

## INTRODUÇÃO

### Generalidades

Nos últimos anos, a introdução ou revisão de normas estruturais de aço inoxidável em todo o mundo fez aumentar o interesse no uso de desse material na construção civil. Historicamente, o alto custo inicial do material limitou seu uso principalmente para aplicações específicas. No entanto, o surgimento de instruções normativas para a utilização com fins estruturais, uma melhor conscientização sobre os benefícios adicionais do aço inoxidável e uma transição para a sustentabilidade estão ampliando o uso do aço inoxidável em estruturas convencionais. A Figura 1 mostra a passarela Helix inaugurada em 2010 sendo a maior passarela de Cingapura, com 280m de comprimento com 2,4km de tubos de aço inoxidável, pesando cerca de 1700 toneladas [1].



Figura 1 - Passarela em Cingapura em perfil tubular de aço inoxidável [1]

No ano de 2017 foram produzidas 48 milhões de toneladas em aços inoxidáveis, correspondendo a taxa anual de crescimento da produção da ordem de

de 5,80%. Em escala mundial, no ano de 2017, da produção total do aço inoxidável, cerca de 53% foi consumido na China, como pode ser visto na Figura 2 [2].

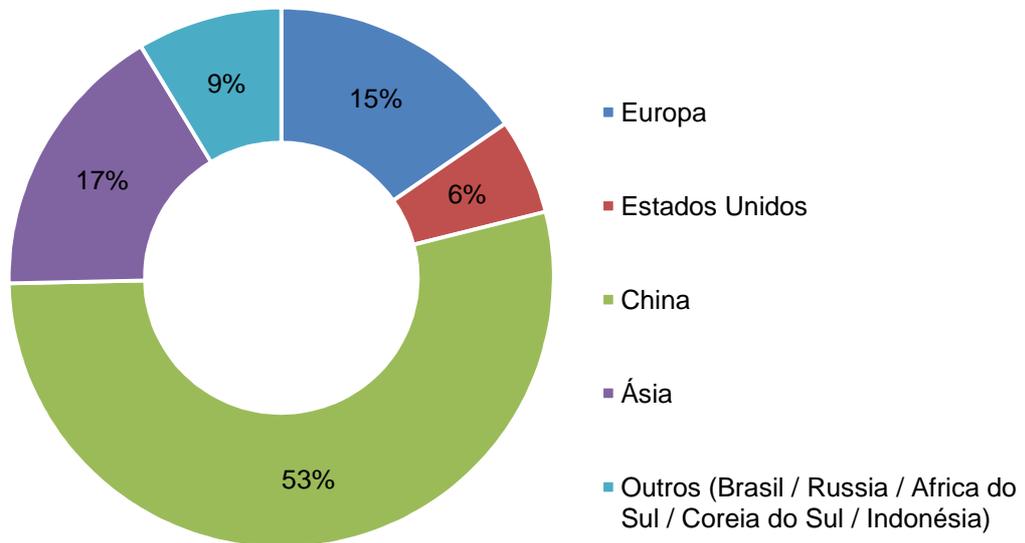


Figura 2 – Relação do consumo mundial do aço inoxidável em diversos setores [2]

Existe uma variedade de aços inoxidáveis que se diferenciam pela dosagem dos elementos adicionados na liga metálica. Este processo de dosagem visa a atender a necessidades específicas, como maior resistência à corrosão e melhorias nas propriedades mecânicas. As principais famílias do aço inoxidável, classificados segundo a sua microestrutura, são: ferríticos, austeníticos, martensíticos, duplex e endurecidos por precipitação. Dentre estes tipos de aços inoxidáveis apresentados, os três mais utilizados na engenharia estrutural são os austeníticos, ferríticos e duplex.

Austenítico é o mais utilizado dos aços inoxidáveis, pois apresenta elevada resistência à corrosão devido ao seu teor de cromo variando de 17% a 18%, combinado com as propriedades mecânicas (boa ductilidade e tenacidade), fatos que justificam o seu maior emprego na engenharia estrutural. O teor de níquel está entre 8% e 11% proporcionando uma boa soldabilidade aos aços austeníticos. Esta família de aço inoxidável pode conter outros elementos químicos tais como molibdênio de 2% a 6%, titânio ou nióbio, de modo a estabilizar a estrutura e o

enxofre, que é adicionado para melhorar sua usinagem. As barras de aço austenítico trabalhadas a frio podem apresentar leves características magnéticas, o que não está presente nas barras laminadas e soldadas. No comportamento mecânico, de maneira geral, as ligas austeníticas apresentam alta plasticidade e grande capacidade de encruamento, possibilitando, desta forma, sua utilização na fabricação de peças ou componentes metálicos nos quais é necessária a realização de deformação plástica.

Os aços inoxidáveis ferríticos contêm de 10,5% a 18% de cromo e um teor de carbono geralmente inferior a 0,08%, embora, por vezes, pode ser de até 0,15%. Os aços inoxidáveis ferríticos especiais possuem um teor de cromo superior a 29%. Estes aços podem conter outros elementos, tais como molibdênio em até 1,2%, titânio ou nióbio e enxofre, que são adicionados para melhorar a usinagem. Em termos de comportamento mecânico, a tenacidade é considerada de média a baixa e a sua capacidade de conformação é também classificada como relativamente reduzida, certamente em virtude de sua baixa capacidade de encruamento. Estes são geralmente os menos dúcteis, menos conformáveis e menos soldáveis dentre os aços inoxidáveis. Os aços inoxidáveis ferríticos demonstram em geral, boa resistência à corrosão, sendo inferiores quando comparados aos aços austeníticos. Observa-se no caso da resistência à corrosão, um bom desempenho em atmosferas urbanas e rurais, enquanto que em ambientes industriais e marinhos, a resistência à corrosão mostra-se insuficiente.

Os aços inoxidáveis duplex são caracterizados pela estrutura combinada ferrítica-austenítica, ou também denominada como austenoferríticos. Estes aços possuem um elevado teor de cromo de 20 a 25%, um teor baixo de níquel de 5 a 9%, um conteúdo variando de molibdênio de 0,2 a 3% e um baixo teor de carbono inferior a 0,06%. Os aços inoxidáveis duplex são magnéticos e podem ser soldados. Esta família de aço inoxidável possui uma combinação favorável das propriedades dos aços inoxidáveis austenítico e ferrítico, tais como boa resistência à corrosão, tenacidade e elevada resistência mecânica. Estas ligas representam atualmente uma importante classe de material, estando em expansão, e têm sido amplamente empregadas em diversos setores como, por exemplo, nas indústrias química, petroquímica e nuclear.

Os aços inoxidáveis diferem dos aços carbono em diversos aspectos, sendo o mais importante, a diferença no comportamento mecânico da curva tensão *versus*

deformação. O aço carbono apresenta tensão de escoamento menor quando comparados aos dos aço inoxidáveis duplex e o austenítico. Quando se trata de deformações o aço inoxidável apresenta valores superiores em relação ao aço carbono, conforme pode ser observado na Figura 3.

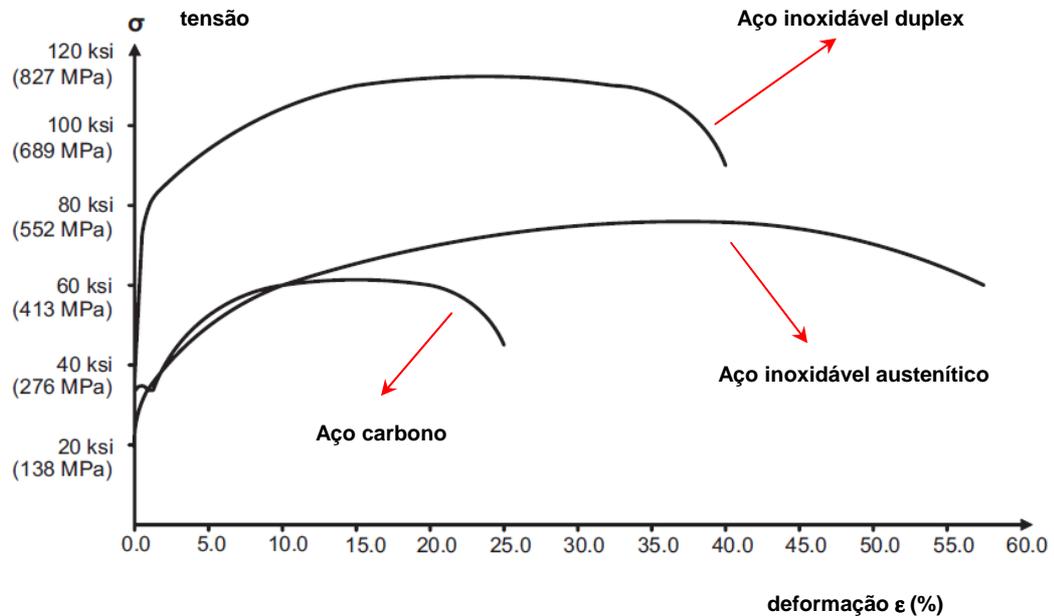


Figura 3 - Curvas tensão *versus* deformação para o aço carbono e os aços inoxidáveis austenítico e duplex [3]

### Colunas submetidas a compressão axial

Quando um elemento está submetida a compressão axial, a mesma pode apresentar ruína por escoamento ou por flambagem local ou global. Analisando a flambagem do tipo global, é comum considerar apenas o caso particular da flambagem global por flexão, que de maneira geral representa o efeito predominante, quando se trata de seções transversais simétricas. Entretanto, mesmo nestas seções, existem outros dois tipos de flambagem global que podem ocorrer, a flambagem por torção e a flambagem por flexo-torção, sendo este último, uma combinação do comportamento de torção e de flexão.

A flambagem por torção ocorre quando há uma coincidência na coordenada do centro de cisalhamento com o centro geométrico da seção transversal além da

possibilidade de torção da seção transversal em torno do eixo longitudinal. Com base nestas duas condicionantes ocorre a flambagem por torção permitindo concluir que o efeito de torção está relacionado a uma questão geométrica e às condições de contorno.

Existem algumas seções transversais em que os pontos do centro de cisalhamento não coincidem com o centro geométrico, e nestes casos, as seções transversais estão mais suscetíveis a flambagem por flexo-torção, como os exemplos da Figura 4.

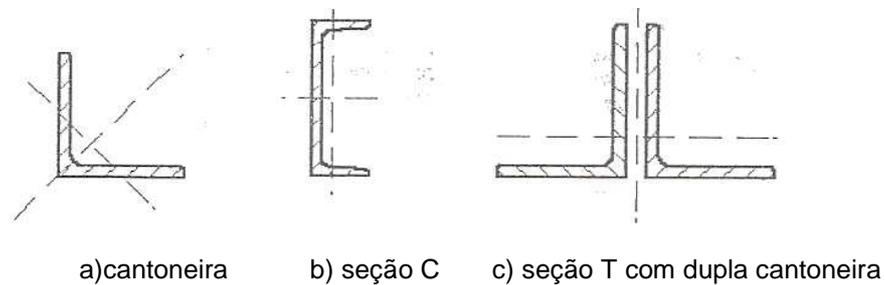


Figura 4 - Seções transversais de perfis laminados suscetíveis a flambagem por flexo-torção [4]

As possíveis variáveis que interferem no comportamento de barras comprimidas sujeitos à flambagem por flexo-torção são: seção transversal, condições de contorno associadas ao comprimento de flambagem. Na Figura 5 são apresentados os valores teóricos dos coeficientes de flambagem previstos na norma brasileira [5] e na literatura técnica.

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem						
Valores teóricos de $K_x$ ou $K_y$	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados	0,65	0,80	1,2	1,0	2,1	2,0

Figura 5 – Valores de  $k_x$  e  $k_y$  (coeficientes de comprimento efetivo de flambagem) [5].

## **Motivação**

Atualmente existem poucas publicações no meio técnico-científico sobre o comportamento estrutural de perfis laminados com seção aberta, com o modo de flambagem por flexo-torção, sendo o estado limite último (ELU) condicionante no dimensionamento. Outro assunto pouco explorado é o comportamento de elementos estruturais constituídos de seções tipo cantoneiras laminadas em aço inoxidável quando submetidos a uma carga axial de compressão. Estes dois aspectos somados formam o elemento motivador e o principal objetivo desta tese de doutorado. Acredita-se que os resultados apresentados nesta tese irão contribuir no meio técnico-científico para um melhor entendimento do comportamento estrutural de perfis laminados de seção aberta tipo cantoneira constituídos de aço inoxidável.

## **Objetivos**

Dentre os diversos objetivos desta tese, pode-se citar a realização de ensaios experimentais de cantoneiras laminadas em aço inoxidável e aço carbono, submetidas à compressão cujos resultados serão comparados com as recomendações de projeto estabelecidas pelo código europeu Eurocode 3, Parte 1-4 [6] e Eurocode 3, Parte 1-1 [7]. Com os resultados dos ensaios experimentais pode-se propor novos critérios para o dimensionamento em aço carbono e aço inoxidável.

## **Descrição do Trabalho**

A presente tese foi dividida em seis capítulos. Inicialmente, são apresentadas algumas considerações sobre o aço inoxidável e sua aplicação em estruturas reais de Engenharia Civil, a motivação, os principais objetivos além do escopo da mesma.

O capítulo um, após a introdução, é destinado à revisão bibliográfica. Neste são apresentados estudos baseados em estruturas em aços carbono e inoxidáveis,

e em conceitos relacionados às mesmas como a caracterização dos materiais, por exemplo.

O segundo capítulo apresenta uma avaliação do comportamento estrutural de cantoneiras quando utilizadas em elementos estruturais submetidos à compressão pura. Neste capítulo são discutidos os fenômenos decorrentes desta solicitação e como o código europeu, Eurocode 3, Parte 1-1 [7] e Eurocode 3, Parte 1-4 [6] os contempla, de modo a adequar o seu dimensionamento.

O terceiro capítulo descreve os ensaios experimentais realizados, a caracterização mecânica dos aços carbono e inoxidável utilizados, assim como a instrumentação adotada para a coleta de informações pertinentes.

O capítulo quatro apresenta os resultados obtidos nos ensaios à compressão axial das colunas constituídas de cantoneiras em aços carbono e inoxidável.

No quinto capítulo são realizadas as comparações dos resultados obtidos nos ensaios experimentais com as recomendações de dimensionamento preconizadas pelo Eurocode 3, Parte 1-1 [7] e Eurocode 3, Parte 1-4 [6].

Por fim, o sexto capítulo apresenta as conclusões da tese além de sugestões para trabalhos futuros.

## 1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o objetivo de situar o assunto e mostrar a evolução das pesquisas no âmbito de elementos estruturais constituídos de cantoneiras, o presente capítulo apresenta os trabalhos mais relevantes publicados em meios científicos, dissertações de mestrado e teses de doutorado sobre o comportamento de cantoneiras sujeitas a carga axiais centradas sejam em aço carbono ou em aço inoxidável. Além disso, são também apresentados alguns trabalhos que abordam a caracterização do material aço inoxidável.

### 1.1. Resultados Experimentais em Aço Carbono

Em 1986, Kitipornchai & Lee [8] realizaram uma investigação do comportamento de cantoneiras com abas iguais e desiguais sujeitas ao fenômeno de flambagem. Os autores analisaram um total de 13 tipos diferentes de seção transversal de cantoneiras. As colunas possuíam uma variação no índice de esbeltez normalizado ( $\bar{\lambda}$ ) de 0,33 a 1,08. As condições de contorno das extremidades das barras foram preparadas para que tivessem liberdade de rotação em um dos eixos e restrição à torção longitudinal ao longo do seu eixo. A Tabela 1 apresenta o resultado médio dos ensaios experimentais, teóricos no regime inelástico e também as cargas máximas definidas por algumas normas específicas de aço carbono como a norma australiana AS1250 [9] e a americana AISC360 [10]. Analisando a Tabela 1 pode-se observar que os resultados experimentais possuem valores sempre acima dos teóricos e das cargas máximas de norma. Também nota-se na Tabela 1 que as cantoneiras com abas desiguais apresentam comportamento de flambagem por flexo-torção.

No ano de 1989, Al-Sayed & Bjorhorvde [11] publicaram um trabalho baseado na análise experimental de cantoneiras em aço carbono com abas iguais e desiguais, submetido a uma carga de compressão, condições semelhantes às usadas por Kitipornchai & Lee [8]. Com o objetivo de ter resposta para falhas ocorridas no regime elástico e inelástico, optou-se por variar o índice de esbeltez das

amostras e da relação entre a largura e a espessura das cantoneiras. O sistema de apoios adotado nos ensaios foi rotulado em uma direção (eixo de menor inércia) e o impedimento a rotação longitudinal.

Tabela 1- Apresentação dos resultados experimentais de Kitipornchai & Lee [8].

Seção (mm)	$\lambda$	Comp. efetivo (mm)	$P_{ex}$ (kN)	$P_{teórica}$ em kN			$P_{AS1250}$ (kN)	$P_{AISC}$ (kN)	Modo de falha
				flexão	flexo-torção	flamb. local			
64x64x5	0,57	600	163	160	182	164	154	159	F
64x64x5	0,66	700	169	157	180	164	154	155	F
76x76x5	0,67	850	182	190	217	192	187	182	F
76x76x5	0,79	1000	167	182	213	192	179	173	F
76x76x5	0,87	1100	161	178	209	192	165	167	F
102x102x6,5	0,75	1310	295	293	345	313	289	286	F
102x102x6,5	0,80	1400	283	290	343	313	276	279	F
64x51x5	0,75	700	141	130	128	140	127	127	FT
64x51x5	0,97	900	135	119	116	140	102	114	FT
76x51x5	0,86	800	143	147	140	147	137	131	FT
76x51x5	1,08	1000	123	136	129	147	107	118	FT
102x76x6,5	0,86	1200	277	261	255	272	242	240	FT
102x76x6,5	1,07	1500	190	241	235	272	189	214	FT

Onde:  
 FT – flambagem por flexo-torção  
 F – flambagem por flexão.

Todos os ensaios experimentais de Al-Sayed & Bjorhorvde [11] mostraram que a relação entre  $P/P_y$  (carga aplicada / carga de escoamento) e a deformação axial inicialmente é linear, tornando-se cada vez mais não-linear quando a carga aplicada aproxima-se da carga  $P_y$ . Isto ocorre devido ao efeito combinado das tensões residuais e o aumento da deflexão provocando escoamento localizado na seção transversal. Os testes também demonstraram que as colunas longas poderiam manter grandes deslocamentos depois de atingir a capacidade máxima, sem qualquer diminuição significativa da carga aplicada. Os extensômetros foram instalados no sentido transversal da cantoneira para que indicasse o aparecimento de alguma deformação transversal característica típica do efeito de flambagem local. No entanto, não houve evidência desta instabilidade. A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios experimentais, das resistências teóricas de flexão e flexo-torção e também o tipo de comportamento obtido nos ensaios experimentais. Pode-se observar que para as cantoneiras com abas desiguais, o modo de falha

predominante foi a flambagem por flexo-torção, reforçando o comportamento semelhante ao apresentado por Kitipornchai & Lee [8].

Tabela 2 – Resultados experimentais de Al-Sayed & Bjorhorvde [11] e teóricos.

Seção (mm)	L/r efetivo	P <sub>Ex</sub> (kN)	P <sub>teórica</sub> (kN)		Modo de falha
			flexão	flexo-torção	
76x76x10	49,40	418,74	402,06	394,49	FT
76x76x10	103,27	230,51	249,20	249,20	F
76x76x10	156,30	103,77	108,36	108,36	F
127x76x10	44,34	510,86	543,79	516,20	FT
127x76x10	99,77	303,49	357,78	320,85	FT
127x76x10	140,29	161,89	189,13	180,22	FT
127x127x10	81,18	501,38	562,92	498,18	FT
127x127x10	111,87	320,40	356,00	356,00	F
127x127x10	154,80	178,53	184,67	184,67	F
101x101x16	112,84	428,09	465,02	465,02	F
101x101x16	150,03	232,56	267,00	267,00	F
152x101x20	1200	366,01	416,07	400,50	FT
Onde: FT – flambagem por flexo-torção F – flambagem por flexão.					

Adluri & Madugula [12] no ano de 1996 apresentaram um estudo sobre o comportamento de cantoneiras de abas iguais submetidas a cargas de compressão centrada e verificaram que em todos os ensaios, a instabilidade estrutural foi caracterizada pela flambagem por flexão. Um total de 26 cantoneiras laminadas a quente foram testadas sendo este um número maior de amostras se comparado com as 13 amostras do trabalho de Kitipornchai & Lee [8] e as 12 amostras de Al-Sayed & Bjorhorvde [11]. Foi coberto um espectro de b/t de 6 a 16 com esbeltezas variando de 68 a 188 cobrindo quase a totalidade de situações práticas de projeto. Em ambas as extremidades adota-se o sistema de apoio semelhante ao adotado nos trabalhos de Kitipornchai & Lee [8] e Al-Sayed & Bjorhorvde [11].

Em 1996 Adluri & Madugula [13] com base nos resultados apresentados por eles no mesmo ano, publicam um trabalho sobre a curva de flambagem a flexão para cantoneiras de abas iguais. Na investigação, os autores concluíram que a curva 2 - SSRC [14] é a curva mais próxima do comportamento real das cantoneiras, conceito igualmente observado no trabalho de Kitipornchai & Lee [8]. A média entre as cargas previstas e os resultados experimentais foi da ordem de 0,80 com um

desvio padrão de 0,11. Os autores descrevem também nesse trabalho, a influência das imperfeições iniciais nas cantoneiras. O valor médio da imperfeição inicial avaliada para todas as cantoneiras foi de  $L/1500$ .

Outro trabalho foi apresentado por Kitipornchai [15] sobre a flambagem global e flambagem por flexo-torção para cantoneiras, com base em características geométricas como o  $\alpha=B_2/B_1$ ,  $\beta=B_1/T$  e  $\lambda=L/B_1$  de acordo com a Figura 6.

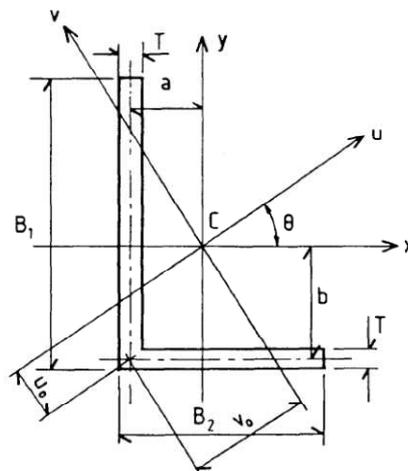


Figura 6 – Parâmetros geométricos [15].

A relação das dimensões transversais das cantoneiras é representada por  $\alpha$ , como foi citado anteriormente. Com estes parâmetros Kitipornchai [15] publica no seu artigo, os gráficos da Figura 7, sendo  $P_e/P_v$  a ordenada dos gráficos que corresponde a relação entre a carga elástica para a flambagem por flexo-torção ( $P_c$ ) com cargas de flambagem por flexão sobre o menor eixo principal ( $P_v$ ). As curvas  $\beta$  do gráfico são referentes à relação entre a maior largura da cantoneira com a sua espessura. Observa-se pelo gráfico da Figura 7(a) que a deformação da flexo-torção é mais significativa para colunas curtas e com elevada esbeltez. Para as cantoneiras com a relação  $\alpha$  igual a 1, ou seja cantoneiras de abas iguais, a deformação por flexo-torção é adequada para valores de  $\alpha$  superiores a 20.

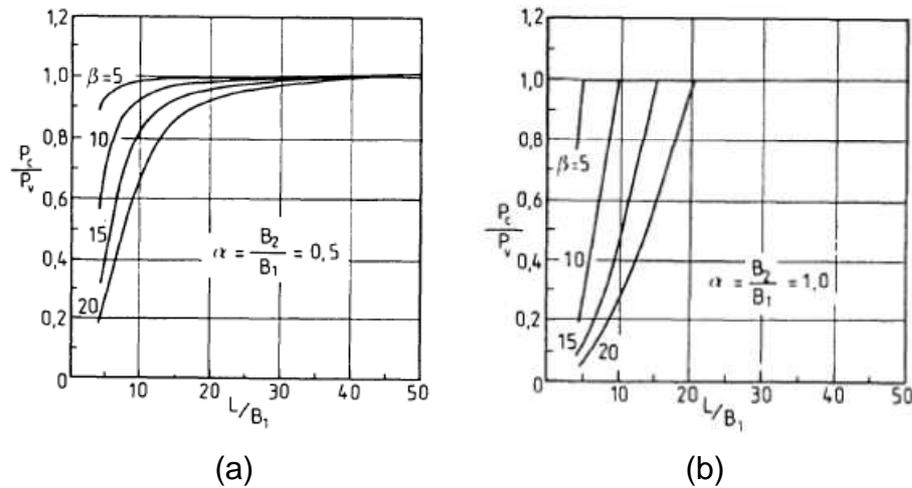


Figura 7 – Comportamento de flambagem para cantoneiras de abas desiguais (a) e para cantoneiras de abas iguais (b).

## 1.2. Caracterização do Material Aço Inoxidável

No ano de 1943, Ramberg-Osgood [16] propõem uma expressão com o intuito de gerar uma curva que representasse a caracterização tensão *versus* deformação do aço inoxidável. No ano de 1944 [17], Hill modifica a expressão de Ramberg-Osgood dada pela equação (1) introduzindo a constante  $n$  definida pela equação (2). Isto pode ser melhor visto na Figura 8 [18].

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + 0,002 \left( \frac{\sigma}{\sigma_{0,2}} \right)^n \quad (1)$$

$$n = \frac{\ln(20)}{\ln(\sigma_{0,2}/\sigma_{0,01})} \quad (2)$$

onde:

$\varepsilon$  é a deformação;

$\sigma$  tensão;

$E_0$  módulo de Young;

$\sigma_{0,2}$  tensão a 0,2% da plastificação;

$\sigma_{0,01}$  tensão a 0,01% da tensão de plastificação.

Analisando o gráfico da Figura 8, verifica-se que as equações (1) e (2) fornecem bons resultados com valores de tensão correspondentes a uma deformação de 0,2 pois elas superestimam significativamente as tensões para além deste limite. Esta observação levou Mirambell e Real [19] em 2000 a propor uma nova formulação para expressar a curva tensão *versus* deformação do aço inoxidável com duas novas equações. A primeira equação (3) mantém a que foi proposta por Hill em 1944 representando o comportamento da curva para valores menores ou iguais a 0,2% da tensão resistente e a segunda para valores maiores que 0,2% da tensão resistente - equação (4). A curva obtida com estas equações está representada na Figura 9.

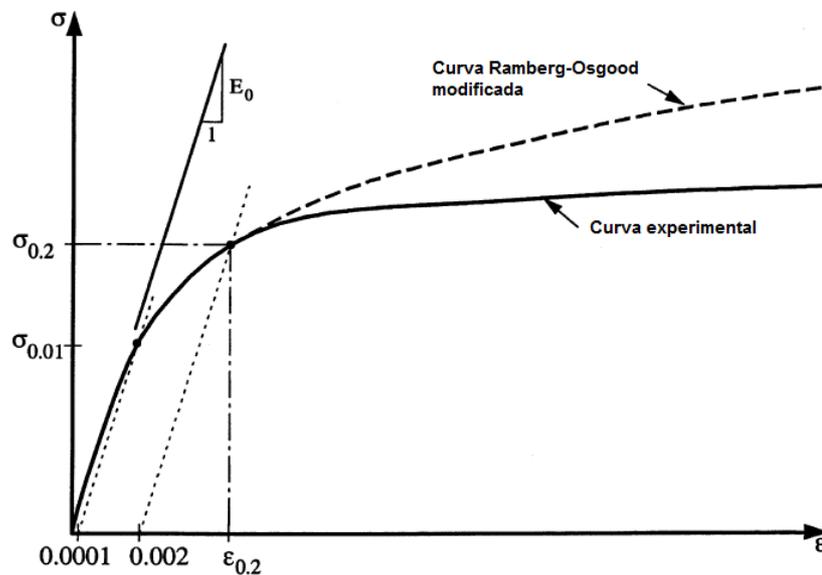


Figura 8 – Curva típica do aço inoxidável e curva da equação proposta por Ramberg-Osgood modificada por Hill [18][16]

$$\varepsilon = \frac{\sigma_{0,2}}{E_0} + 0,002 \left( \frac{\sigma}{\sigma_{0,2}} \right)^n \quad (3)$$

para  $\sigma \leq \sigma_{0,2}$

$$\varepsilon = \frac{(\sigma - \sigma_{0,2})}{E_{0,2}} + \left( \varepsilon_u - \varepsilon_{0,2} - \frac{(\sigma_u - \sigma_{0,2})}{E_{0,2}} \right) \left( \frac{\sigma - \sigma_{0,2}}{\sigma_u - \sigma_{0,2}} \right)^n + \varepsilon_{0,2} \quad (4)$$

onde:

$E_{0,2}$  é módulo de elasticidade a 0,2% da deformação;

$\varepsilon_u$  deformação última;

$\epsilon_{0,2}$  deformação a 0,2%;  
 $\sigma_u$  tensão última.

As curvas tensão *versus* deformação da Figura 9 representam os resultados experimentais de uma viga em aço inoxidável submetida a flexão. Pode-se concluir pelo gráfico da Figura 9 que as equações propostas por Mirambell e Real [19] possuem uma boa correlação com os resultados experimentais.

Em 2003, Rasmussen [18] analisou o comportamento dos aços inoxidáveis austenítico, ferrítico e duplex e sugeriu a equação (5), comparando esta equação com a equação (4). Pode-se observar que houve uma redução nos parâmetros da equação (5). Rasmussen [18] também propôs que determinados parâmetros da equação (5) estejam relacionados com o tipo de aço inoxidável, ver equação (8).

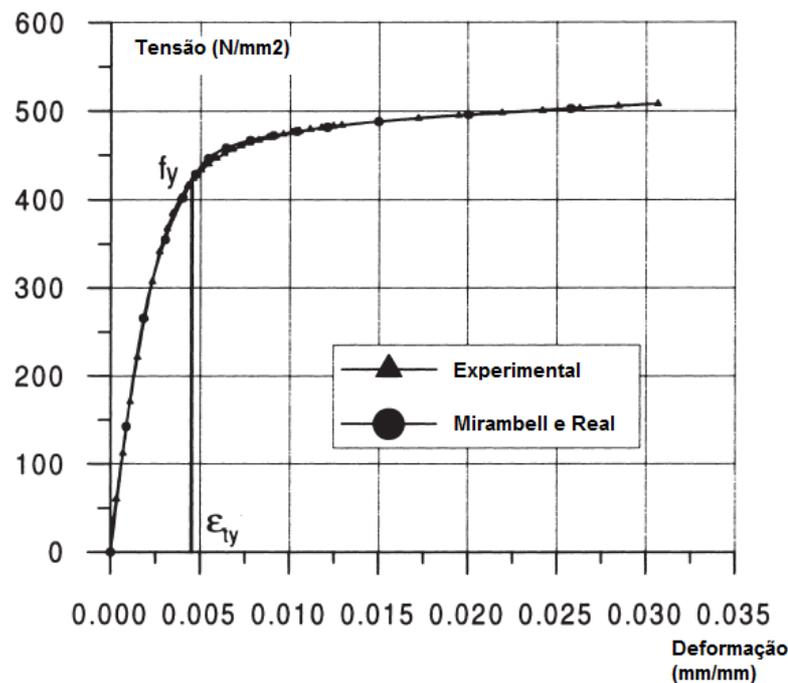


Figura 9 - Curva tensão-deformação para resultados experimentais e para a equação proposta por Mirambell e Real [19]

$$\epsilon = \frac{(\sigma - \sigma_{0,2})}{E_{0,2}} + \epsilon_u \left( \frac{\sigma - \sigma_{0,2}}{\sigma_u - \sigma_{0,2}} \right)^m + \epsilon_{0,2} \quad (5)$$

para  $\sigma > \sigma_{0,2}$

onde,

$$\varepsilon_u = 1 - \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_u} \quad (6)$$

$$m = 1 + \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_u} \quad (7)$$

$$\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_u} = \begin{cases} 0,2 + 185 \frac{\sigma_{0,2}}{E_0} & \text{para aço austenítico e} \\ & \text{duplex} \\ 0,2 + 185 \frac{\sigma_{0,2}}{E_0} & \text{para as demais ligas de aço} \\ \frac{\quad}{1 - 0,0375 (n - 5)} & \text{inoxidável} \end{cases} \quad (8)$$

O gráfico da Figura 10 indica uma boa correlação com os resultados experimentais, apresentando uma relação linear para os aços inoxidáveis austenítico e duplex. Também se observa que no gráfico da Figura 10, o aço inoxidável ferrítico, ao contrário dos outros dois aços inoxidáveis, não apresenta um comportamento linear, pois os valores de  $n$  para os aços ferríticos são superiores aos dos aços austenítico e duplex. O comportamento do aço inoxidável é descrito no anexo C do Eurocode 3, Parte 1-4 [6] com base nas equações (5) a (8) propostas por Rasmussen [18].

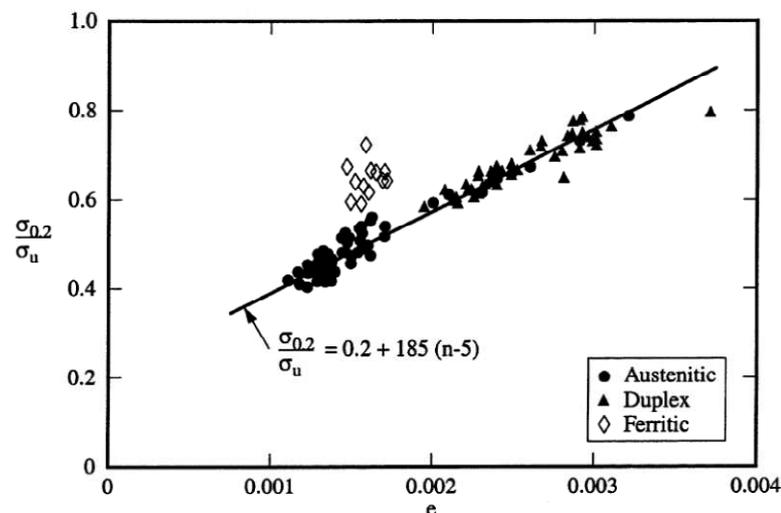


Figura 10 - A relação  $\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_u}$  versus deformação  $\frac{\sigma_{0,2}}{E_0}$  [18].

### 1.3. Resultados Experimentais em Cantoneiras em Aços Inoxidáveis

Assim como realizado anteriormente para o aço carbono, este item concentrar-se-á na apresentação dos resultados de ensaios realizados em cantoneiras em aço inoxidável.

No ano de 2013, Reynolds [20] publica na sua tese de doutorado, os resultados do comportamento de cantoneiras soldadas em aço inoxidável duplex. Foram ensaiadas um total de 33 cantoneiras de abas iguais com variação na esbeltez entre 35 a 350. Os ensaios de compressão foram realizados com três tipos de cantoneiras. Os seus apoios tiveram liberdade de rotação no eixo de menor inércia e impedimento de rotação ao longo do seu eixo longitudinal. Os resultados dos testes experimentais de flambagem estão apresentados no gráfico da Figura 11, juntamente com as curvas de flambagem por flexão usando os módulos de elasticidade  $E_t$  e  $E_o$ . A tensão normal experimental  $\sigma_{exp}$  é a relação entre a carga máxima e à área de corte transversal ( $P_{EXP}/A$ ) onde a força  $P_{EXP}$  é a carga máxima atingida durante os testes para cada amostra. Comparando-se os resultados do gráfico da Figura 11, as barras que se deformaram a flexão mostram um bom comportamento com a curva de flambagem a flexão calculada utilizando o módulo tangente. A flambagem por flexo-torção não pôde ser analisada devido ao limitado número de respostas, necessitando neste caso, de mais estudos para melhor avaliar este estado limite último.

Afshan e Gardner [21] desenvolveram o Método da Resistência Contínua (CSM – Continuous Strength Method) que leva em consideração, os níveis de deformação, a não linearidade da curva tensão *versus* deformação do aço inoxidável e o acréscimo de resistência associados a estes fatores, principalmente as características de encruamento tão presentes nos aços inoxidáveis austeníticos.

Em 2017, Menezes [22] realizou ensaios de treze cantoneiras laminadas em aço inoxidável austenítico de seção L64x64x6,35 e comprimento variável de 250mm a 1500mm. O modo de ruína apresentado pelas colunas foi de flambagem local das abas das cantoneiras para comprimentos menores ou iguais a 750mm e flambagem por flexão para as demais. Também se observa que para valores de esbeltez normalizada menores que 0,65, o critério de cálculo preconizado pelo Eurocode 3, Parte 1-4 [6] é conservador e que para valores acima deste está contra a segurança.

Já o Método da Resistência Contínua (CSM) [21] mostrou ser contra a segurança para o caso de colunas de perfis laminados de aço inoxidável, como visto na Figura 12.

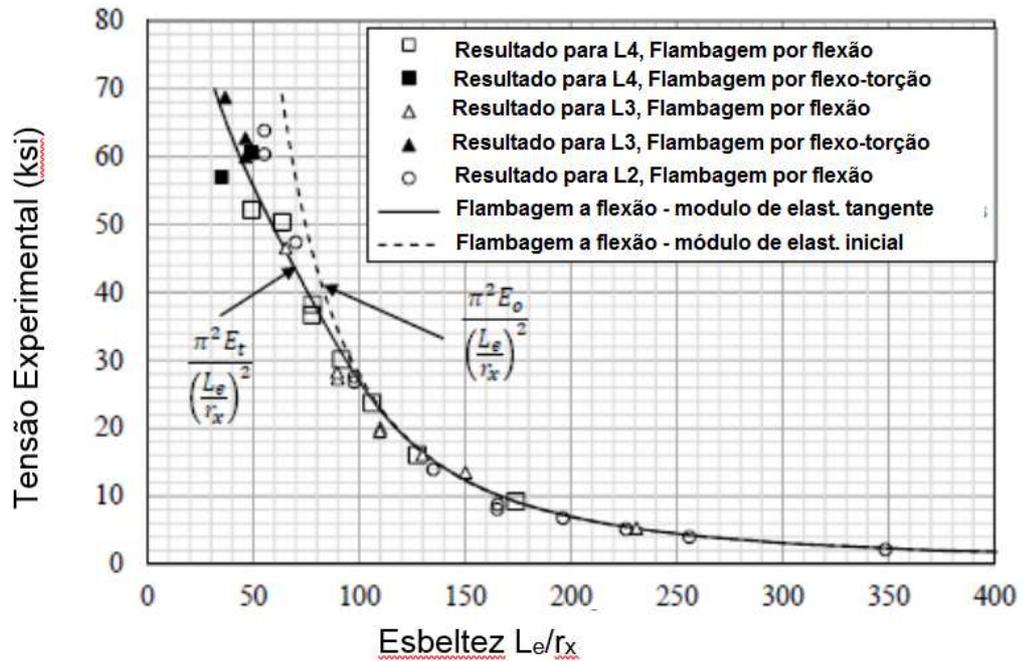


Figura 11 – Curva experimental para cantoneiras de abas iguais [20].

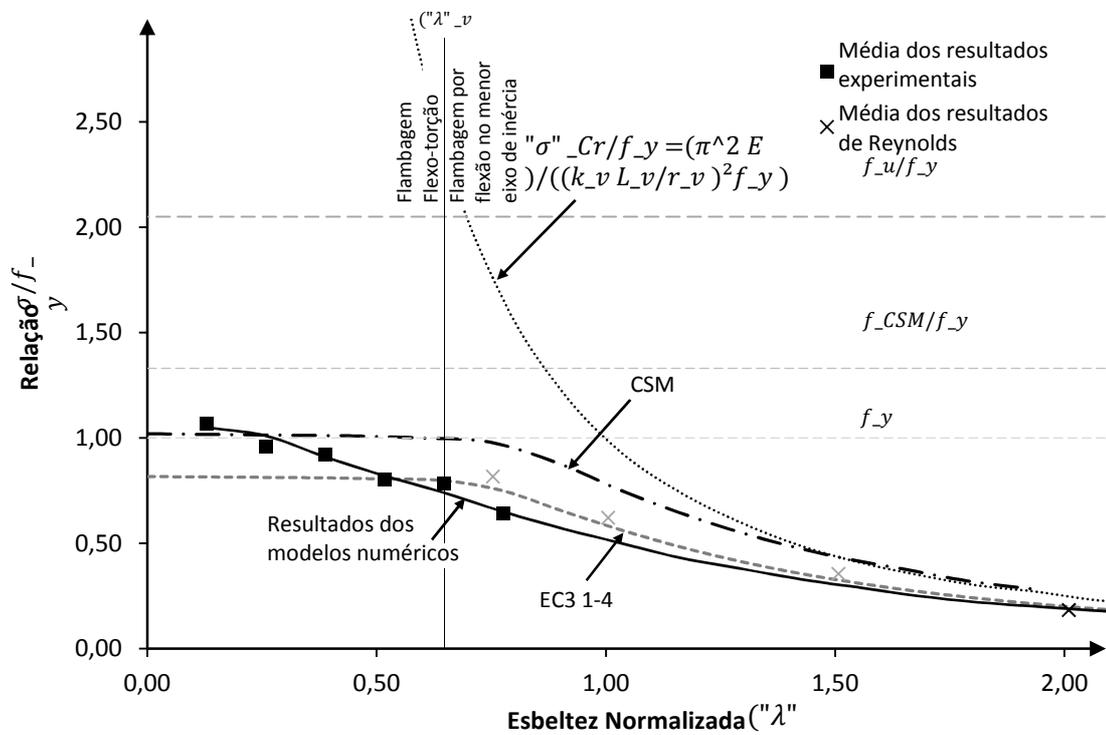


Figura 12 – Comparação entre os métodos de cálculo [22].

O comportamento dos perfis de aço inoxidável em compressão não é um tema novo, mas a maioria das pesquisas está centrada nas seções formadas a frio. Para estas seções, os resultados muitas vezes consideram o encruamento e a interação entre modos de flambagem local e global. Há um número reduzido de trabalhos para casos de flambagem por flexo-torção de seções em aços inoxidáveis, que está atualmente limitado às seções formadas a frio, como pode ser visto nos trabalhos de Ashraf [23] e Rasmussen [24].

Esta revisão da literatura existente revelou que os dados são insuficientes para recomendações de projeto a serem feitas para elementos estruturais caracterizados por seções transversais tipo cantoneira em aços inoxidáveis. Desta forma, verifica-se a necessidade de se realizar uma investigação sobre as cantoneiras em aço inoxidável submetidas a compressão axial, para um melhor entendimento do comportamento dos diversos modos de flambagem e as suas vantagens associadas. A investigação realizada nesta tese dar-se-á por meio da realização de ensaios experimentais, sendo este o foco principal da presente tese.

## 2. DIMENSIONAMENTO DE CANTONEIRAS SUBMETIDAS A COMPRESSÃO CENTRADA

Este capítulo apresenta os conceitos necessários ao dimensionamento de colunas caracterizadas por seção transversal tipo cantoneira evidenciando os fenômenos de flambagem local, global por flexão, por torção e por flexo-torção. Os elementos estruturais como escoras e colunas são os elementos mais suscetíveis a estes tipos de instabilidade. A flambagem de colunas pode ocorrer de duas maneiras distintas: a global ou a local. A global representa a flambagem do elemento estrutural como um todo, enquanto a flambagem local representa o colapso dos elementos individuais que compõe a seção transversal do elemento estrutural analisado.

A flambagem global pode se manifestar sob três formas: flambagem por flexão, por torção e por flexo-torção. A flambagem por flexão é predominante em elementos com seção transversal fechada, a flambagem por torção, ocorre em elementos com seção transversal aberta contendo pequenas espessuras e que também apresentam uma rigidez torsional pequena. O último tipo de flambagem global é a por flexo-torção que ocorre em elementos onde os centros de cisalhamento e de gravidade não coincidem.

### 2.1. Modo de Flambagem por Flexão

A flambagem por flexão é caracterizada pelo movimento do corpo rígido da seção transversal em resposta ao deslocamento transversal do eixo longitudinal da barra, o qual assume uma flexão. Trata-se da ocorrência de flexão em torno de um dos eixos principais de inércia da seção transversal devido a um esforço de compressão maior do que o esforço crítico ou carga de Euler - ver equação (9).

A Figura 13 ilustra um caso geral de flambagem elástica por flexão de uma cantoneira simples com carga centrada de valor igual a  $N$ .

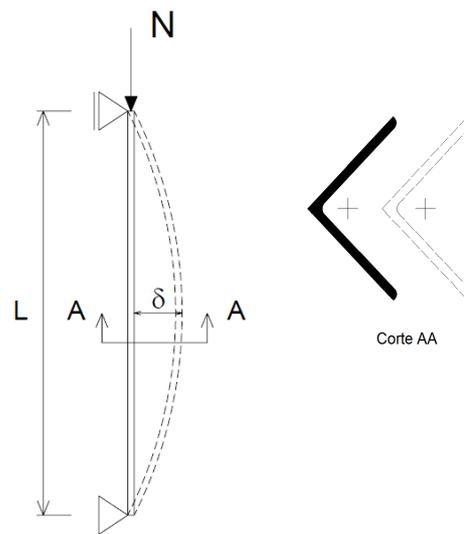


Figura 13 - Flambagem por flexão de uma cantoneira.

Considerando-se o caso da flambagem por flexão no regime elástico, na qual as tensões atuantes não ultrapassam a tensão elástica, as forças normais críticas  $N_{ex}$  e  $N_{ey}$  são deduzidas pela equação clássica de Euler, conforme as equações (9) e (10).

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(k_x L_x)^2} \quad (9)$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(k_y L_y)^2} \quad (10)$$

onde:

$I_x$  é o momento de inércia da seção bruta em relação ao eixo principal x;

$I_y$  é o momento de inércia da seção bruta em relação ao eixo principal y;

$E$  é o módulo de elasticidade longitudinal do aço;

$N_{ex}$  e  $N_{ey}$  são as cargas normais de flambagem elástica a flexão na direção dos eixos x e y, respectivamente.

$L_x$  e  $L_y$  são os comprimentos da barra por flexão originais do elemento na direção do eixo x e y, respectivamente.

$k_x$  e  $k_y$  são os coeficientes de comprimento efetivo de flambagem por flexão na direção dos eixos x e y, respectivamente.

## 2.2. Modo de Flambagem a Torção

Os elementos estruturais submetidos à compressão centrada em seções transversais fechadas possuem elevada rigidez à torção. No entanto, considerando o mesmo tipo de carregamento  $N$ , como ilustrado na Figura 14 para seções transversais abertas com ou sem simetria, a flambagem por torção pode passar a controlar a resistência do elemento estrutural. Este fenômeno de instabilidade é caracterizado pela rotação da seção transversal em torno do seu centro de torção, sem sofrer deslocamento no plano da mesma - ver Figura 14.

A carga máxima que provoca a flambagem por torção é dada pela equação (11).

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 EC_w}{(k_z L_z)^2} + GI_t \right] \quad (11)$$

onde:

$N_{ez}$  é a carga normal de flambagem elástica a torção;

$r_0$  é o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção;

$L_z$  é o comprimento de flambagem por flexão original do elemento no eixo z;

$k_z$  é o coeficiente que altera o comprimento efetivo de flambagem por flexão no eixo z para considerar diferentes condições de apoio diferentes da simplesmente apoiada;

$C_w$  é a constante de empenamento da seção transversal;

$I_t$  é a constante de torção de Saint Venant da seção transversal;

$G$  é o módulo de elasticidade transversal do aço;

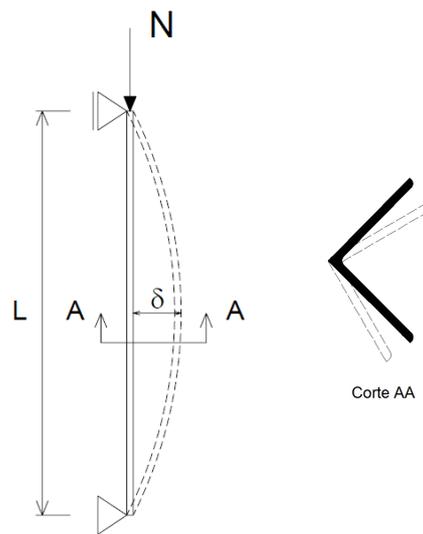


Figura 14 – Flambagem por torção de uma cantoneira.

### 2.3. Modo de Flambagem por Flexo-Torção

Este item concentra-se na ideia de um elemento sob esforço axial, ocorrer os modos combinados de flambagem por torção e por flexão - ver Figura 15.

Barras submetidas à compressão com seção transversal assimétrica, como as cantoneiras, estão sujeitas à flambagem por flexão ou por flexo-torção. Este fenômeno ocorre pela mudança do centro de cisalhamento em relação ao centroide da seção transversal. Ressalta-se que tanto a flambagem por flexão como a flambagem por torção são casos particulares do caso geral de flambagem por flexo-torção. A flambagem por flexo-torção é calculada por meio das raízes da equação (12) conforme apresentado em [25].

A

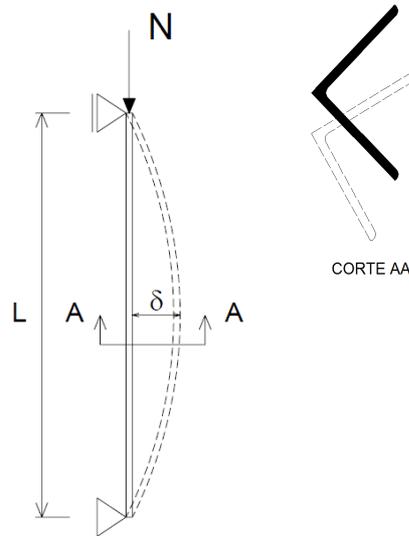


Figura 15 - Flambagem por flexo-torção de uma cantoneira

$$r_0^2 (N_{cr} - N_x)(N_{cr} - N_y)(N_{cr} - N_z) + (N_{cr})^2 (y_0)^2 (N_{cr} - N_x) - (N_{cr})^2 x_0 (N_{cr} - N_y) = 0 \quad (12)$$

Onde:

$N_x$ ,  $N_y$  e  $N_z$  são dadas pelas equações (9) a (11), respectivamente.

$x_0$  é a coordenada x do centro de torção;

$y_0$  é a coordenada y do centro de torção;

$r_0$  é o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção.

Para o caso específico da cantoneira simples e considerando a seção transversal com um único eixo de simetria, ou seja, o eixo x, tem-se  $y_0 = 0$  e  $x_0 \neq 0$ . Com isto, a equação (12) é modificada, obtendo-se a equação (13).

$$(N_{cr} - N_y)(r_0^2 (N_{cr} - N_x)(N_{cr} - N_z) - (N_{cr} x_0)^2) = 0 \quad (13)$$

Para este caso, uma das soluções representa a flambagem por flexão em torno do eixo y, apresentada na equação (14). As duas outras soluções para o fenômeno da flambagem por flexo-torção podem ser obtidas resolvendo-se a equação quadrática (15). Na primeira equação (14), pode-se perceber que a flambagem por flexão em torno do eixo y é desacoplada das demais e pode ser

tratada separadamente. A equação (15), por outro lado, está atrelada à flambagem por flexo-torção.

$$(N_{cr}) = N_y = \frac{\pi^2 E I_x}{(k_y L_y)^2} \quad (14)$$

$$r_0^2 (N_{cr} - N_x)(N_{cr} - N_z) - (N_{cr} x_0)^2 = 0 \quad (15)$$

Com o intuito de facilitar a apresentação da solução oriunda da resolução da equação (15), faz-se:  $\beta = 1 - (x_0 / r_0)^2$  obtendo-se a expressão (16).

$$(N_{cr}) = \frac{1}{2\beta} \left[ (N_x + N_z) \pm \sqrt{(N_x + N_z)^2 - 4\beta N_x N_z} \right] \quad (16)$$

O resultado da equação (16) pode ser utilizado como sendo a força crítica associada à flambagem por flexo-torção, sendo sempre menor que as cargas de flambagem  $N_x$  e  $N_z$ , mas podendo ser menor ou maior que a carga de flambagem  $N_y$  resultante da expressão (14).

## 2.4. Modo de Flambagem Local

A flambagem local de uma barra submetida a uma carga axial de compressão é caracterizada por um típico modo de flambagem das abas, no caso das cantoneiras. Seções transversais compostas por elementos esbeltos têm suas cargas resistentes limitadas em níveis de tensão inferiores ao do escoamento devido a este fenômeno.

Assim como os elementos estruturais sofrem flambagem, as partes constituintes da seção transversal de uma barra podem flambar quando solicitadas por tensões de compressão. A Figura 16 mostra a configuração típica deste fenômeno.

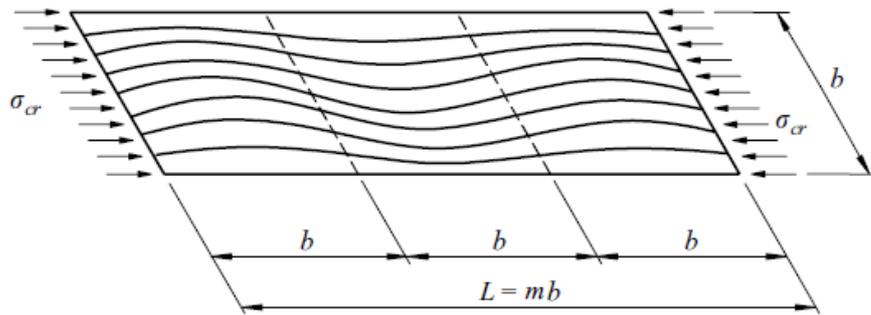


Figura 16 – Configuração da flambagem de placa

A tensão crítica pertinente a este fenômeno é apresentada na equação

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12 \times (1 - \nu^2) \times \left(\frac{b}{t}\right)^2} \quad (17)$$

sendo,

$b$  é a largura da placa;

$F_{cr}$  é a tensão crítica de flambagem local;

$k$  é o coeficiente de flambagem local, dado pela relação do comprimento com a largura da cantoneira;

$t$  é a espessura da placa;

$\nu$  é o coeficiente de Poisson do aço.

## 2.5. Flambagem por Flexão – Aço Carbono - EUROCODE 3, Parte 1-1 [7]

O dimensionamento de elementos submetidos a compressão simples, segundo o EUROCODE 3, Parte 1-1 [7], é baseado nas curvas de flambagem. Estas curvas são consideradas para barras com uma configuração inicial de imperfeição senoidal. De acordo com estas curvas, tudo se passa como se as diversas imperfeições das peças reais como a falta de linearidade, excentricidade das cargas, tensões residuais, entre outras fossem substituídas por uma “imperfeição inicial equivalente”, cuja amplitude é calibrada de modo a reproduzir todas as imperfeições.

De acordo com a maneira de verificação do EUROCODE 3, Parte 1-1 [7], a resistência das seções transversais de elementos axialmente comprimidos é verificada através da seguinte condição:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (18)$$

em que  $N_{Ed}$  é o valor do esforço axial atuante e  $N_{c,Rd}$  é o valor de esforço axial resistente das seções obtido de acordo com a classe da seção transversal.

- Seções classe 1, 2 ou 3

$$N_{c,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M1}} \quad (19)$$

- Seção classe 4

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \quad (20)$$

onde:

$A$  é a área bruta da seção,

$A_{eff}$  é a área efetiva da seção transversal de classe 4,

$f_y$  é a tensão de escoamento do aço;

$\gamma_{M1}$  é o coeficiente de segurança para elemento sujeito a flambagem.

Deve-se ressaltar que a seção transversal do tipo cantoneira simples pertence ao grupo da classe 3, de acordo com a tabela 5.2 do EUROCODE 3, Parte 1-1 [7].

Em elementos comprimidos deve-se adicionalmente verificar a condição  $N_{Ed} \leq N_{b,Ed}$ , sendo  $N_{b,Ed}$  a resistência a flambagem por flexão do elemento. A resistência à flambagem por flexão, em elementos de seção transversal tipo cantoneira submetidos a esforço axial constante de compressão, é dada por:

- Seções classe 1, 2 ou 3

$$N_{b,Rd} = \chi \frac{Af_y}{\gamma_{M1}} \quad (21)$$

- Seção de classe 4

$$N_{b,Rd} = \chi \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \quad (22)$$

em que  $\chi$  é o fator de redução, obtido através da seguinte equação:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \text{ mas } \chi \leq 1,0 \quad (23)$$

onde:

$$\phi = \frac{1}{2} \left[ 1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right]$$

sendo,

$\bar{\lambda}$  o coeficiente de esbeltez normalizado, dado por:

- Seções de classe 1, 2 ou 3

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\lambda_1} \quad (24)$$

- Seção de classe 4

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}} \frac{1}{\lambda_1} \quad (25)$$

onde:

$N_{cr}$  é a carga crítica elástica para o plano mais condicionante,

$L_{cr}$  é o comprimento de flambagem e  $i$  o raio de giração

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9\varepsilon, \text{ sendo } \varepsilon = \sqrt{235/f_y} \text{ com } f_y \text{ em MPa.}$$

A equação (23) pode ser representada por uma série de gráficos, como o da Figura 17. Os gráficos ou curvas de flambagem do EUROCODE 3, Parte 1-1 [7] tem no eixo das abscissas o valor do  $\bar{\lambda}$  correspondente ao coeficiente de esbelteza normalizado e no eixo das ordenadas, os valores do fator de redução  $\chi$  dado pela equação (23).

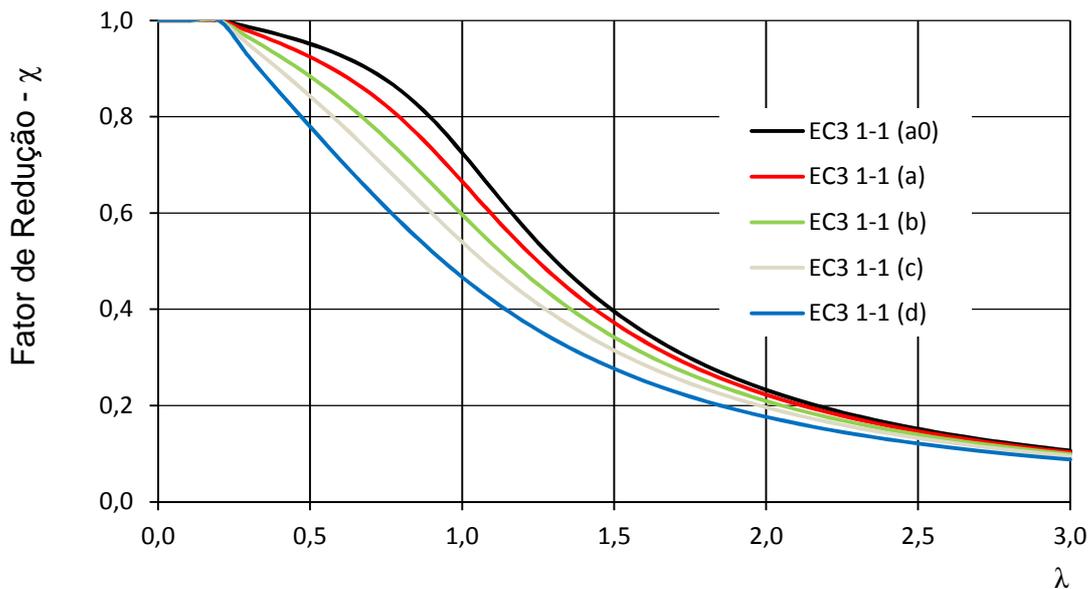


Figura 17 - Curvas de flambagem segundo o EUROCODE 3, Parte 1-1 [7]

O fator de imperfeição  $\alpha$  usado na equação (23) possui os seguintes valores: 0,13, 0,21, 0,34, 0,49 e 0,76 para as curvas de flambagem  $a_0$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$ , respectivamente.

O fator  $\alpha$  está associado a um determinado tipo de curva de flambagem. A escolha da curva de flambagem depende do tipo de seção transversal, eixo de flexão e tensão de escoamento  $f_y$ , conforme o quadro da Figura 18. Cabe ressaltar

que este fator de imperfeição considera as imperfeições iniciais das barras e as tensões residuais nelas atuantes.

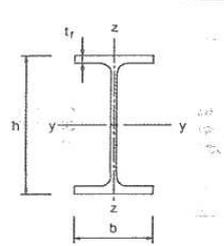
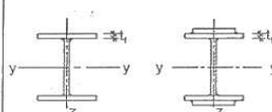
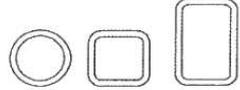
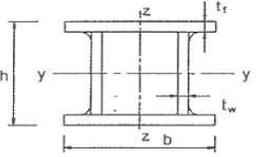
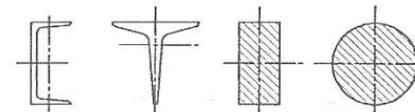
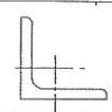
Secção	Geometria	Eixo de flexão	Curva de encurvadura			
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460		
Laminadas I ou H		$h/b \geq 1.2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y	a	$a_0$
				z-z	b	$a_0$
		$40 \text{ mm} < t_f \leq 100 \text{ mm}$	y-y	b	a	
			z-z	c	a	
		$h/b \leq 1.2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y-y	b	a
				z-z	c	a
	$t_f > 100 \text{ mm}$	y-y	d	c		
		z-z	d	c		
Soldadas I ou H		$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y	b	b	
			z-z	c	c	
		$t_f > 40 \text{ mm}$	y-y	c	c	
			z-z	d	d	
Tubulares		Laminadas a quente	qq.	a	$a_0$	
		Enformadas a frio	qq.	c	c	
Soldadas ocas		Em geral	qq.	b	b	
		Cordões: $a > 0.5 t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	qq.	c	c	
U, T e sólidas			qq.	c	c	
Secções L			qq.	b	b	

Figura 18 - Relação das seções transversais com as curvas de flambagem [4]

## 2.6. Flambagem por Flexão - Aços Inoxidáveis - EUROCODE 3, Parte 1-4 [6]

Seguindo o mesmo propósito, este sub-item aborda a flambagem por flexão para elemento sujeito a compressão axial constituído de aço inoxidável.

No dimensionamento segundo o EUROCODE 3, Parte1-4 [6], as equações apresentadas para o aço carbono no EUROCODE 3, Parte 1-1 [7] são semelhantes às adotadas no aço inoxidável, a única alteração é a substituição do 0,20, da equação que define  $\phi$ , para  $\bar{\lambda}_0$  cujos valores são apresentados na Tabela 3. A expressão (26) é a equação proposta pelo EUROCODE 3, Parte 1-4 [6] com a alteração mencionada anteriormente. O fator de imperfeição  $\alpha$  sofre algumas alterações como pode ser visto na Tabela 3, abaixo.

Tabela 3 - Valores de  $\alpha$  e  $\bar{\lambda}_0$  para o aço inoxidável

<b>Tipo de perfil</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>\bar{\lambda}_0</math></b>
Dobrado a frio com seção aberta	0,49	0,40
Seção tubular	0,49	0,40
Seção aberta soldada eixo de maior inércia	0,49	0,20
Seção aberta soldada eixo de menor inércia	0,76	0,20
Todas as seções	0,34	0,20

Sendo:

$$\phi = 0,5 \left( 1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2 \right) \quad (26)$$

Com base nestas informações e com o conhecimento das equações utilizadas pelo código europeu para o dimensionamento de peças com carregamento axial, conclui-se que há a possibilidade de se traçar curvas de flambagem para elementos estruturais constituídos de aço inoxidável. Com este conceito, a Figura 19 apresenta as curvas de flambagem propostas no EUROCODE 3, Parte 1-4 [6] para os mais variados tipos de perfis e de aços inoxidáveis diferentes ao contrário das cinco curvas de flambagem do aço carbono, sendo elas vinculadas aos parâmetros de tensão de escoamento, tipo de seção e eixo de flexão.

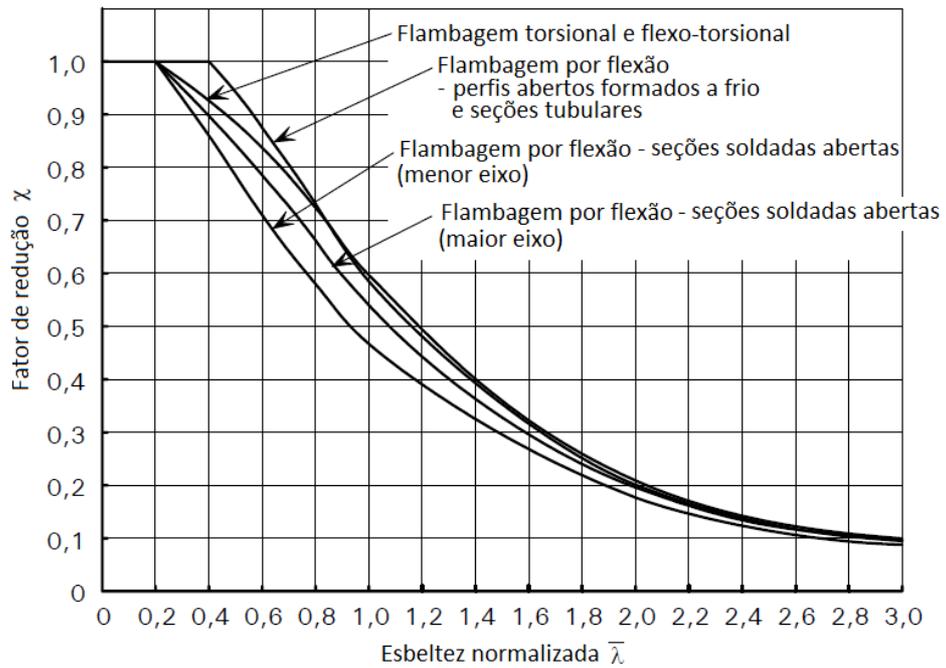


Figura 19 - Curvas de flambagem segundo EUROCODE 3, Parte 1-4 [6]

## 2.7. Flambagem Local – Aços Inoxidáveis - EUROCODE 3, Parte 1-4 [6]

O código europeu Eurocode 3, Parte 1-4 [6], classifica a seção transversal de cantoneiras submetidas à compressão para o fenômeno de flambagem local em duas classes:

- classe 3: a seção transversal pode ser solicitada uniformemente até a tensão de escoamento do material;
- classe 4: a seção transversal não pode ser solicitada uniformemente até a tensão de escoamento do material, sendo necessária a redução de sua resistência de forma a contemplar o fenômeno de flambagem local dos elementos que a compõem.

A Figura 20 mostra como a seção deve ser classificada:

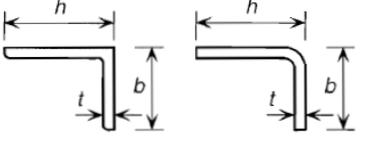
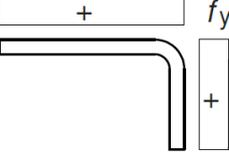
<b>Cantoneiras</b>		
		<p>Não se aplica a cantoneiras em contato contínuo com outros componentes</p>
Classe	Seção sob compressão	
Distribuição de tensões ao longo da seção (compressão +)		
3	$h/t \leq 15\varepsilon : \frac{b+h}{2t} \leq 11,5\varepsilon$	
<p>onde <math>\varepsilon</math> é o fator do material para classificação dos elementos da seção dado por <math>\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210000} \right]^{0,5}</math> e <math>f_y</math> é a tensão de escoamento do material.</p>		

Figura 20 – Classificação de cantoneira submetida a compressão, EUROCODE 3, Parte 1-4

[6]

Se a seção for de Classe 4, a área dos elementos esbeltos deve ser reduzida no cálculo da resistência a partir dos seguintes parâmetros:

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1 \quad (27)$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} \quad (28)$$

onde:

$\rho$  é o fator de redução da área do elemento da seção;

$\bar{\lambda}_p$  é a esbeltez normalizada do elemento da seção;

$\bar{b}$  é a dimensão da aba da cantoneira;

$t$  é a espessura da cantoneira;

$\varepsilon$  é o fator do material para classificação dos elementos da seção;

$k_\sigma$  é o coeficiente de flambagem do elemento cujo valor é igual a 0,43 para cantoneiras.

## 2.8. Método da Resistência Contínua (CSM)

As normas utilizadas atualmente para o dimensionamento de elementos estruturais constituídos de aços inoxidáveis são baseadas em materiais que possuem um comportamento ideal elástico, como o aço carbono. Para a elaboração de um projeto é necessário considerar o comportamento real do aço inoxidável, que apresenta uma curva tensão *versus* deformação com um formato mais arredondado - ver Figura 3, e com região de encruamento significativo.

O Método de Resistência Contínua (CSM - Continuous Strength Method) foi desenvolvido por Afshan e Gardner [21] visando permitir a maior capacidade de deformação da seção transversal, e também de modificar o modelo de material elástico e perfeitamente plástico por um que permita considerar o encruamento. Este método é uma nova abordagem para se dimensionar estruturas em aço inoxidável com base em uma melhor consideração da curva tensão-deformação do material.

A aplicação do CSM em estruturas de aço inoxidável tem sido usada para gerar uma relação simples e contínua entre a esbelteza e a capacidade de deformação da seção transversal, referida como a curva base de dimensionamento. Também é usado um modelo linear elástico de encruamento do material, que permite a exploração da deformação na região plástica.

O conceito de classificação de seção transversal representa a abordagem atual das normas para o tratamento da flambagem local em perfis metálicos sendo usada para determinar a resistência estrutural do elemento. Este método é mais adequado para materiais com uma curva tensão *versus* deformação semelhante aos modelos perfeitamente idealizados de materiais elasto-plásticos, onde a presença de um patamar de escoamento claramente definido permite que seções transversais sejam agrupadas em classes distintas de comportamento.

O EUROCODE 3, Parte 1-4 [6] adota para o aço inoxidável, a abordagem de classificação da seção transversal utilizada também para o aço carbono, com a tensão de escoamento tomada a 0,2% de deformação permanente ( $\sigma_{0,2}$ ). Limites de esbeltez são geralmente obtidos a partir de resultados experimentais em nível da seção transversal. Devido ao recente surgimento do aço inoxidável como um material estrutural, os limites correntes de classificação da seção transversal do

EUROCODE 3, Parte 1-4 [6] foram definidos com base em um número pequeno de ensaios experimentais.

Os resultados dos estudos feitos por Gardner e Afshan [21], com base em dados experimentais mais abrangentes, mostraram que os limites atuais de classificação das seções são conservadores - ver Figura 21. O gráfico da Figura 21 apresenta a razão do momento resistente com o momento plástico da seção transversal ( $M_{u, \text{test}}/W_{pl} \sigma_{0,2}$ ) em função da esbeltez da seção transversal. Também foi proposto por Afshan e Gardner [21] que os limites de esbeltez do aço inoxidável sejam compatibilizados com os limites utilizados para o aço carbono.

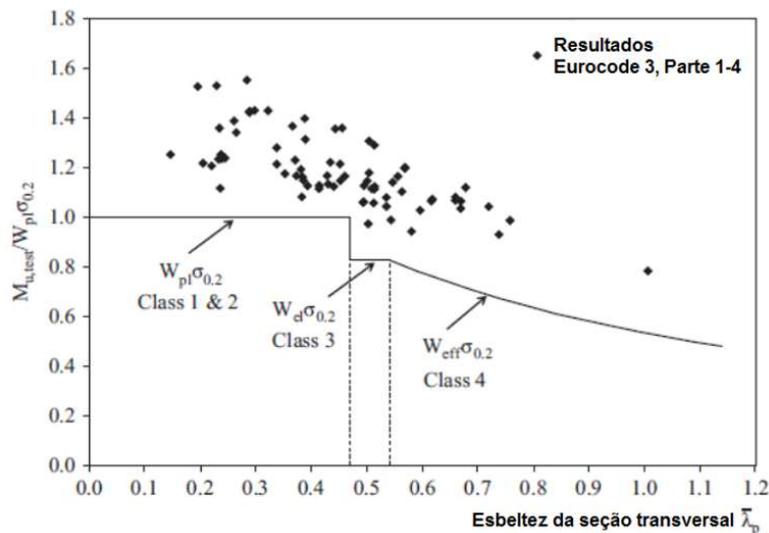


Figura 21 – Comparação de resultados experimentais com a EUROCODE 3, Parte 1-4 [6] e [21]

Outros resultados experimentais como os de Afshan e Gardner [21] para colunas curtas também demonstraram um significativo conservadorismo do EUROCODE 3, Parte 1-4 [6]. Esta norma limita a resistência à compressão da seção transversal à força correspondente à tensão de escoamento tomada a 0,2% da deformação permanente, assim como relaciona a resistência à flexão ao momento plástico da seção.

O CSM é uma abordagem de dimensionamento baseada em dois componentes chaves:

- uma curva base que define o nível de tensão que uma seção transversal pode suportar de forma normalizada;

- e um modelo de material que permite que a tensão de encruamento possa ser usada para determinar a resistência da seção.

Uma característica fundamental do CSM é a relação entre a resistência da seção transversal com a sua capacidade de deformação, a qual é controlada pela esbeltez da seção transversal e pela sua sensibilidade aos efeitos da flambagem local. A capacidade de deformação da seção determina a habilidade da seção em avançar para a região de encruamento de tensão e, portanto, manter o aumento de carga. A curva base foi fundamentada em dados experimentais de colunas curtas e vigas, de forma a proporcionar uma contínua relação entre a capacidade de deformação transversal normalizada e a esbeltez da seção transversal.

Dentro do CSM, a esbeltez da seção transversal é definida como:

$$\bar{\lambda}_{CS} = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,s}}} \quad (29)$$

Onde:

$f_y$  é o limite de elasticidade aparente; e

$\sigma_{cr,s}$  é a tensão crítica de flambagem elástica da seção.

Em uma primeira etapa, o limite de esbeltez deve ser estabelecido, de forma a definir a transição entre seções transversais esbeltas (isto é, aquelas que falham devido à flambagem local abaixo da carga de escoamento) e seções transversais compactas (isto é, as que se beneficiam do encruamento e falham por flambagem local inelástica acima da carga de escoamento). Este limite pode ser determinado com base nos dados de ensaios de elementos estruturais em aço inoxidável. Uma regressão linear, realizada por Afshan e Gardner [21], para ajuste de dados experimentais indicou que o ponto da linha onde  $(N_{u,test} / A_{\sigma 0,2})$  é igual a 1,0 ocorre em  $\bar{\lambda}_{CS} = 0,68$ , conforme a Figura 22. Um valor semelhante foi obtido em testes com aço carbono e liga de alumínio.

