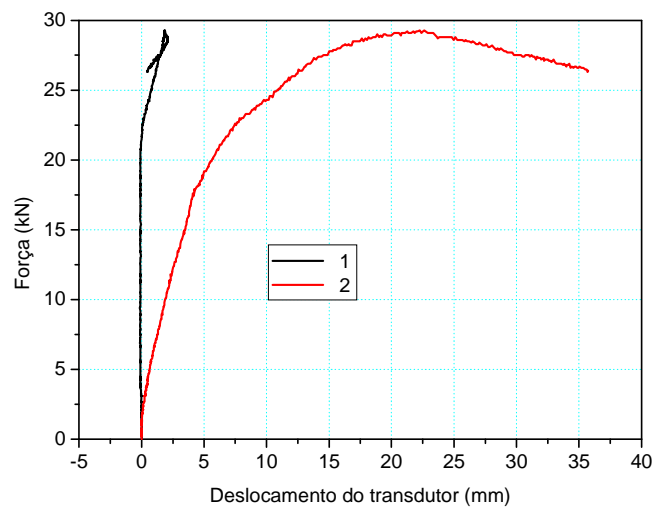
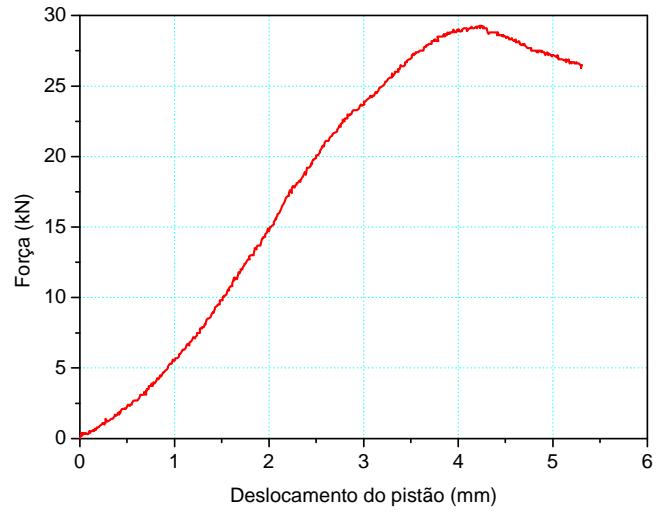
Transdutores
Figura B.21 – Barra L1800-2S



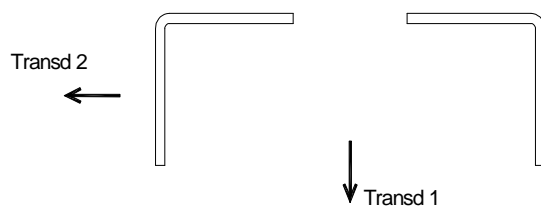
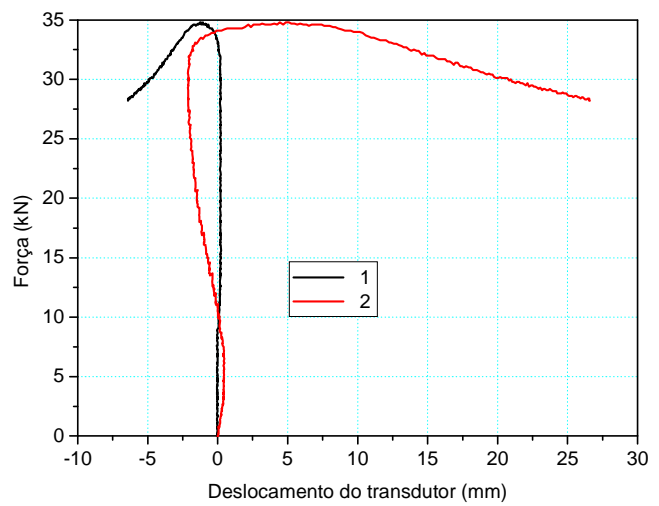
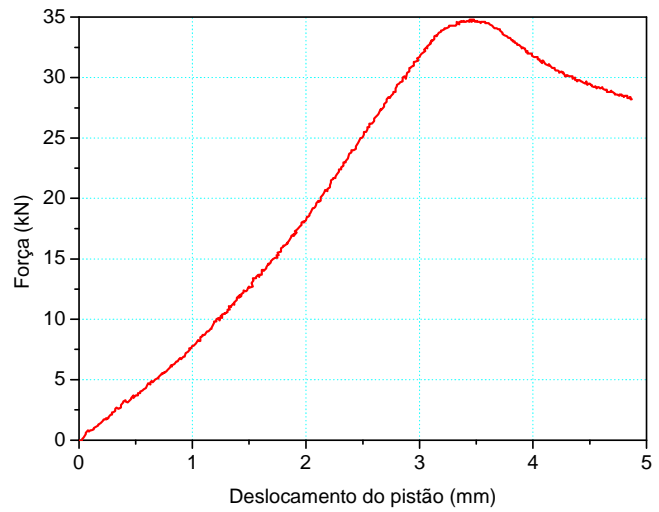
Transdutores
 Figura B.22 – Barra L1800-3S



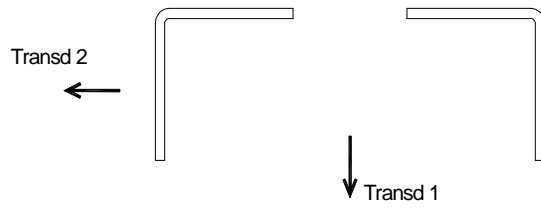
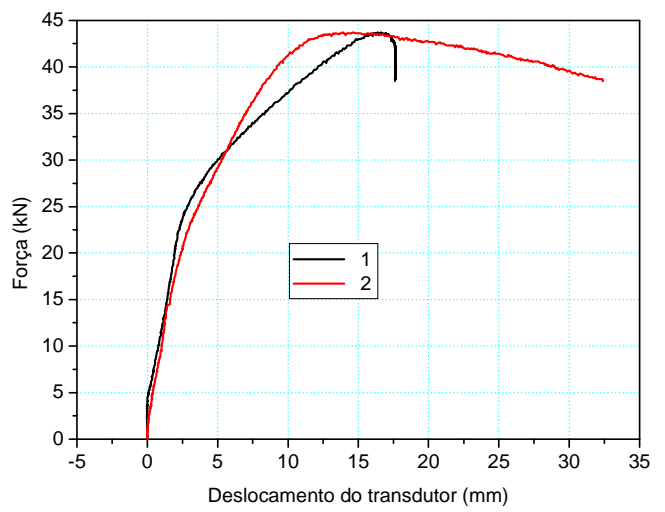
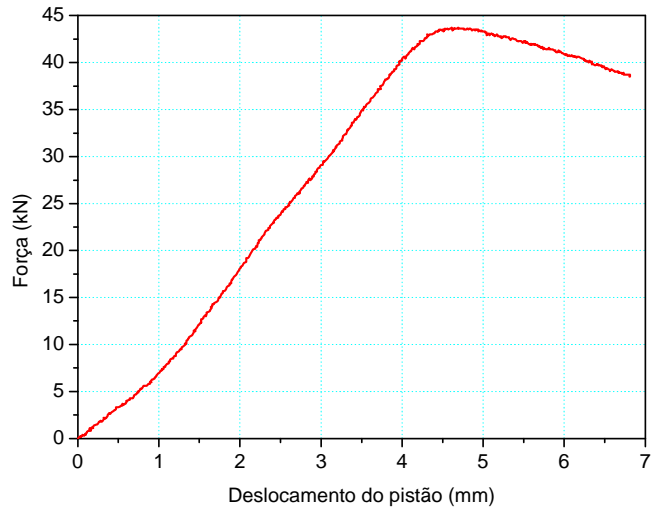
Transdutores
 Figura B.23 – Barra L1800-4S



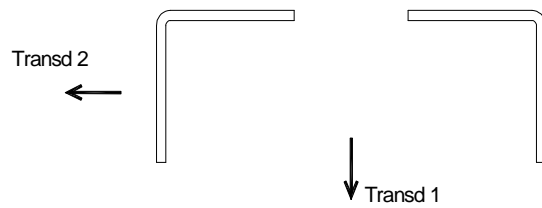
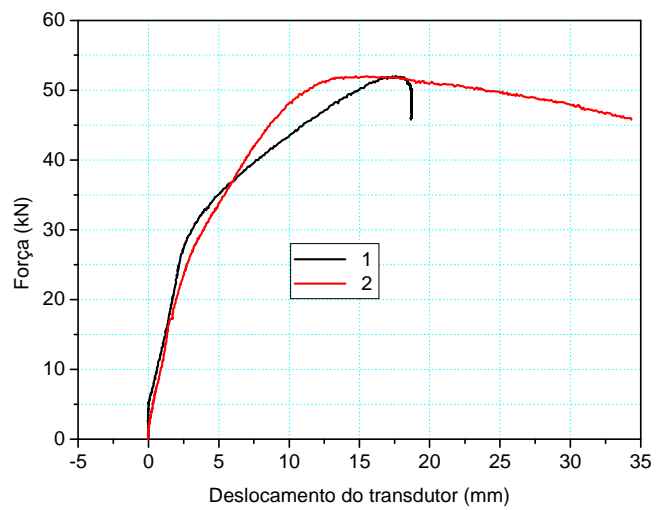
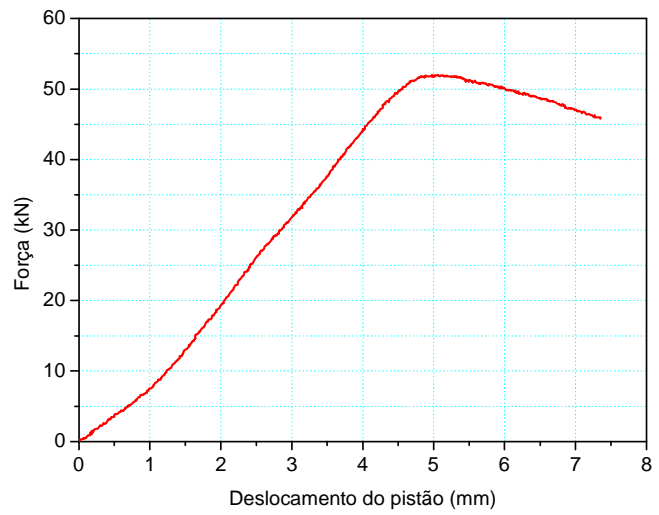
Transdutores
 Figura B.24 – Barra L2400-1S



Transdutores
 Figura B.25 – Barra L2400-1SR

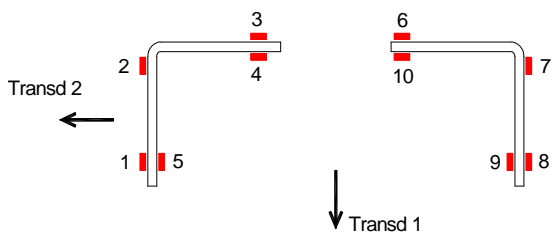
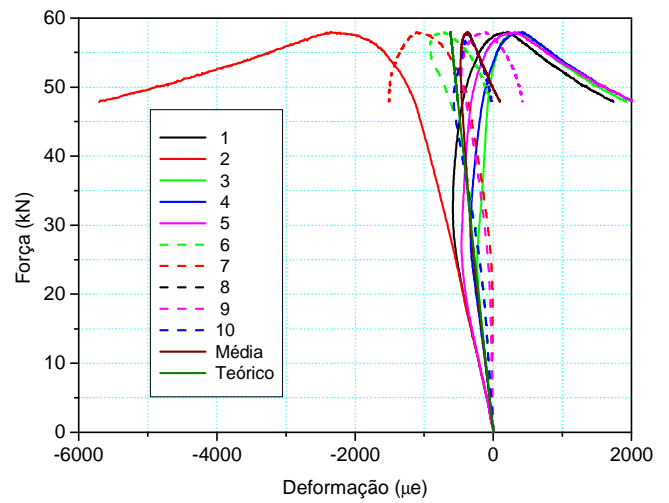
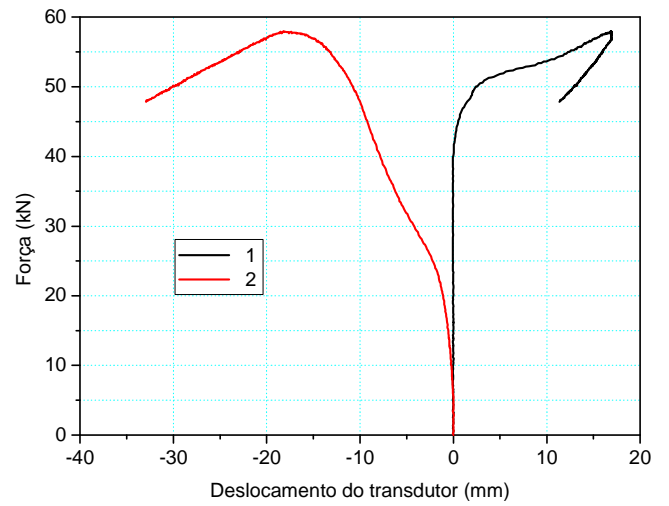
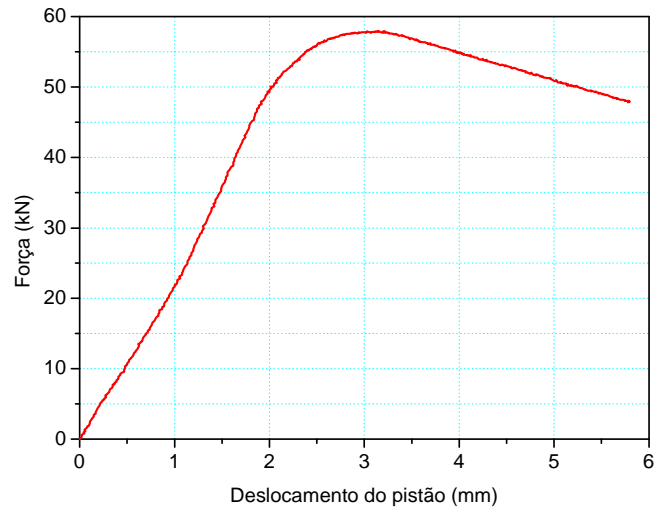


Transdutores
 Figura B.26 – Barra L2400-2S



Transdutores
 Figura B.27 – Barra L2400-5S

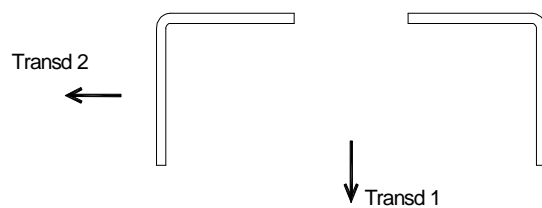
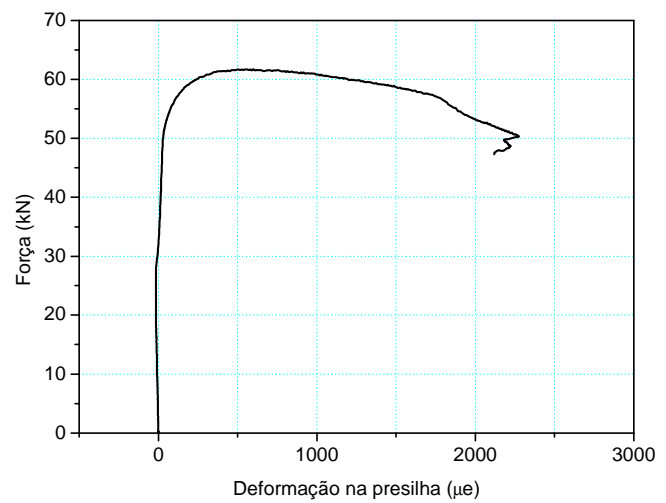
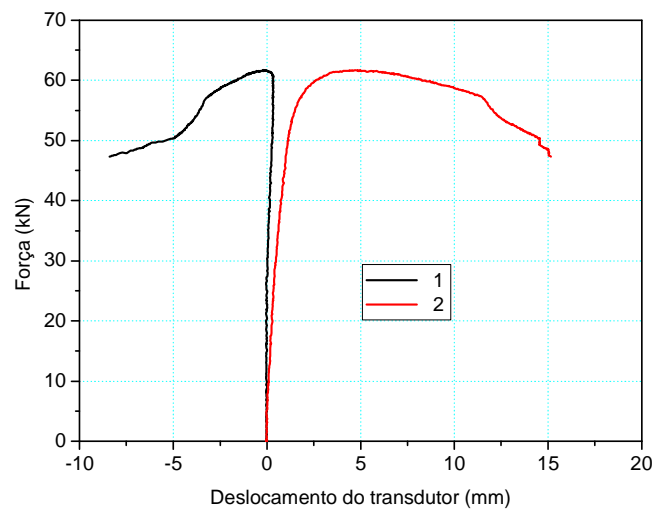
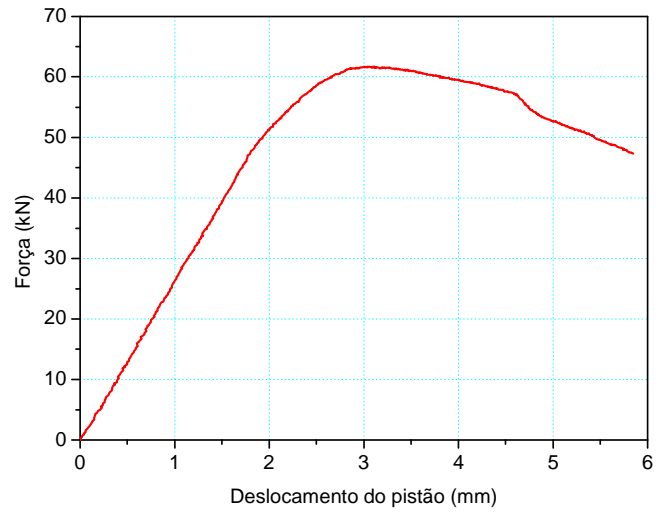
Perfil 2L 60x2,00
Extremidades fixas (compressão centrada)



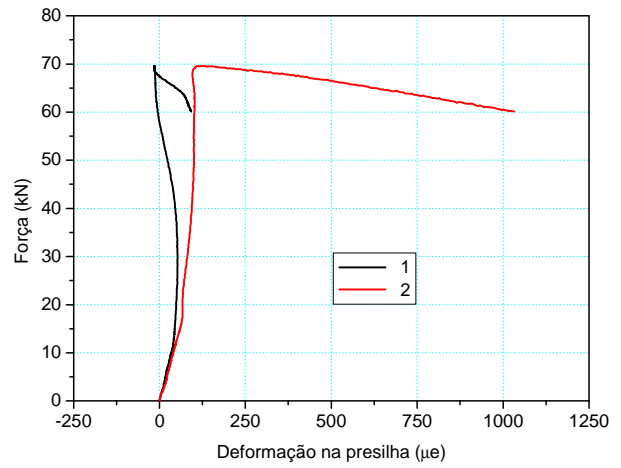
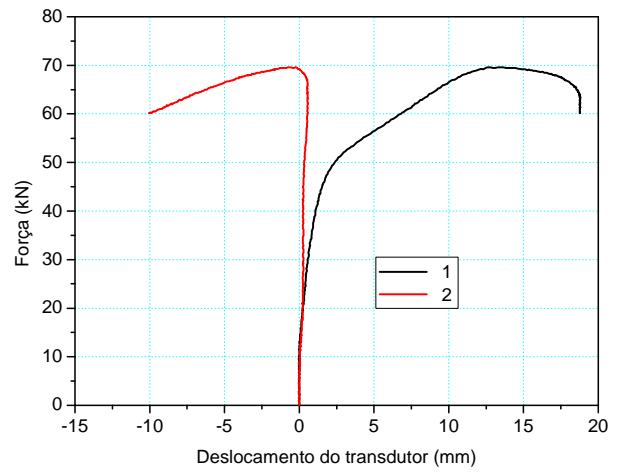
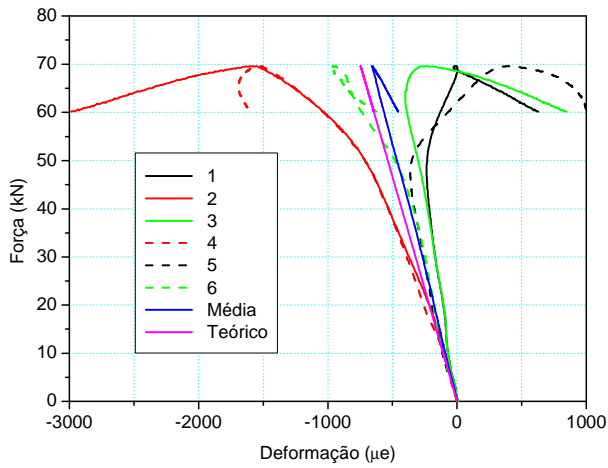
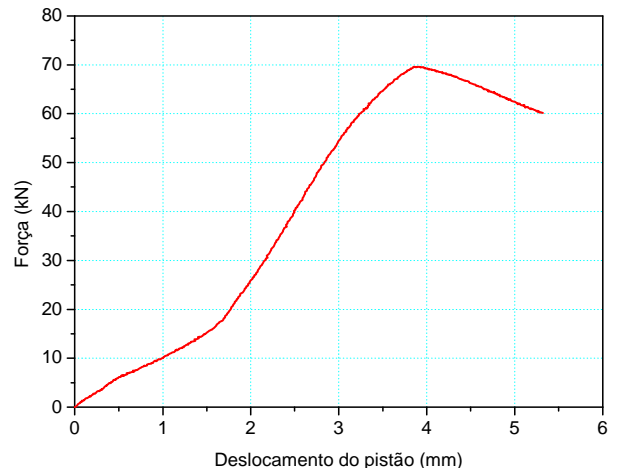
Extensômetros e transdutores

$$\text{Teórico: } \epsilon = \frac{N}{E.A}$$

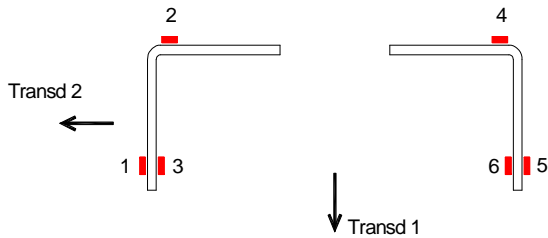
Figura B.28 – Barra LC1200-0



Transdutores
 Figura B.29 – Barra LC1200-1P

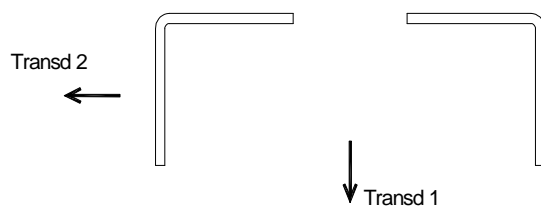
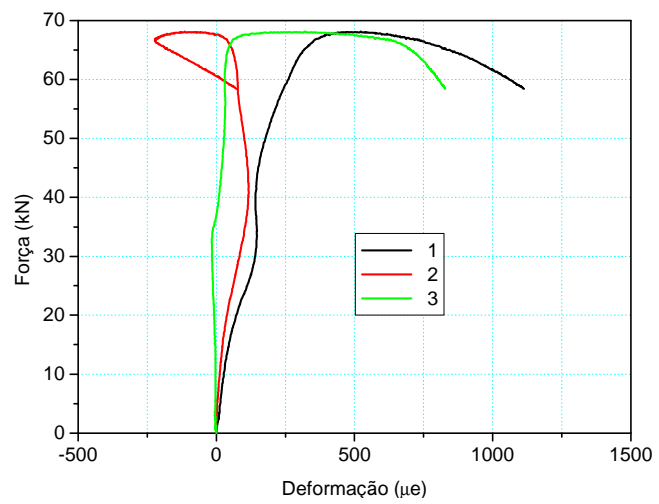
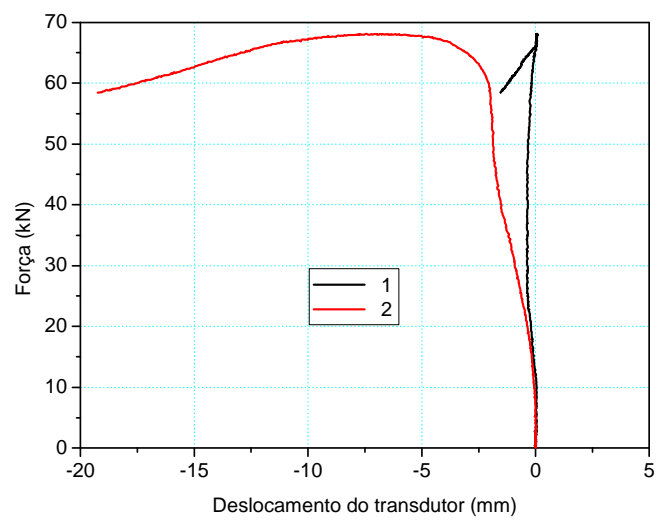
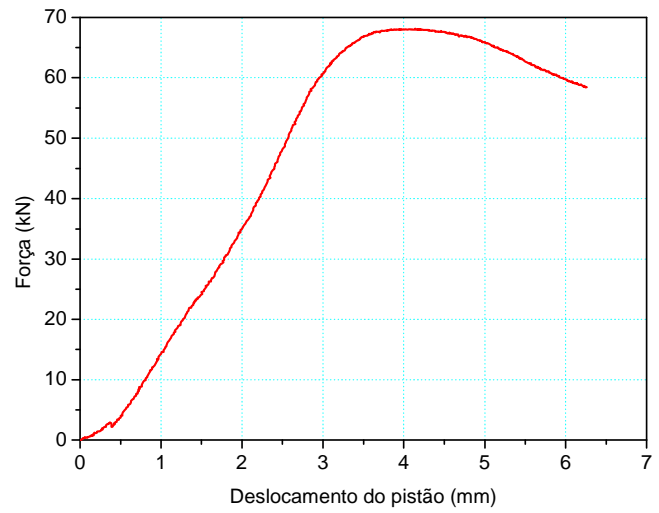
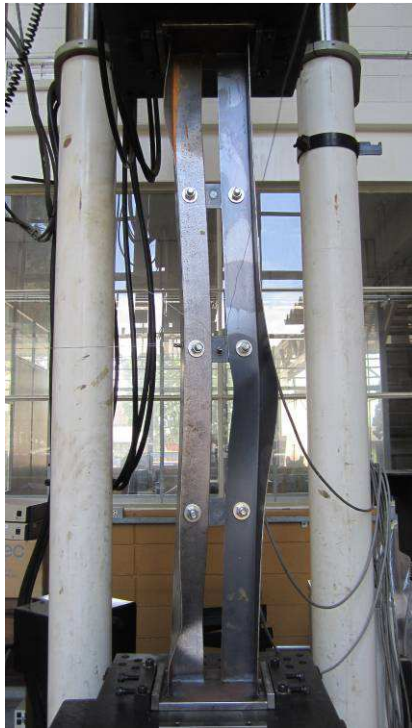


