

## 4 Estudo Experimental

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais do Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro no período de Junho de 2002 a Outubro de 2003.

A descrição genérica dos ensaios e parâmetros investigados está apresentada a seguir.

### 4.1. Características do PE-3

O traçado geométrico do duto PE-3 tem a forma em ziguezague (no plano horizontal) indicada nas Figuras 4.1, com ângulo  $\alpha = 10^\circ$  e comprimento  $L$  do trecho reto igual a 12 m. A pressão interna no duto atinge 4,5 MPa. Algumas características físicas e geométricas do protótipo são apresentadas na Tabela 4.1.

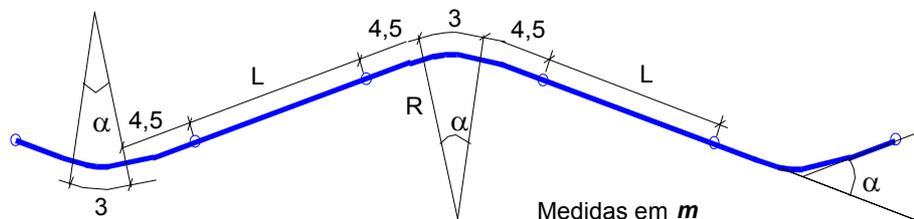


Figura 4.1 – Características geométricas do duto PE-3

Tabela 4.1 – Características físicas e geométricas do duto PE-3

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Diâmetro Externo [mm]	457
Espessura de parede [mm]	12,7
Raio de curvatura [m]	17,5
Graduação do aço	API 5L X52
$f_y$ [MPa]	358
Módulo de Elasticidade (E) [MPa]	206000
Coeficiente de Poisson	0,30
Coeficiente de Expansão Térmica [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]	$1,17 \times 10^{-5}$
Temperatura de operação [ $^{\circ}\text{C}$ ]	80 (105)

#### 4.2. Características dos Modelos

Os modelos são constituídos de tubos de aço com diâmetro externo de 76,2 mm e seu traçado geométrico tem a forma em ziguezague (no plano horizontal) com ângulo  $\alpha$  assumindo os valores  $5^{\circ}$ ,  $10^{\circ}$  e  $15^{\circ}$ . Características físicas e geométricas dos modelos são retiradas de ensaios que serão apresentados nos itens seguintes e um resumo é apresentado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Características físicas e geométricas dos modelos

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Diâmetro Externo [mm]	76,2
Espessura de parede [mm]	2,12
Raio de curvatura [m]	2,92
Graduação do aço	APOLO NBR6591
$f_y$ [MPa]	345
Módulo de Elasticidade (E) [MPa]	210000
Coeficiente de Poisson	0,279
Coeficiente de Expansão Térmica [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]	$1,26 \times 10^{-5}$
Temperatura de operação [ $^{\circ}\text{C}$ ]	80 (105)

Cada tubo de aço tem comprimento retilíneo de 6 m, e os modelos ensaiados apresentam comprimentos totais,  $L_D$ , de 12m, 16m e 18m, e comprimento do tramo reto,  $L$ , de 2m (para  $L_D$  de 12m e 16m) e 4m (para  $L_D$  de 18m). Para que os comprimentos desejados fossem obtidos, estes tubos foram

soldados de forma que nenhuma seção soldada coincidissem com o centro da curva. Estes pontos de solda estão apresentados na Figura 4.2.