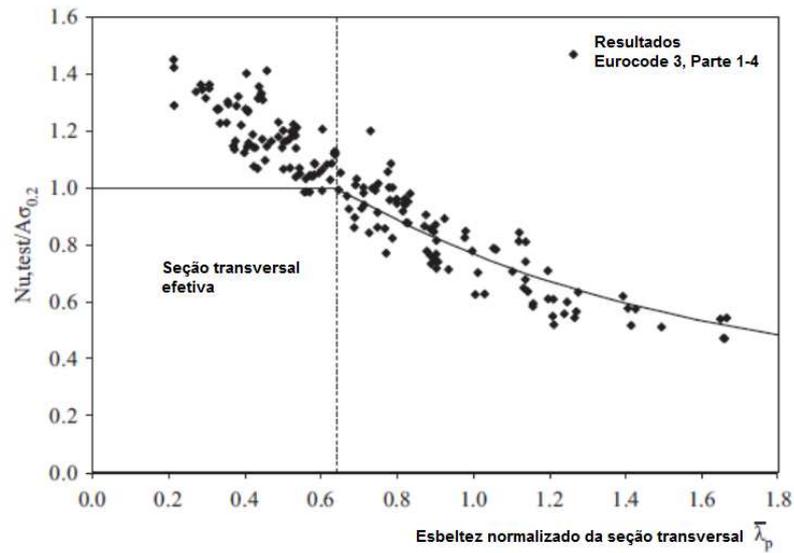


Figura 22 - Comparação de resultados experimentais com EUROCODE 3, Parte 1-4 [6], [21]

Desta forma, para fazer a transição entre as seções esbeltas e as seções compactas, será adotado  $\bar{\lambda}_{cs} = 0,68$ . Este número também marca o limite de aplicabilidade do CSM, uma vez que acima deste limite não há nenhum benefício significativo a ser obtido com a seção plastificada.

Para colunas curtas, onde a carga última  $N_u$  excede a carga de escoamento  $N_y$ , o encurtamento no final na carga última  $\bar{\delta}_u$ , dividido pelo comprimento da coluna  $L$ , é utilizado para definir a deformação de ruptura  $\varepsilon_{lb}$  da seção transversal, devido à flambagem local inelástica.

Para compatibilidade com o modelo de material simplificado adotado, a capacidade de deformação  $\varepsilon_{csm}$  é obtida subtraindo-se a deformação plástica de 0,2% (ou seja, 0,002) da deformação de flambagem local  $\varepsilon_{lb}$ , ou seja:

$$\varepsilon_{csm} = \varepsilon_{lb} - 0,002 \quad (30)$$

Para expressar a capacidade de deformação da seção transversal em formato normalizado, divide-se pela deformação de escoamento  $\varepsilon_y = \frac{f_y}{E}$ , de forma a permitir que materiais de diferentes resistências e rigidez sejam considerados. Logo, a

capacidade de deformação da seção transversal, em formato normalizado, é dada por:

$$\frac{\varepsilon_{\text{csm}}}{\varepsilon_y} = \frac{\varepsilon_{\text{lb}} - 0,002}{\varepsilon_y} = \frac{(\delta u/L) - 0,002}{\varepsilon_y} \quad (31)$$

O CSM utiliza um modelo de material elástico e com encruamento linear. A origem do modelo adotado começa em menos 0,2% da deformação plástica, o que, combinado com as definições de taxa de deformação, prevê a correta tensão.

A inclinação de encruamento é determinada como a inclinação da reta que passa pelo ponto de deformação 0,2% ( $f_y, \varepsilon_y$ ) e um ponto máximo especificado ( $f_{y\text{max}}, \varepsilon_{y\text{max}}$ ) com  $\varepsilon_{y\text{max}}$  tomado como  $0,16 \varepsilon_u$ , onde  $\varepsilon_u$  é a deformação na tensão última, e  $f_{\text{max}}$  é a tensão última de tração  $f_u$ . A deformação relativa à tensão última de tração  $\varepsilon_u$  é determinada conforme o anexo C da EUROCODE 3, Parte 1-4 [6].

Um diagrama esquemático do modelo de material utilizado pelo CSM é mostrado na Figura 23.

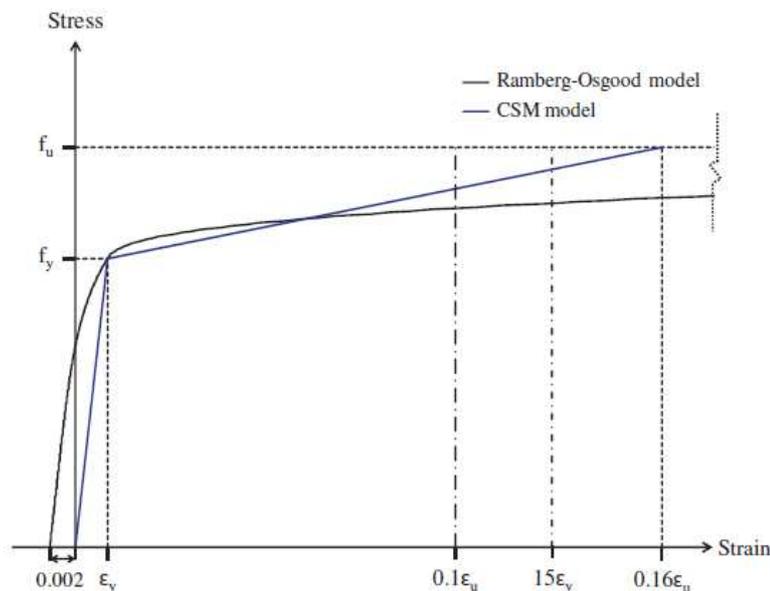


Figura 23 – Curva do modelo CSM e do modelo Ramberg-Osgood [21]

Tendo estabelecida a capacidade de deformação normalizada da seção transversal  $\varepsilon_{\text{csm}}/\varepsilon_y$ , a partir da curva base da concepção do CSM, a deformação limite  $\varepsilon_{\text{csm}}$  pode agora ser usada, em conjunto com o modelo de material proposto como linear nos regimes elástico e plástico, para determinar a resistência da seção transversal a compressão. Para seções com  $\bar{\lambda}_{\text{cs}} \leq 0,68$ , a resistência à compressão  $N_{\text{c,Rd}}$  é dada por:

$$N_{\text{c,Rd}} = N_{\text{csm,Rd}} = \frac{Af_{\text{csm}}}{\gamma_{\text{M0}}} \quad (32)$$

Onde:

$A$  é a área da seção transversal bruta.

$f_{\text{csm}}$  é a tensão limite determinada a partir do modelo de material de deformação plástica dado pela expressão  $f_{\text{csm}} = f_y + E_{\text{sh}} \varepsilon_y \left( \frac{\varepsilon_{\text{csm}}}{\varepsilon_y} - 1 \right)$  sendo

$$E_{\text{sh}} = \frac{f_u - f_y}{0,16\varepsilon_u - \varepsilon_y}.$$

O CSM oferece maior precisão e menor dispersão em relação aos métodos de projeto atuais. A confiabilidade da abordagem tem sido demonstrada por análises estatísticas e o CSM está atualmente sob consideração para inclusão em normas europeias e norte-americanas de dimensionamento para estruturas de aço inoxidável.

### **3. ENSAIOS EXPERIMENTAIS**

O presente capítulo tem como objetivo descrever e apresentar a metodologia adotada para a execução dos ensaios experimentais, realizados no Laboratório de Engenharia Civil da UERJ (LEC), que avaliaram o comportamento de cantoneiras em aço carbono e aço inoxidável, ambas submetidas a compressão centrada. Foram ensaiadas inicialmente, 18 cantoneiras em aço carbono (com repetição) e mais 18 cantoneiras em aço inoxidável austenítico em um total de 36 cantoneiras. Manteve-se as mesmas seções transversais das cantoneiras para os dois tipos de aço.

Antes de se iniciar os ensaios das 36 cantoneiras descritas anteriormente foram realizados 6 ensaios com cantoneiras em aço carbono de seção transversal igual a 51x51x4,8mm. As cantoneiras tiveram comprimentos com variação entre 400mm a 1500mm e os resultados destes ensaios estão no anexo da tese. Estes ensaios preliminares foram realizados para avaliar o comportamento da prensa hidráulica, do equipamento de aquisição de dados, da velocidade para a execução dos ensaios e o tratamento adequado dos resultados.

#### **3.1. Ensaios em Aço Carbono**

Nos subitens a seguir será apresentada a metodologia utilizada nos ensaios das cantoneiras constituídas de aço carbono.

##### **3.1.1. Descrição das cantoneiras em aço carbono ensaiadas**

As seções escolhidas para os ensaios das cantoneiras em aço carbono constituídas de perfis laminados com as seguintes seções transversais: L64x64x4,8mm, L76x76x6,4mm e L102x102x6,4mm todas constituídas de aço carbono ASTM A36, com esbeltez dos elementos (b/t) iguais a 13,3; 11,9 e 15,9, respectivamente.

Para as três seções transversais da cantoneira foram escolhidos três comprimentos distintos, variando entre 272 mm e 1517 mm, com esbelteza normalizado  $\lambda$  de 0,08 a 0,51, considerando-se o momento na menor inércia.

Na Tabela 4 são apresentados os comprimentos reais das cantoneiras ensaiadas antes da fixação das chapas de extremidade bem como os valores da esbelteza teórica de acordo com o modo de falha. A nomenclatura utilizada é apresentada na Figura 24.

Tabela 4 – Caracterização dos ensaios - comprimento e esbelteza teórica para as cantoneiras em aço carbono

Ensaio	L (mm)	Flexão na maior inercia	Flexão na menor inercia	Flexo-Torção	Torção	Local
		$\lambda_{\text{teor.}}$	$\lambda_{\text{teor.}}$	$\lambda_{\text{teor.}}$	$\lambda_{\text{teor.}}$	$\lambda_{\text{teor.}}$
LC_64x64x4,8_L502_1	502	0,13	0,26	0,86	0,86	0,88
LC_64x64x4,8_L503_1	503	0,13	0,26	0,86	0,86	0,88
LC_64x64x4,8_L750_1	750	0,19	0,38	0,87	0,86	0,88
LC_64x64x4,8_L750_2	750	0,19	0,38	0,87	0,86	0,88
LC_64x64x4,8_L1000_1	1000	0,26	0,51	0,87	0,86	0,88
LC_64x64x4,8_L1000_2	1000	0,26	0,51	0,87	0,86	0,88
LC_76x76x6,4_L485_1	485	0,11	0,21	0,77	0,76	0,77
LC_76x76x6,4_L502_1	502	0,11	0,22	0,77	0,76	0,77
LC_76x76x6,4_L750_1	750	0,16	0,32	0,77	0,76	0,77
LC_76x76x6,4_L750_2	750	0,16	0,32	0,77	0,76	0,77
LC_76x76x6,4_L1004,5_1	1004,5	0,22	0,43	0,78	0,76	0,77
LC_76x76x6,4_L1005,5_1	1005,5	0,22	0,43	0,78	0,76	0,77
LC_102x102x6,4_L272_1	272	0,04	0,08	1,01	1,01	1,01
LC_102x102x6,4_L272_2	272	0,04	0,08	1,01	1,01	1,01
LC_102x102x6,4_L937_1	937	0,15	0,29	1,01	1,01	1,01
LC_102x102x6,4_L943_1	943	0,15	0,29	1,01	1,01	1,01
LC_102x102x6,4_L1505_1	1505	0,23	0,46	1,02	1,01	1,01
LC_102x102x6,4_L1517_1	1517	0,23	0,47	1,02	1,01	1,01

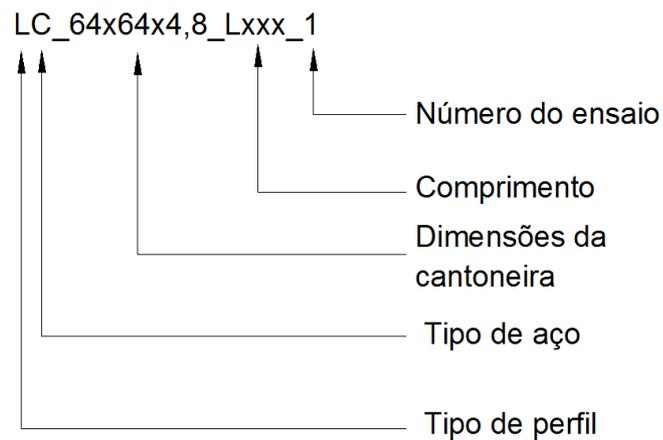


Figura 24 – Nomenclatura dos ensaios

### 3.1.2. Caracterização do Material – Aço Carbono

Na caracterização do aço carbono foram separados comprimentos de cantoneiras com 250mm para as três seções utilizadas neste trabalho. Destas barras selecionadas foram extraídos três corpos-de-prova. Os corpos-de-prova foram extraídos das cantoneiras o mais afastado possível da junção das abas da cantoneira, ver Figura 25. A Figura 26 apresenta as medidas do corpo-de-prova de acordo com as especificações da norma NBR6892 [26].



Figura 25 – Detalhe da extração de corpo-de-prova da cantoneira.

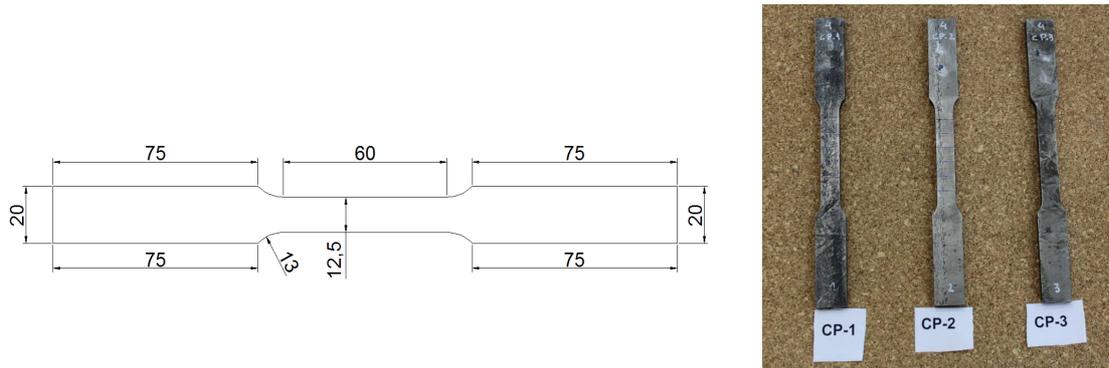


Figura 26 – Dimensões dos corpos-de-prova conforme a NBR 6892 [26]

As propriedades físicas como módulo de elasticidade ( $E$ ), tensão de escoamento ( $f_y$ ) e de ruptura ( $f_u$ ) foram obtidas com os resultados dos ensaios dos corpos-de-prova (CP) a tração, e estão apresentados na Tabela 5. Por meio dos ensaios também foi possível obter os gráficos tensão *versus* deformação conforme apresentado na Figura 27.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios a tração para cantoneiras em aço carbono.

Perfil	CP	E (GPa)	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)
LC_64x64x4,8	1	203,315	331,44	474,01
	2	203,100	349,33	473,72
	3	203,548	334,16	481,42
<b>Média</b>		<b>203,32</b>	<b>338,31</b>	<b>476,38</b>
<b>Teórico</b>		<b>210,00</b>	<b>250,00</b>	<b>400-500</b>
LC_76x76x6,4	1	210,228	331,75	461,76
	2	209,219	337,03	464,60
	3	209,116	355,47	471,94
<b>Média</b>		<b>209,52</b>	<b>341,41</b>	<b>466,10</b>
<b>Teórico</b>		<b>210,00</b>	<b>250,00</b>	<b>400-500</b>
LC_102x102x6,4	1	209,277	319,18	452,24
	2	218,967	336,01	451,33
	3	205,980	314,97	454,86
<b>Média</b>		<b>211,41</b>	<b>323,39</b>	<b>452,81</b>
<b>Teórico</b>		<b>210,00</b>	<b>250,00</b>	<b>400-500</b>

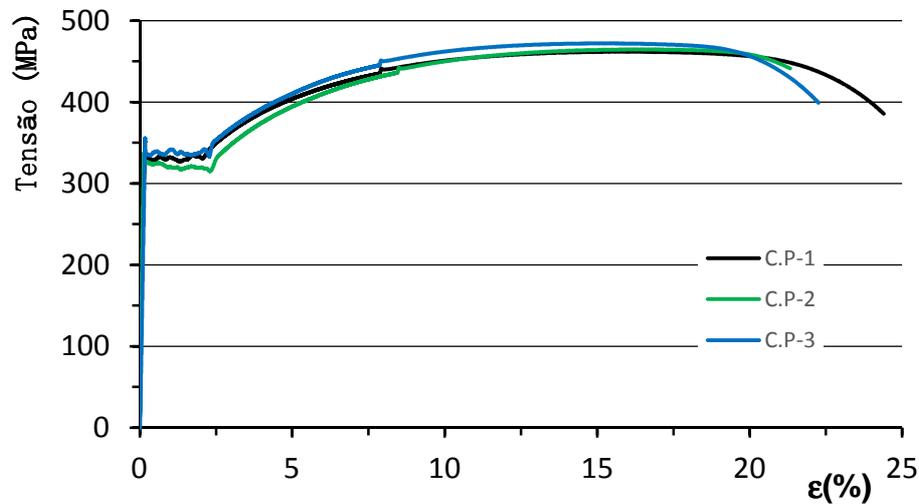


Figura 27 - Gráfico tensão *versus* deformação para a cantoneira LC\_64x64x4,8 nos ensaios a tração dos corpos-de-prova em aço carbono.

### 3.2. Ensaio em Aço Inoxidável

A metodologia para realizar a caracterização do aço inoxidável foi a mesma utilizada na caracterização do aço carbono, porém a velocidade nos ensaios foi menor em relação aos ensaios a tração do aço carbono.

#### 3.2.1. Descrição das cantoneiras em aço inoxidável ensaiadas

As dimensões das seções transversais das cantoneiras em aço inoxidável austenítico A304L serão as mesmas das cantoneiras em aço carbono ASTM A36. Partiu-se deste princípio para que seja possível comparar os resultados de ambos. Desta forma, manteve-se também a esbelteza dos elementos ( $b/t$ ).

O comprimento inicial das cantoneiras em aço inoxidável partiram dos resultados dos ensaios em aço carbono, as mesmas variaram entre 152 mm a 1893 mm, com esbelteza normalizada  $\lambda$  de 0,063 a 0,863. A nomenclatura das cantoneiras em aço inoxidável acompanhou a mesma sequência adotada no aço carbono,

ressaltando-se que na legenda, “LSS” significa cantoneira “L” e “SS” referência ao material aço inoxidável (*stainless steel*).

Na Tabela 6 são apresentados os comprimentos reais das cantoneiras ensaiadas antes da fixação das chapas de extremidade bem como os valores da esbeltez teórica de acordo com os modo de falha.

Tabela 6 – Caracterização dos ensaios - comprimento e esbeltez teórico para as cantoneiras em aço inoxidável.

Ensaio	L (mm)	Flexão na maior inércia	Flexão na menor inércia	Flexo-Torção	Torção	Local
		$\lambda_{teor.}$	$\lambda_{teor.}$	$\lambda_{teor.}$	$\lambda_{teor.}$	$\lambda_{teor.}$
LSS_64x64x4,8_L250_1	250	0,07	0,15	0,98	0,98	1,01
LSS_64x64x4,8_L250_2	250	0,07	0,15	0,98	0,98	1,01
LSS_64x64x4,8_L500_1	500	0,15	0,29	0,98	0,98	1,01
LSS_64x64x4,8_L500_2	500	0,15	0,29	0,98	0,98	1,01
LSS_64x64x4,8_L1000_1	1000	0,30	0,59	1,00	0,98	1,01
LSS_64x64x4,8_L1000_2	1000	0,30	0,59	1,00	0,98	1,01
LSS_64x64x4,8_L1470_1	1470	0,44	0,86	1,02	0,98	1,01
LSS_76x76x6,4_L152_1	152	0,04	0,08	0,83	0,83	0,90
LSS_76x76x6,4_L496_1	496	0,12	0,25	0,84	0,83	0,90
LSS_76x76x6,4_L753_1	753	0,19	0,37	0,84	0,83	0,90
LSS_76x76x6,4_L990_1	990	0,25	0,49	0,85	0,83	0,90
LSS_76x76x6,4_L1196_1	1196	0,30	0,59	0,85	0,83	0,90
LSS_76x76x6,4_L1410_1	1410	0,35	0,70	0,86	0,83	0,90
LSS_102x102x6,4_L203_1	203	0,03	0,06	0,98	0,98	1,02
LSS_102x102x6,4_L407_1	407	0,06	0,13	0,98	0,98	1,02
LSS_102x102x6,4_L998_1	998	0,16	0,31	0,98	0,98	1,02
LSS_102x102x6,4_L1480_1	1480	0,23	0,46	0,99	0,98	1,02
LSS_102x102x6,4_L1893_1	1893	0,30	0,59	1,00	0,98	1,02

### 3.2.2. Caracterização do Material – Aço Inoxidável

#### 3.2.2.1. Comportamento a tração

Para a caracterização do material aço inoxidável adotou-se a mesma metodologia da caracterização do aço carbono descrita anteriormente. A Figura 28 ilustra a extração dos corpos de prova em aço inoxidável utilizando equipamento de corte a eletroerosão com fio de molibdênio. Esta técnica também foi adotada para a extração dos corpos-de-prova das cantoneiras em aço carbono.



Figura 28 – Corte dos corpos-de-prova para cantoneiras em aço inoxidável.

As propriedades físicas do aço inoxidável como módulo de elasticidade ( $E$ ), tensão de escoamento a 0,2% da deformação ( $f_{0,2}$ ) e de ruptura ( $f_u$ ) foram obtidas com os resultados dos ensaios dos corpos-de-prova (CP) a tração conforme os valores apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultado dos ensaios a tração do aço inoxidável

Perfil	CP	E (GPa)	$f_{0,2}$ (MPa)	$f_u$ (MPa)
LSS_64x64x4,8	1	230,00	383,15	702,89
	2	175,00	419,79	706,84
	3	195,00	507,86	734,98
<b>Média</b>		<b>200,00</b>	<b>436,93</b>	<b>714,90</b>
LSS_76x76x6,4	1	135,00	407,22	708,73
	2	201,10	372,31	688,62
	3	211,00	419,14	714,62
<b>Média</b>		<b>182,37</b>	<b>399,56</b>	<b>703,99</b>
LSS_102x102x6,4	1	197,50	295,02	617,73
	2	185,00	289,09	591,74
	3	187,50	316,93	667,78
<b>Média</b>		<b>190,00</b>	<b>300,35</b>	<b>625,75</b>

Os resultados dos ensaios também foram usados para a elaboração de gráficos tensão *versus* deformação como os da Figura 29.

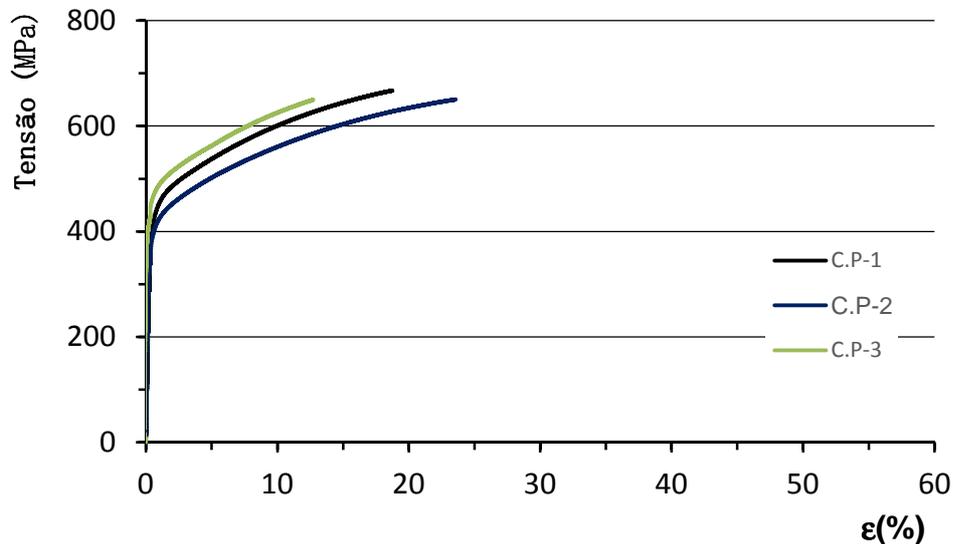


Figura 29 – Curva tensão *versus* deformação para cantoneiras LSS\_64x64x4,8 em aço inoxidável

### 3.2.2.2. Comportamento a compressão

Conforme é de conhecimento da comunidade científica, o aço inoxidável possui quatro curvas tensão *versus* deformação diferentes, sendo duas para tração e duas para compressão compreendendo diferenças entre corpos-de-prova extraídos em direções paralelas ou perpendiculares a direção de laminação. Adota-se a curva de tração paralela à direção da laminação para as equações de flambagem existentes nas normas de dimensionamento, por apresentar menor resistência que a curva de compressão. Para avaliar o comportamento real do material, realizou-se o ensaio a compressão de perfis tubulares compostos por duas cantoneira soldadas nas abas, conforme ilustrado na Figura 30 com uma média de 200mm de comprimento.

Nos ensaios, as leituras de deformação foram realizadas por extensômetros lineares, colados à meia altura da coluna, sendo um extensômetro posicionado em

cada aba no eixo do centroide da cantoneira quando isolada. Esta metodologia teve como objetivo, retardar a ocorrência da flambagem local nos espécimes ensaiados.



Figura 30 – Perfil tubular composto por duas cantoneiras.

As tensões foram calculadas a partir da relação da carga aplicada pela prensa hidráulica e a área do perfil tubular composto por duas cantoneiras, admitindo uma distribuição uniforme de tensões normais em toda a seção transversal. A Figura 31 ilustra a coluna depois do ensaio de compressão e a Figura 32 apresenta as curvas tensão *versus* deformação de um dos ensaios.

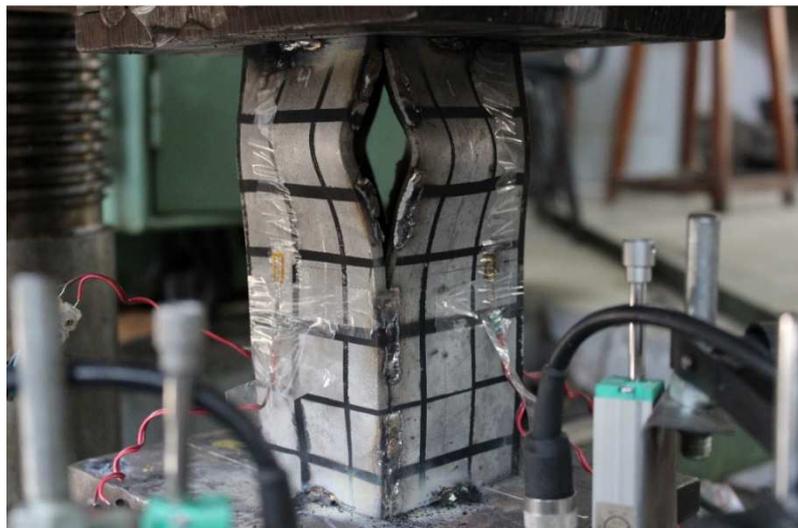


Figura 31 – Perfil tubular composto por duas cantoneiras depois do ensaio a compressão

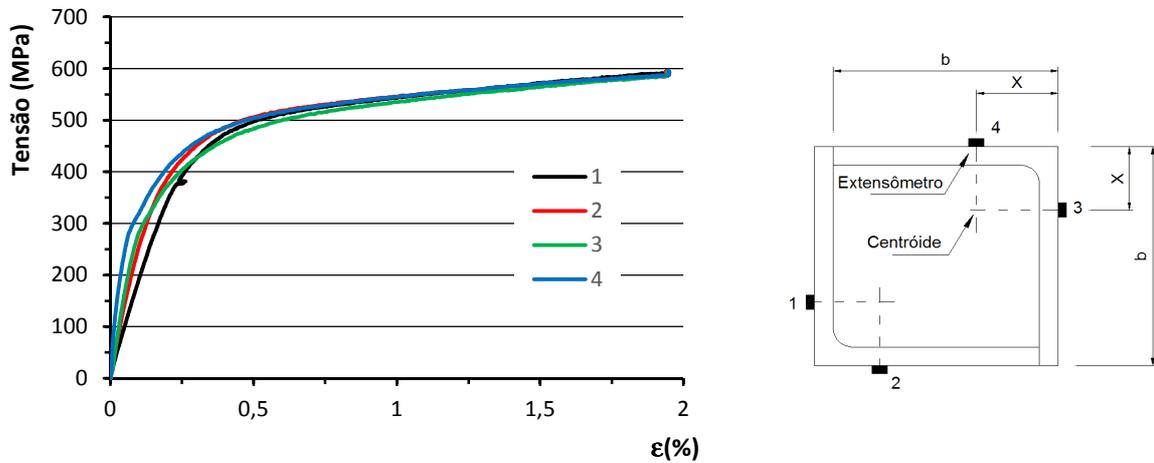


Figura 32 – Curva tensão *versus* deformação para ensaio a compressão de cantoneiras em aço inoxidável.

No gráfico da Figura 32 pode-se observar que os extensômetros atingiram sua capacidade de deformação máxima. Este fato ocorreu em todos os ensaios a compressão dos perfis tubulares formados por duas cantoneiras. A Tabela 8 apresenta um resumo dos resultados obtidos, como módulo de elasticidade  $E$  e a tensão de escoamento a 0,2% de deformação, no anexo C estão presentes todos os resultados dos ensaios.

Tabela 8 – Resultado da caracterização do aço inoxidável a compressão

Perfil	$E$ (GPa)	$\sigma_{0,2}$ (MPa)
LSS_64x64x4,8	242,25	475,62
	215,00	481,7
<b>Média</b>	<b>228,63</b>	<b>478,66</b>
LSS_76x76x6,4	215,00	483,09
	207,50	379,05
<b>Média</b>	<b>211,25</b>	<b>431,07</b>
LSS_102x102x6,4	225,00	444,63
	237,50	483,07
<b>Média</b>	<b>231,25</b>	<b>463,85</b>

A Tabela 9 apresenta os valores médios dos ensaios dos corpos-de-prova em aço inoxidável a tração e a compressão. Comparando-se os resultados, nota-se que os valores do módulo de elasticidade e da tensão de escoamento  $\sigma_{0,2}$  a 0,2% foram superiores no ensaio a compressão e a Figura 33 ilustra uma curva tensão *versus* deformação comparando-se os ensaios.

Tabela 9 – Resultados médios do aço inoxidável para os ensaios a tração e a compressão.

Perfil	Ensaio a compressão		Ensaio a tração	
	E (GPa)	$\sigma_{0,2}$ (MPa)	E (GPa)	$f_y$ (MPa)
LSS_64x64x4,8	228,63	478,66	200,00	436,93
LSS_76x76x6,4	211,25	431,07	182,37	399,56
LSS_102x102x6,4	231,25	463,85	190,00	300,00

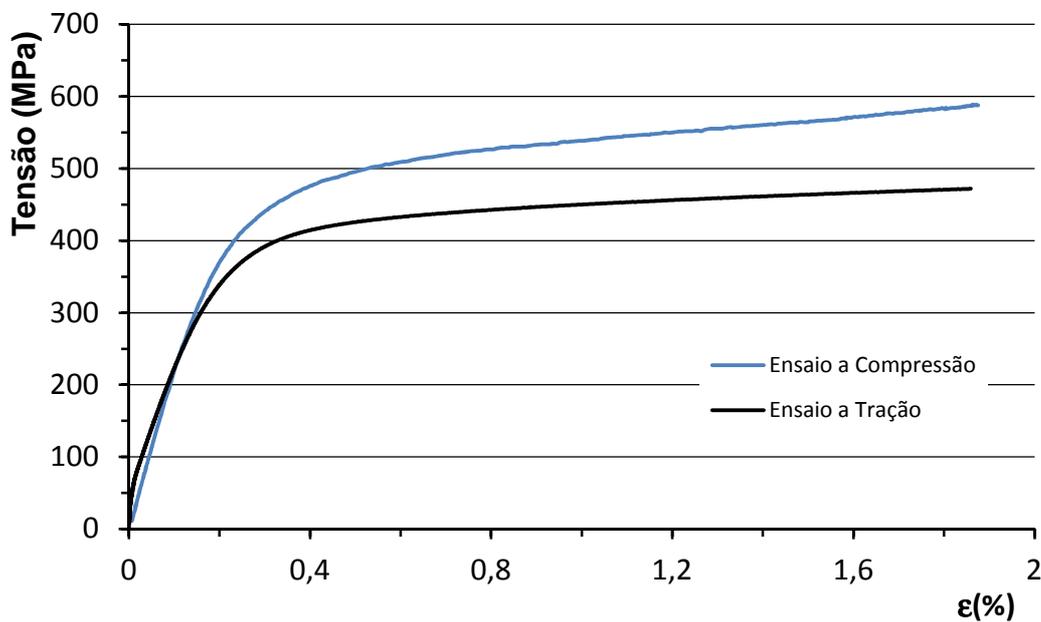


Figura 33 – Curva tensão *versus* deformação para ensaio a compressão e a tração de cantoneiras em aço inoxidável.

### 3.3. Configuração dos ensaios e condições de contorno

Conforme citado anteriormente, o objetivo dos ensaios foi de obter a capacidade máxima de colunas submetidas a um carregamento de compressão centrado. Para isso foi utilizada uma prensa hidráulica com capacidade de 3000kN, sendo adequada para os testes realizados. A Figura 34 mostra a configuração geral do ensaio.



Figura 34 – Esquema do ensaio

Com o intuito de se reproduzir, da melhor forma possível, os ensaios de colunas a compressão pura, alguns cuidados foram tomados na preparação dos mesmos, tais como:

- Cortes exatamente perpendiculares das cantoneiras com o seu eixo longitudinal;
- a chapa de base foi fixada na cantoneira por meio de solda com eletrodo e para garantir a perpendicularidade da ligação, a mesma foi executada em uma superfície plana e durante a soldagem foi feita a verificação do nível vertical - ver
- Figura 35;
- posicionamento coincidente do centroide do conjunto, com o centroide da cantoneira e chapas de base, com o centroide da prensa - ver
- Figura 35 – através de gabaritos;
- após a colocação do conjunto na prensa verificou-se o nível vertical da cantoneira e o nível horizontal da mesa superior da prensa.

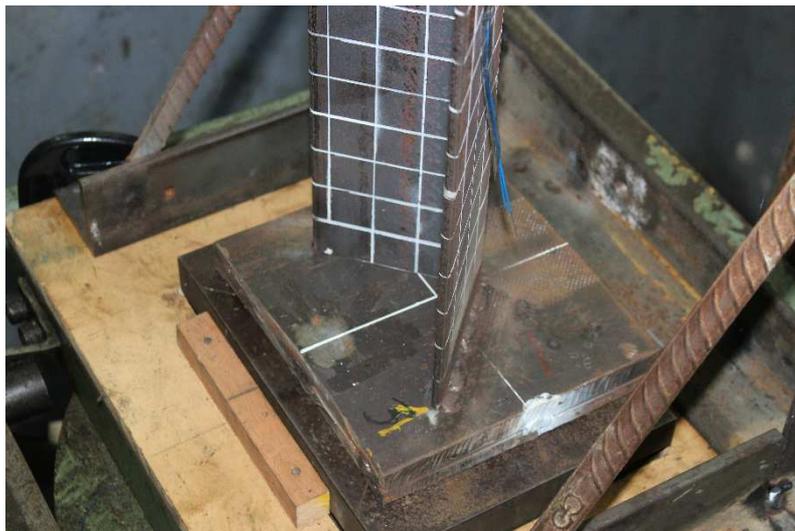


Figura 35 – Detalhe da chapa de base e do posicionamento da cantoneira na prensa.

Devido a limitações de altura livre na prensa hidráulica, somente puderam ser realizados ensaios com cantoneiras de até 1893mm de comprimento. Para os ensaios foi utilizada a escala de 3000kN da prensa, podendo também ser adotada a escala de 600kN para alguns ensaios. A prensa passou por um processo de adaptação na qual o controle de deslocamento passou a ser feita por um sistema eletrônico automatizado.

Após preparadas as condições necessárias para a realização dos ensaios descritas anteriormente, aplicou-se uma pré-carga inicial de 20kN nas colunas através de controle de força com uma velocidade do prato inferior da prensa de 0,03mm/s. Após alcançada a pré-carga, dava-se início ao um ciclo de carregamento com amplitude de 70kN e com velocidade de força de 5kN/s. Com o fim deste ciclo, iniciava-se o ensaio até atingir sua capacidade máxima. Esta fase do ensaio foi feita com controle de deslocamentos a uma velocidade de aproximadamente 0,006mm/s.

A mesa superior da prensa possui um assento esférico, onde se espera que o coeficiente de flambagem esteja dentro do domínio entre  $0,5 \leq k \leq 0,7$ , presumindo-se que o assento esférico promova um grau de engastamento pelo menos parcial. A mesa inferior não apresenta possibilidade de rotação somente de deslocamento vertical.

### **3.4. Instrumentação**

A instrumentação adotada nos ensaios tanto para aço carbono quanto para o aço inoxidável são as mesmas, ou seja, deslocamento medido com transdutores de deslocamentos e deformações com auxílio de extensômetros lineares elétricos.

O posicionamento dos transdutores de deslocamentos (LVDT) variaram de acordo com o comprimento da coluna. Para as colunas com comprimento menor que 500 mm foi colocado um LVDT no meio da colunas e para as demais cantoneiras foram posicionados três LVDTs por aba com espaçamento entre eles de 1/4 do comprimento da coluna. No sentido transversal da seção da cantoneira, os LVDTs foram colocados a 15mm da extremidade das abas. A Figura 36 apresenta um esquema do posicionamento dos LVDTs para colunas maiores do que 500mm.

Cabe ressaltar que nos ensaios iniciais das cantoneiras LC\_102x102x6,4\_L937, LC\_102x102x6,4\_L943, LC\_102x102x6,4\_L1505 e LC\_102x102x6,4\_L1517 foram adicionados por aba da cantoneira, um LVDT posicionado a 1/8 da extremidade superior quando a cantoneira já estava instalada na prensa. Os resultados obtidos não foram significativos, e, por isso não se adotou esta estratégia para os demais ensaios.

Foram posicionados dois LVDTs na mesa superior da prensa para investigar a rotação da mesa, uma vez que, conforme citado anteriormente, esta possui um assento esférico que simula uma articulação rotulada. A mesa superior da prensa tem um formato retangular, neste caso instalaram-se dois LVDTs nas extremidades opostas das diagonais para registrar qualquer rotação da mesa superior da prensa.

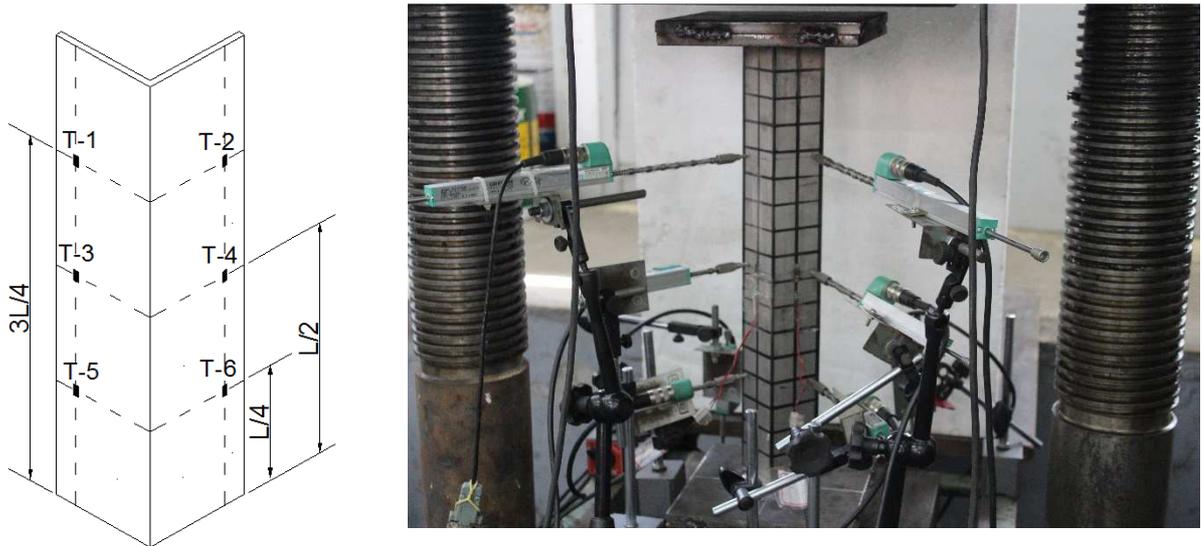


Figura 36 – Esquema do posicionamento dos transdutores de deslocamentos

Os extensômetros tiveram o mesmo critério de posicionamento longitudinal adotado para os LVDTs. No sentido transversal, os extensômetros foram posicionados no ponto médio das abas, ver Figura 37.

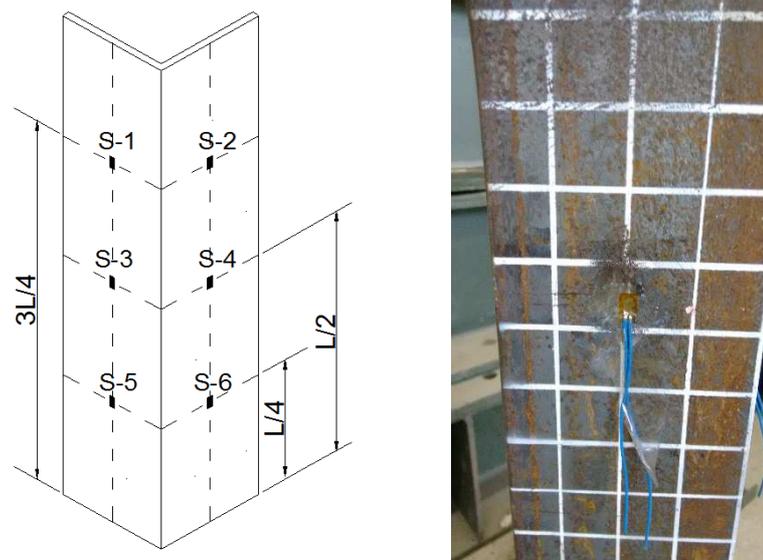


Figura 37 – Esquema do posicionamento dos extensômetros

O posicionamento dos LVDTs e dos extensômetros descritos anteriormente foi definido após os ensaios preliminares com as cantoneiras em aço carbono 51x51x4,8. Para estes ensaios, os LVDTs estavam localizados a meia altura e no centroide da seção transversal e se verificou que, nesta posição, os resultados obtidos foram pouco expressivos. Os extensômetros também estavam fixados a meia altura e no centro da aba. Diferente do que foi adotado nos demais ensaios, havia dois extensômetros no mesmo ponto sendo um no lado externo e outro no lado interno conforme pode ser observado na Figura 38. Observando os resultados, verificou-se que os extensômetros internos mostraram-se pouco relevantes na análise dos resultados pois apresentaram diferenças muito pequenas em termos de deformações quando comparadas com as medições dos extensômetros externos.



Figura 38 – Esquema do posicionamento dos LVDTs e dos extensômetros para os ensaios preliminares

## 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

No presente capítulo serão apresentadas as análises dos resultados obtidos nos ensaios realizados para as cantoneiras em aço carbono e em aço inoxidável. Todos os gráficos destes ensaios estão apresentados nos Anexos A e B, e nos anexos C, as dimensões reais experimentais medidas para todas as cantoneiras. Neste capítulo, apresentar-se-ão os gráficos mais relevantes para a completa caracterização e entendimento do comportamento estrutural de cantoneiras em aço carbono e em aço inoxidável sujeitas a carregamento centrado.

### 4.1. Ensaios de Cantoneiras em Aço Carbono

#### 4.1.1. Carga Última e Modos de Flambagem

Como mencionado no capítulo anterior, as cantoneiras em aço carbono foram ensaiadas com repetição de dois espécimes com comprimentos relativamente próximos. Os gráficos da Figura 39 a Figura 41 apresentam as curvas de carga última *versus* deslocamento vertical para as três seções transversais laminadas com os respectivos modos de falhas.

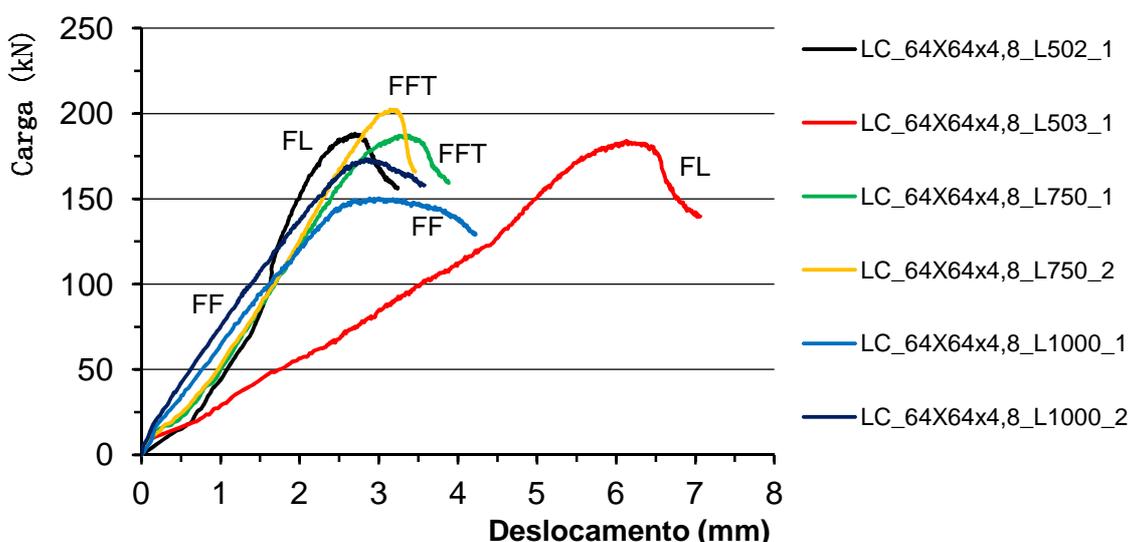


Figura 39 – Gráfico carga *versus* deslocamento vertical dos ensaios - LC\_64x64x4,8

Onde:

FL (Flambagem Local),

FFT (Flambagem por Flexo-Torção)

FF (Flambagem por Flexão)

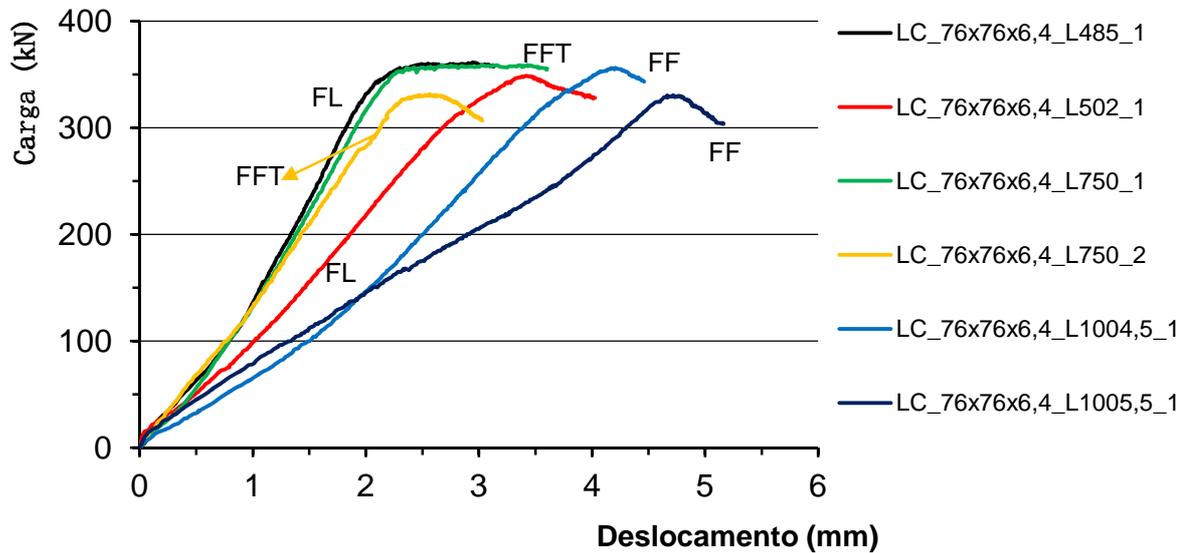


Figura 40 - Gráfico carga versus deslocamento vertical dos ensaios LC\_76x76x6,4

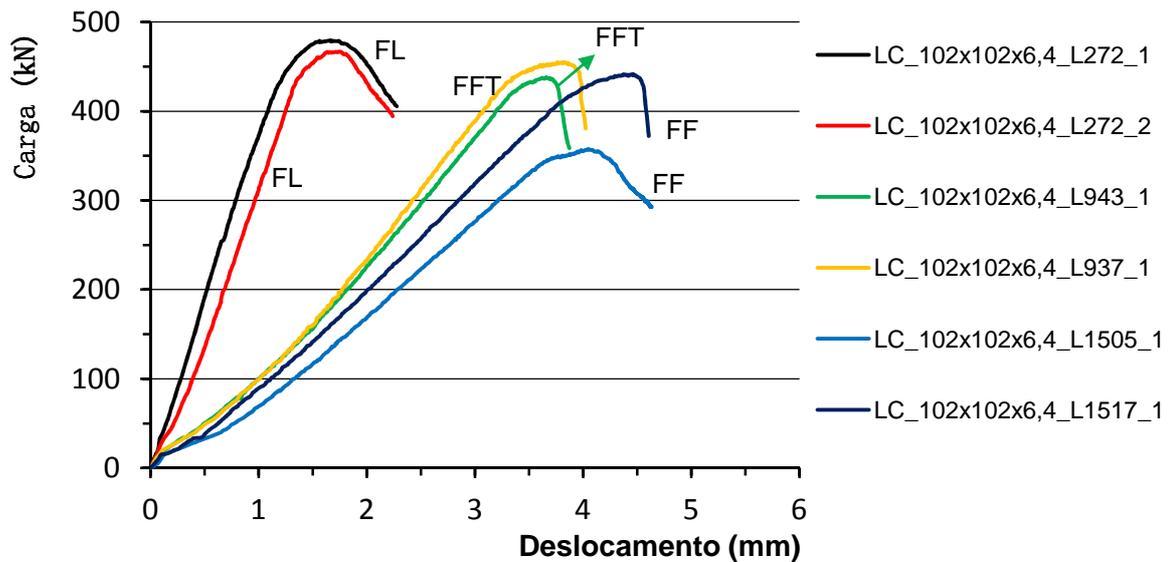


Figura 41 - Gráfico carga versus deslocamento vertical dos ensaios LC\_102x102x6,4

Observa-se nestes gráficos, as variações das faixas de carregamentos de acordo com as seções transversais: as cantoneiras LC\_64x64x4,8 tem faixa de carregamento de 0 a 200kN, as cantoneiras LC\_76x76x6,4 faixa de 0 a 350 kN e as cantoneiras LC\_102x102x6,4 com faixa de 0 a 500 kN. Na Tabela 10 são apresentados os resultados das cargas última axiais e os respectivos modos de falha, onde se observa que para todas as seções transversais, houve três tipos de flambagem observados a saber: a flambagem local das abas da seção transversal, flambagem por flexo-torção e flambagem por flexão.

Tabela 10 – Resumo dos resultado para cantoneiras em aço carbono

Ensaio	Carga Máxima (kN)	Modo de Falha
LC_64x64x4,8_L502_1	188,18	Flambagem local
LC_64x64x4,8_L503_1	183,94	Flambagem local
LC_64x64x4,8_L750_1	187,35	Flambagem por flexo-torção
LC_64x64x4,8_L750_2	202,38	Flambagem por flexo-torção
LC_64x64x4,8_L1000_1	150,35	Flambagem por flexão
LC_64x64x4,8_L1000_2	173,20	Flambagem por flexão
LC_76x76x6,4_L485_1	361,15	Flambagem local
LC_76x76x6,4_L502_1	348,61	Flambagem local
LC_76x76x6,4_L750_1	358,87	Flambagem por flexo-torção
LC_76x76x6,4_L750_2	331,58	Flambagem por flexo-torção
LC_76x76x6,4_L1004,5_1	356,02	Flambagem por flexão
LC_76x76x6,4_L1005,5_1	330,44	Flambagem por flexão
LC_102x102x6,4_L272_1	479,18	Flambagem local
LC_102x102x6,4_L272_2	466,74	Flambagem local
LC_102x102x6,4_L937_1	438,11	Flambagem por flexo-torção
LC_102x102x6,4_L943_1	454,74	Flambagem por flexo-torção
LC_102x102x6,4_L1505_1	357,48	Flambagem local
LC_102x102x6,4_L1517_1	441,39	Flambagem local

A Figura 42 ilustra um exemplo da configuração deformada do ensaio LC\_76x76x6,4\_L485\_1 que apresentou flambagem local (FL). Da Figura 43 a Figura 46 são apresentados gráficos referentes a este ensaio. No gráfico da Figura 43 observa-se que no ponto de carregamento máximo há um pequeno trecho de patamar, caracterizando neste trecho, uma determinada resistência da cantoneira.

Já a Figura 44 ilustra a curva carga *versus* deformação onde se pode observar que o extensômetro S-1 instalado em uma das abas passa a apresentar uma diminuição da deformação de compressão a partir do ponto de carga máxima. Isto evidencia que esta face da aba passa a estar tracionada após a ocorrência da flambagem local.

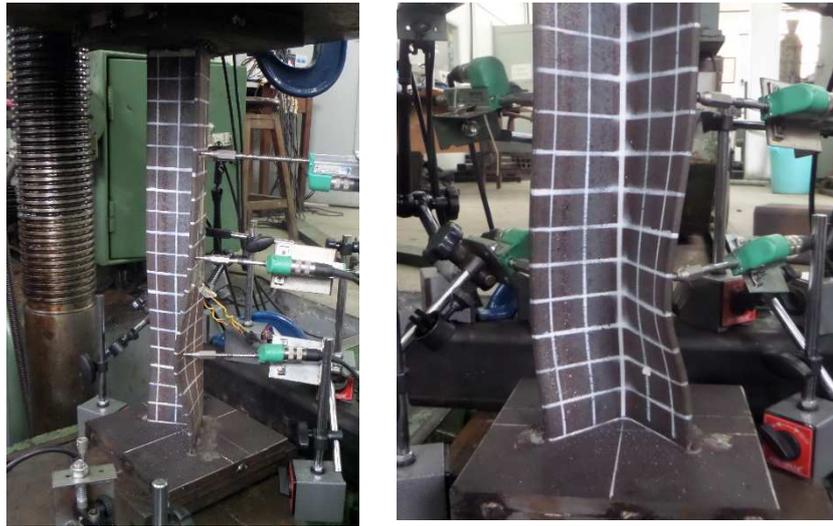


Figura 42 – Configuração deformada da cantoneira LC\_76x76x6,4\_L485\_1 - FL

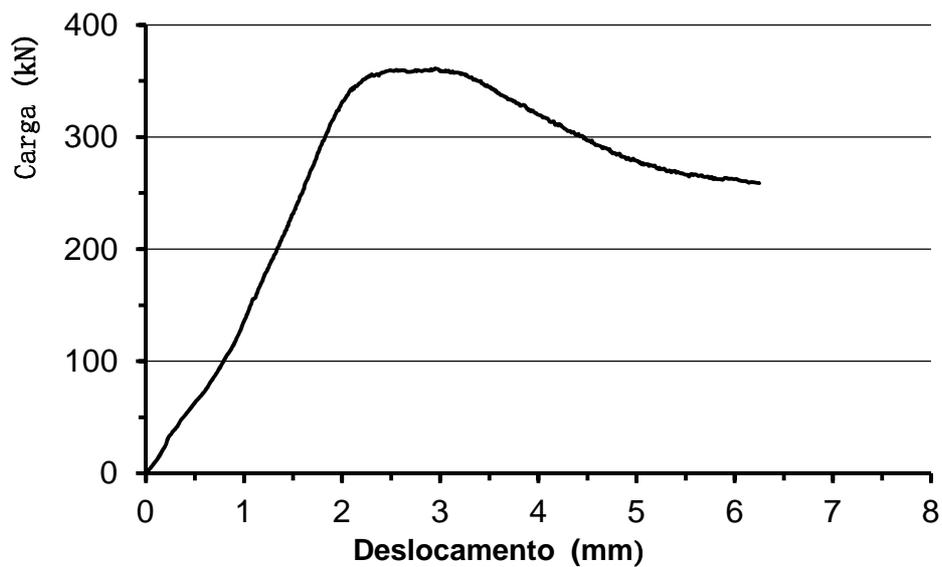


Figura 43 – Carga aplicada *versus* deslocamento vertical - LC\_76x76x6,4\_L485\_1 - FL

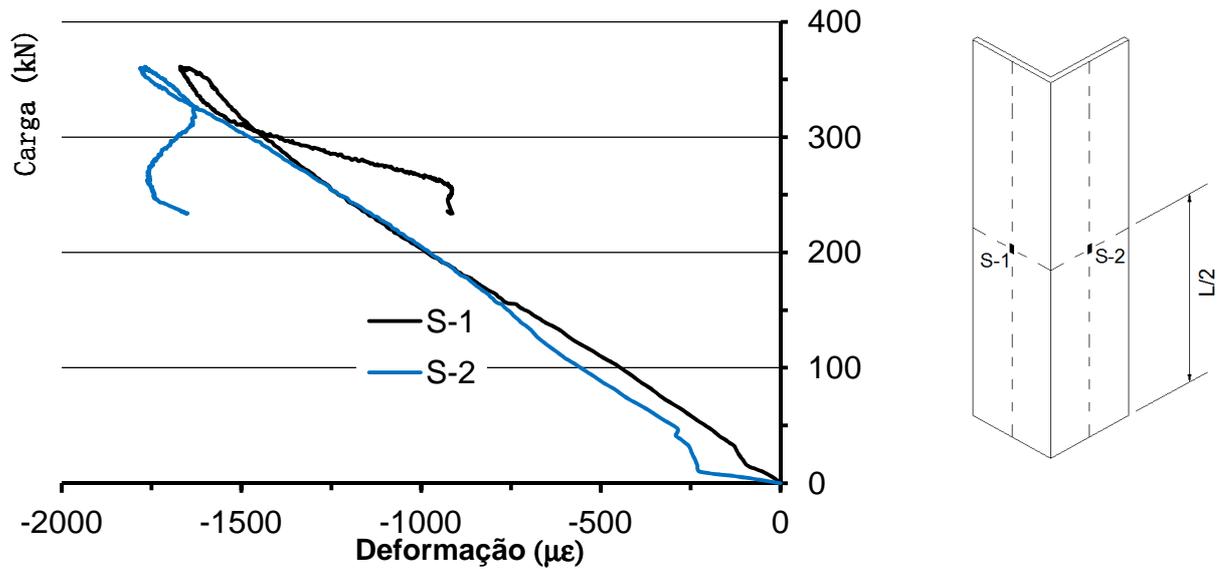


Figura 44 – Carga aplicada *versus* deformação - LC\_76x76x6,4\_L485\_1 – FL

As curvas carga *versus* deslocamento horizontal para este ensaio onde ocorreu a flambagem local apresentadas na Figura 45, apresentam um dos LVDTs (T6) com o deslocamento muito mais acentuado do que os demais após a carga máxima ser atingida. Antes de se atingir a carga máxima, verifica-se pequenos deslocamentos em todos os LVDTs.

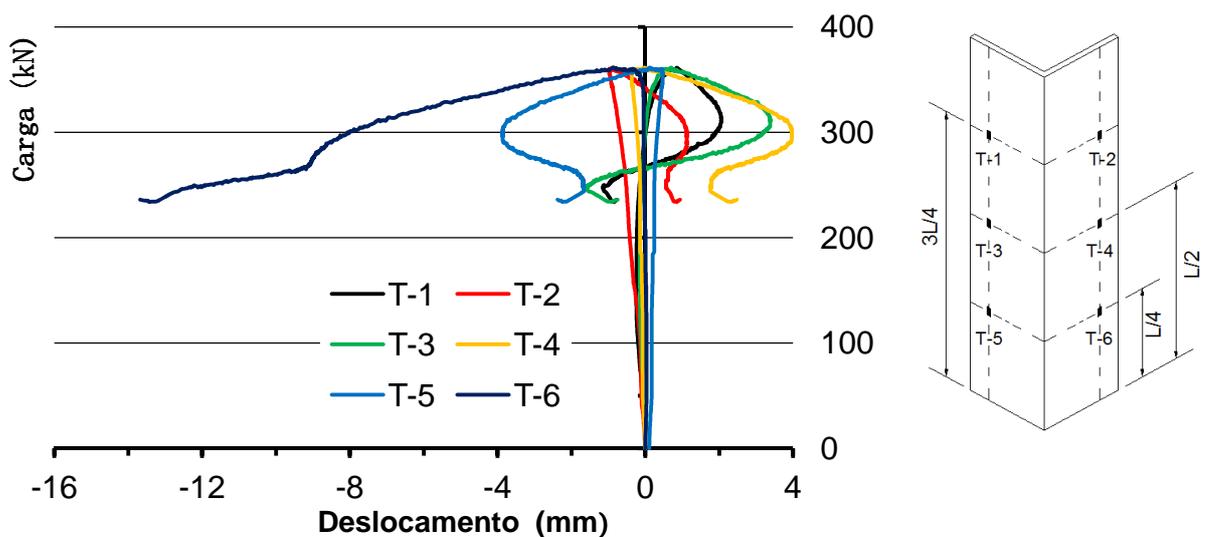


Figura 45 – Carga aplicada *versus* deslocamento horizontal - LC\_76x76x6,4\_L485\_1 - FL

A Figura 46 mostra um exemplo da configuração da flambagem por flexão (FF) para o ensaio da cantoneira LC\_76x76x6,4\_L1004,5\_1 e resultados obtidos nestes ensaios são apresentados posteriormente nos gráficos da Figura 47 a Figura 49. Na Figura 47 apresenta-se a curva *versus* deslocamento vertical onde se observa que não há um trecho com patamar, como havia ocorrido no ensaio cuja falha foi caracterizada pela flambagem local - ver Figura 43. Este fato evidencia a ocorrência de flambagem por flexão. Na curva carga *versus* deformação apresentada no gráfico da Figura 48, observa-se que os extensômetros posicionados nas mesmas alturas possuíram comportamento de deformação semelhante. Este comportamento também ocorreu quando os resultados obtidos por meio das leituras dos LVDTs usados neste ensaio são apresentados no gráfico da Figura 49 em que contempla a relação de carga *versus* deslocamento horizontal. Neste gráfico é possível observar que depois de se atingir a carga máxima, todas as curvas evidenciam o deslocamento da cantoneira para um mesma direção caracterizando a flambagem por flexão, fato este que também pode ser observado na configuração deformada da cantoneira na Figura 46.

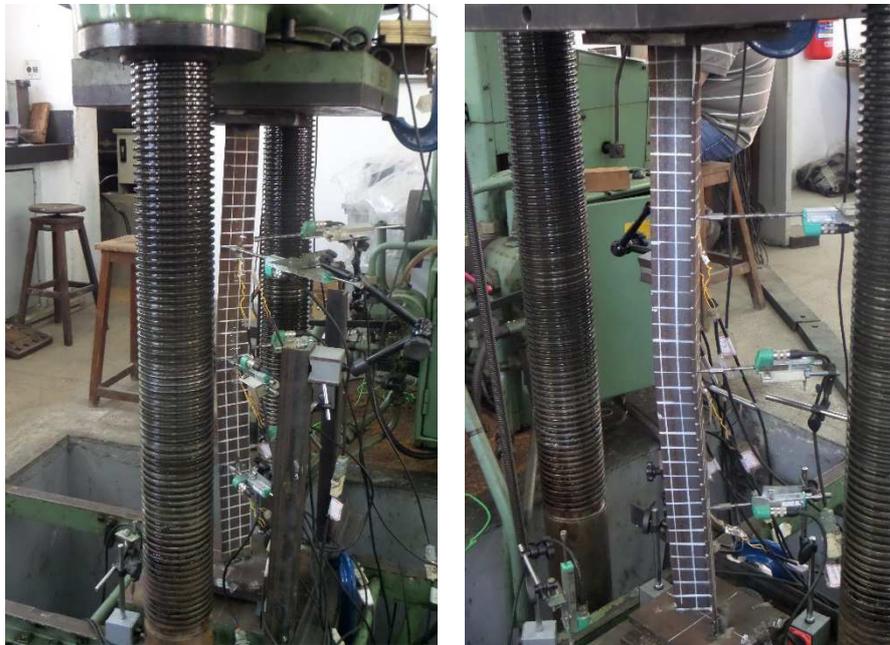


Figura 46 – Configuração deformada da cantoneira LC\_76x76x6,4\_L1004,5\_1 – FF

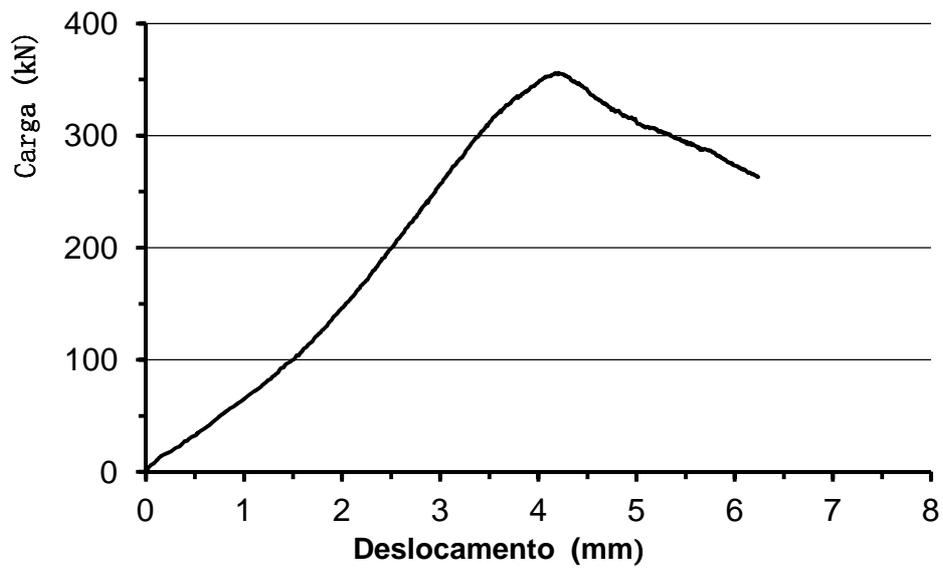


Figura 47 – Carga aplicada *versus* deslocamento vertical - LC\_76x76x6,4\_L1004,5\_1 – FF

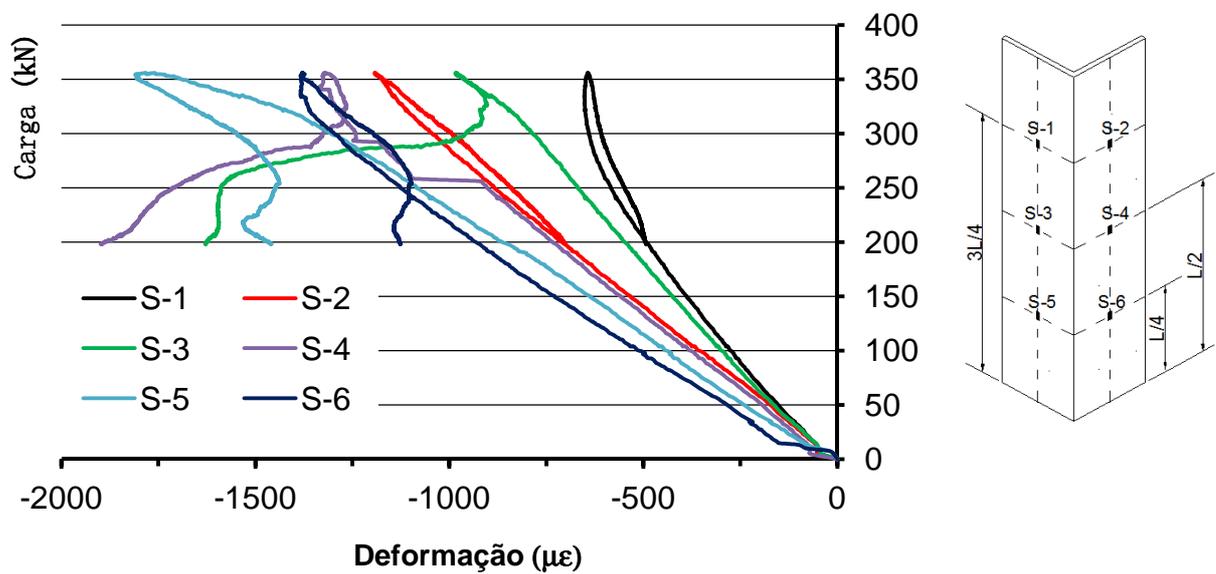


Figura 48 – Carga aplicada *versus* deformação - LC\_76x76x6,4\_L1004,5\_1 - FF

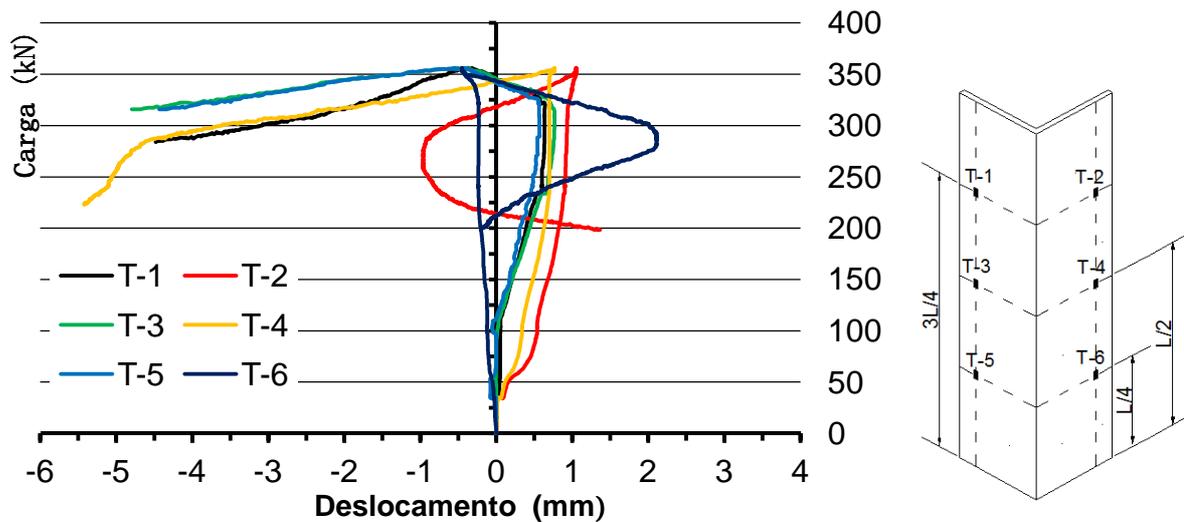


Figura 49 – Carga aplicada *versus* deslocamento horizontal - LC\_76x76x6,4\_L1004,5\_1 - FF

A Figura 50 mostra a configuração da flambagem por flexo-torção (FFT). Durante o ensaio, observou-se que ocorrera primeiro, a deformação global de torção e depois a deformação global por flexão. Também se nota pelas ilustrações da Figura 51 que surgem rótulas plásticas nas extremidades da coluna para todos os ensaios em que houve a flambagem por flexo-torção.

De modo geral, as leituras obtidas através dos extensômetros lineares entre as séries foram similares quando analisadas somente as colunas que tiveram a flambagem por flexo-torção. A Figura 52 mostra a deformação vertical a meia altura de uma coluna ensaiada, ressaltando-se que os extensômetros foram posicionados na direção do centroide em cada uma das abas da seção transversal da cantoneira. Pelo gráfico da Figura 52 nota-se que a deformação inicia-se com valores de compressão; quando as curvas de deformação atingem um valor na ordem dos  $800\mu\epsilon$ , uma das curvas mantém a deformação de compressão e na outra curva há uma redução nos valores da deformação a compressão, caracterizando o surgimento a partir daquele ponto, de deformações de tração. Para este nível de carga aplicada, verifica-se o surgimento da torção na seção transversal. Continuando a aplicação do carregamento na coluna, o extensômetro que havia mantido a leitura de deformação de compressão, quando atinge uma deformação na ordem dos  $1550\mu\epsilon$ , também passa a ter deformação de tração, caracterizando a flexão, ver Figura 53.

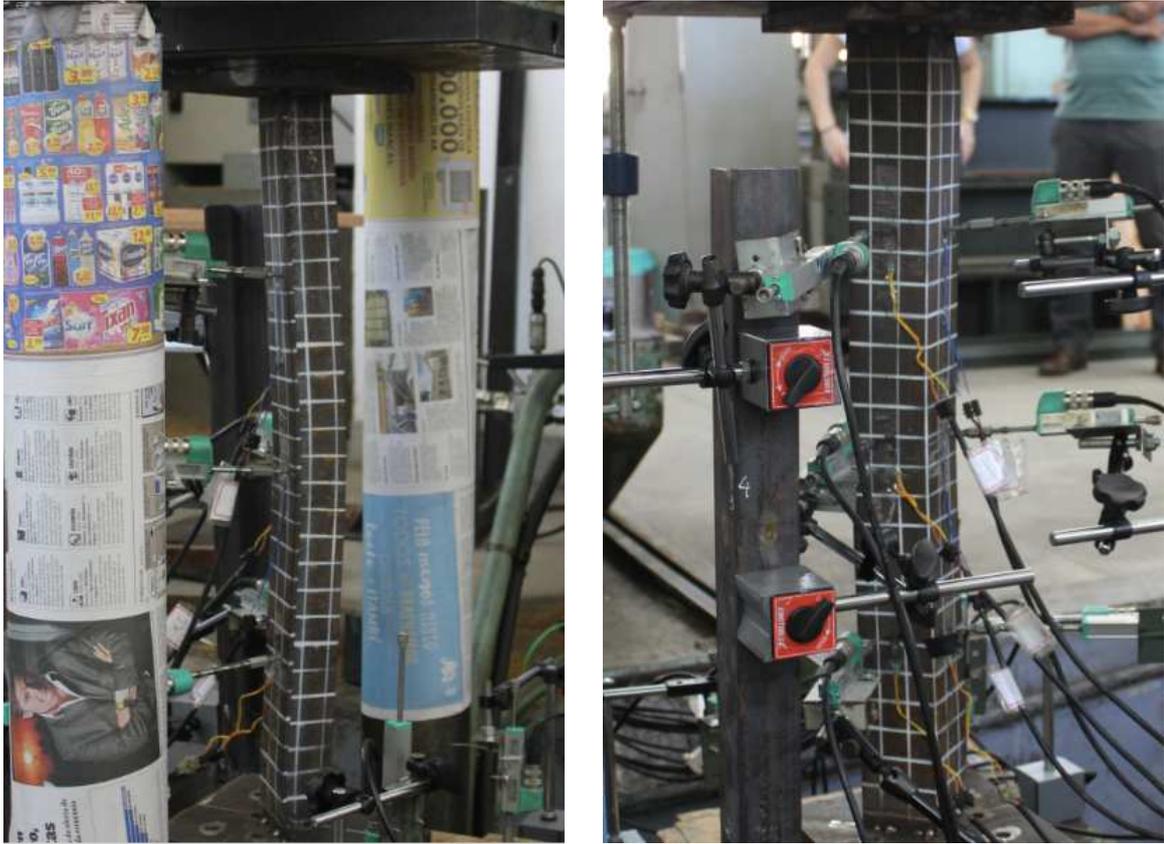


Figura 50 – Configuração deformada da cantoneira LC\_76x76x6,4\_L750\_1 - FFT



Figura 51 – Detalhe das extremidades da coluna LC\_76x76x6,4\_L750\_1

Observando-se os gráficos da Figura 52 e da Figura 53 para uma mesma coluna submetida a compressão pode haver a combinação da deformação a torção e da deformação a flexão caracterizando a flexo-torção.