$$\text{Teórico: } \epsilon = \frac{N}{E.A}$$

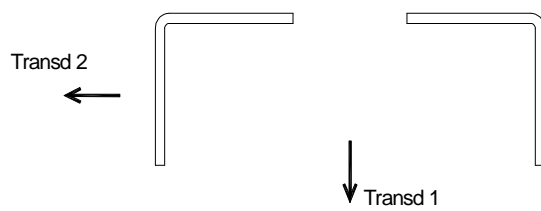
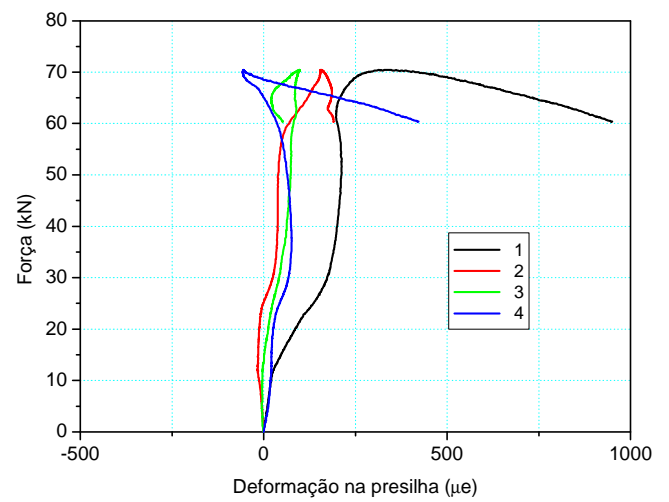
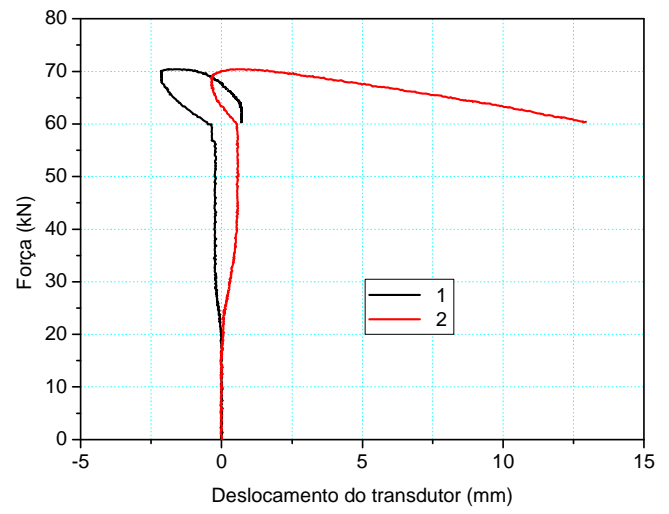
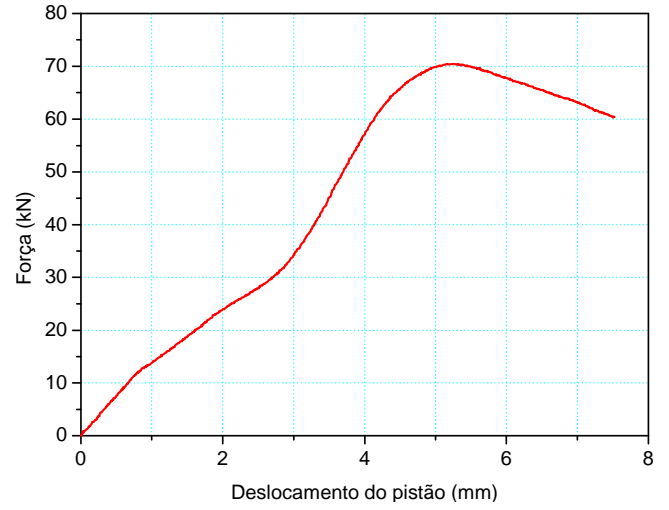
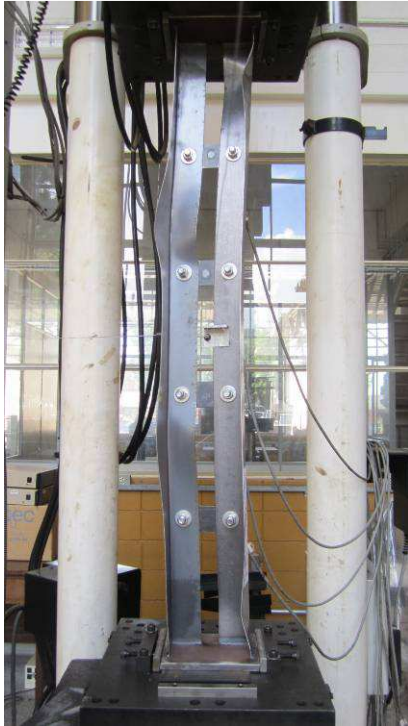


Extensômetros e transdutores

Figura B.30 – Barra LC1200-2P



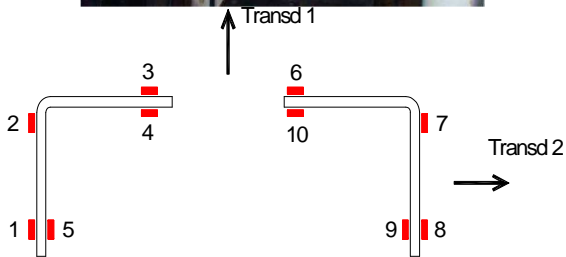
Transdutores
 Figura B.31 – Barra LC1200-3P



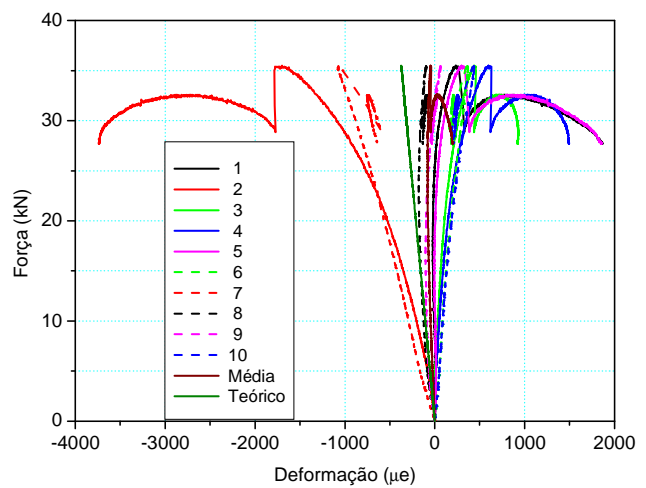
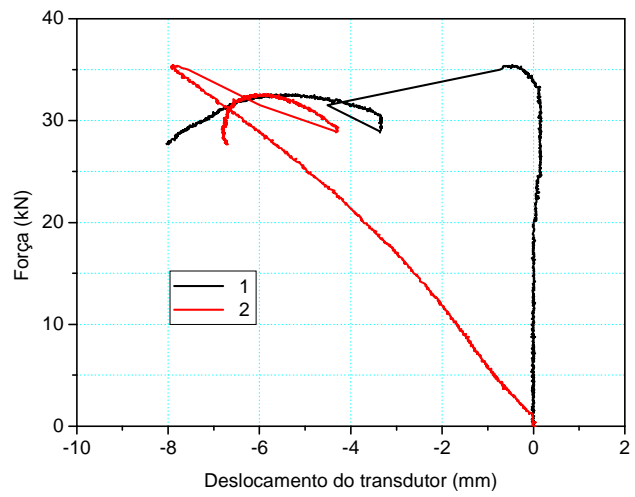
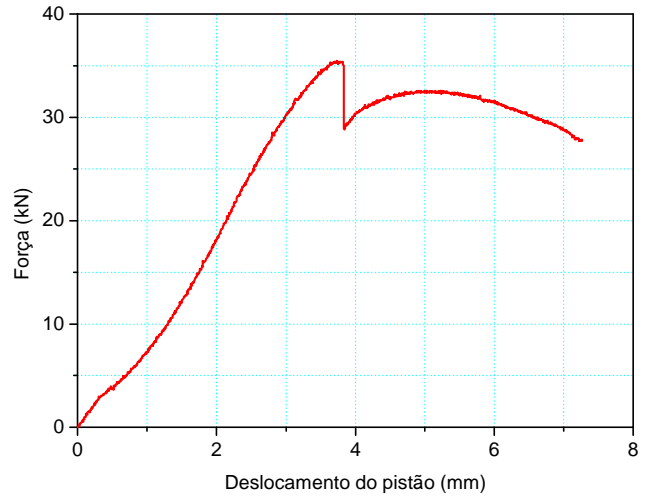
Transdutores

Figura B.32 – Barra LC1200-4P

Perfil 2L 60x2,00
Flexão livre em relação ao eixo de menor inércia do conjunto (compressão excêntrica)

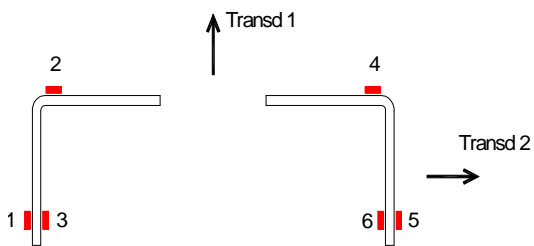
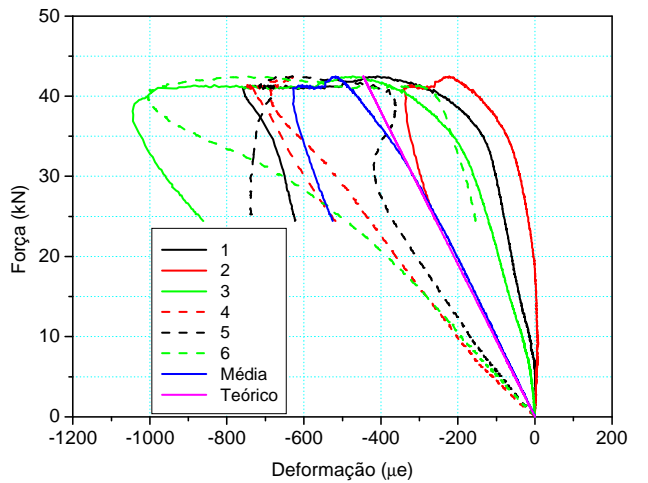
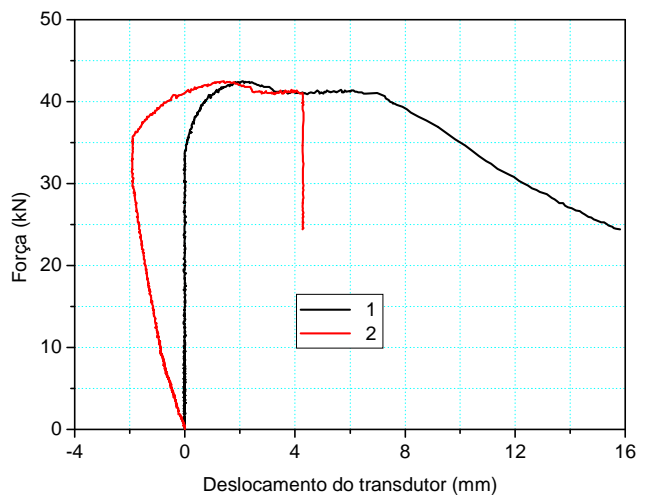
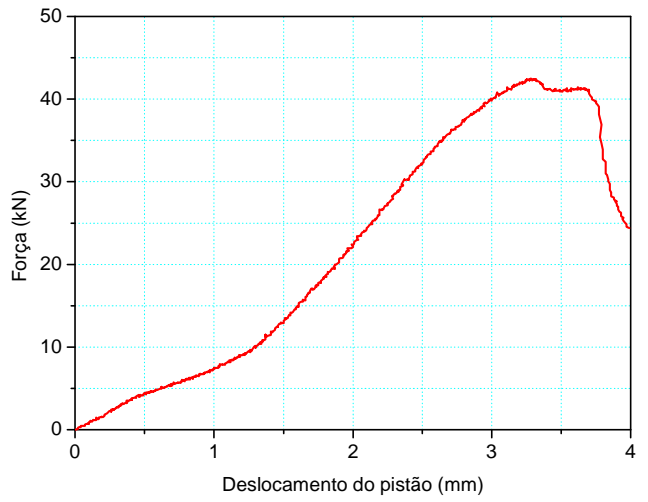


Extensômetros e transdutores



$$\text{Teórico: } \varepsilon = \frac{N}{E.A}$$

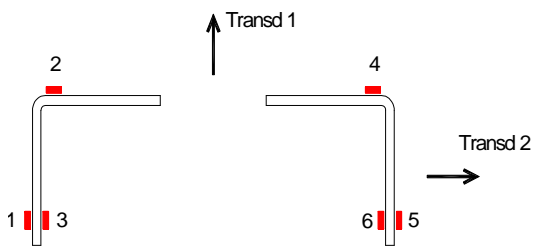
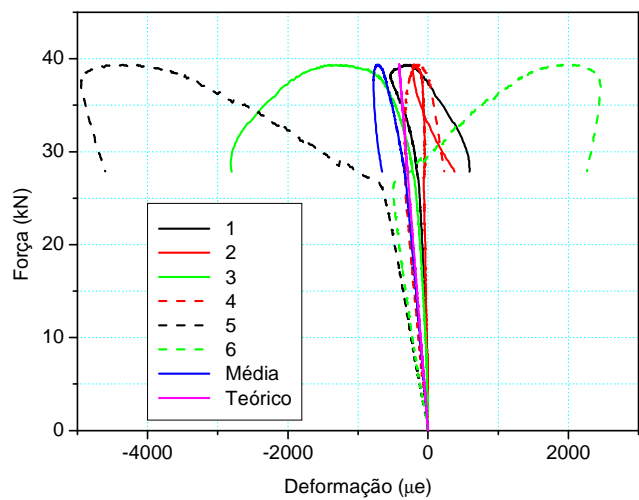
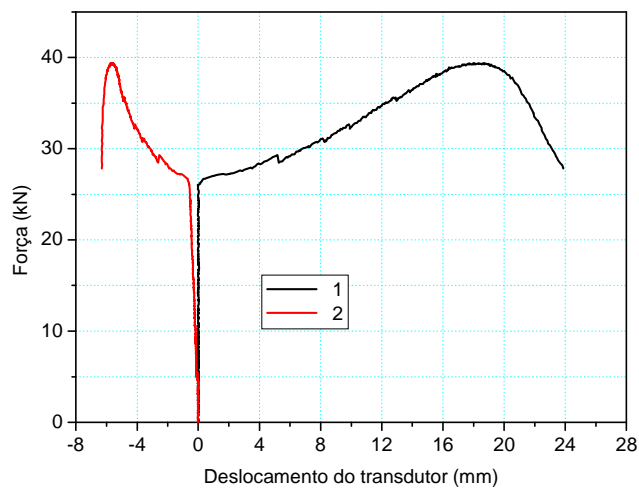
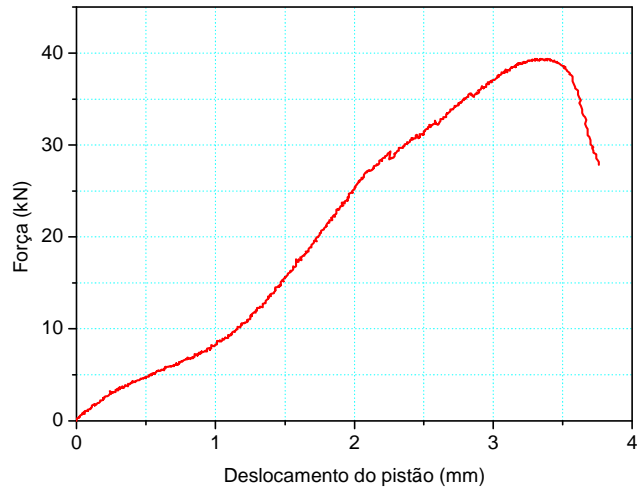
Figura B.33 – Barra L1200-0



$$\text{Teórico: } \epsilon = \frac{N}{E \cdot A}$$

Extensômetros e transdutores

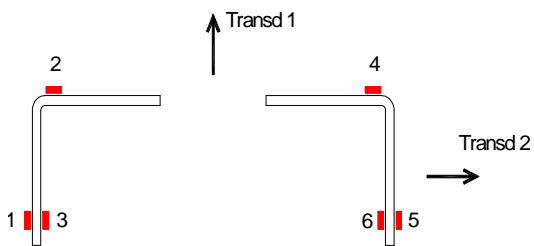
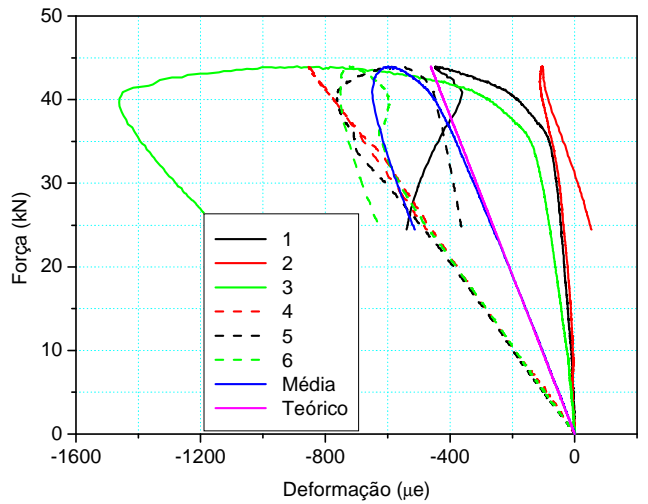
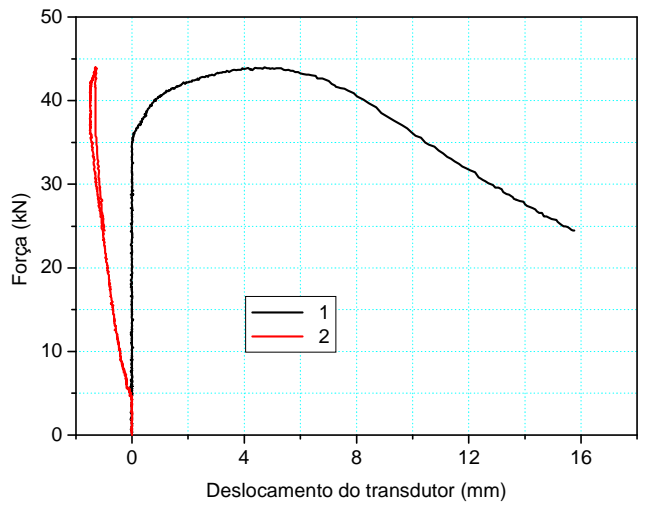
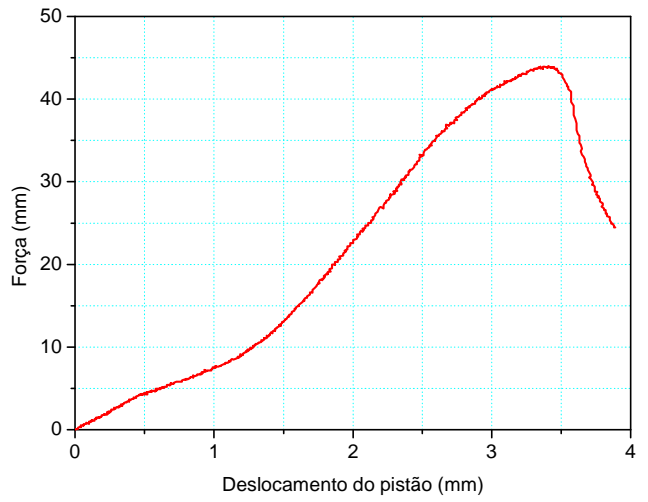
Figura B.34 – Barra L1200-1P



$$\text{Teórico: } \epsilon = \frac{N}{E.A}$$

Extensômetros e transdutores

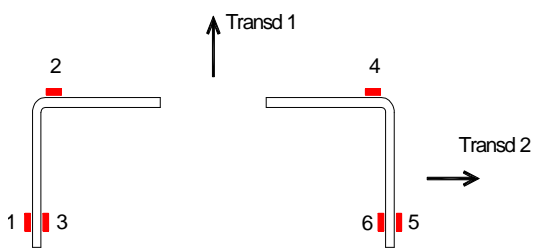
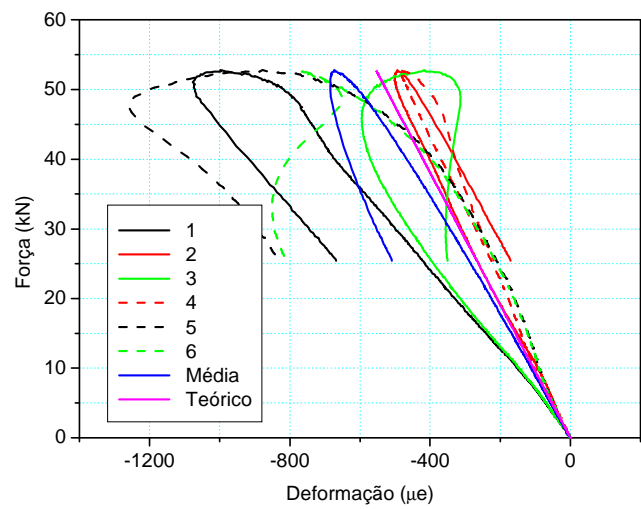
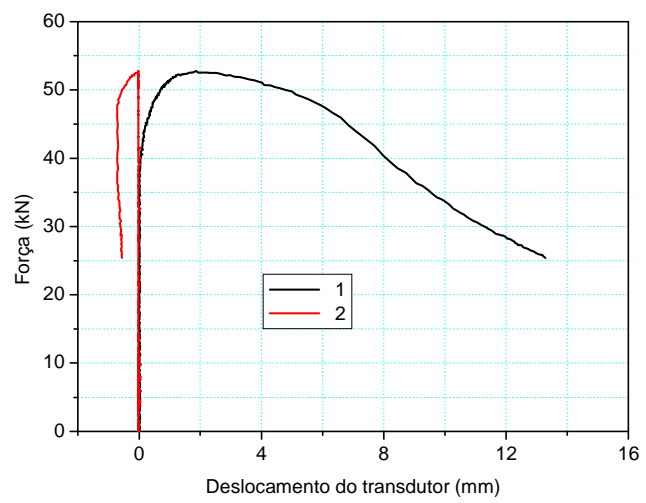
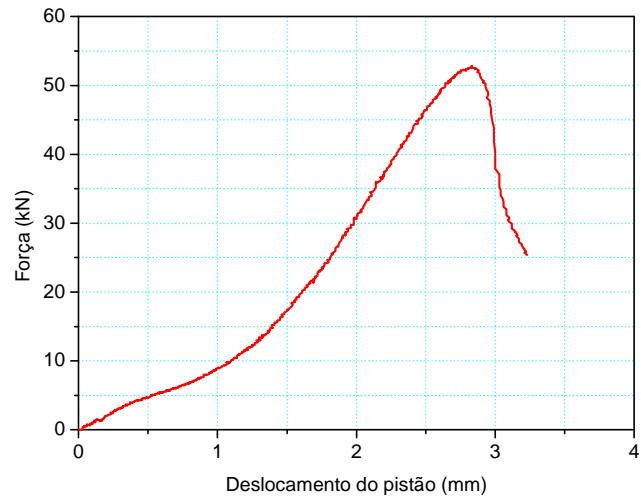
Figura B.35 – Barra L1200-2P