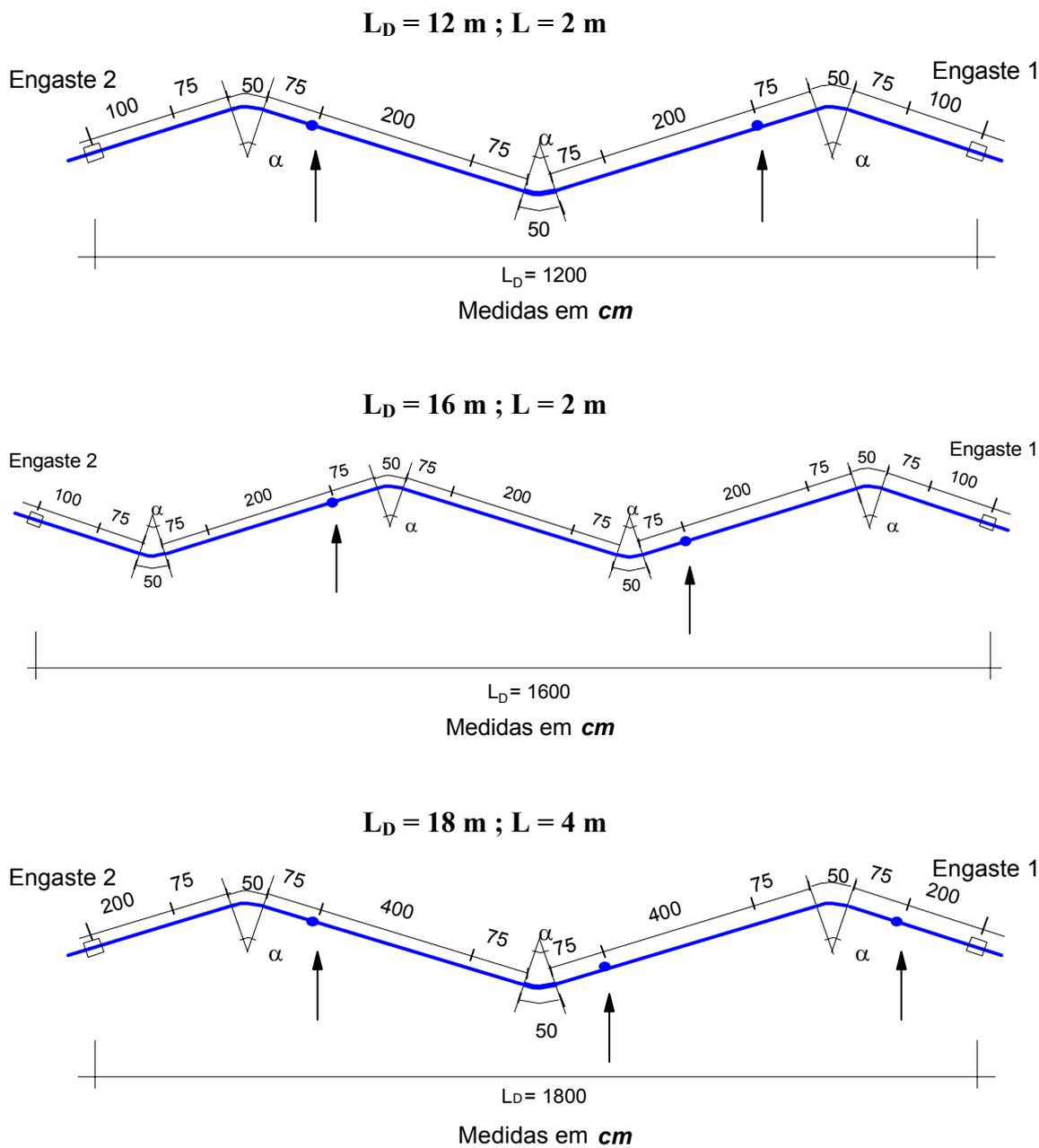


Figura 4.2 – Localização das seções de solda

#### 4.2.1. Características dos Corpos de Prova

As propriedades mecânicas do material do modelo foram obtidas em ensaios de tração e compressão axiais, empregando corpos de prova extraídos do

próprio modelo (tubo com diâmetro externo igual 3"). Foram realizados três ensaios de tração e três de compressão.

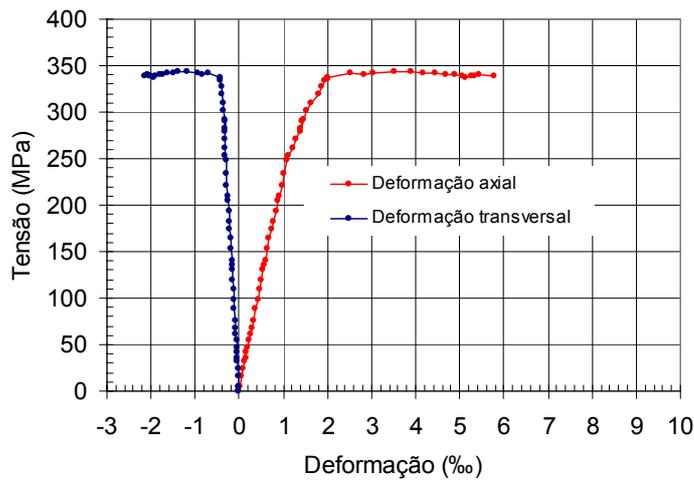
O corpo de prova empregado nos ensaios de tração (Figura 4.3) tem comprimento igual a quatro vezes o seu diâmetro ( $l = 4\phi = 304,8mm$ ). O ensaio de compressão foi realizado empregando o corpo de prova mostrado também na Figura 4.3, com mesma seção transversal do tubo do modelo e altura igual a 2 vezes o diâmetro do tubo ( $l = 2\phi = 152,4 mm$ ). As deformações, longitudinais e transversais, foram medidas com extensômetros elétricos de resistência em dois pontos diametralmente opostos.