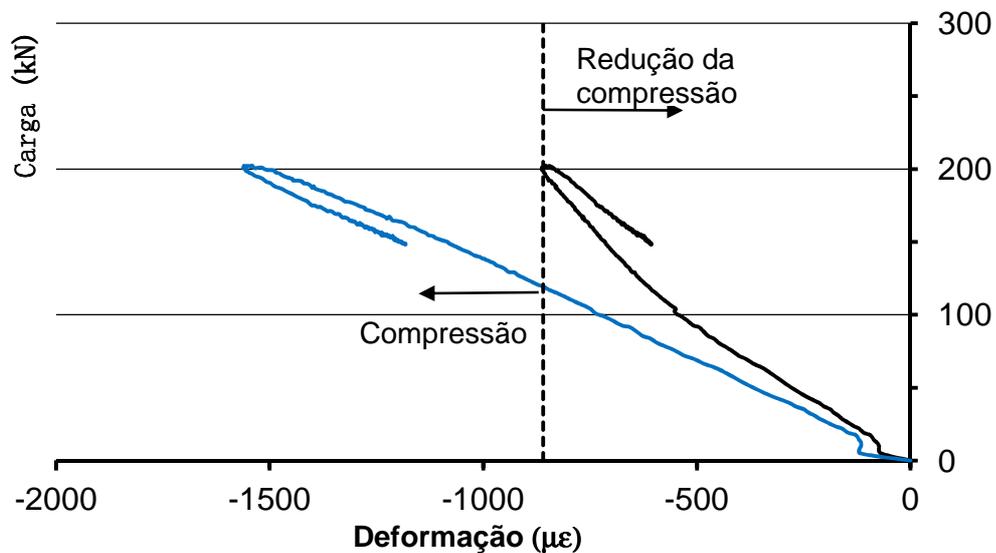


Figura 52 – Carga aplicada versus deformação vertical para as cantoneiras com FFT –  
Ensaio LC\_76x76x6,4\_L750\_1

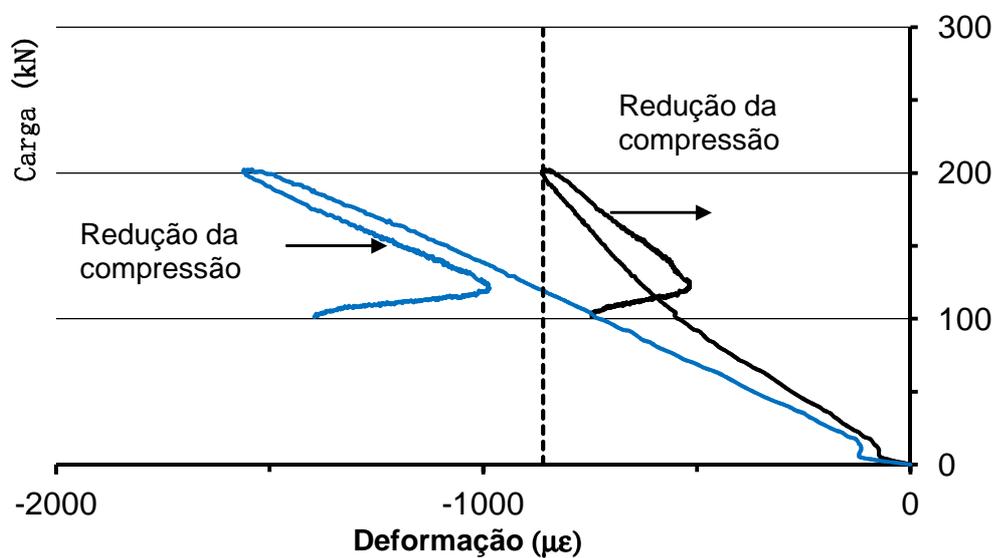


Figura 53 – Carga aplicada versus deformação vertical para as cantoneiras com FFT –  
Ensaio LC\_76x76x6,4\_L750\_1 - aba 2

#### 4.1.2. Curvas Carga versus Deslocamentos Horizontais

Os gráficos obtidos com os resultados das leituras dos transdutores de deslocamento são apresentados a seguir como exemplo para uma das cantoneiras. Conforme citado anteriormente, os gráficos dos demais ensaios são apresentados no Anexo A todos os ensaios das cantoneiras em aço carbono.

Todos os gráficos apresentados são referentes a flambagem por flexo-torção. Como já mencionado anteriormente, os transdutores de deslocamento foram posicionados a  $1/4$ ,  $1/2$  e a  $3/4$  do comprimento longitudinal das colunas, colocando-se, nestes pontos, dois transdutores sendo um para cada aba da cantoneira. Com o objetivo de se obter melhor os resultados dos deslocamentos, todos os transdutores foram posicionados a 1,5 mm da extremidade das abas.

Os gráficos da Figura 54 a Figura 56 apresentam os resultados dos deslocamentos horizontais para a cantoneira LC\_76x76x6,4\_L750\_2 para cada par de transdutores.

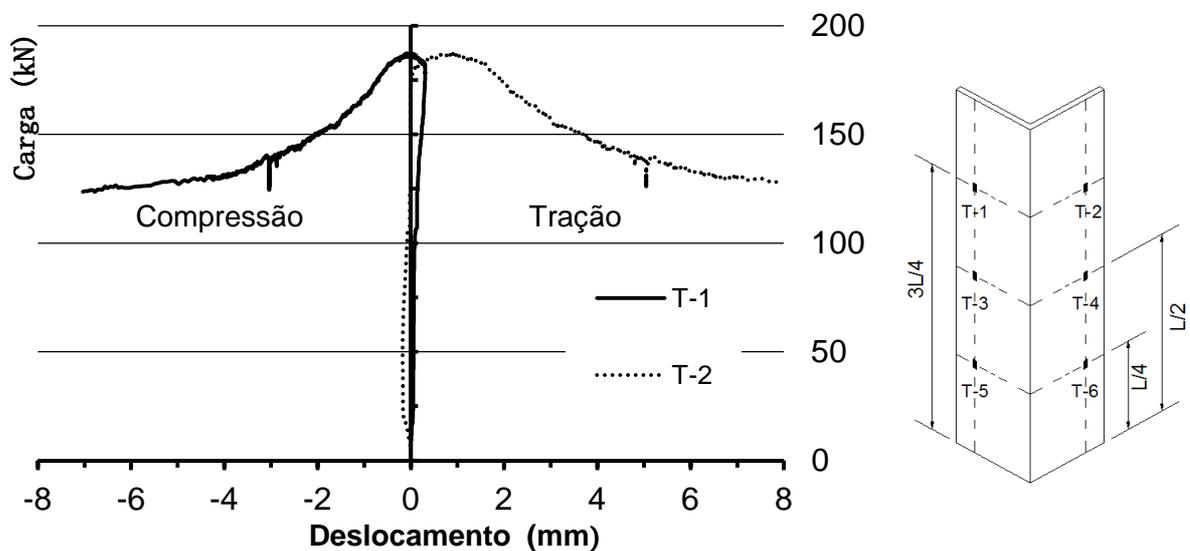


Figura 54 – Deslocamento horizontal *versus* carga para os transdutores posicionados a  $3/4$  da altura da coluna LC\_76x76x6,4\_L750\_2

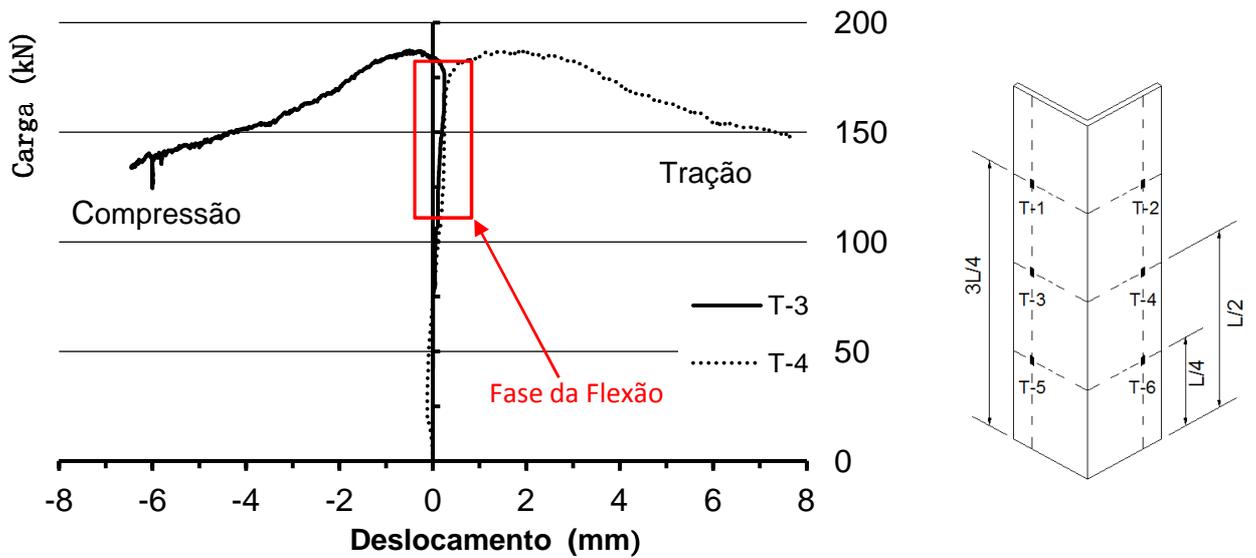


Figura 55 – Deslocamento horizontal *versus* carga para os transdutores posicionados a meia da altura da coluna LC\_76x76x6,4\_L750\_2

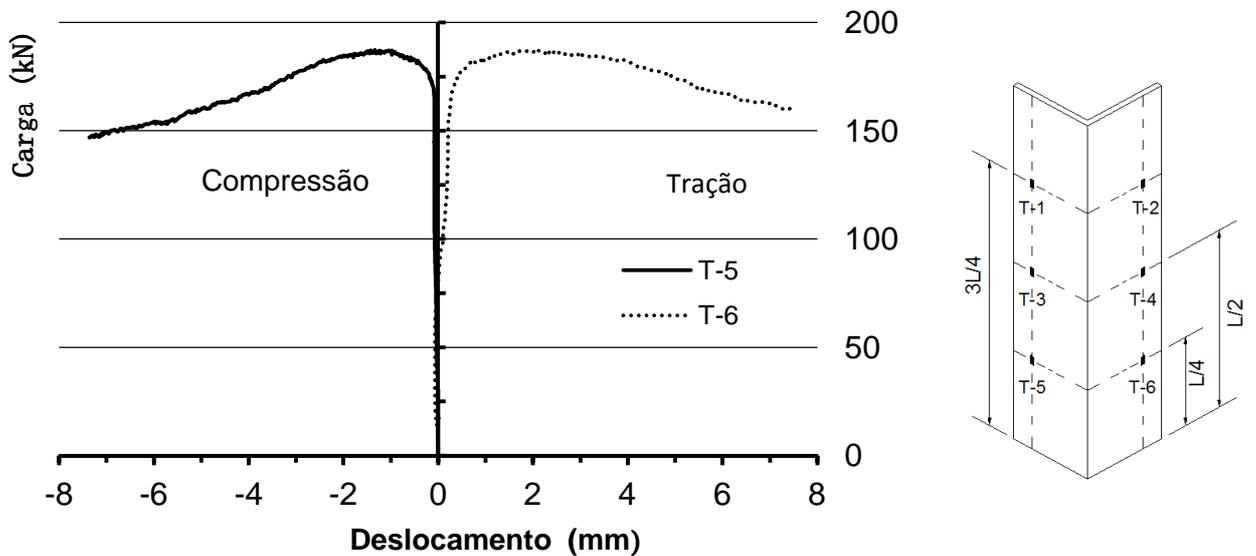


Figura 56 – Deslocamento horizontal *versus* carga para os transdutores posicionados a  $1/4$  da altura da coluna LC\_76x76x6,4\_L750\_2

Na Figura 57 são apresentados os resultados agrupados dos seis transdutores de deslocamento para o ensaio LC\_76x76x6,4\_L750\_2.

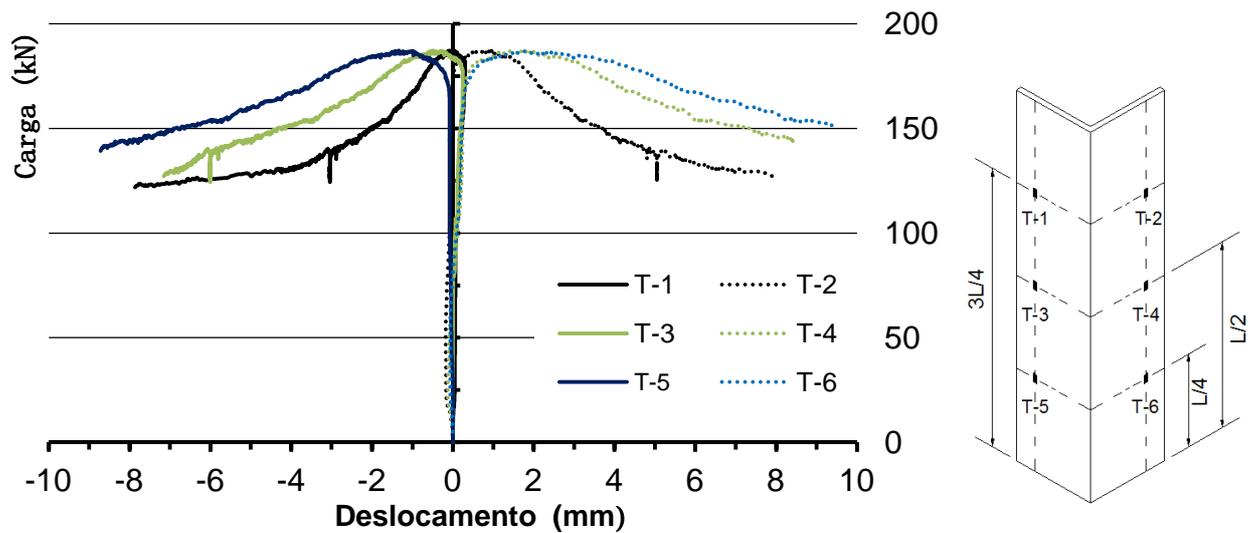


Figura 57 – Deslocamento horizontal *versus* carga para todos os transdutores posicionados ao longo da coluna LC\_76x76x6,4\_L750\_2

Nos gráficos da Figura 54 a Figura 56 e, conseqüentemente da Figura 57 pode ser observado que há uma predominância da deformação a torção tendo em vista a simetria entre os pares de transdutores. Nestes gráficos observa-se que depois da coluna alcançar a carga crítica, ocorre uma diferença no traçado das curvas. Isto pode ter ocorrido devido ao fato da prensa hidráulica utilizada no ensaio possuir um assento esférico no topo da coluna o que provocaria uma menor resistência a torção neste ponto.

A Figura 55 apresenta o gráfico para os transdutores de deslocamentos posicionados a meia altura da coluna ensaiada. Na figura há um destaque para a região onde ocorreu a flexão. Após a fase de flexão e mantendo-se o carregamento no ensaio, nota-se que o deslocamento que prevalece é referente ao fenômeno da flexo-torção. O gráfico da Figura 57 mostra todos os transdutores de deslocamento distribuídos conforme o distanciamento relatado no início deste subitem. Quando a coluna atingiu uma carga superior a 100kN, a coluna começa a apresentar deformações de flexão ao longo de toda a coluna confirmando de que se trata de uma flambagem flexo-torção. Na Figura 58 é apresentada a configuração deformada da cantoneira LC\_76x76x6,4\_L750\_2 após o ensaio caracterizando bem a flambagem por flexo-torção.



Figura 58 – Configuração deformada após o ensaio - coluna LC\_76x76x6,4\_L750\_2.

#### 4.1.3. Rotação da mesa superior

Para todos os ensaios de cantoneira em aço carbono foram medidos os deslocamentos do prato superior da prensa, de modo a avaliar a condição de contorno utilizada e a rotação da mesa ao longo da realização dos ensaios. A Figura 59 mostra um dos transdutores posicionados e devido à restrição no comprimento do transdutor foi colocada uma base para que fosse possível fazer a leitura.

Na Figura 60 é apresentado um exemplo de gráfico com as curvas carga *versus* deslocamento dos transdutores. Cabe ressaltar que para todos os ensaios das cantoneiras em aço carbono, os gráficos tiveram o mesmo comportamento. O gráfico mostra que os deslocamentos da mesa são próximos a zero até um determinado carregamento (100kN), e a partir deste, os deslocamentos aumentam de forma súbita até valores da ordem de 0,03mm. Os deslocamentos desta ordem apresentados antes do alcance da carga máxima (300kN) podem ser resultado da fixação dos LVDT's ou da adaptação do sistema como um todo, uma vez que a maior parcela acontece no início do ensaio. Observa-se também que depois de

alcançada a carga máxima a variação de deslocamento para ambas as curvas é muito pequena, da ordem de 0,001mm.

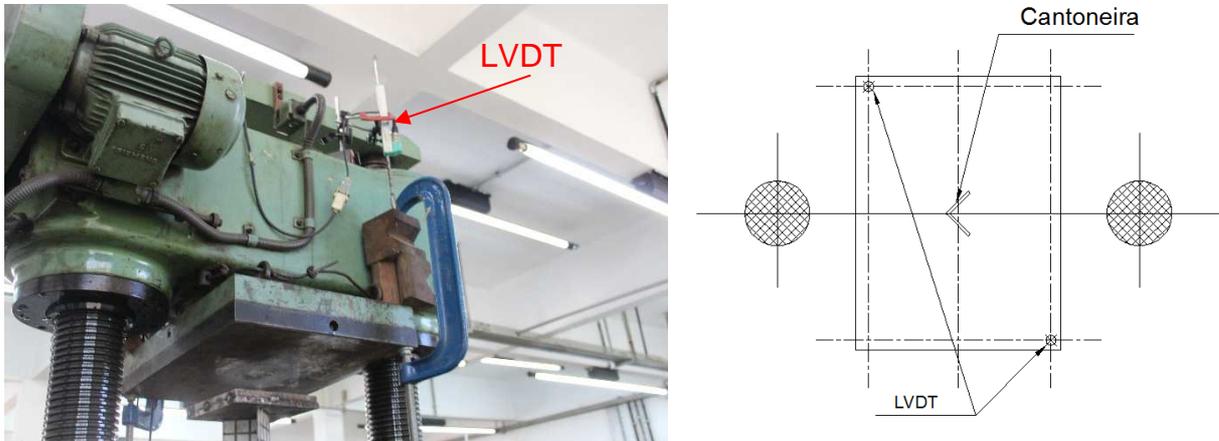


Figura 59 – Posicionamento dos transdutores para leitura do deslocamento do prato superior da prensa – cálculo da rotação do prato superior

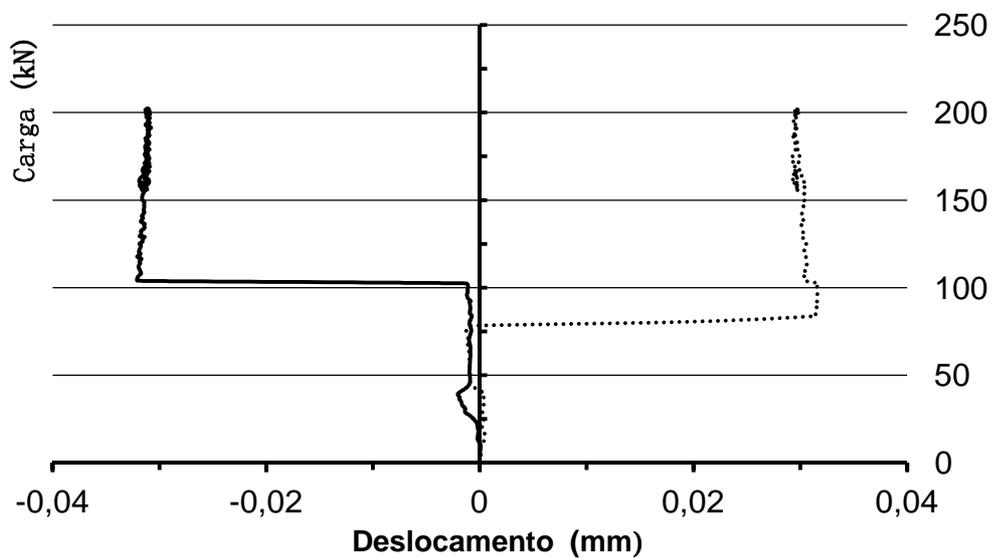


Figura 60 – Medição dos deslocamentos da mesa superior da prensa do ensaio LC\_64x64x4,8\_L750\_2

Para maior compreensão do fenômeno, a Figura 61 mostra a rotação do ponto onde se posicionaram os transdutores, calculada a partir dos resultados anteriores. Confirma-se que a rotação durante todo é de pequena variação.

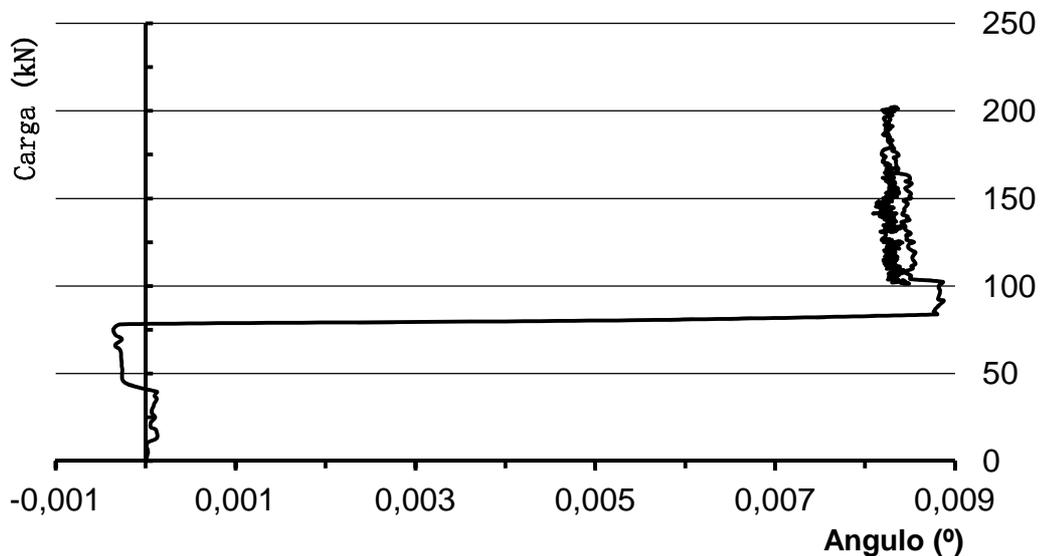


Figura 61 – Rotação da mesa superior do ensaio

## 4.2. Ensaio de Cantoneiras em Aço Inoxidável

### 4.2.1. Carga última e modos de flambagem para o aço inoxidável

Neste item do presente trabalho serão apresentados os resultados dos ensaios com cantoneiras em aço inoxidável. Diferentemente dos ensaios de aço carbono em que houve repetição em todos os ensaios, para os ensaios em aço inoxidável somente as cantoneiras LSS\_64x64x4,8 foram as que tiveram repetição. As demais cantoneiras em aço inoxidável foram ensaiadas sem repetição de comprimentos. Os gráficos da Figura 62 a Figura 64 apresentam o comportamento das curvas carga crítica *versus* deslocamento vertical com os seus respectivos modos de falha.

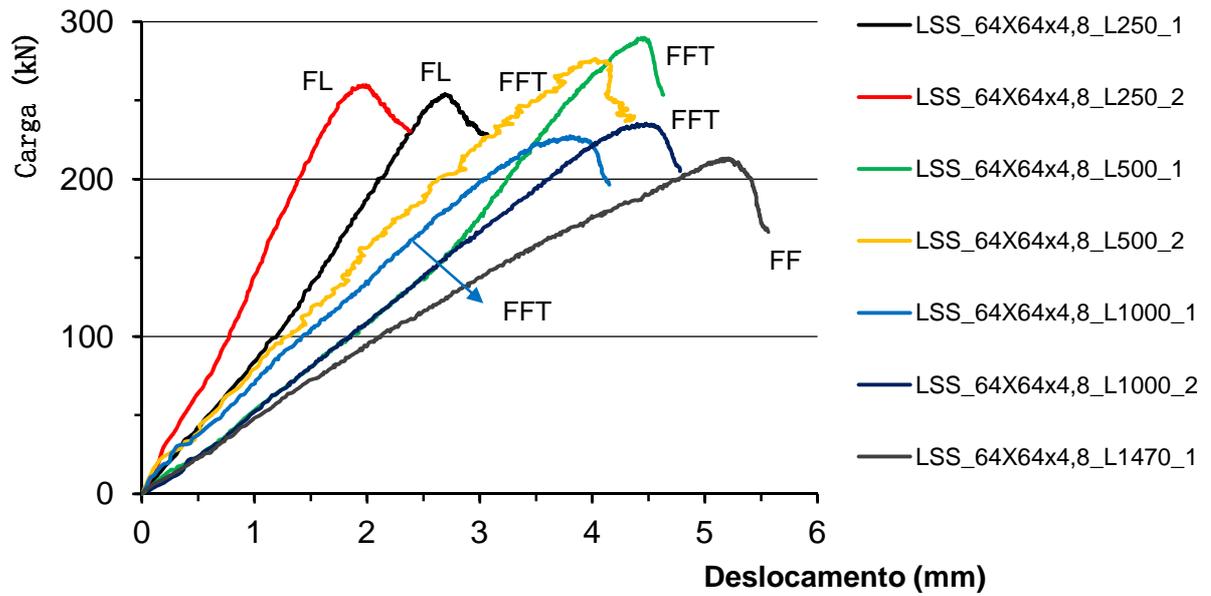


Figura 62 – Gráfico carga versus deslocamento vertical dos ensaios - LSS\_64x64x4,8

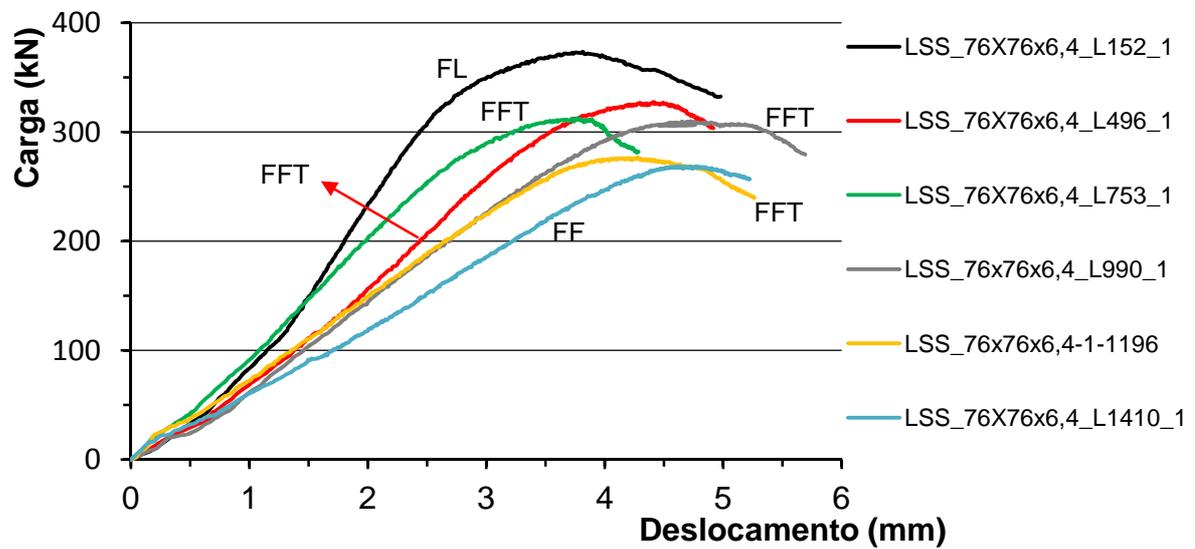


Figura 63 – Gráfico carga versus deslocamento vertical dos ensaios - LSS\_76x76x6,4

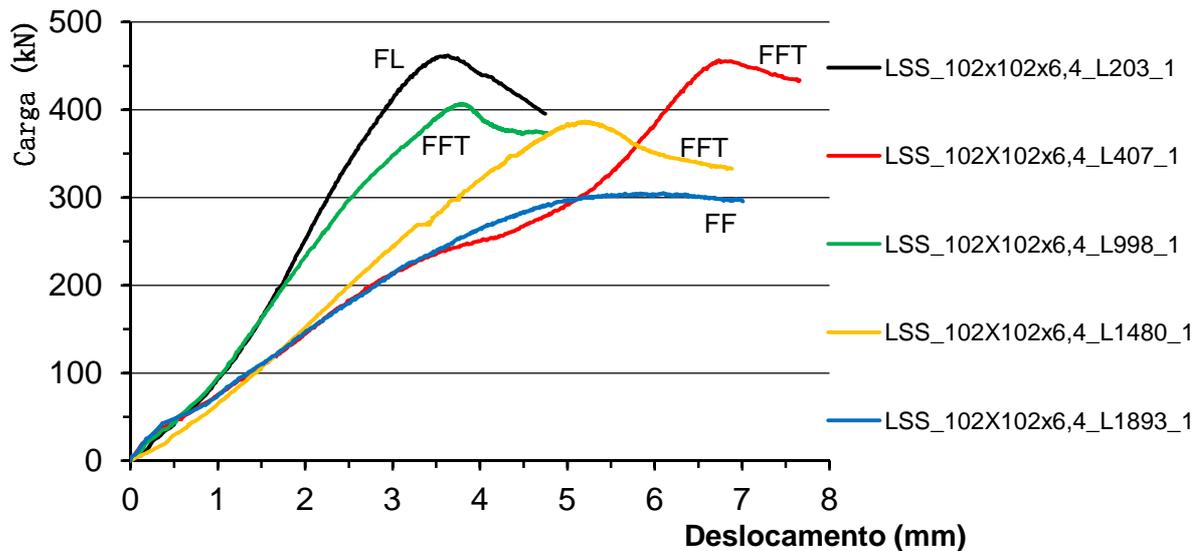


Figura 64 – Gráfico carga *versus* deslocamento vertical dos ensaios - LSS\_102x102x6,4

Analisando-se os gráficos da Figura 62 a Figura 64, foram observadas as seguintes variações das faixas de carregamentos de acordo com a seção transversal: as cantoneiras LSS\_64x64x4,8 tem faixa de carregamento de 0 a 300kN, as cantoneiras LSS\_76x76x6,4 faixa de 0 a 400 kN e as cantoneiras LC\_102x102x6,4 com faixa de 0 a 500 kN. Na Tabela 11 são apresentados os resultados das cargas máximas e os modos de falha observados no ensaios, onde se verifica que para todas as seções transversais, ocorreram três tipos de flambagem: local das abas da seção transversal, flexo-torção e flexão.

A Figura 65 ilustra a configuração deformada para a cantoneira em aço inoxidável 76x76x6,4 com 152 mm de comprimento cuja falha é caracterizada pela flambagem local (FL). Para a mesma cantoneira, os gráficos da Figura 66 e da Figura 67 apresentam as curvas carga *versus* deslocamento vertical e carga *versus* deformação, respectivamente. Na Figura 66 nota-se que a carga máxima foi próxima dos 370 kN e que neste ponto, a curva tem um traçado suave, os extensômetros representados nas curvas da Figura 67 foram posicionados igualmente e os mesmos quando alcançam a carga máxima tem comportamento distintos. Por causa do comprimento da cantoneira não foram feitas as leituras dos deslocamentos.

Tabela 11 - Resumo dos resultado para cantoneiras em aço inoxidável

Ensaio	Carga Máxima (kN)	Modo de Falha
LSS_64x64x4,8_L250_1	253,92	Flambagem local
LSS_64x64x4,8_L250_2	259,52	Flambagem local
LSS_64x64x4,8_L500_1	289,77	Flambagem por flexo-torção
LSS_64x64x4,8_L500_2	276,41	Flambagem por flexo-torção
LSS_64x64x4,8_L1000_1	227,31	Flambagem por flexo-torção
LSS_64x64x4,8_L1000_2	235,11	Flambagem por flexo-torção
LSS_64x64x4,8_L1470_1	213,06	Flambagem por flexão
LSS_76x76x6,4_L152_1	373,38	Flambagem local
LSS_76x76x6,4_L496_1	327,47	Flambagem por flexo-torção
LSS_76x76x6,4_L753_1	312,73	Flambagem por flexo-torção
LSS_76x76x6,4_L990_1	309,78	Flambagem por flexo-torção
LSS_76x76x6,4_L1196_1	276,77	Flambagem por flexo-torção
LSS_76x76x6,4_L1410_1	268,45	Flambagem por flexão
LSS_102x102x6,4_L203_1	461,64	Flambagem local
LSS_102x102x6,4_L407_1	456,35	Flambagem por flexo-torção
LSS_102x102x6,4_L998_1	407,01	Flambagem por flexo-torção
LSS_102x102x6,4_L1480_1	386,71	Flambagem por flexo-torção
LSS_102x102x6,4_L1893_1	304,90	Flambagem por flexão

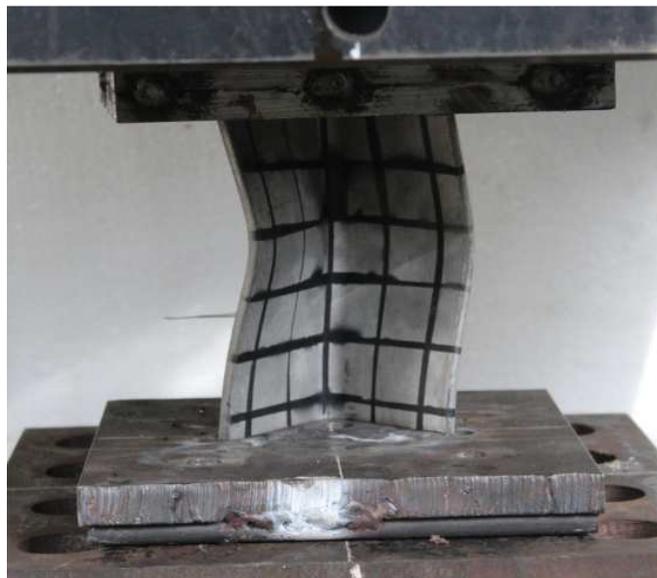


Figura 65 – Configuração deformada - LSS\_76x76x6,4\_L152\_1 – FL

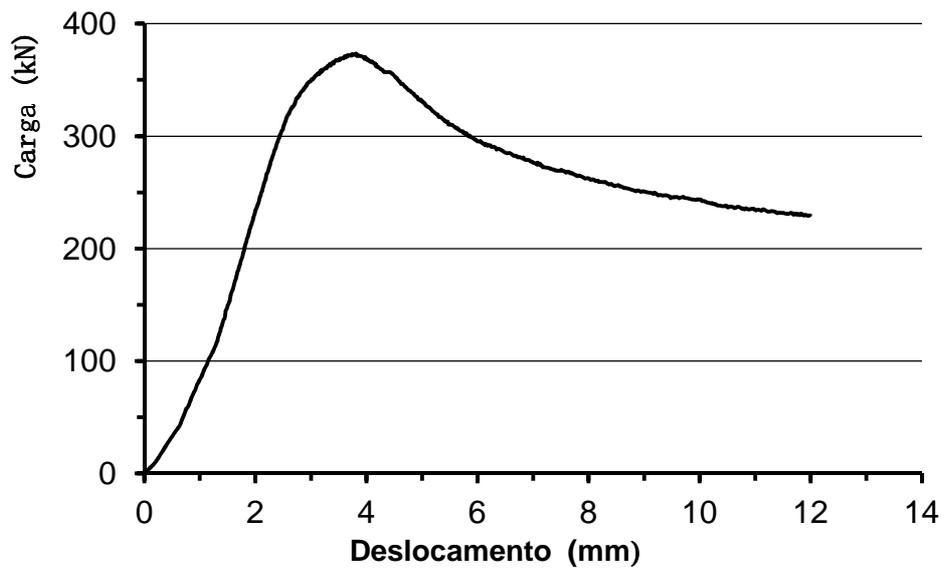


Figura 66 – Carga aplicada *versus* deslocamento vertical - LSS\_76x76x6,4\_L152\_1 – FL

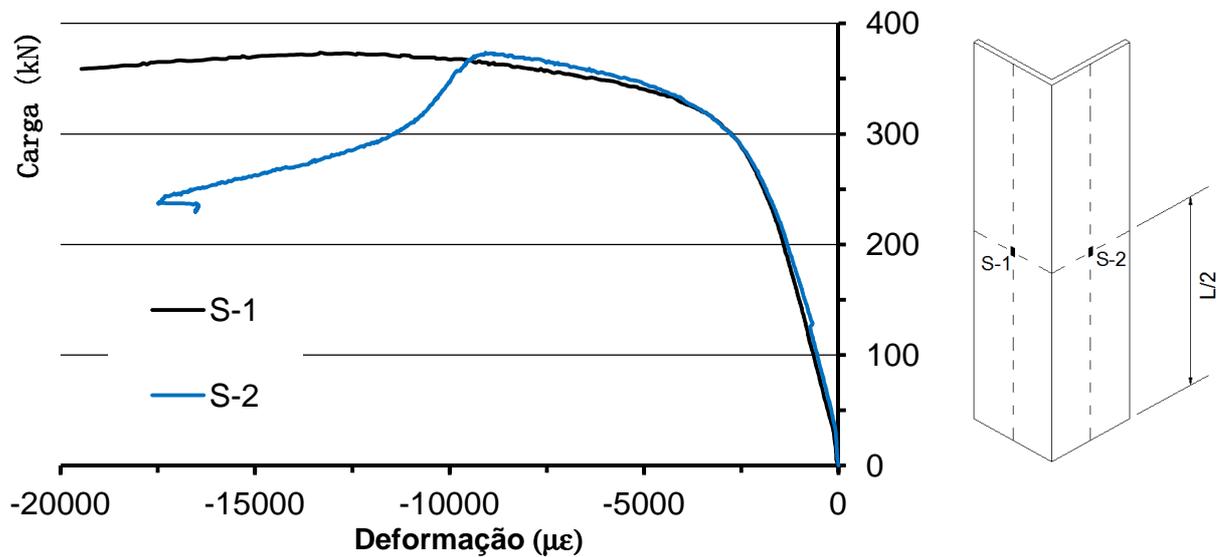


Figura 67 – Carga aplicada *versus* deformação - LSS\_76x76x6,4\_L152\_1 - FL

A Figura 68 ilustra a configuração deformada da cantoneira LSS\_64x64x4,8\_L1470\_1 cujo ELU que caracterizou a falha foi flambagem por flexão (FF). A Figura 69 apresenta o gráfico carga *versus* deslocamento vertical onde se pode observar que, ao atingir a carga máxima, há uma queda súbita na resistência da cantoneira evidenciando mais uma vez, a falha por flambagem por flexão. Os gráficos da Figura 70 e da Figura 71 apresentam as curvas carga *versus* deformação e carga *versus* deslocamento horizontal, respectivamente. No gráfico da Figura 70, todos os extensômetros apresentam, durante a fase de carregamento, valores de deformação negativos, ou seja, de compressão e durante a fase de descarregamento, uma redução nesta deformação. A mesma ideia pode ser observada nas curvas da Figura 71 onde há, para todo os LVDTs, deslocamentos no mesmo sentido. Estes comportamentos caracterizam a flambagem por flexão (FF).



Figura 68 – Configuração deformada - LSS\_64x64x4,8\_L1470\_1 - FF

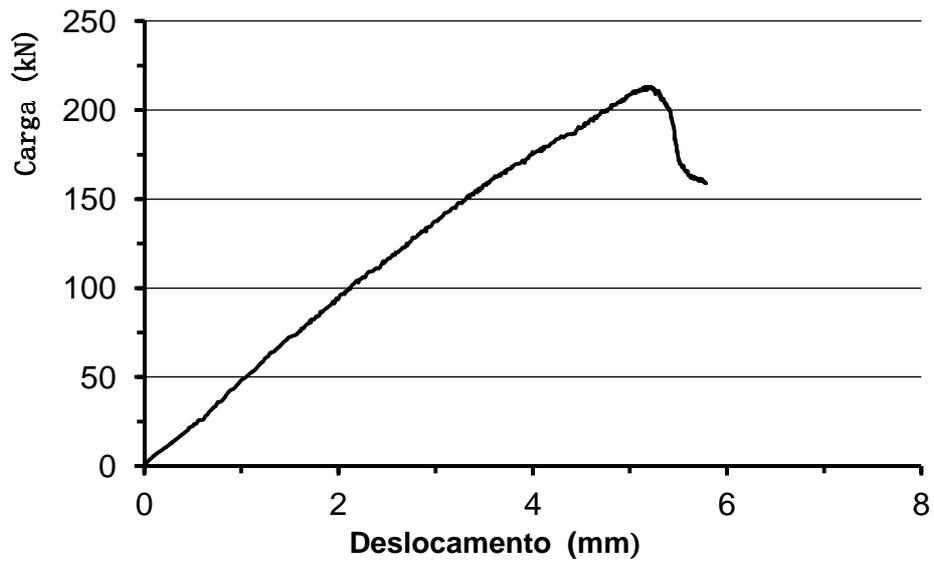


Figura 69 – Carga aplicada versus deslocamento vertical - LSS\_64x64x4,8\_L1470\_1 – FF

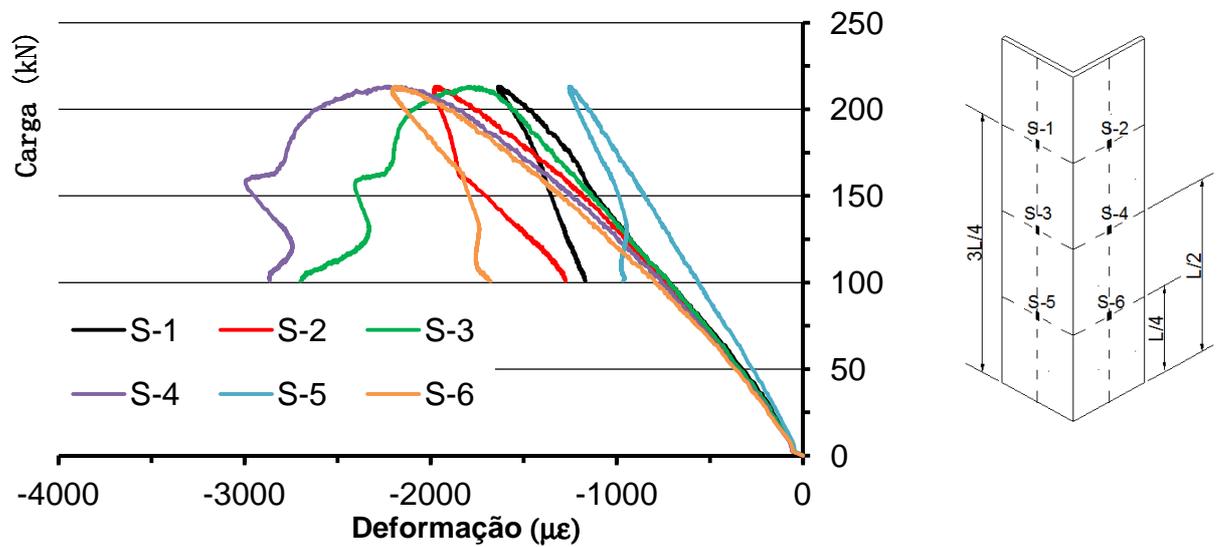


Figura 70 – Carga aplicada versus deformação - LSS\_64x64x4,8\_L1470\_1 - FF

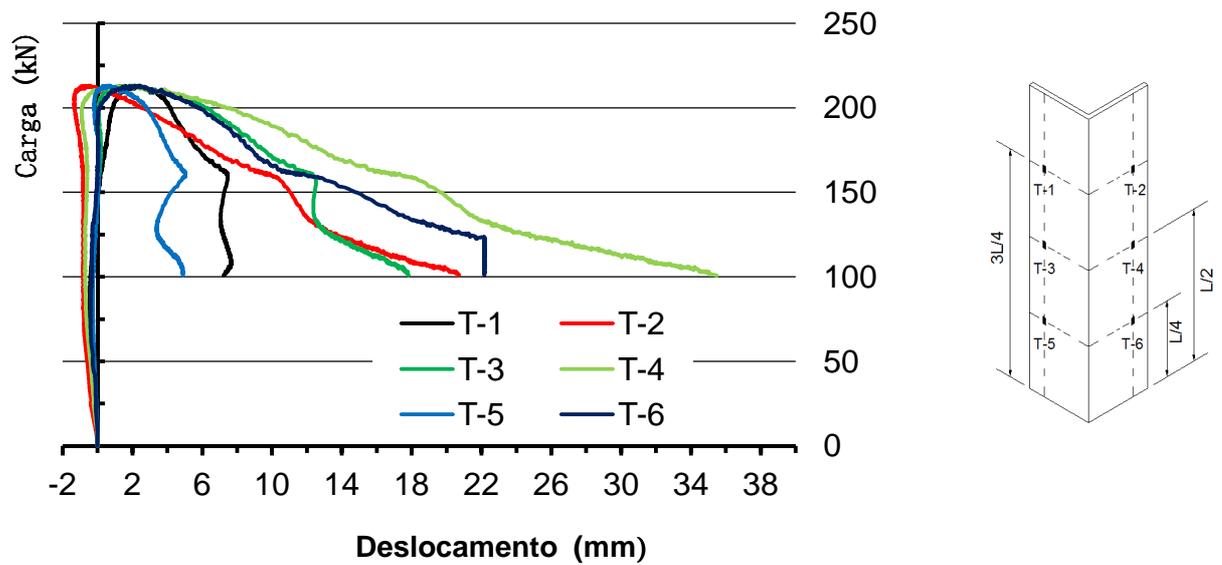


Figura 71 – Carga versus deslocamento horizontal - LSS\_64x64x4,8\_L1470\_1 - FF

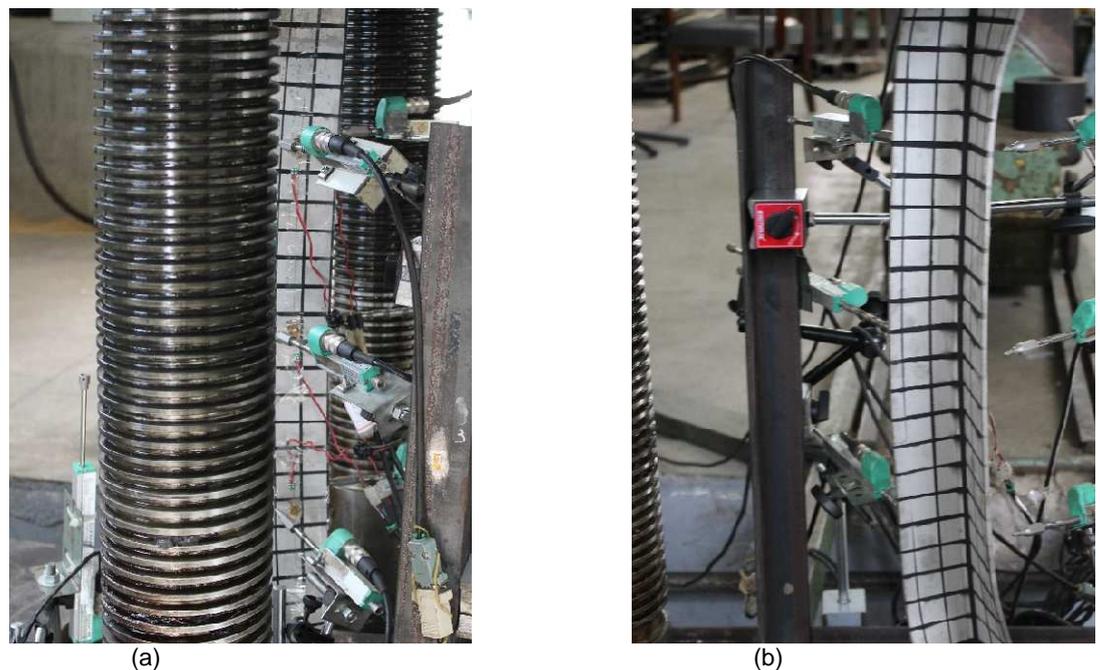


Figura 72 – Configuração deformada da cantoneira LSS\_76x76x6,4\_L753\_1 - FFT

A Figura 72 mostra a configuração da flambagem por flexo-torção. A Figura 72(a) apresenta a cantoneira em um detalhe lateral onde é possível observar a deformação por flexão e na Figura 72(b), uma outra posição da mesma cantoneira, sendo neste caso, uma vista frontal e se observa a deformação referente a parcela de torção. Também se nota pela Figura 72(b), o deslocamento horizontal da

cantoneira de um modo geral. Para todos os ensaios em que houve a flambagem por flexo-torção surgiram rótulas plásticas nas extremidades da coluna lembrando que este fenômeno também ocorreu para as cantoneiras em aço carbono.

As leituras obtidas por meio dos extensômetros lineares entre as séries foram similares quando avaliadas somente as colunas que tiveram a flambagem por flexo-torção. A Figura 73 mostra a deformação vertical a meia altura de uma coluna ensaiada, lembrando que os extensômetros foram posicionados na direção do centroide e em cada uma das abas da seção transversal da cantoneira.

No gráfico da Figura 73 nota-se que a deformação inicia-se com valores de compressão e ambas as curvas estão quase sobrepostas para valores de carga inferiores a carga crítica, mostrando que para este ensaio, a coluna estava perfeitamente centralizada. Quando a coluna alcança a carga crítica, uma das abas representada pela curva do extensômetro S-1, mantém a deformação de compressão e a outra aba representada pela curva do extensômetro S-2 começa a apresentar deformações de tração. Esta diferença de deformações caracteriza a flambagem por torção. Após esta fase de início de deformações de tração, a curva do extensômetro S-2 volta a apresentar a deformação de compressão mantendo-a assim até o final do ensaio, passando neste caso, a ter uma deformação de flexão. Pode-se concluir que a cantoneira da Figura 73 apresentou flambagem por flexo-torção, pois apresenta deformações características de torção quando atinge a carga crítica e depois flambagem por flexão com a cantoneira já com deformação de torção.

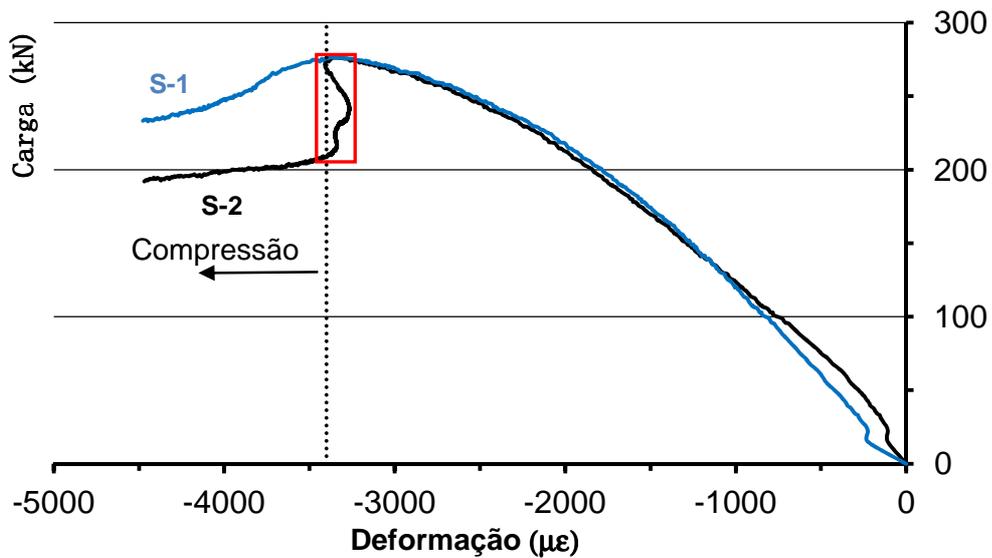


Figura 73 – Carga aplicada *versus* deformação vertical - LSS\_64x64x4,8\_L500\_2 – FFT

#### 4.2.2. Curvas carga *versus* deslocamentos horizontais

Os gráficos obtidos com os resultados das leituras dos transdutores de deslocamento são apresentados a seguir como exemplo para uma das cantoneiras. Conforme citado anteriormente, os gráficos dos demais ensaios são apresentados no Anexo B para todos os ensaios das cantoneiras em aço inoxidável.

Todos os gráficos apresentados são referentes a flambagem por flexo-torção. Assim como nos ensaios das cantoneiras em aço carbono, o posicionamento e a quantidade de transdutores foram mantidos.

Os gráficos da Figura 74 a Figura 76 apresentam os resultados dos deslocamentos horizontais para a cantoneira LSS\_64x64x4,8\_L500\_2 para cada par de transdutores.

Na Figura 77 são apresentados os resultados agrupados dos seis transdutores de deslocamento para o ensaio LSS\_64x64x4,8\_L500\_2.

As curvas do gráfico da Figura 74 mostraram que a flexão ocorre, porém o fenômeno é pouco perceptível para carregamentos abaixo da carga última e, quando se ultrapassa a carga última, apresentam uma deformação de torção mais visível.

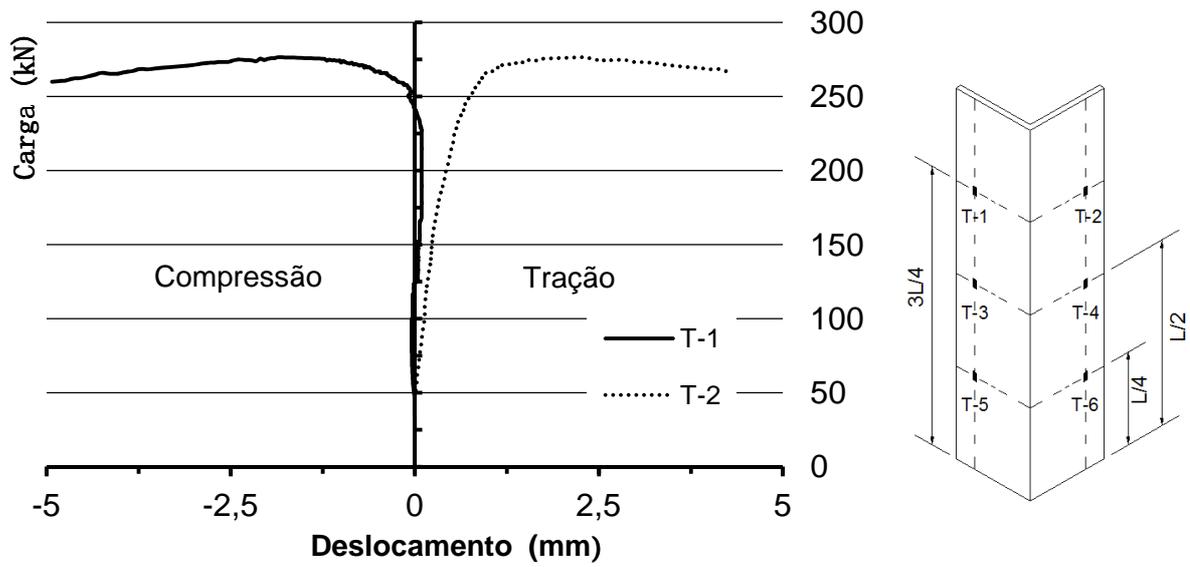


Figura 74 – Deslocamento horizontal *versus* carga para os transdutores posicionados a  $\frac{1}{4}$  da altura da coluna LSS\_64x64x4,8\_L500\_2

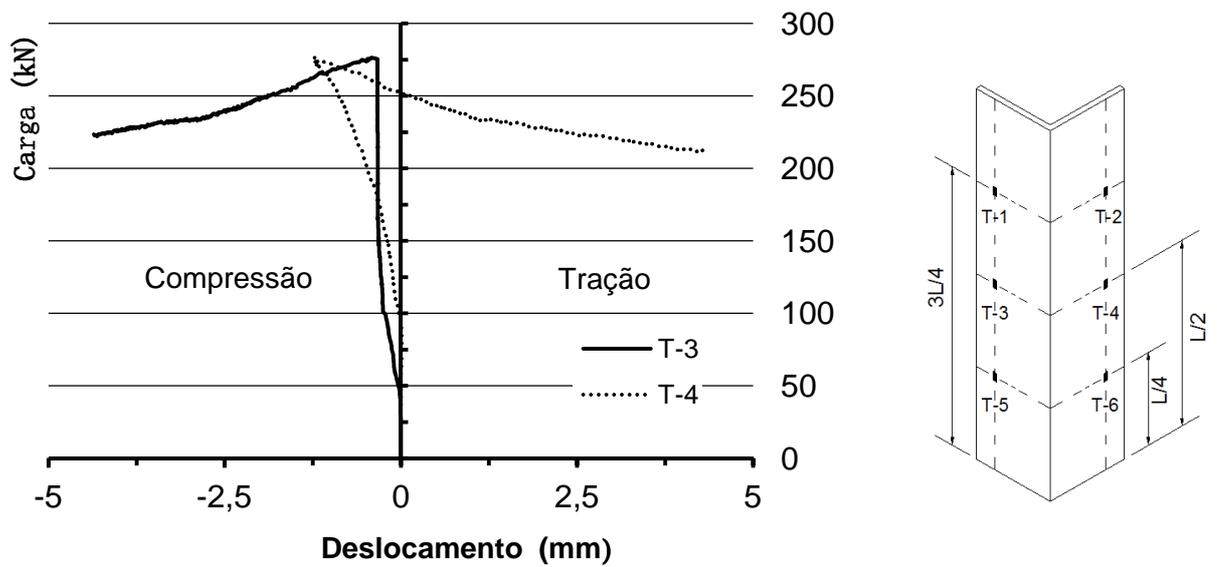


Figura 75 – Deslocamento horizontal *versus* carga para os transdutores posicionados a meia da altura da coluna LSS\_64x64x4,8\_L500\_2

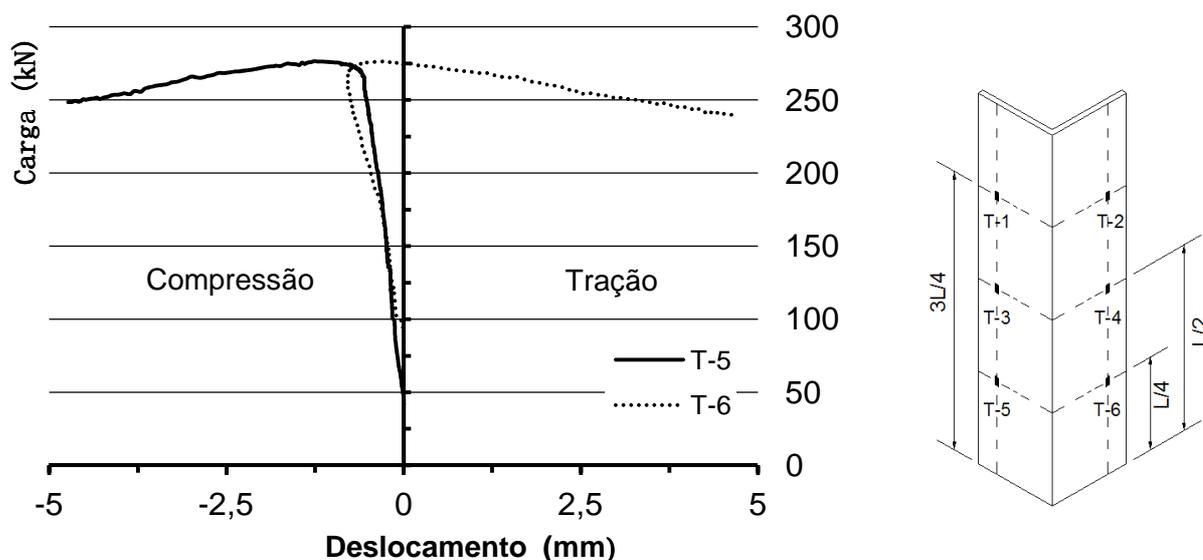


Figura 76 – Deslocamento horizontal *versus* carga para os transdutores posicionados a  $\frac{1}{4}$  da altura da coluna LSS\_64x64x4,8\_L500\_2

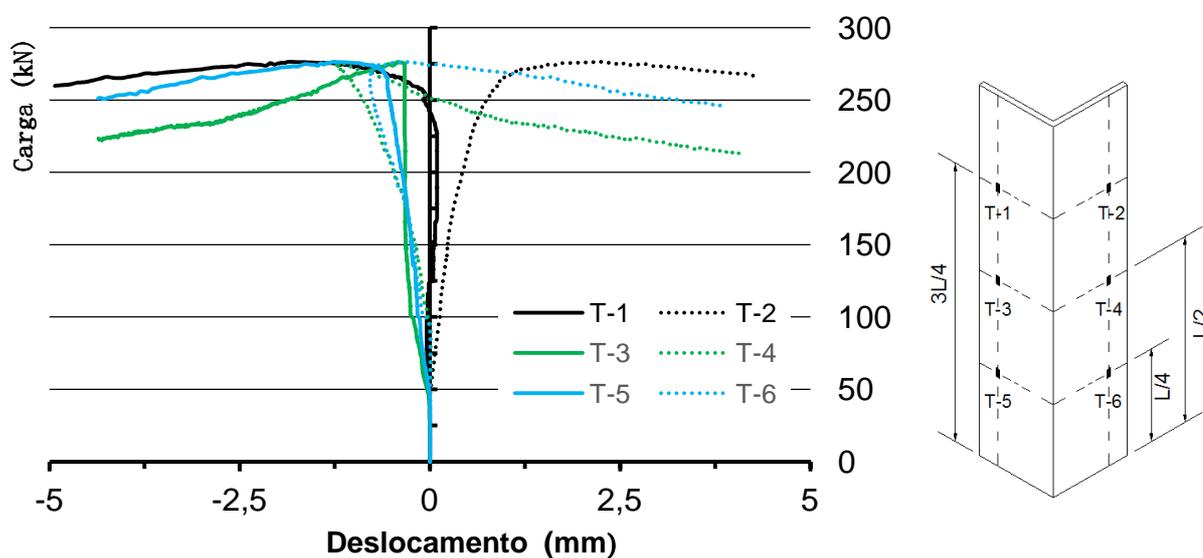


Figura 77 – Deslocamento horizontal *versus* carga para todos os transdutores posicionados na coluna ensaiada em aço inoxidável

Nos gráficos da Figura 75 e da Figura 76, pode-se observar deslocamentos característicos de flambagem por flexão para valores abaixo da carga última e, com

valores de deslocamentos superiores ao da Figura 74 para o mesmo nível de carregamento. E após atingirem a carga máxima, começam a apresentar também deslocamentos que caracterizam a deformação por torção.

O gráfico da Figura 77 mostra todos os resultados obtidos com os transdutores de deslocamento distribuídos ao longo da cantoneira, conforme o posicionamento apresentado. Até o nível de carga correspondente a carga máxima são verificados deslocamentos correspondentes a deformações de flexão ao longo de toda a coluna confirmando que se trata de uma flambagem por flexão. Depois de ultrapassado este limite de carga máxima, todos os transdutores forneceram uma resposta característica de torção, demonstrando assim, que as cantoneiras sofreram flambagem por flexo-torção. A Figura 78 ilustra a configuração deformada da cantoneira LSS\_64x64x4,8\_L500\_2 após o ensaio onde se pode concluir que ocorreu, para esta cantoneira, a flambagem por flexo-torção.

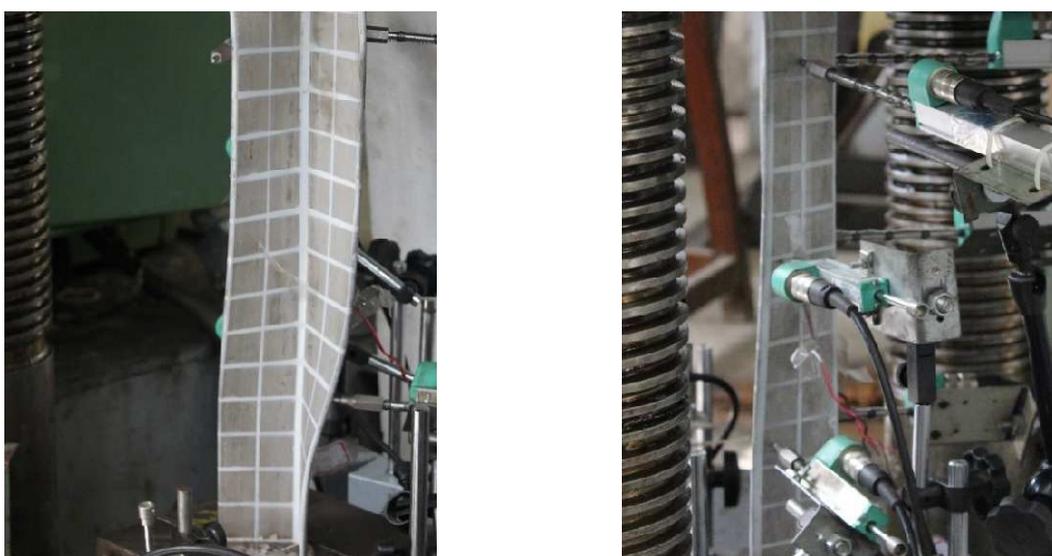


Figura 78 – Configuração deformada após o ensaio – coluna LSS\_64x64x4,8\_L500\_2

#### 4.2.3. Rotação da mesa superior

Assim como em todos os ensaios de cantoneiras em aço carbono, para todos os ensaios de cantoneiras em aço inoxidável, também foram medidos os deslocamentos da mesa superior da prensa, de modo a avaliar a condição de

contorno utilizada e a rotação da mesa ao longo do ensaio. As respostas dos ensaios foram semelhantes aos dos ensaios de aço carbono, ou seja, os deslocamentos da mesa são próximos a zero e a rotação da mesa apresentou também uma variação baixa.

### **4.3. Comparação dos Resultados - Aço Carbono e Aço Inoxidável**

Com o objetivo de confrontar os resultados obtidos para os ensaios das cantoneiras em aço carbono com as de aço inoxidável, serão apresentados neste item do presente trabalho, as curvas com os resultados dos ensaios em que as colunas possuíam a mesma seção e o mesmo comprimento, ou com valores próximos.

#### **4.3.1. Carga versus Deslocamento Vertical - Aço Carbono e Aço Inoxidável**

No gráfico da Figura 79 são apresentados os resultados dos ensaios das cantoneiras com seção transversal 64x64x4,8 em aço carbono e em aço inoxidável. Nestes gráficos pode-se observar que os valores das cargas críticas dos ensaios em aço inoxidável são superiores aos do aço carbono para um mesmo comprimento. A relação do deslocamento vertical com a carga crítica é maior para o aço inoxidável em relação ao aço carbono. Para esta seção transversal, para ambos os aços, foram realizadas repetições nos comprimentos das colunas.

Para os gráficos da Figura 80 e da Figura 81 nota-se que os valores das cargas críticas em geral, para o aço inoxidável, estão dentro da média ou um pouco abaixo dos resultados em aço carbono, porém deve-se ressaltar que para as seções 76x76x6,4 e 102x102x6,4, no aço inoxidável, não houve repetição de ensaios e também os comprimentos das colunas ensaiadas quando confrontados com os de aço carbono não são exatamente iguais. Para estas seções em aço inoxidável, a relação do deslocamento vertical com a carga crítica é maior em relação ao do aço carbono.

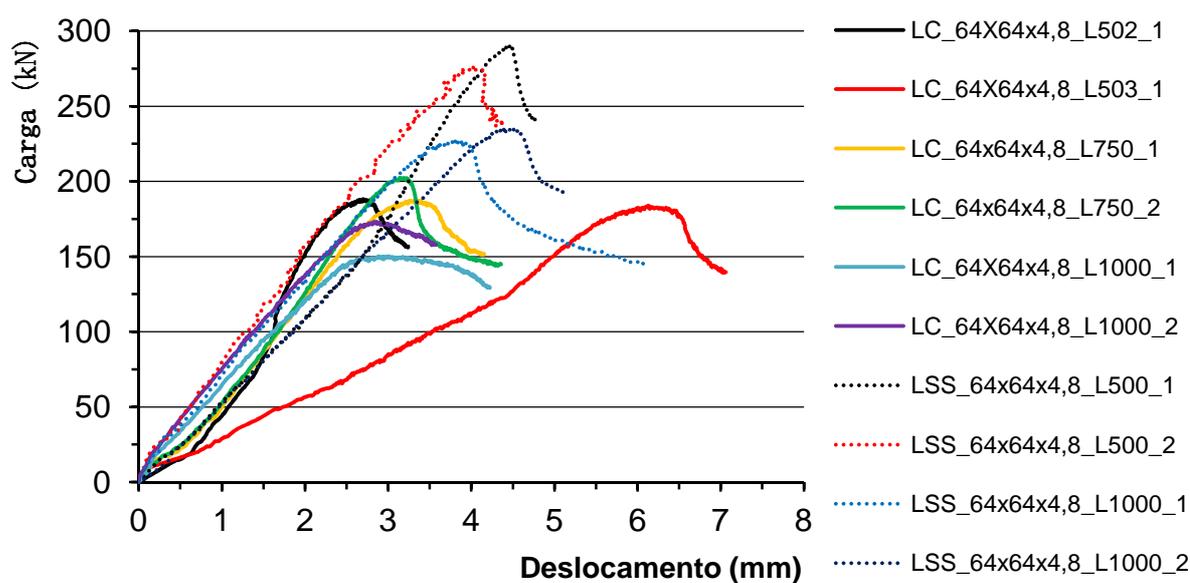


Figura 79 – Carga *versus* deslocamento vertical para as cantoneiras 64x64x4,8 em aço carbono e aço inoxidável

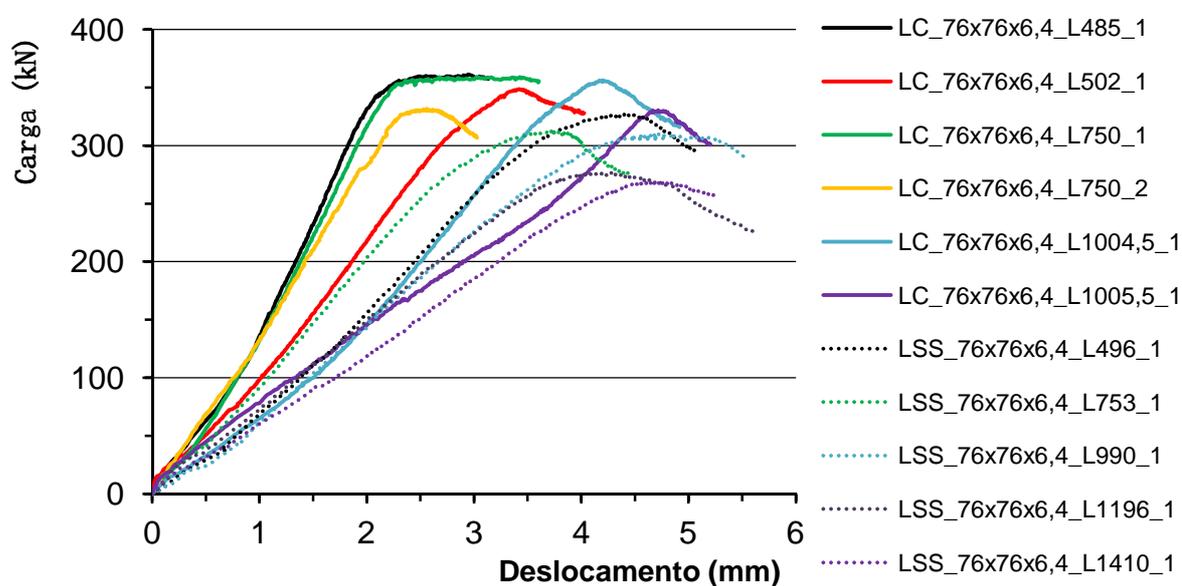


Figura 80 – Carga *versus* deslocamento vertical para as cantoneiras 76x76x6,4 em aço carbono e aço inoxidável

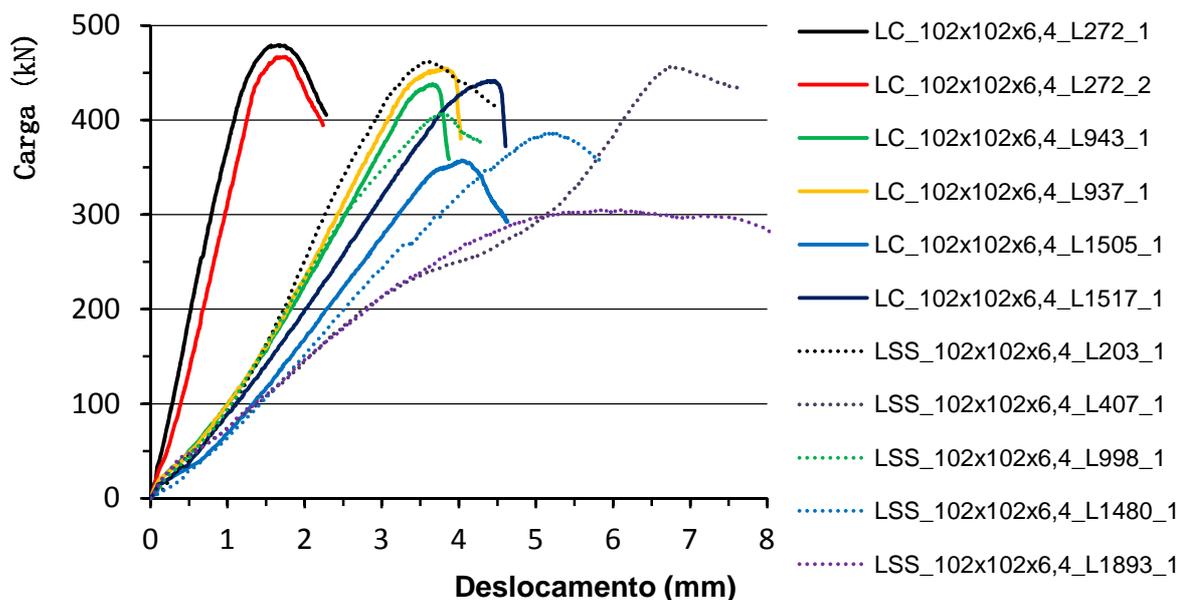


Figura 81 – Carga *versus* deslocamento vertical para as cantoneiras 102x102x6,4 em aço carbono e aço inoxidável

#### 4.3.2. Carga *versus* Deformação e Deslocamento Horizontal - Aço Carbono e Aço Inoxidável

A Figura 82 mostra o gráfico com as curvas das cantoneiras 64x64x4,8 com comprimento de 500 mm, sendo uma em aço carbono e a outra em aço inoxidável. O valor das cargas críticas são bem diferentes onde se pode observar que a cantoneira em aço inoxidável apresenta um valor maior em relação ao aço carbono. Analisando as deformações para o nível de carga máxima nos dois ensaios, é possível perceber que a cantoneira em aço inoxidável possui uma capacidade maior de deformação da ordem de 3500  $\mu\epsilon$  enquanto que no ensaio de aço carbono, este valor é de aproximadamente 1000  $\mu\epsilon$  na média entra as deformações medidas nas duas abas.