$$\text{Teórico: } \epsilon = \frac{N}{E \cdot A}$$

Extensômetros e transdutores

Figura B.36 – Barra L1200-3P

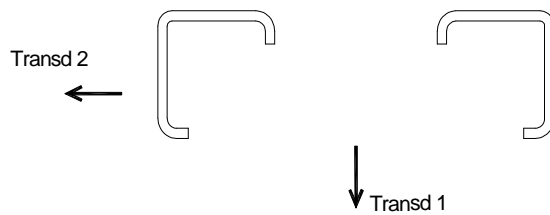
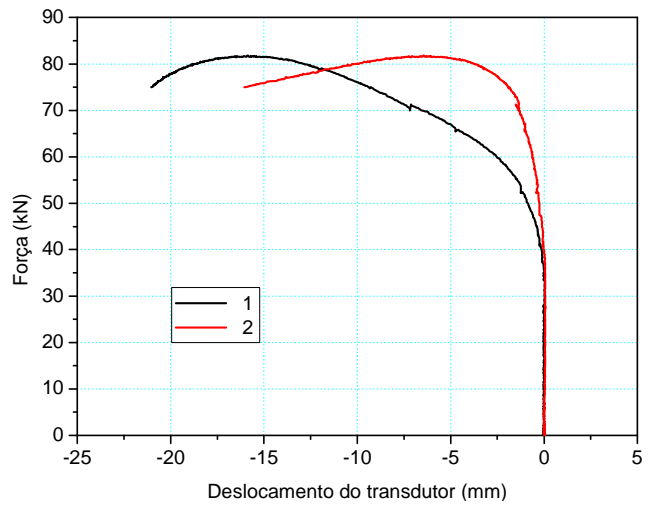
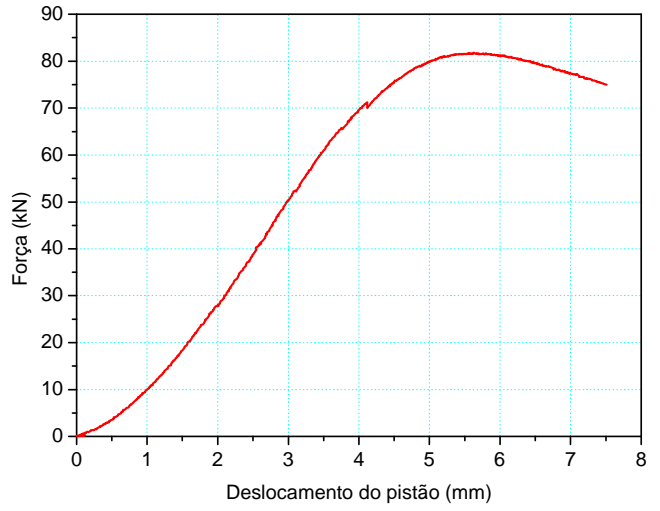


$$\text{Teórico: } \epsilon = \frac{N}{E \cdot A}$$

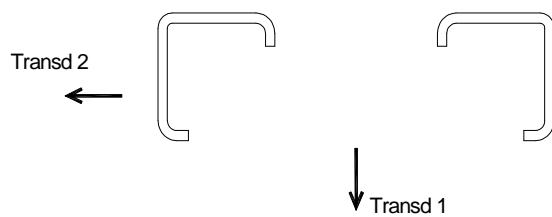
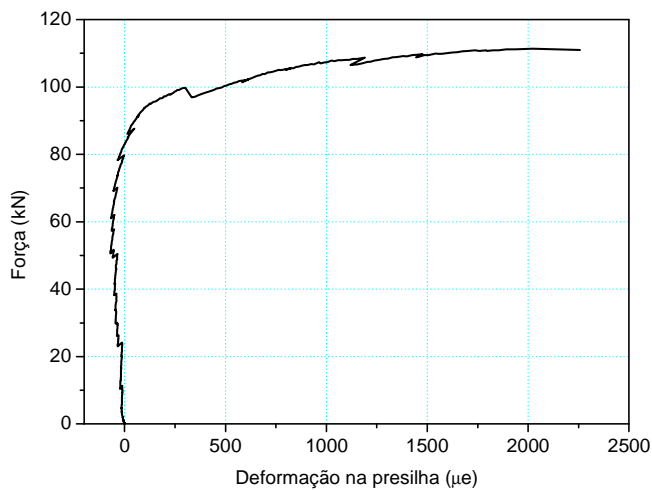
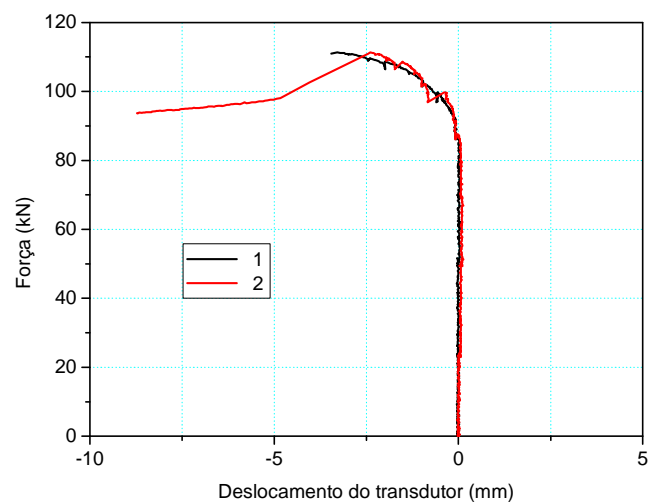
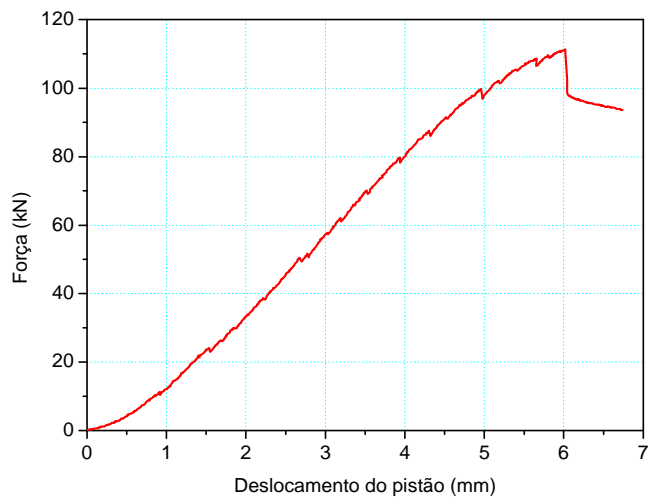
Extensômetros e transdutores

Figura B.37 – Barra L1200-4P

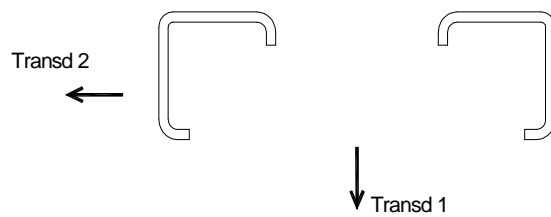
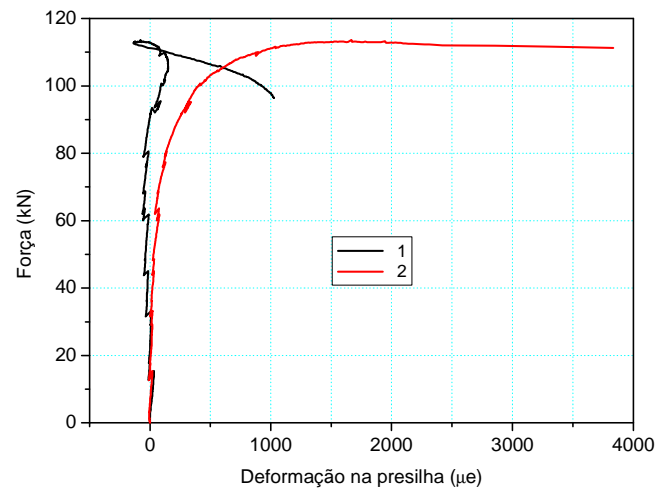
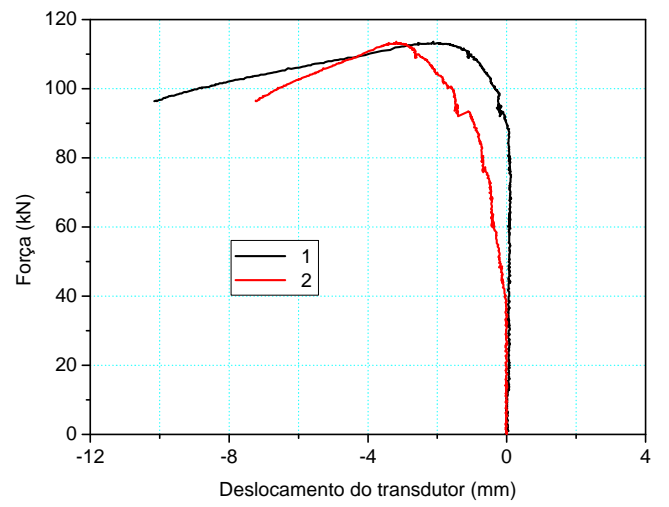
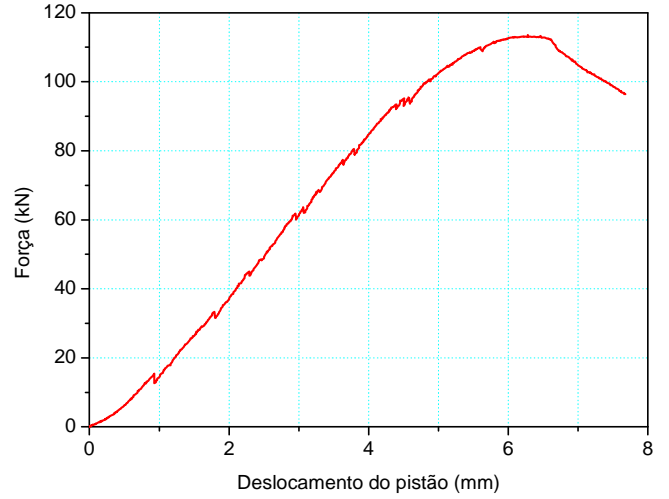
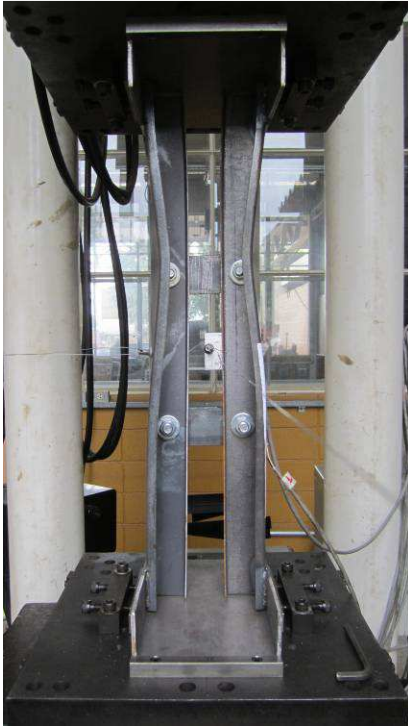
Perfil 2Le 50x13x2,00
Extremidades fixas (compressão excêntrica)



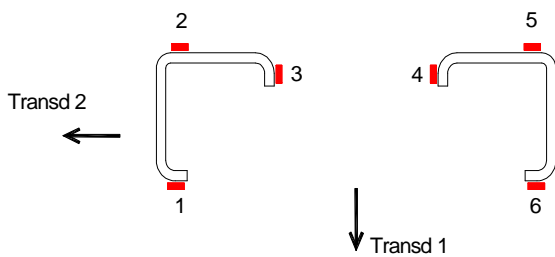
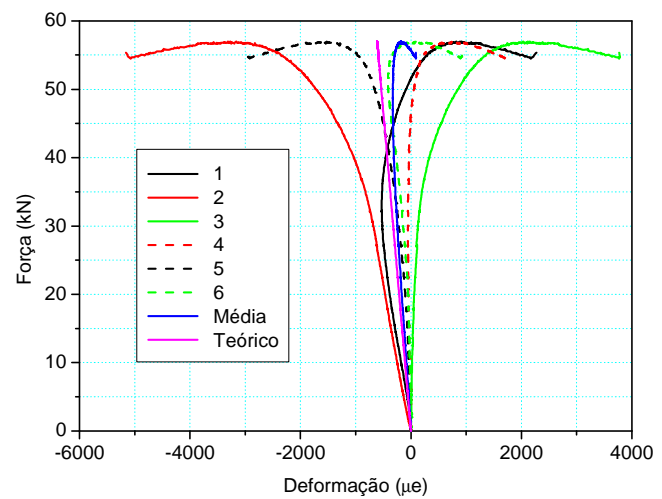
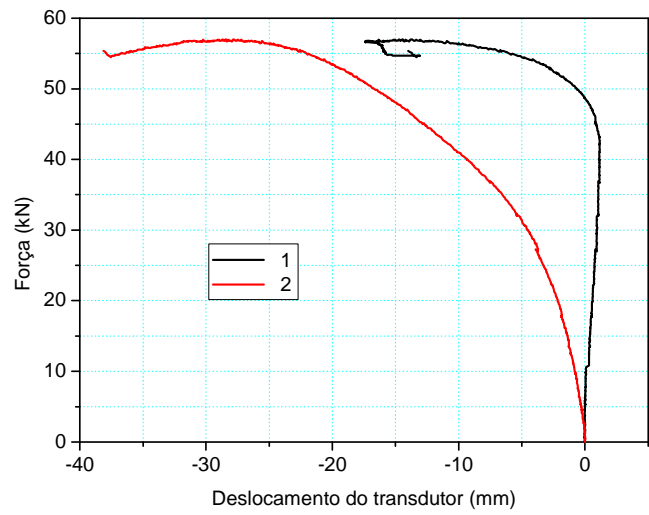
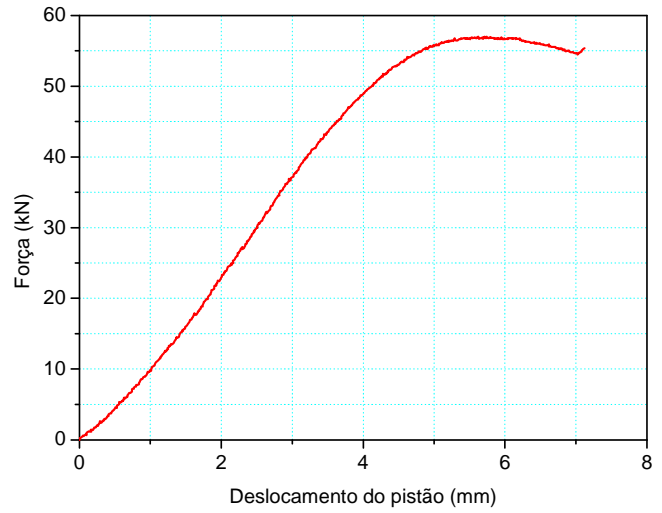
Transdutores
 Figura B.38 – Barra Le600-0



Transdutores
 Figura B.39 – Barra Le600-1P



Transdutores
 Figura B.40 – Barra Le600-2P



Extensômetros e transdutores

$$\text{Teórico: } \varepsilon = \frac{N}{E.A}$$

Figura B.41 – Barra Le1200-0

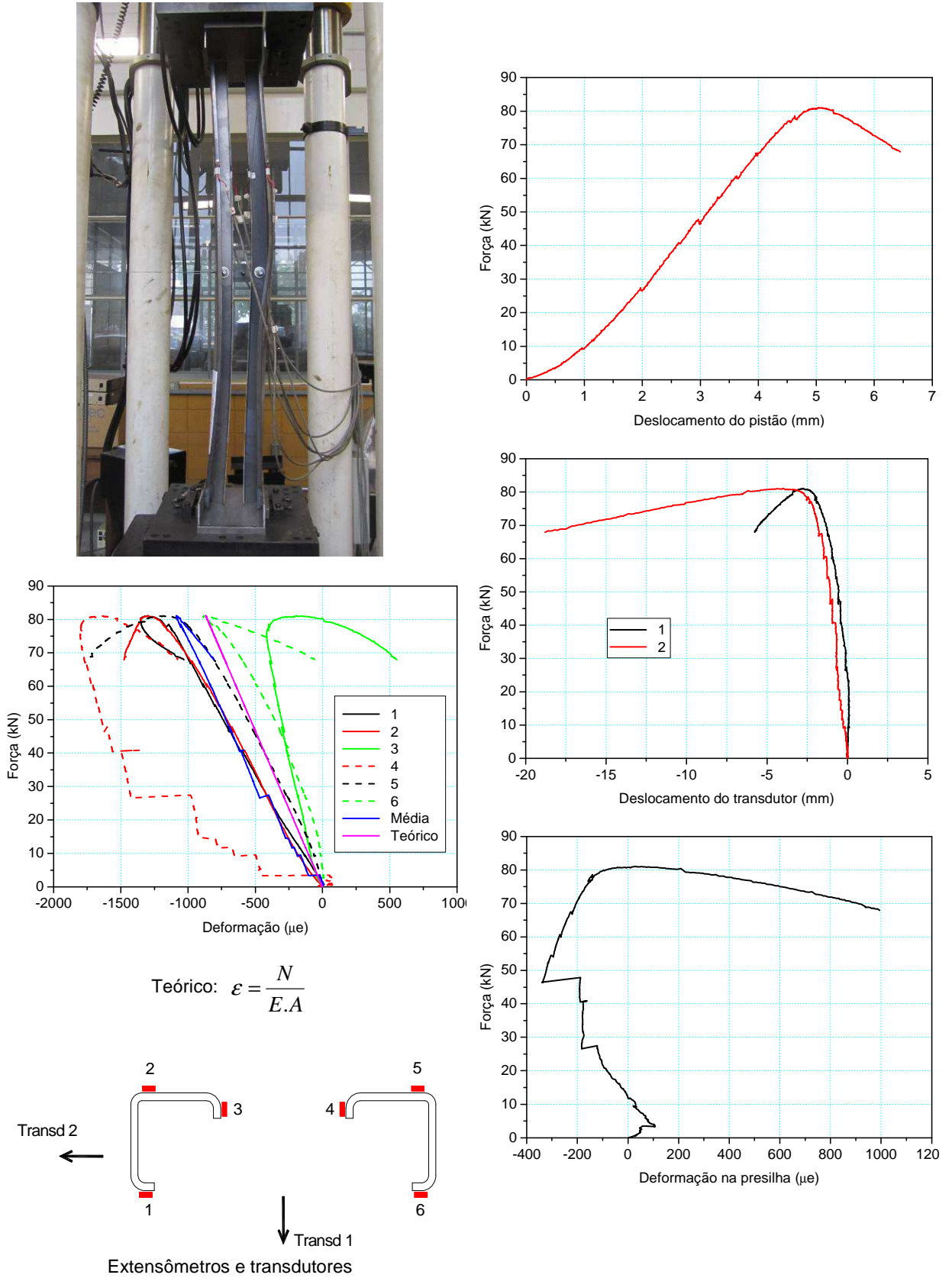
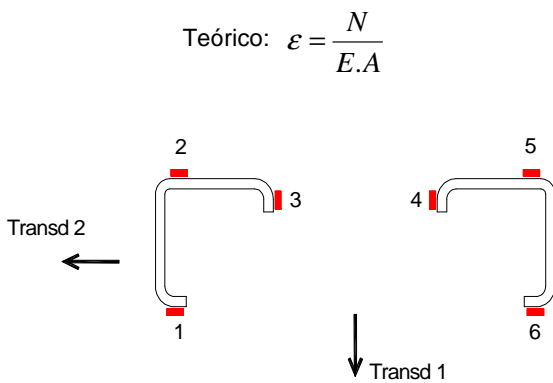
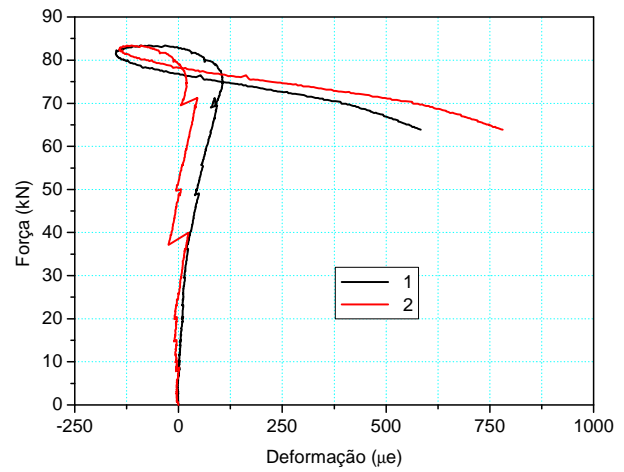
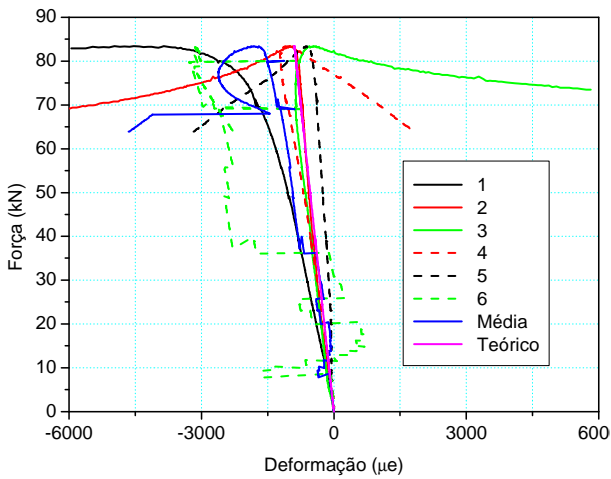
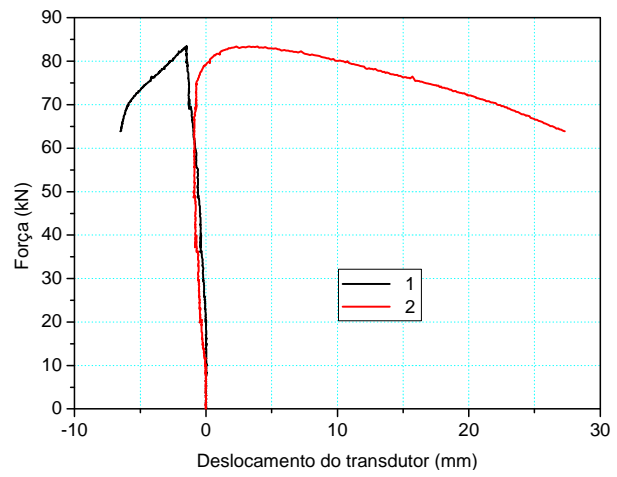
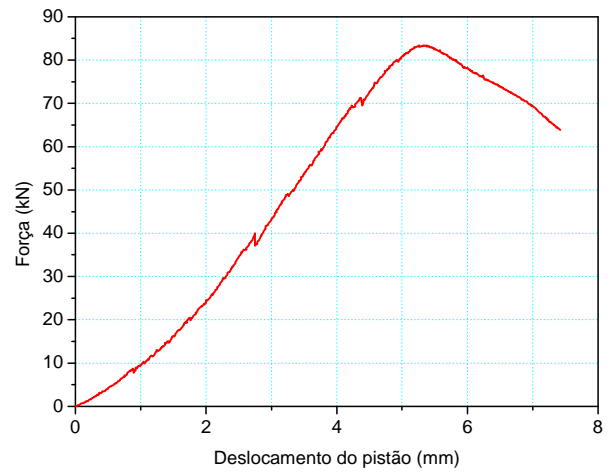
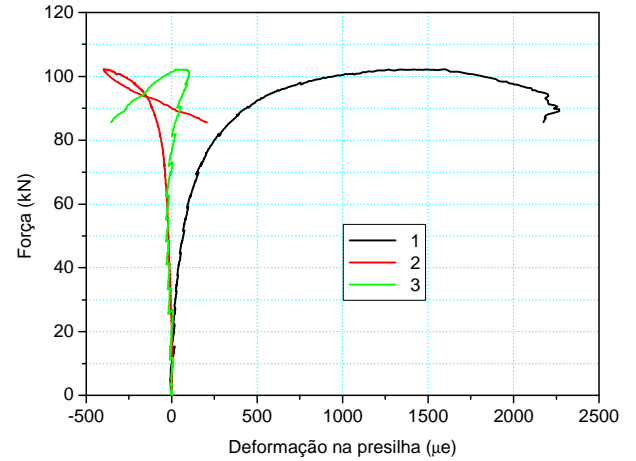
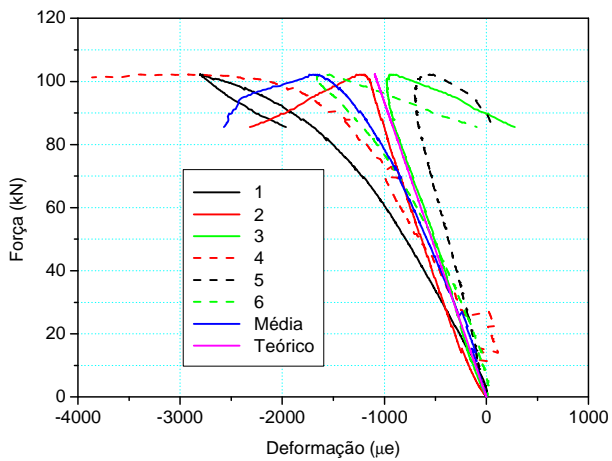
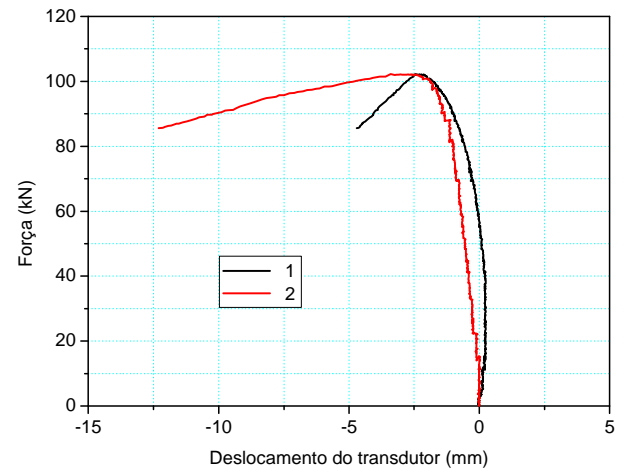
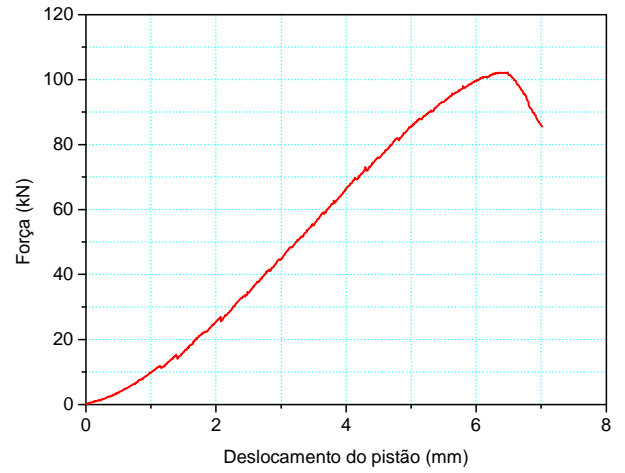