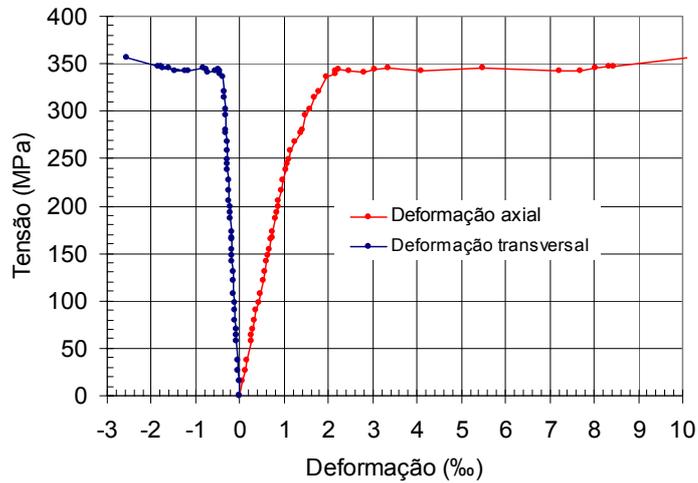
Figura 4.3 – Corpos de prova empregados no ensaio de tração e compressão axiais

As curvas tensão-deformação obtidas nos ensaios estão mostradas nas Figuras 4.4 e 4.5. Em cada figura estão representadas as curvas correspondentes aos valores médios das deformações axiais e transversais.