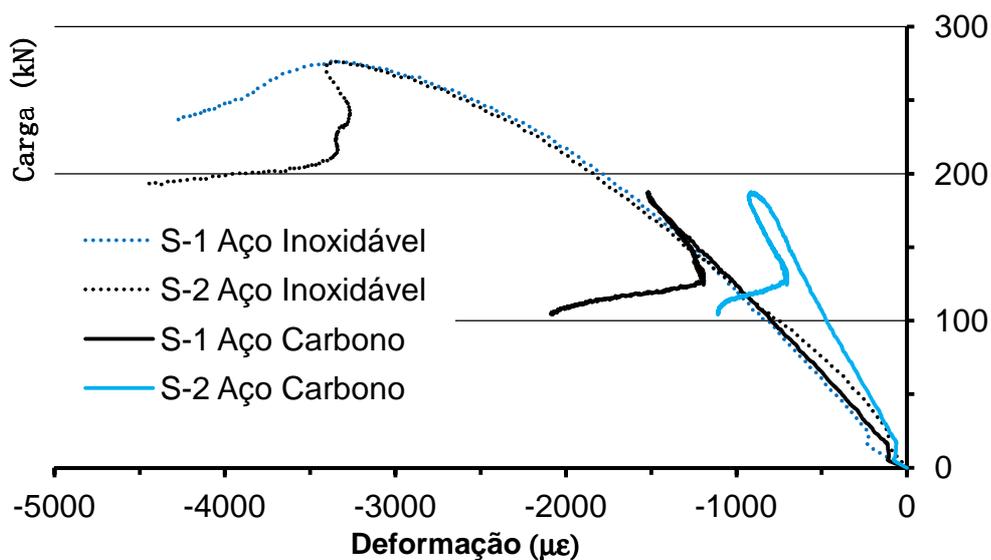


Figura 82 – Carga *versus* deformação a meia altura das colunas - L64x64x4,8 em aço carbono e aço inoxidável

#### 4.3.3. Carga x Deslocamento Horizontal - Aço Carbono e Aço Inoxidável

Na Figura 83 são apresentadas as curvas carga *versus* deslocamento horizontal a meia altura para as mesmas cantoneiras da Figura 82. O posicionamento dos transdutores estão apresentados no detalhe da Figura 83. Analisando o gráfico da Figura 83 é possível notar que há diferença nos valores da carga máxima, conclusão já relatada anteriormente, porém na fase em que o carregamento está abaixo dos valores das cargas máximas, os deslocamento estão com uma variação da ordem de 1mm de diferença dentro de uma mesma faixa de ordem de grandeza.

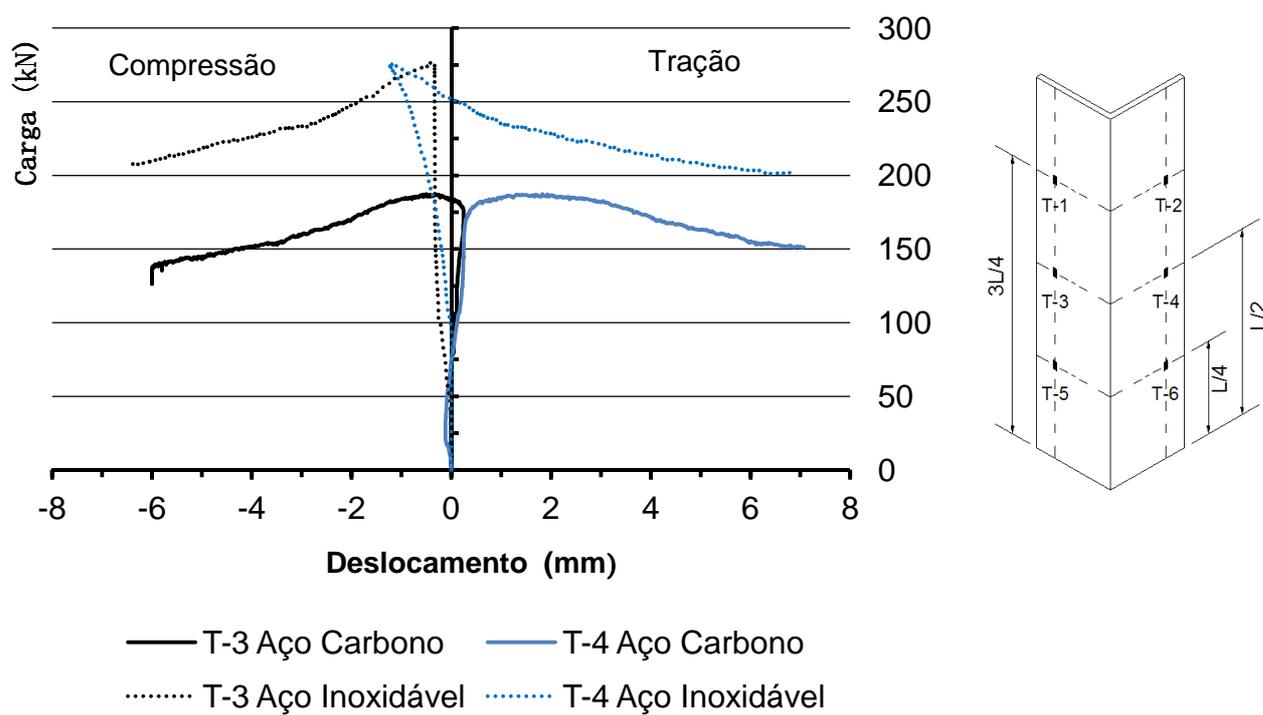


Figura 83 – Carga *versus* deslocamento horizontal a meia altura para as cantoneiras 64x64x4,8 em aço carbono e inoxidável

## 5. COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS NORMATIVOS – EUROCODE 3, PARTES 1-1 [7] E 1-4 [6]

Neste capítulo são apresentadas e discutidas as comparações dos resultados experimentais com as normas de dimensionamento – Eurocode 3, Partes 1-1 (aço carbono) [7] e 1-4 (Aço Inoxidável) [6]. No decorrer deste trabalho percebeu-se a ausência de trabalhos científicos sobre o comportamento de cantoneiras laminadas de abas iguais em que o modo de falha predominante no dimensionamento fosse a flambagem por flexo-torção, sendo este modo de falha o foco principal deste capítulo.

### 5.1. Comparação com o EUROCODE 3, Parte 1-1 [7] - Aço Carbono

No item 6.3 do EUROCODE 3, Parte 1-1 [7] que trata da resistência de peças submetidas a um carregamento de compressão, é citado que para seções abertas como no caso das cantoneiras tema deste trabalho, deve ser avaliada a flambagem por flexo-torção e que em alguns casos, sua resistência pode ser menor que a resistência a flambagem por flexão.

Para os valores da flambagem por flexão utiliza-se as expressões (21) e (23) apresentadas no capítulo três, e, para o caso das cantoneiras foi adotado o valor de  $\alpha$  como sendo igual a 0,34. Para a flambagem por flexo-torção, a esbeltez normalizada  $\bar{\lambda}_T$  é dada pela expressão abaixo:

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} \quad (33)$$

onde:

$N_{cr} = N_{cr,TF}$  desde que a  $N_{cr} < N_{cr,T}$ ;

$N_{cr,FT}$  é a carga crítica elástica para a flambagem por flexo-torção;

$N_{cr}$  é a carga crítica elástica para o plano mais condicionante;

$N_{cr,T}$  é a carga crítica elástica para a flambagem por torção.

Da Tabela 12 a Tabela 14 são apresentadas as sínteses de resistências para os diversos comprimentos de colunas ensaiados, todas em aço carbono, utilizando o coeficiente de flambagem  $k$  com valor de 0,5, ou seja, bi-engastadas. Esta tabela também contém a carga crítica de flambagem local ( $N_{Cr, LB}$ ) da seção, utilizando-se a tensão crítica obtida pela equação (17). Nestas tabelas, as cargas comparadas estão em negrito. A relação EUROCODE 3, Parte 1-1 [7] com carga experimental (EC3 / Exper.), última linha das tabelas, está com uma variação entre 0,50 e 0,91 mostrando que o EUROCODE 3, Parte 1-1 [7] com os parâmetros adotados, fornece resultados que podem ser considerados conservadores em alguns casos. Esta conclusão pode ser também observada, quando se analisa a Tabela 15 onde se apresenta o resumo da média da relação EC3 / Exper. e seu correspondente desvio padrão.

Tabela 12 – Resumo das resistências para as cantoneiras 64x64x4,8 - aço carbono

		LC_64x64x4,8					
		Comprimento (mm)					
		502	503	750	750	1000	1000
Cargas (kN)	Experimental	<b>188,18</b>	<b>183,93</b>	<b>187,35</b>	<b>202,38</b>	<b>150,35</b>	<b>173,2</b>
	$N_{Cr,u}$	11.930,39	11.883,00	5.344,90	5.344,90	3.006,51	3.006,51
	$N_{Cr,v}$	3.023,27	3.011,26	1.354,45	1.354,45	761,88	761,88
	$N_{Cr,T}$	272,5	272,5	272,5	272,5	272,5	272,5
	$N_{Cr,FT}$	270,16	270,15	267,25	267,25	263,08	263,08
	$N_{Cr, LB}$	259,78					
	$N_{Rd,u} - EC3$	200,06	200,06	200,06	200,06	195,93	195,93
	$N_{Rd,v} - EC3$	195,98	195,95	186,51	186,51	175,79	175,79
	$N_{Rd,T} - EC3$	137,4	137,4	137,4	137,4	137,4	137,4
	$N_{Rd,FT} - EC3$	<b>137,4</b>	<b>137,4</b>	<b>136,12</b>	<b>136,12</b>	<b>136,12</b>	<b>136,12</b>
EC3 / Exper.	0,73	0,75	0,73	0,67	0,91	0,79	
Média	0,76						
Desvio Padrão	0,08						

Onde:

$N_{Cr,u}$  é a carga teórica da flambagem a flexão na maior inercia;

$N_{Cr,v}$  é a carga teórica da flambagem a flexão na menor inercia;

$N_{Cr,T}$  é a carga teórica da flambagem a torção;

$N_{Cr,FT}$  é a carga teórica da flambagem a flexo-torção;

$N_{Cr,LB}$  é a carga teórica da flambagem local;

$N_{Rd,u}$  - EC3 é a carga da flambagem a flexão na maior inercia segundo o código europeu;

$N_{Rd,v}$  - EC3 é a carga da flambagem a flexão na menor inercia segundo o código europeu;

$N_{Rd,T}$  - EC3 é a carga da flambagem a torção segundo o código europeu;

$N_{Rd,FT}$  - EC3 é a carga da flambagem a flexo-torção segundo o código europeu;

Tabela 13 – Resumo das resistências para as cantoneiras 76x76x6,4 - aço carbono

		LC_76x76x6,4					
		Comprimento (mm)					
		485	502	750	750	1004,5	1005,5
Cargas (kN)	Experimental	<b>361,15</b>	<b>348,61</b>	<b>358,87</b>	<b>331,58</b>	<b>356,02</b>	<b>330,44</b>
	$N_{Cr,u}$	28.999,80	27.068,93	12.127,07	12.127,07	6.760,50	6.747,06
	$N_{Cr,v}$	7.375,69	6.884,60	3.084,35	3.084,35	1.719,44	1.716,02
	$N_{Cr,T}$	546,32	546,32	546,32	546,32	546,32	546,32
	$N_{Cr,FT}$	542,47	542,19	537,05	537,05	529,55	529,52
	$N_{Cr,LB}$	531,82					
	$N_{Rd,u}$ – EC3	318,14	318,14	318,14	318,14	316,23	316,21
	$N_{Rd,v}$ – EC3	317,28	316,46	304,24	304,24	290,76	290,71
	$N_{Rd,T}$ – EC3	238,22	238,22	238,22	238,22	238,22	238,22
	$N_{Rd,FT}$ – EC3	<b>236,31</b>	<b>236,31</b>	<b>236,31</b>	<b>236,31</b>	<b>234,38</b>	<b>234,38</b>
EC3 / Exper.	0,65	0,68	0,66	0,71	0,66	0,71	
Média	0,68						
Desvio Padrão	0,03						

Tabela 14 – Resumo das resistências para as cantoneiras 102x102x6,4 - aço carbono

		LC_102x102x6,4					
		Comprimento (mm)					
		272	272	937	943	1505	1517
Cargas (kN)	Experimental	<b>479,18</b>	<b>466,74</b>	<b>438,11</b>	<b>454,74</b>	<b>357,48</b>	<b>441,39</b>
	$N_{Cr,u}$	28.999,80	27.068,93	12.127,07	12.127,07	6.760,50	6.747,06
	$N_{Cr,v}$	7.375,69	6.884,60	3.084,35	3.084,35	1.719,44	1.716,02
	$N_{Cr,T}$	546,32	546,32	546,32	546,32	546,32	546,32
	$N_{Cr,FT}$	542,47	542,19	537,05	537,05	529,55	529,52
	$N_{Cr,LB}$	531,82					
	$N_{Rd,u} - EC3$	408,98	408,98	408,98	408,98	404,32	404,05
	$N_{Rd,v} - EC3$	408,98	408,98	396,14	395,87	368,34	367,70
	$N_{Rd,T} - EC3$	241,58	241,58	241,58	241,58	241,58	241,58
	$N_{Rd,FT} - EC3$	<b>241,58</b>	<b>241,58</b>	<b>241,58</b>	<b>241,58</b>	<b>239,00</b>	<b>239,00</b>
EC3 / Exper.	0,50	0,52	0,55	0,53	0,67	0,55	
Média	0,55						
Desvio Padrão	0,06						

Tabela 15 – Resumo das médias e dos desvios padrão – aço carbono

Cantoneira	Média		Desvio Padrão	
	$\alpha=0,34$	$\alpha=0,20$	$\alpha=0,34$	$\alpha=0,20$
LC_64x64x4,8	0,76	0,85	0,08	0,09
LC_76x76x6,4	0,68	0,75	0,03	0,03
LC_102x102x6,4	0,55	0,62	0,06	0,07
Média	0,66	0,74	0,06	0,06

Na Tabela 16 são apresentados os modos de falha dos ensaios de todas as cantoneiras em aço carbono, além dos modos de falha teóricos e obtidos através do EUROCODE 3, Parte 1-1 [7]. Houve alguma coerência nos modos de falha local para as cantoneiras 64x64x4,8 e 76x76x6,4. Para todos os casos em que, na análise

experimental, as cantoneiras apresentaram o modo de flexo-torção, a norma europeia também apresentava o mesmo resultado.

Tabela 16 – Comparação entre os modos de falha para as cantoneiras em aço carbono

	Comprimento mm	Experimental	Teórico	EC 3 1-1 [7]
LC_64x64x4,8	502,0	Local	Local	Flexo-torção
	503,0	Local	Local	Flexo-torção
	750,0	Flexo-torção	Local	Flexo-torção
	750,0	Flexo-torção	Local	Flexo-torção
	1000,0	Flexão	Local	Flexo-torção
	1000,0	Flexão	Local	Flexo-torção
LC_76x76x6,4	485,0	Local	Local	Flexo-torção
	502,0	Local	Local	Flexo-torção
	750,0	Flexo-torção	Local	Flexo-torção
	750,0	Flexo-torção	Local	Flexo-torção
	1004,5	Flexão	Flexo-torção	Flexo-torção
	1005,5	Flexão	Flexo-torção	Flexo-torção
LC_102x102x6,4	272,0	Local	Flexo-torção	Flexo-torção
	272,0	Local	Flexo-torção	Flexo-torção
	937,0	Flexo-torção	Flexo-torção	Flexo-torção
	943,0	Flexo-torção	Flexo-torção	Flexo-torção
	1505,0	Flexão	Flexo-torção	Flexo-torção
	1517,0	Flexão	Flexo-torção	Flexo-torção

Somente nas cantoneiras 102x102x6,4 com comprimentos de 937 mm e 943 mm, o modo de flexo-torção é observado em todos os casos. Nos demais casos, os resultados dos modos de falha resultantes do dimensionamento estabelecido pela norma europeia não condizem com os modos de falha observados nos experimentos, fato que confirma que mais estudos devem ser realizados para o estabelecimento de resultados mais coerentes.

No gráfico da Figura 84 são apresentadas as curvas para o ELU de flambagem em relação ao eixo de menor inércia da seção além do ELU de flambagem por flexo-torção segundo a norma europeia onde os pontos no gráfico são referentes aos resultados dos ensaios experimentais. Estes foram inseridos no gráfico com a abcissa sendo a esbeltez teórica normalizada e a ordenada, a relação entre a tensão máxima e a tensão referente ao escoamento, todos de acordo com o

seu respectivo modo de falha. As curvas de flambagem por flexão possuem o mesmo traçado, por isso foi representada por uma única curva. Já no caso da curva de flambagem por flexo-torção, pode-se notar que o traçado é dependente da seção transversal da cantoneira devido ao fato da expressão que define este ELU ter a parcela da torção que depende das suas características geométricas. Comparando-se os resultados dos ensaios em que houve a flambagem por flexão com a curva proposta pelo EUROCODE 3, Parte 1-1 [7], pode-se observar que os valores da norma podem conduzir a resultados um pouco conservadores. Agora, fazendo as mesmas considerações para a flambagem por flexo-torção, o resultado do EUROCODE 3, Parte 1-1 [7] apresenta-se muito mais conservador. Outro ponto a ser comentado sobre o gráfico da Figura 84 é de que há concordância em determinados pontos nas curvas de flambagem por flexão e por flexo-torção. Neste gráfico, F e FT representam flambagem por flexão e por flexo-torção.

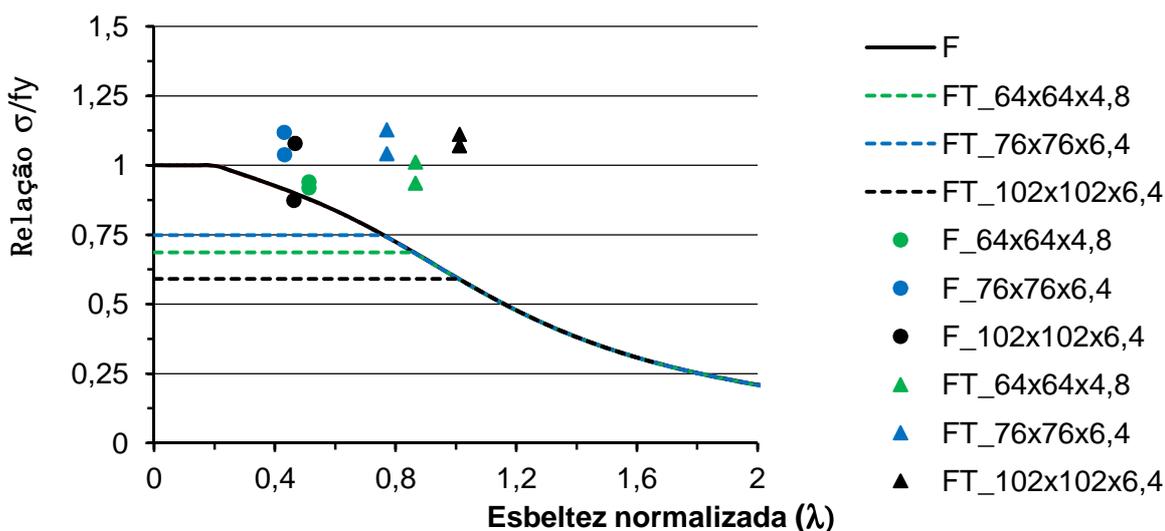


Figura 84 – Curvas de flambagem na menor inércia e de flexo-torção - aço carbono.

Com o intuito de se ter valores de flambagem por flexo-torção mais próximos dos resultados obtidos nos ensaios é proposta uma nova curva com alteração no valor de  $\alpha$ , pois para a obtenção da carga crítica, segundo a norma europeia, este seria o único coeficiente em que os valores não utilizariam fórmulas. Durante as tentativas de se obter um novo valor de  $\alpha$ , percebeu-se que para valores acima de 0,34, a curva distanciava-se mais dos pontos da flexo-torção e a curva de flexão tornava-se mais conservadora. A Figura 85 mostra o gráfico com o valor de  $\alpha$ , igual

a 0,20, sendo este valor proposto para que a curva de flambagem por flexão fosse atendida e que se diminuísse o conservadorismo da curva de flambagem por flexo-torção.

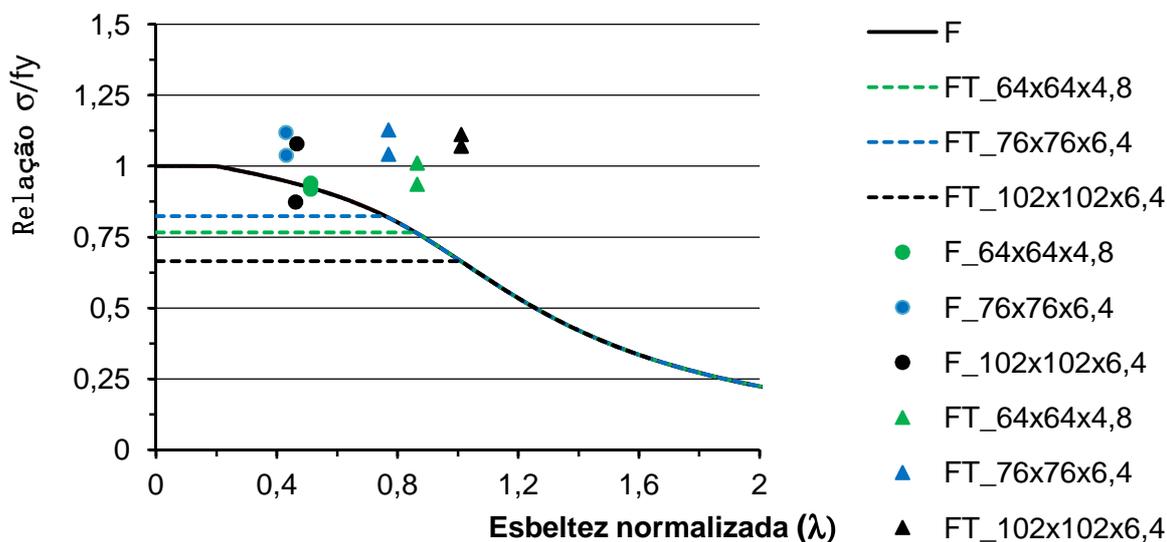


Figura 85 – Curvas de flambagem na menor inércia e de flexo-torção - aço carbono.

## 5.2. Comparação do EUROCODE 3, Parte 1-4 [6] com os resultados dos ensaios do aço inoxidável

Neste item serão comparados os resultados dos ensaios experimentais das cantoneiras em aço inoxidável e das resistências calculadas pelo EUROCODE 3, Parte 1-4 [6]. Assim como no item anterior, o coeficiente de comprimento efetivo de flambagem  $k$  adotado foi de 0,5. As expressões para a obtenção das resistências, segundo a norma europeia, foram apresentadas no capítulo três. Neste mesmo capítulo, há a reprodução de uma tabela do EUROCODE 3, Parte 1-4 [6] que faz referência aos valores de  $\alpha$  e  $\lambda_0$ , ver Tabela 3. Como nesta tabela não há um valor específico para o caso de cantoneiras laminadas foram adotados os valores para a seção aberta e soldada na menor inércia, ou seja,  $\alpha = 0,76$  e  $\lambda_0 = 0,20$ .

Da Tabela 17 a Tabela 19 são apresentadas, resumidamente, as cargas resistentes para todos os comprimentos de colunas ensaiados de cantoneiras em aço inoxidável. Nas tabelas, as cargas comparadas estão em negrito. A relação



	$N_{Rd,FT} - EC3$	<b>262,78</b>	<b>262,78</b>	<b>260,43</b>	<b>258,08</b>	<b>258,08</b>	255,71
EC3 / Exper.		0,70	0,80	0,83	0,83	0,93	0,89
Média		0,83					
Desvio padrão		0,08					

Tabela 19 – Resumo das carga críticas para as cantoneiras 102x102x6,4 em aço inoxidável

		LSS_102x102x6,4				
		Comprimento (mm)				
		203,00	407,00	998,00	1480,00	1893,00
Cargas (kN)	Experimental	<b>461,64</b>	<b>456,36</b>	<b>407,02</b>	<b>386,71</b>	<b>304,90</b>
	$N_{Cr,u}$	374.891,89	93.262,98	15.510,90	7.053,01	4.311,19
	$N_{Cr,v}$	94.606,61	23.535,57	3.914,29	1.779,88	1.087,96
	$N_{Cr,T}$	397,74	397,74	397,74	397,74	397,74
	$N_{Cr,FT}$	397,58	397,11	393,9	389,24	383,72
	$N_{Cr,LB}$	363,37				
	$N_{Rd,u} - EC3$	379,83	379,83	379,83	370,31	351,66
	$N_{Rd,v} - EC3$	379,83	379,83	347,51	306,21	272,07
	$N_{Rd,T} - EC3$	231,61	231,61	231,61	231,61	231,61
	$N_{Rd,FT} - EC3$	<b>231,61</b>	<b>231,61</b>	<b>231,61</b>	<b>229,19</b>	<b>229,19</b>
EC3 / Exper.	0,50	0,51	0,57	0,59	0,89	
Média	0,61					
Desvio padrão	0,16					

Na Tabela 21 são apresentados os modos de falha observados nos ensaios de todas as cantoneiras em aço inoxidável bem como os modos de falha teórico e do EUROCODE 3, Parte 1-4 [6]. Houve alguma coerência nos modos de falha local para as cantoneiras 64x64x4,8 e 76x76x6,4, situação semelhante ao do aço carbono. Há o modo flexo-torção nos ensaios e nas análises teóricas para as cantoneiras 102x102x6,4. Os resultados da norma europeia e da análise experimental foram coerentes em todos os casos de modo flexo-torção com as cantoneiras 76x76x6,4. Para as cantoneiras 64x64x4,8, somente nos ensaios com comprimento de 500 mm. os modos de falha foram iguais ao da análise experimental e a norma europeia. Nos demais casos, os resultados dos modos de falha resultantes do dimensionamento estabelecido pela norma europeia não condizem com os modos de falha observados nos ensaios experimentais e com os modos de falha teóricos. Este fato confirma que mais estudos devem ser realizados para se aumentar a gama de resultados disponíveis de forma que uma melhor avaliação mais abrangente possa ser efetuada.

Tabela 20 – Resumo das médias e dos desvios padrão – aço inoxidável

Cantoneira	Média		Desvio Padrão	
	$\alpha=0,34$	$\alpha=0,25$	$\alpha=0,34$	$\alpha=0,25$
LSS_64x64x4,8	0,78	0,66	0,06	0,05
LSS_76x76x6,4	0,83	0,87	0,08	0,07
LSS_102x102x6,4	0,61	0,65	0,16	0,14
Média	0,74	0,73	0,10	0,09

Tabela 21 – Comparação entre os modos de falha para as cantoneiras em aço inoxidável

	Comprimento mm	Ensaio	Teórico	EC 3 1-4 [6]
LSS_64x64x4,8	250	Local	Local	Flexo-torção
	250	Local	Local	Flexo-torção
	500	Flexo-torção	Local	Flexo-torção
	500	Flexo-torção	Local	Flexo-torção
	1000	Flexo-torção	Local	Flexão
	1000	Flexo-torção	Local	Flexão
	1470	Flexão	Flexão	Flexão
LSS_76x76x6,4	152,00	Local	Local	Flexo-torção
	496,00	Flexo-torção	Local	Flexo-torção
	753,00	Flexo-torção	Local	Flexo-torção
	990,00	Flexo-torção	Local	Flexo-torção
	1196,00	Flexo-torção	Local	Flexo-torção
	1410,00	Flexão	Local	Flexão
LSS_102x102x6,4	203,00	Local	Flexo-torção	Local
	407,00	Flexo-torção	Flexo-torção	Local
	998,00	Flexo-torção	Flexo-torção	Local
	1480,00	Flexo-torção	Flexo-torção	Local
	1893,00	Flexão	Flexo-torção	Local

A obtenção das curvas de flambagem em aço inoxidável para o modo de falha de flambagem por flexão e flexo-torção segundo o EUROCODE 3, Parte 1-4 [6] são independentes quando se comparam os valores de  $\alpha$  e  $\lambda_0$  - ver Tabela 3, fato este diferente do EUROCODE 3, Parte 1-1 [7] em que o valor  $\alpha$  é igual para todos os modos de falha. Dando foco para o modo de falha de flambagem por flexo-torção, o gráfico da Figura 86 apresenta as curvas de flambagem segundo a norma europeia

para todas as cantoneiras em aço inoxidável ensaiadas nesta tese. Os pontos no gráfico são referentes aos resultados dos ensaios experimentais. Estes pontos foram inseridos no gráfico da mesma maneira que foi feito no aço carbono do item anterior. A abcissa e a ordenada dos gráficos seguiram também a mesma ideia do aço carbono. As curvas de flexo-torção para as cantoneiras 64x64x4,8 e a 102x102x6,4 possuem o mesmo traçado, ficando representado por uma única curva. Comparando os resultados dos ensaios em que houve a flambagem por flexo-torção com a curva proposta pelo EUROCODE 3, Parte 1-4 [6], pode-se observar que os valores da norma são um pouco conservadores para o caso da cantoneira 76x76x6,4 e muito conservadores para as demais.

Com o intuito de se ter valores mais próximos dos resultados obtidos nos ensaios experimentais cujos modos de falha foram caracterizados pela flambagem por flexo-torção, uma nova curva é proposta com alteração somente no valor de  $\alpha$ , pois as alterações feitas em ambos os coeficientes ( $\alpha$  e  $\lambda_0$ ) iria tornar os resultados da código europeu contra a segurança. Outro fator que impediu de se tentar novos valores de  $\alpha$  e  $\lambda_0$  foi a proximidade dos resultados da cantoneira 76x76x6,4 com a curva do EUROCODE 3, Parte 1-4 [6]. A Figura 87 mostra o gráfico com o valor de  $\alpha = 0,25$ , pois com este valor para que a curva de flexo-torção, reduz-se o conservadorismo da curva.

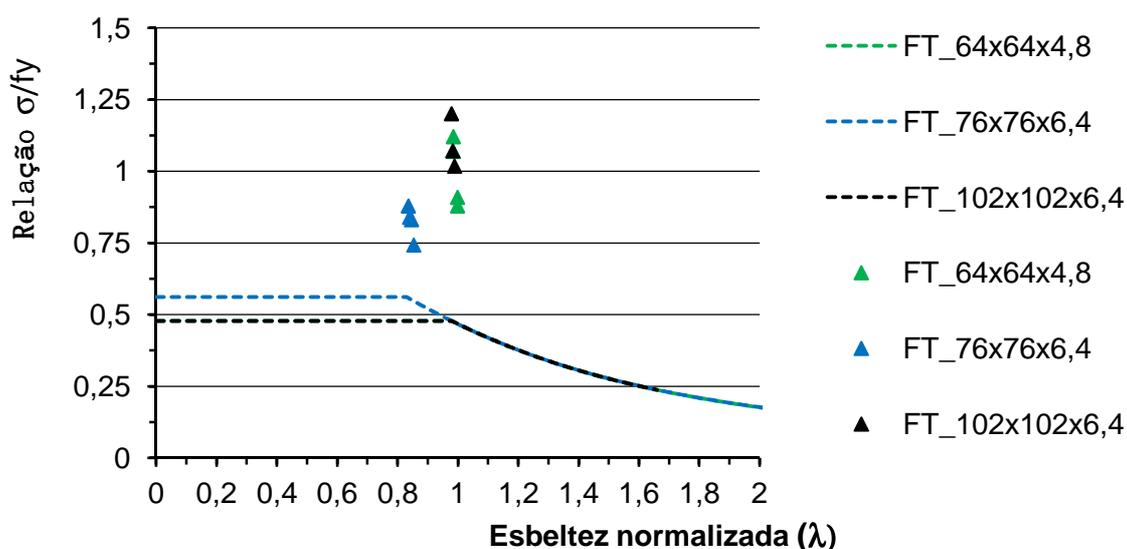


Figura 86 – Curvas de flambagens flexo-torção para cantoneiras em aço inoxidável.

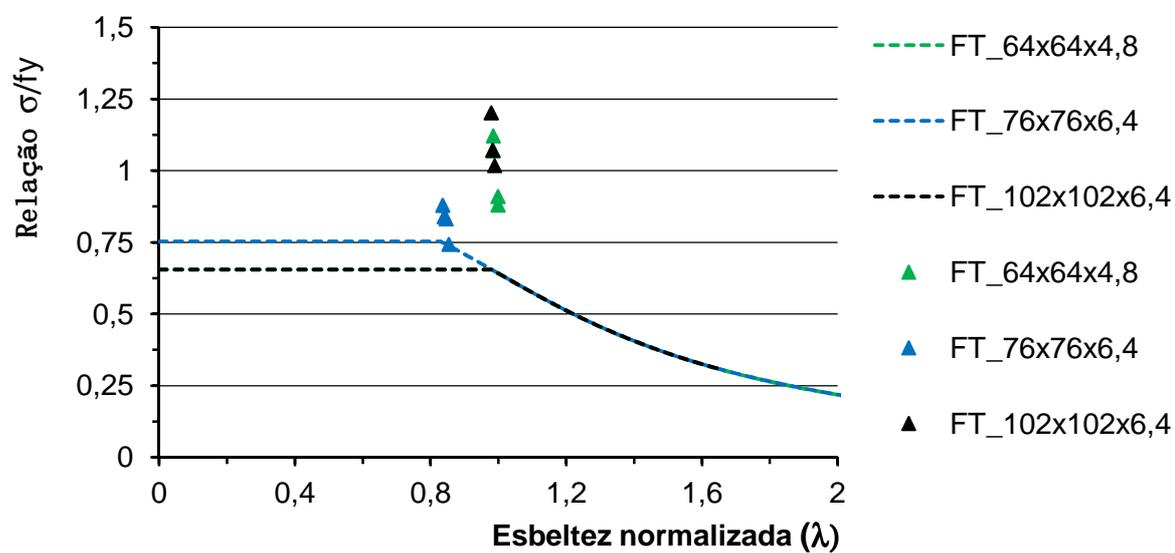


Figura 87 – Curvas de flambagem flexo-torção para cantoneiras em aço inoxidável.

## **6. CONCLUSÕES**

### **6.1. Introdução**

Esta tese realizou um estudo do comportamento estrutural de colunas de aço carbono e aço inoxidável do tipo austenítico. As colunas eram compostas por cantoneiras laminadas de seção transversal L64x64x4,8, L76x76x6,4 e 102x102x6,4 colunas estas que são susceptíveis a diversos tipos de flambagem (local, flexo-torção e flexão). Para isto se desenvolveu modelos experimentais, com variação de comprimento entre 203mm a 1893mm.

A análise experimental avaliou o comportamento de 36 corpos de prova sendo 18 em aço carbono e 18 em aço inoxidável. Na caracterização a tração do aço carbono foram ensaiados um total de 9 corpos de prova, sendo 3 corpos de prova para cada tipo de seção transversal. Na caracterização do aço inoxidável se seguiu o mesmo quantitativo de corpos de prova.

Com a utilização de duas cantoneiras soldadas entre si formando um perfil com seção retangular se realiza ensaios para a caracterização do aço inoxidável a compressão. Para estes ensaios foram utilizados 2 corpos de prova por seção.

Por fim, comparo-se os resultados obtidos nos ensaios com os critérios de cálculo preconizados pelo Eurocode 3, Parte 1-1 [7] e Eurocode 3, Parte 1-4 [6] e se propôs uma modificação do parâmetro utilizado para estruturas deste tipo.

### **6.2. Principais conclusões**

Os ensaios experimentais desenvolvidos neste trabalho foram realizados com diferentes comprimentos. Deste modo, foi possível observar o comportamento de colunas constituídas por cantoneiras para valores de esbeltez normalizada variados. Concluiu-se que a condição de apoio dos ensaios para o aço carbono e para o aço inoxidável foi bi-engastada. As deformações e deslocamentos horizontais das colunas foram medidos por meio de resistência elétrica (extensômetros) e transdutores de deslocamento (LVDT).

A caracterização do material revelou que a tensão de escoamento do aço carbono e do aço inoxidável tiveram resultados distintos de acordo com o tipo de seção transversal. Todos os resultados da caracterização do material foram obtidas a 0,2% de deformação.

O modo de ruína apresentado pelas colunas foram de flambagem local das abas das cantoneiras e flambagem global por flexão e por flexo-torção. A flambagem local ocorreu para as cantoneiras em aço carbono e aço inoxidável com comprimento menores ou iguais a 500mm. Para as cantoneiras em aço carbono 64x64x4,8 e 76x76x6,4. A flambagem por flexo-torção ocorreu em comprimentos iguais a 750mm e com 945mm para a cantoneira 102x102x6,4. Nas demais cantoneiras em aço carbono com comprimento dentro do intervalo de 1000mm a 1500mm a flambagem foi por flexão. Nas cantoneiras em aço inoxidável a flambagem por flexo-torção foi para comprimentos entre 500mm a 1480mm e entre 147mm a 1893mm flambagem por flexão.

Na avaliação do comportamento das deformações axiais, as cantoneiras em aço inoxidável tiveram na fase de carregamento uma deformação maior quando comparados com as em aço carbono.

O fato da prensa utilizada possuir um assento esférico na mesa superior não interferiu no resultado até o ponto de carga máxima dos ensaios, sendo confirmado pela medição da rotação da placa e pela validação dos resultados obtidos por meio da análise teórica e normativa.

Verificou-se que os critérios de cálculo preconizados pelo Eurocode 3, Parte 1-1 [7] e Eurocode 3, Parte 1-4 [6] são conservadores.

Verificou-se que os parâmetros de  $\alpha$  e  $\lambda_0$  preconizados pelo Eurocode 3, Parte 1-4 [6] não são pertinentes para colunas de cantoneiras laminadas de aço inoxidável.

### **6.3. Principais contribuições deste trabalho**

O presente trabalho teve, para o meio acadêmico, as seguintes contribuições:

- Este trabalho reúne artigos e publicações que abordam o tema de cantoneiras a compressão em aço carbono e aço inoxidável duplex, comportamento estrutural do aço inoxidável e os critérios de cálculo do Eurocode 3, Parte 1-1[7] e Eurocode 3, Parte 1-4[6];
- Aumento do número de dados experimentais realizados com cantoneiras de aço carbono e do aço inoxidável austenítico solicitadas à compressão;
- Utilização e recomendação de um processo de caracterização do material com corpo de prova à compressão, onde se comprova, a sua pertinência;
- Comparação dos resultados experimentais com as recomendações de cálculo preconizadas no Eurocode 3, Parte 1-1[7] e Eurocode 3, Parte 1-4[6], verificando que para esbeltezas normalizadas menores que 0,65, os critérios de cálculo são conservadores.

#### **6.4. Sugestões para trabalhos futuros**

A partir das conclusões obtidas durante a realização deste trabalho, algumas sugestões para trabalhos futuros podem ser apresentadas, tais como:

- Realizar ensaios com outras seções de cantoneiras para maior compreensão e avaliação da resistência final para diferentes valores de relação  $(b/t)$  em perfis de aço carbono e aço inoxidável.
- Realizar ensaios semelhantes aos deste trabalho com diferentes tipos de aço inoxidável para avaliar as suas diferenças de comportamento.
- Realizar análise numérica com os resultados dos ensaios apresentados neste trabalho, para que assim possa aumentar a quantidade de resultados e consequentemente uma melhor avaliação.
- Na análise numérica considerar também as tensões residuais, para que se possa verificar a relevância da sua consideração no resultado.

## REFERÊNCIAS

- [1] Portal Metalica Construção Civil. Disponível em: < <https://http://wwwo.metalica.com.br/ponte-helix-dupla-estrutura-de-aco-inoxidavel-em-formato-helicoidal>> Acesso em 18 nov. 2017.
- [2] Portal da World Stainless. Disponível em: < [https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/media\\_releases/2017\\_Year/180315\\_Press\\_Release\\_Stainless\\_Steel\\_Public\\_17Q4.pdf](https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/media_releases/2017_Year/180315_Press_Release_Stainless_Steel_Public_17Q4.pdf) > Acesso em 26 abril. 2018.
- [3] AISC, Design 27:Structural Stainless Steel, American Institute of Steel Construction, Estados Unidos da America, 2013.
- [4] Simões, R. A. D. Manual de dimensionamento de estruturas metálicas, Coleção Construção Metálica e Mista, cmm Press, Coimbra, 2007.
- [5] NBR 8800, Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2008.
- [6] CEN, Eurocode 3,: Design of Steel Structures, Part 1-4: Design of steel structures – General rules - Stainless Steel, EN 1993 1-4, European Committee for Standardization, Brussels,2003.
- [7] CEN, Eurocode 3,: Design of Steel Structures, Part 1-1: General rules and rules for building, EN 1993 1-1, European Committee for Standardization, Brussels,2005.
- [8] Kitipornchai. S, Lee. H. W, Inelastic experiments on angle and tee struts, Journal Constructional Steel Research, vol. 6, p.219-236, 1986.
- [9] Australian Standard, Steel Structures Code, AS 1250,Sydney, 1981.

- [10] American Institute of Steel Construction, AISC. Specification for structural steel building. New York, NY. 1978.
- [11] Al-Sayed, S. H., Bjorhovde, R, Experimental Study of Single Angles Columns, Journal Constructional Steel Research, vol. 12, p.83-102, 1989.
- [12] Adluri, S. M. R, Madugula, M. K. S, Flexural buckling of steel angles: experimental investigation, Journal of Structural Engineering, vol. 122, p.309-317, 1996.
- [13] Adluri, S. M. R, Madugula, M. K. S, Development of column curve for steel angles, Journal of Structural Engineering, vol. 122, p.318-325, 1996.
- [14] Galambos, T.V., Design of axially loaded compressed angles – Struct. Stability Res. Council, Lehigh Univ., Bethlehem, Pa, p.353-367.
- [15] Kitipornchai. S, Torsionla-flexural buckling of angles: A parametric study, Journal of Constructional Steel Research, vol. 3, p.28-31, 1983.
- [16] Ramberg W, Osgood WR. Description of stress-strain curves by three parameters. National Advisory Committee for Aeronautics, Washington, DC;note n° 902, July 1943.
- [17] Hill HN, Determination of stress-strain relations from the offset yield strength values. Technical Note n° 927. National Advisory Committee for Aeronautics. Washington, DC; 1944.
- [18] Rasmussen, Kim J.R. Full-ranger stress-strain curves stainless steel alloys. Journal of Constructional Steel Research, v. 59, p. 47-61, 2003.
- [19] Mirambell, E., Real, E., On the calculation of deflections instructural stainless steel beams: an experimental and numerical investigation. Journal of Constructional Steel Research, v. 54, p. 109-133, 2000.

- [20] Reynolds, N. A., Behavior and design of concentrically loaded duplex stainless steel single equal-leg angle struts, tese de doutorado, Georgia Institute of Technology, Georgia, 2013.
- [21] Afshan. S, Gardner.L, The continuous strength method for structural stainless steel design, Thin-Walled Structures, vol. 68, p.42-49, 2013.
- [22] Menezes, Arthur Araujo, Comportamento estrutural de cantoneiras de aço inoxidável submetidas à compressão axial, dissertação de mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2017.
- [23] Afshan. M, Gardner. L, Nethercot. D.A, Compression strength of stainless steel cross-sections, Journal Constructional Steel Research, vol. 62, p. 105-115, 2006.
- [24] Becque. J, Rasmussen. J.R, Experimental investigation of the interaction of local and over buckling of stainless steel I columnus, Journal of Structural Engineering, vol. 135, p.1340-1348, 2009.
- [25] Galambos, T.V., Guide to stability desing criteria for metal structures. New York: John Wiley & Sons, New York, 1998.
- [26] ABNT NBR 6892, Materiais metálicos – Ensaio de Tração, Parte 1 – Método de ensaio a temperatura ambiente. 2015.

## ANEXO A

Este anexo apresenta as medições feitas no programa de ensaios experimentais para as cantoneiras laminadas em aço carbono que não foram apresentadas no desenvolvimento desta tese.

**Tabela 22 – Cantoneiras laminadas em aço carbono com os seus respectivos modos de falhas de correntes dos ensaios**

Cantoneiras	Comprimento mm	Ensaio
LC_64x64x4,8	502,0	Local
	503,0	Local
	750,0	Flexo-torção
	750,0	Flexo-torção
	1000,0	Flexão
	1000,0	Flexão
LC_76x76x6,4	485,0	Local
	502,0	Local
	750,0	Flexo-torção
	750,0	Flexo-torção
	1004,5	Flexão
	1005,5	Flexão
LC_102x102x6,4	272,0	Local
	272,0	Local
	937,0	Flexo-torção
	943,0	Flexo-torção
	1505,0	Flexão
	1517,0	Flexão

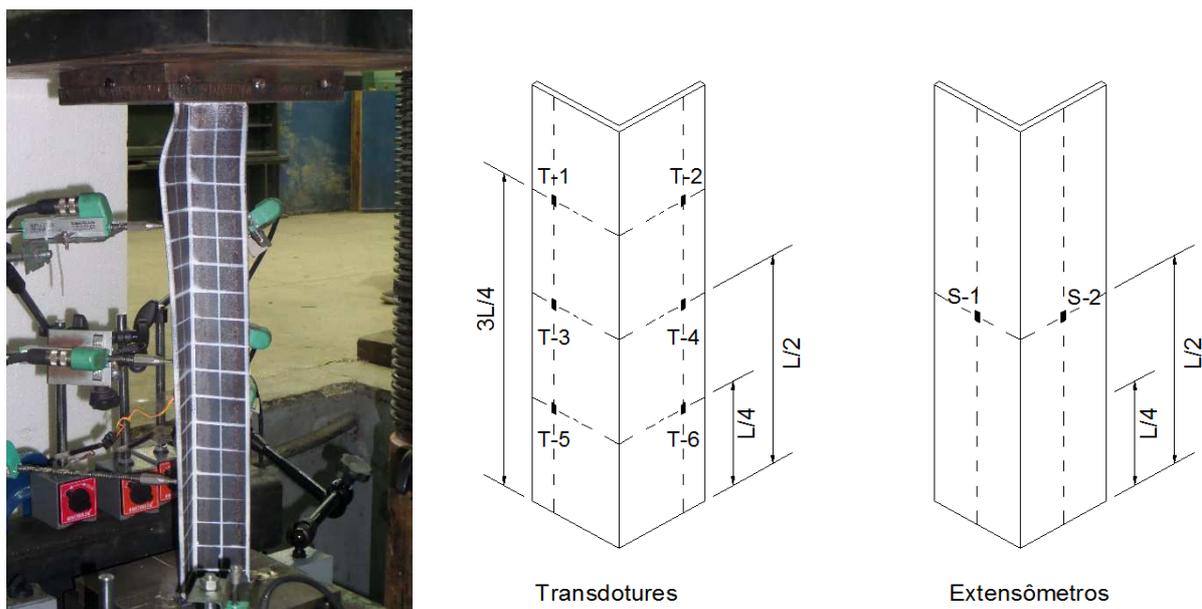


Figura A1 – Cantoneira LC\_64x64x4,8\_L502\_1

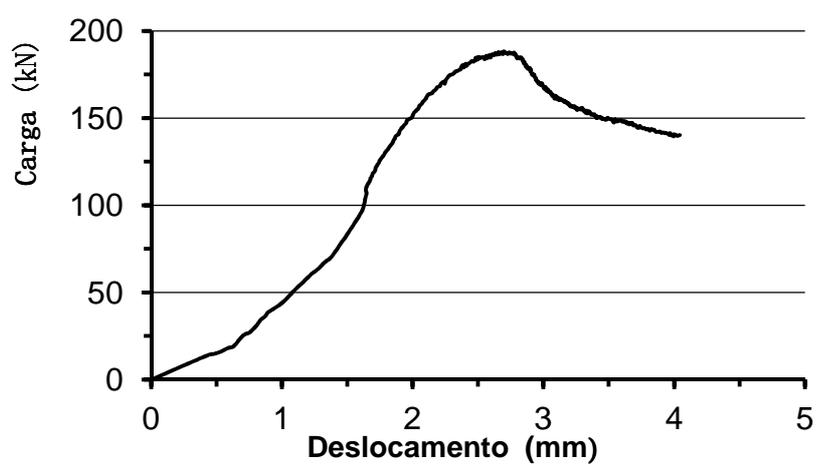


Figura A2 – Curva carga *versus* deslocamento vertical LC\_64x64x4,8\_L502\_1

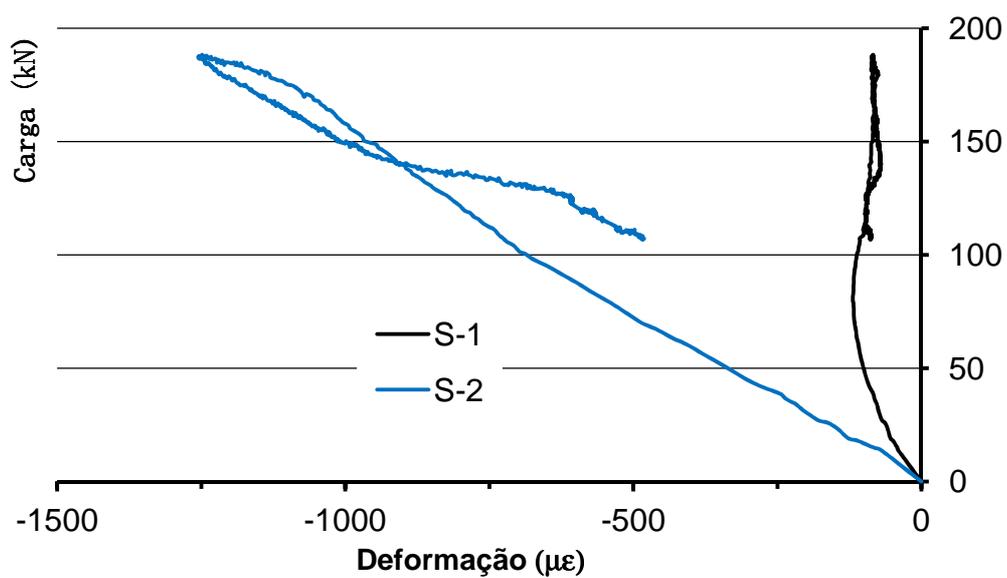


Figura A3 – Curva carga *versus* deformação LC\_64x64x4,8\_L502\_1

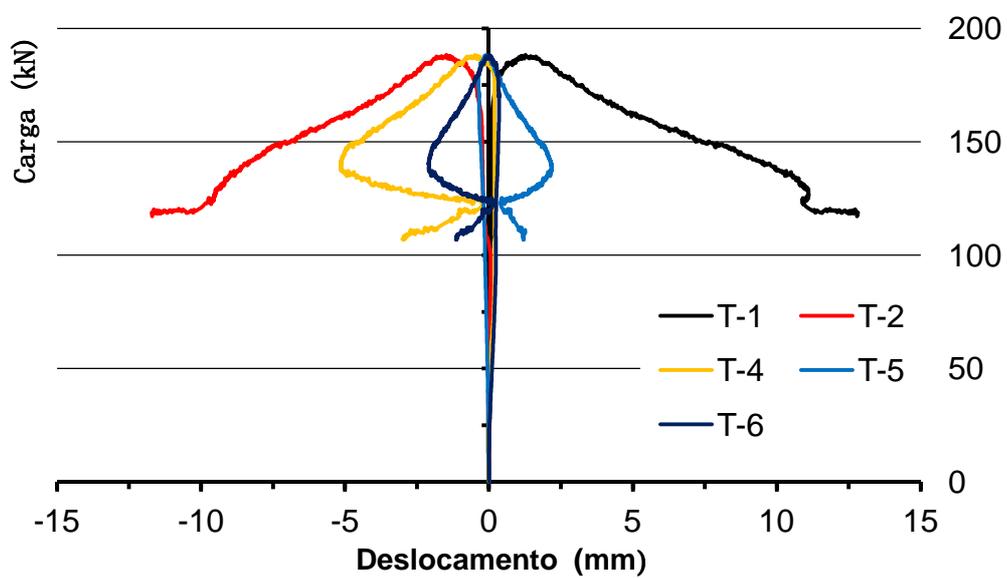
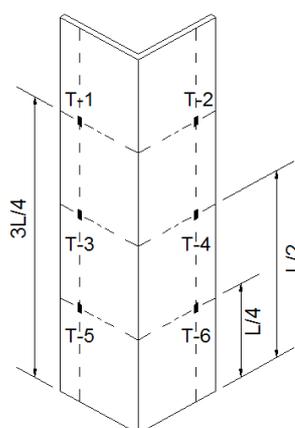
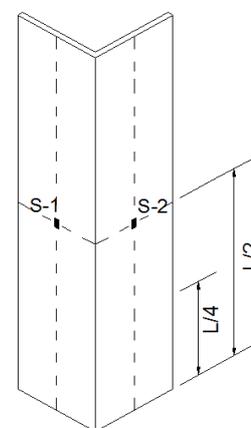


Figura A4 – Curva carga *versus* deslocamentos LC\_64x64x4,8\_L502\_1



Transdutores



Extensômetros

Figura A5 – Cantoneira LC\_64x64x4,8\_L503\_1

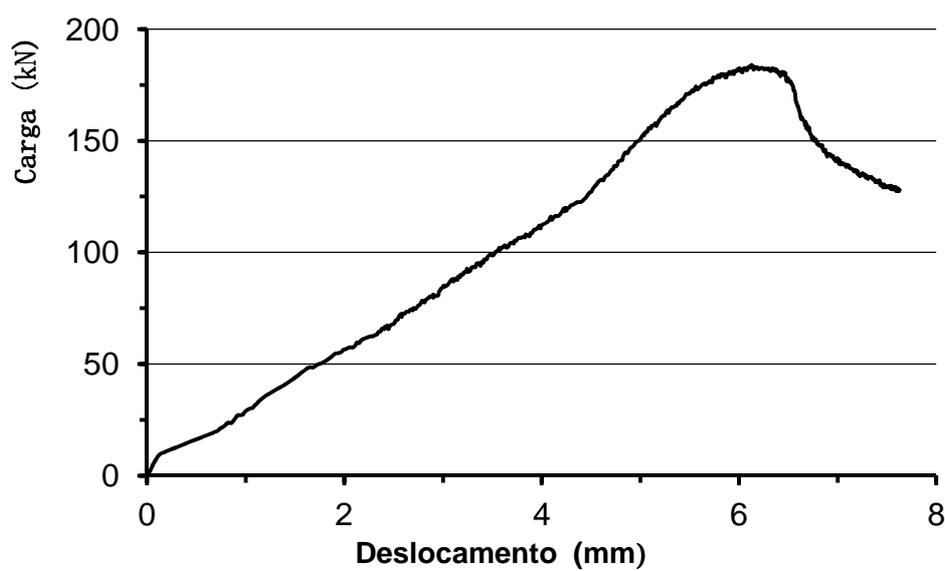


Figura A6 – Curva carga versus deslocamento vertical LC\_64x64x4,8\_L503\_1

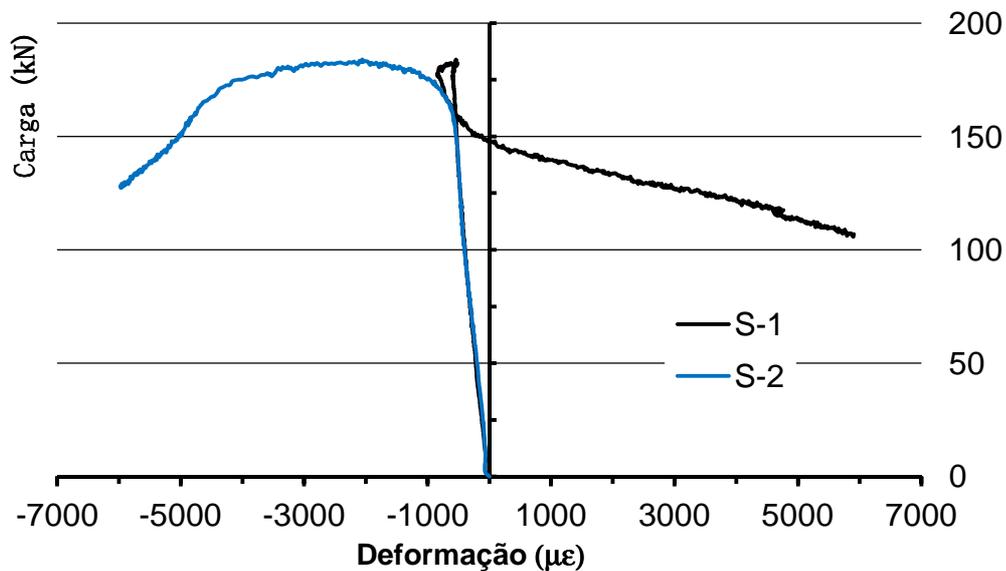


Figura A7 – Curva carga versus deformação LC\_64x64x4,8\_L503\_1

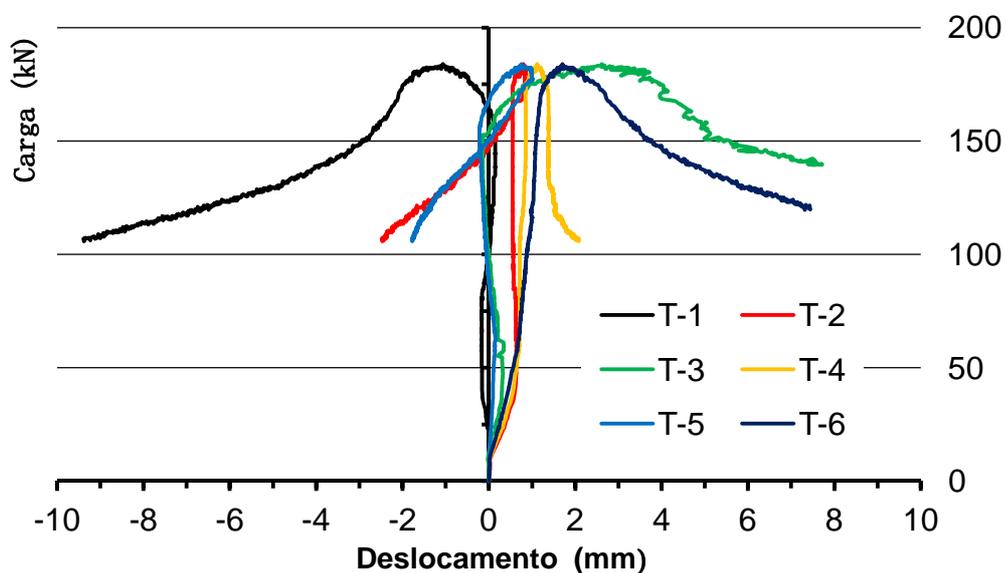


Figura A8 – Curva carga versus deslocamento LC\_64x64x4,8\_L503\_1

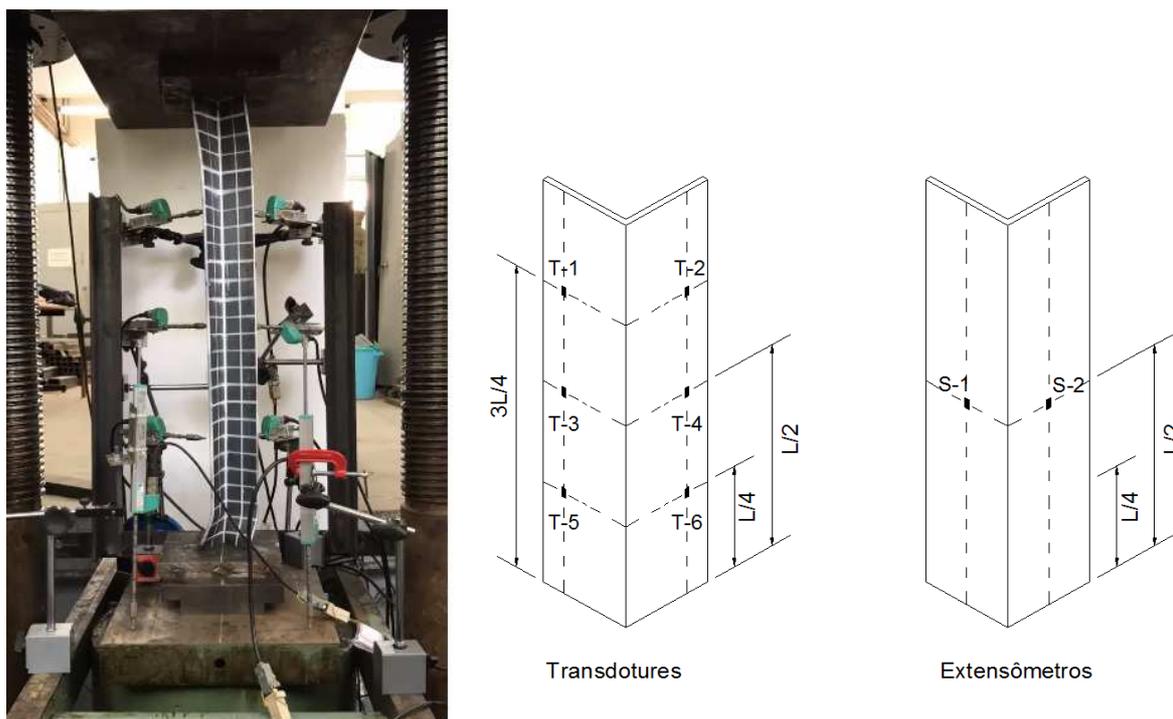


Figura A9 – Cantoneira LC<sub>64x64x4,8\_L750\_1</sub>

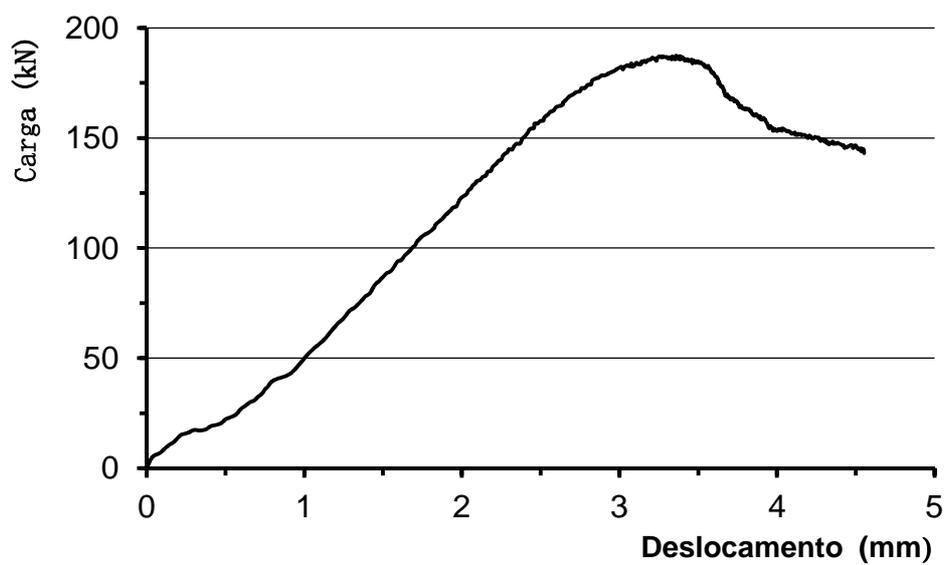


Figura A10 – Curva carga versus deslocamento vertical LC<sub>64x64x4,8\_L750\_1</sub>

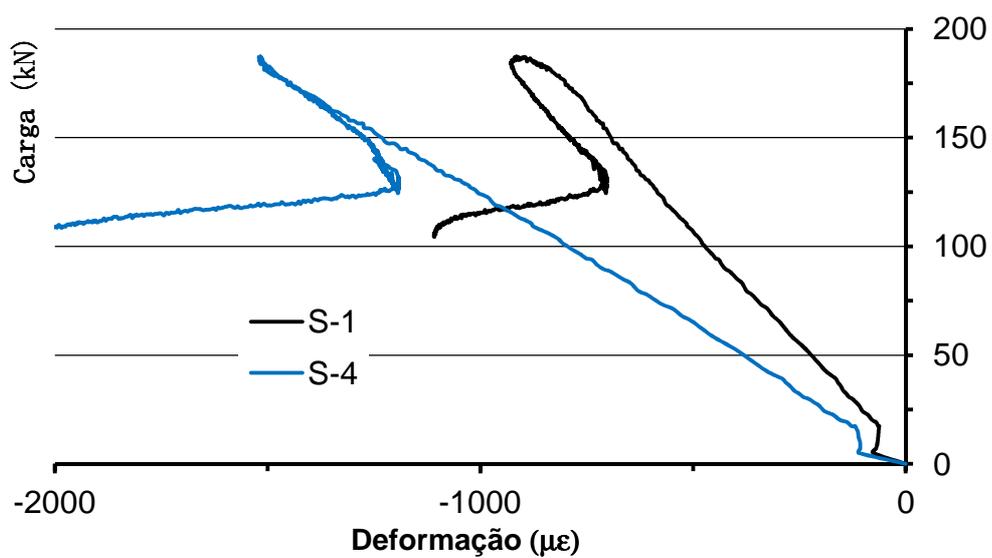


Figura A11 – Curva carga *versus* deformação LC\_64x64x4,8\_L750\_1

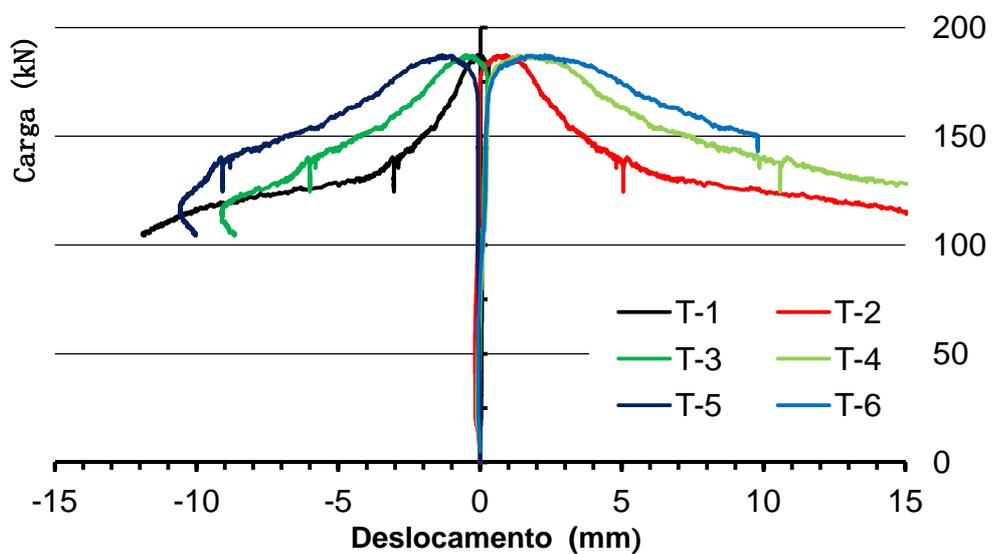


Figura A12 – Curva carga *versus* deslocamento LC\_64x64x4,8\_L750\_1

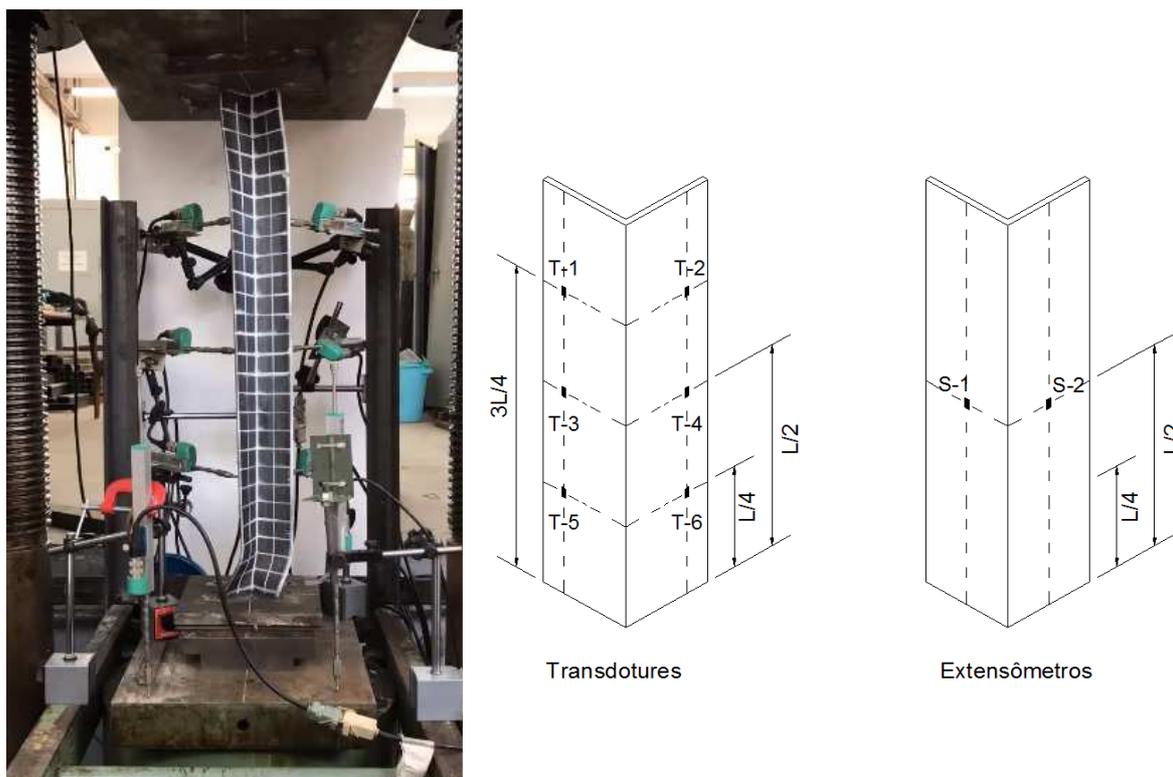


Figura A13 – Cantoneira LC\_64x64x4,8\_L750\_2

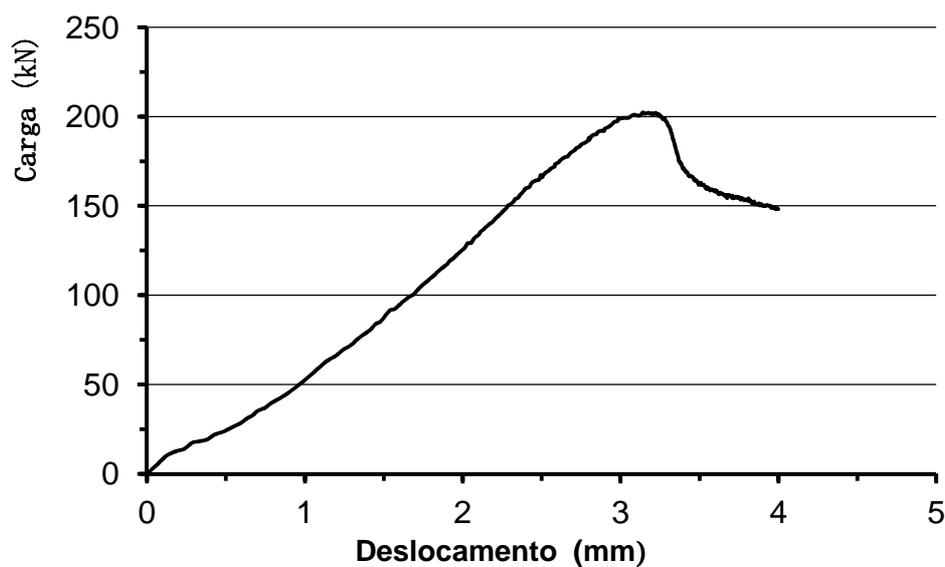


Figura A14 – Curva carga versus deslocamento vertical LC\_64x64x4,8\_L750\_2

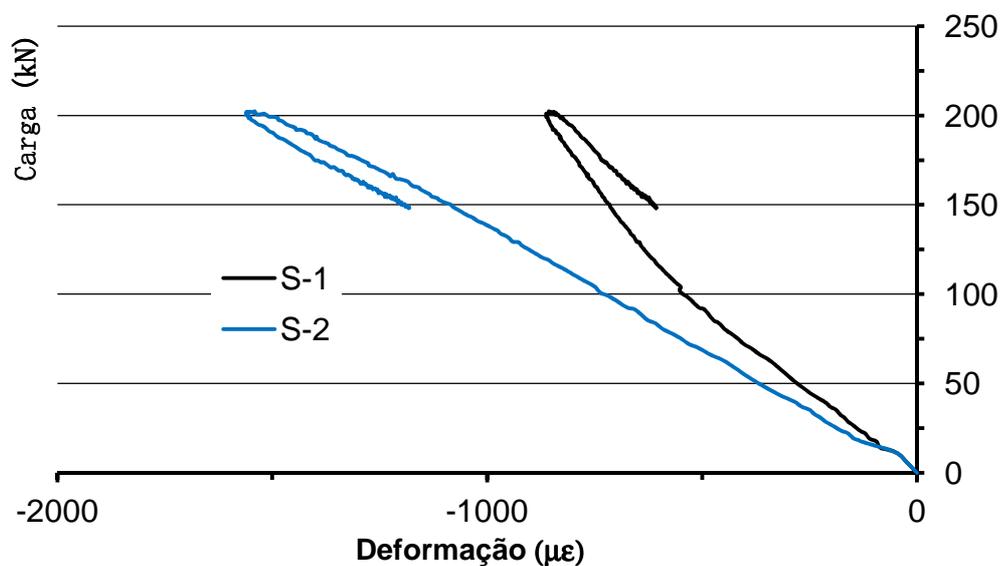


Figura A15 – Curva carga versus deformação LC\_64x64x4,8\_L750\_2

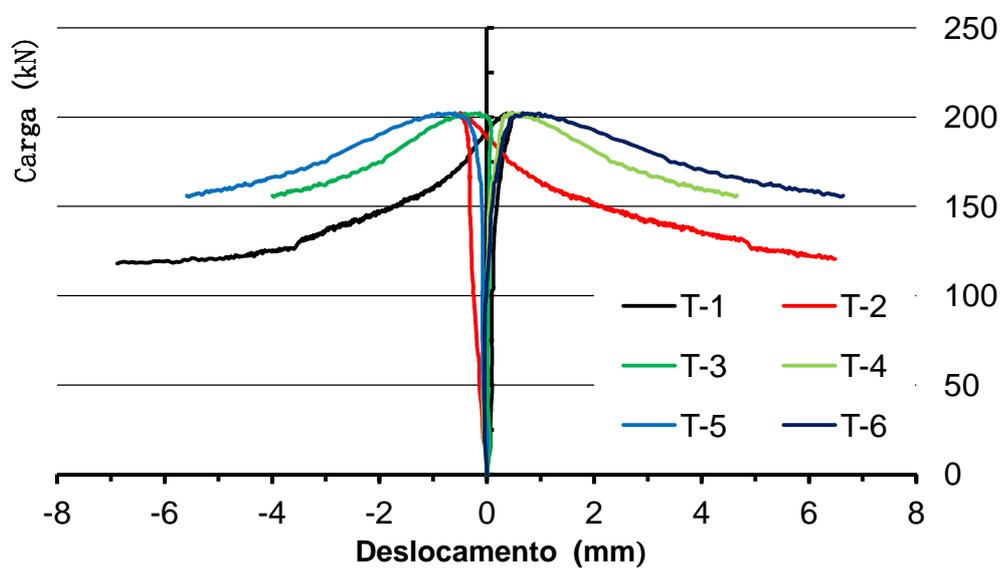


Figura A16 – Curva carga versus deslocamento LC\_64x64x4,8\_L750\_2

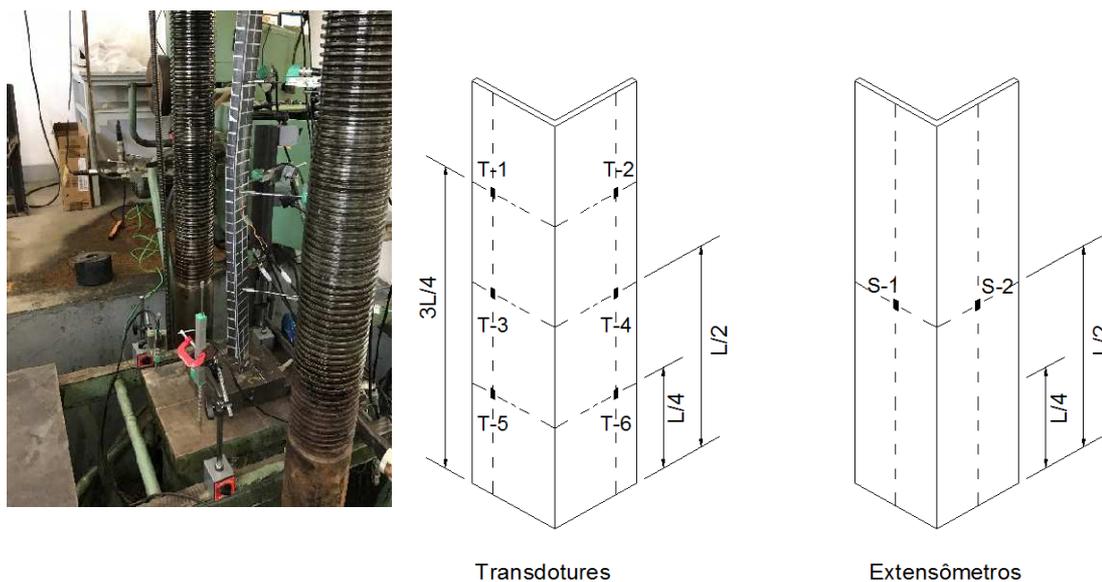


Figura A17 – Cantoneira LC\_64x64x4,8\_L1000\_1

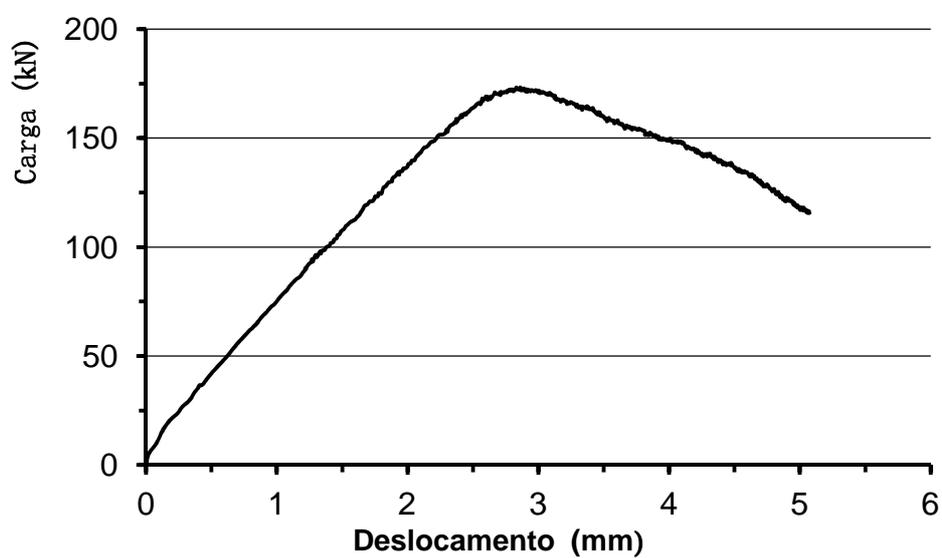


Figura A18 – Curva carga versus deslocamento vertical LC\_64x64x4,8\_L1000\_1

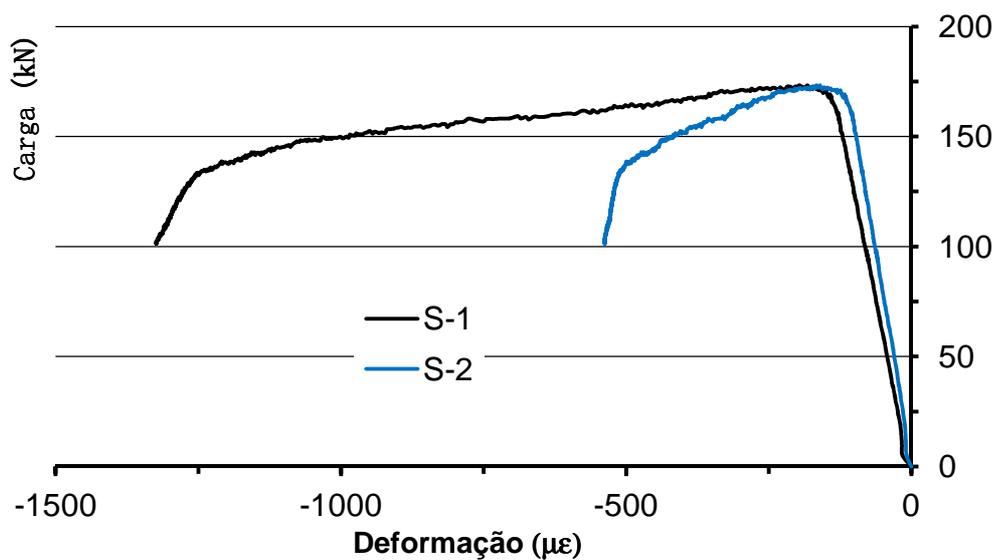


Figura A19 – Curva carga versus deformação LC\_64x64x4,8\_L1000\_1

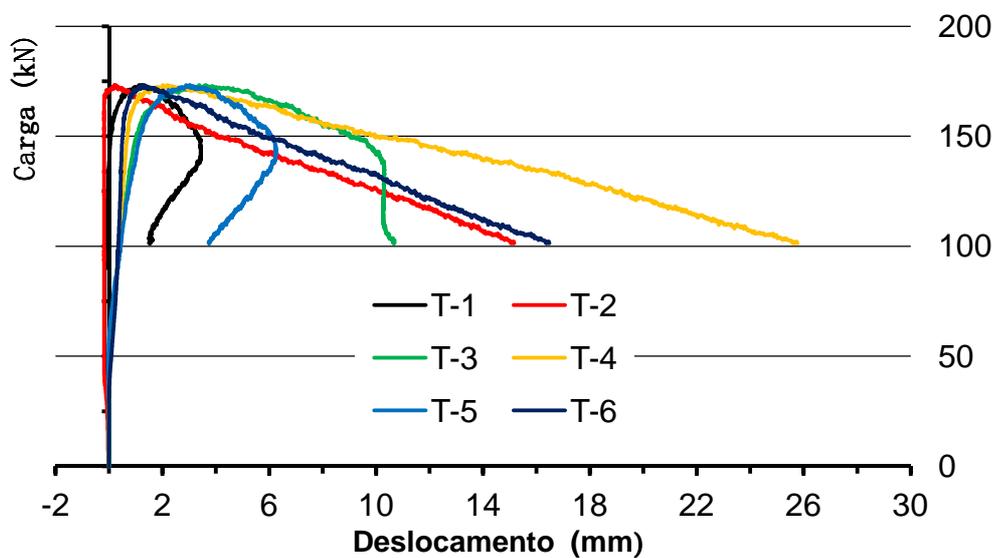
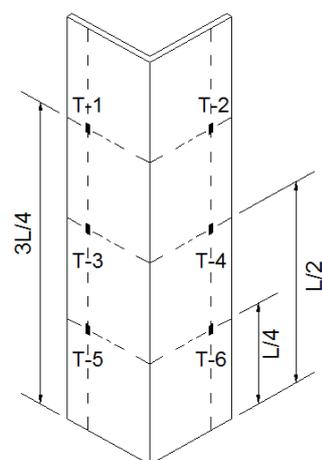
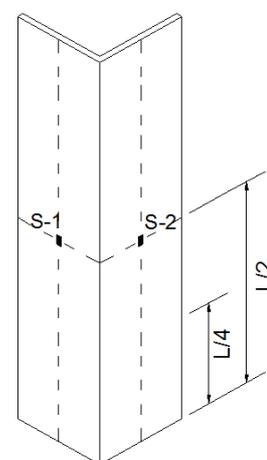