Figura B.42 – Barra Le1200-1P

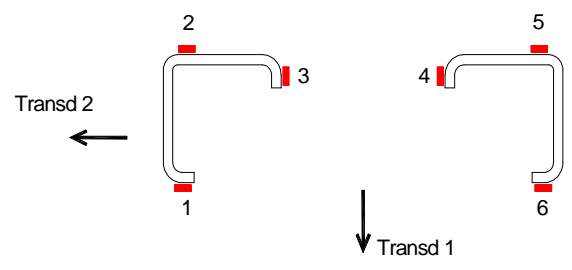


Extensômetros e transdutores

Figura B.43 – Barra Le1200-2P

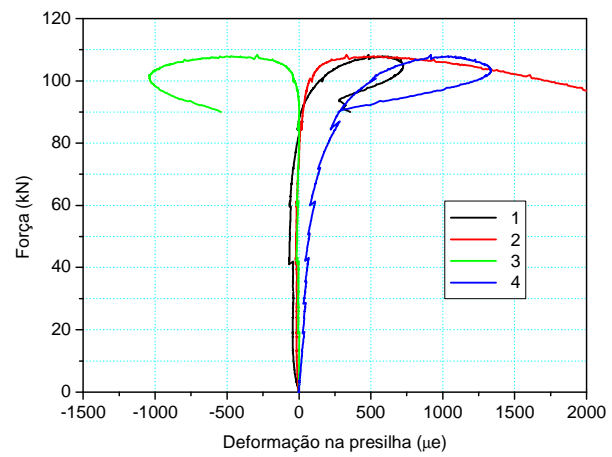
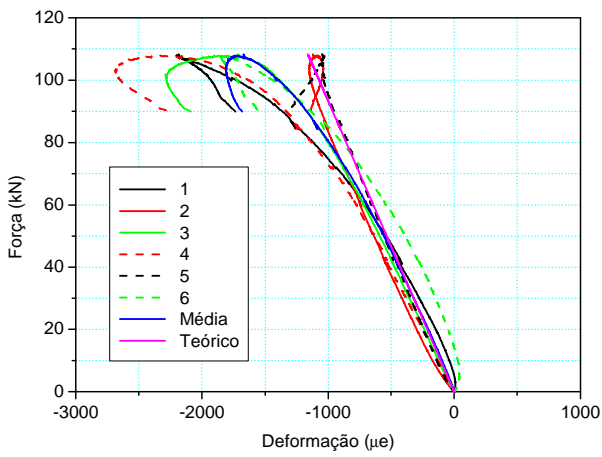
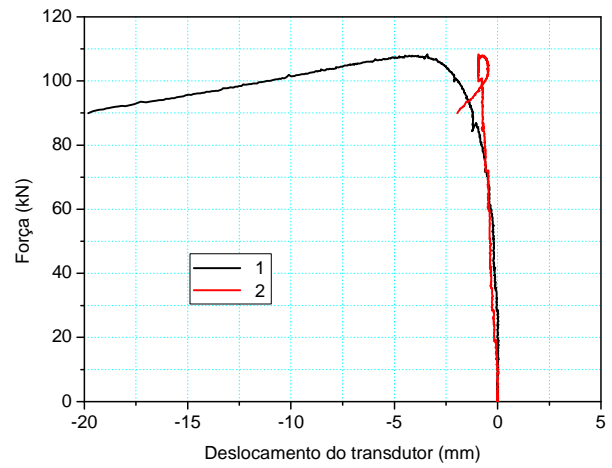
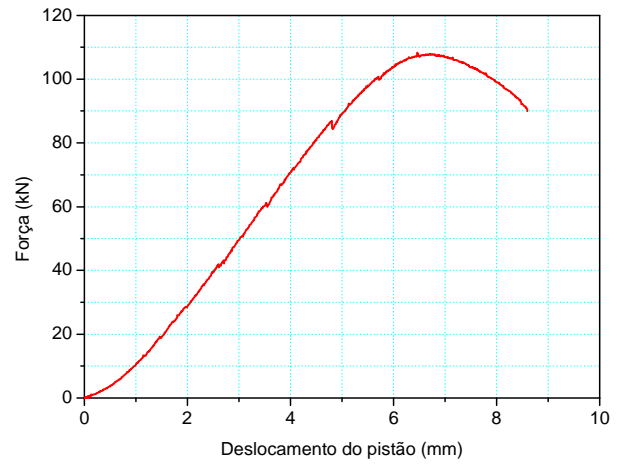


Teórico: $\epsilon = \frac{N}{E.A}$

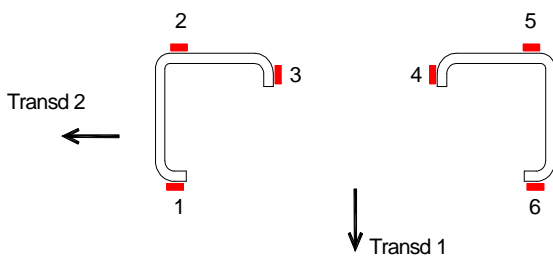


Extensômetros e transdutores

Figura B.44 – Barra Le1200-3P

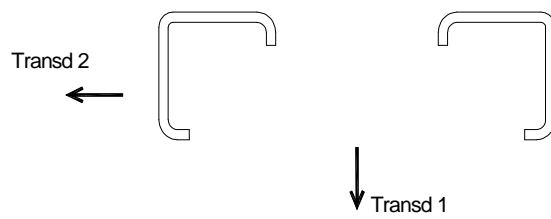
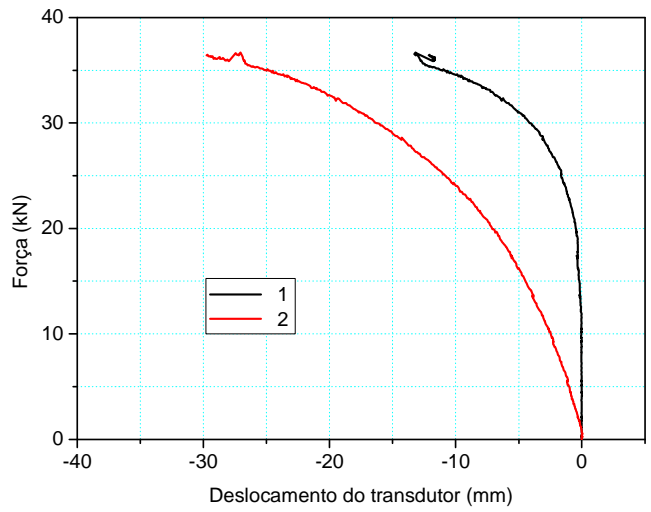
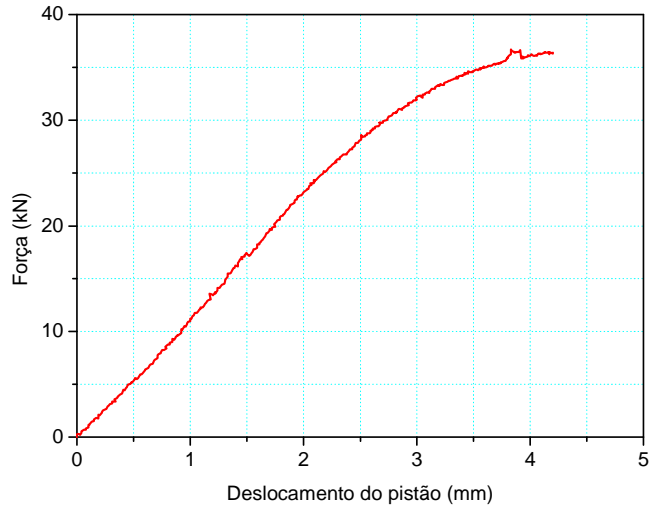


Teórico: $\epsilon = \frac{N}{E.A}$

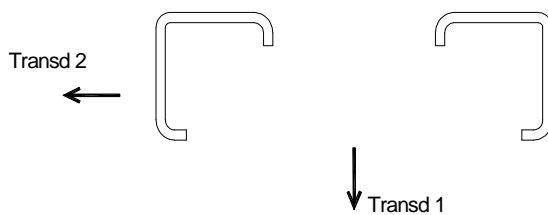
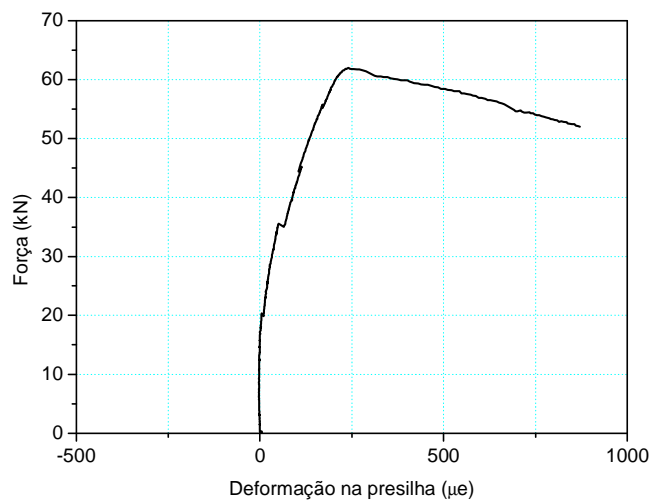
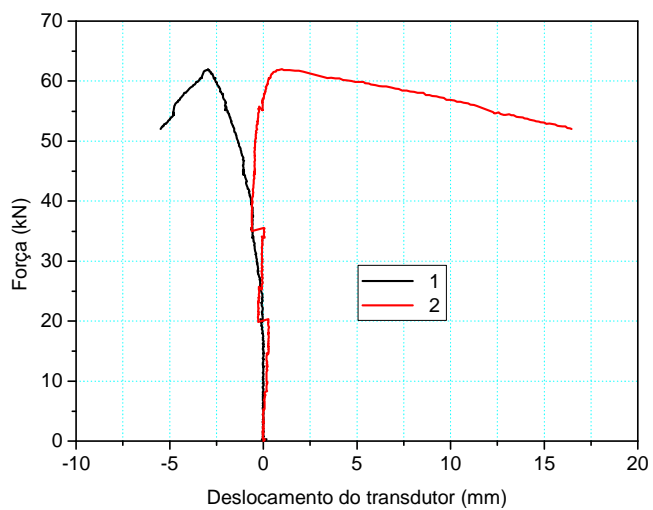
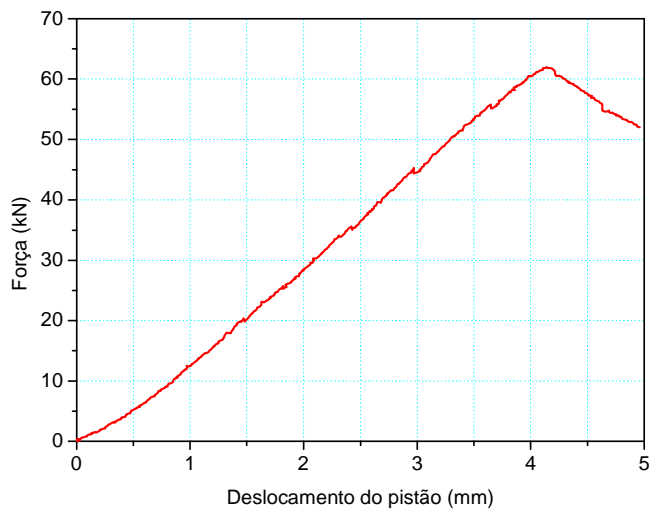
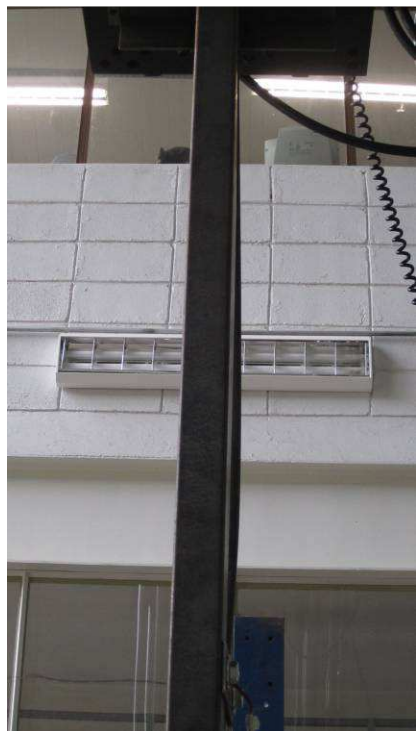


Extensômetros e transdutores

Figura B.45 – Barra Le1200-4P



Transdutores
 Figura B.46 – Barra Le1800-0



Transdutores
 Figura B.47 – Barra Le1800-1P

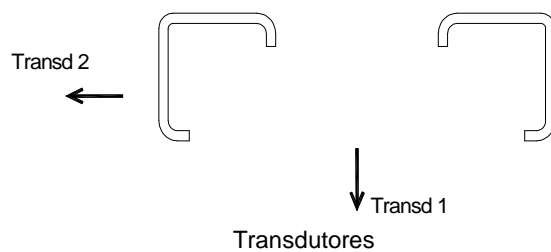
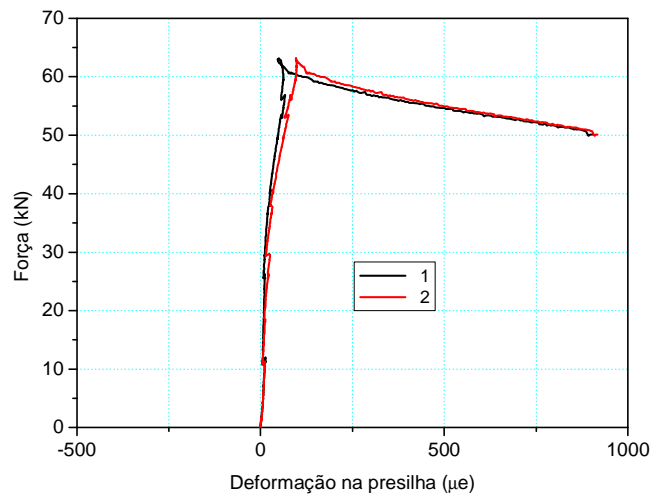
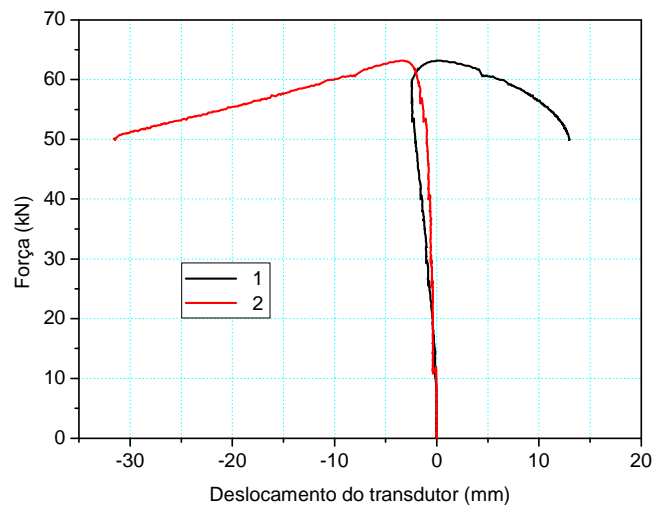
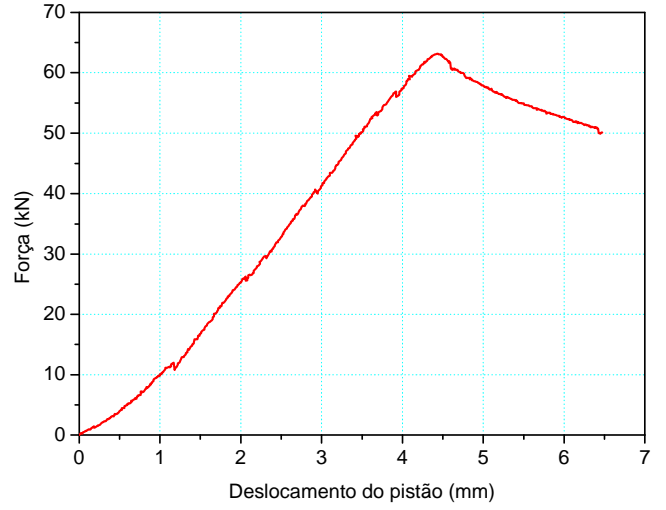
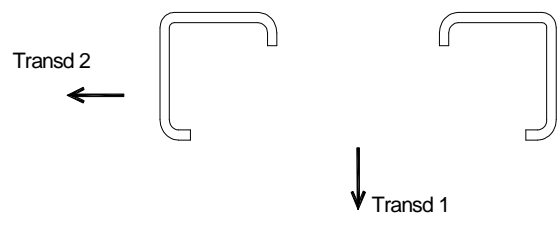
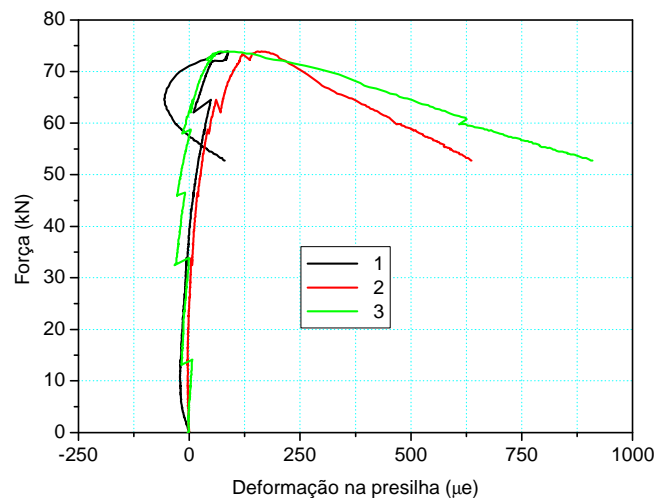
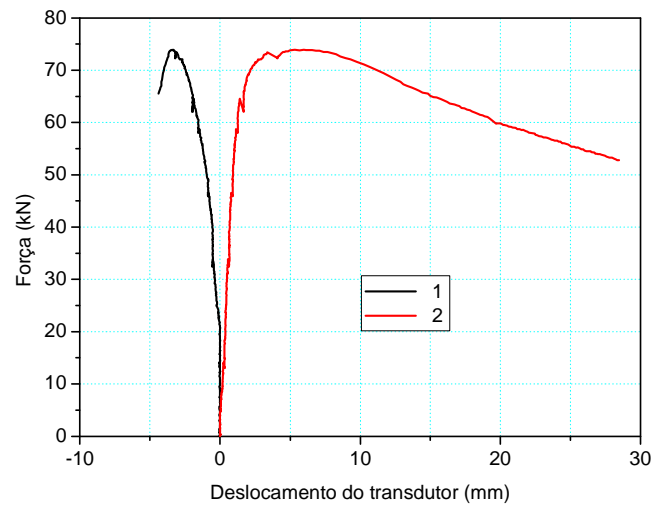
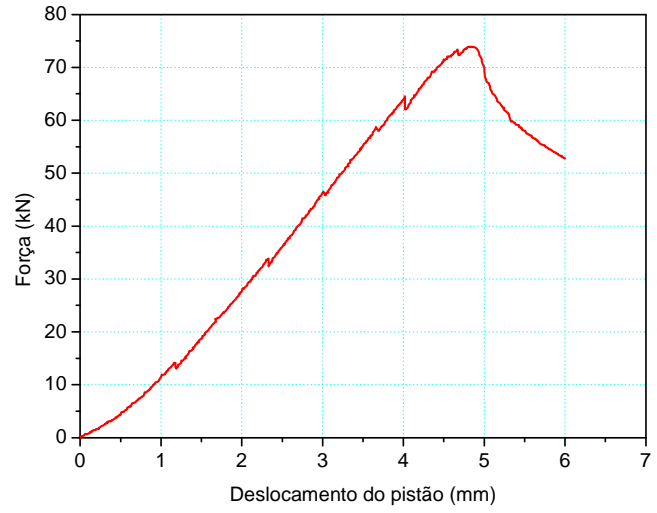
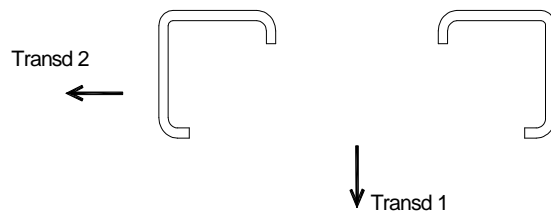
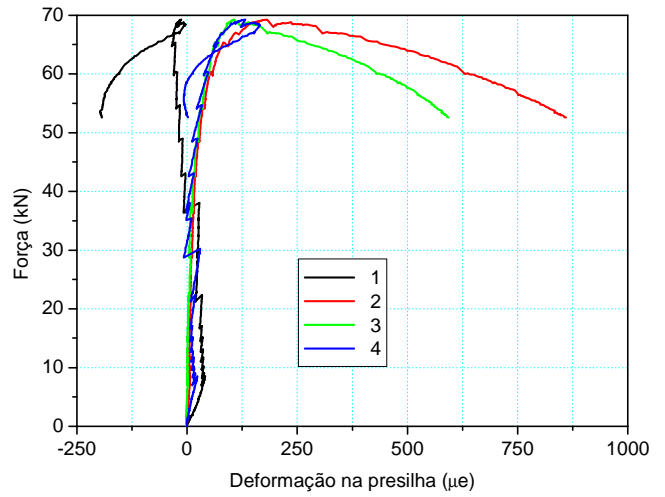
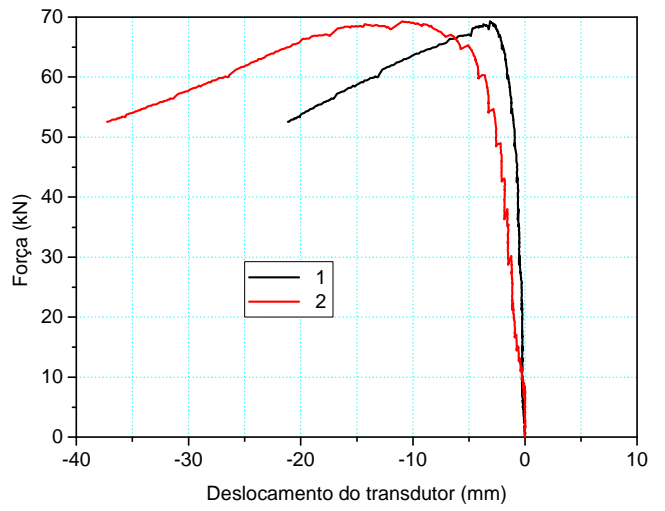
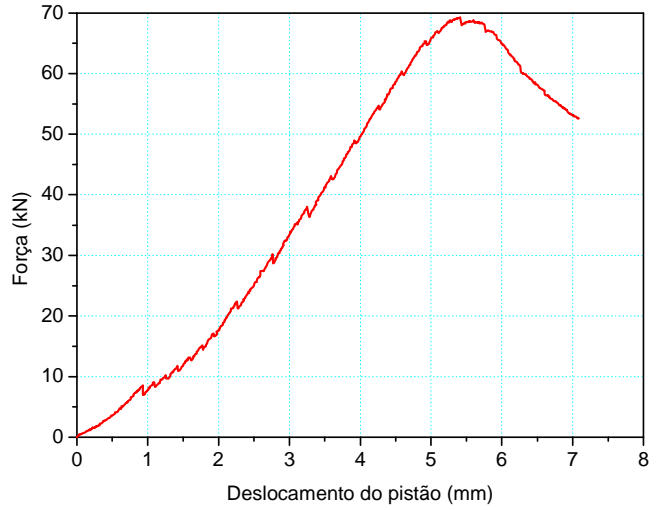