**Corpo de prova 1**



**Corpo de prova 2**



**Corpo de prova 3**

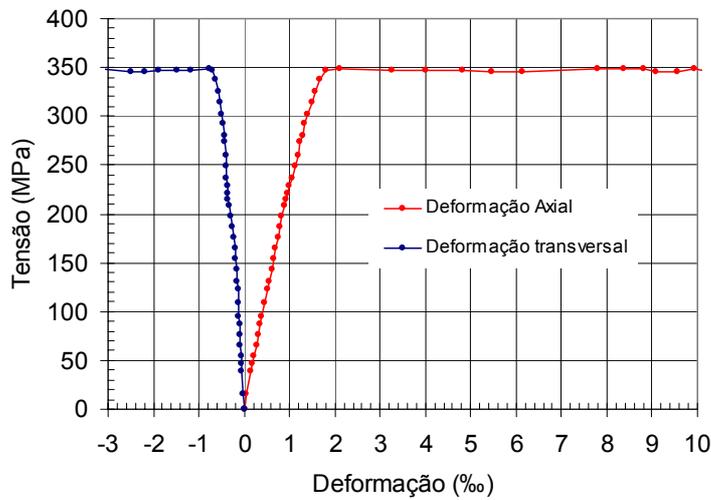


Figura 4.4 - Curvas Tensão-Deformação obtidas no ensaio de tração axial

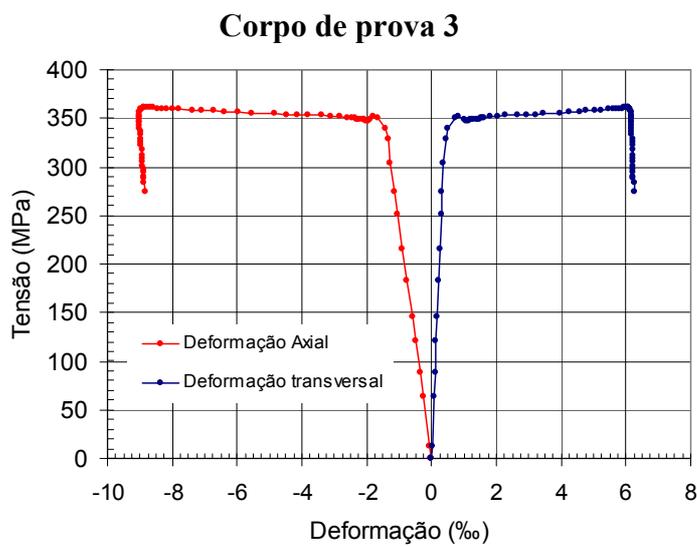
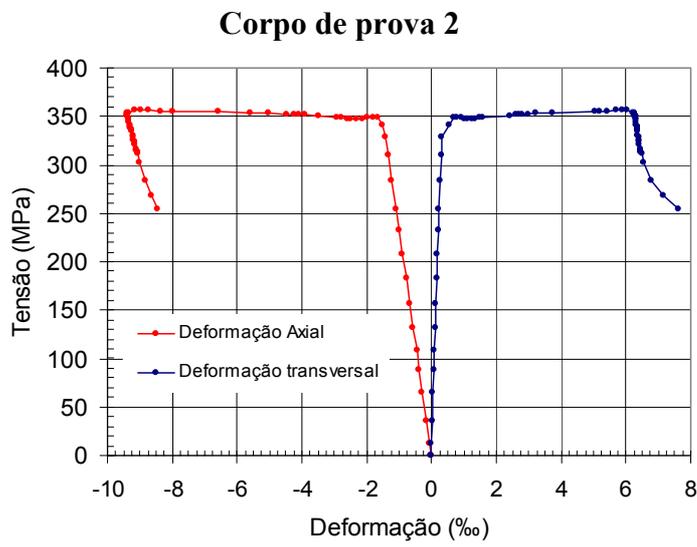
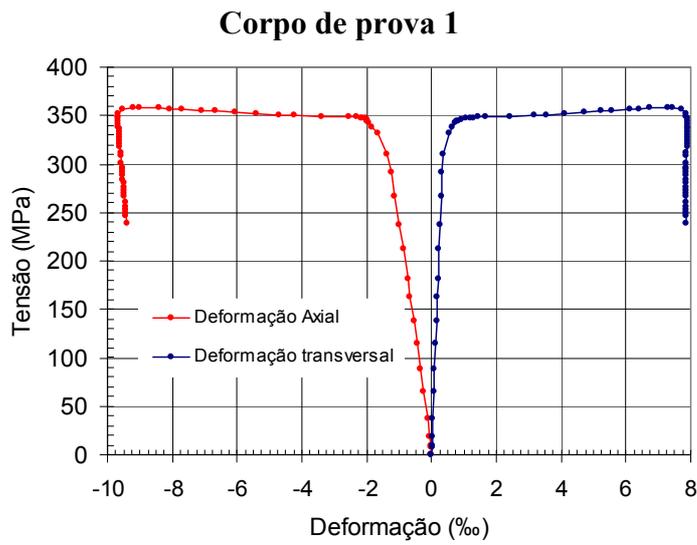


Figura 4.5 - Curvas Tensão-Deformação obtidas no ensaio de compressão axial

A partir dessas curvas foram obtidos a tensão de escoamento, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, cujos valores são os fornecidos nas Tabelas 4.3 e 4.4.

Os valores do módulo de elasticidade,  $E$ , representam a inclinação da reta ajustada aos pontos dos trechos retos (elásticos) das curvas. Os valores do coeficiente de Poisson fornecidos são os valores médios para tensões  $50 \text{ MPa} < \sigma < 250 \text{ MPa}$  apresentados nas Figuras 4.6 e 4.7.