Figura A20 – Curva carga versus deslocamento LC\_64x64x4,8\_L1000\_1



Transdutores



Extensômetros

Figura A21 – Cantoneira LC\_64x64x4,8\_L1000\_2

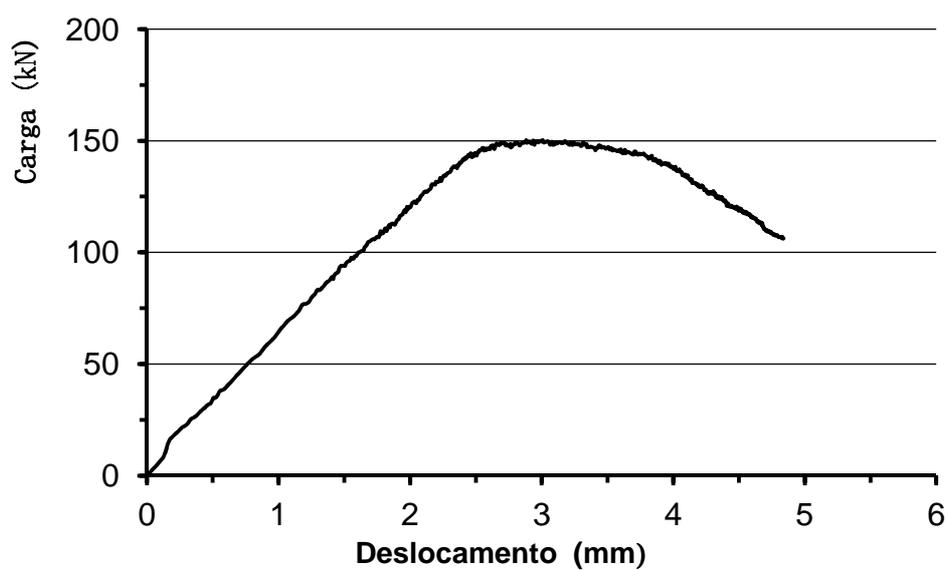


Figura A22 – Curva carga versus deslocamento vertical LC\_64x64x4,8\_L1000\_2

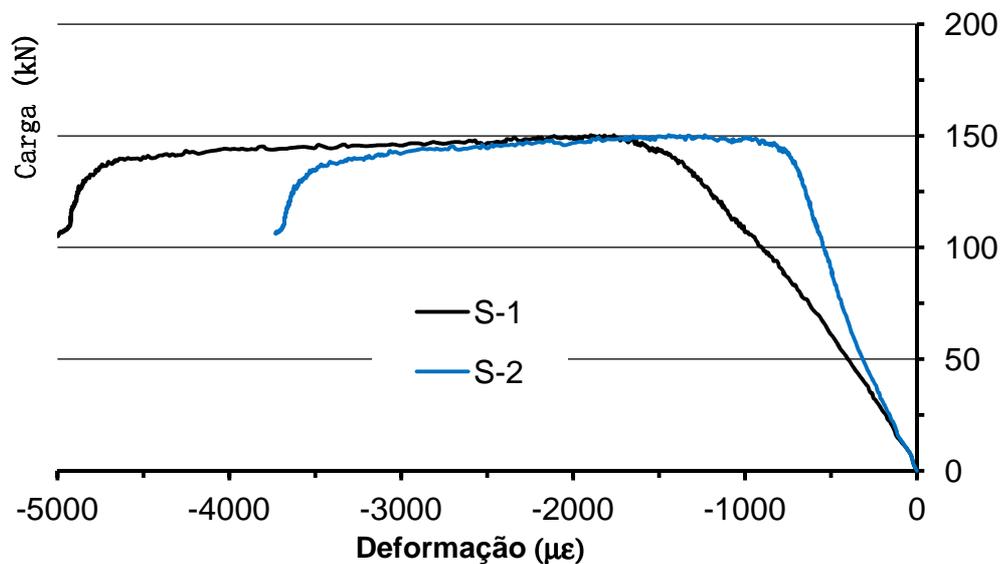


Figura A23 – Curva carga versus deformação LC\_64x64x4,8\_L1000\_2

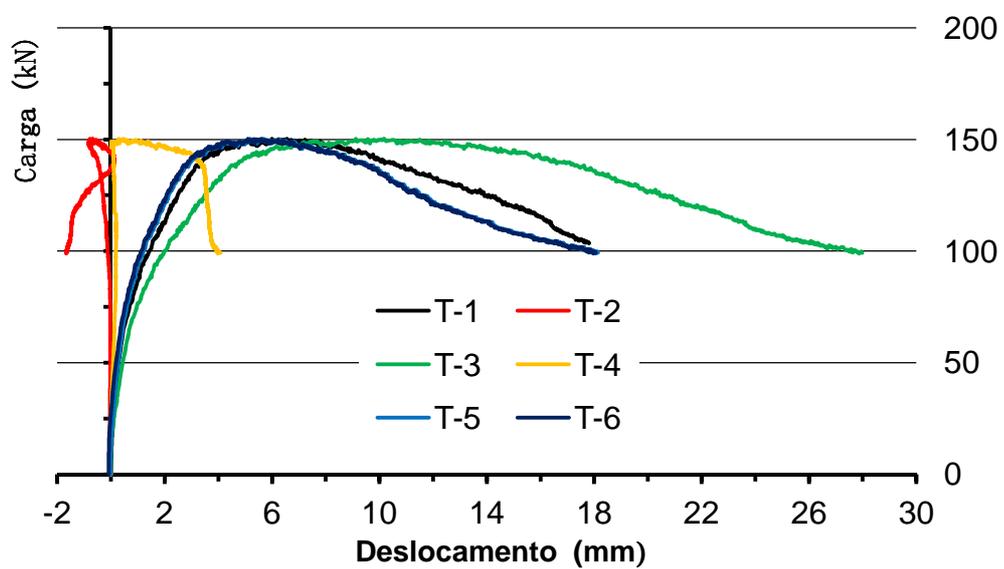


Figura A24 – Curva carga versus deslocamento LC\_64x64x4,8\_L1000\_2

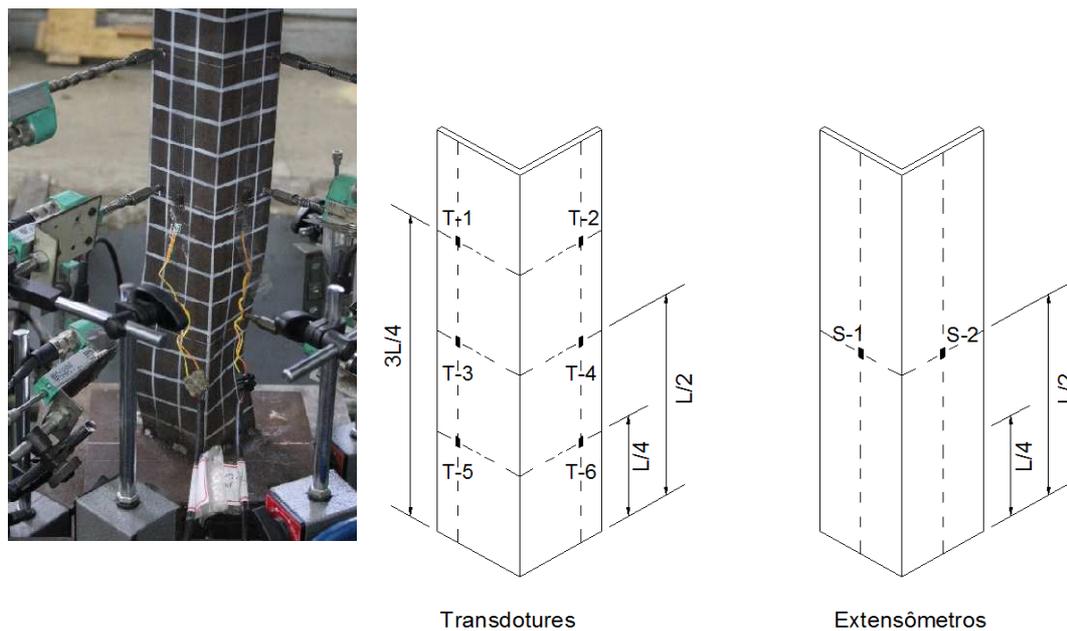


Figura A25 – Cantoneira LC\_76x76x6,4\_L485\_1

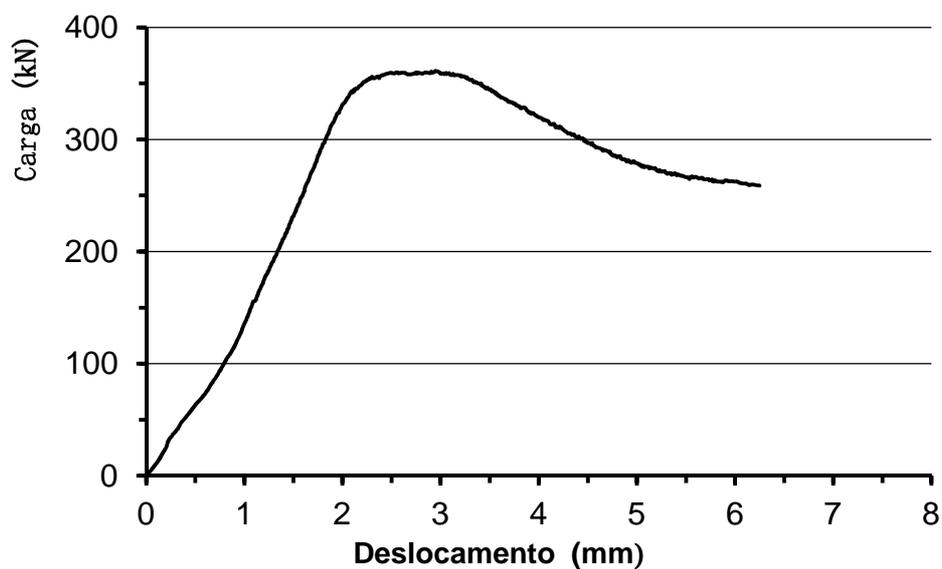


Figura A26 – Curva carga versus deslocamento vertical LC\_76x76x6,4\_L485\_1

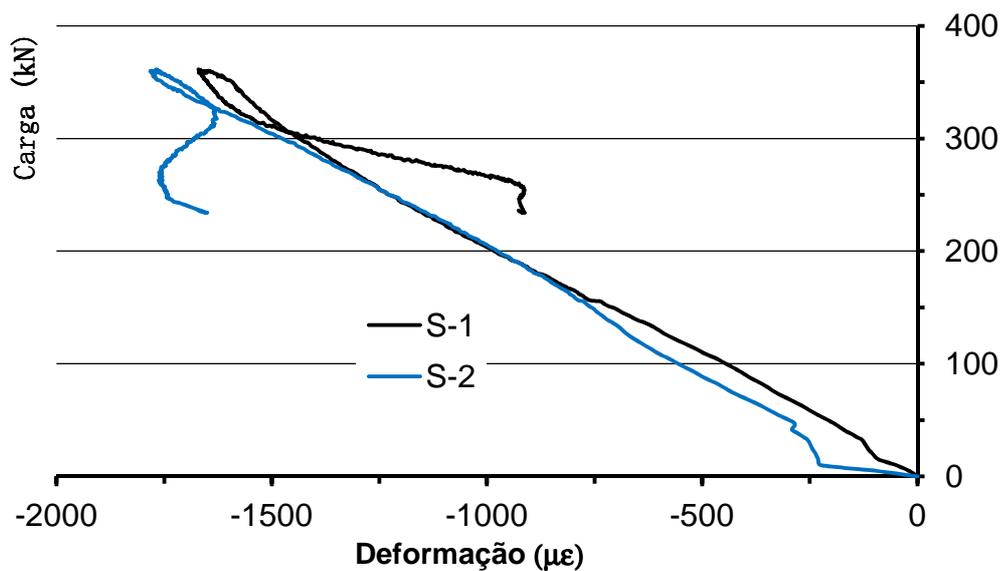


Figura A27 – Curva carga versus deformação LC\_76x76x6,4\_L485\_1

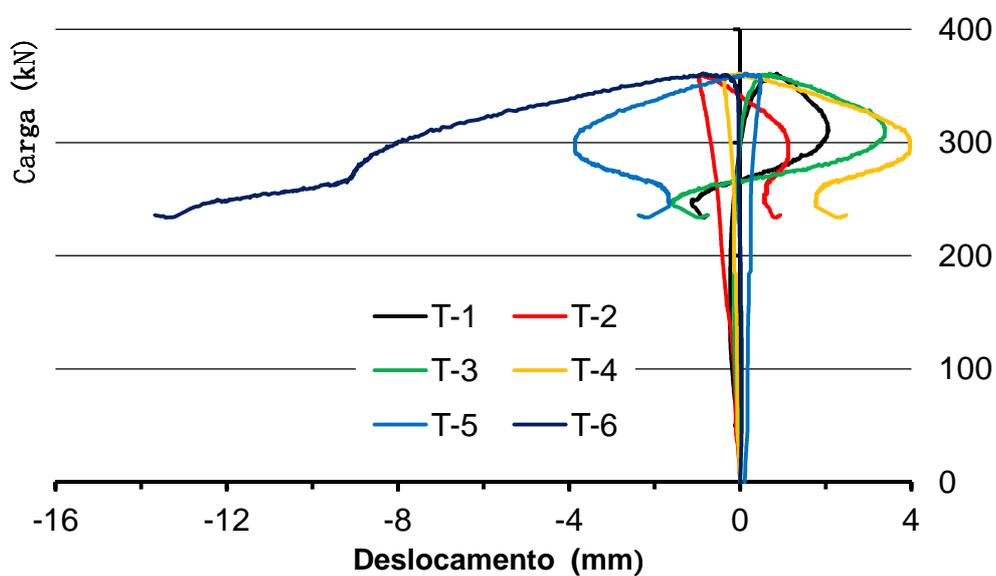
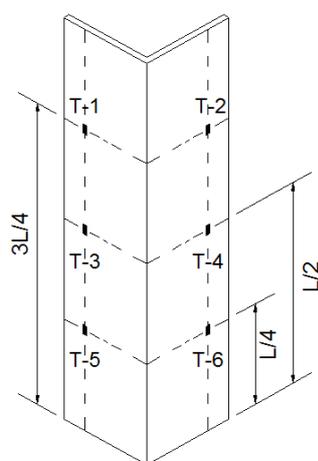
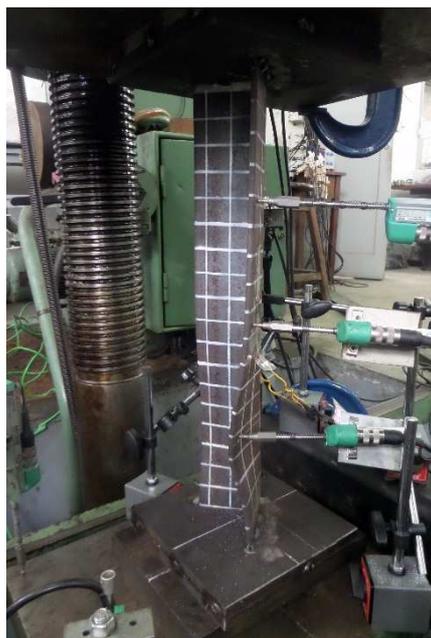
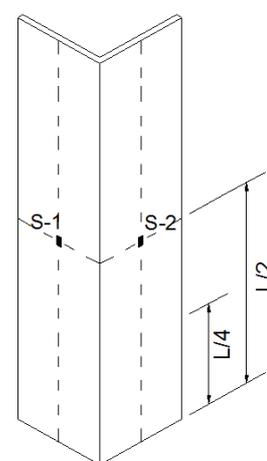


Figura A28 – Curva carga versus deslocamento LC\_76x76x6,4\_L485\_1



Transdutores



Extensômetros

Figura A29 – Cantoneira LC\_76x76x6,4\_L502\_1

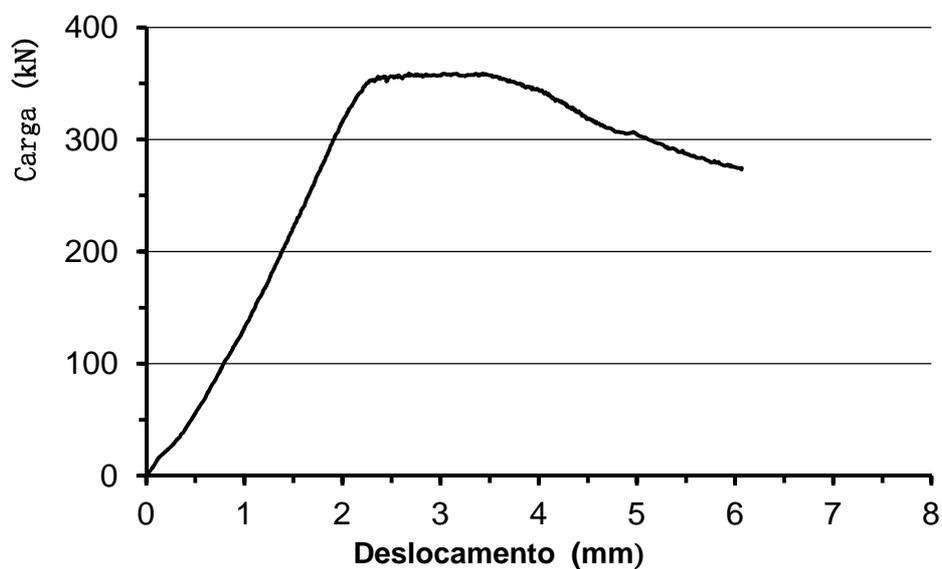


Figura A30 – Curva carga versus deslocamento vertical LC\_76x76x6,4\_L502\_1

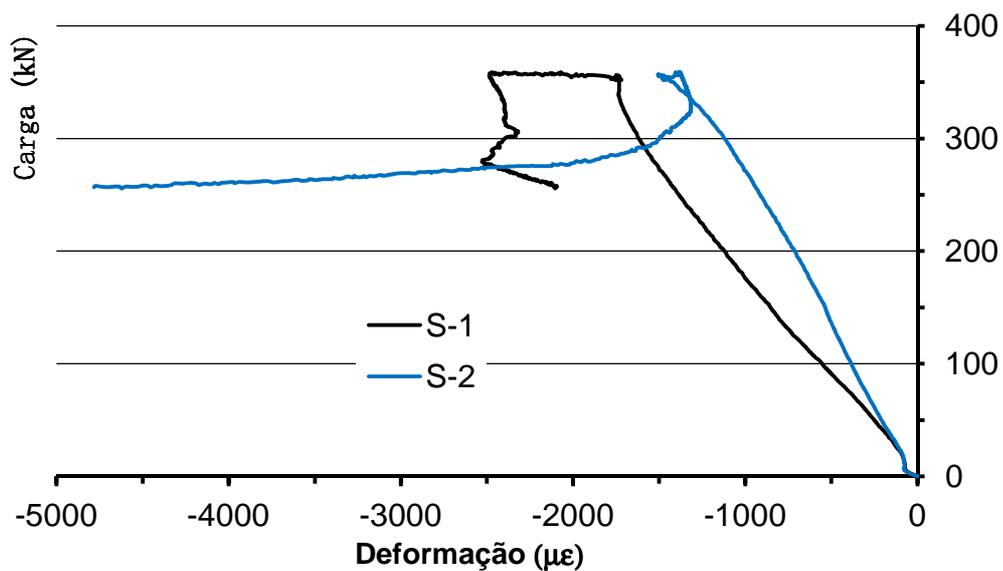


Figura A31 – Curva carga *versus* deformação LC\_76x76x6,4\_L502\_1

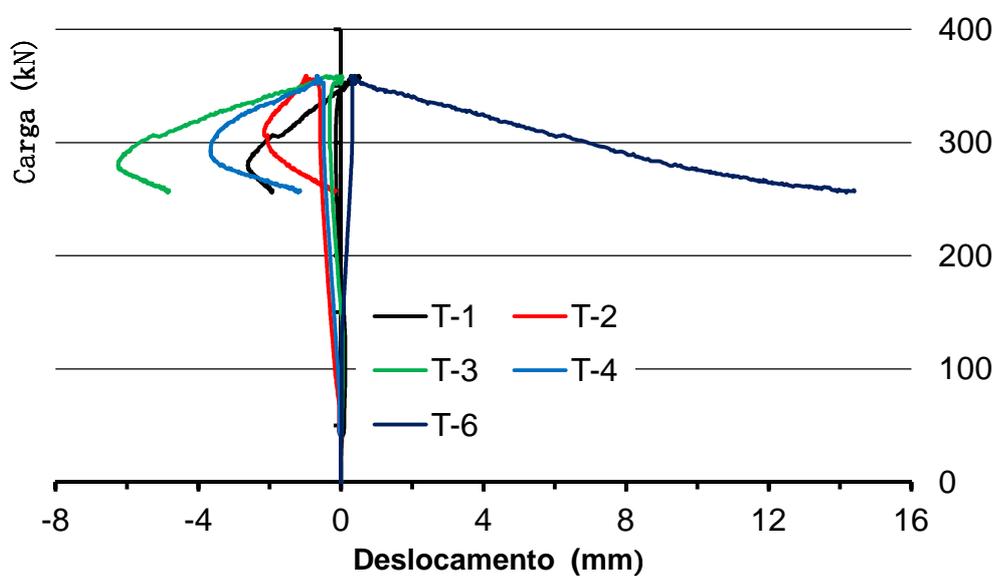


Figura A32 – Curva carga *versus* deslocamento LC\_76x76x6,4\_L502\_1

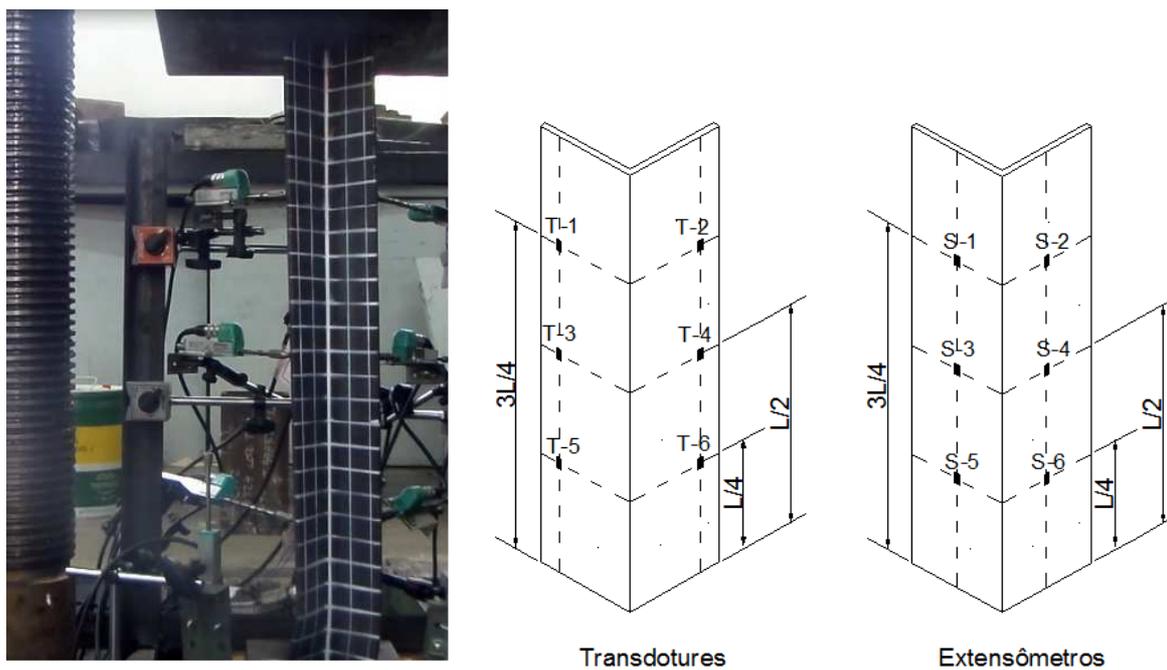


Figura A33 – Cantoneira LC\_76x76x6,4\_L750\_1

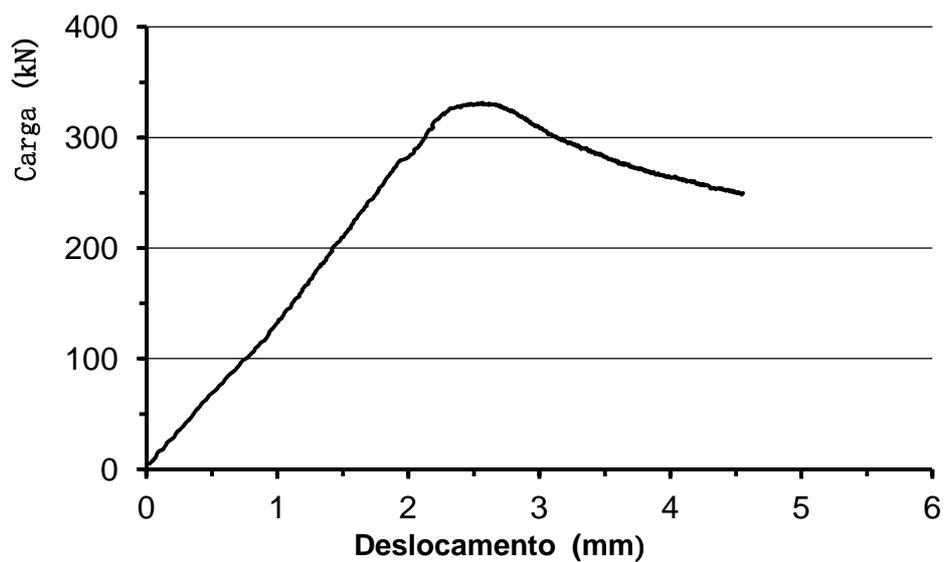


Figura A34 – Curva carga versus deslocamento vertical LC\_76x76x6,4\_L750\_1

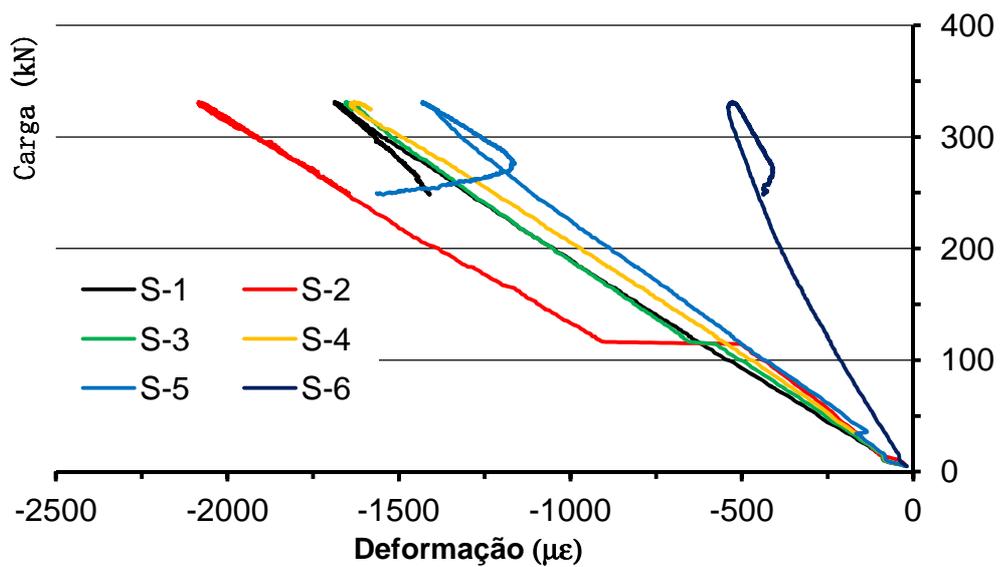


Figura A35 – Curva carga *versus* deformação LC\_76x76x6,4\_L750\_1

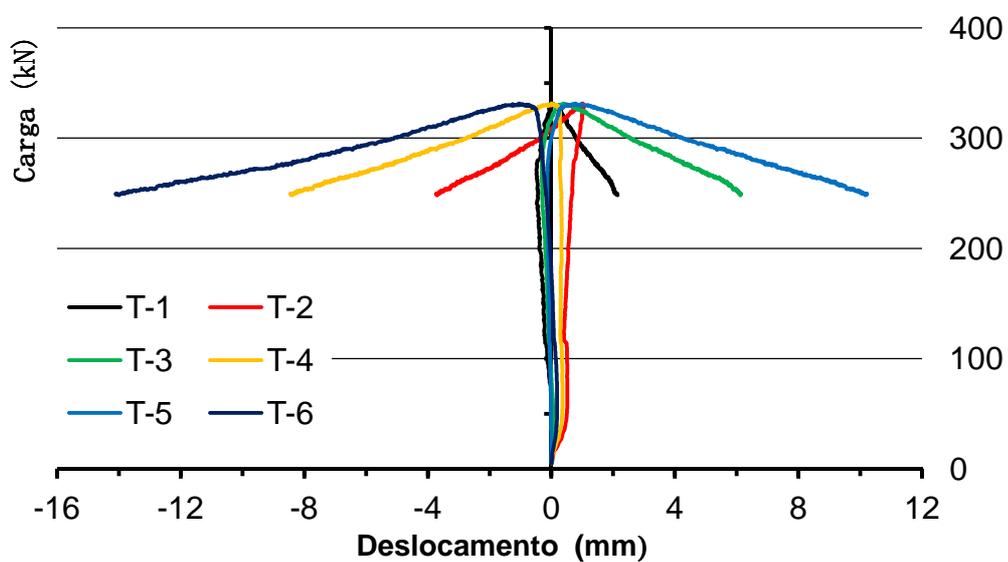


Figura A36 – Curva carga *versus* deslocamento LC\_76x76x6,4\_L750\_1

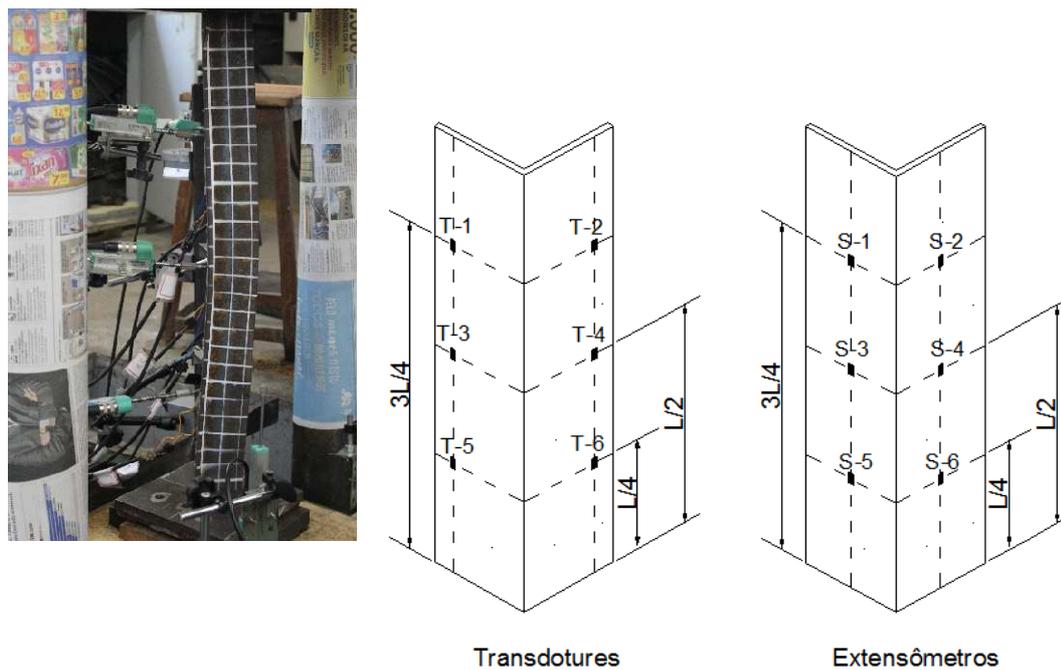


Figura A37 – Cantoneira LC\_76x76x6,4\_L750\_2

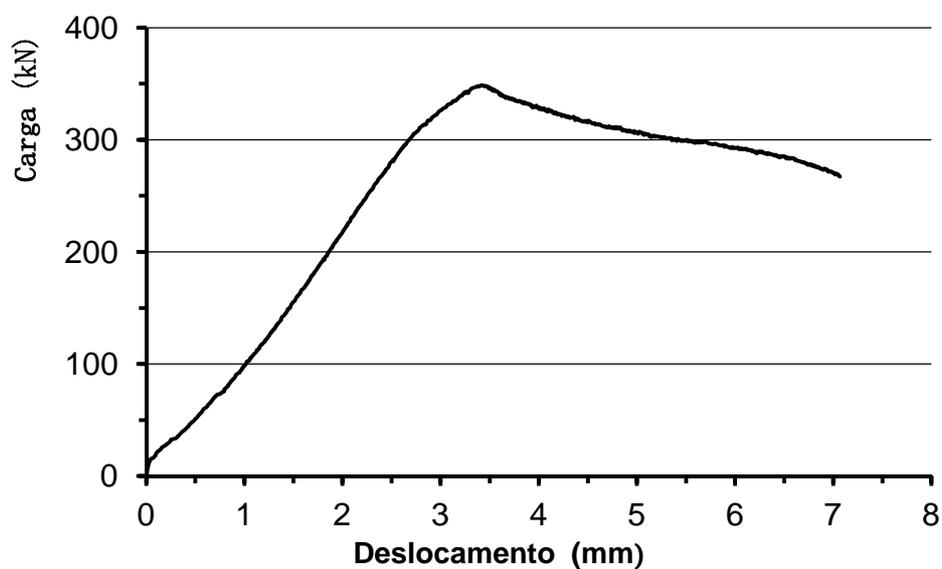


Figura A38 – Curva carga versus deslocamento vertical LC\_76x76x6,4\_L750\_2

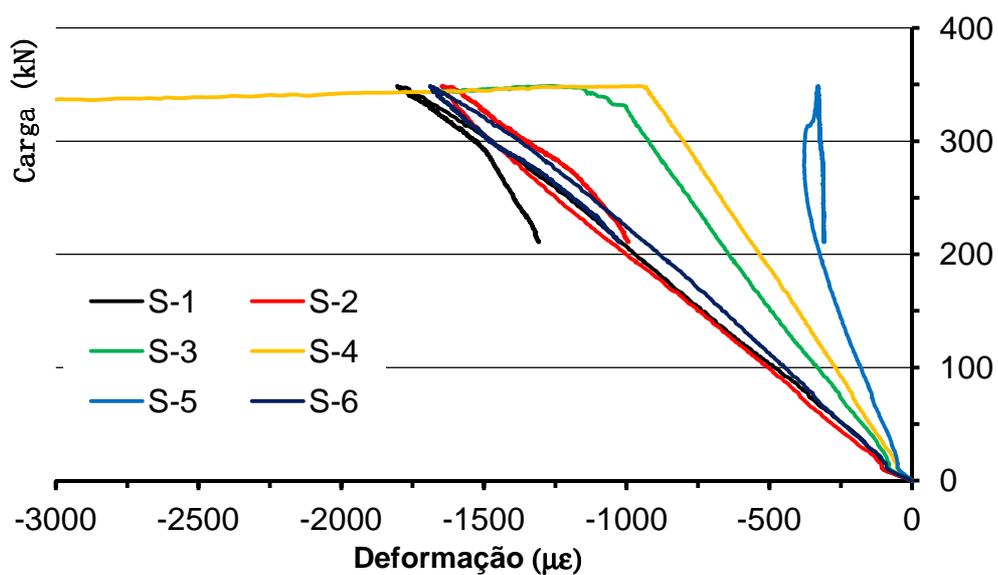


Figura A39 – Curva carga *versus* deformação LC\_76x76x6,4\_L750\_2

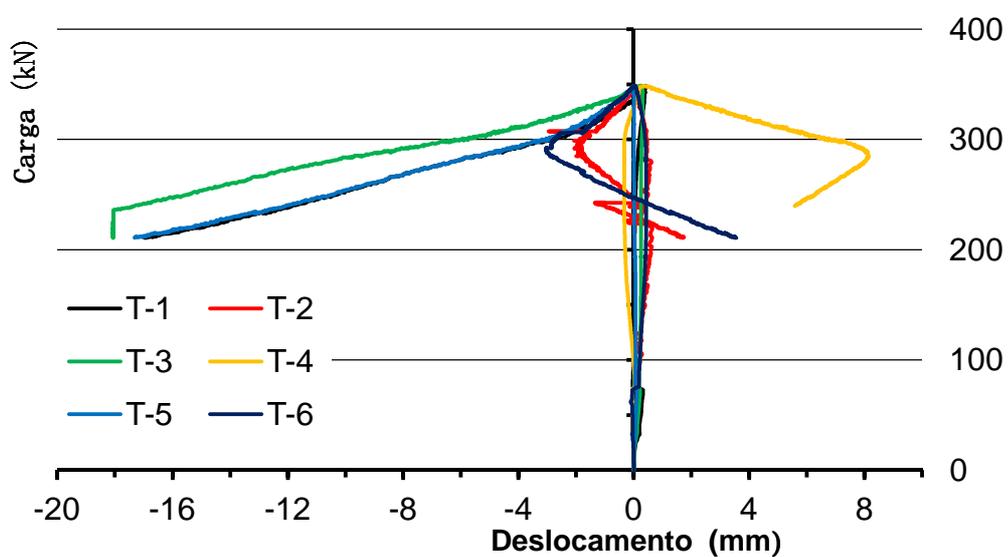


Figura A40 – Curva carga *versus* deslocamento LC\_76x76x6,4\_L750\_2

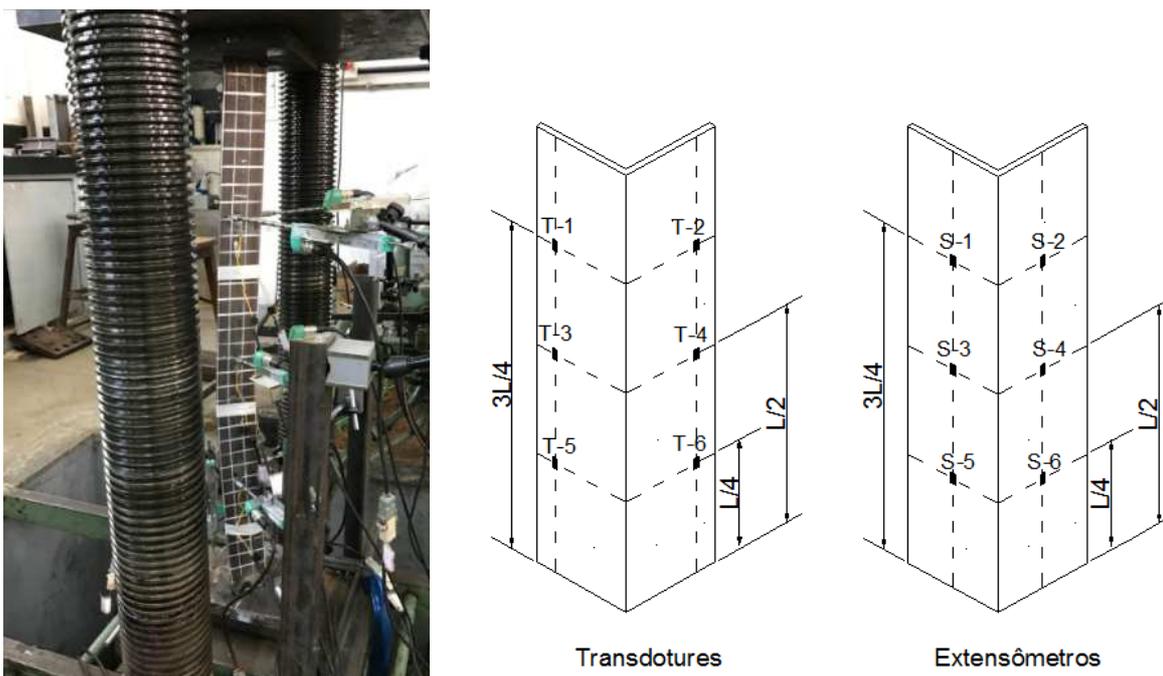


Figura A41 – Cantoneira LC\_76x76x6,4\_L1004,5\_1

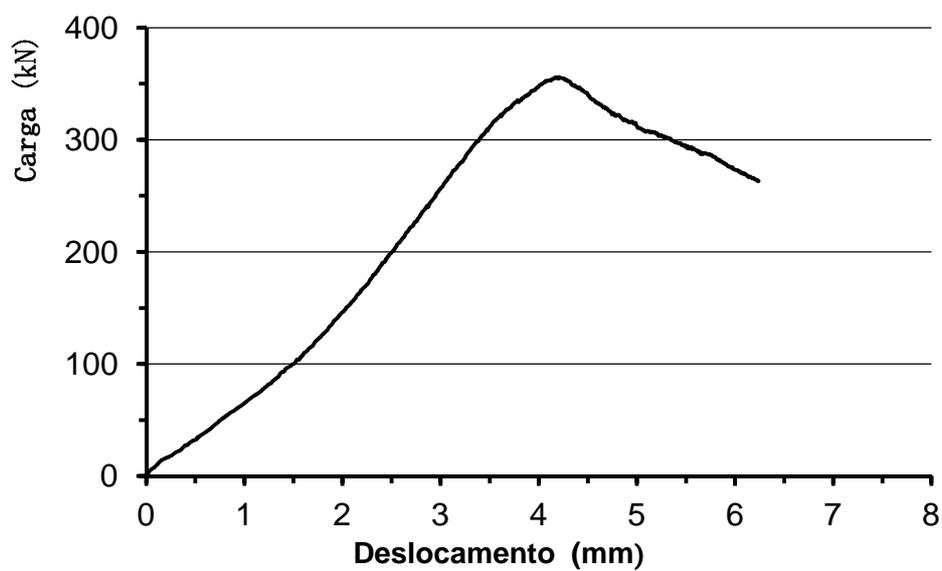


Figura A42 – Curva carga versus deslocamento vertical LC\_76x76x6,4\_L1004,5\_1

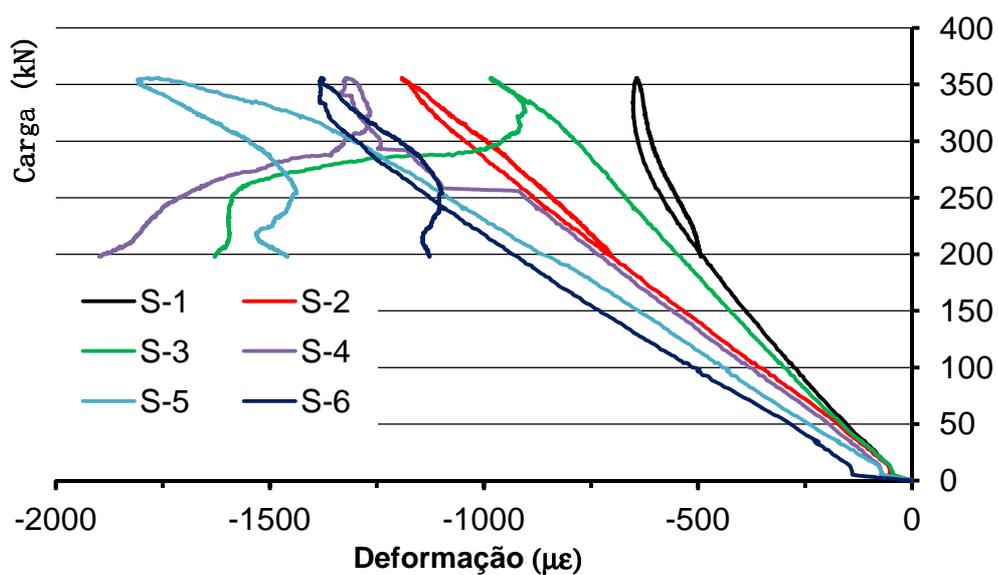


Figura A43 – Curva carga *versus* deformação LC\_76x76x6,4\_L1004,5\_1

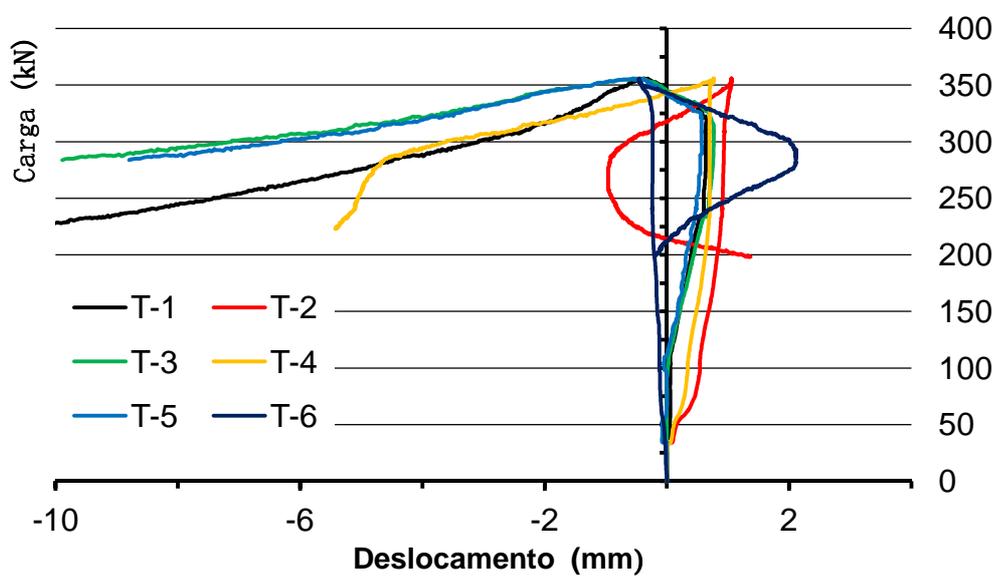
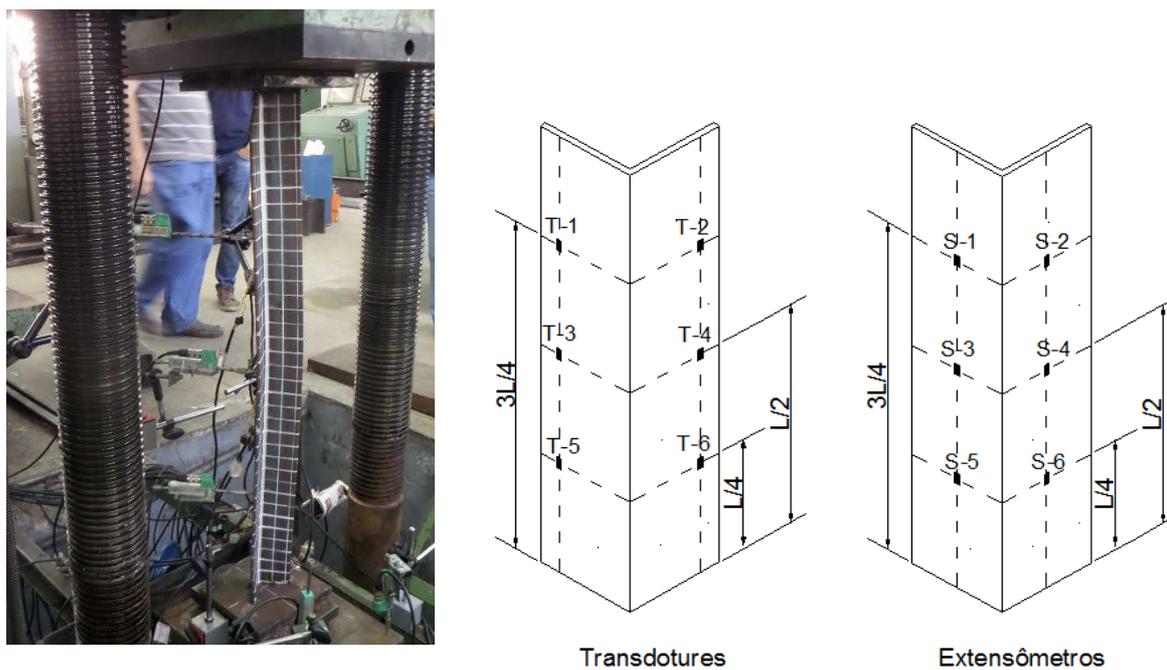
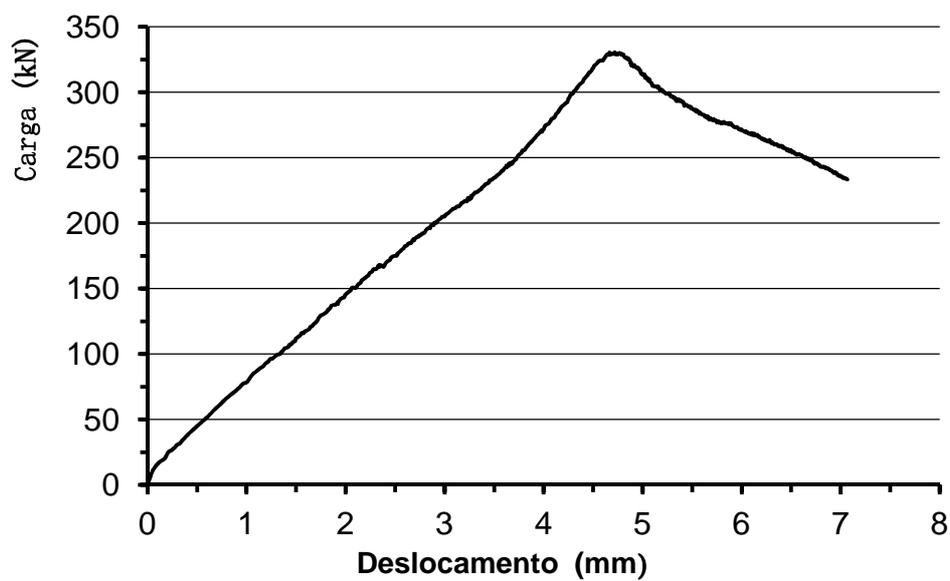