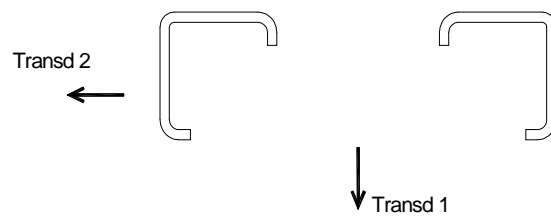
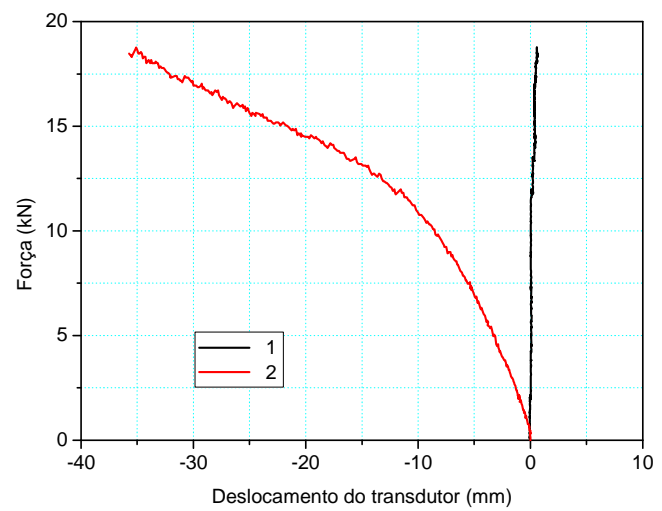
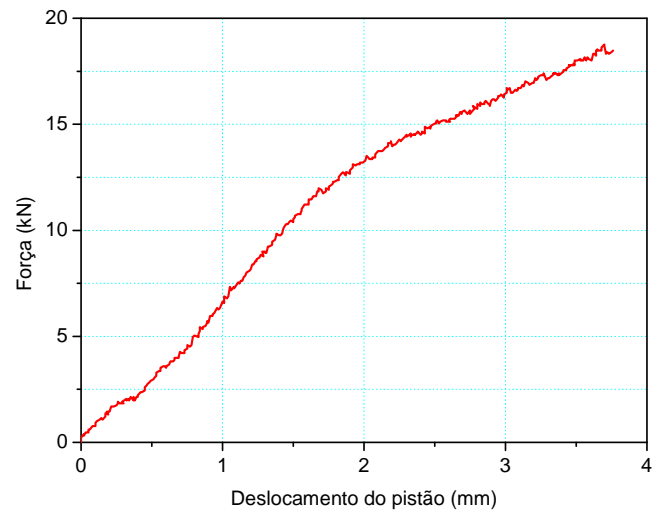
Figura B.48 – Barra Le1800-2P



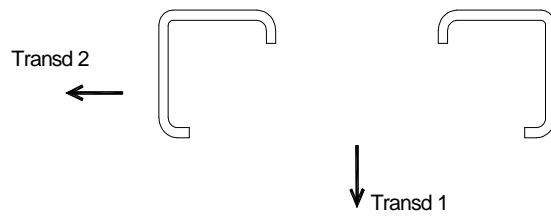
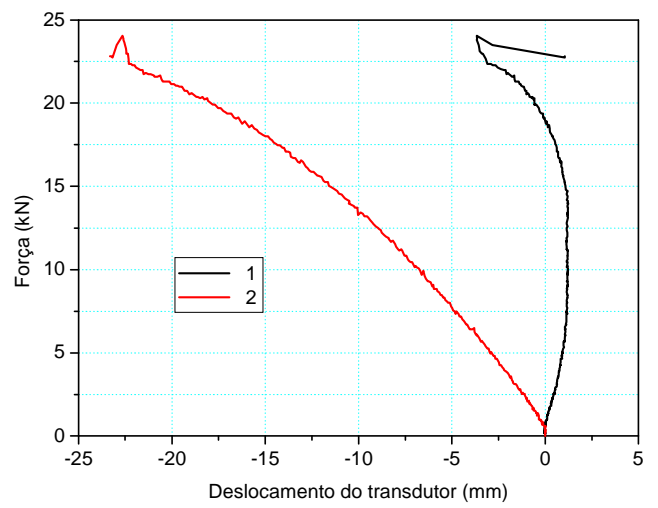
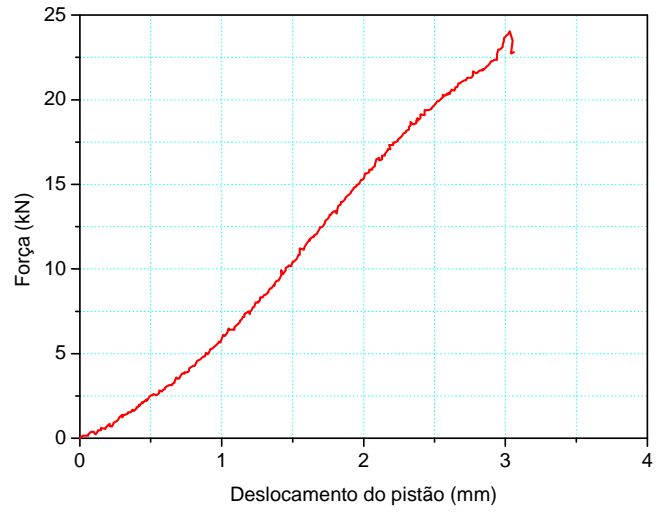
Transdutores
 Figura B.49 – Barra Le1800-3P



Transdutores
Figura B.50 – Barra Le1800-4P

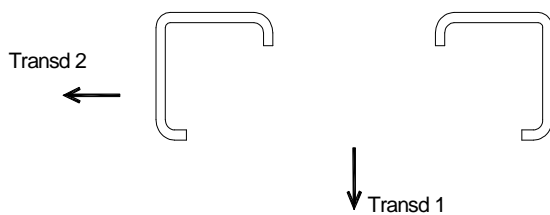
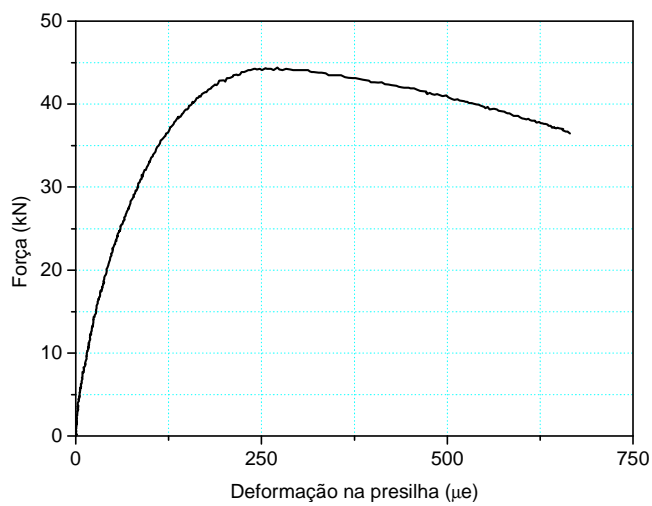
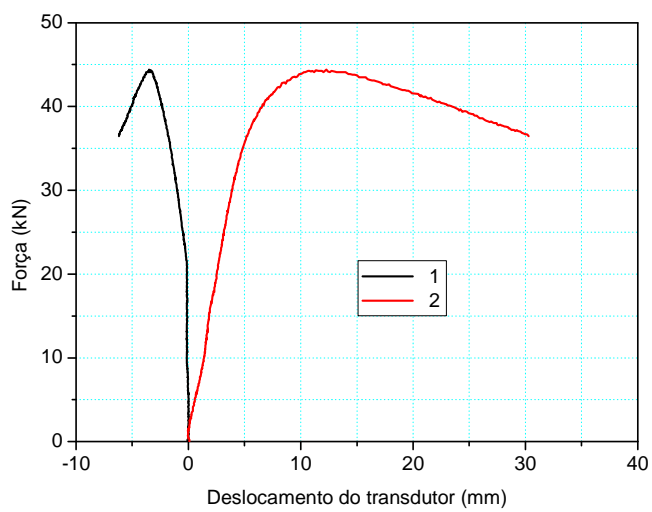
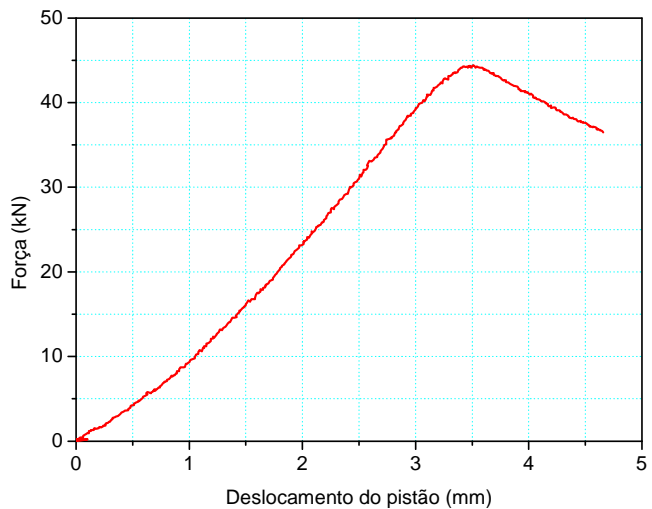


Transdutores
 Figura B.51 – Barra Le2400-0

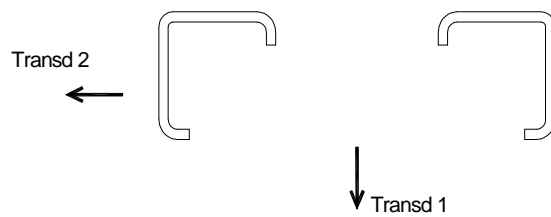
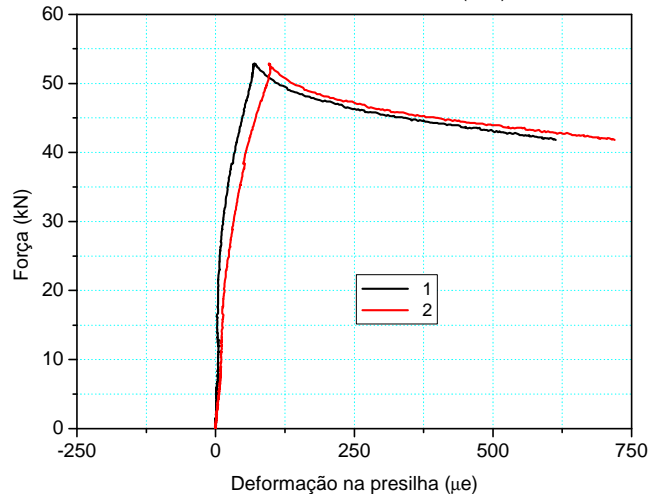
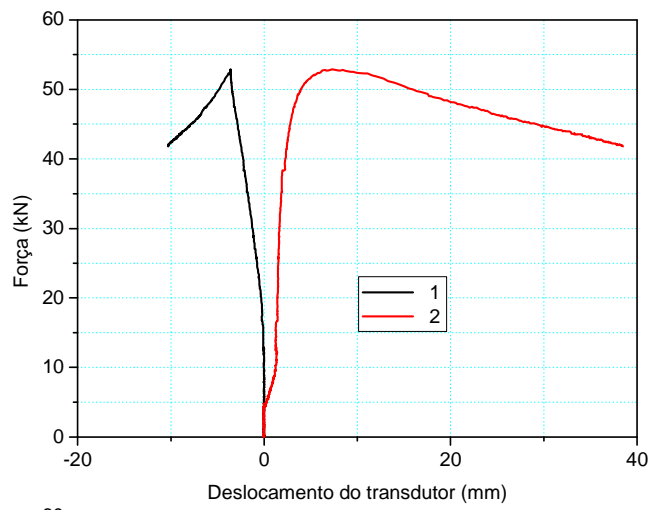


Transdutores

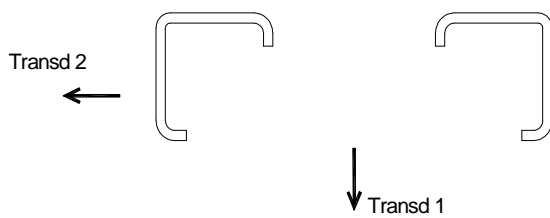
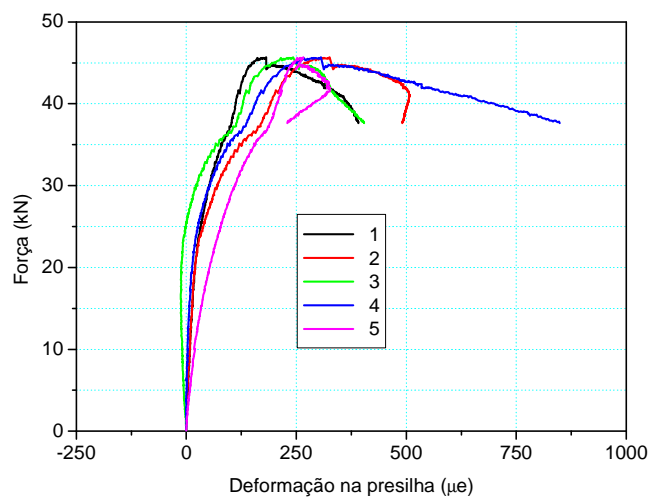
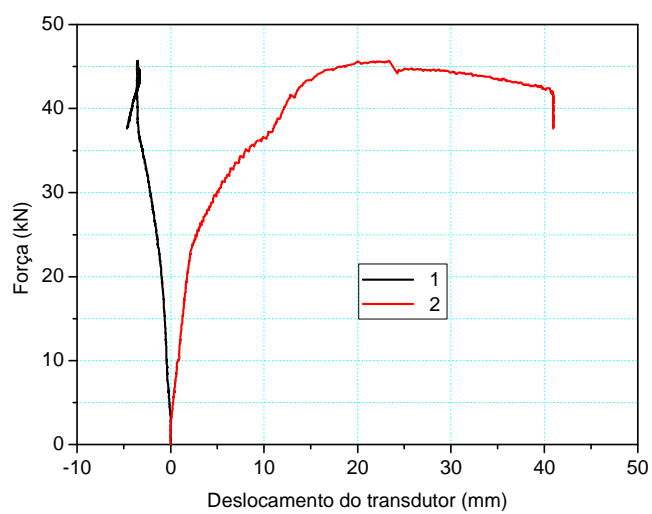
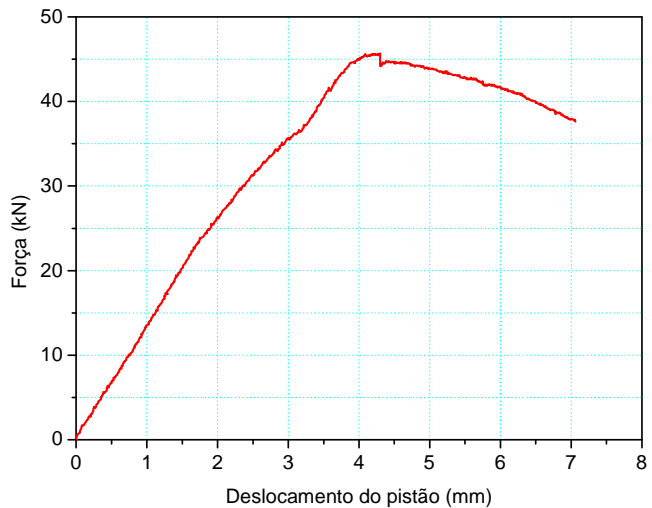
Figura B.52 – Barra Le2400-0R



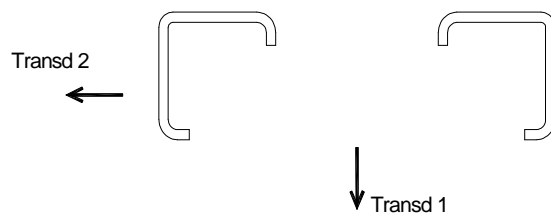
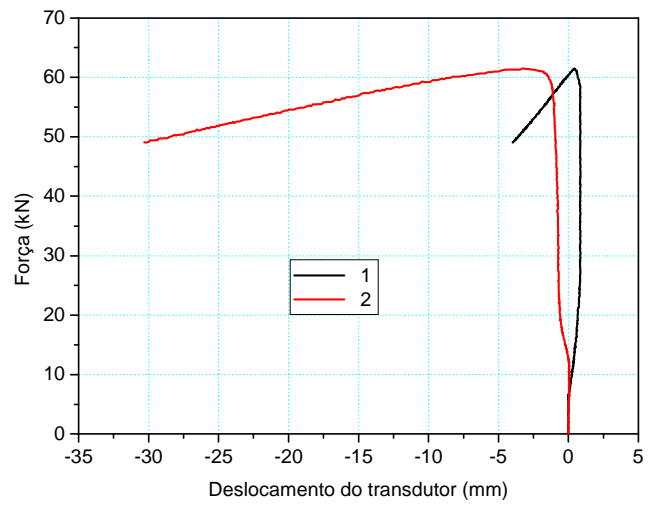
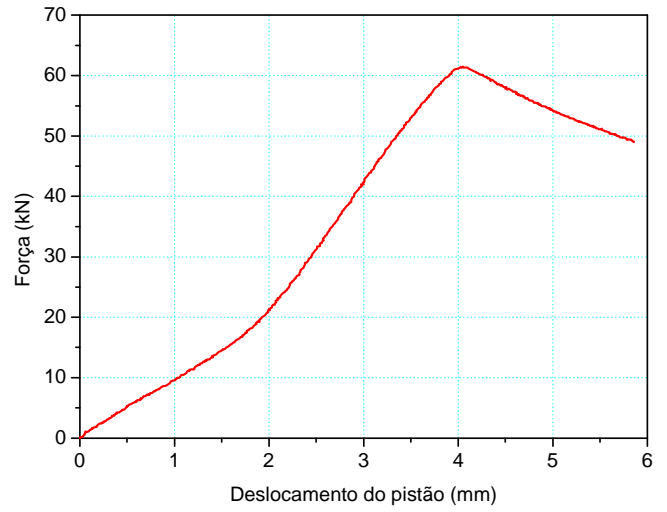
Transdutores
 Figura B.53 – Barra Le2400-1P



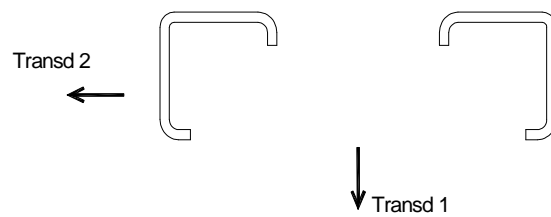
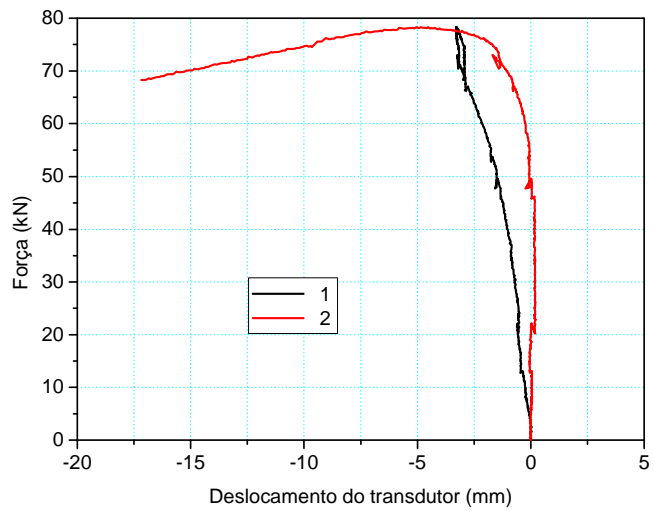
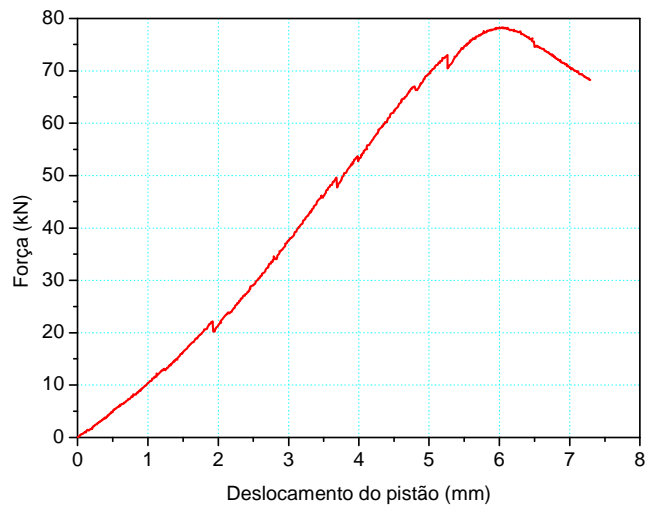
Transdutores
 Figura B.54 – Barra Le2400-2P



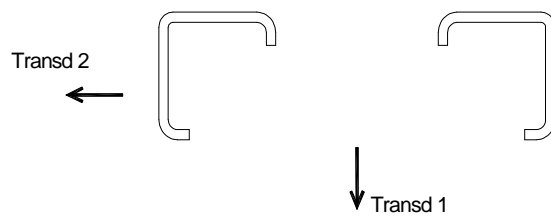
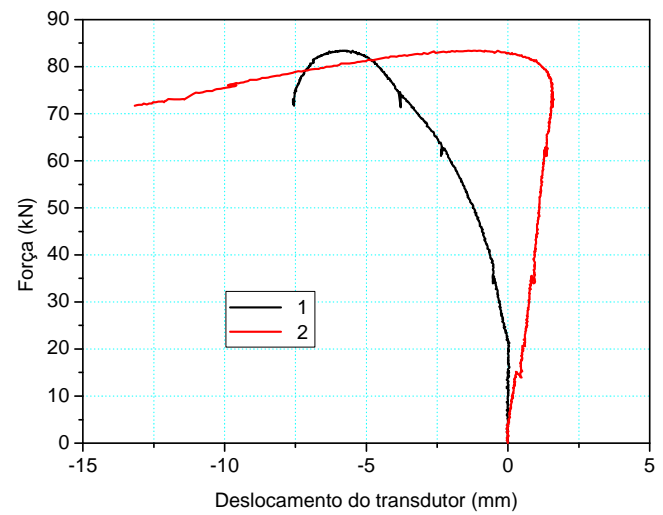
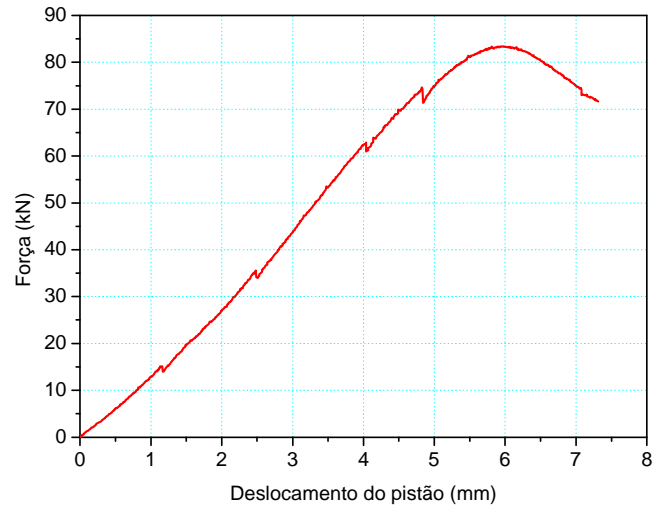
Transdutores
 Figura B.55 – Barra Le2400-5P