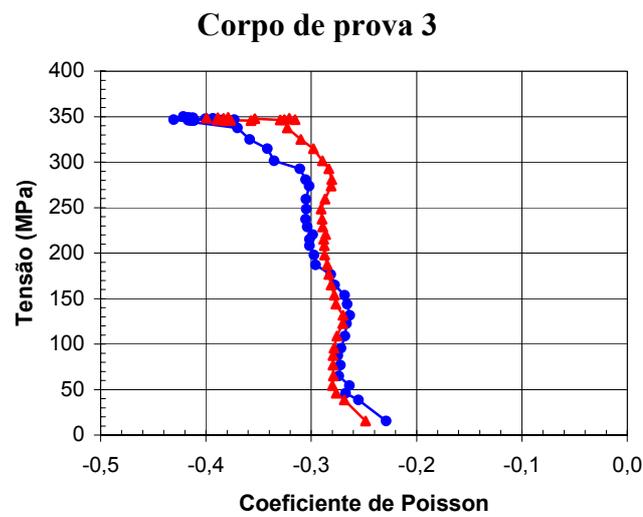
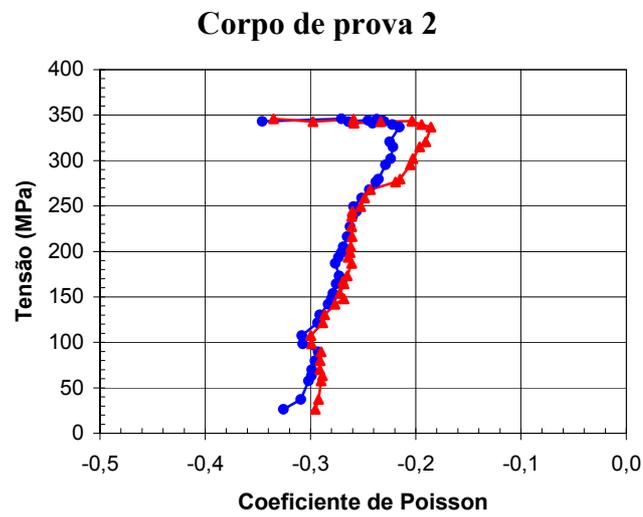
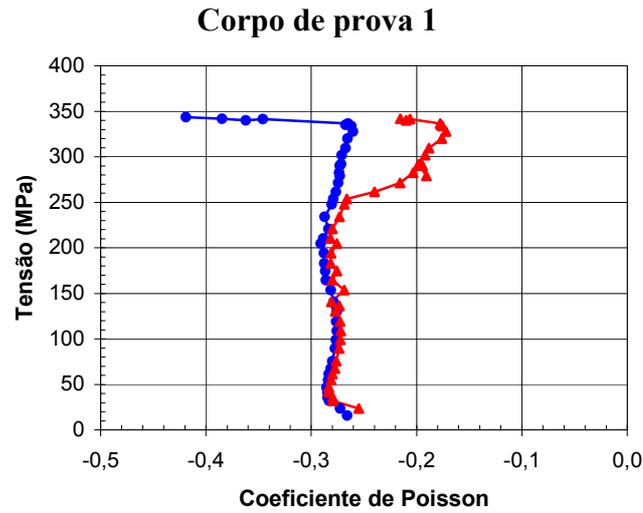


Figura 4.6 - Coeficiente de Poisson medido em dois pontos diametralmente opostos no ensaio de tração axial