Figura A44 – Curva carga *versus* deslocamento LC\_76x76x6,4\_L1004,5\_1



**Figura A45 – Cantoneira LC\_76x76x6,4\_L1005,5\_1**



**Figura A46 – Curva carga versus deslocamento vertical LC\_76x76x6,4\_L1005,5\_1**

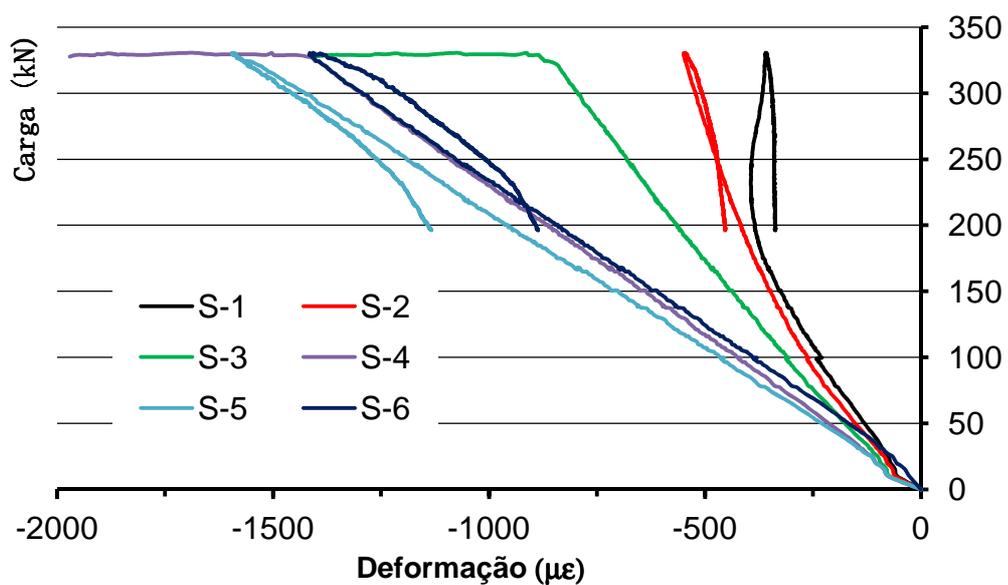


Figura A47 – Curva carga versus deformação LC\_76x76x6,4\_L1005,5\_1

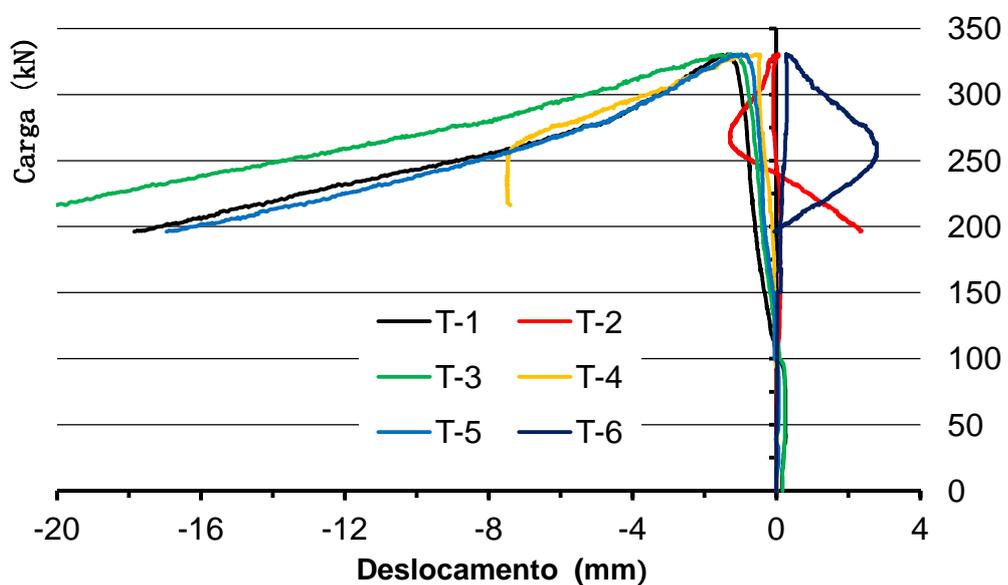


Figura A48 – Curva carga versus deslocamento LC\_76x76x6,4\_L1005,5\_1

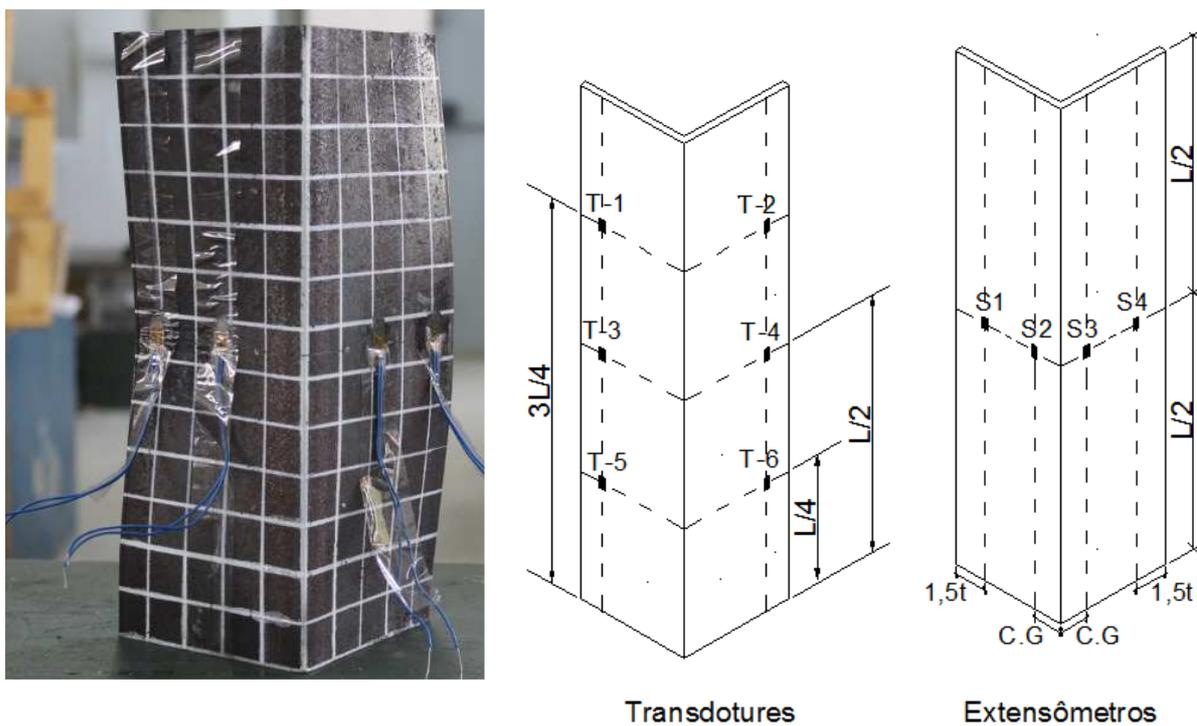


Figura A49 – Cantoneira LC\_102x102x6,4\_L272\_1

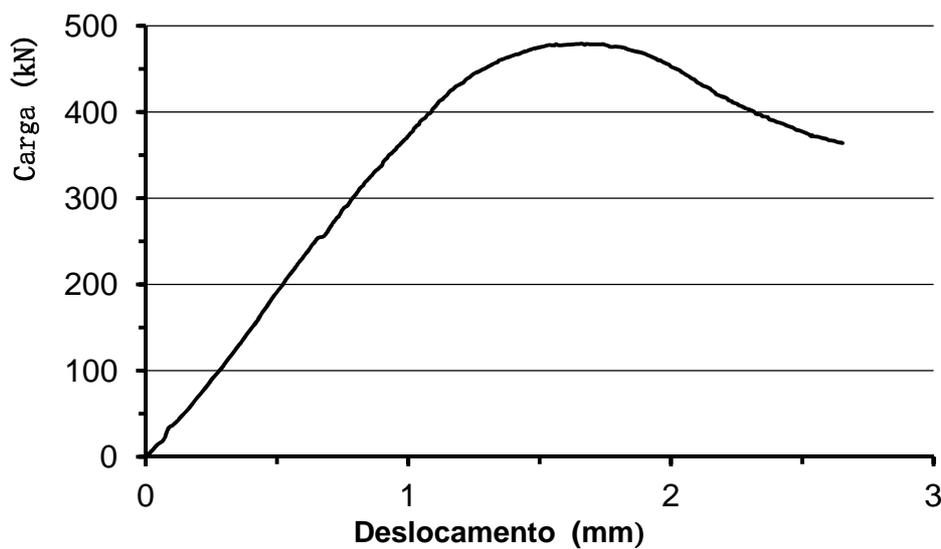


Figura A50 – Curva carga versus deslocamento vertical LC\_102x102x6,4\_L272\_1

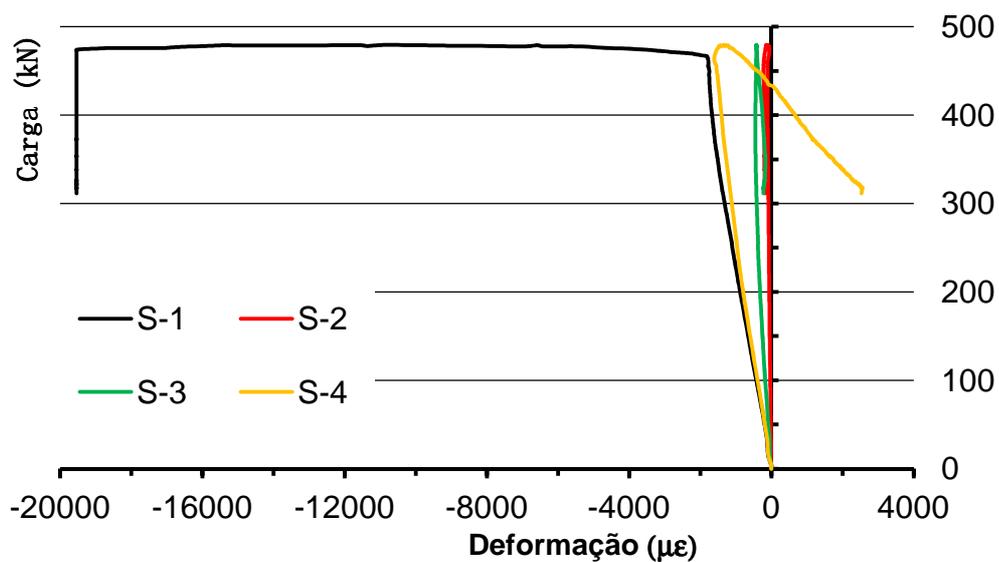


Figura A51 – Curva carga *versus* deformação LC\_102x102x6,4\_L272\_1

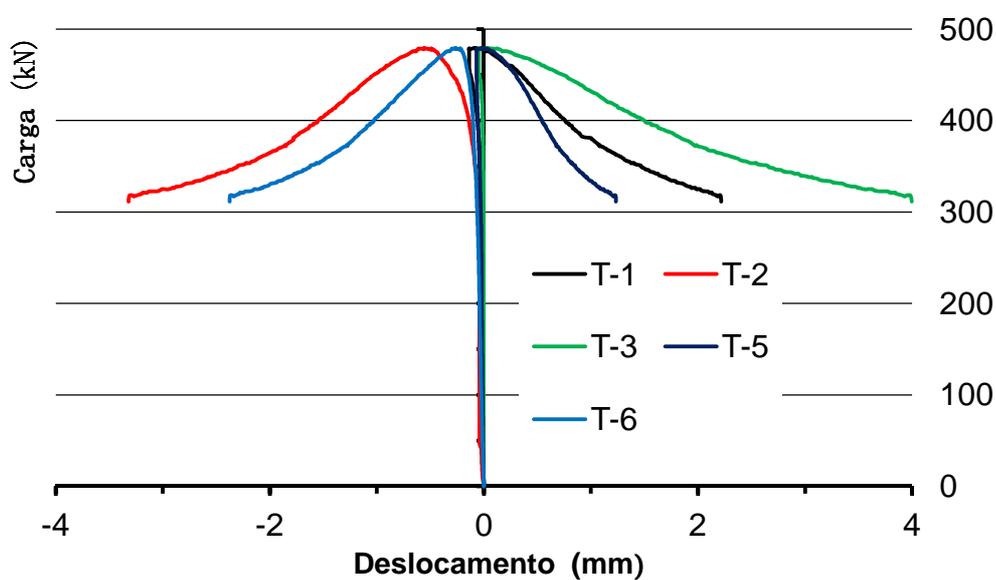


Figura A52 – Curva carga *versus* deslocamento LC\_102x102x6,4\_L272\_1

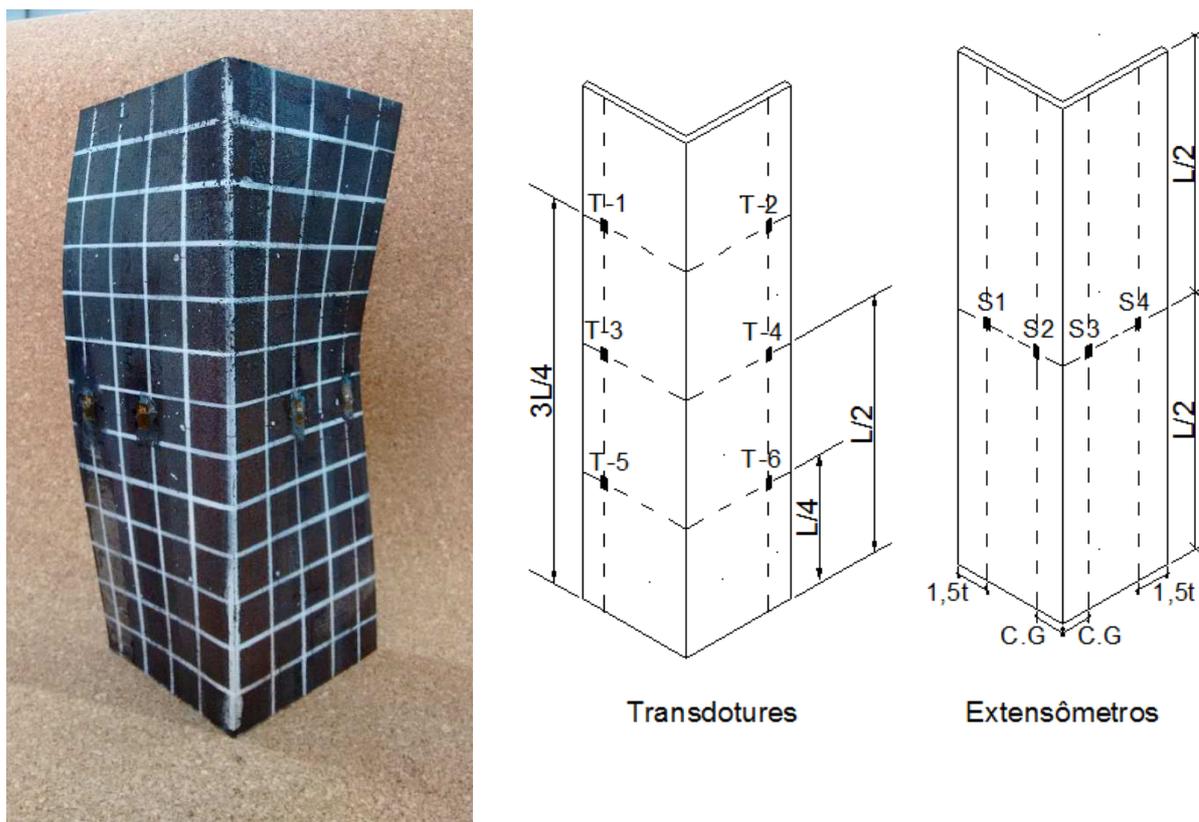


Figura A53 – Cantoneira LC\_102x102x6,4\_L272\_2

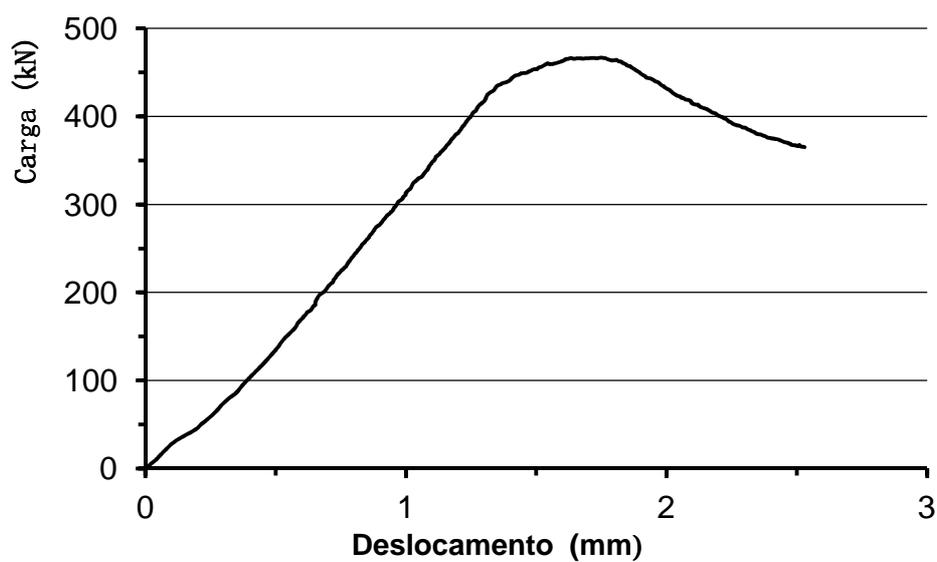


Figura A54 – Curva carga versus deslocamento vertical LC\_102x102x6,4\_L272\_2

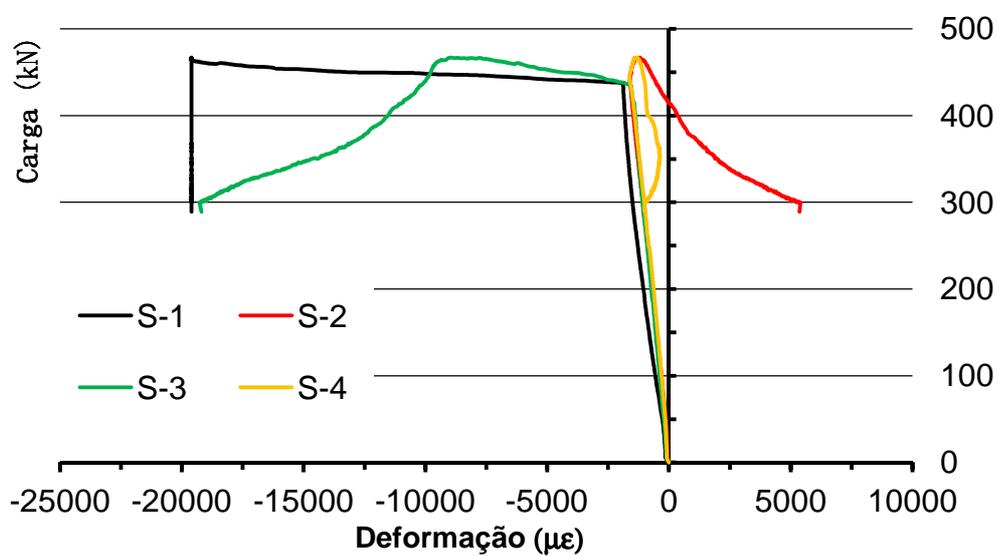


Figura A55 – Curva carga versus deformação LC\_102x102x6,4\_L272\_2

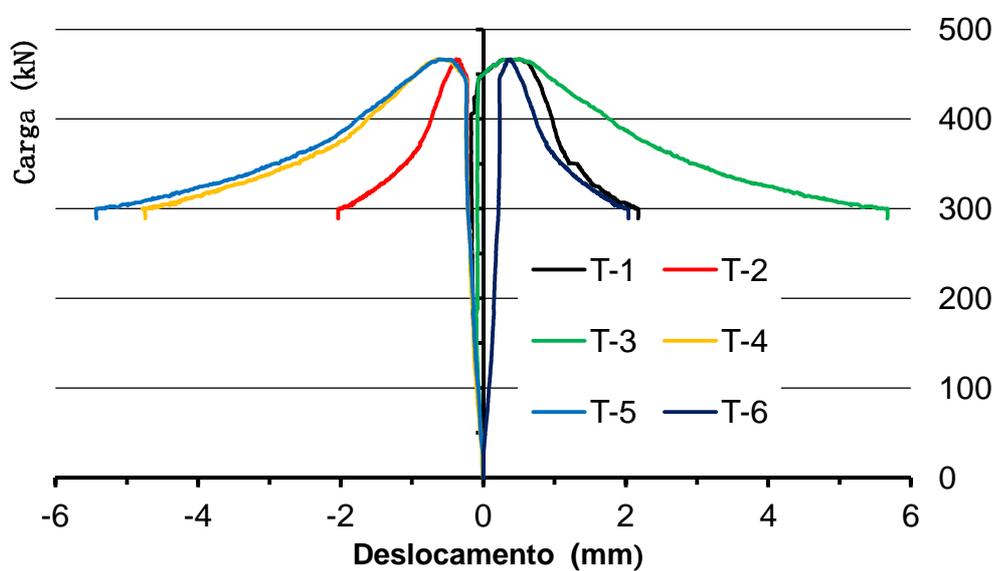


Figura A56 – Curva carga versus deslocamento LC\_102x102x6,4\_L272\_2

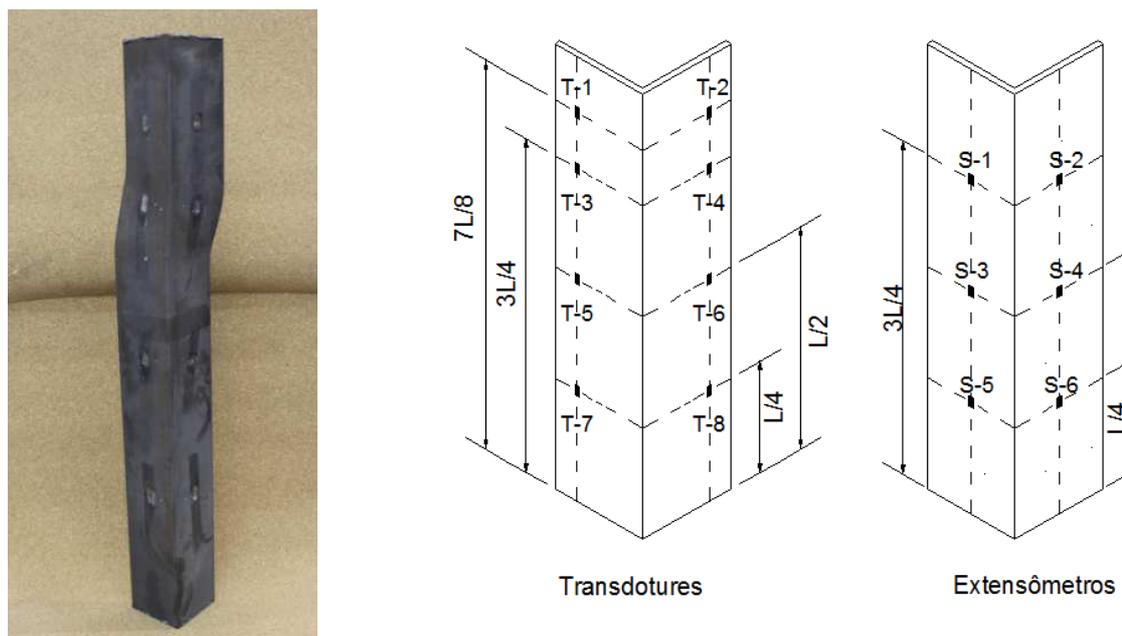


Figura A57 – Cantoneira LC\_102x102x6,4\_L937\_1

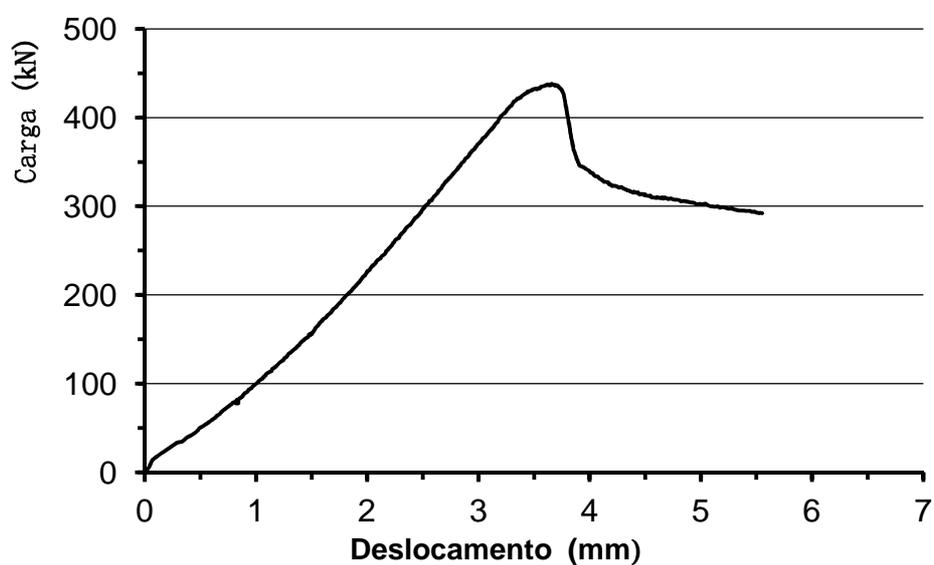


Figura A58 – Curva carga versus deslocamento vertical LC\_102x102x6,4\_L937\_1

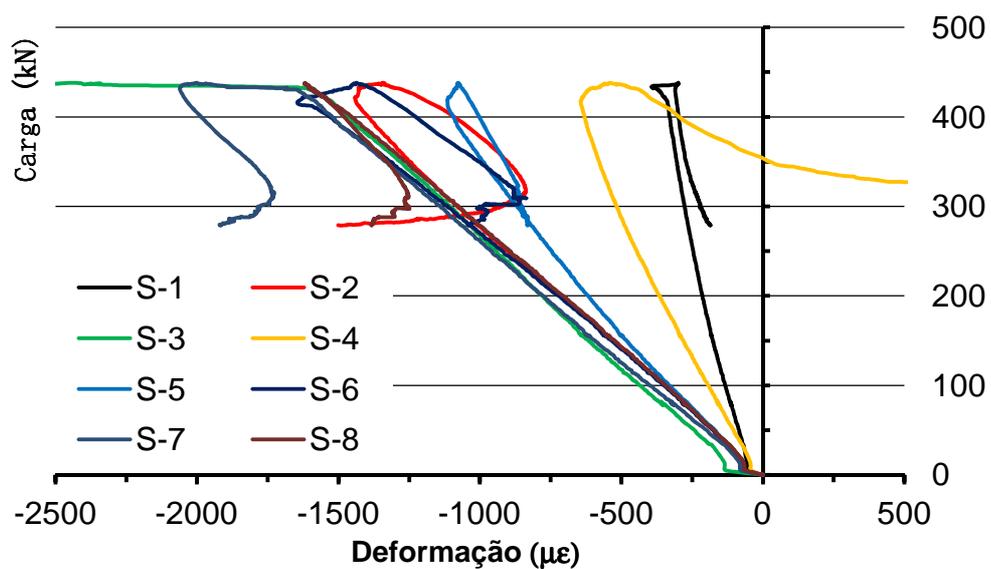


Figura A59 – Curva carga versus deformação LC\_102x102x6,4\_L937\_1

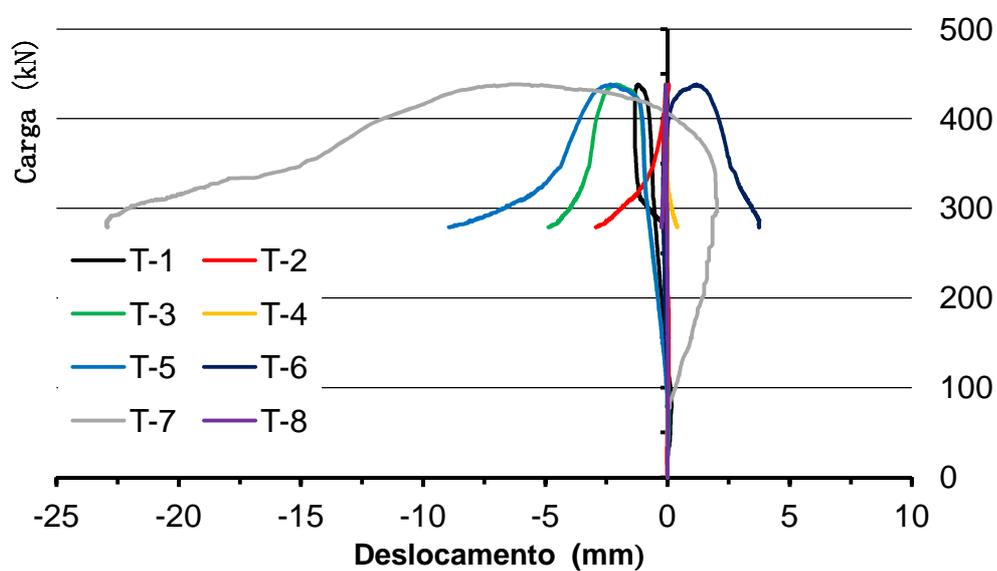


Figura A60 – Curva carga versus deslocamento LC\_102x102x6,4\_L937\_1

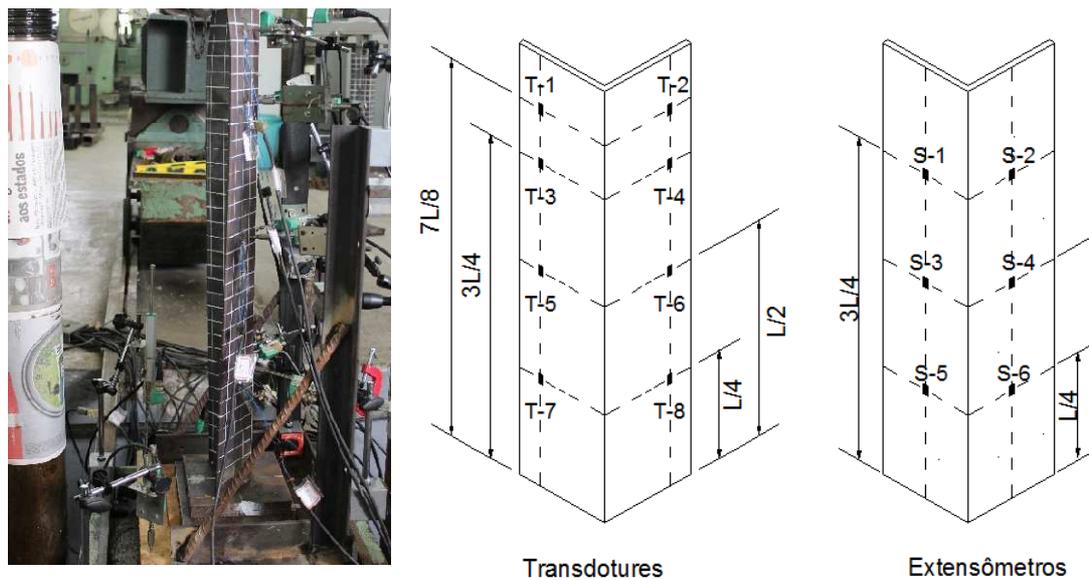


Figura A61 – Cantoneira LC\_102x102x6,4\_L943\_1

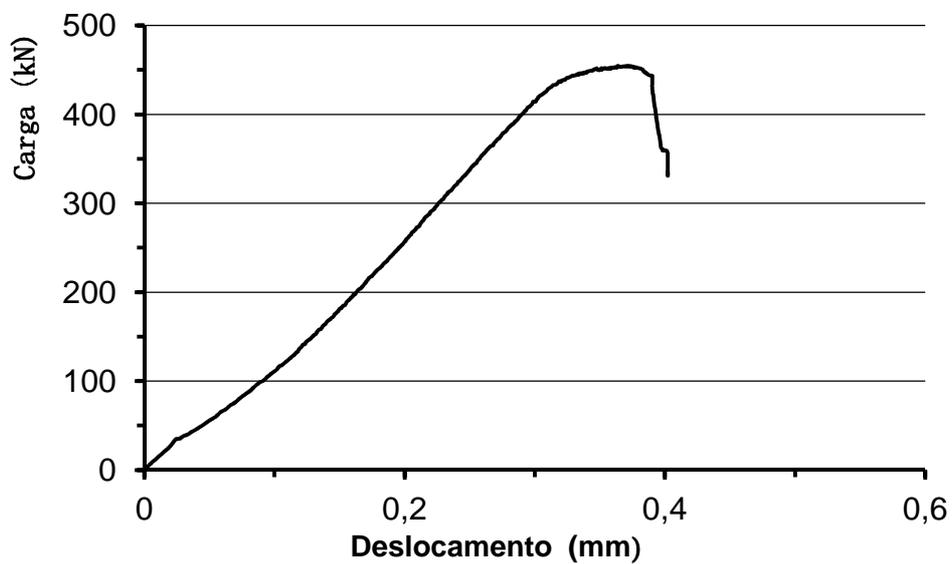


Figura A62 – Curva carga versus deslocamento vertical LC\_102x102x6,4\_L943\_1

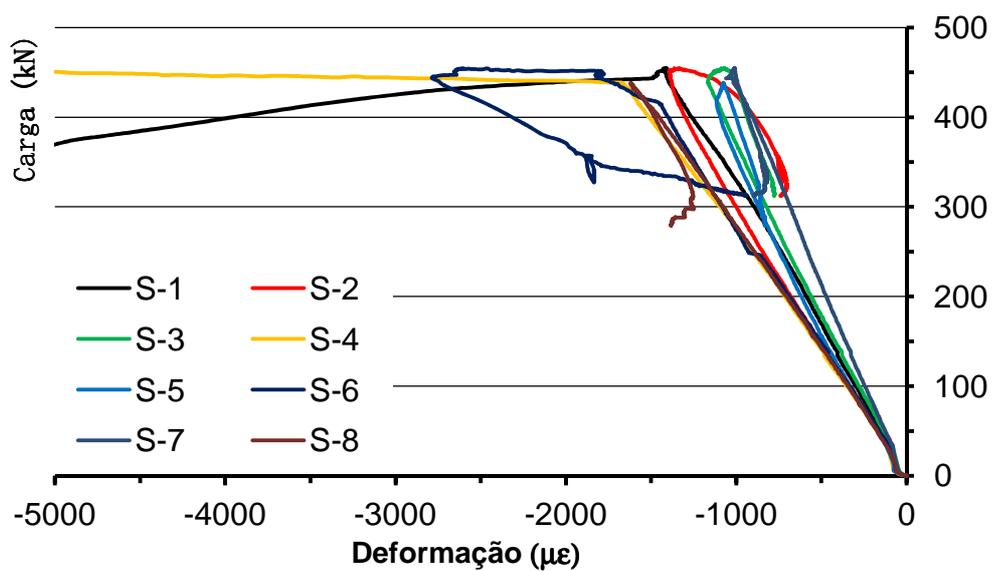


Figura A63 – Curva carga *versus* deformação LC\_102x102x6,4\_L943\_1

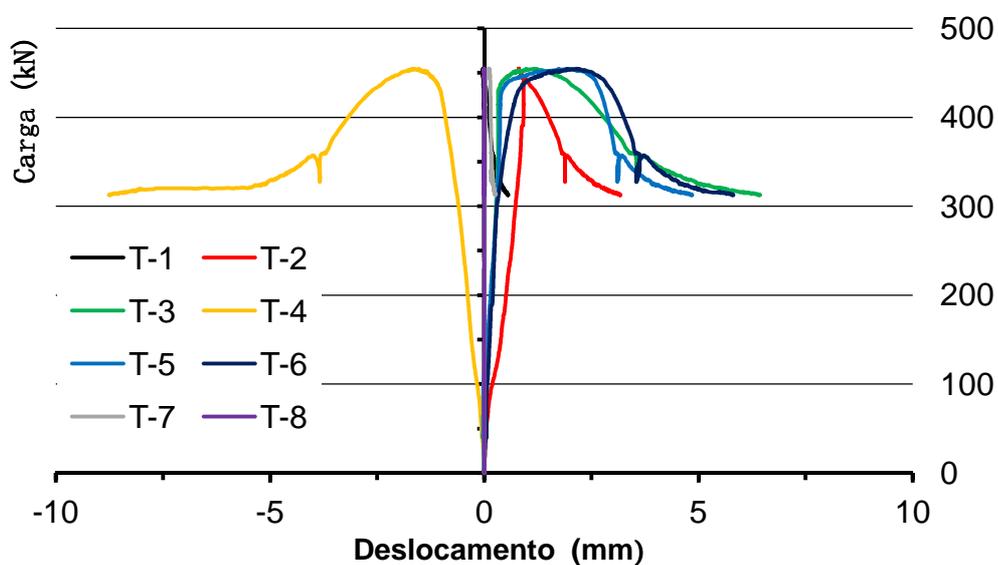


Figura A64 – Curva carga *versus* deslocamento LC\_102x102x6,4\_L943\_1

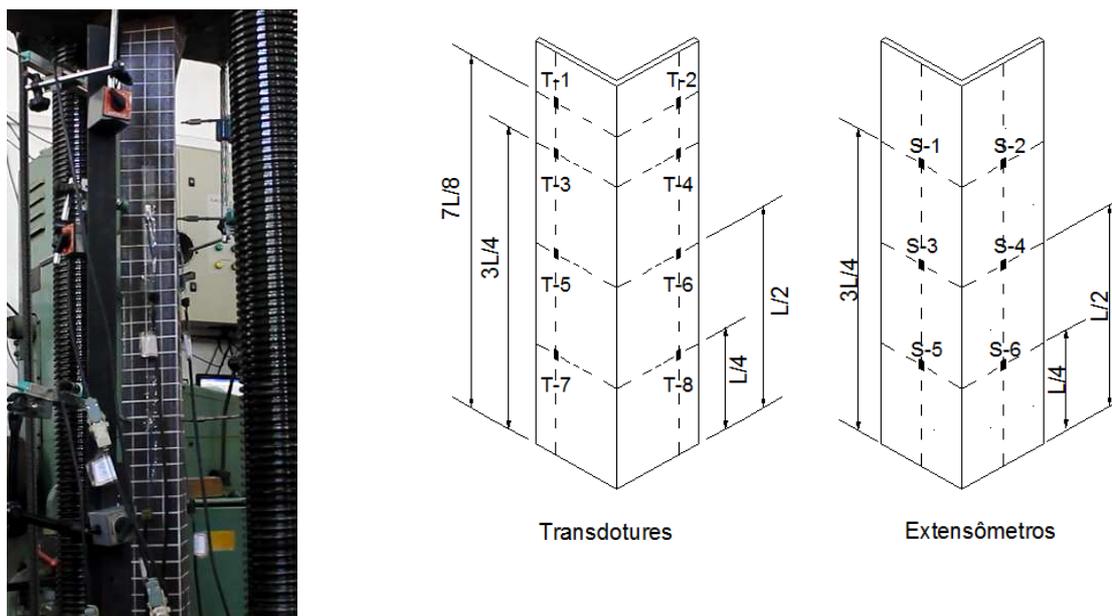


Figura A65 – Cantoneira LC\_102x102x6,4\_L1505\_1

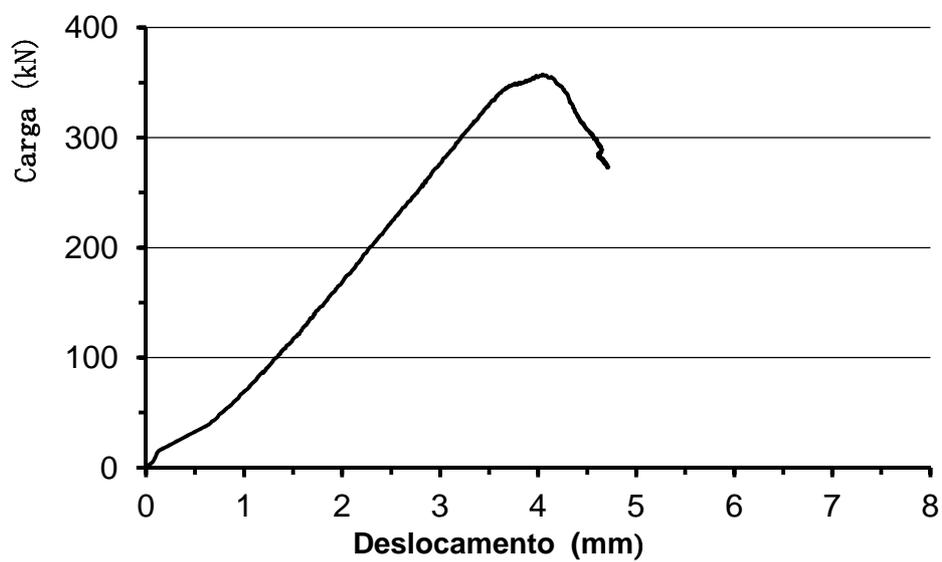


Figura A66 – Curva carga versus deslocamento vertical LC\_102x102x6,4\_L1505\_1

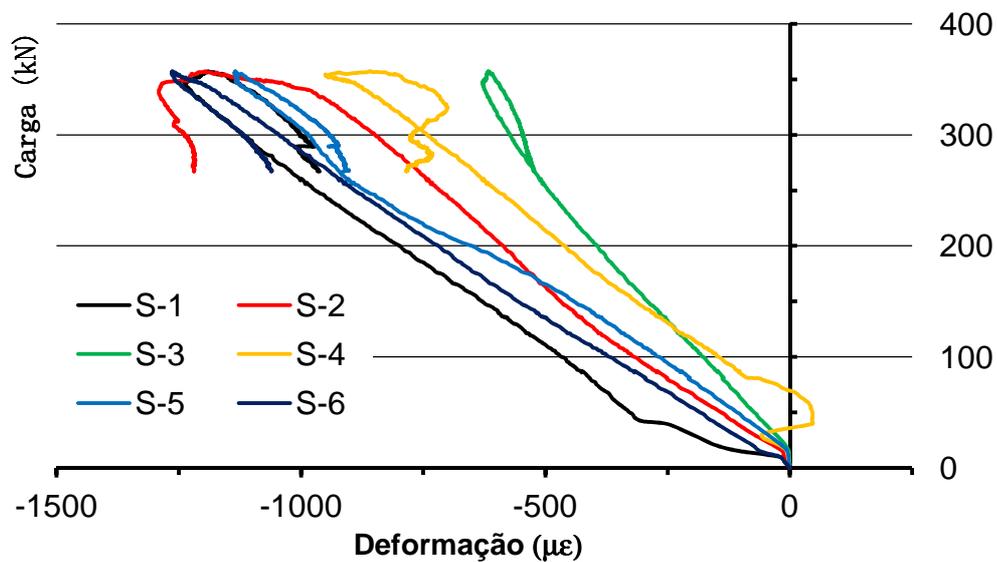


Figura A67 – Curva carga versus deformação LC\_102x102x6,4\_L1505\_1

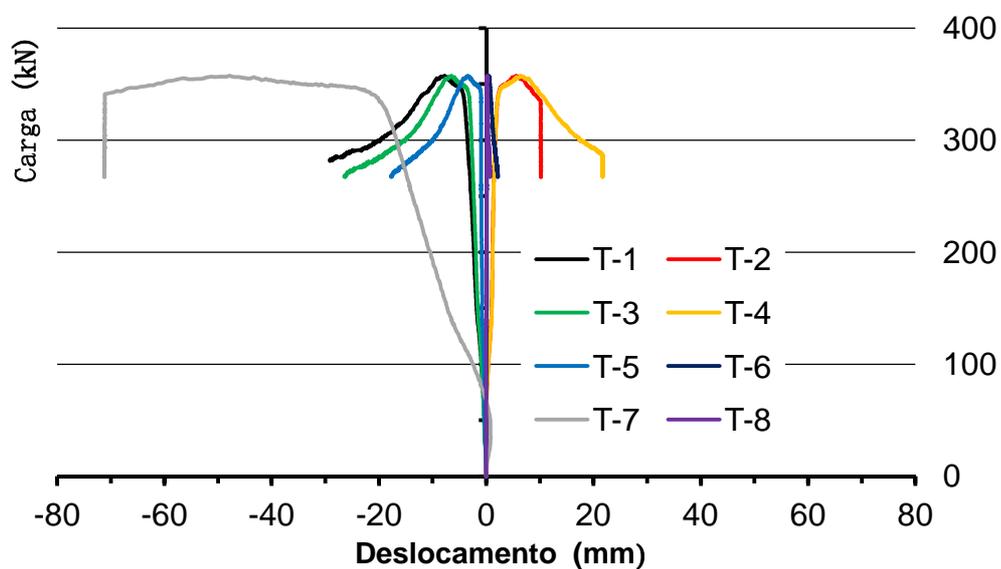


Figura A68 – Curva carga versus deslocamento LC\_102x102x6,4\_L1505\_1

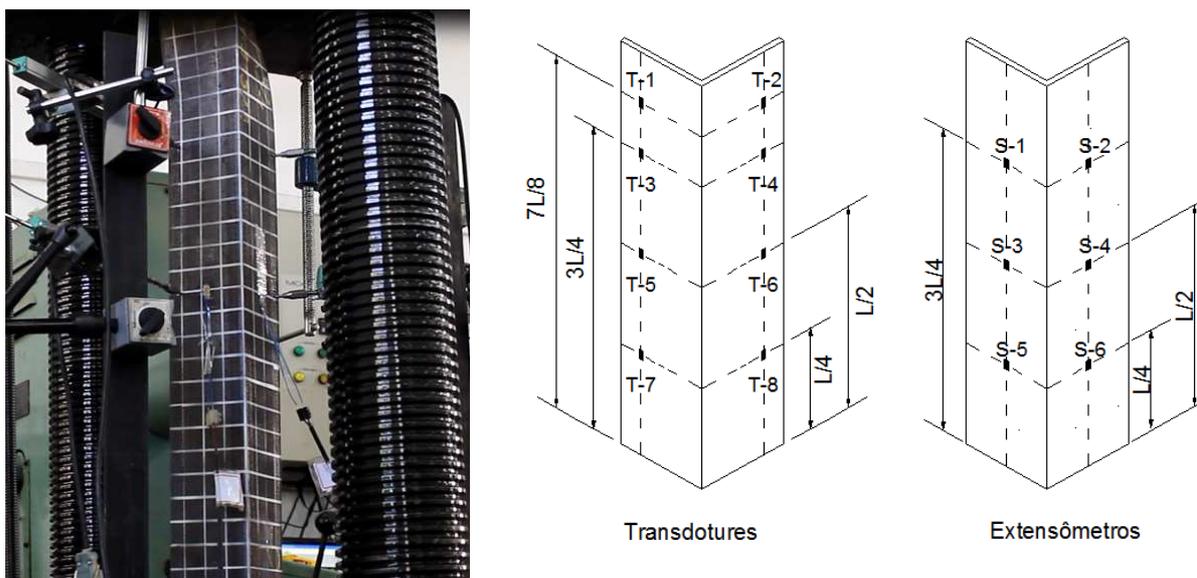


Figura A69 – Cantoneira LC\_102x102x6,4\_L1517\_1

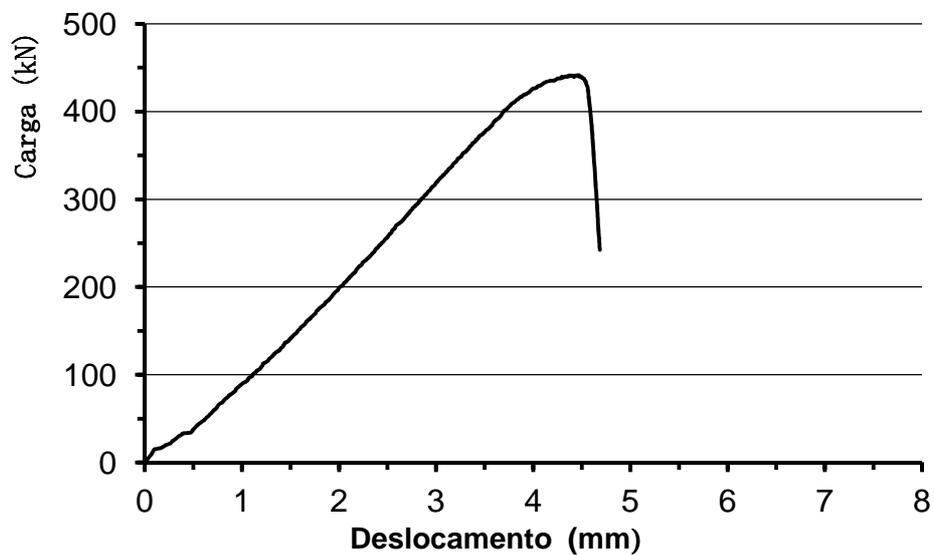


Figura A70 – Curva carga versus deslocamento vertical LC\_102x102x6,4\_L1517\_1

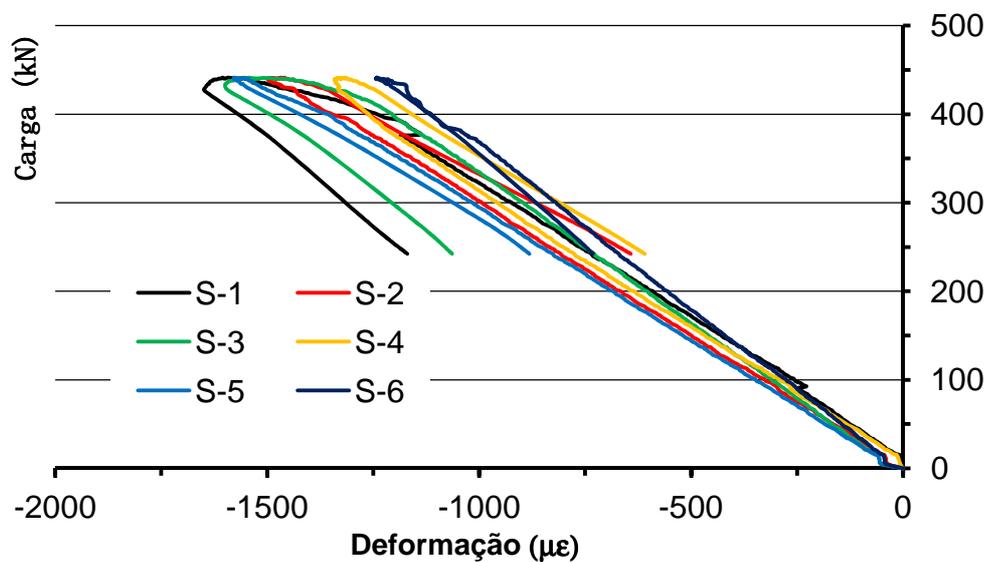


Figura A71 – Curva carga versus deformação LC\_102x102x6,4\_L1517\_1

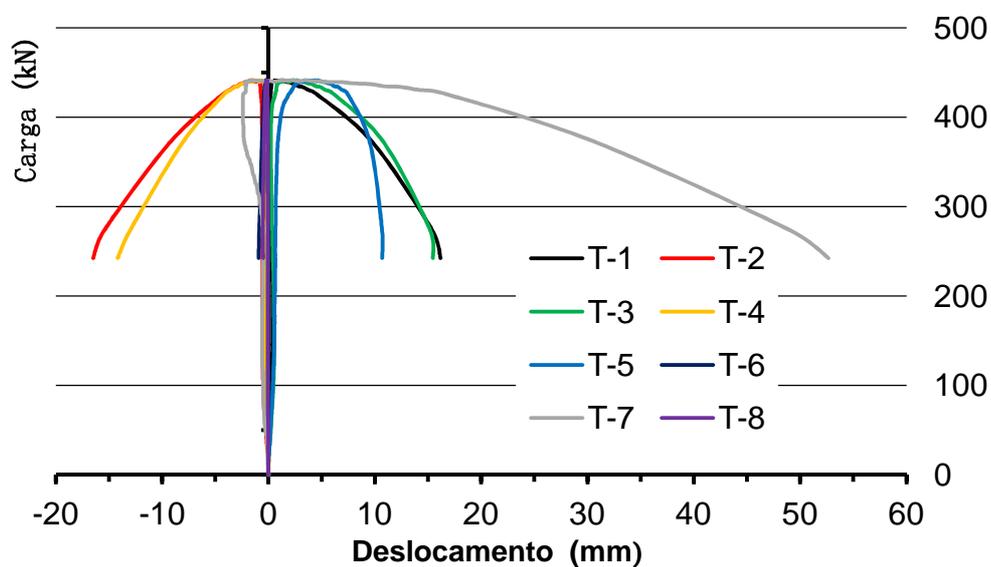


Figura A72 – Curva carga versus deslocamento LC\_102x102x6,4\_L1517\_1

## ANEXO B

Este anexo apresenta as medições feitas no programa de ensaios experimentais para as cantoneiras laminadas em aço inoxidável que não foram apresentadas no desenvolvimento desta tese.

**Tabela 23 – Cantoneiras laminadas em aço inoxidável com os seus respectivos modos de falhas de correntes dos ensaios**

Cantoneira	Comprimento mm	Modo de Falha (Ensaio)
LSS_64x64x4,8	250,0	Local
	250,0	Local
	500,0	Flexo-Torção
	500,0	Flexo-torção
	1000,0	Flexo-torção
	1000,0	Flexo-torção
	1470,0	Flexão
LSS_76x76x6,4	152,0	Local
	496,0	Flexo-torção
	753,0	Flexo-torção
	990,0	Flexo-torção
	1196,0	Flexo-torção
	1410,0	Flexão
LSS_102x102x6,4	203,0	Local
	407,0	Flexo-torção
	998,0	Flexo-torção
	1480,0	Flexo-torção
	1893,0	Flexão