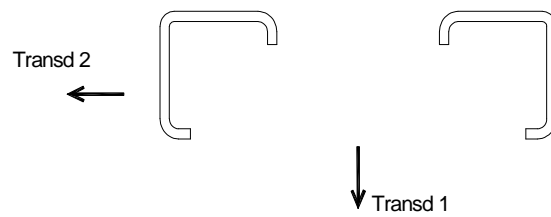
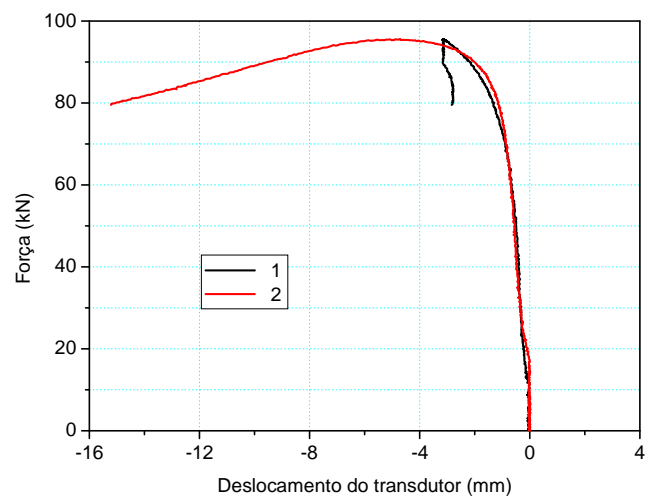
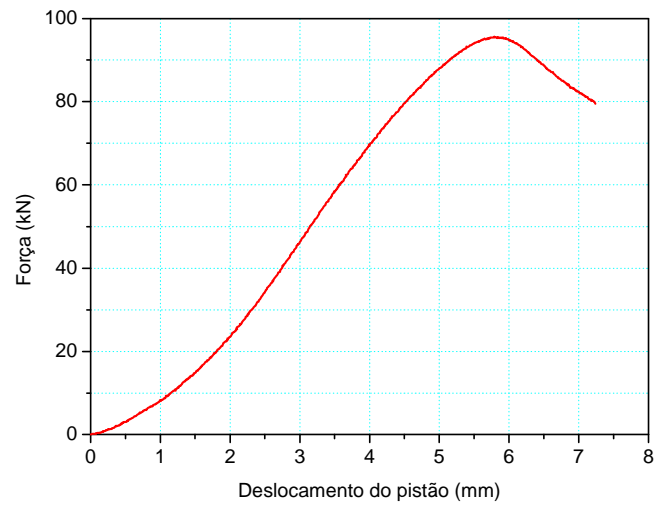
Transdutores
 Figura B.56 – Barra Le1800-1S



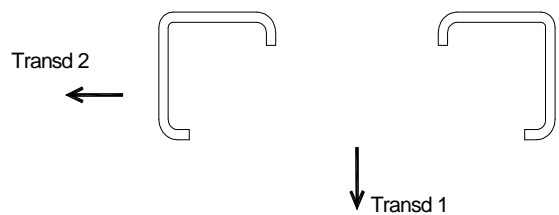
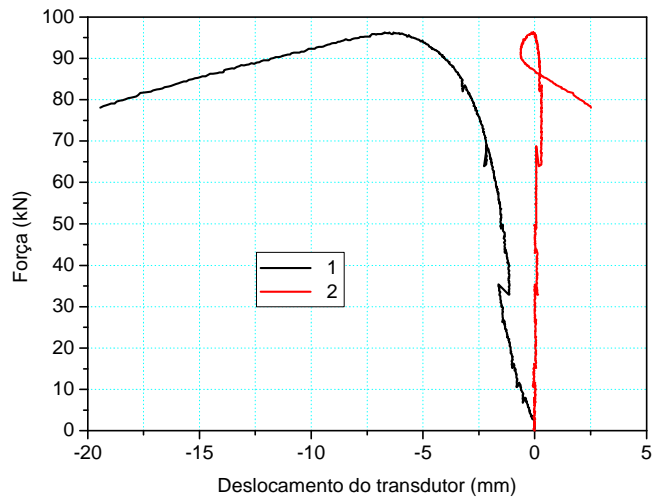
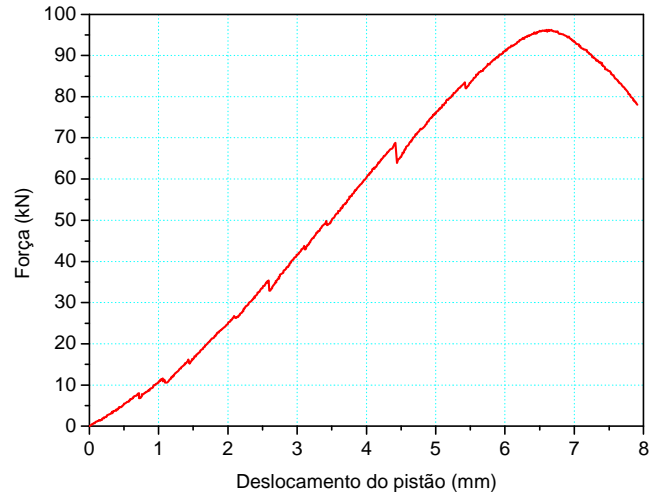
Transdutores
 Figura B.57 – Barra Le1800-2S(1)



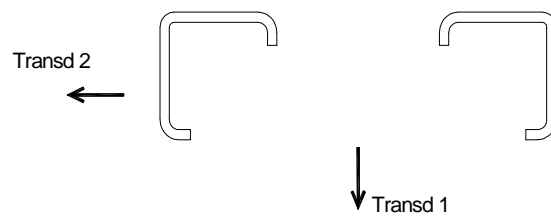
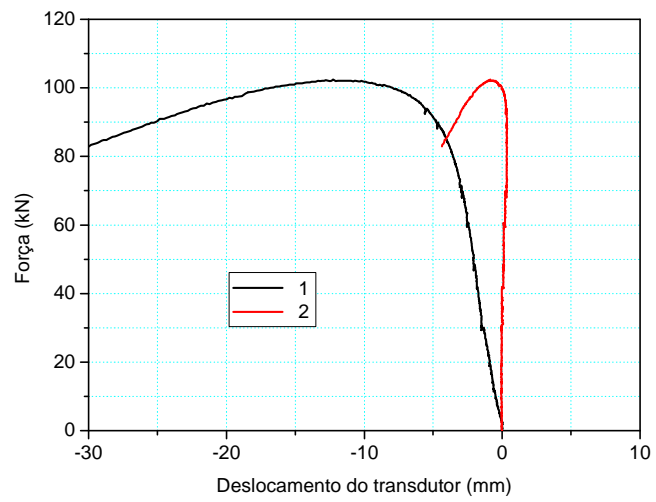
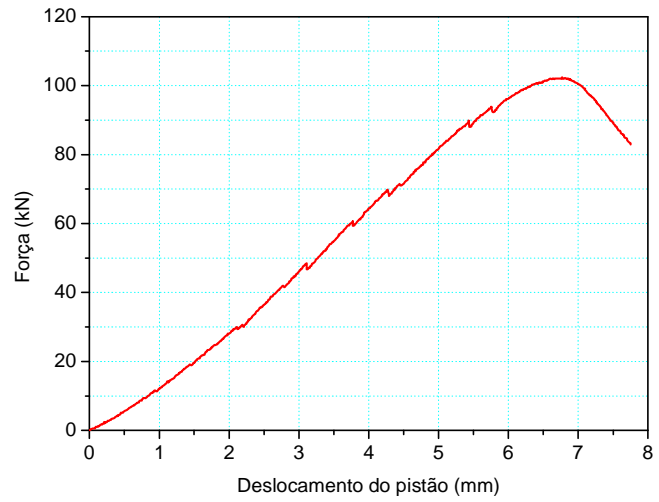
Transdutores
 Figura B.58 – Barra Le1800-2S(2)



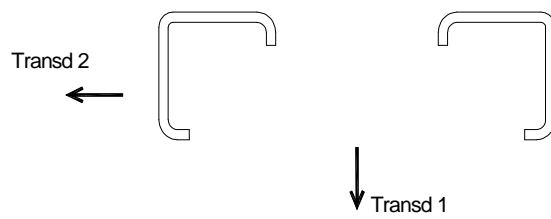
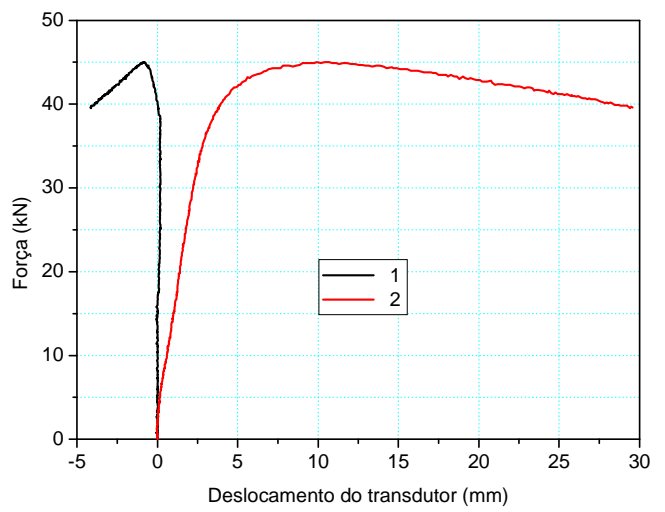
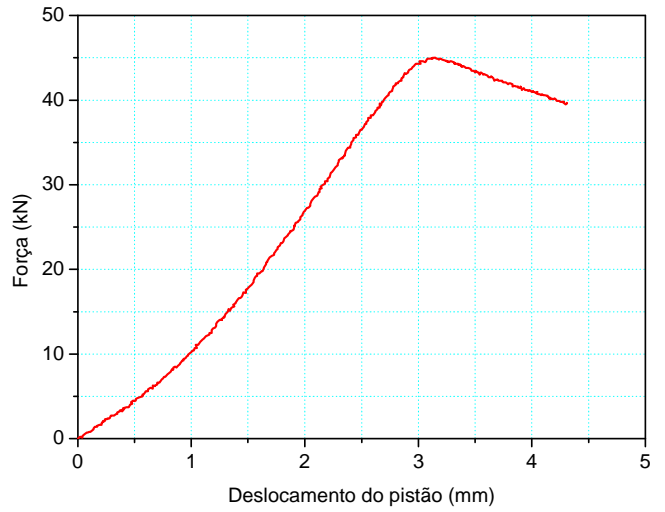
Transdutores
 Figura B.59 – Barra Le1800-3S



Transdutores
 Figura B.60 – Barra Le1800-4S(1)

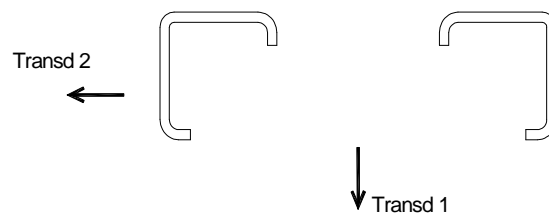
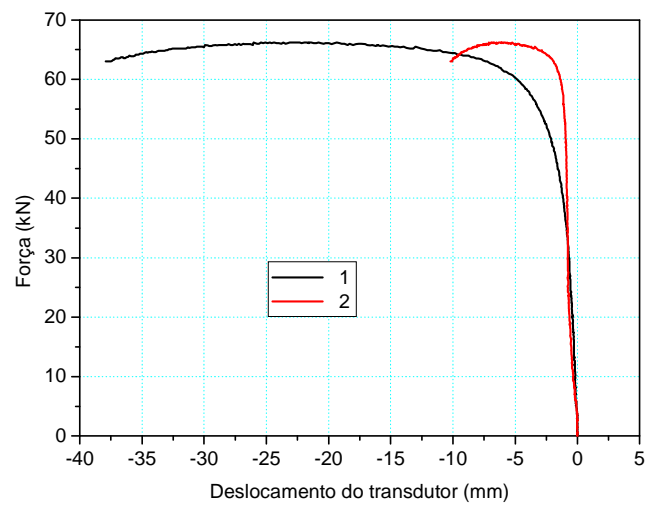
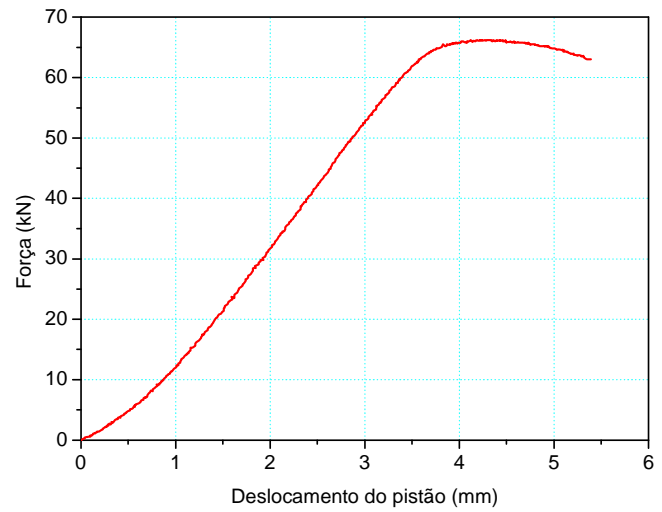


Transdutores
 Figura B.61 – Barra Le1800-4S(2)

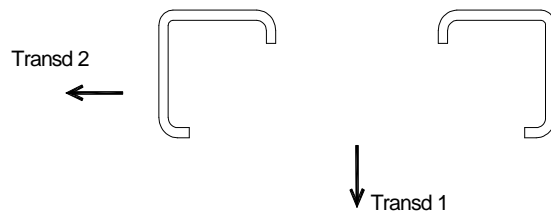
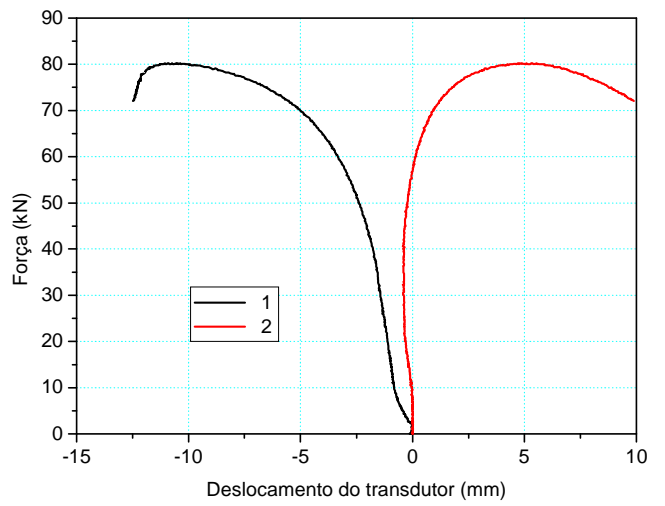
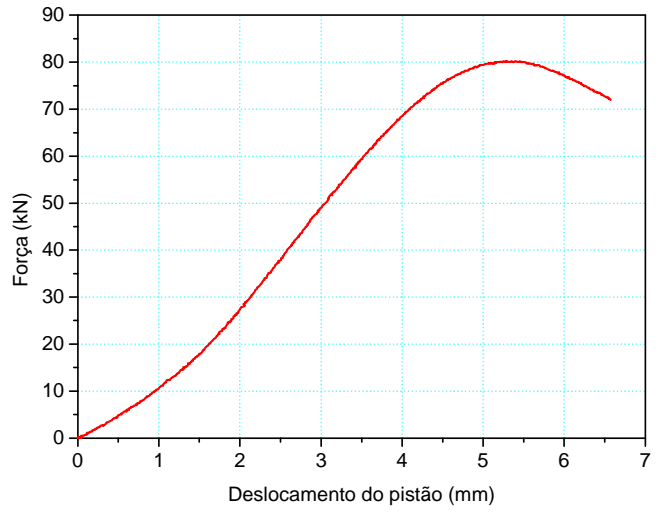


Transdutores

Figura B.62 – Barra Le2400-1S

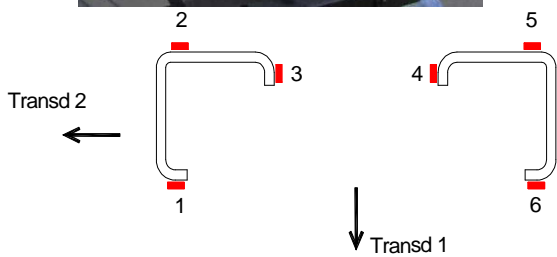
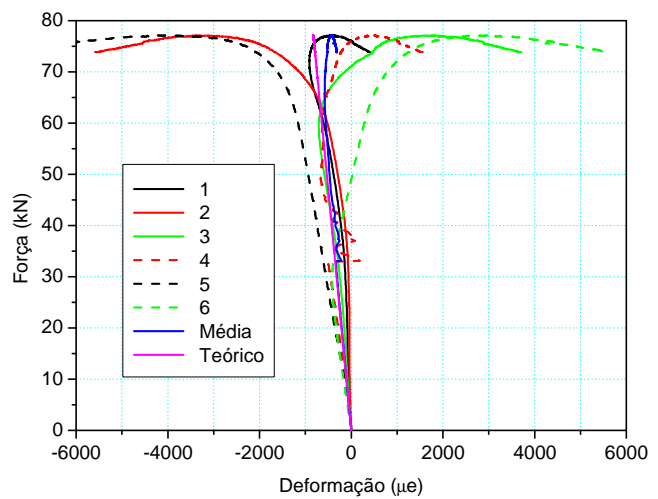
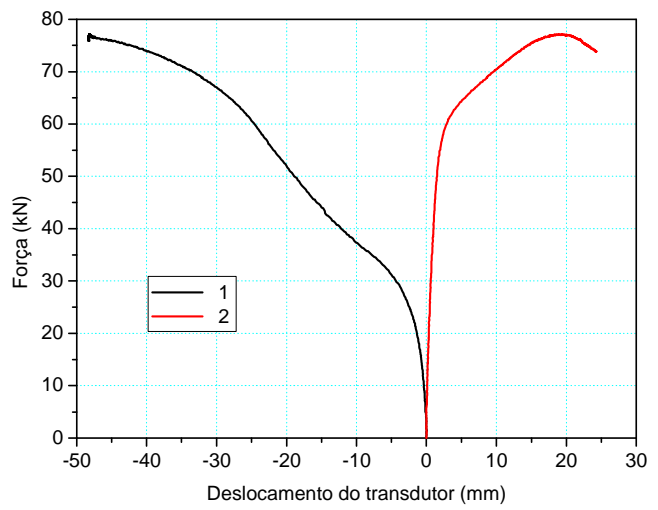
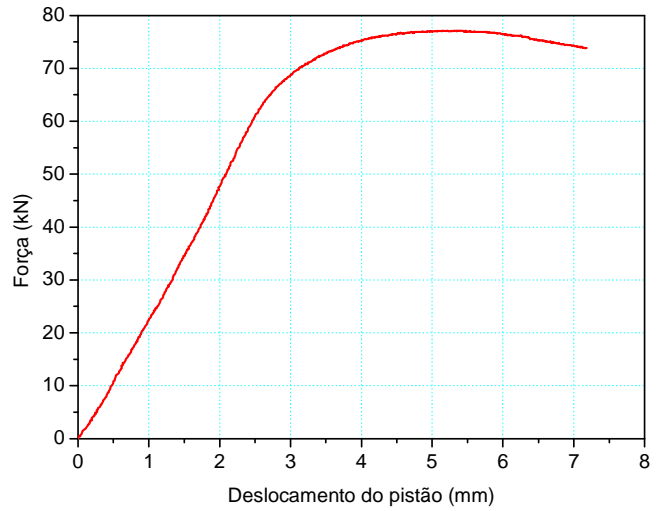
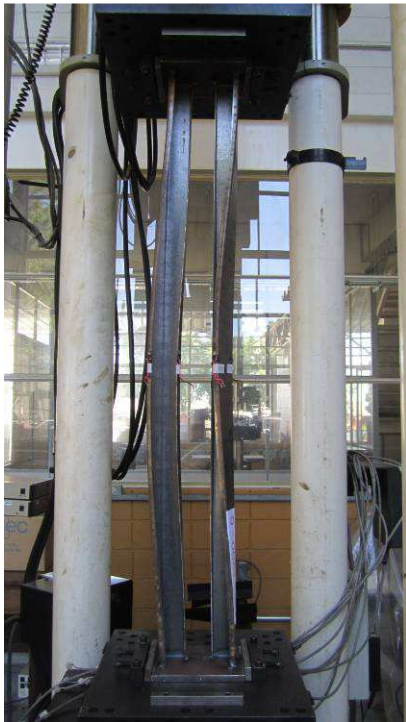


Transdutores
 Figura B.63 – Barra Le2400-2S



Transdutores
 Figura B.64 – Barra Le2400-5S

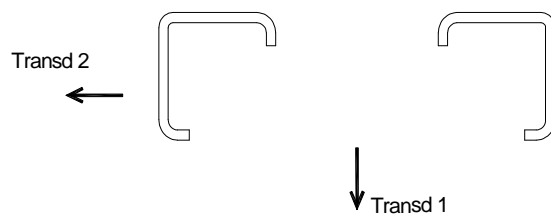
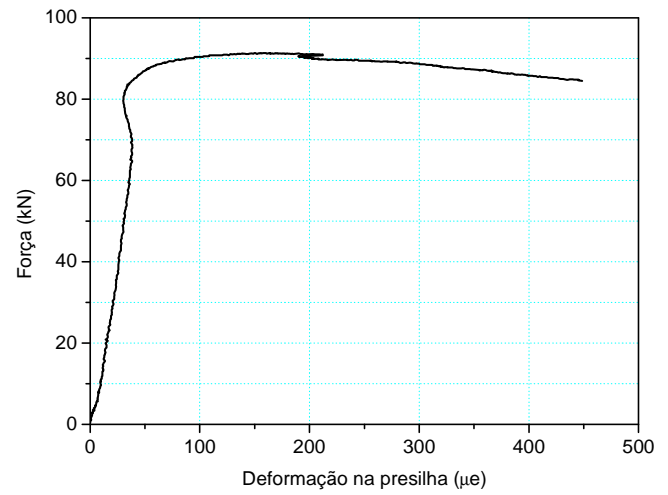
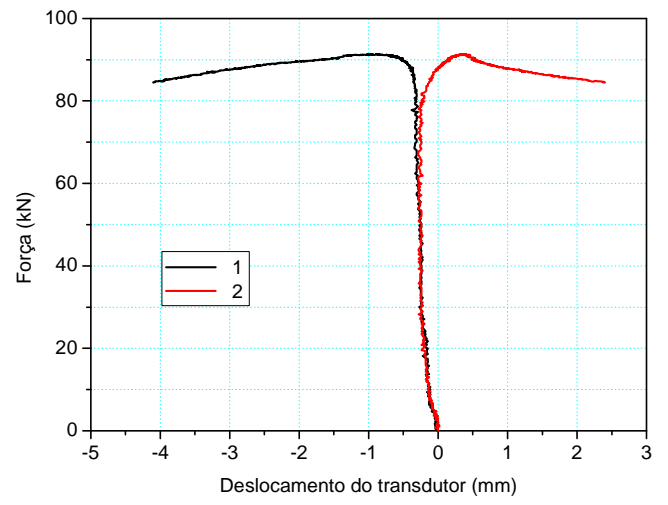
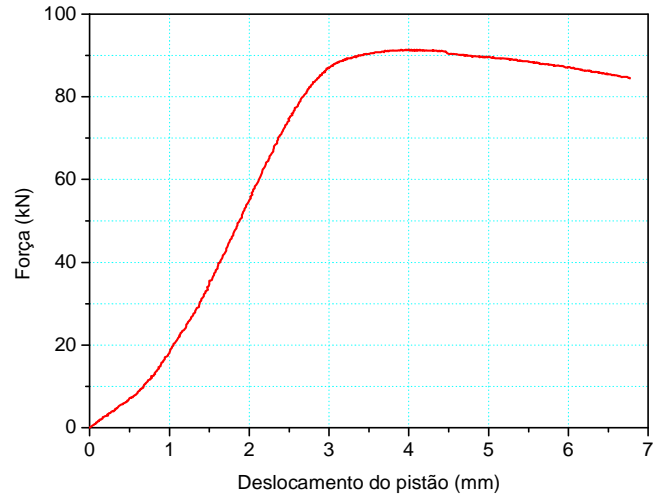
Perfil 2Le 50x13x2,00
Extremidades fixas (compressão centrada)