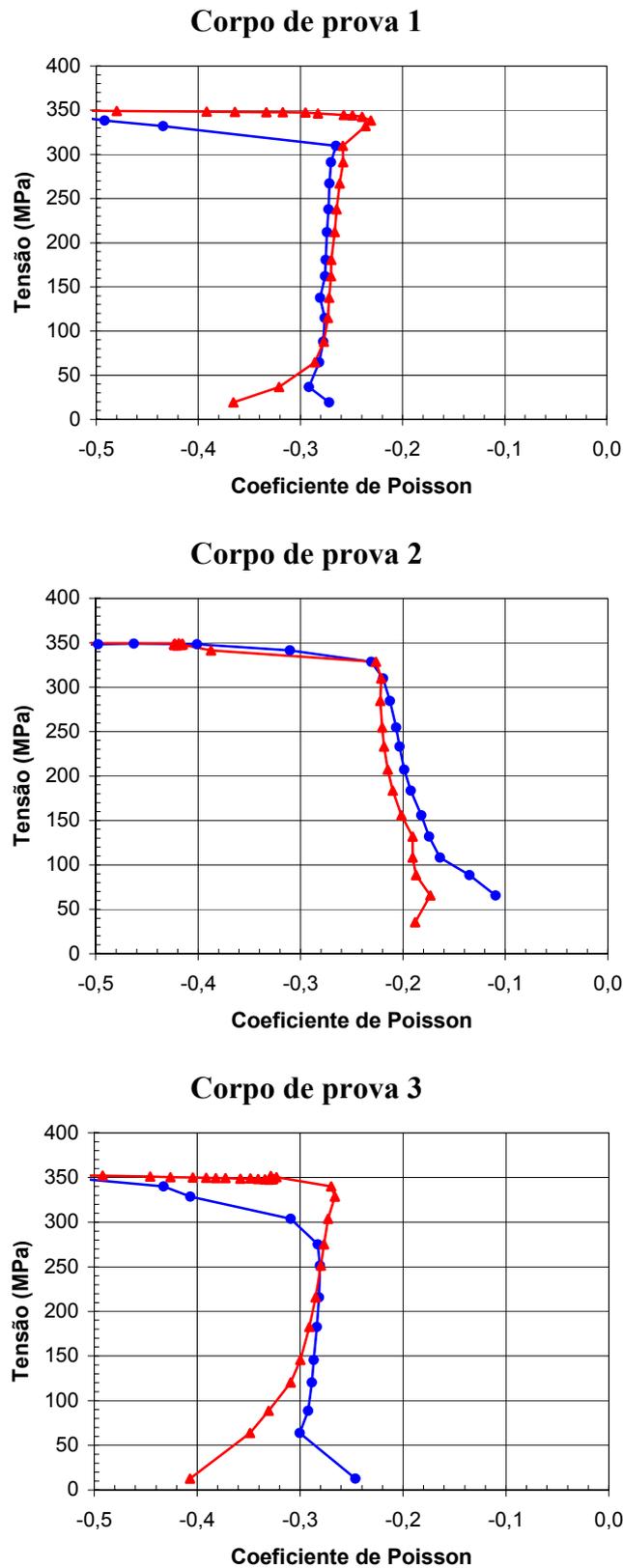


Figura 4.7 - Coeficiente de Poisson medido em dois pontos diametralmente opostos no ensaio de compressão axial

Tabela 4.3 – Propriedades mecânicas do material dos modelos sob **tração** axial

	$f_y$ (MPa)	E (MPa)	$\nu$	$f_{max}$ (MPa)
Corpo-de-prova 1	343,0	210800	0,279	352,0
Corpo-de-prova 2	345,0	209000	0,277	398,0
Corpo-de-prova 3	347,0	210200	0,282	362,0

Tabela 4.4 – Propriedades mecânicas do material dos modelos sob **compressão** axial

	$f_y$ (MPa)	E (MPa)	$\nu$	$f_{max}$ (MPa)
Corpo-de-prova 1	347,0	217800	0,275	358,0
Corpo-de-prova 2	349,0	224400	0,187*	356,0
Corpo-de-prova 3	352,0	228700	0,295	361,0

\*Resultado a ser desconsiderado

onde:

$f_y$  = tensão de escoamento, correspondente a uma deformação residual de 0,2 %;

E = módulo de elasticidade;

$\nu$  = coeficiente de Poisson;

$f_{max}$  = tensão máxima observada no ensaio.

#### 4.2.2. Coeficiente de Dilatação Térmica

O coeficiente de dilatação térmica,  $\alpha_T$ , foi medido num corpo de prova extraído do próprio tubo do modelo ( $\phi = 76,2$  mm), com comprimento de 1984 mm. O corpo de prova foi submetido a seis ciclos de temperatura, com a temperatura variando entre 27°C e 80°C. A variação de temperatura foi conseguida introduzindo-se no interior do corpo de prova água quente e água fria alternadamente. A variação de comprimento do corpo de prova foi medida com um relógio comparador (sensibilidade de 0,01 mm) e a variação da temperatura com um termopar colocado em contato com a parede do corpo de prova.

Os resultados obtidos estão mostrados na Figura 4.8 e na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Resultados do ensaio de determinação do coeficiente de dilatação térmica

Temperatura (°C)	Leitura (mm)	$\Delta T$ (°C)	$\Delta L$ (mm)	$\alpha_T = \Delta L / (\Delta T \cdot 1984)$ (°C <sup>-1</sup> )
28,0	1,51			
79,0	2,72	51,00	1,21	1,196E-05
26,9	1,74	-52,15	-0,98	9,472E-06
80,2	3,06	53,35	1,32	1,247E-05
27,2	1,55	-53,05	-1,51	1,435E-05
80,3	2,97	53,15	1,42	1,347E-05
27,0	1,77	-53,30	-1,20	1,135E-05
80,2	3,18	53,20	1,41	1,336E-05
27,2	1,65	-53,00	-1,53	1,455E-05
80,5	3,02	53,30	1,37	1,296E-05
27,6	1,72	-52,88	-1,30	1,239E-05
80,2	3,06	52,58	1,34	1,285E-05