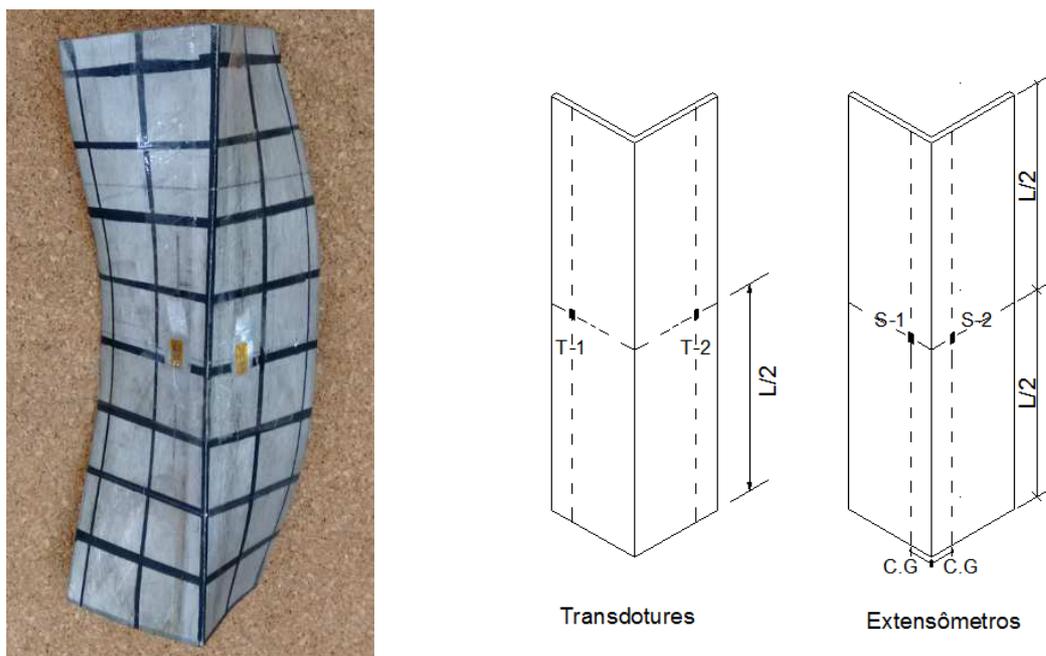


Figura B1 – Cantoneira LSS\_64x64x4,8\_L246\_1

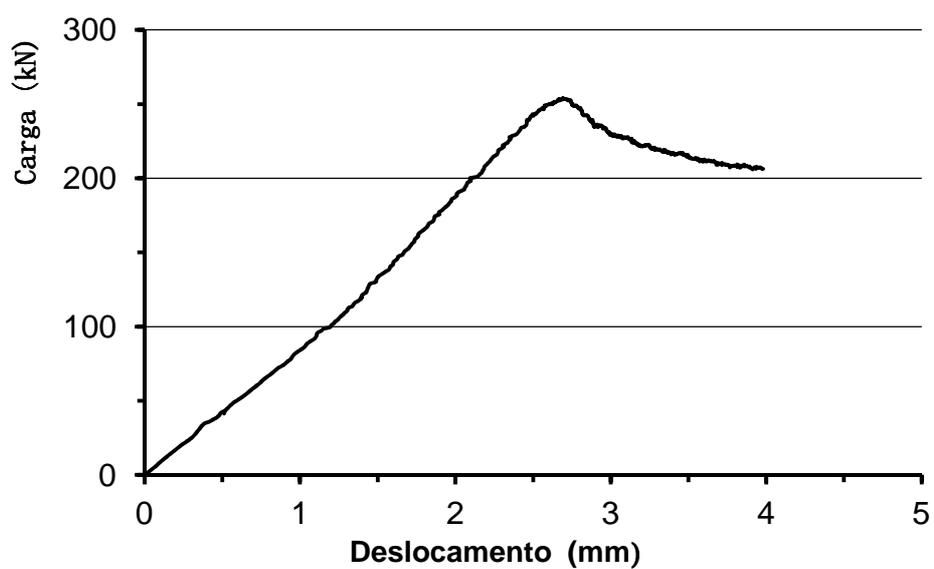


Figura B2 – Curva carga versus deslocamento vertical LSS\_64x64x4,8\_L246\_1

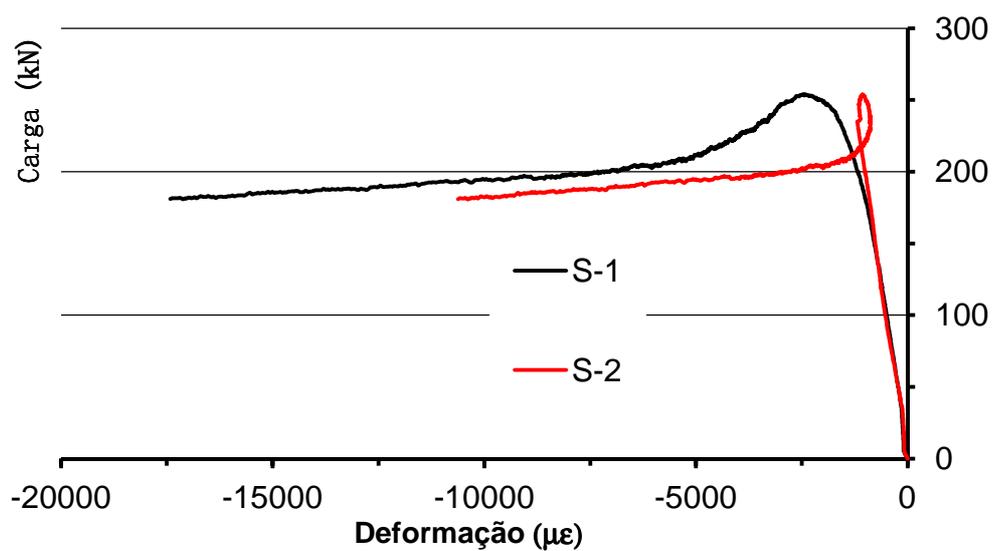


Figura B3 – Curva carga versus deformação LSS\_64x64x4,8\_L246\_1

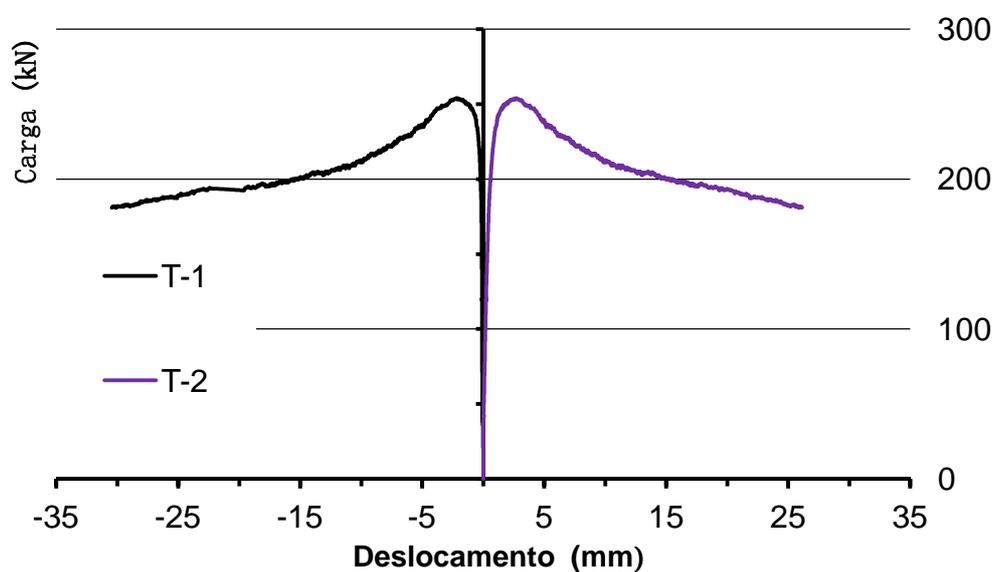


Figura B4 – Curva carga versus deslocamentos LSS\_64x64x4,8\_L246\_1

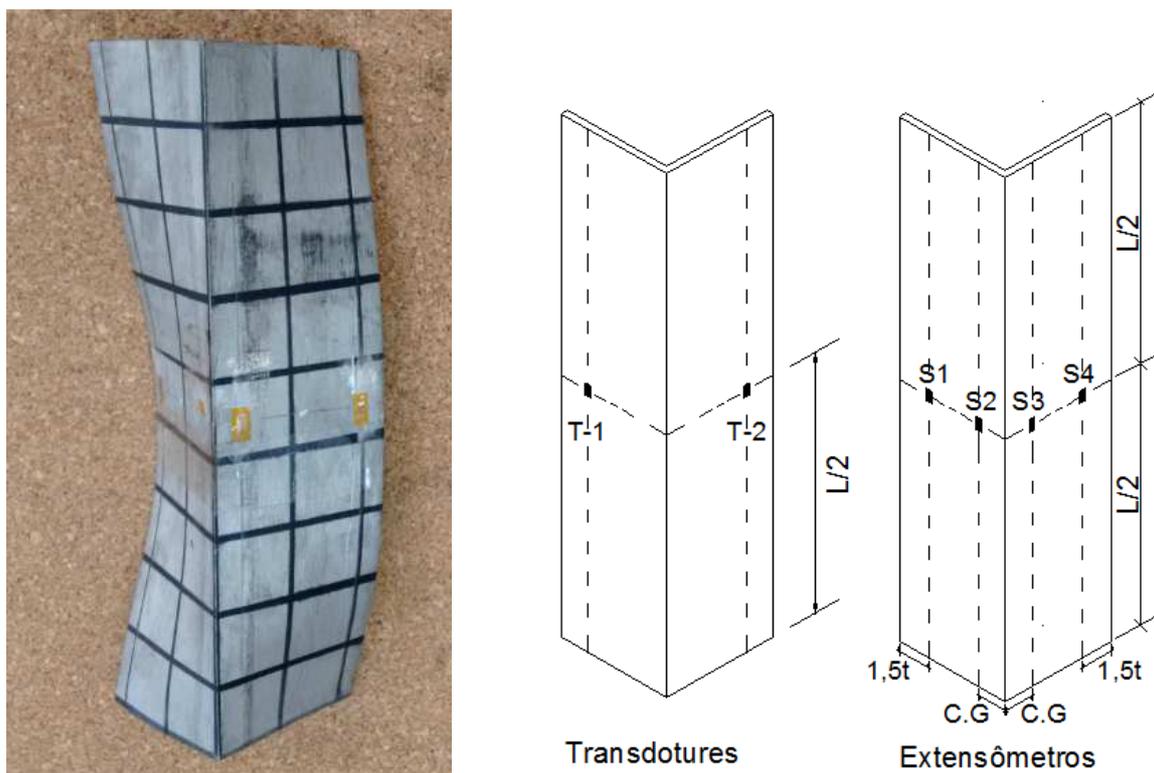


Figura B5 – Cantoneira LSS\_64x64x4,8\_L252\_1

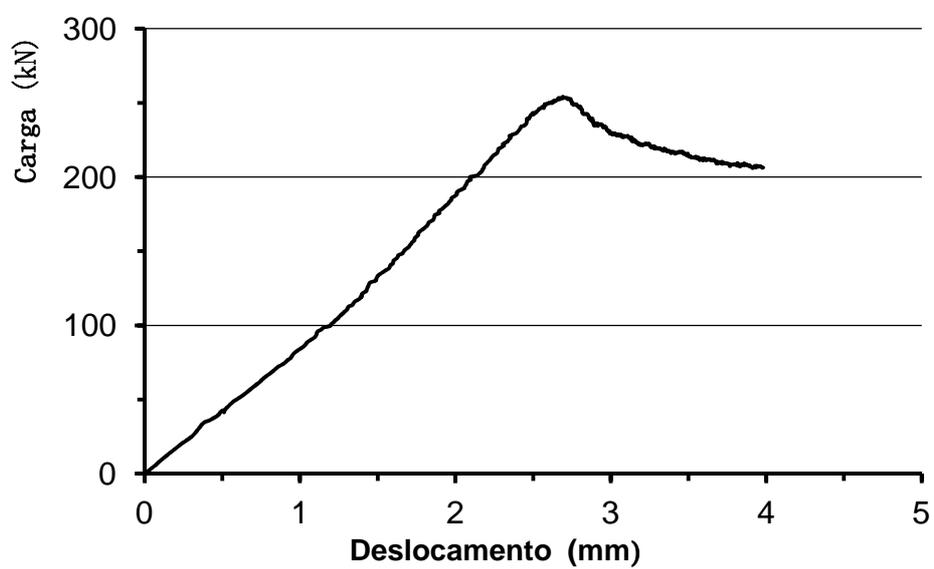


Figura B6 – Curva carga versus deslocamento vertical LSS\_64x64x4,8\_L252\_1

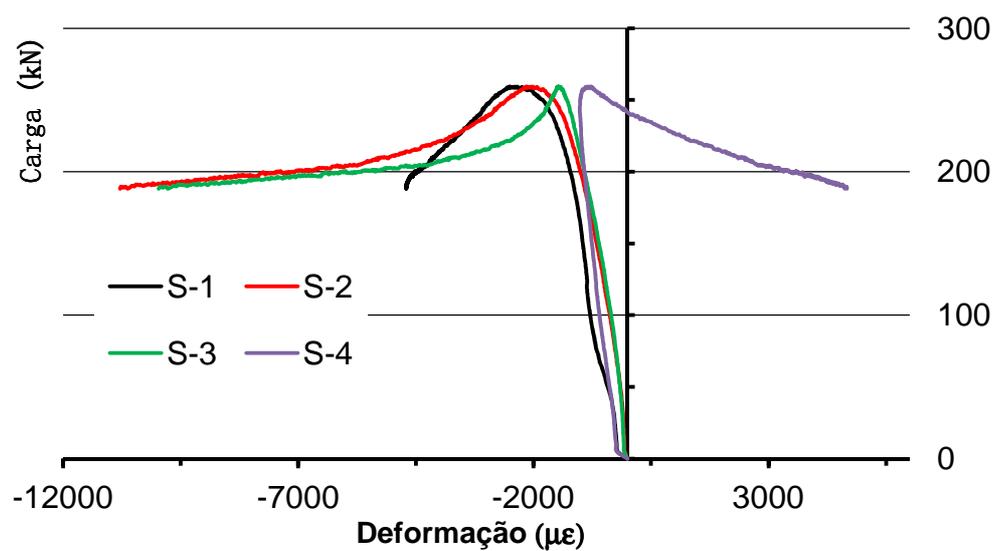


Figura B7 – Curva carga versus deformação LSS\_64x64x4,8\_L252\_1

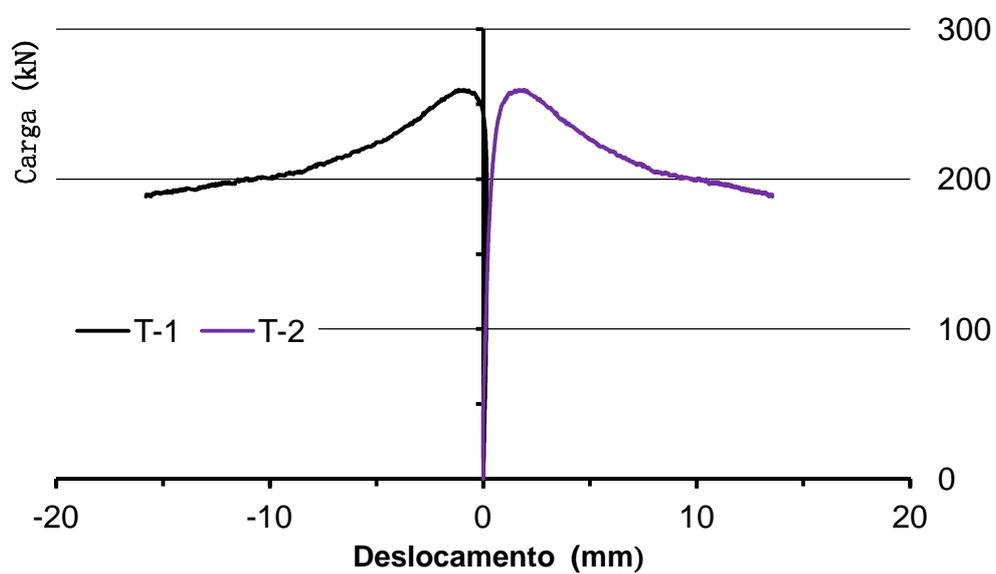


Figura B8 – Curva carga versus deslocamentos LSS\_64x64x4,8\_L252\_1

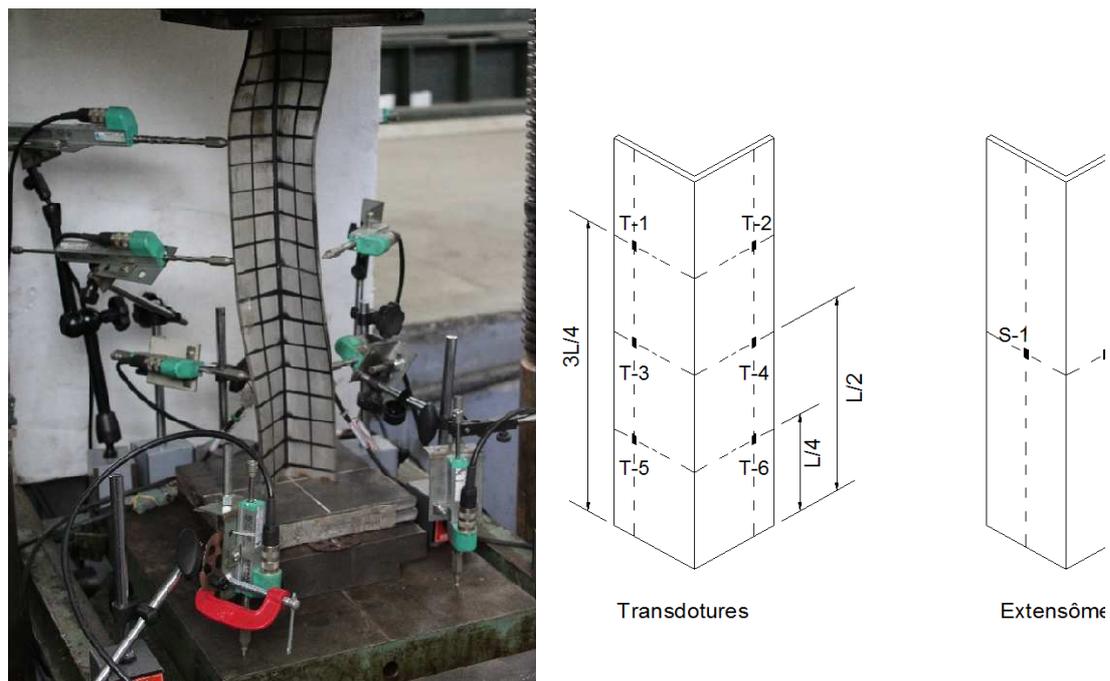


Figura B9 – Cantoneira LSS\_64x64x4,8\_L500\_1

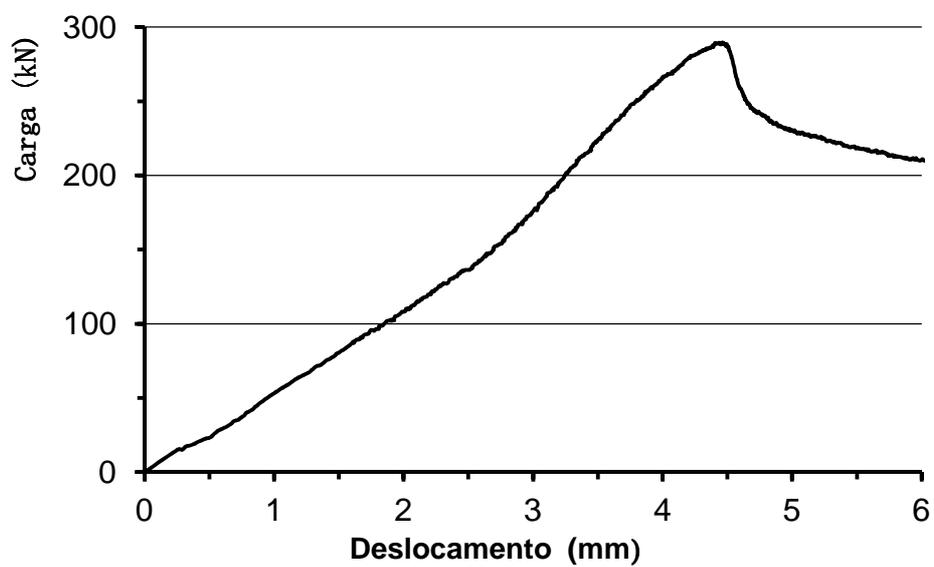


Figura B10 – Curva carga versus deslocamento vertical LSS\_64x64x4,8\_L500\_1

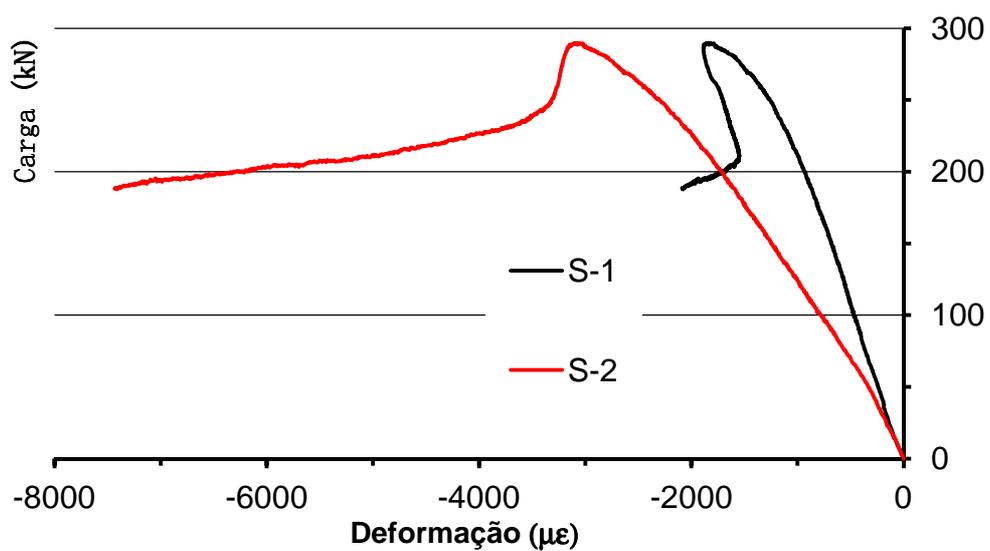


Figura B11 – Curva carga versus deformação LSS\_64x64x4,8\_L500\_1

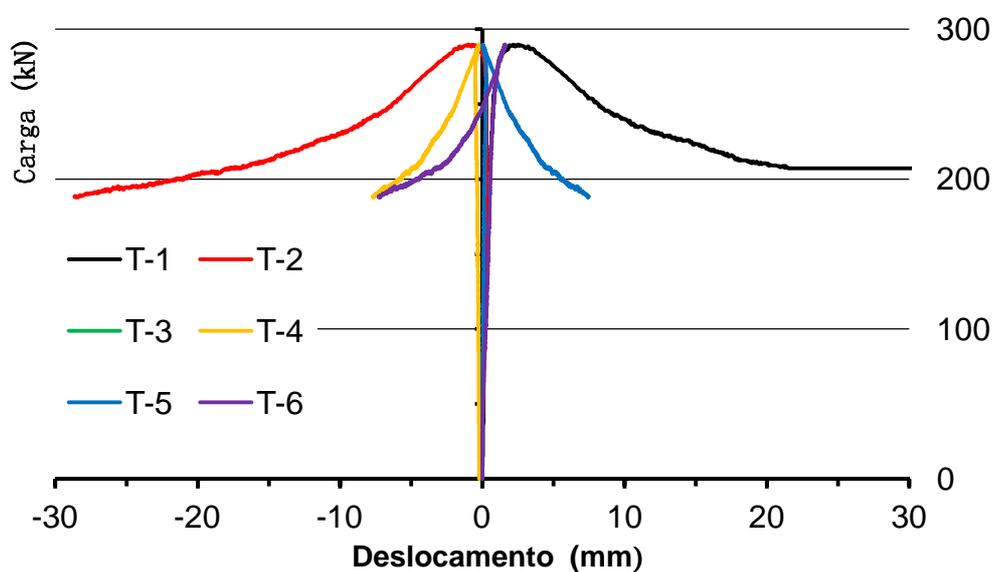


Figura B12 – Curva carga versus deslocamentos LSS\_64x64x4,8\_L500\_1

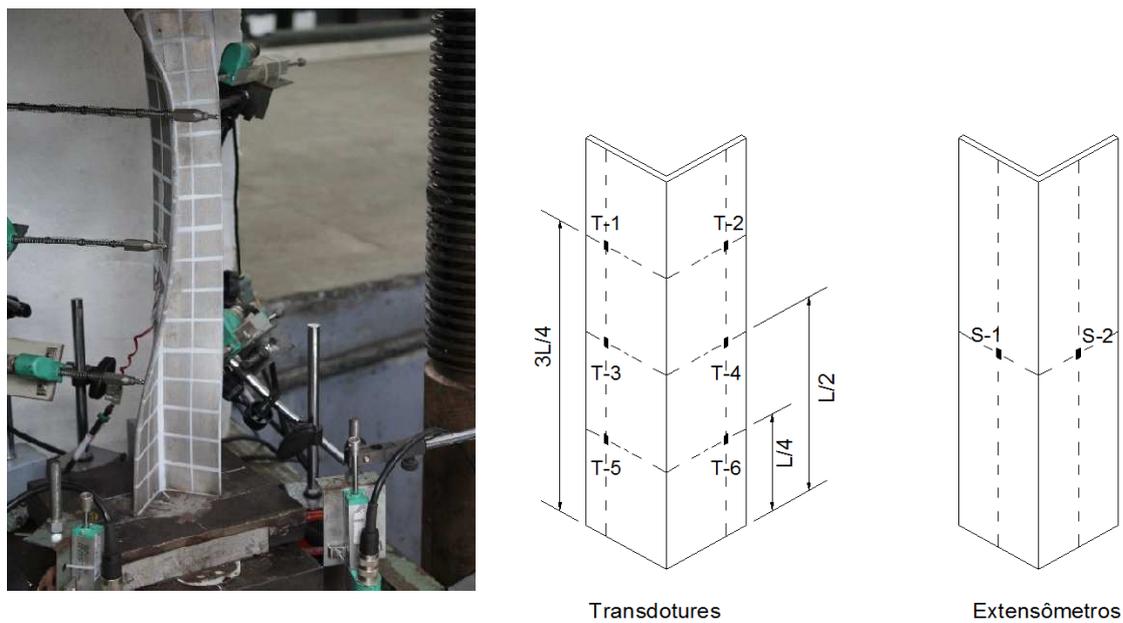


Figura B13 – Cantoneira LSS\_64x64x4,8\_L500\_2

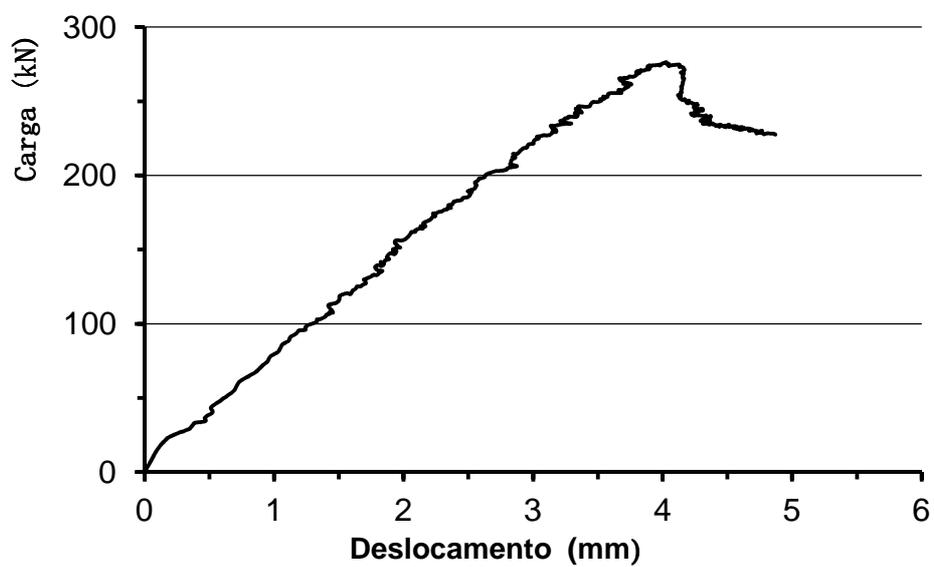


Figura B14 – Curva carga *versus* deslocamento vertical LSS\_64x64x4,8\_L500\_2

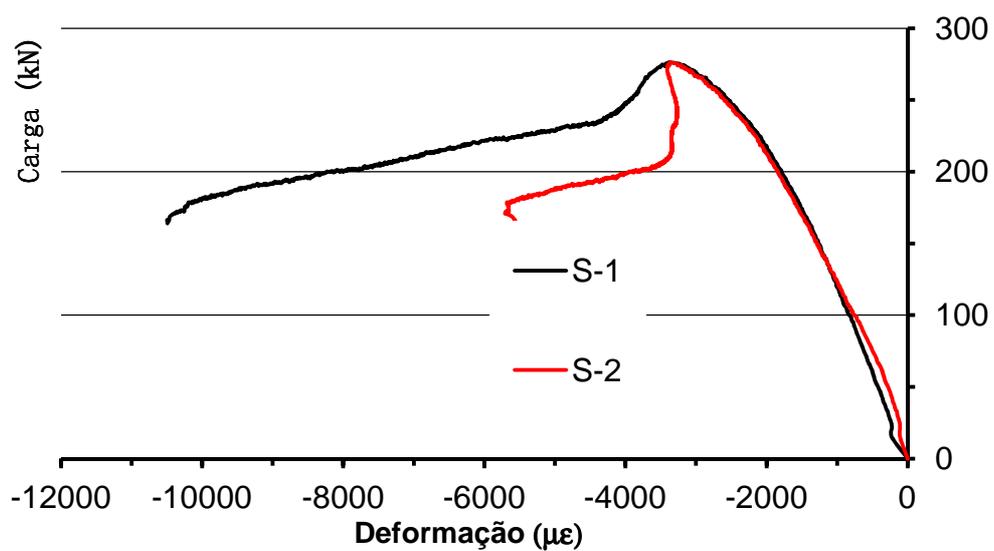


Figura B15 – Curva carga versus deformação LSS\_64x64x4,8\_L500\_2

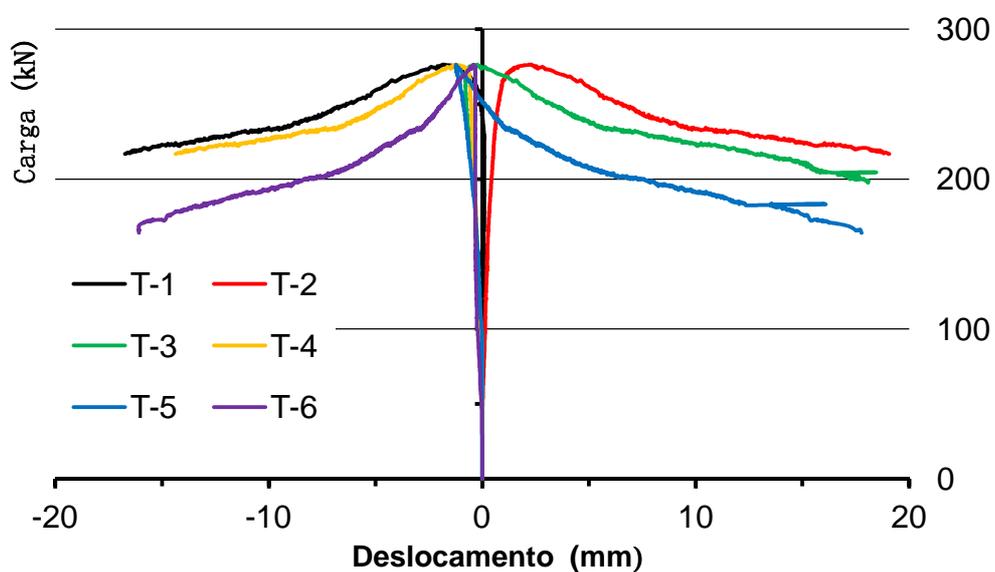


Figura B16 – Curva carga versus deslocamentos LSS\_64x64x4,8\_L500\_2

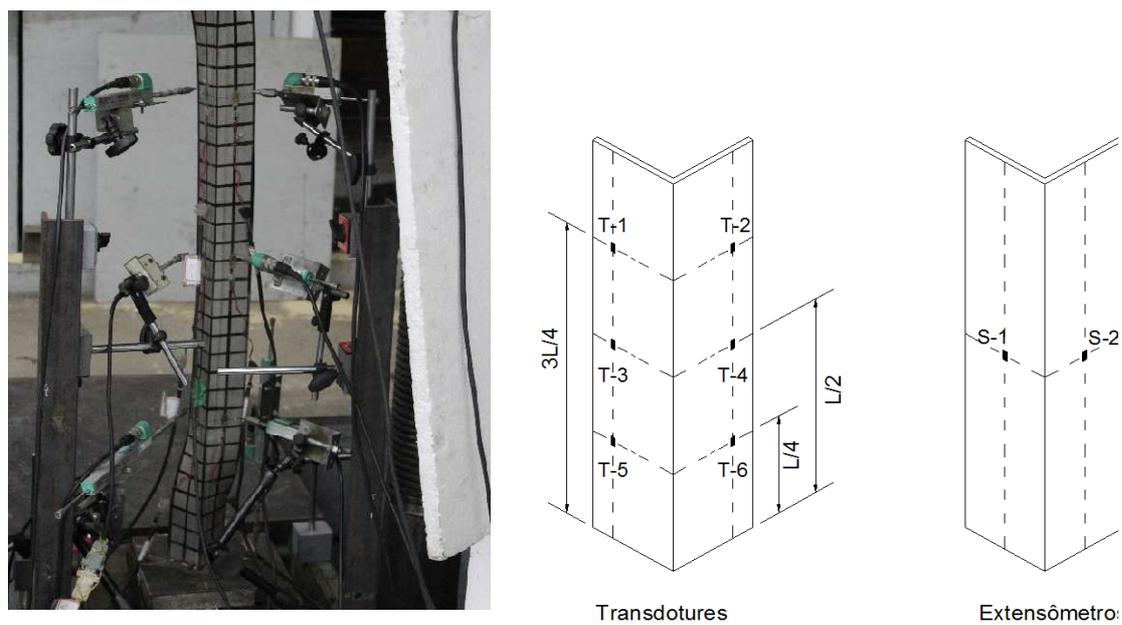


Figura B17 – Cantoneira LSS\_64x64x4,8\_L998\_1

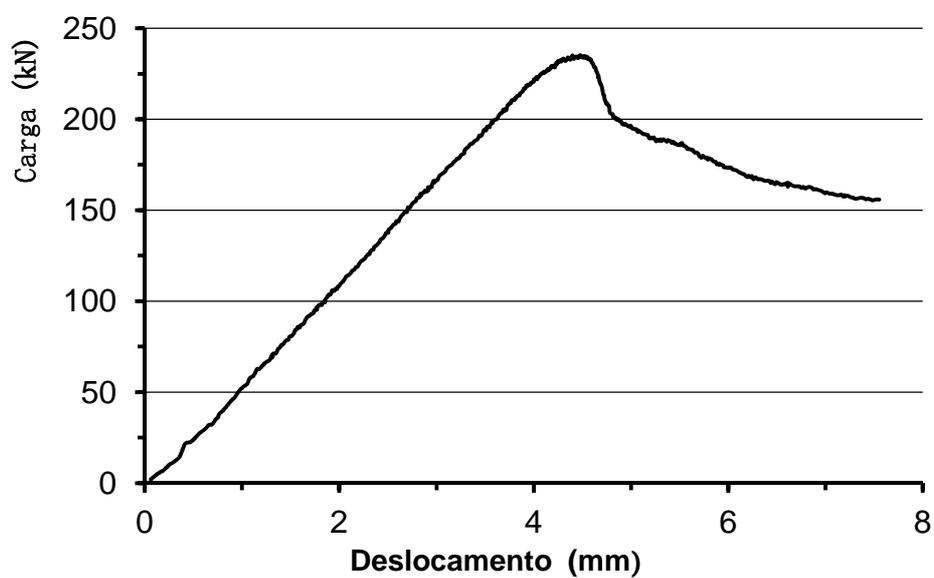


Figura B18 – Curva carga versus deslocamento vertical LSS\_64x64x4,8\_L998\_1

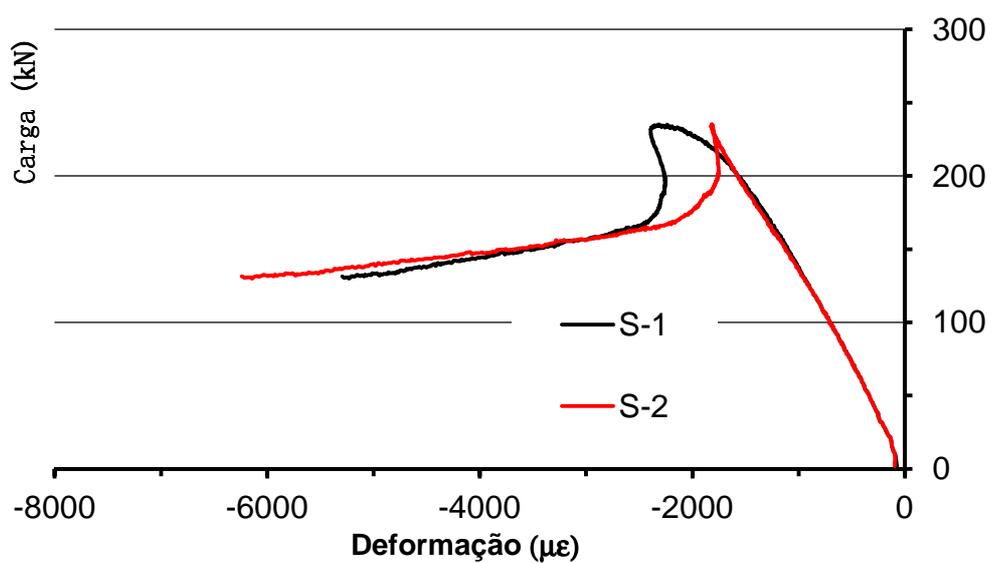


Figura B19 – Curva carga *versus* deformação LSS\_64x64x4,8\_L998\_1

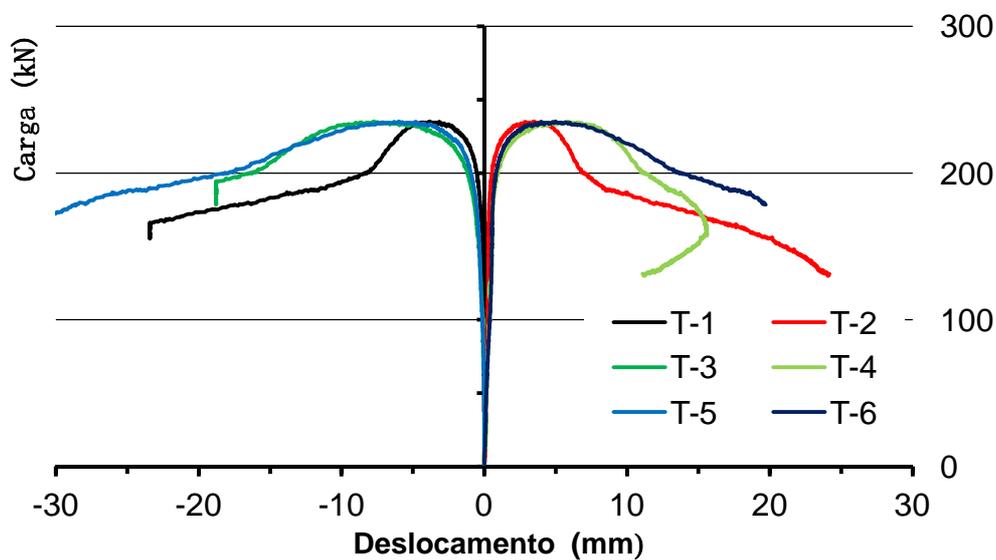


Figura B20 – Curva carga *versus* deslocamentos LSS\_64x64x4,8\_L998\_1

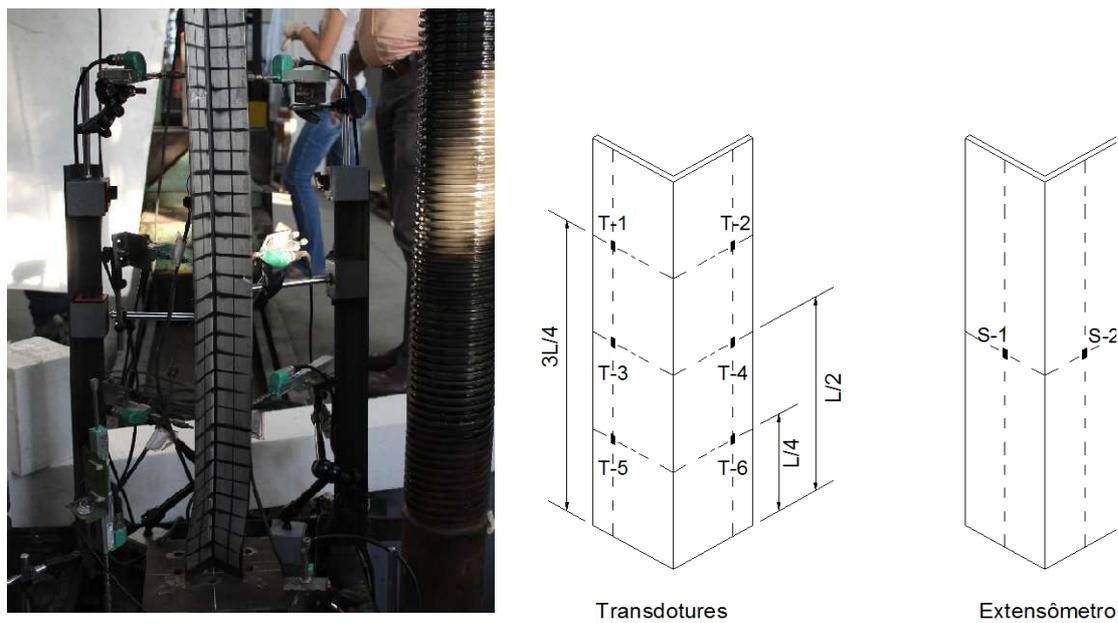


Figura B21 – Cantoneira LSS\_64x64x4,8\_L1000\_1

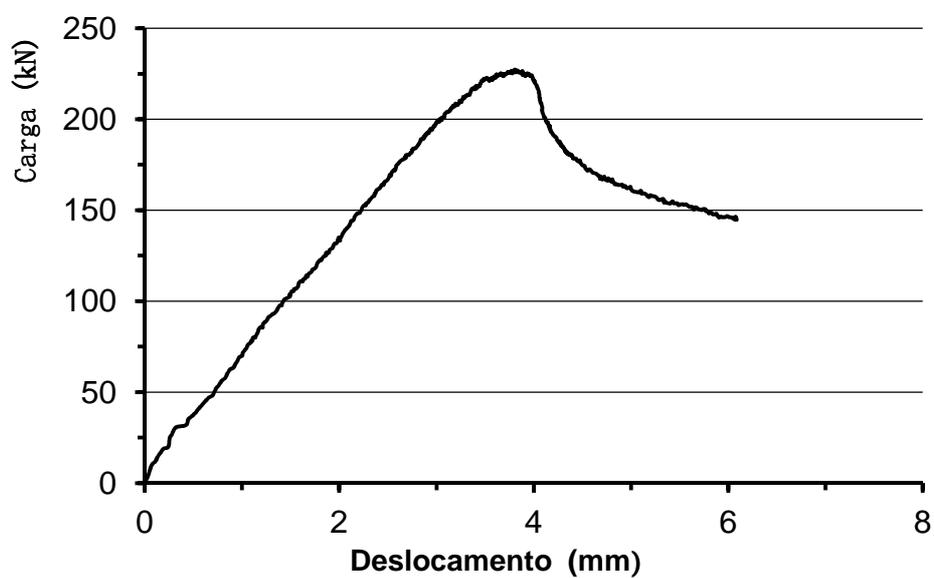


Figura B22 – Curva carga versus deslocamento vertical LSS\_64x64x4,8\_L1000\_1

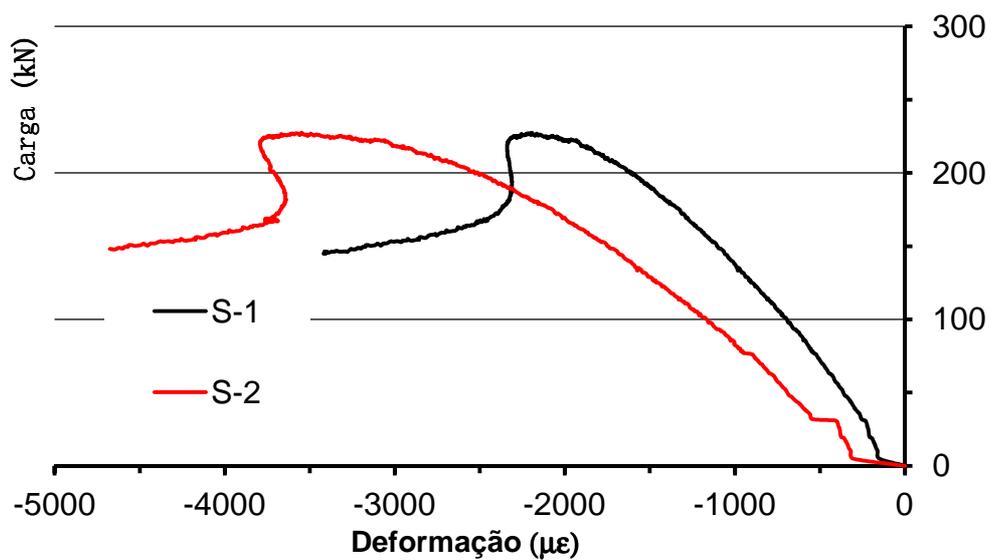


Figura B23 – Curva carga versus deformação LSS\_64x64x4,8\_L1000\_1

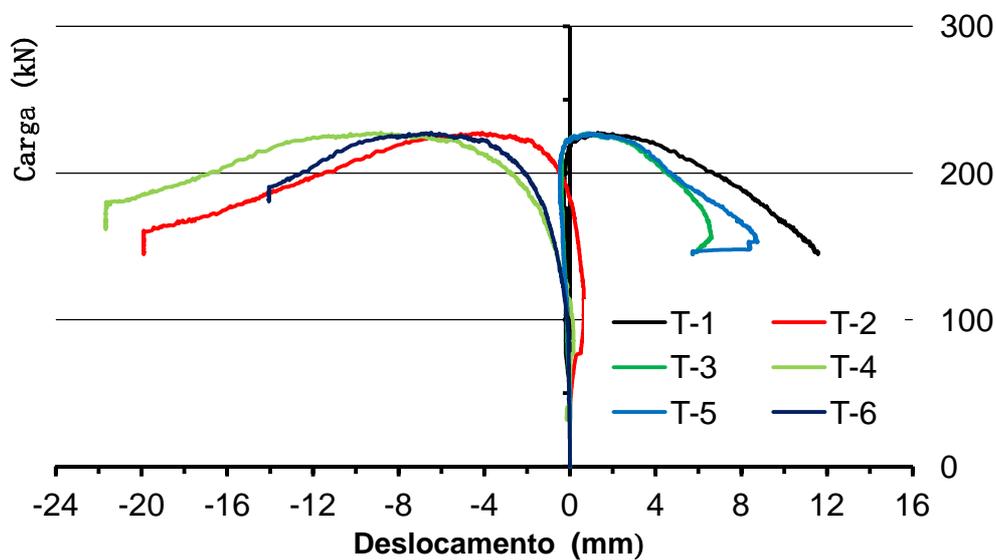


Figura B24 – Curva carga versus deslocamentos LSS\_64x64x4,8\_L1000\_1

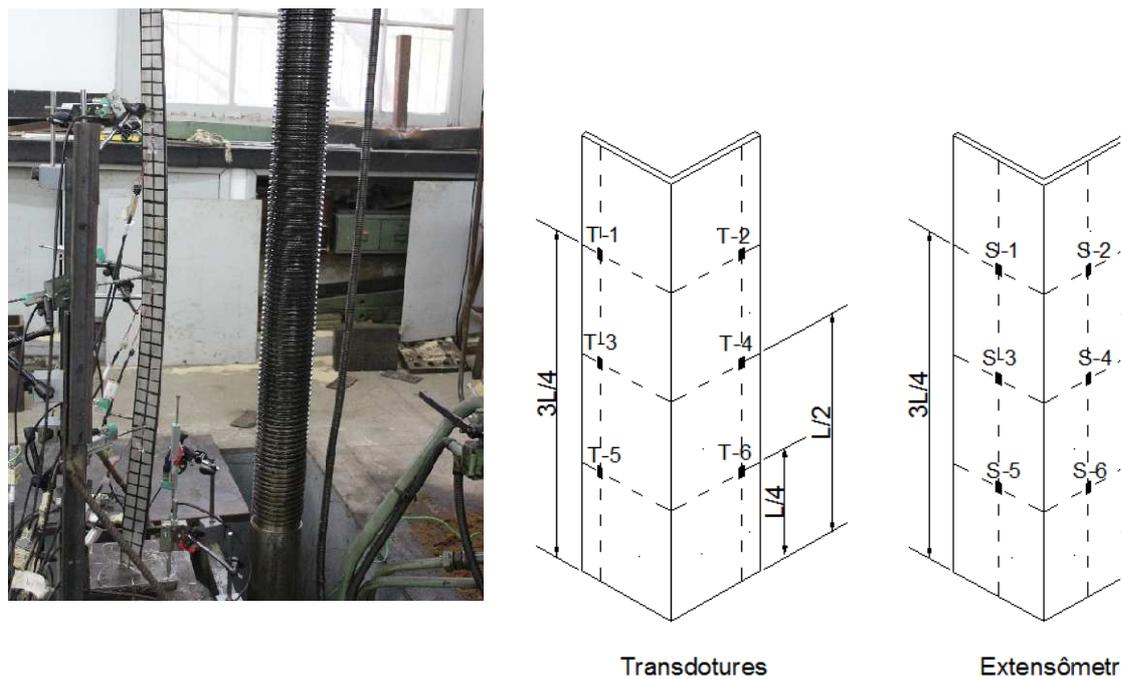


Figura B25 – Cantoneira LSS\_64x64x4,8\_L1470\_1

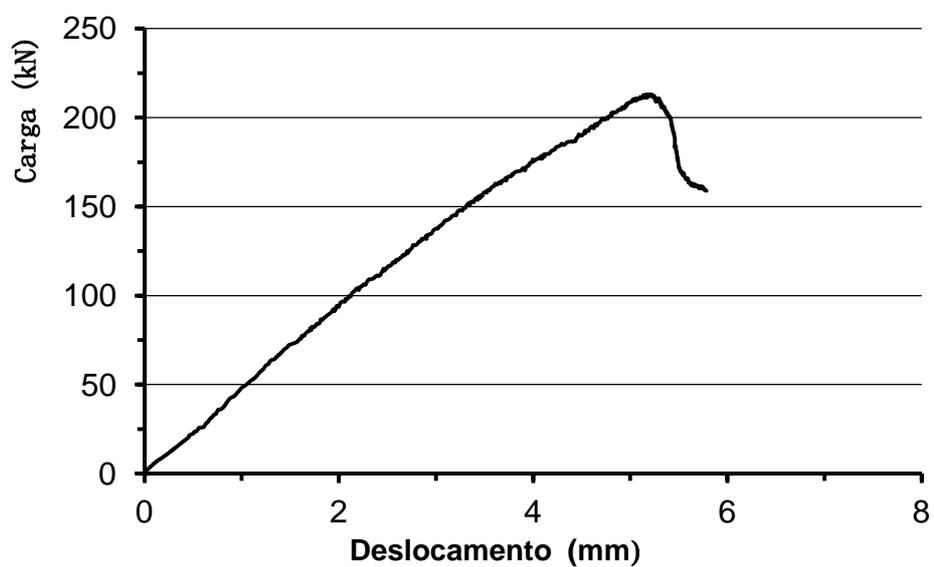


Figura B26 – Curva carga versus deslocamento vertical LSS\_64x64x4,8\_L1470\_1

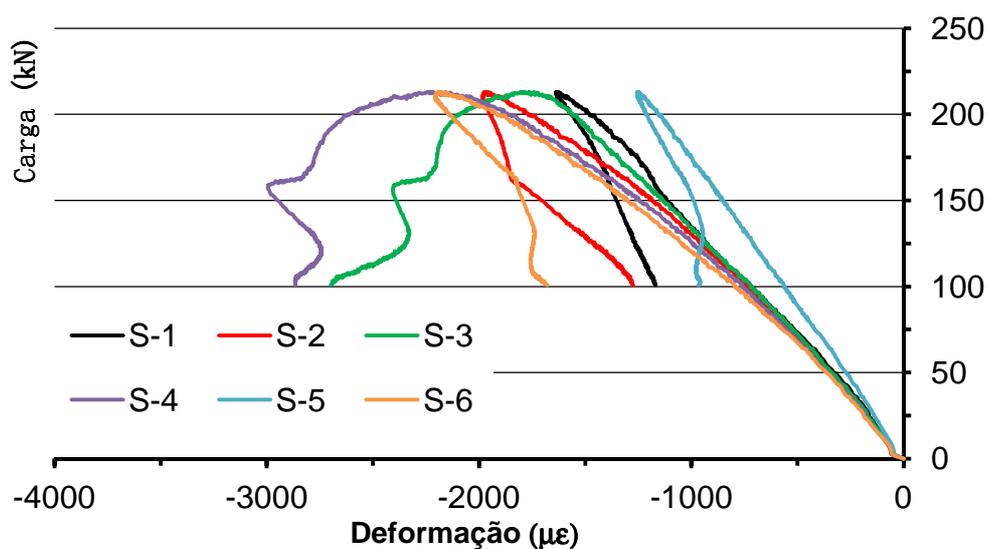


Figura B27 – Curva carga versus deformação LSS\_64x64x4,8\_L1470\_1

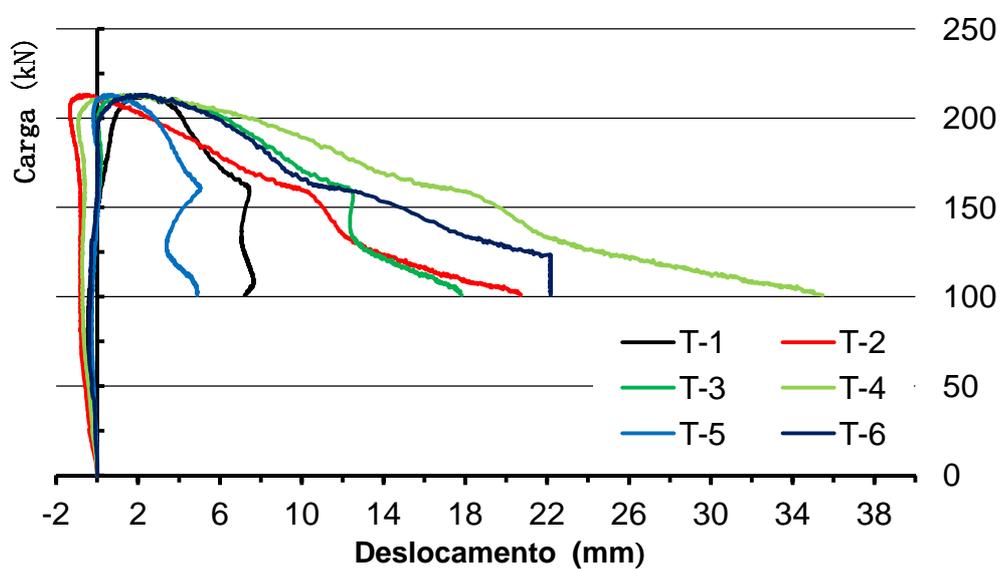


Figura B28 – Curva carga versus deslocamentos LSS\_64x64x4,8\_L1470\_1

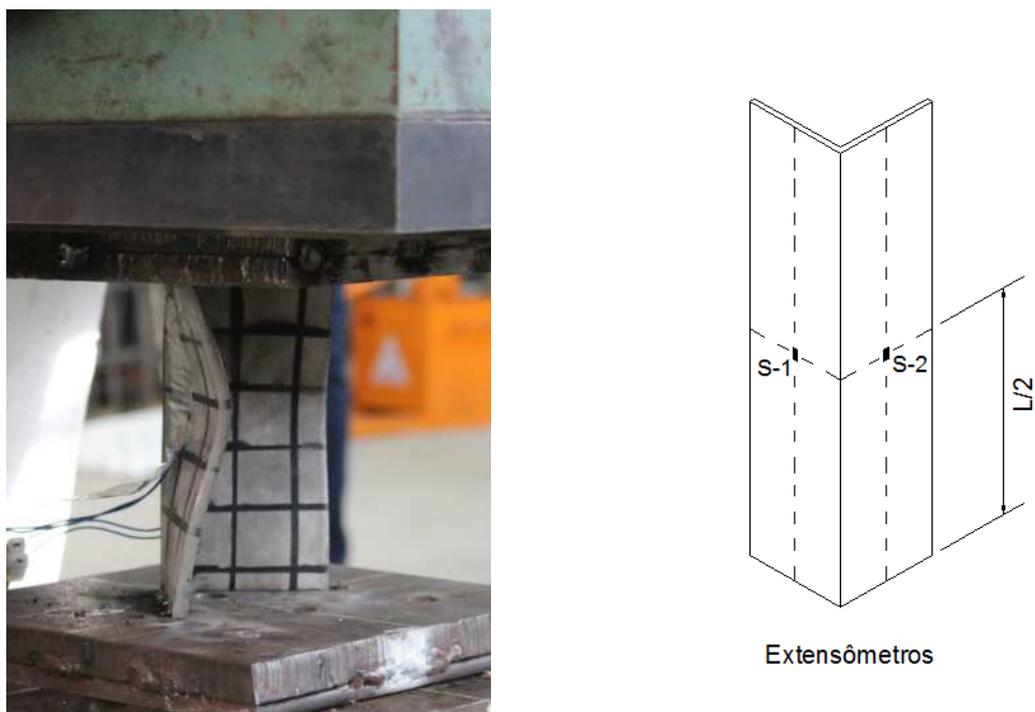


Figura B29 – Cantoneira LSS\_76x76x6,4\_L152\_1

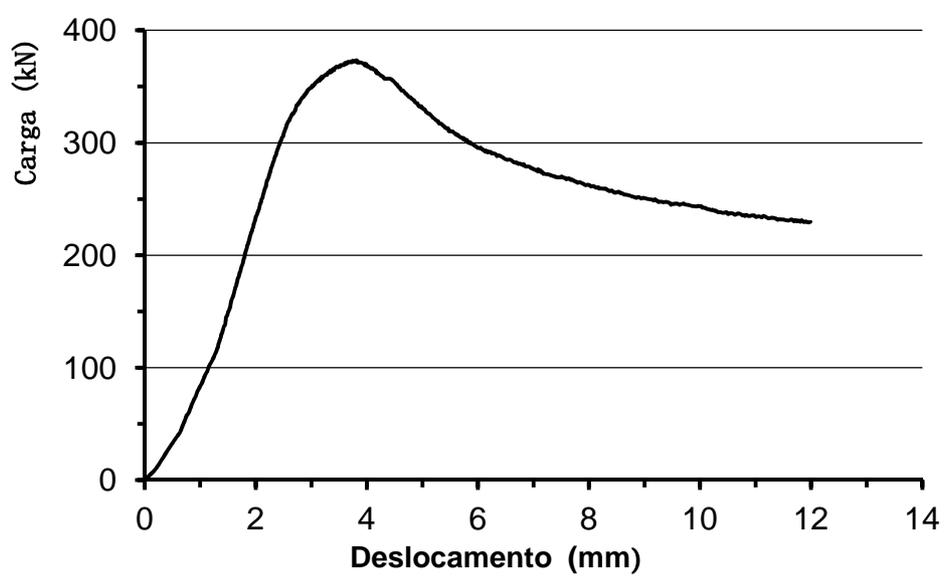


Figura B30 – Curva carga versus deslocamento vertical LSS\_76x76x6,4\_L152\_1

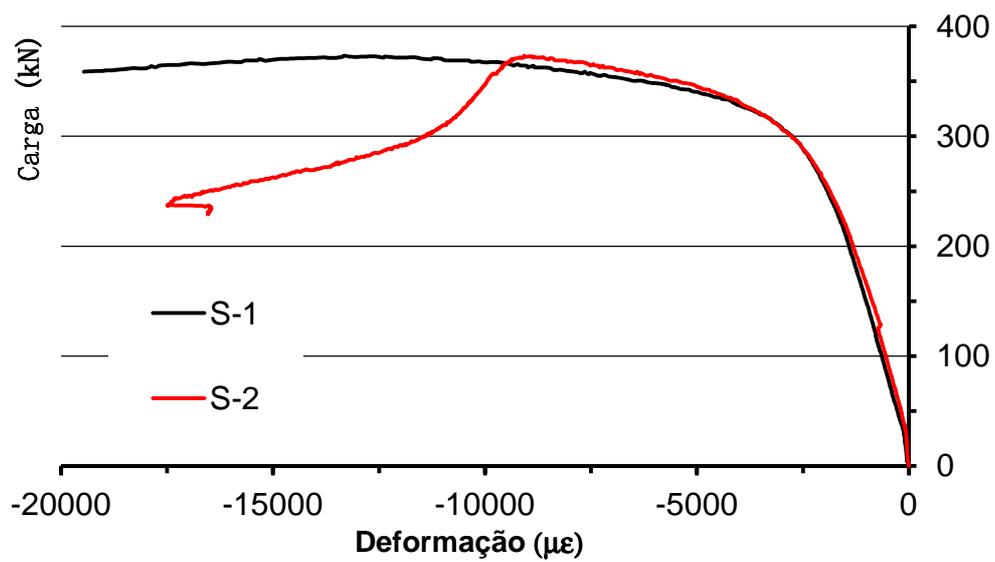


Figura B31 – Curva carga versus deformação LSS\_76x76x6,4\_L152\_1

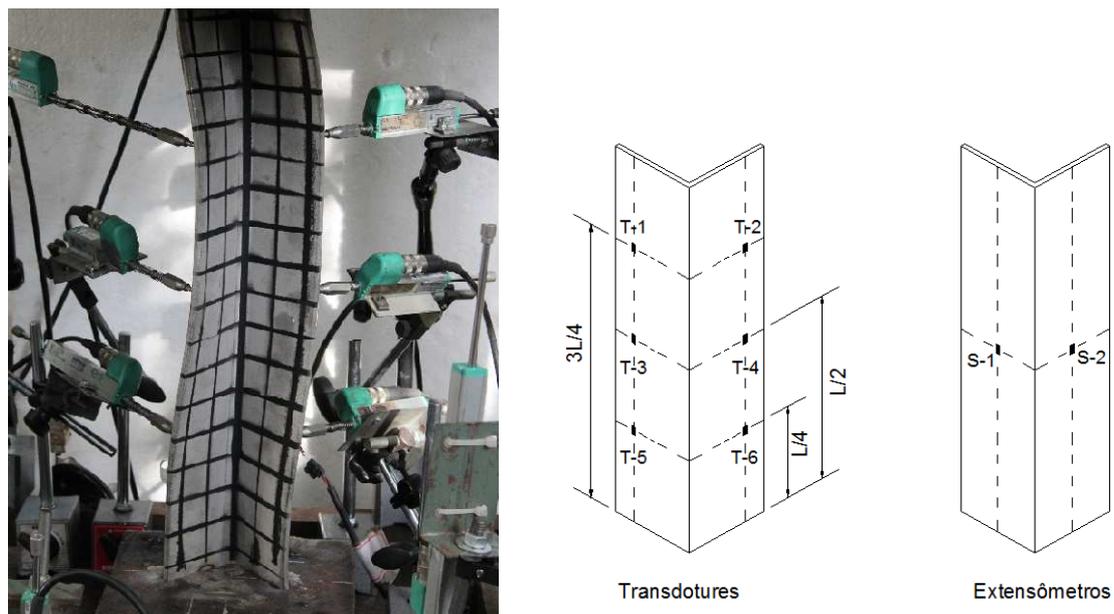


Figura B32 – Cantoneira LSS\_76x76x6,4\_L496\_1

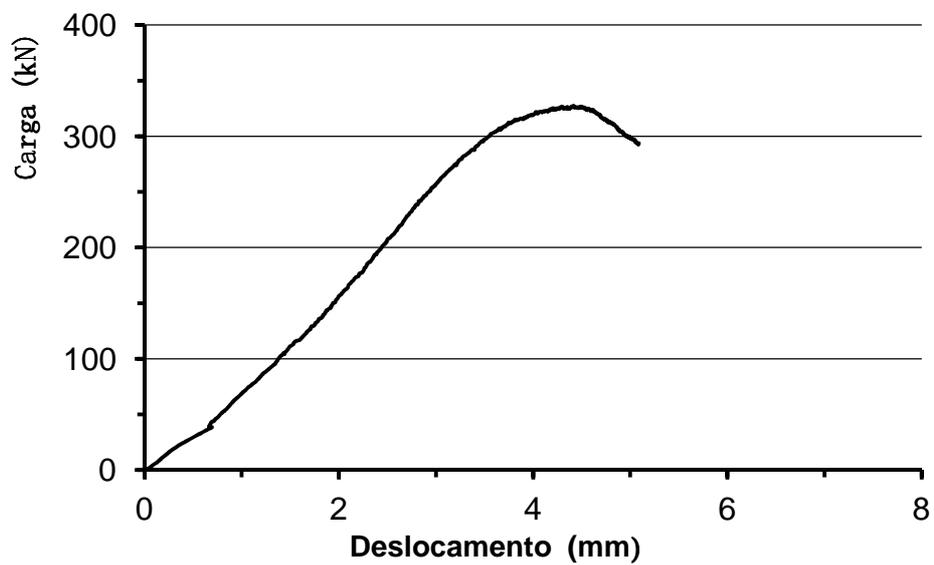


Figura B33 – Curva carga versus deslocamento vertical LSS\_76x76x6,4\_L496\_1

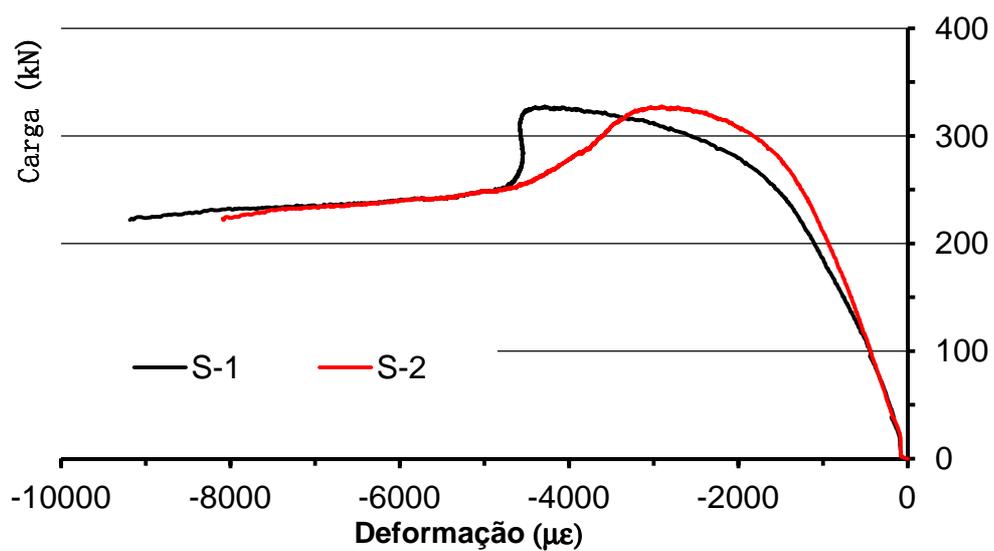


Figura B34 – Curva carga versus deformação LSS\_76x76x6,4\_L496\_1

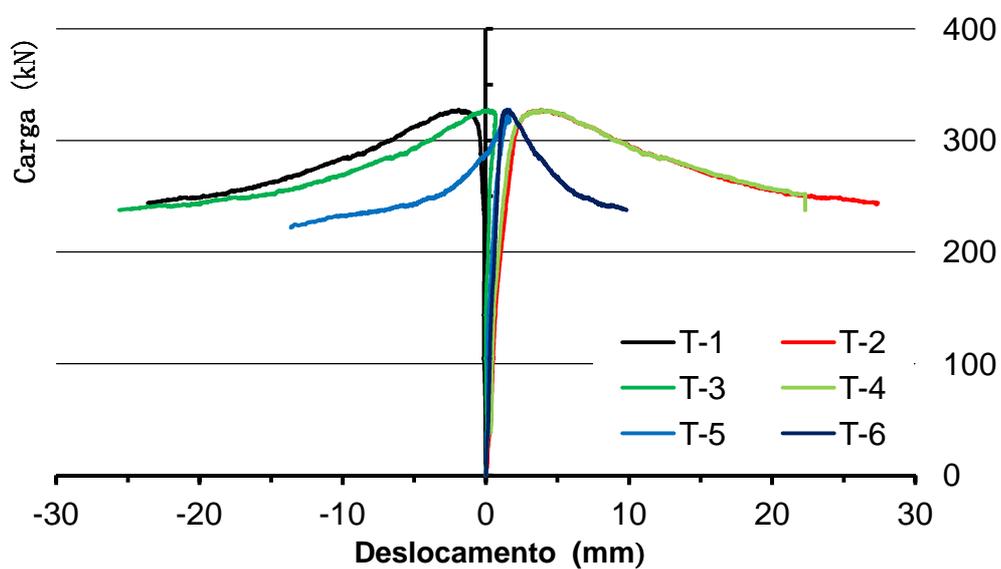


Figura B35 – Curva carga versus deslocamentos LSS\_76x76x6,4\_L496\_1

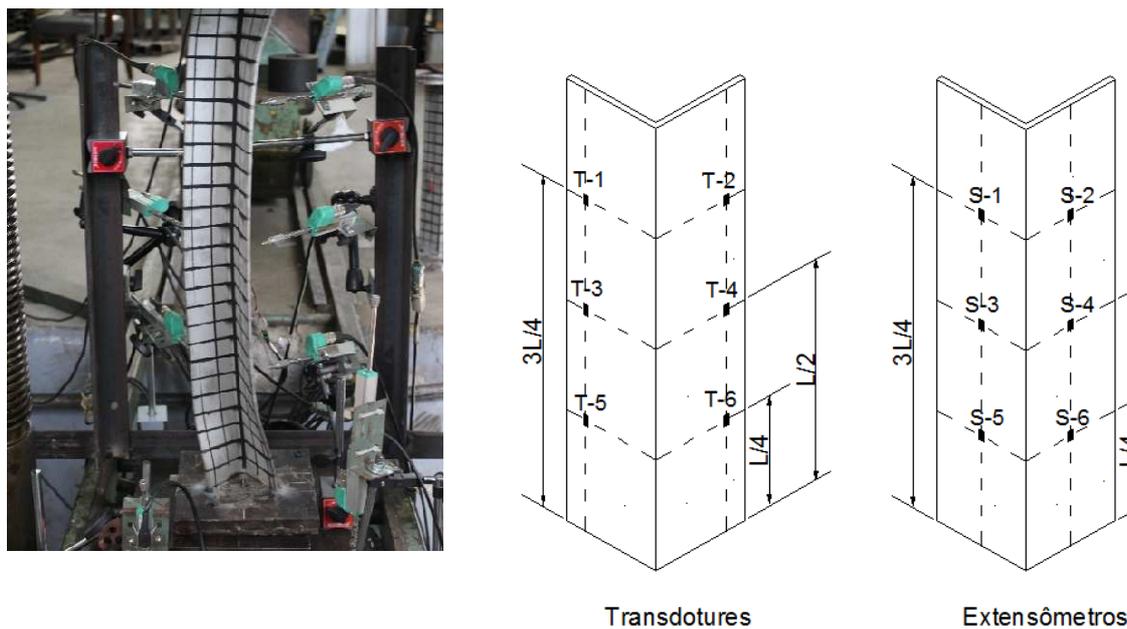


Figura B36 – Cantoneira LSS\_76x76x6,4\_L753\_1

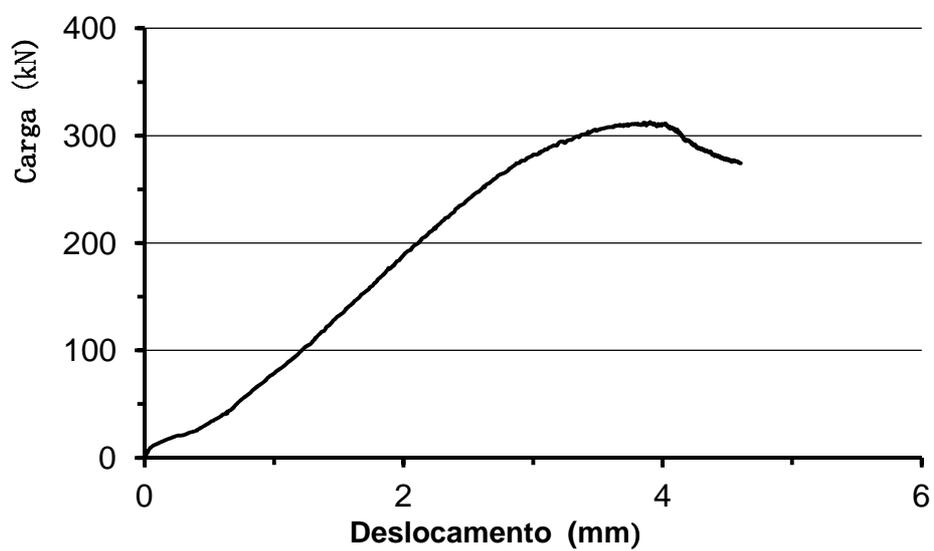


Figura B37 – Curva carga versus deslocamento vertical LSS\_76x76x6,4\_L753\_1

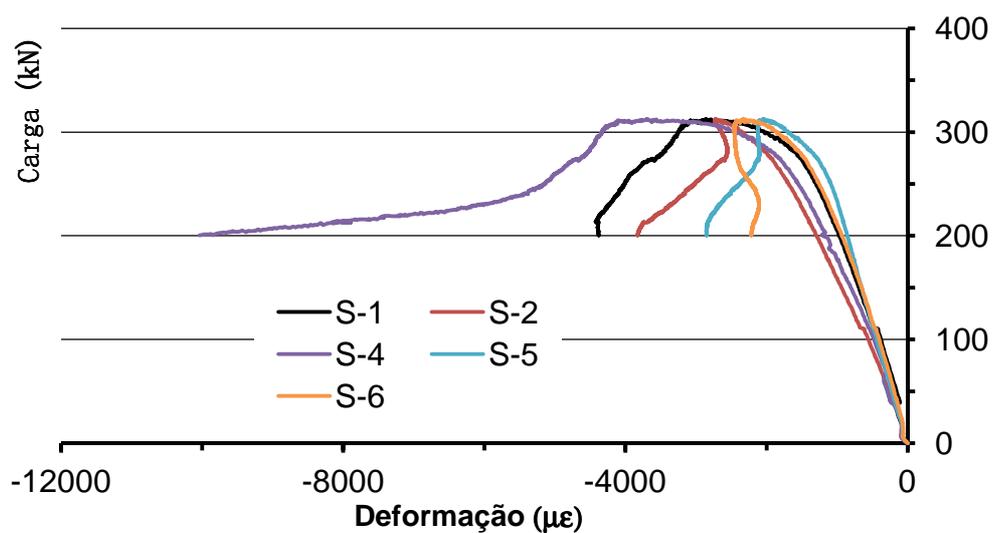


Figura B38 – Curva carga *versus* deformação LSS\_76x76x6,4\_L753\_1

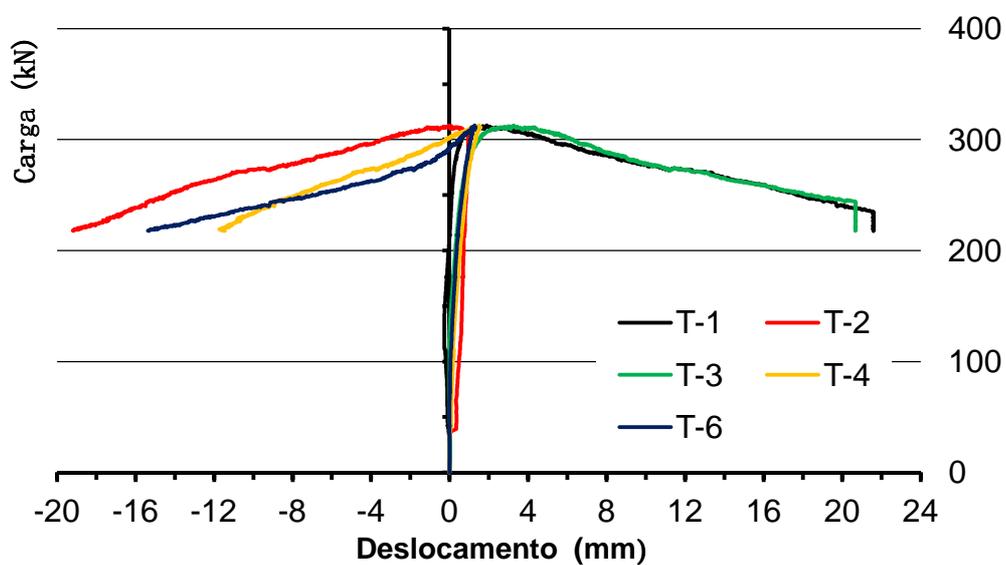
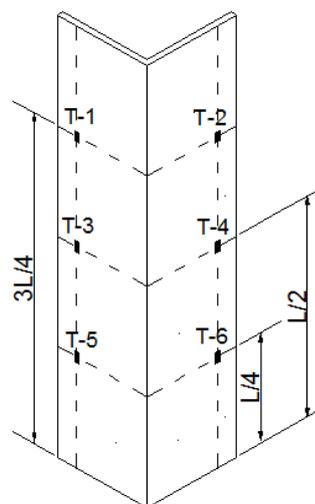
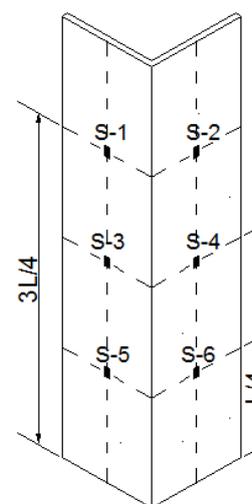


Figura B39 – Curva carga *versus* deslocamentos LSS\_76x76x6,4\_L753\_1



Transdutores



Extensômetros

Figura B40 – Cantoneira LSS\_76x76x6,4\_L1196\_1

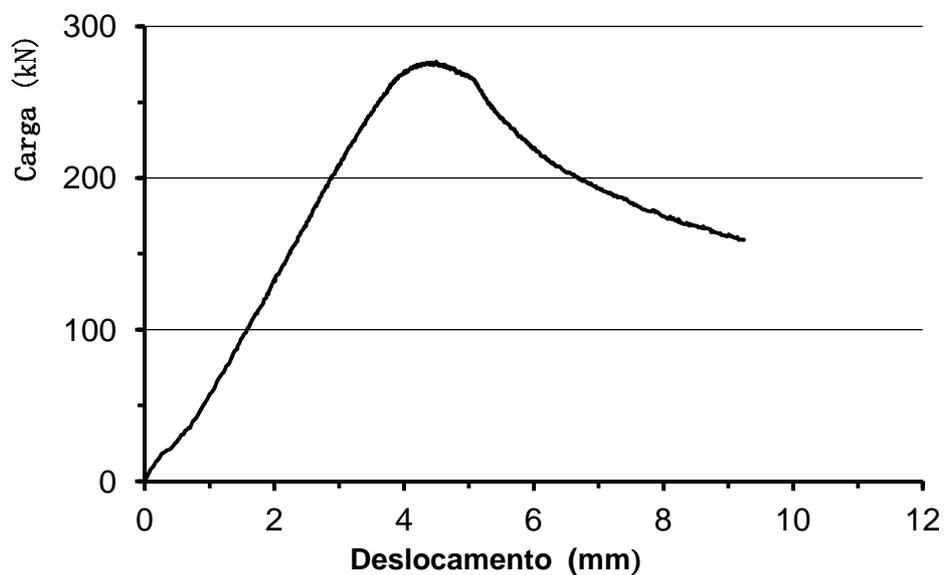


Figura B41 – Curva carga versus deslocamento vertical LSS\_76x76x6,4\_L1196\_1

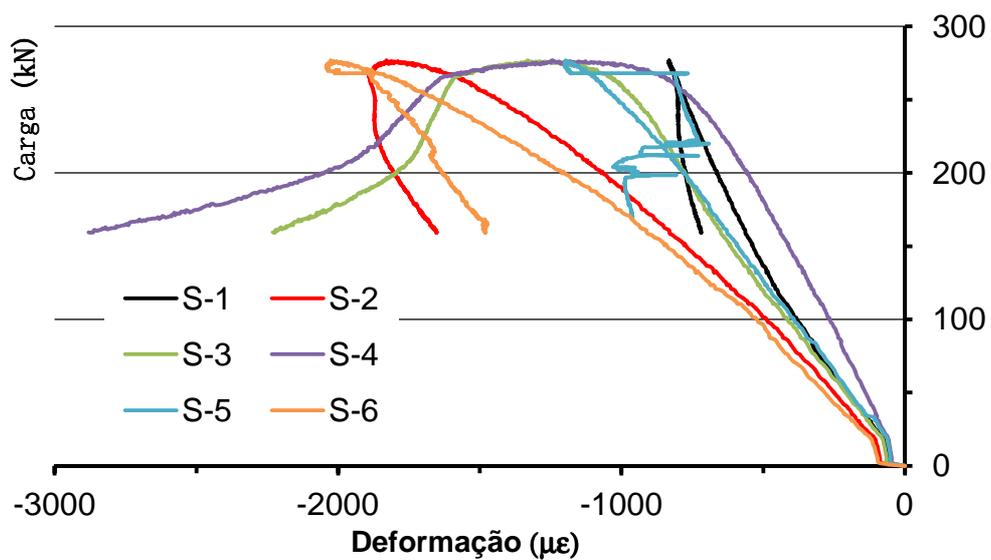


Figura B42 – Curva carga versus deformação LSS\_76x76x6,4\_L1196\_1

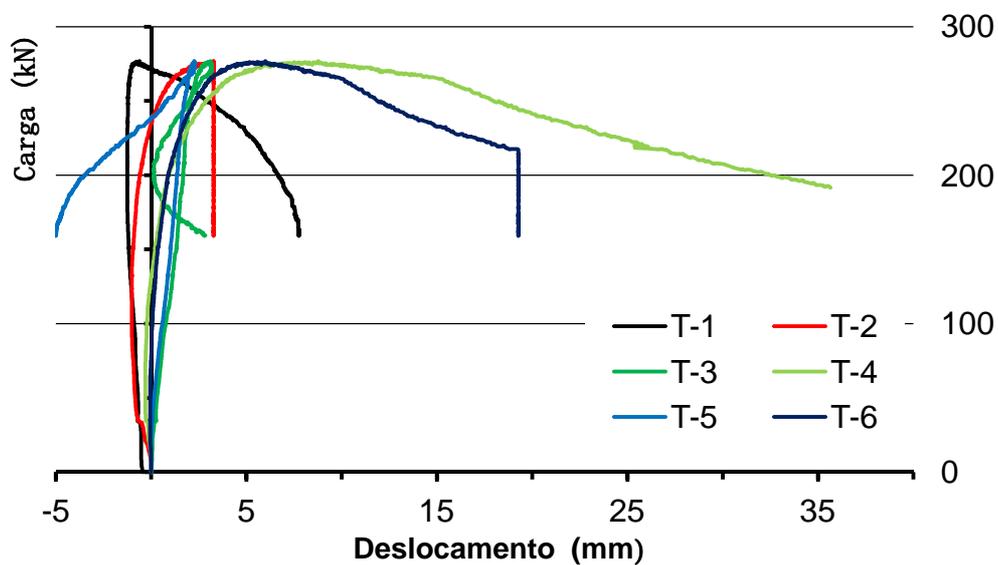
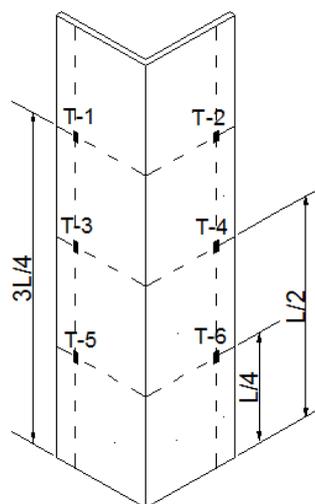
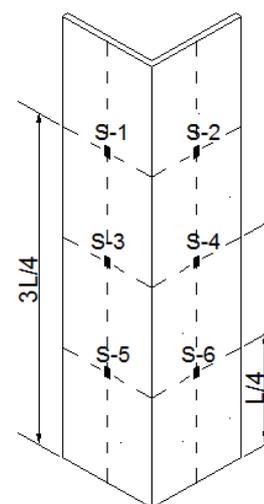


Figura B43 – Curva carga versus deslocamentos LSS\_76x76x6,4\_L1196\_1



Transdutores



Extensômetros

Figura B44 – Cantoneira LSS\_76x76x6,4\_L1410\_1

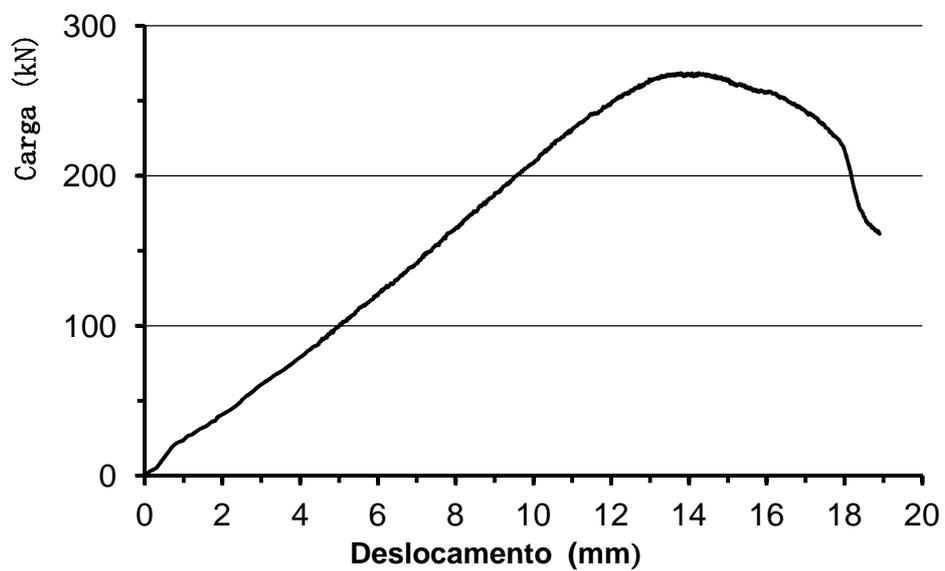


Figura B45 – Curva carga versus deslocamento vertical LSS\_76x76x6,4\_L1410\_1

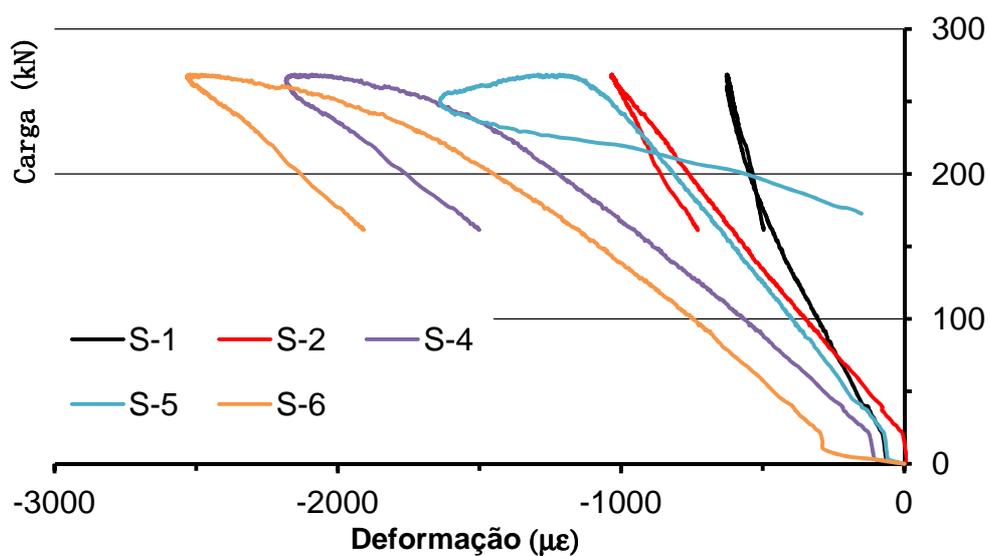


Figura B46 – Curva carga versus deformação LSS\_76x76x6,4\_L1410\_1

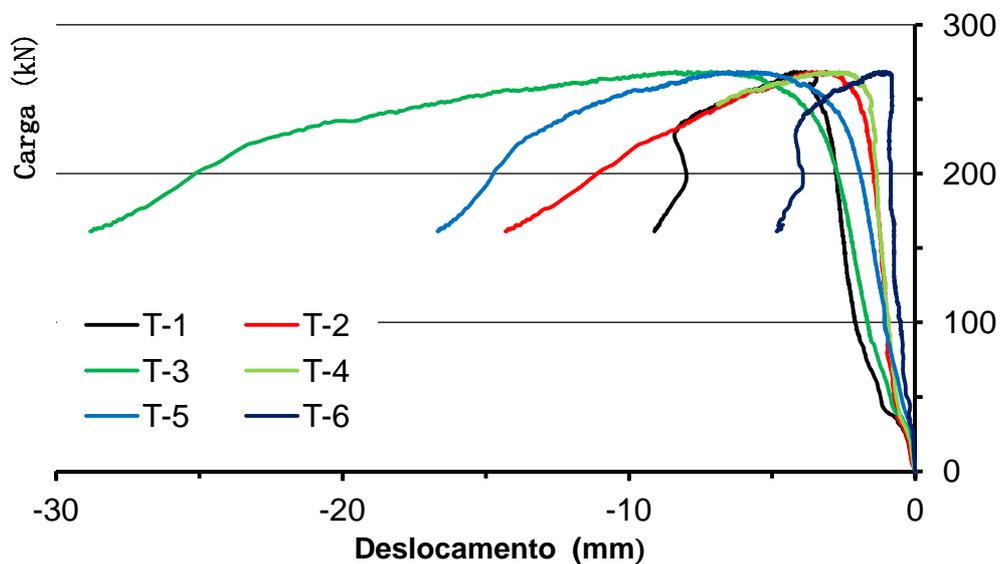


Figura B47 – Curva carga versus deslocamentos LSS\_76x76x6,4\_L1410\_1

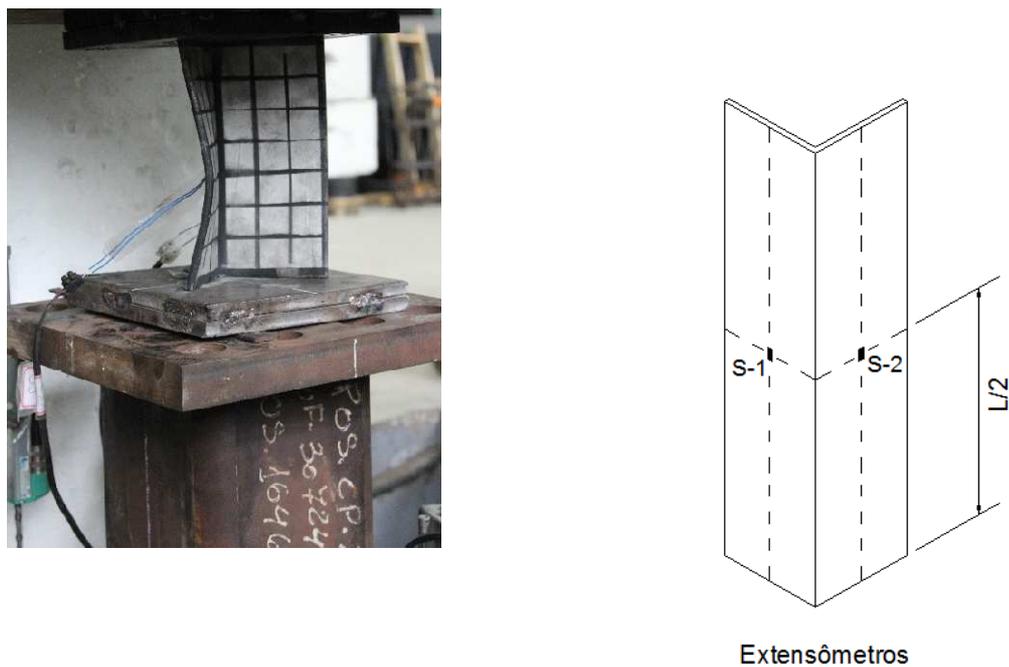


Figura B48 – Cantoneira LSS\_102x102x6,4\_L203\_1

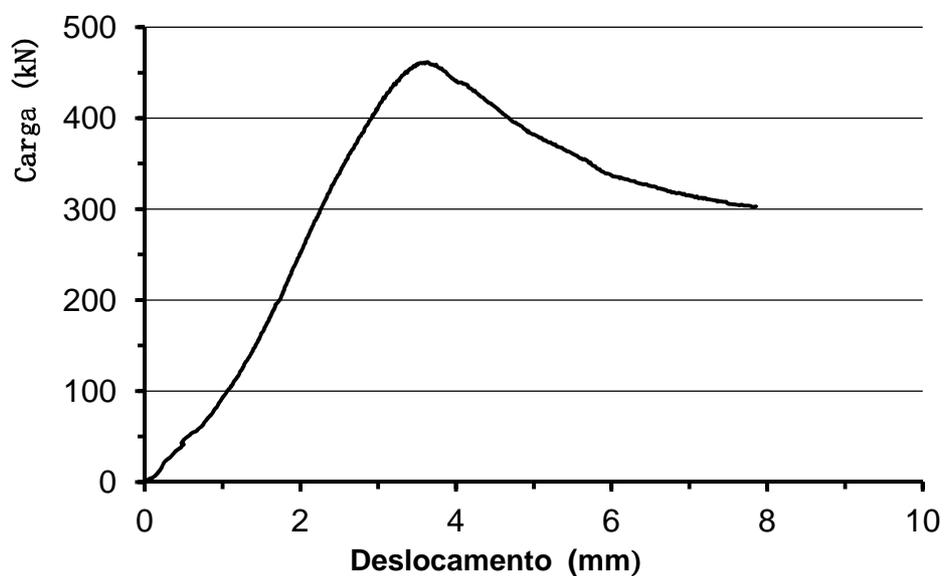


Figura B49 – Curva carga versus deslocamento vertical LSS\_102x102x6,4\_L203\_1

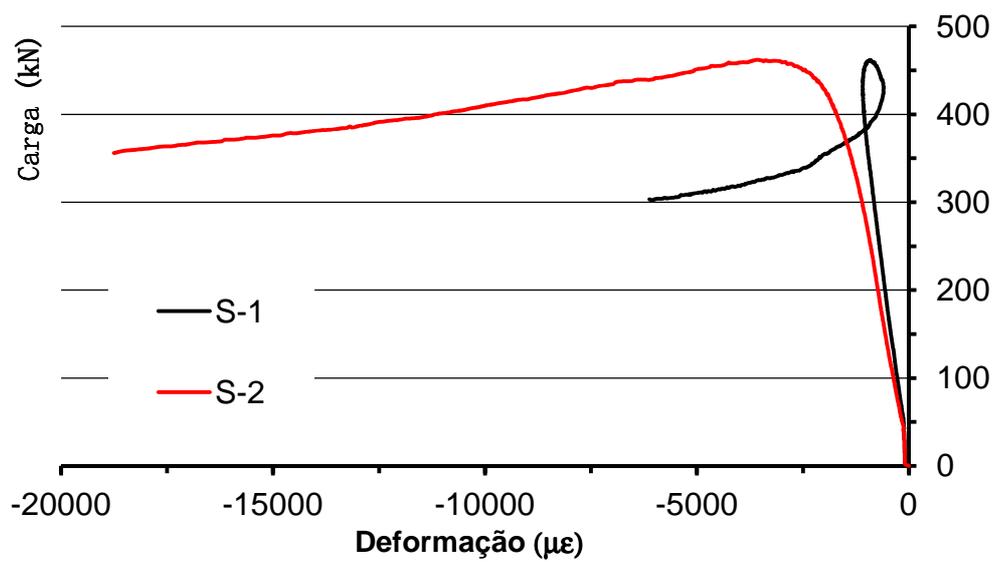


Figura B50 – Curva carga versus deformação LSS\_102x102x6,4\_L203\_1

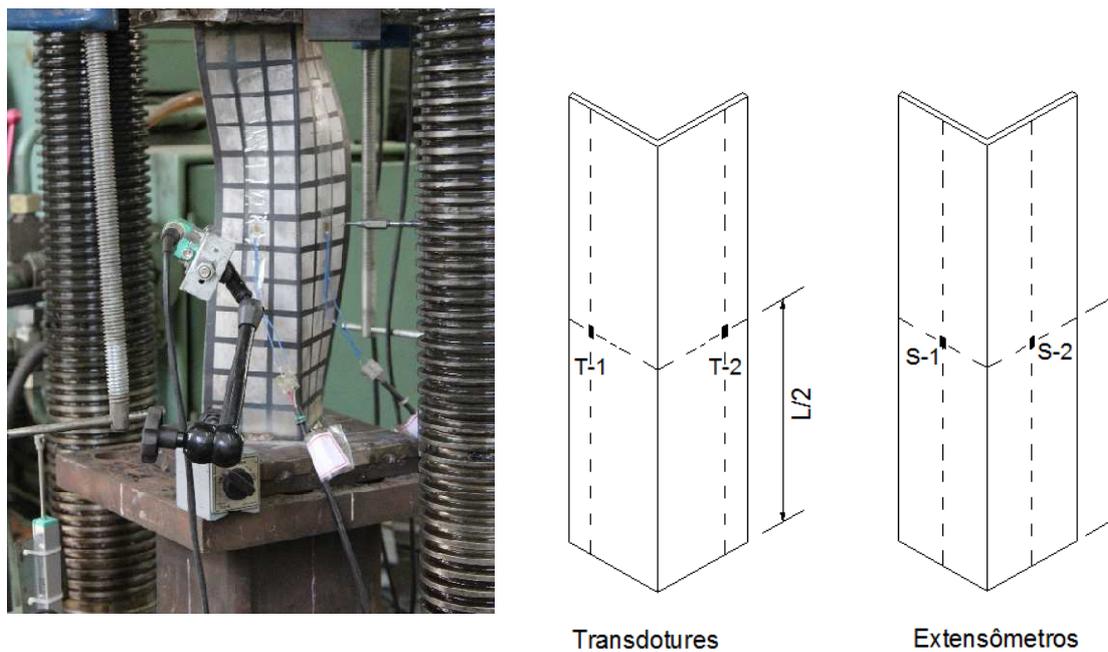


Figura B51 – Cantoneira LSS\_102x102x6,4\_L407\_1

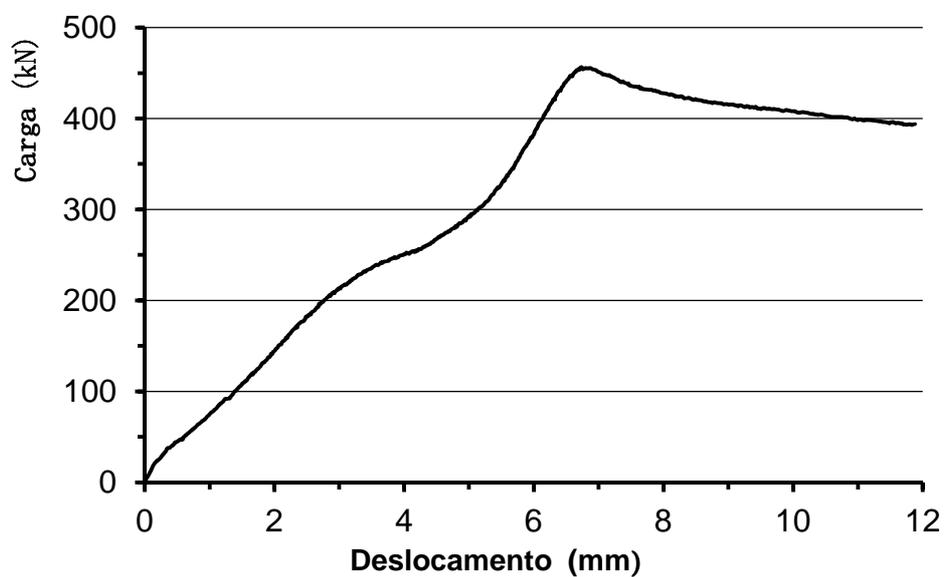


Figura B52 – Curva carga *versus* deslocamento vertical LSS\_102x102x6,4\_L407\_1