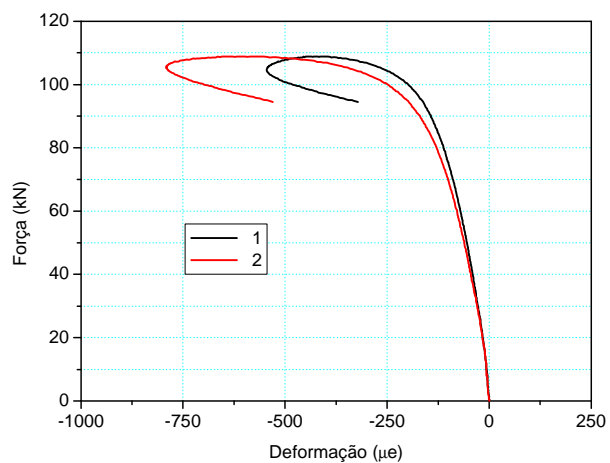
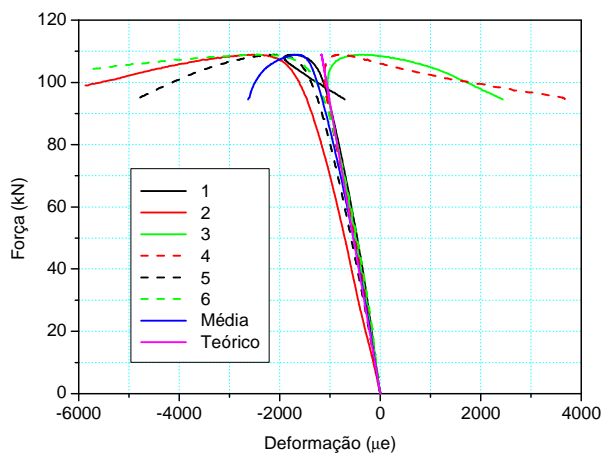
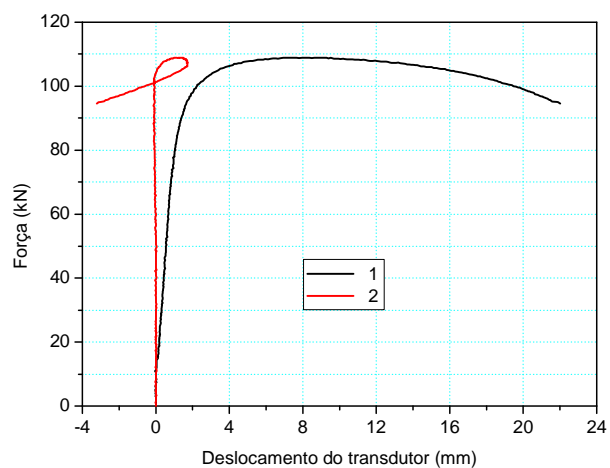
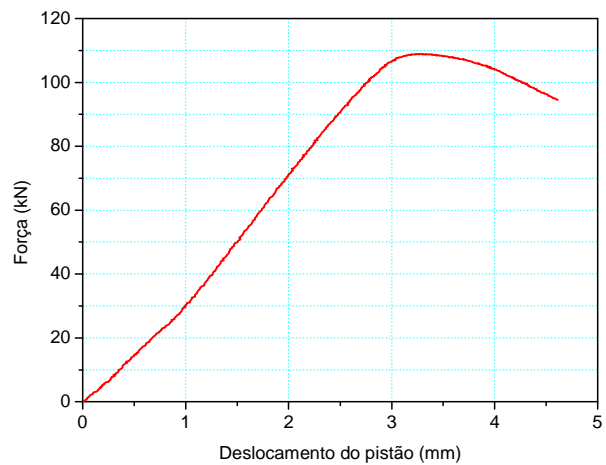
Extensômetros e transdutores

$$\text{Teórico: } \epsilon = \frac{N}{E.A}$$

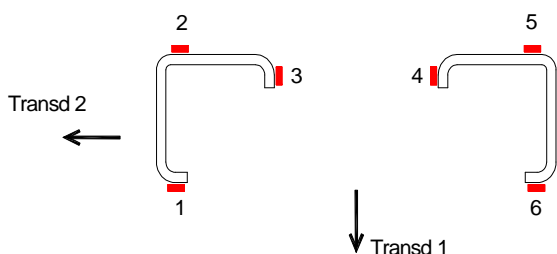
Figura B.65 – Barra LeC1200-0



Transdutores
 Figura B.66 – Barra LeC1200-1P

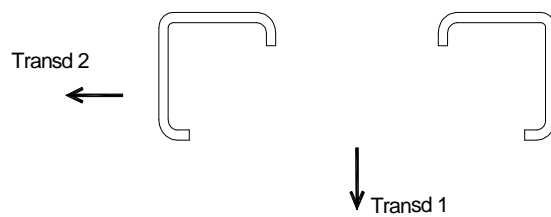
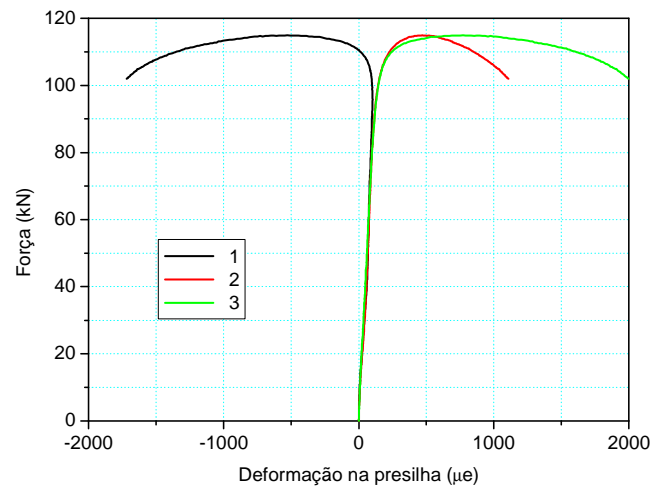
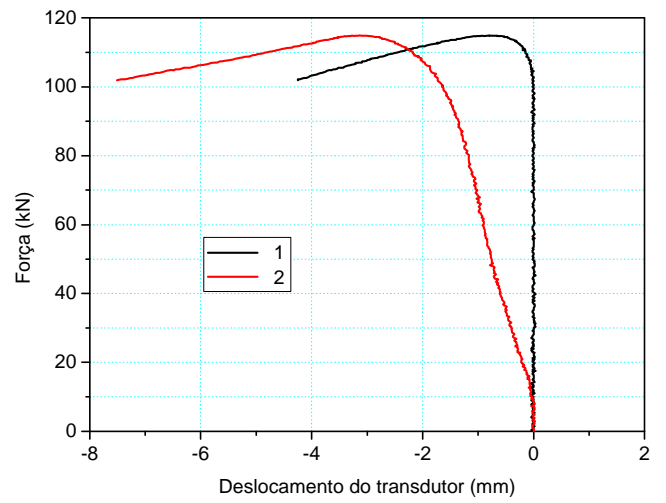
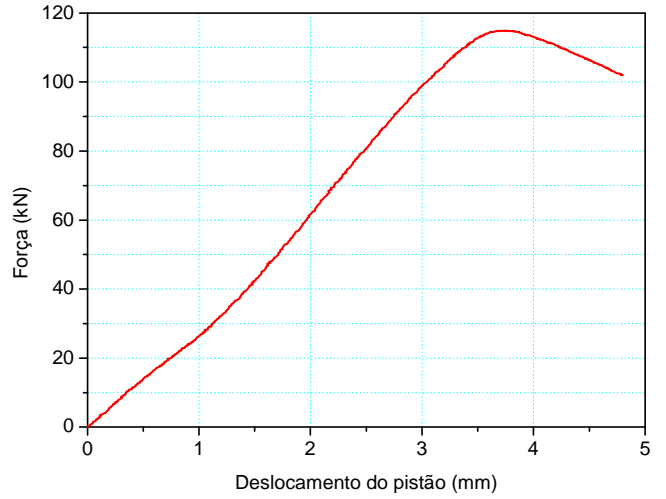


Teórico: $\epsilon = \frac{N}{E.A}$

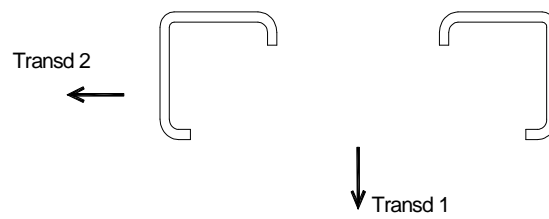
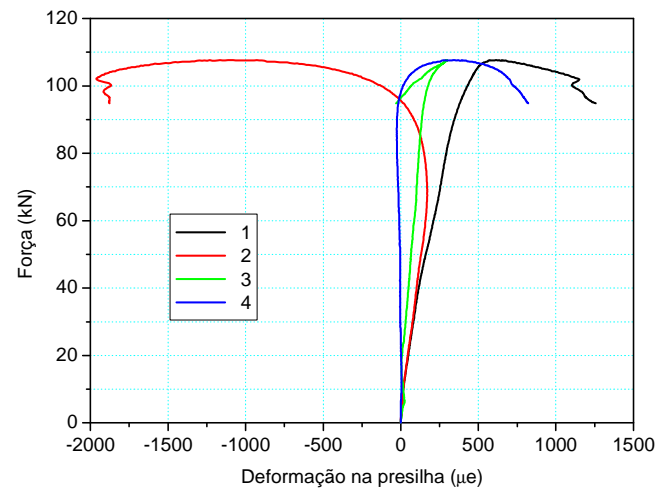
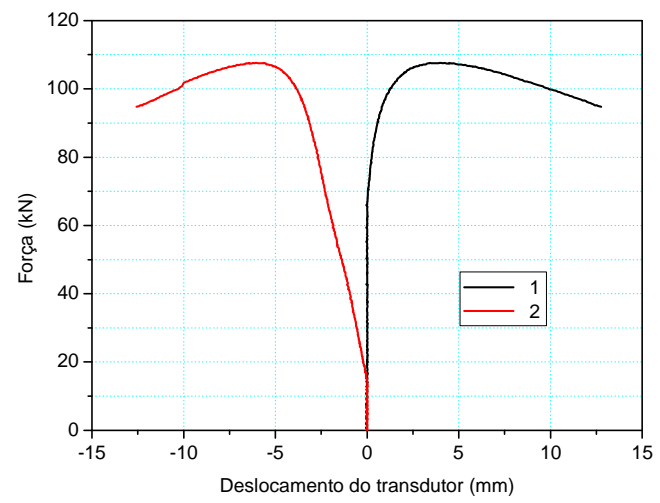
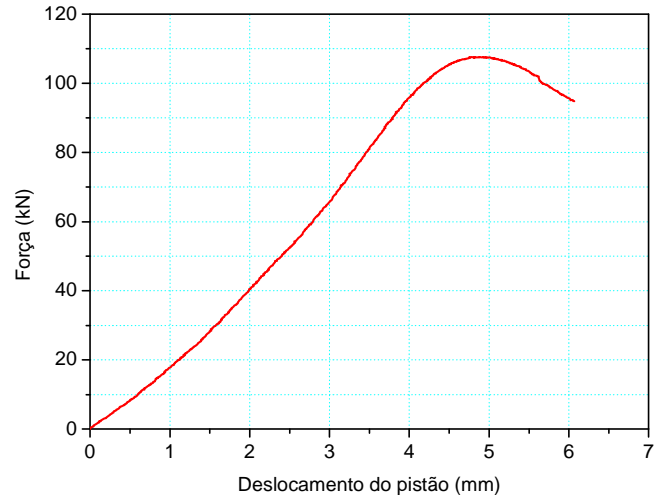


Extensômetros e transdutores

Figura B.67 – Barra LeC1200-2P

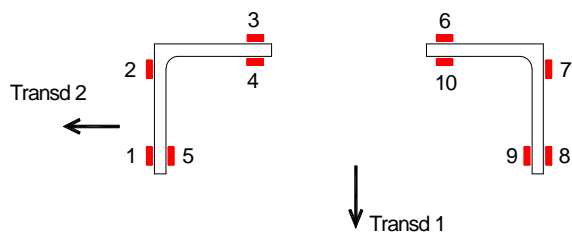
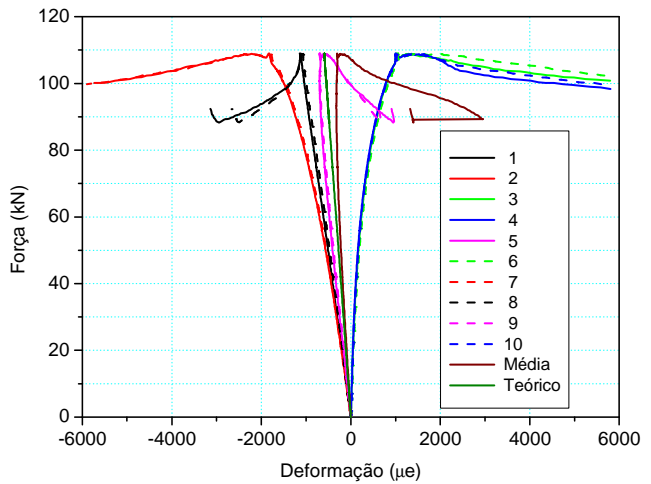
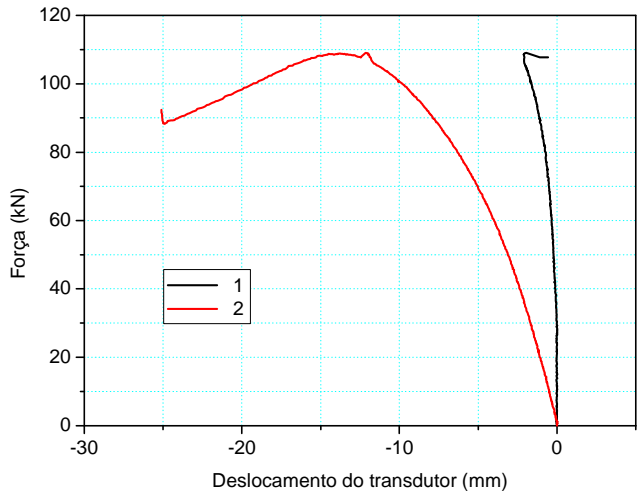
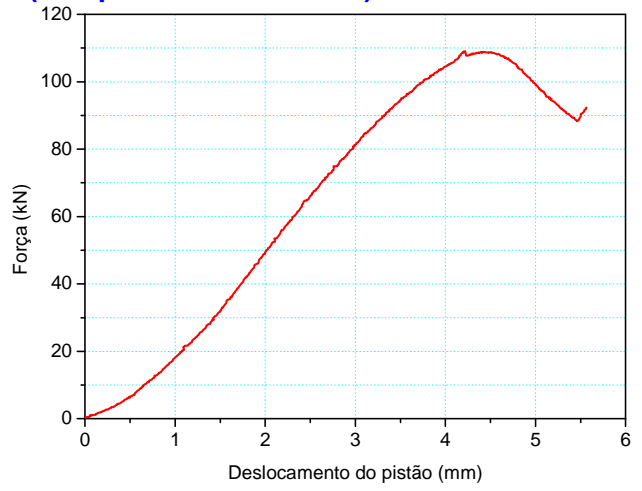
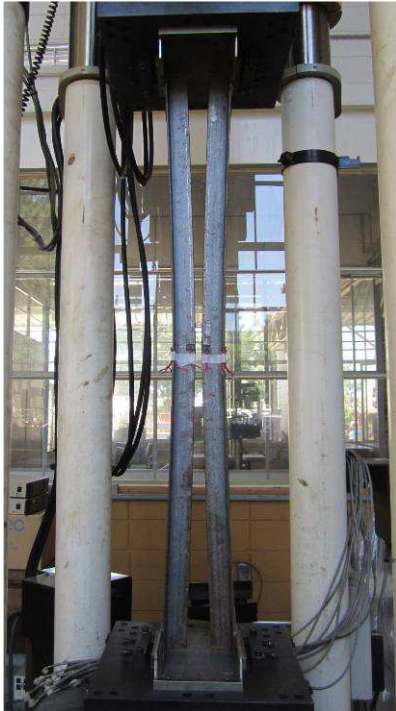


Transdutores
 Figura B.68 – Barra LeC1200-3P



Transdutores
 Figura B.69 – Barra LeC1200-4P

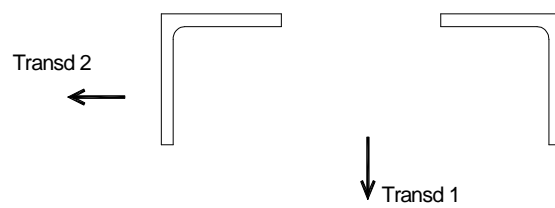
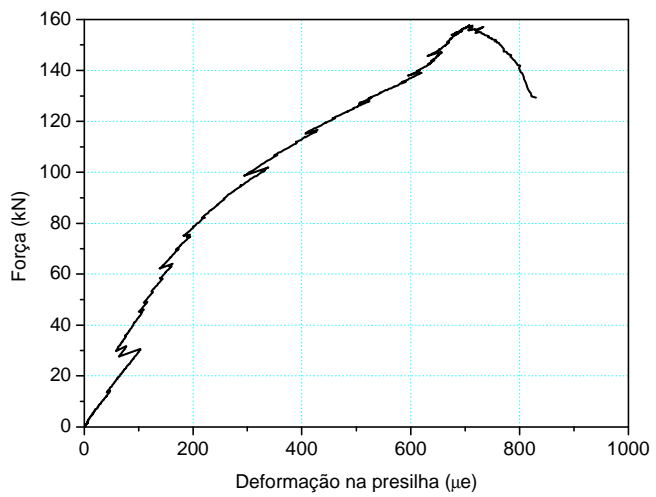
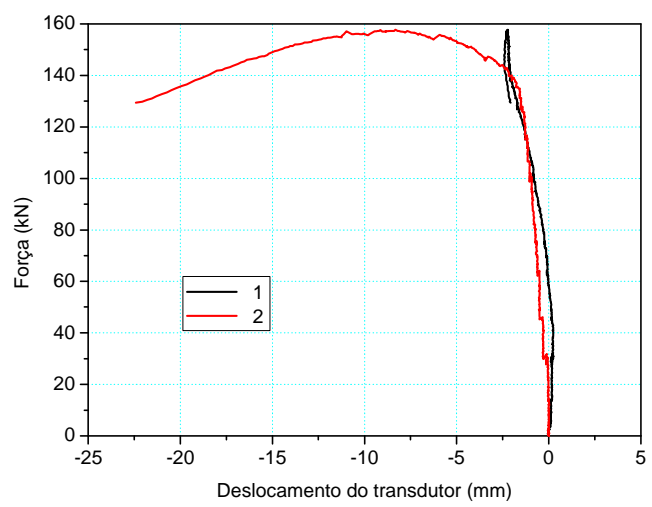
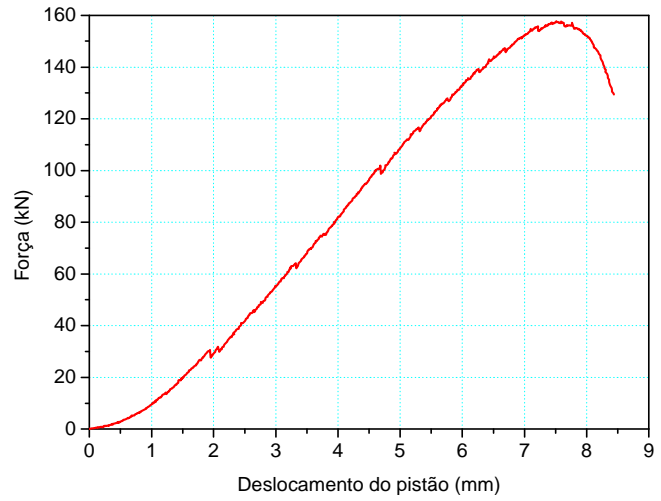
Perfil 2L 50x5 (2"x3/16")
Extremidades fixas (compressão excêntrica)



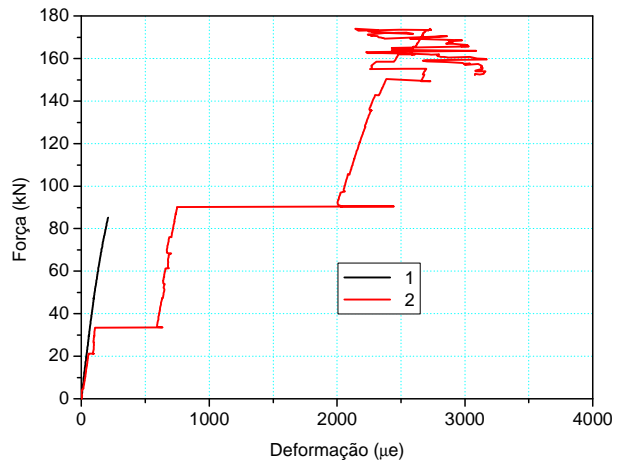
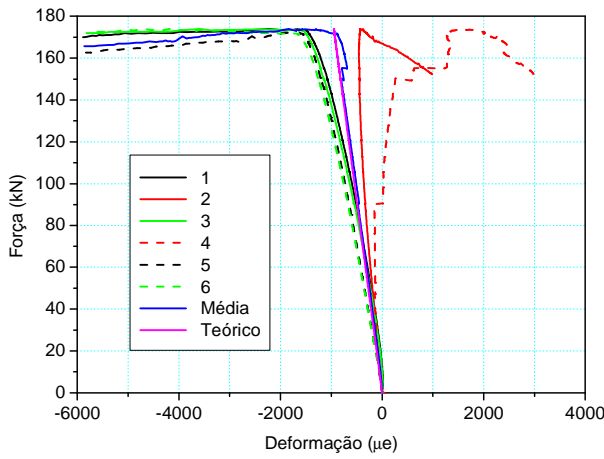
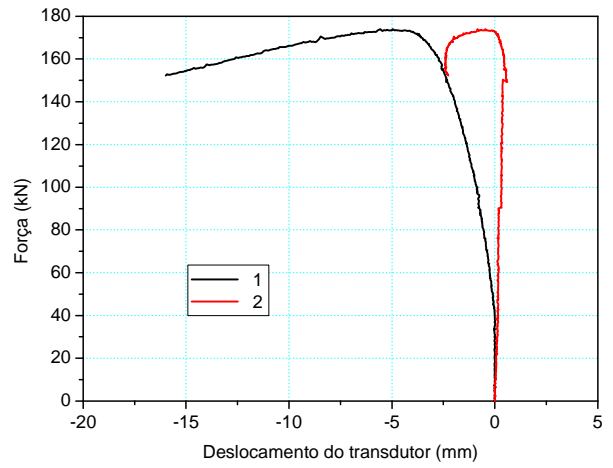
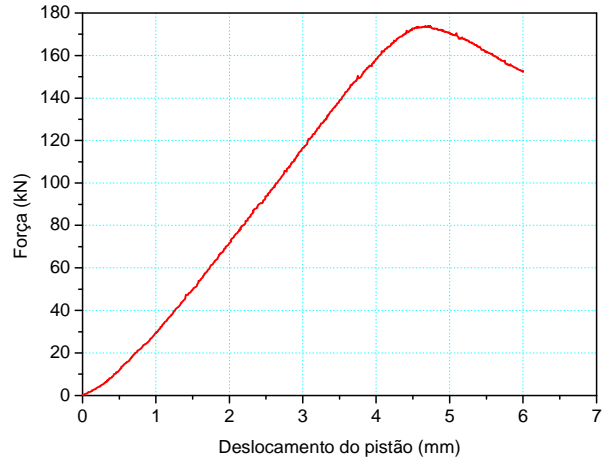
Teórico: $\epsilon = \frac{N}{E.A}$

Extensômetros e transdutores

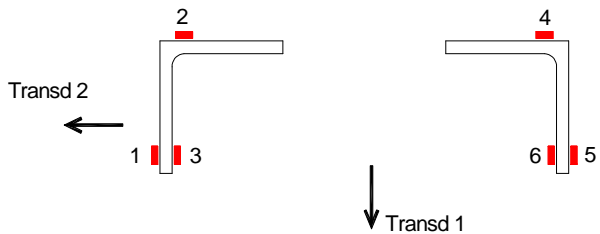
Figura B.70 – Barra LL1200-0



Transdutores
 Figura B.71 – Barra LL1200-1P

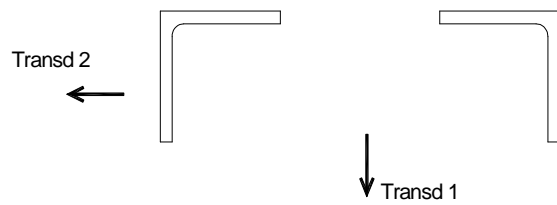
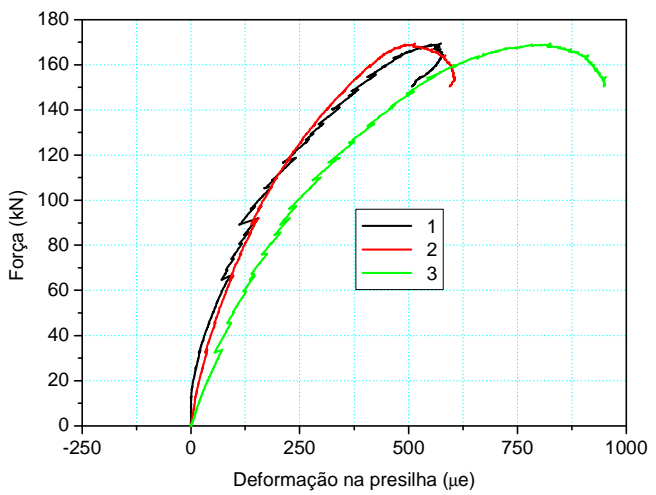
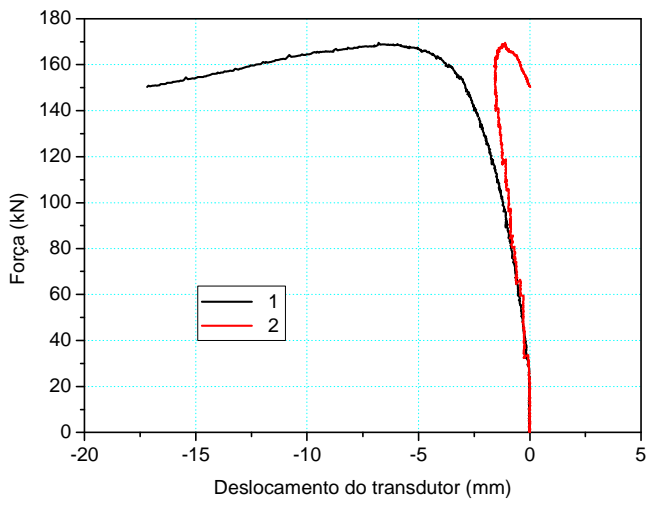
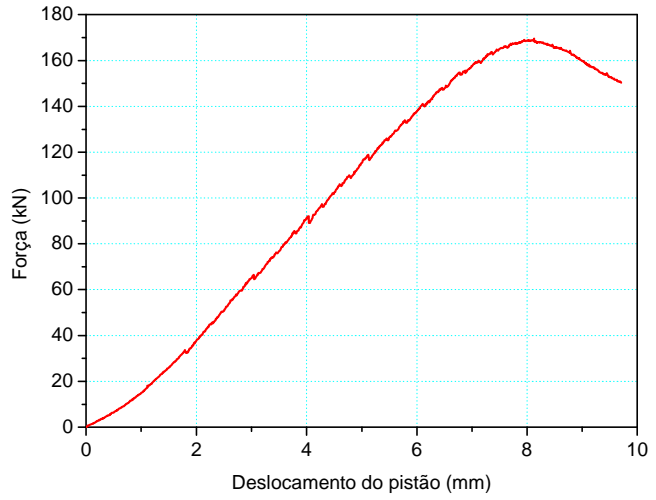