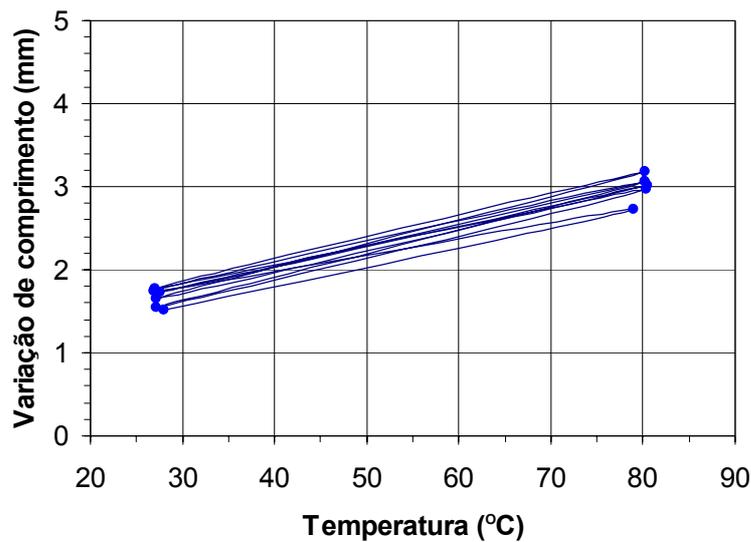


Figura 4.8 – Variação de comprimento em função da variação da temperatura

O valor final a ser considerado é a média dos valores fornecidos na última coluna da tabela, ou seja,

$$\alpha_T = 12,6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

### 4.2.3. Execução do Ziguezague

Para o duto adquirir a forma ziguezague foi montado um sistema composto de uma garra metálica (Figura 4.9) em que ao aplicar uma força na sua extremidade ela vai fechando e dobrando o duto num raio de curvatura de 2,92 metros. Para obter a precisão do ângulo desejado foram utilizadas duas hastes de alumínio (Figura 4.10) fixadas fora do trecho a ser encurvado.

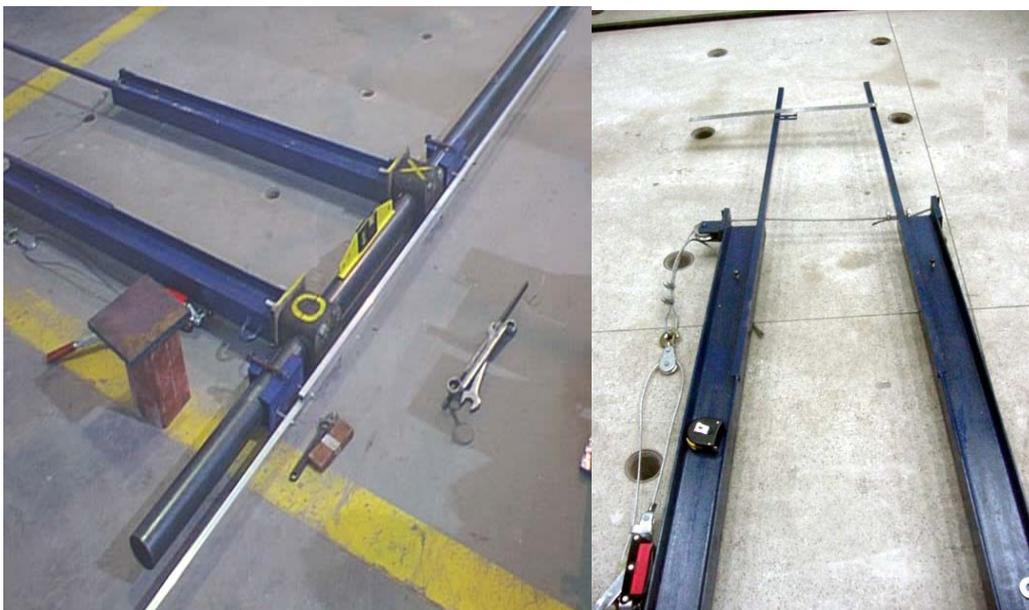


Figura 4.9 – Sistema utilizado para a dobra do duto



Figura 4.10 – Hastes de alumínio para determinação do ângulo

Para os ângulos de  $5^\circ$  e  $10^\circ$  não foi observada ovalização na seção duto, o que não ocorreu para o ângulo de  $15^\circ$  onde formou-se um enrugamento na parede do duto (Figura 4.11). A solução encontrada para que não se formasse este enrugamento foi obtida com a colocação de abraçadeiras ao longo da região dobrada, como mostra a Figura 4.12.