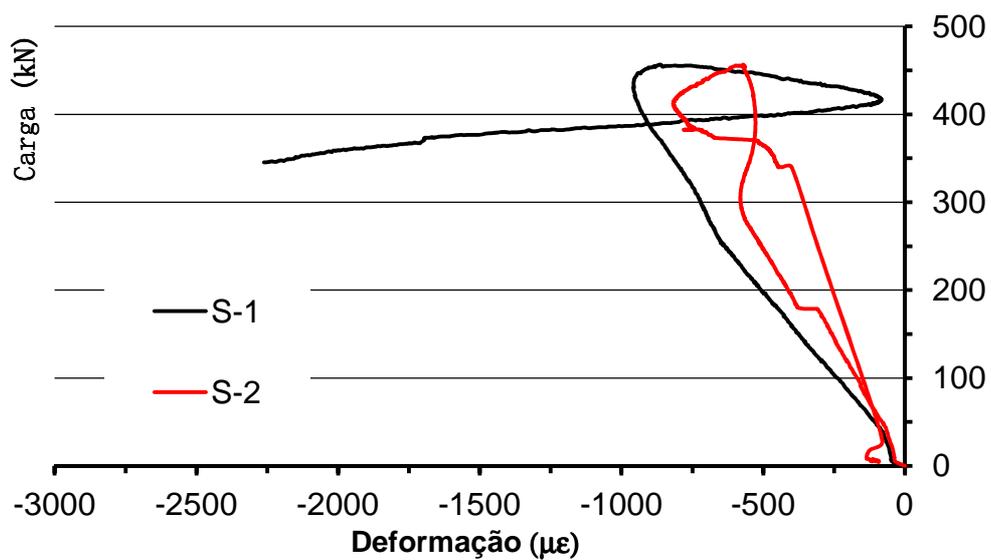


Figura B53 – Curva carga *versus* deformação LSS\_102x102x6,4\_L407\_1

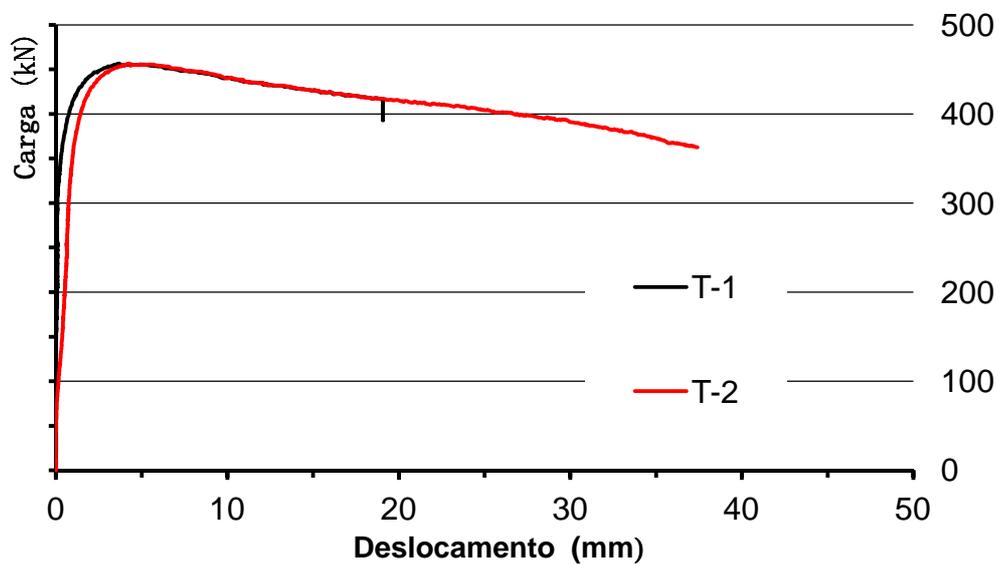


Figura B54 – Curva carga *versus* deslocamentos LSS\_102x102x6,4\_L407\_1

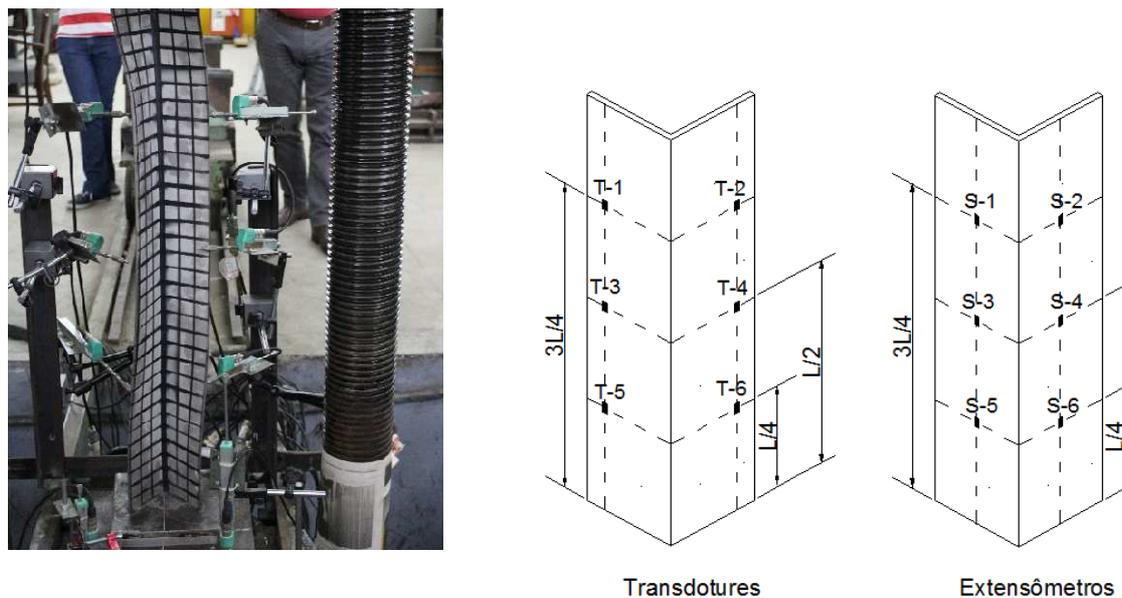


Figura B55 – Cantoneira LSS\_102x102x6,4\_L998\_1

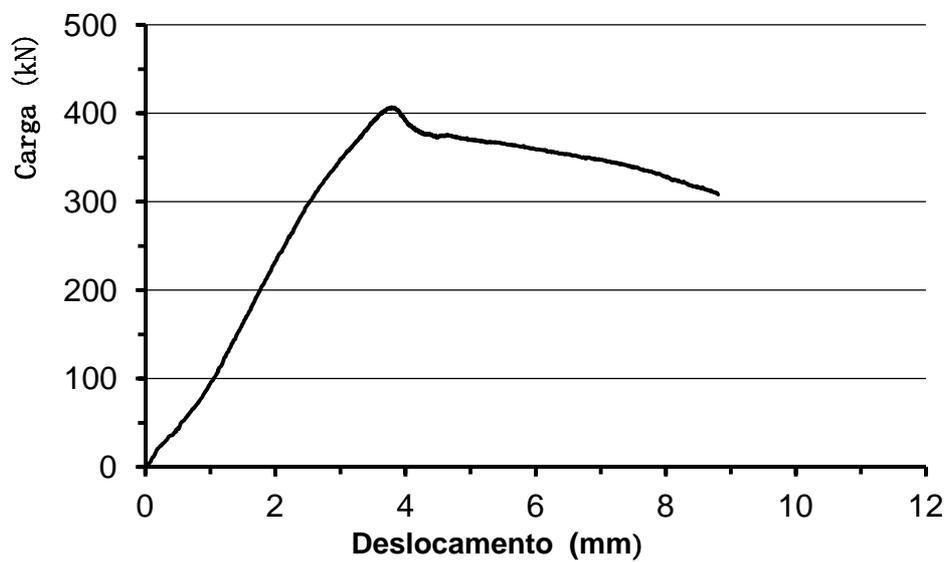


Figura B56 – Curva carga versus deslocamento vertical LSS\_102x102x6,4\_L998\_1

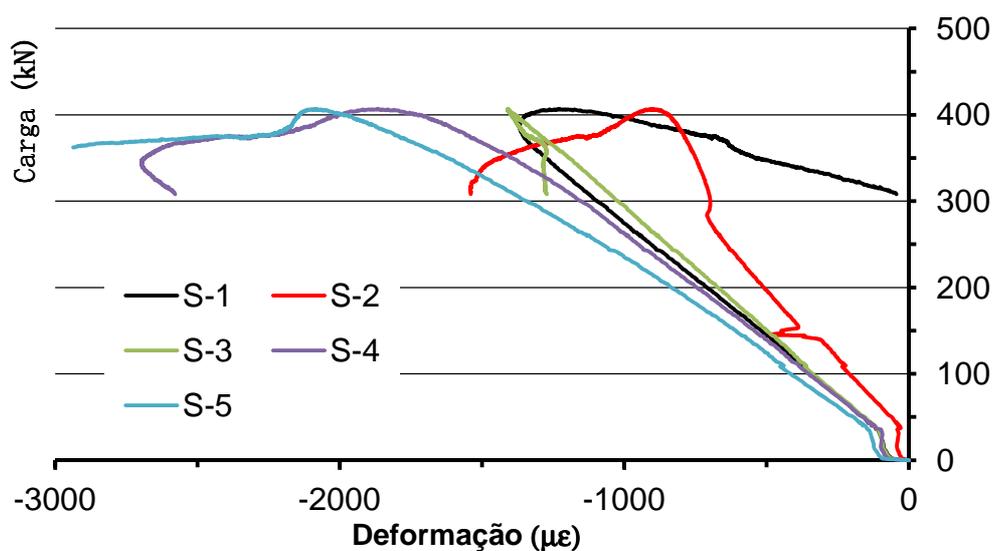


Figura B57 – Curva carga versus deformação LSS\_102x102x6,4\_L998\_1

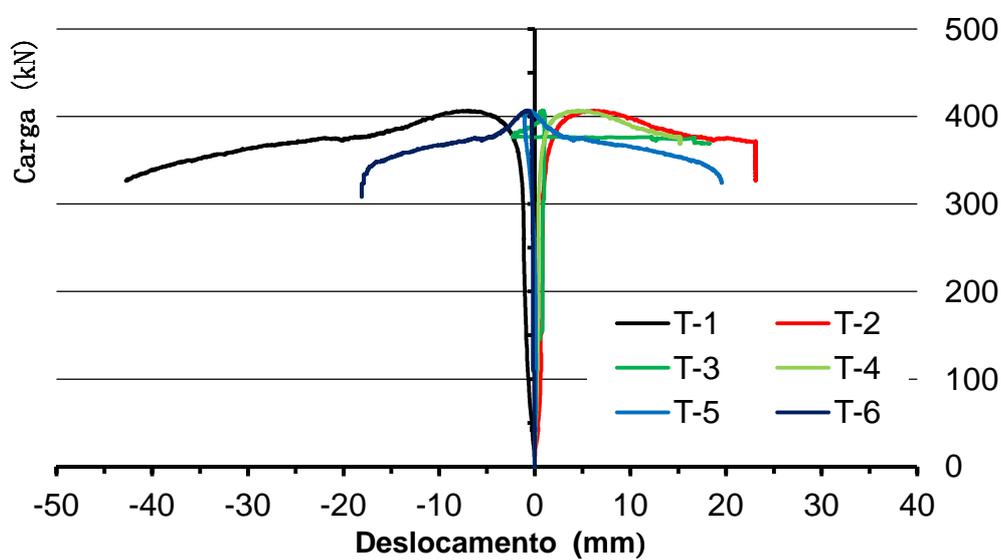


Figura B58 – Curva carga versus deslocamentos LSS\_102x102x6,4\_L998\_1

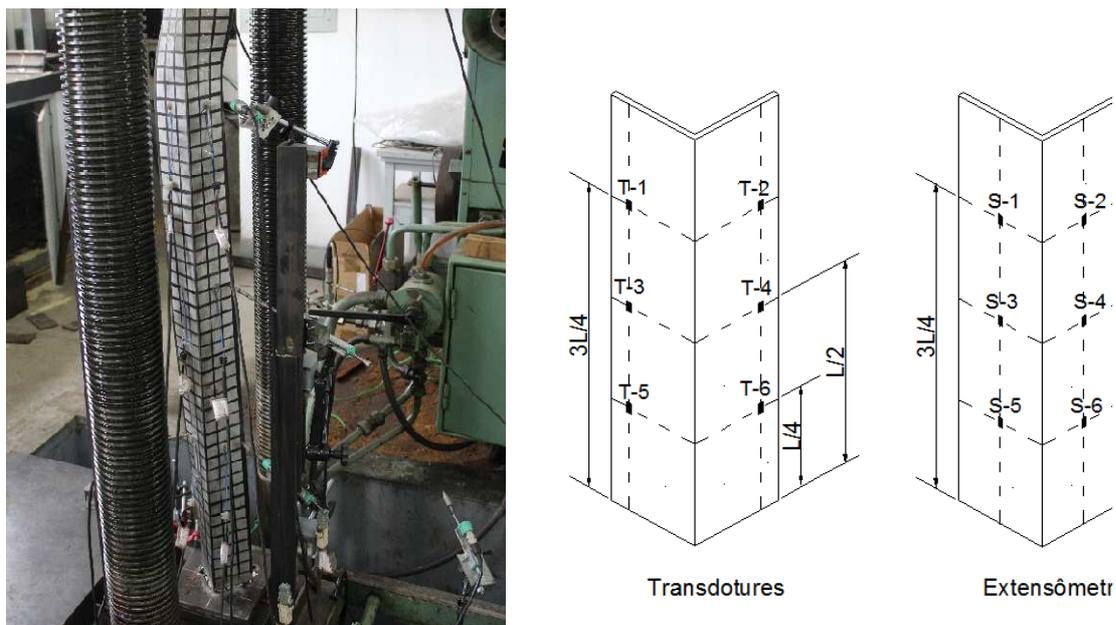


Figura B59 – Cantoneira LSS\_102x102x6,4\_L1480\_1

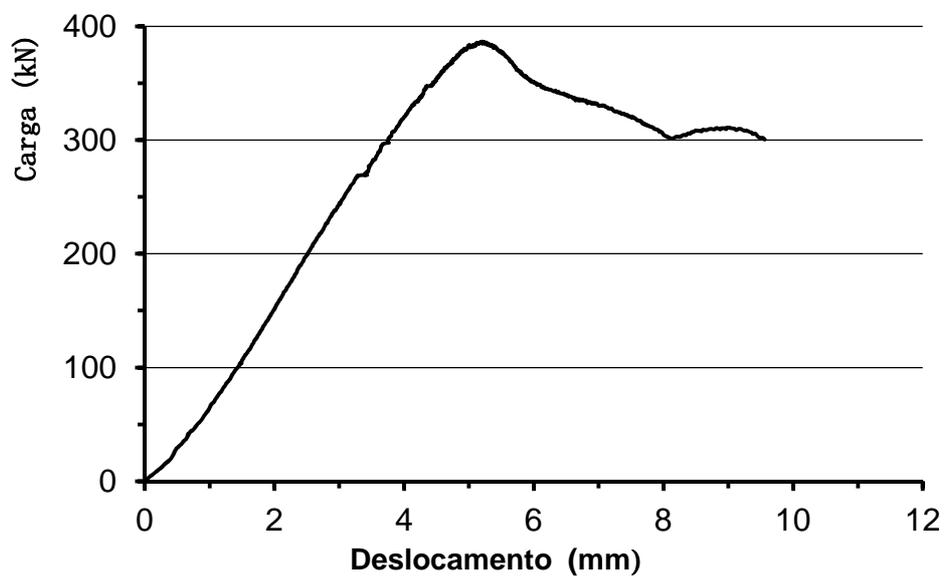


Figura B60 – Curva carga versus deslocamento vertical LSS\_102x102x6,4\_L1480\_1

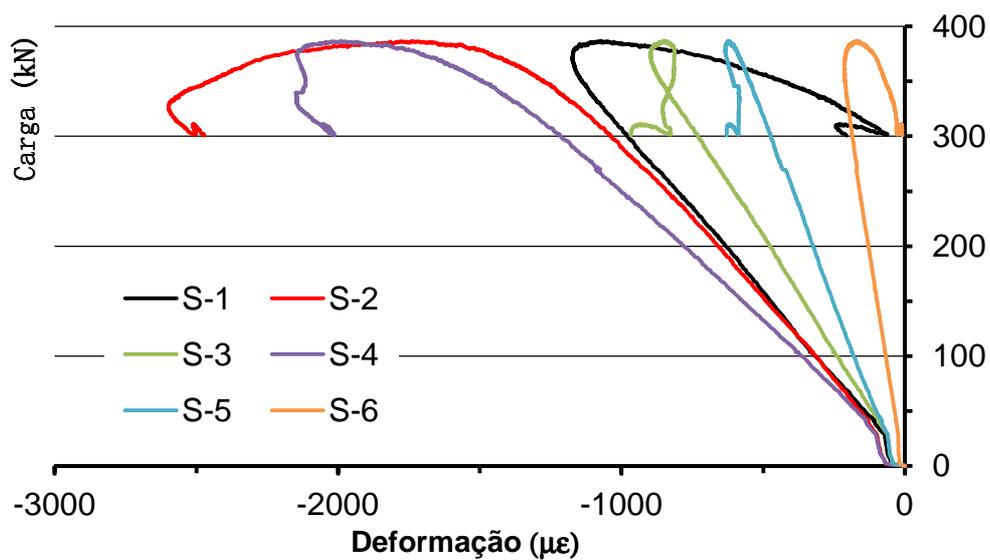


Figura B61 – Curva carga *versus* deformação LSS\_102x102x6,4\_L1480\_1

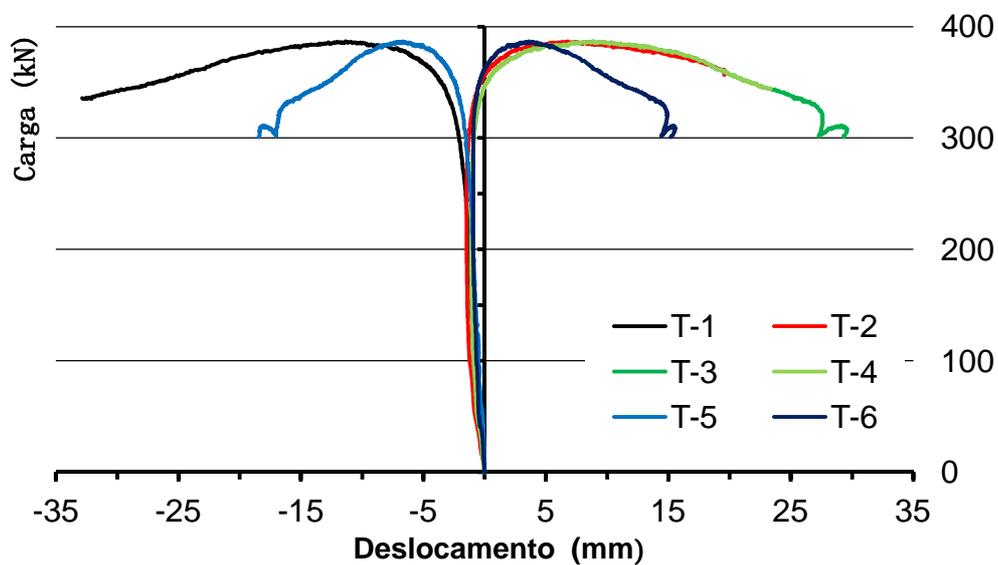


Figura B62 – Curva carga *versus* deslocamentos LSS\_102x102x6,4\_L1480\_1

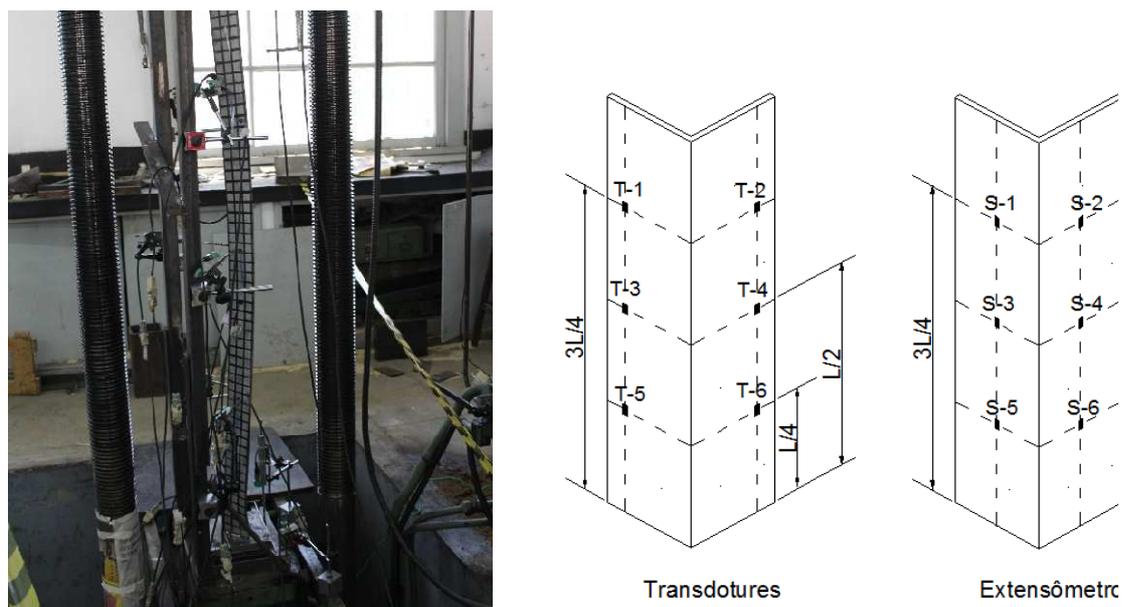


Figura B63 – Cantoneira LSS\_102x102x6,4\_L1893\_1

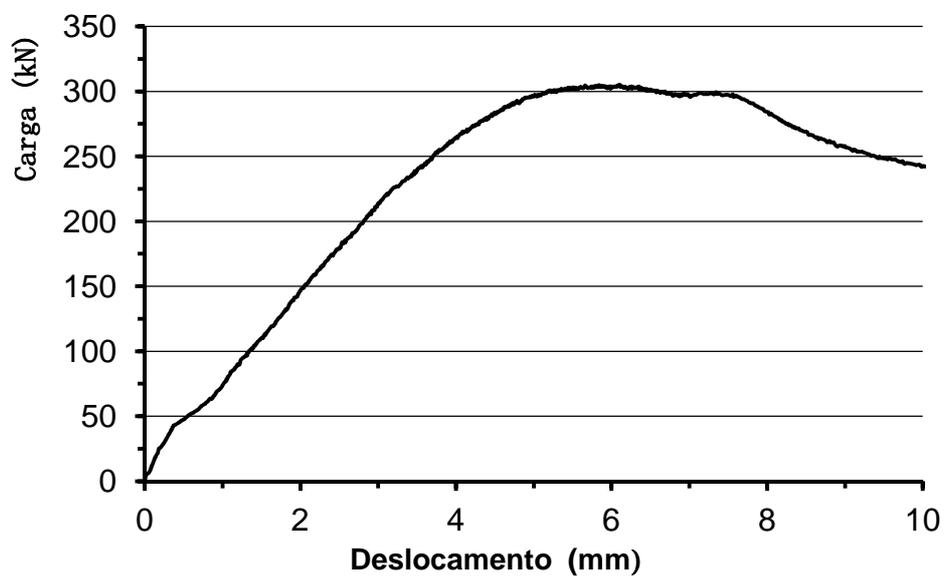


Figura B64 – Curva carga *versus* deslocamento vertical LSS\_102x102x6,4\_L1893\_1

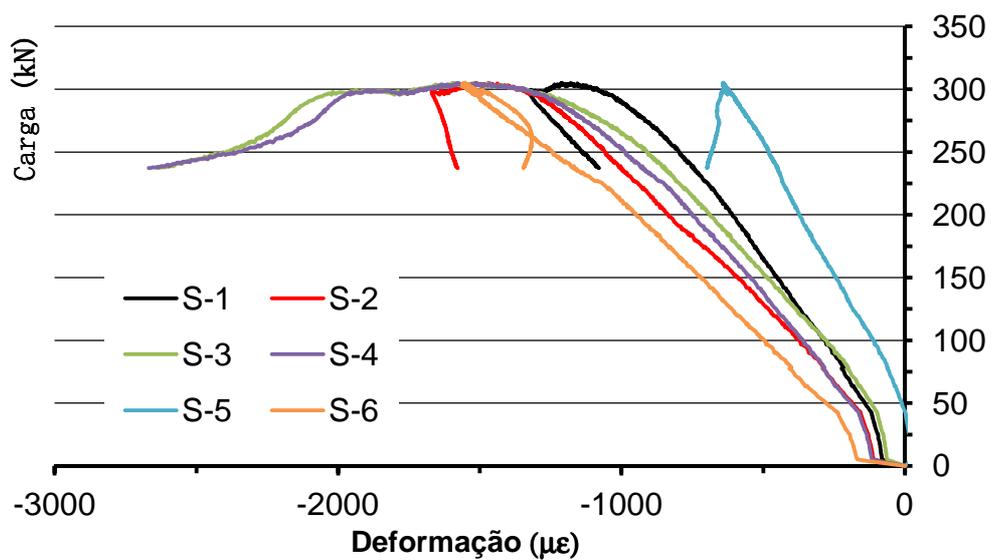


Figura B65 – Curva carga versus deformação LSS\_102x102x6,4\_L1893\_1

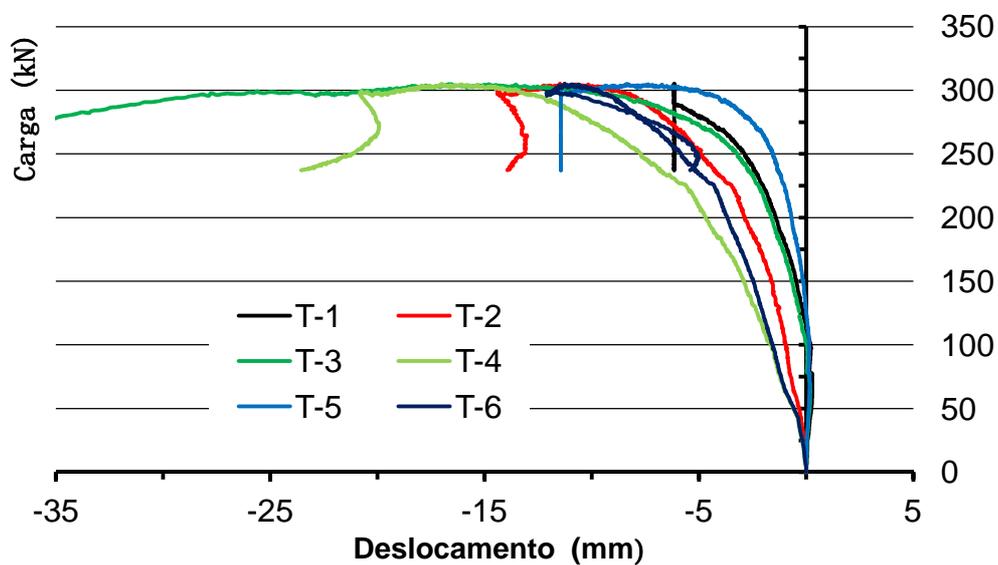
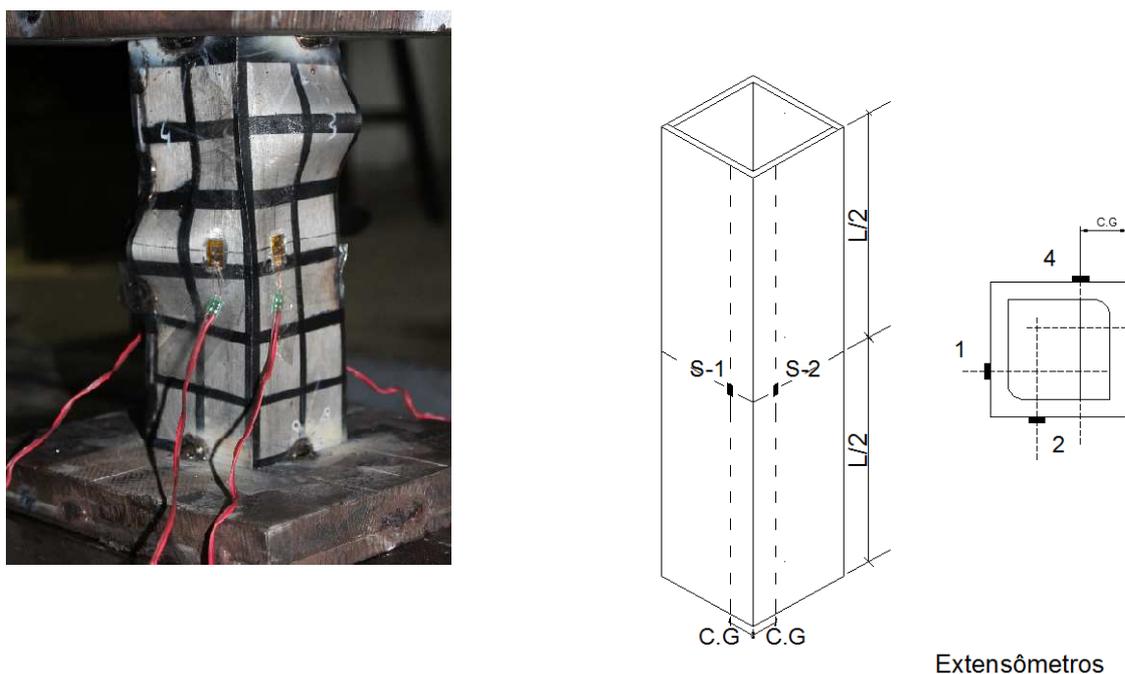


Figura B66 – Curva carga versus deslocamentos LSS\_102x102x6,4\_L1893\_1

## ANEXO C

Este anexo apresenta as medições feitas no programa de ensaios experimentais para as cantoneiras em aço inoxidável soldadas formando um perfil tubular.



Extensômetros

Figura C1 – Cantoneiras 2LSS\_64x64x4,8\_L200\_1

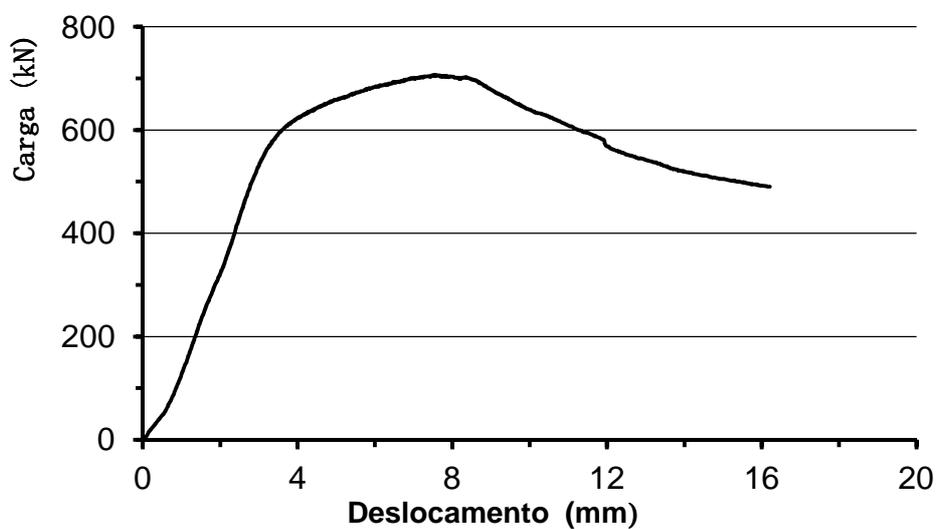


Figura C2 – Curva carga versus deslocamento vertical 2LSS\_64x64x4,8\_L200\_1

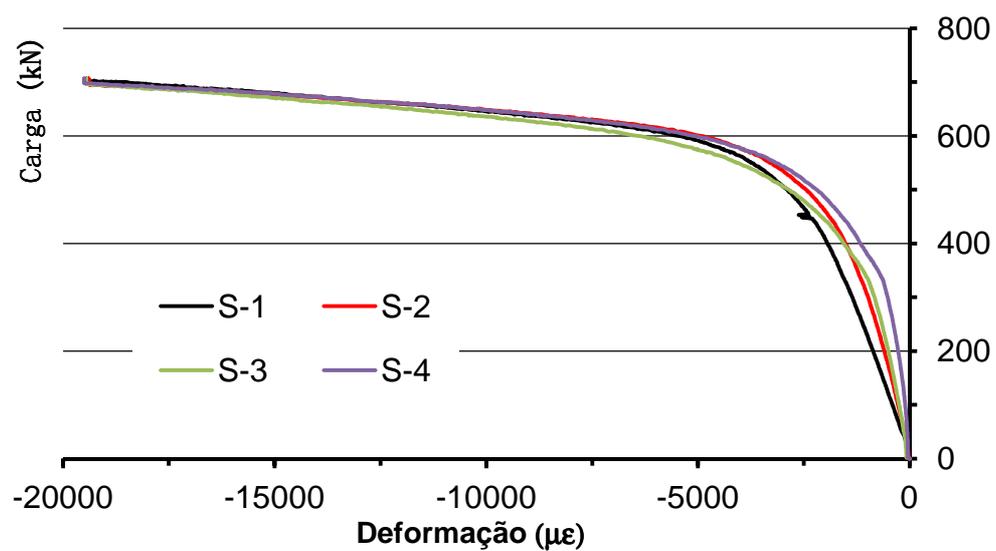


Figura C3 – Curva carga versus deformação 2LSS\_64x64x4,8\_L200\_1

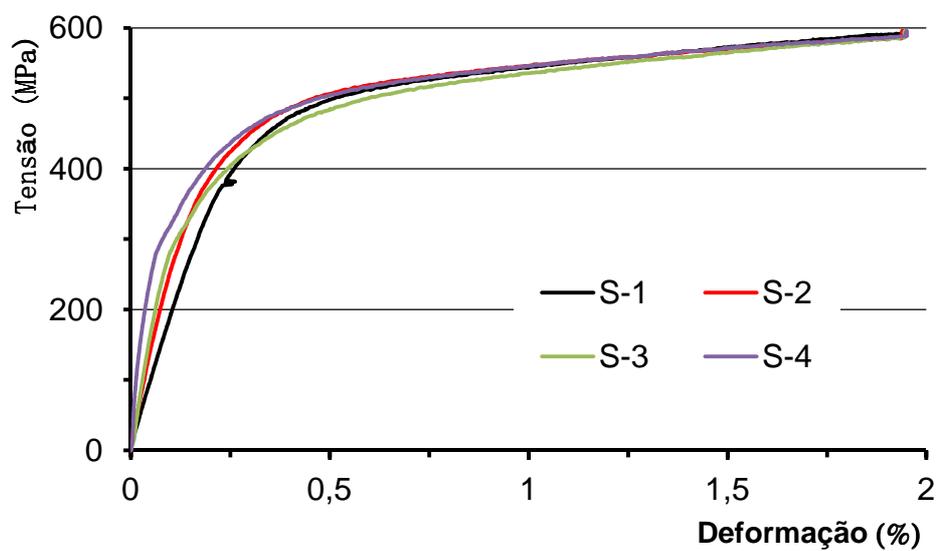


Figura C4 – Curva tensão versus deslocamentos 2LSS\_64x64x4,8\_L200\_1

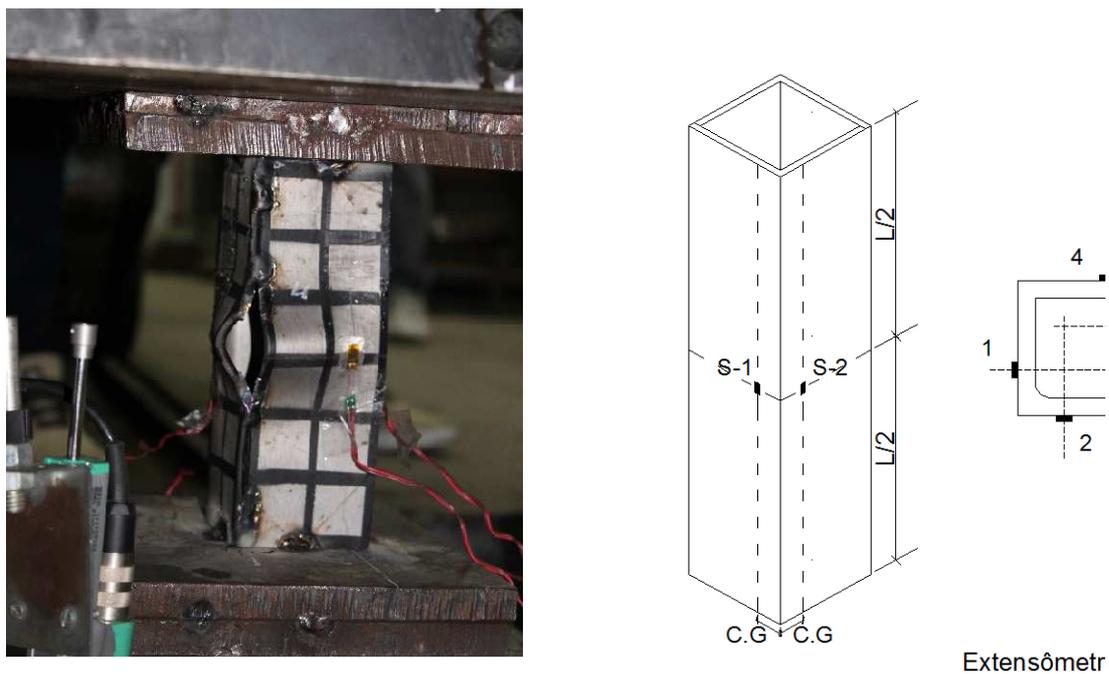


Figura C5 – Cantoneiras 2LSS\_64x64x4,8\_L204\_1

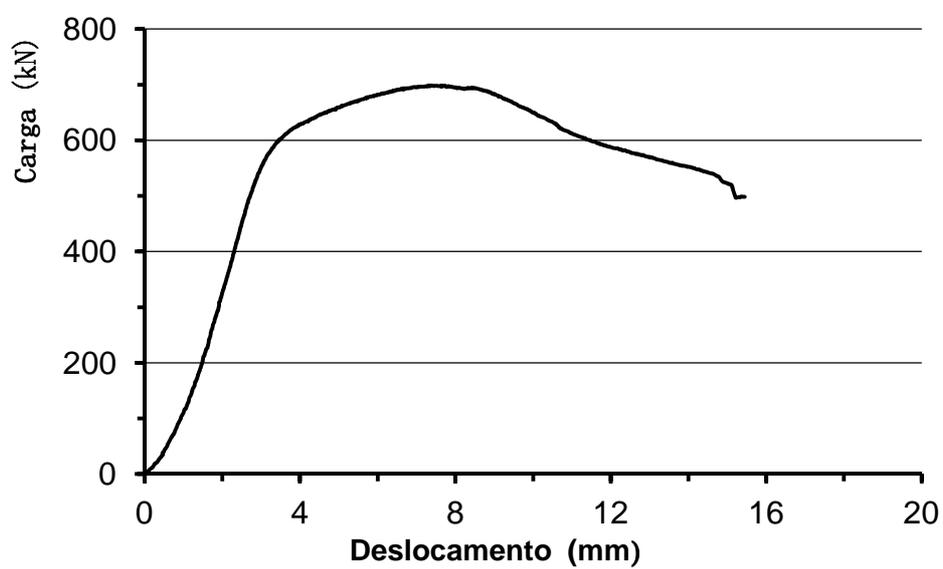


Figura C6 – Curva carga versus deslocamento vertical 2LSS\_64x64x4,8\_L204\_1

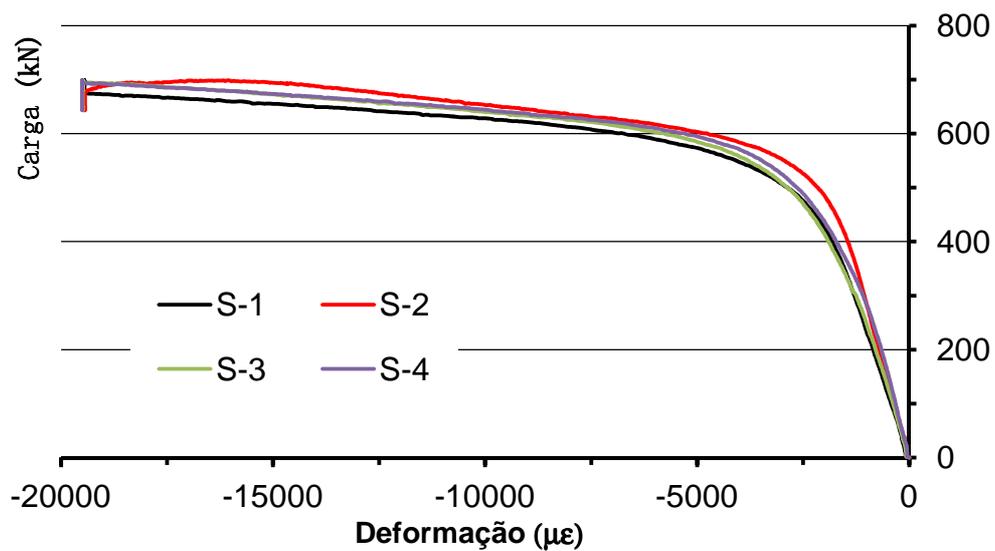


Figura C7 – Curva carga *versus* deformação 2LSS\_64x64x4,8\_L204\_1

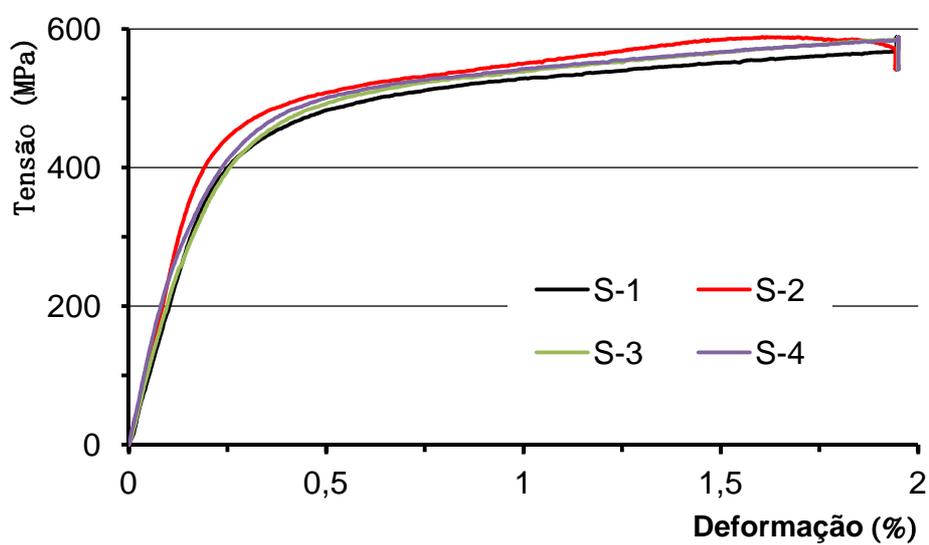


Figura C8 – Curva tensão *versus* deslocamentos 2LSS\_64x64x4,8\_L204\_1

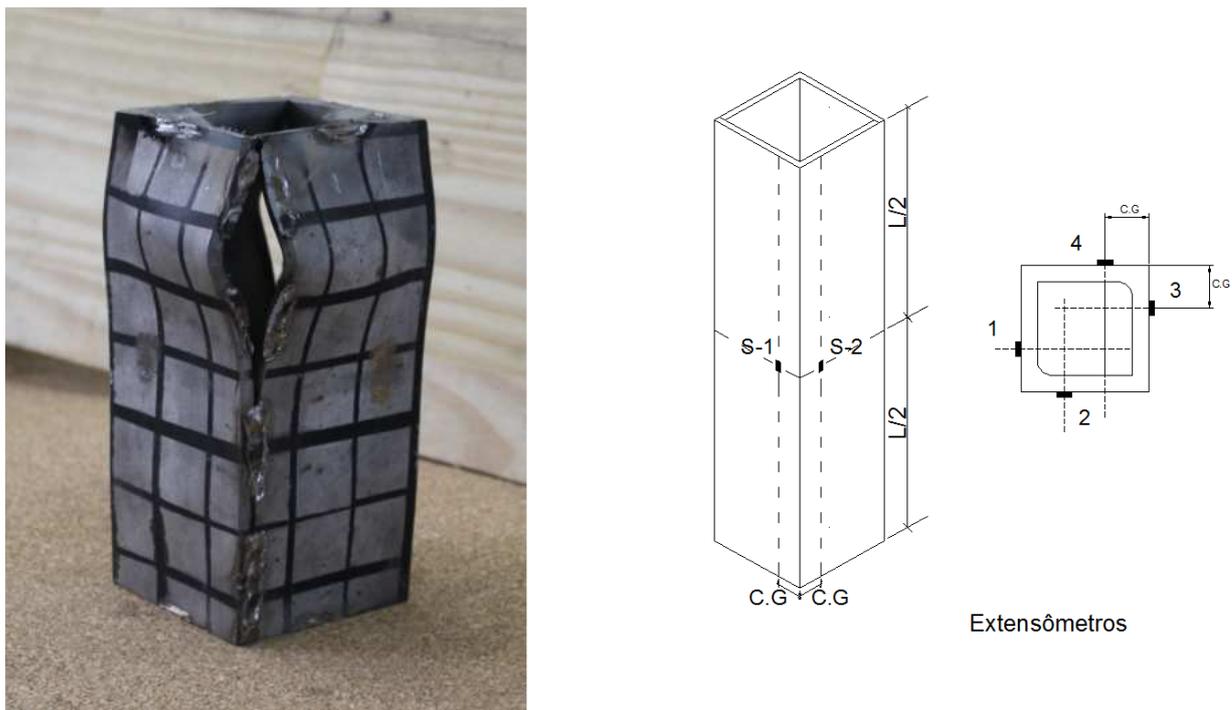


Figura C9 – Cantoneiras 2LSS\_76x76x6,4\_L189\_1

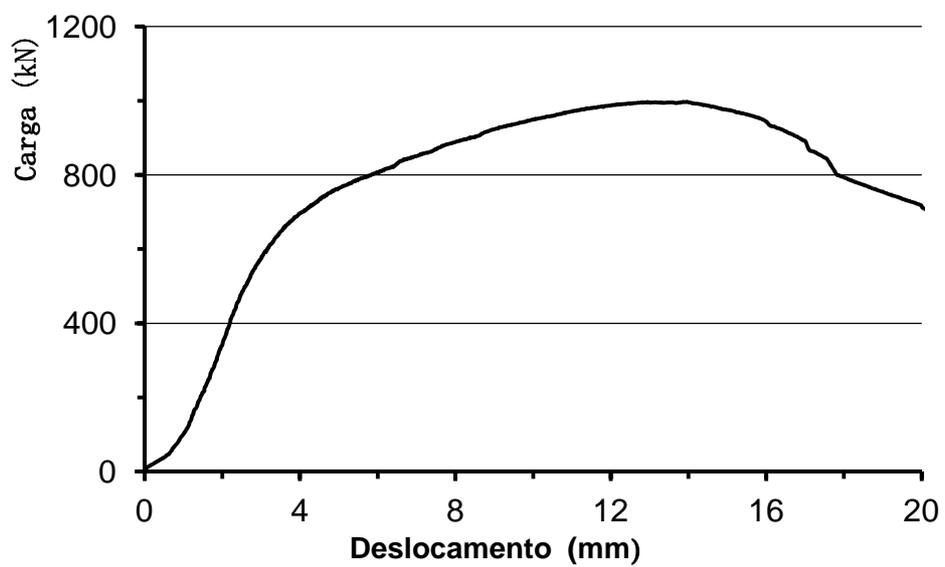


Figura C10 – Curva carga versus deslocamento vertical 2LSS\_76x76x6,4\_L189\_1

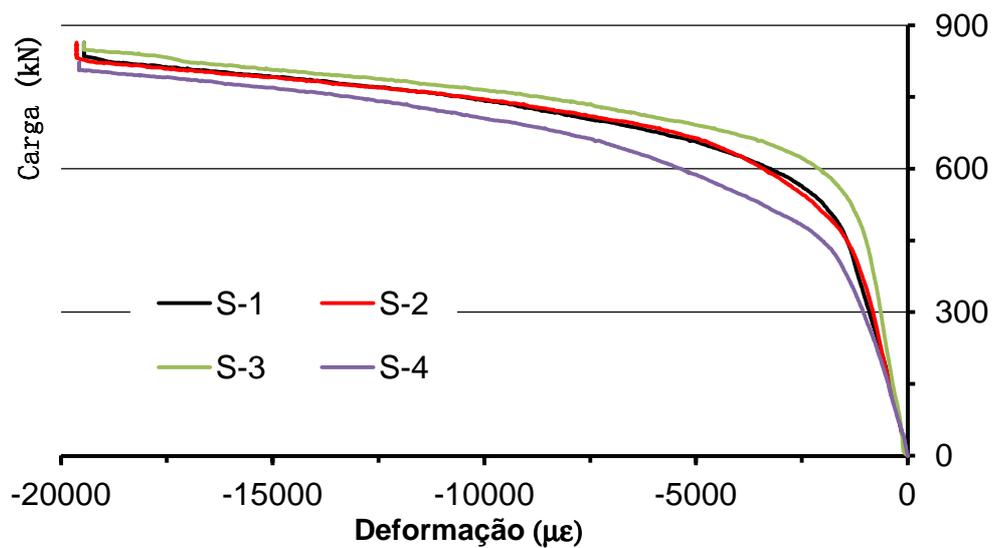


Figura C11 – Curva carga versus deformação 2LSS\_76x76x6,4\_L189\_1

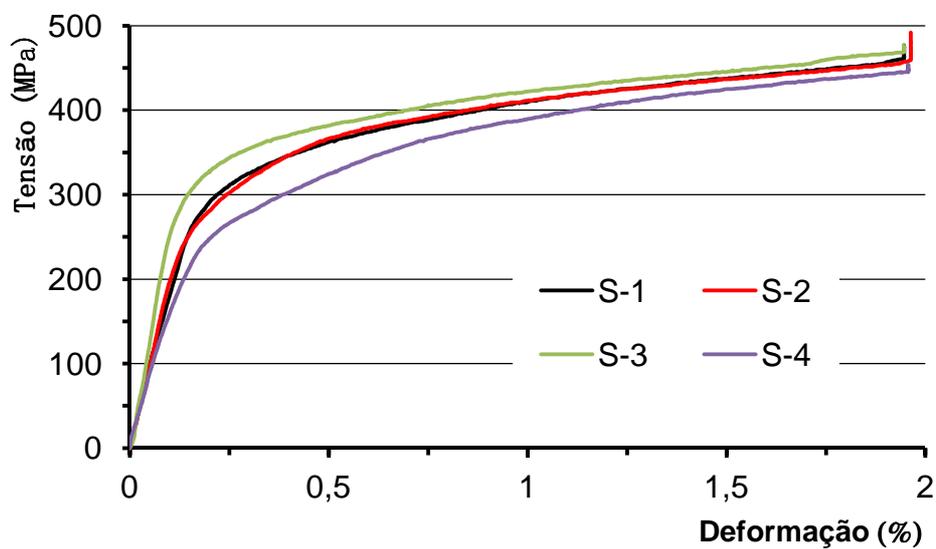


Figura C12 – Curva tensão versus deslocamentos 2LSS\_76x76x6,4\_L189\_1

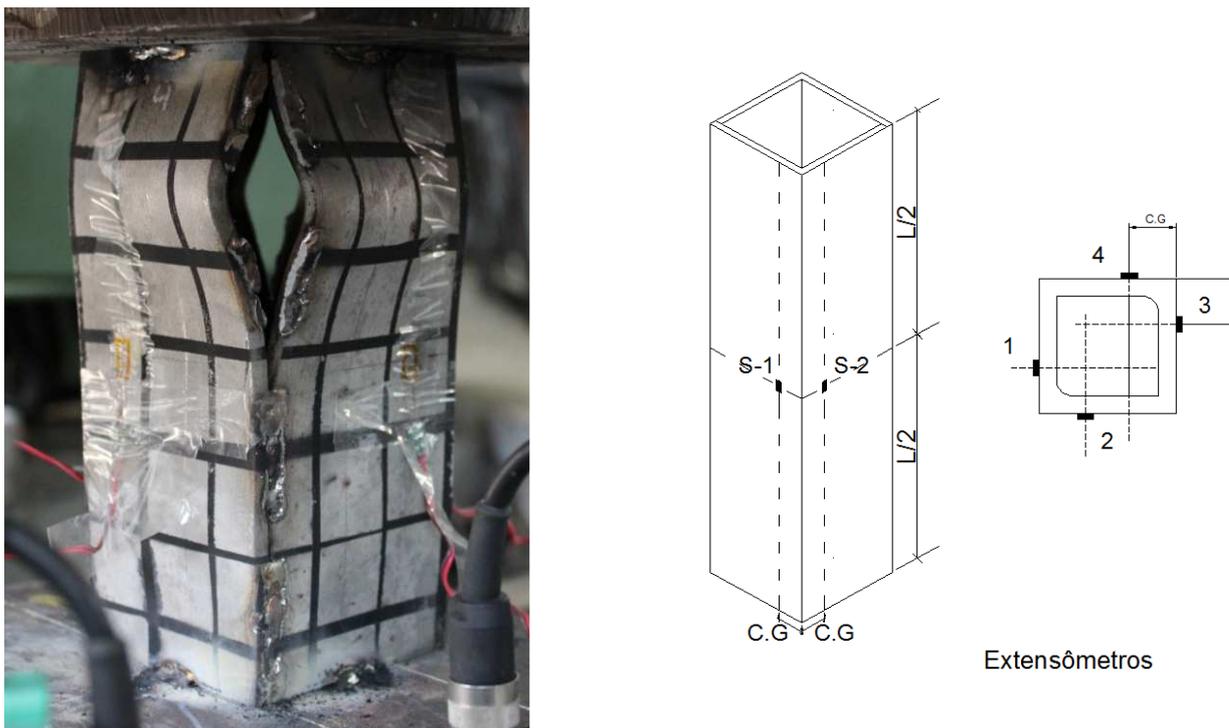


Figura C13 – Cantoneiras 2LSS\_76x76x6,4\_L201\_1

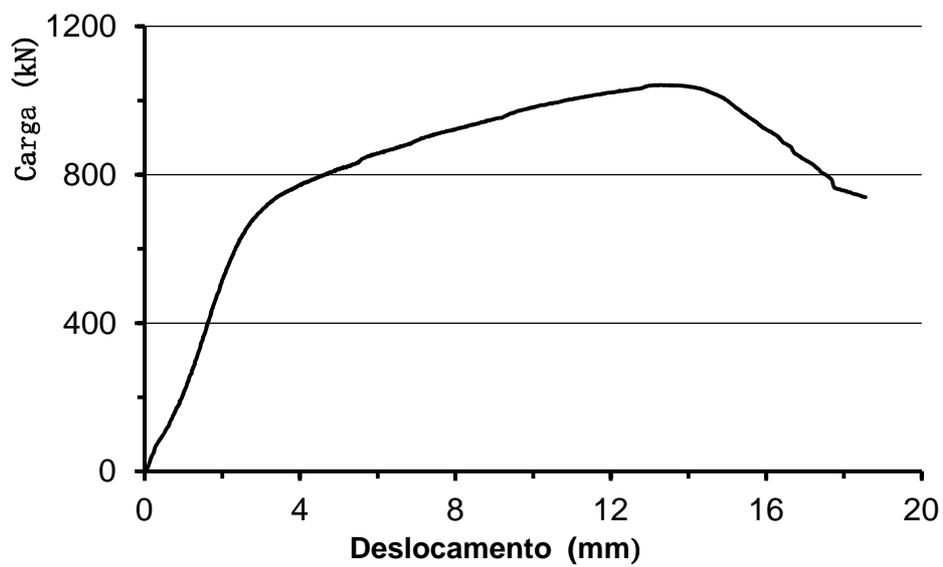


Figura C14 – Curva carga versus deslocamento vertical 2LSS\_76x76x6,4\_L201\_1

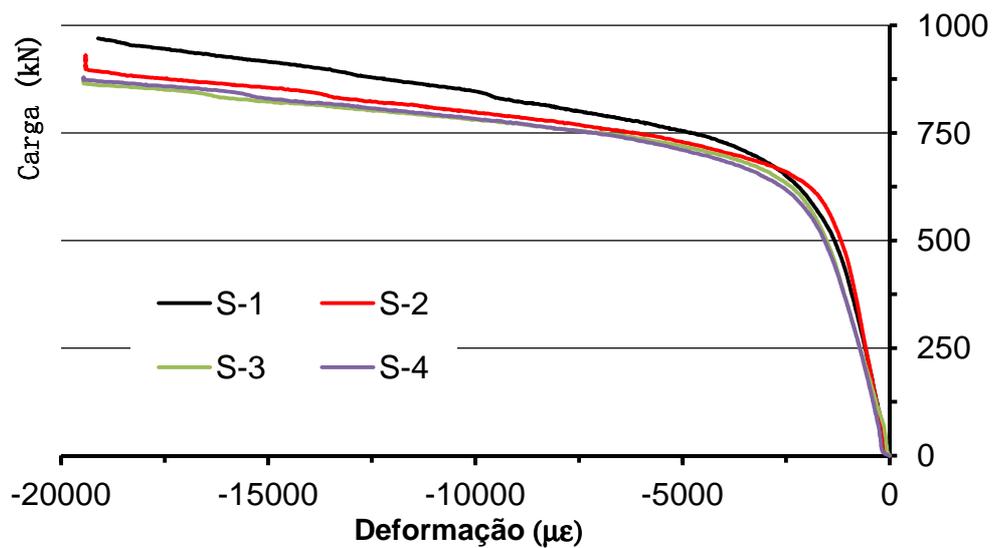


Figura C15 – Curva carga versus deformação 2LSS\_76x76x6,4\_L201\_1

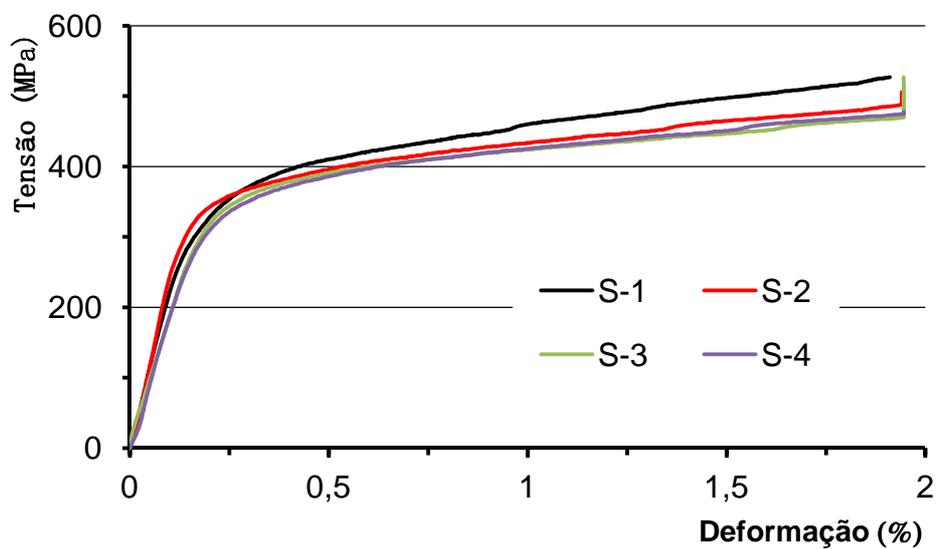


Figura C16 – Curva tensão versus deslocamentos 2LSS\_76x76x6,4\_L201\_1

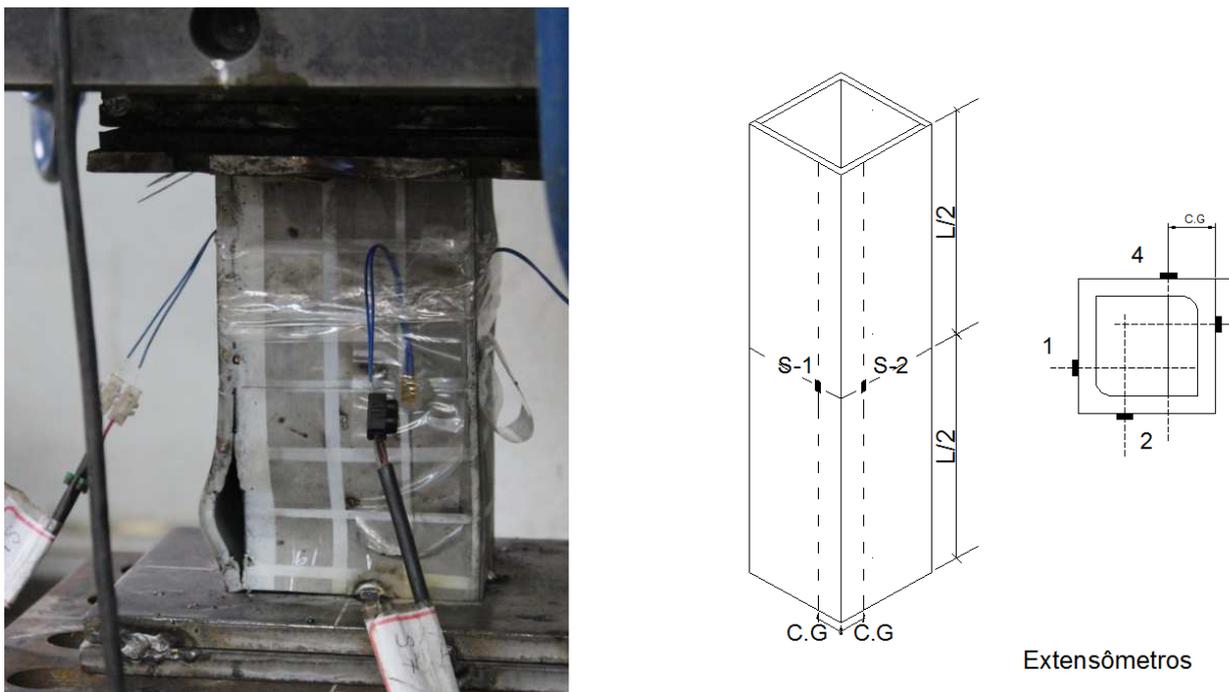


Figura C17 – Cantoneiras 2LSS\_102x102x6,4\_L193\_1

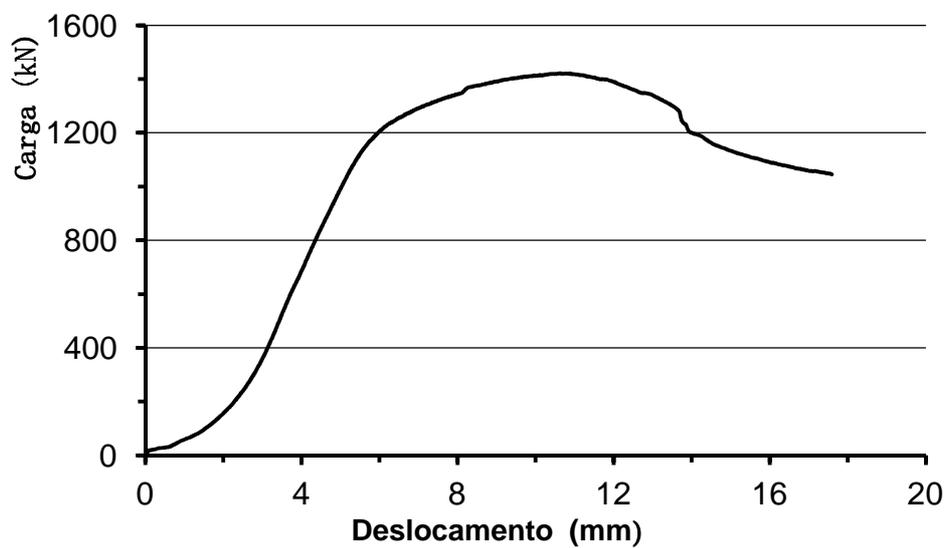


Figura C18 – Curva carga versus deslocamento vertical 2LSS\_102x102x6,4\_L193\_1

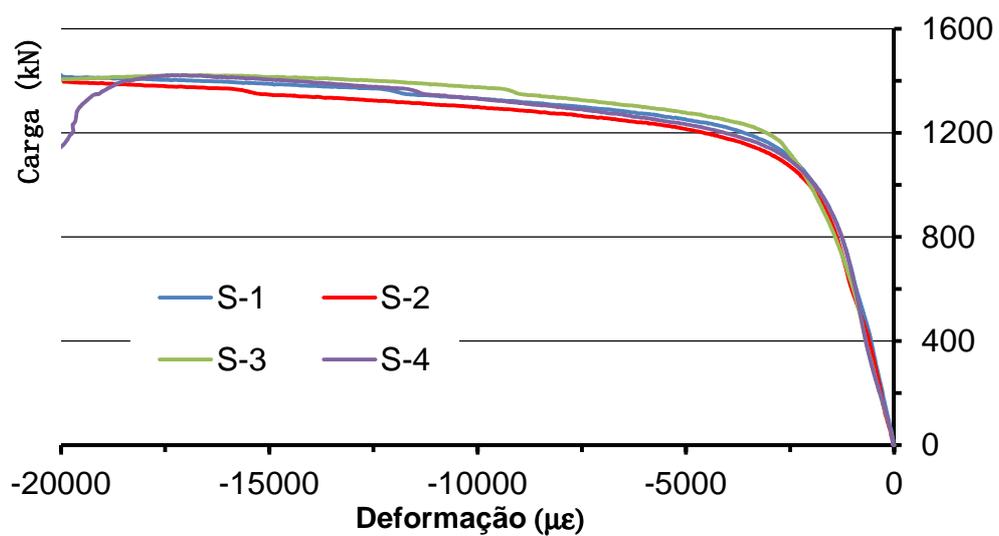


Figura C19 – Curva carga *versus* deformação 2LSS\_102x102x6,4\_L193\_1

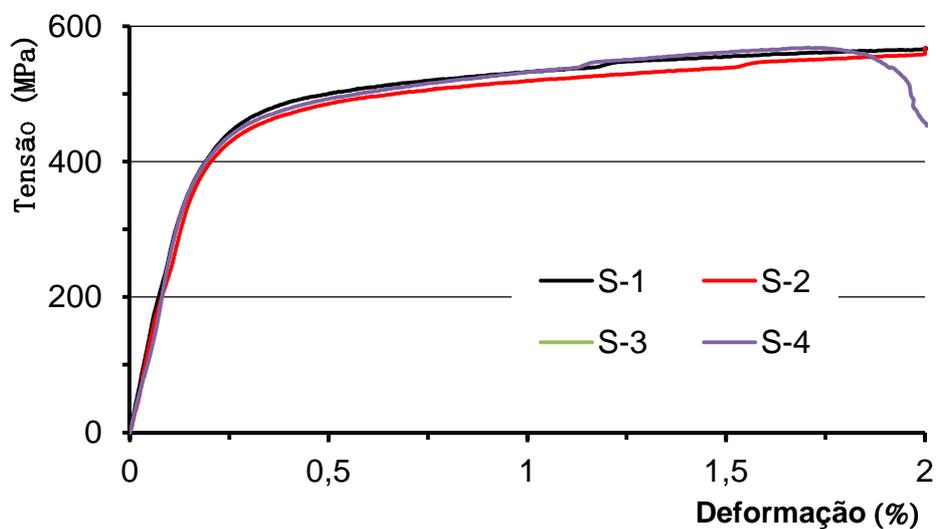


Figura C20 – Curva tensão *versus* deslocamentos 2LSS\_102x102x6,4\_L193\_1

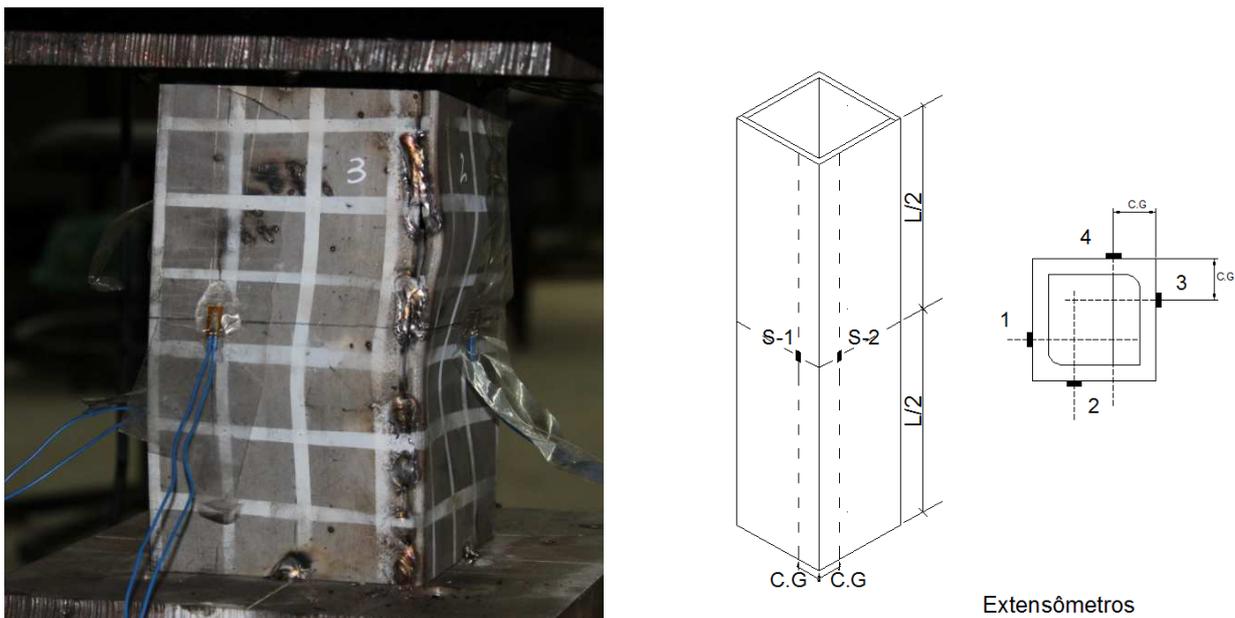


Figura C21 – Cantoneiras 2LSS\_102x102x6,4\_L200\_1

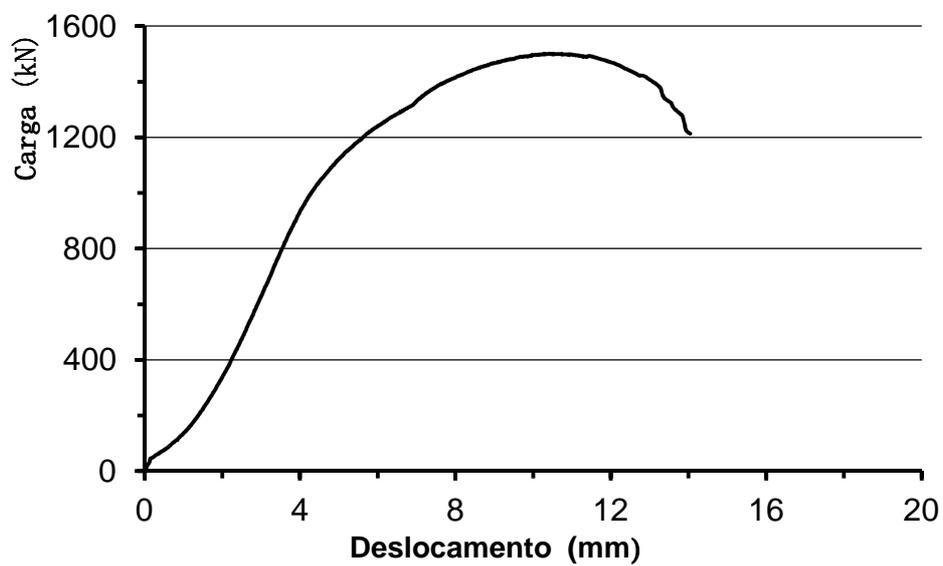


Figura C22 – Curva carga versus deslocamento vertical 2LSS\_102x102x6,4\_L200\_1

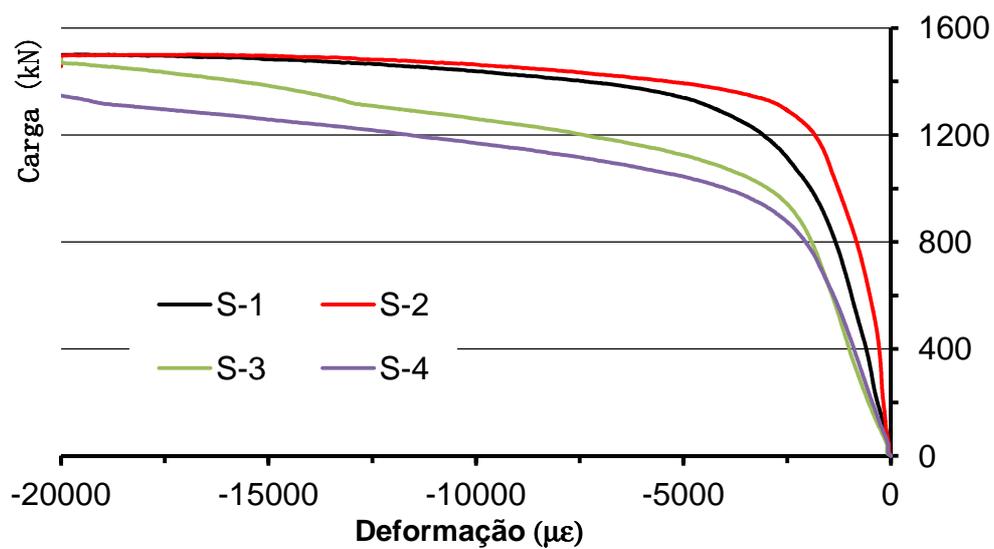


Figura C23 – Curva carga versus deformação 2LSS\_102x102x6,4\_L200\_1

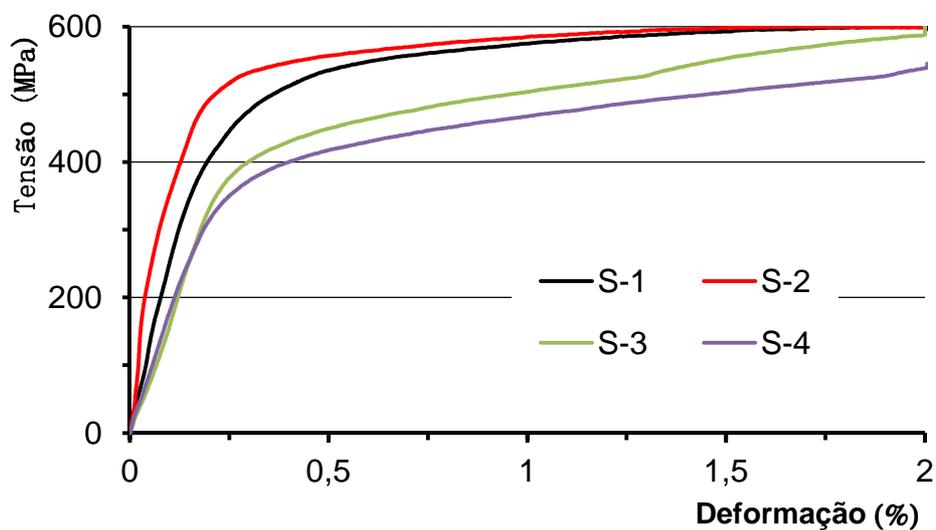


Figura C24 – Curva tensão versus deslocamentos 2LSS\_102x102x6,4\_L200\_1

## ANEXO D

Neste anexo são apresentadas as dimensões experimentais de todas as cantoneiras laminadas em aço carbono e em aço inoxidável do programa de ensaios experimentais que não foram apresentadas no desenvolvimento desta tese.

Tabela D1 – Resultado da caracterização do aço inoxidável a compressão

Cantoneiras	Comprimento mm	b <sub>1</sub>	t <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	t <sub>2</sub>
LC_64x64x4,8	502	63,52	5,10	63,76	5,00
	503	63,18	4,96	63,52	5,02
	750	63,87	5,00	63,70	4,83
	750	63,47	4,97	63,83	4,87
	1000	63,53	4,90	63,70	4,97
	1000	63,53	5,07	63,63	4,97
LC_76x76x6,4	485	76,00	6,60	76,90	7,00
	502	76,00	6,70	77,40	7,00
	750	76,20	6,50	77,20	6,70
	750	75,90	6,60	75,90	7,00
	1004,5	76,80	6,60	77,00	6,70
	1005,5	76,00	6,60	77,00	6,60
LC_102x102x6,4	272	101,70	6,50	101,70	7,00
	272	102,00	6,70	102,00	6,70
	937	101,80	6,90	101,80	6,80
	943	101,80	6,60	101,20	6,50
	1505	101,80	7,00	101,40	6,60
	1517	101,20	6,70	101,00	6,80

Onde: b<sub>1</sub> e b<sub>2</sub> são referentes as abas

t<sub>1</sub> e t<sub>2</sub> são referentes as abas

Tabela D2 – Resultado da caracterização do aço inoxidável a compressão

Cantoneira	Comprimento mm	$b_1$	$t_1$	$b_2$	$t_2$
LSS_64x64x4,8	250	64,51	4,89	64,50	4,91
	250	64,50	5,00	64,00	4,87
	500	64,52	5,01	64,12	4,93
	500	64,42	4,78	64,00	4,73
	1000	64,37	4,95	64,20	4,69
	1000	64,61	4,85	64,18	4,86
	1470	64,08	4,91	64,23	4,59
LSS_76x76x6,4	152	75,03	6,13	98,65	6,69
	496	75,92	6,22	75,12	6,14
	753	75,98	6,24	75,10	6,32
	990	75,40	6,26	75,90	6,48
	1196	75,16	6,14	75,38	6,28
	1410	75,54	6,40	75,16	6,24
LSS_102x102x6,4	203	98,80	6,71	98,84	6,81
	407	99,24	6,68	98,65	6,69
	998	99,06	6,79	99,35	6,75
	1480	99,16	6,64	98,76	6,73
	1893	98,62	6,84	98,97	6,89

Onde:  $b_1$  e  $b_2$  são referentes as abas

$t_1$  e  $t_2$  são referentes as abas

## ANEXO E

Neste anexo são apresentadas os resultados dos ensaios experimentais de todas as cantoneiras laminadas em aço carbono com seção transversal 51x51x4,8 que não foram apresentadas no desenvolvimento desta tese.

**Tabela 24 – Cantoneiras laminadas em aço carbono com os seus respectivos modos de falhas de correntes dos ensaios**

Cantoneiras	Comprimento mm	Ensaio
LC_51x51x4,8	400,0	Local
	500,0	Local
	750,0	Flexão
	1000,0	Flexão
	1500,0	Flexão
	1000,0	Flexão



Figura E1 – Curva tensão *versus* deslocamentos LC\_51x51x4,8\_L400\_1

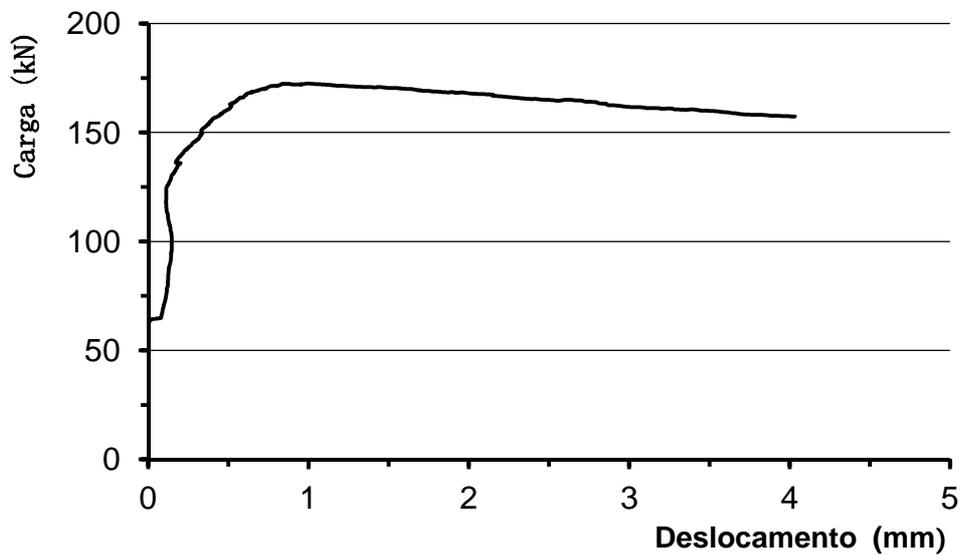


Figura E2 – Curva tensão *versus* deslocamentos LC\_51x51x4,8\_L500\_1



Figura E3 – Curva tensão *versus* deslocamentos LC\_51x51x4,8\_L750\_1

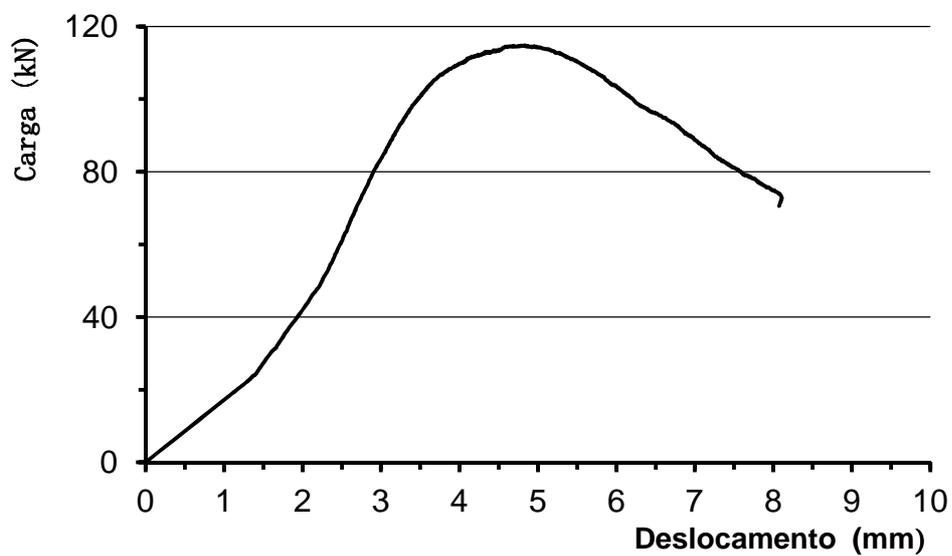


Figura E4 – Curva tensão *versus* deslocamentos LC\_51x51x4,8\_L1000\_1

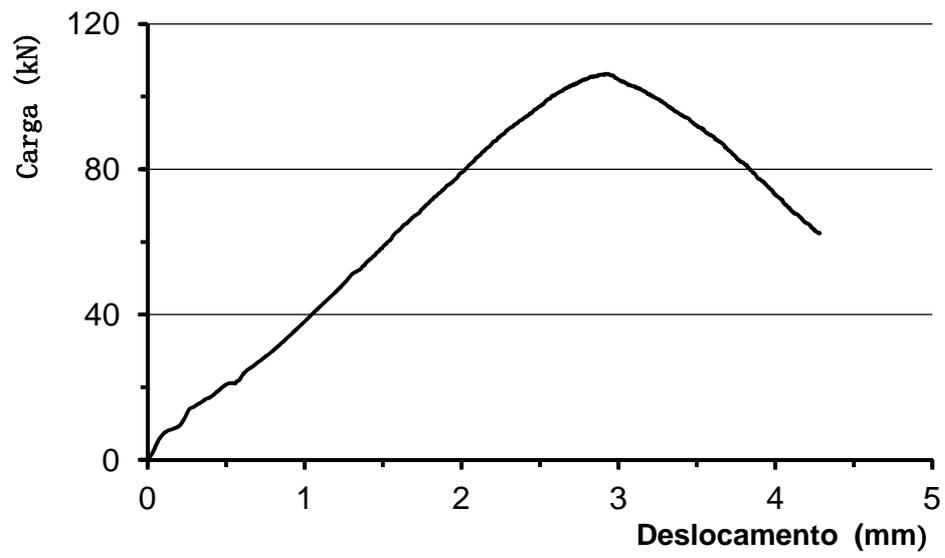


Figura E5 – Curva tensão *versus* deslocamentos LC\_51x51x4,8\_L1500\_1