Teórico: $\epsilon = \frac{N}{E.A}$

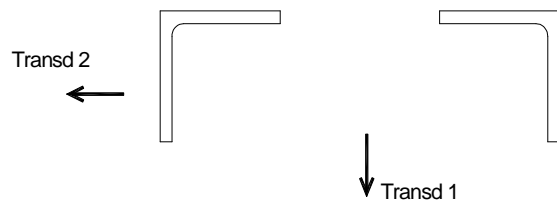
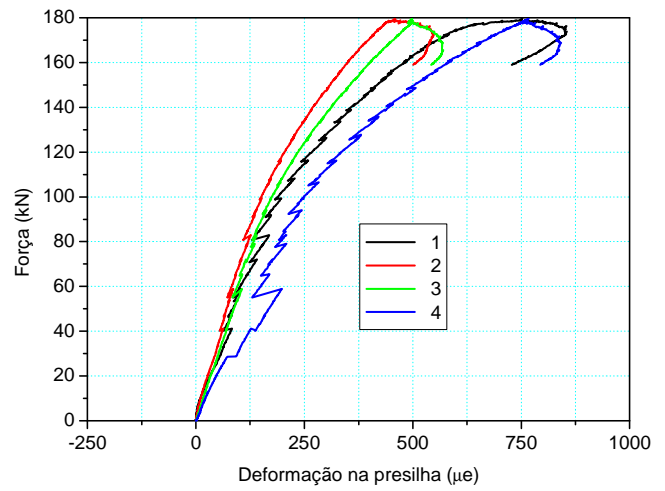
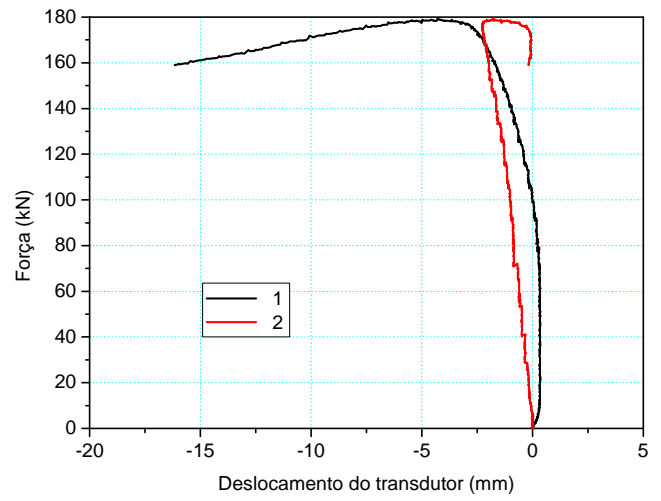
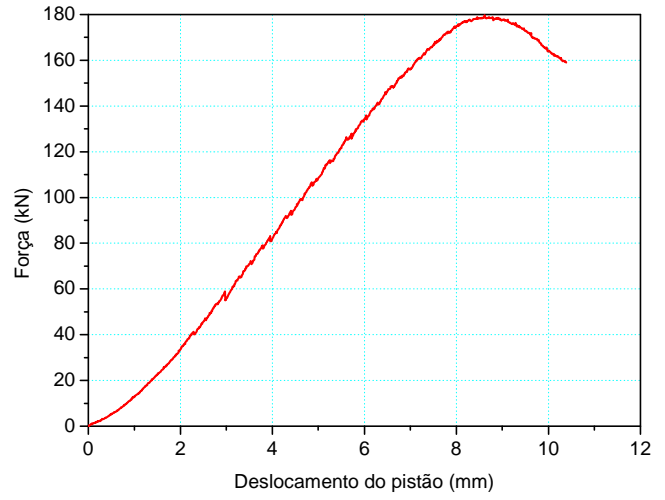
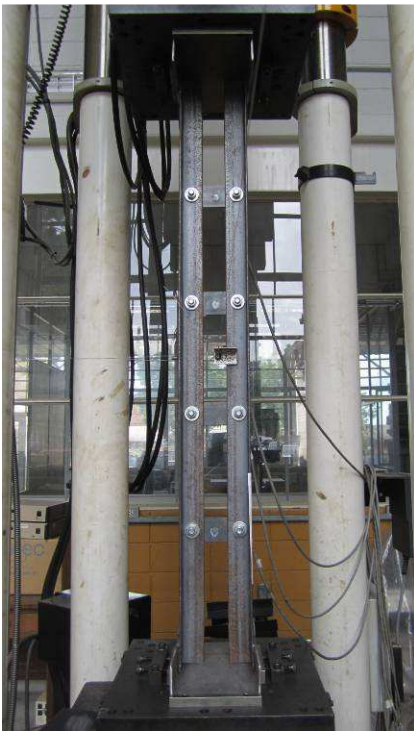


Extensômetros e transdutores

Figura B.72 – Barra LL1200-2P

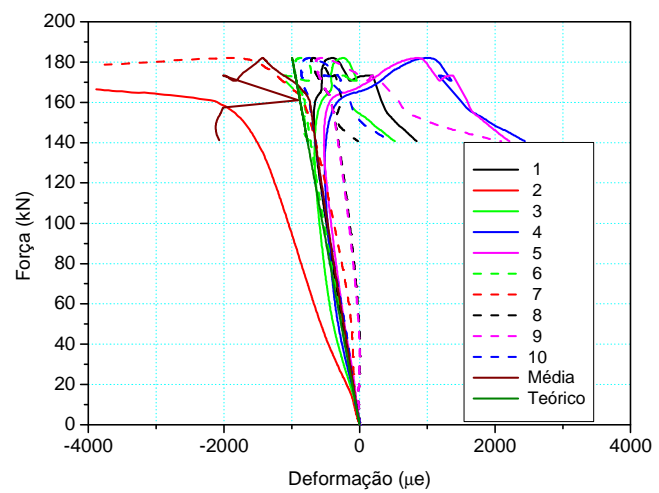
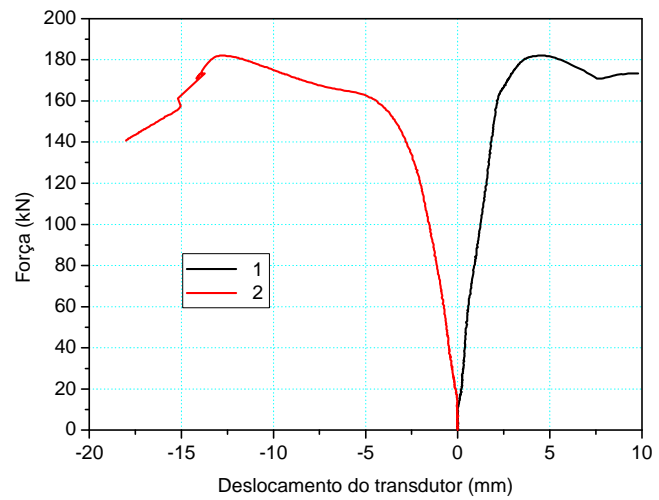
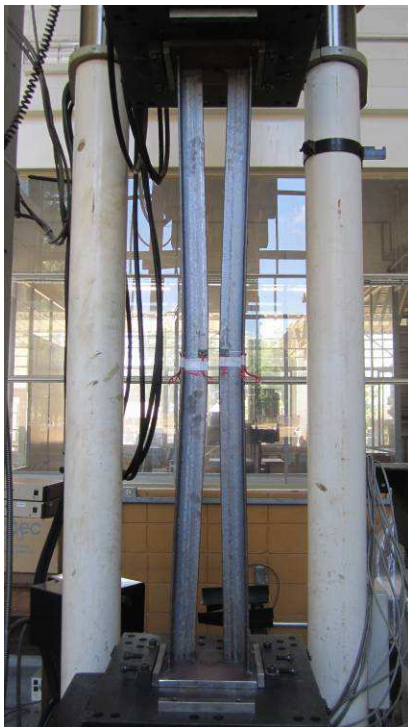
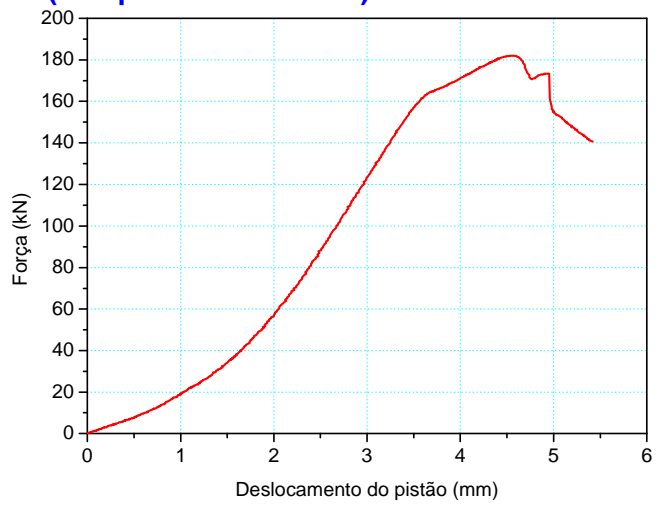


Transdutores
 Figura B.73 – Barra LL1200-3P



Transdutores
 Figura B.74 – Barra LL1200-4P

Perfil 2L 50x5 (2"x3/16")
Extremidades fixas (compressão centrada)



$$\text{Teórico: } \epsilon = \frac{N}{E.A}$$

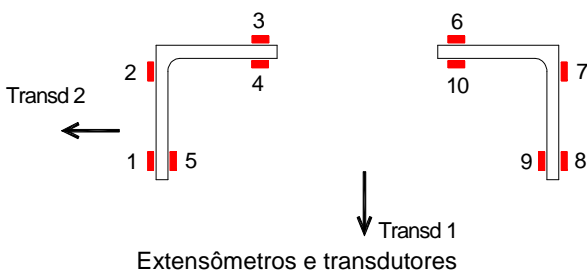
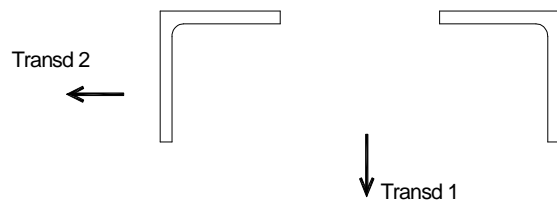
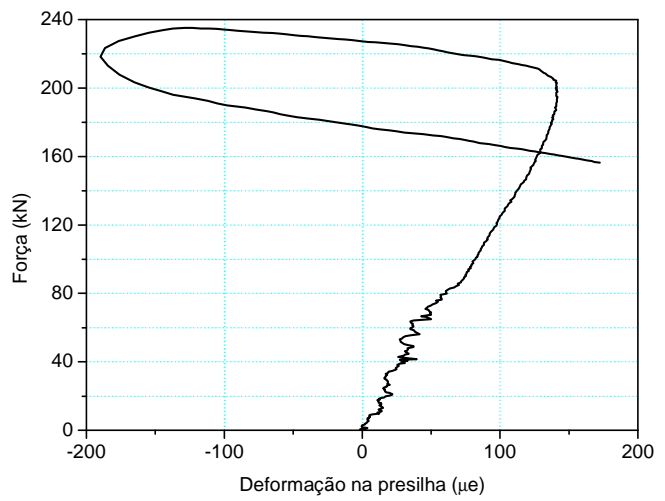
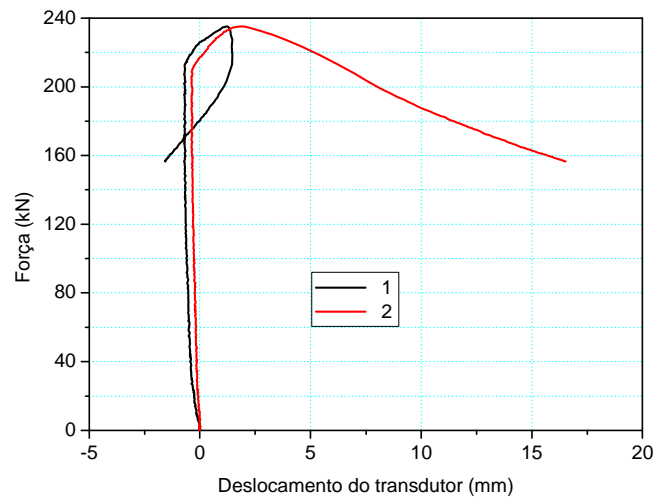
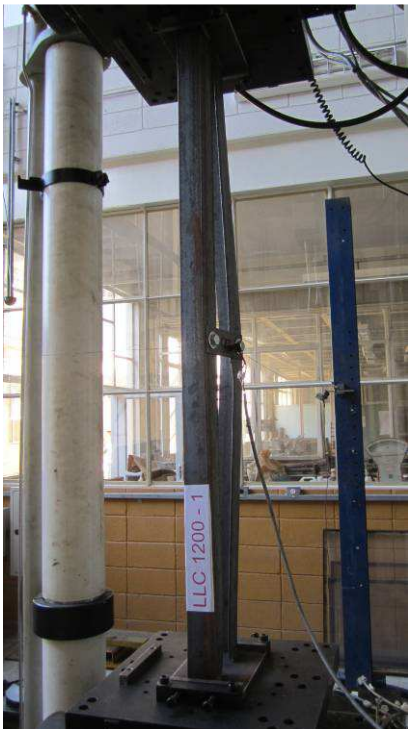
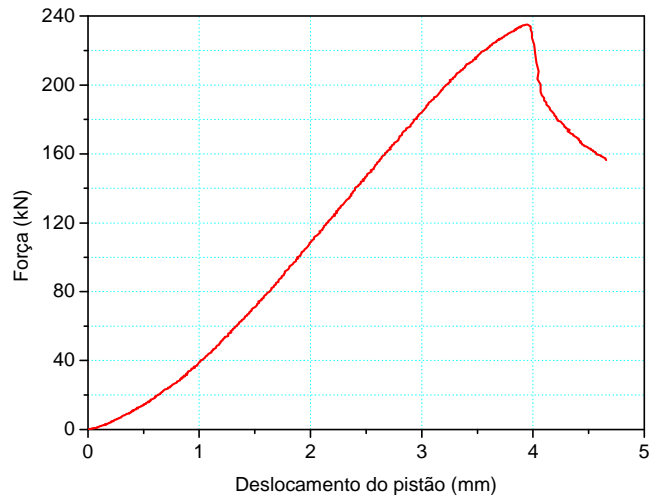
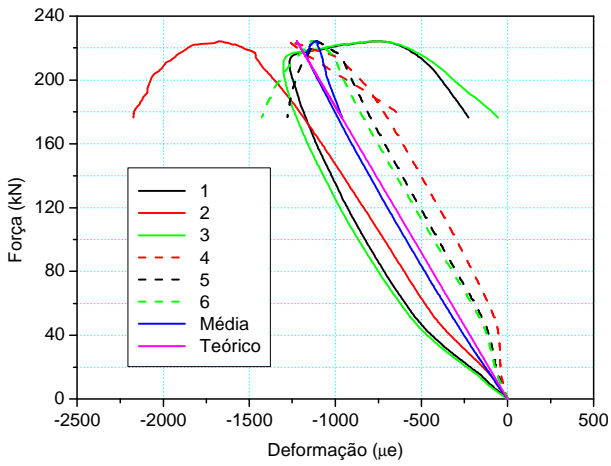
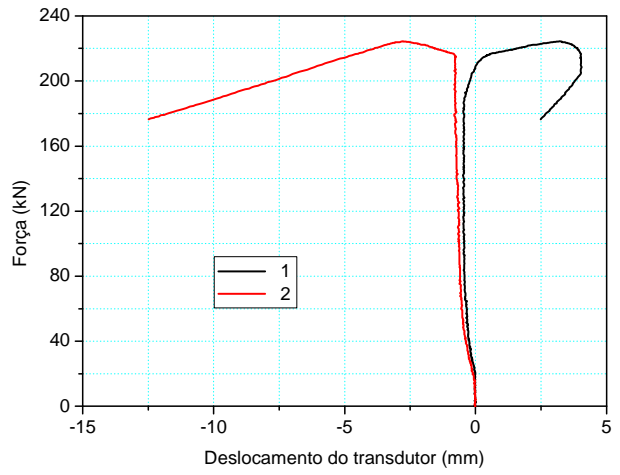
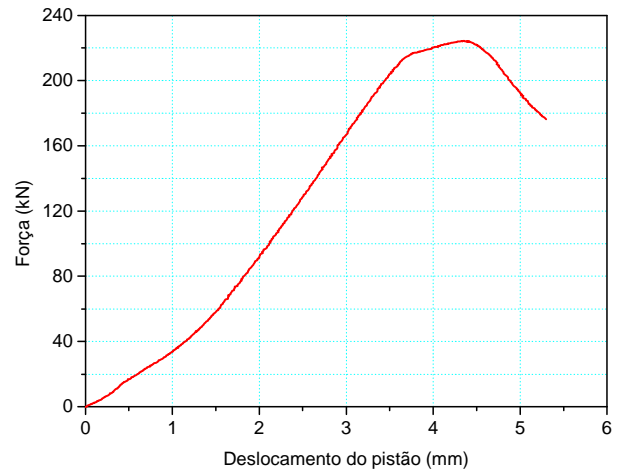
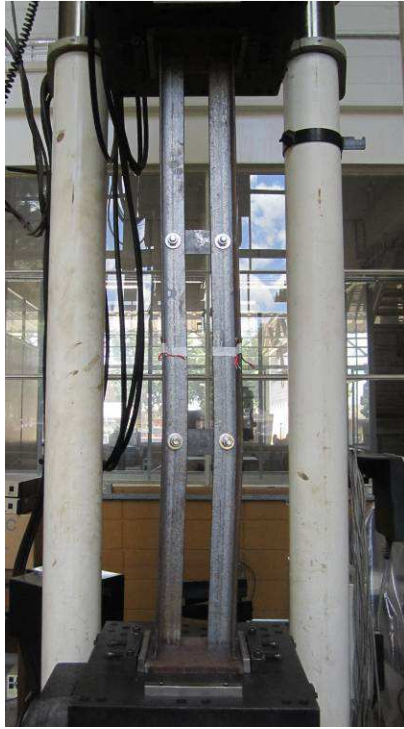


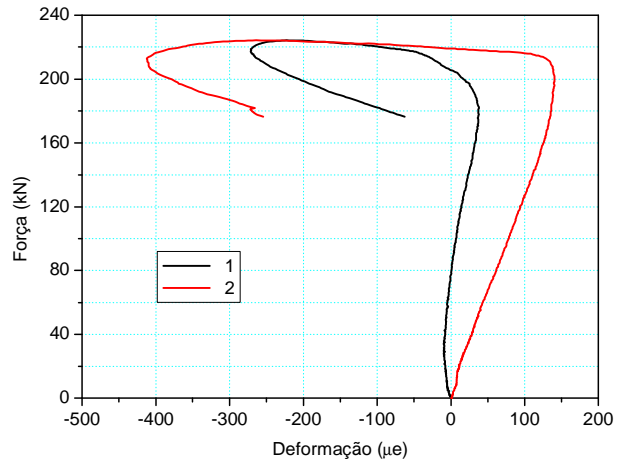
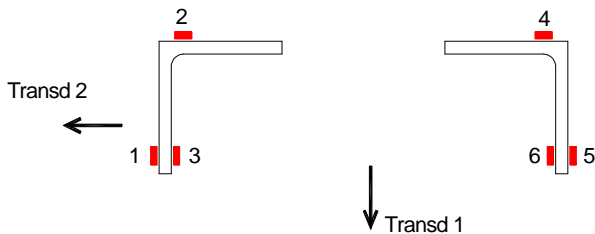
Figura B.75 – Barra LLC1200-0



Transdutores
 Figura B.76 – Barra LLC1200-1P

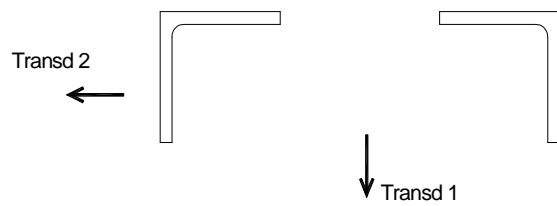
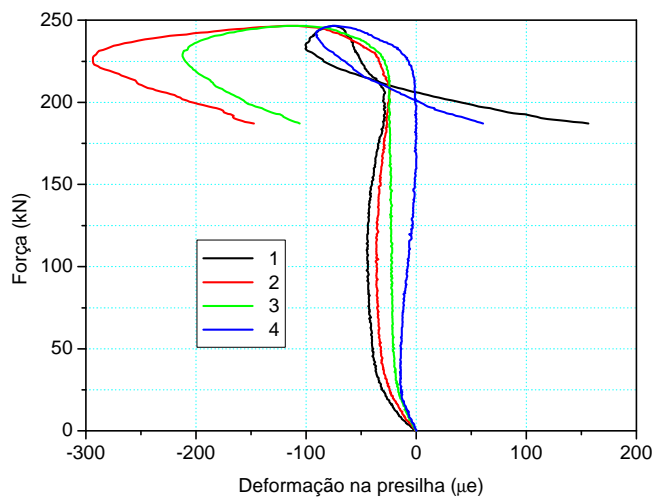
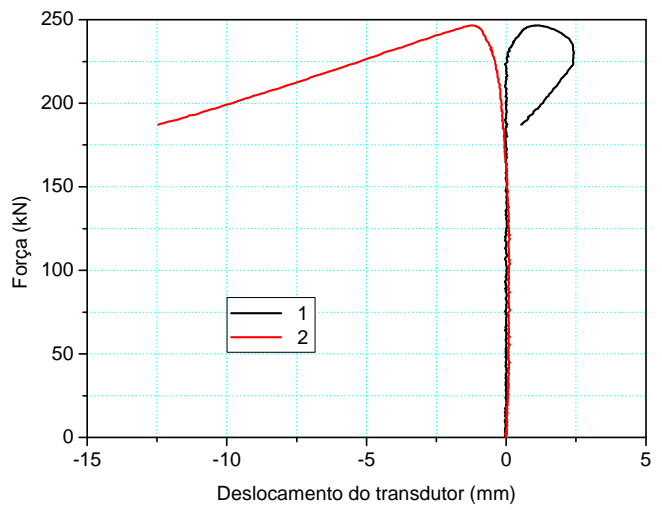
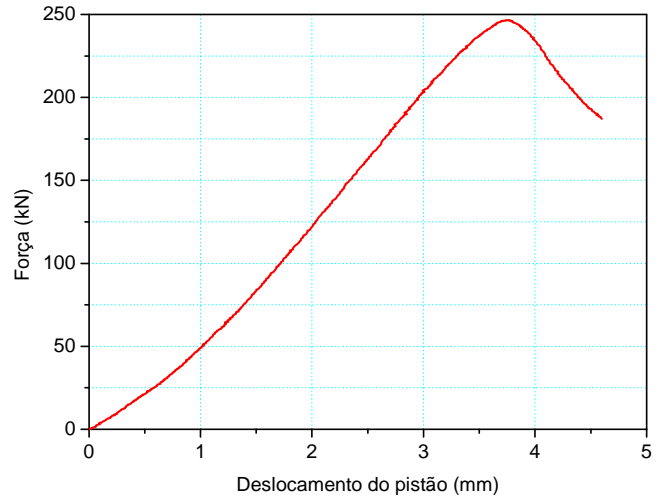


$$\text{Teórico: } \epsilon = \frac{N}{E.A}$$



Extensômetros e transdutores

Figura B.77 – Barra LLC1200-2P



Extensômetros e transdutores
 Figura B.78 – Barra LLC1200-4P