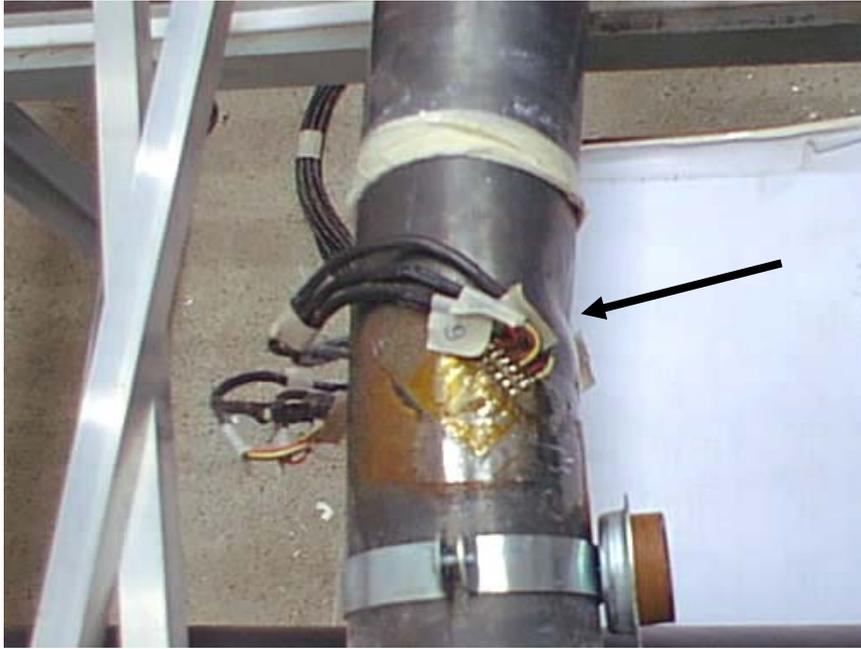


Figura 4.11 – Enrugamento no duto

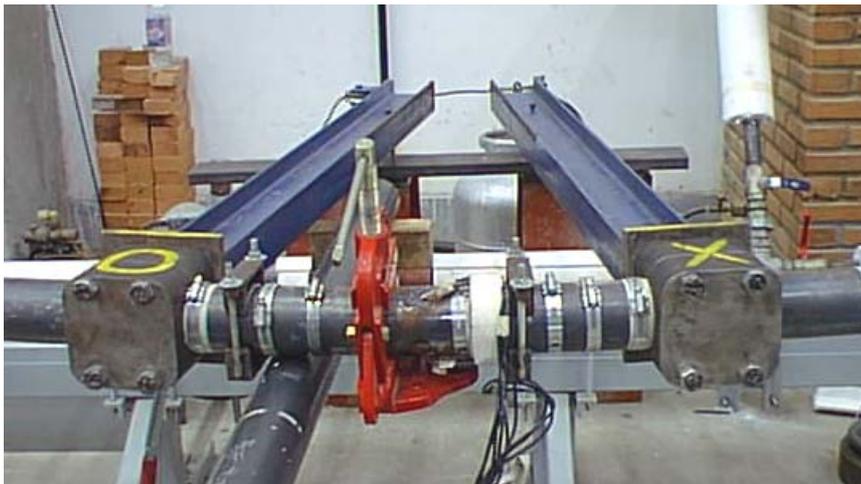


Figura 4.12 – Abraçadeiras na região da dobra

### 4.3. Características da Bancada de Ensaio

#### 4.3.1. Descrição Geral

A representação esquemática da Bancada de Ensaio está mostrada na Figura 4.13 e uma vista geral na Figura 4.14.

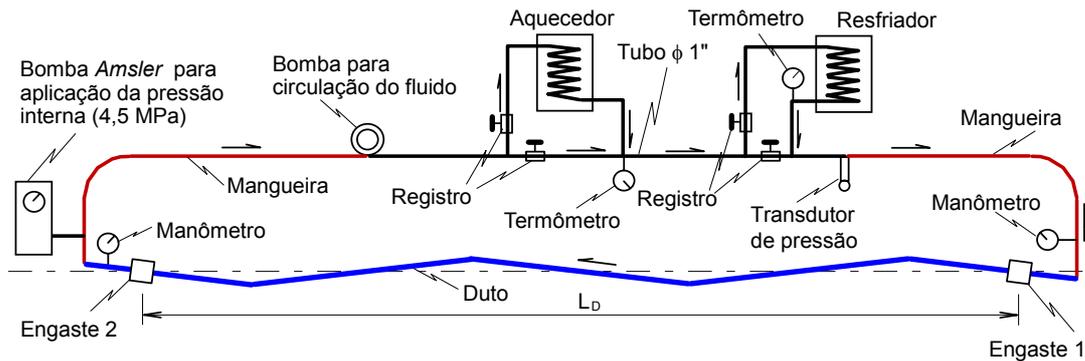
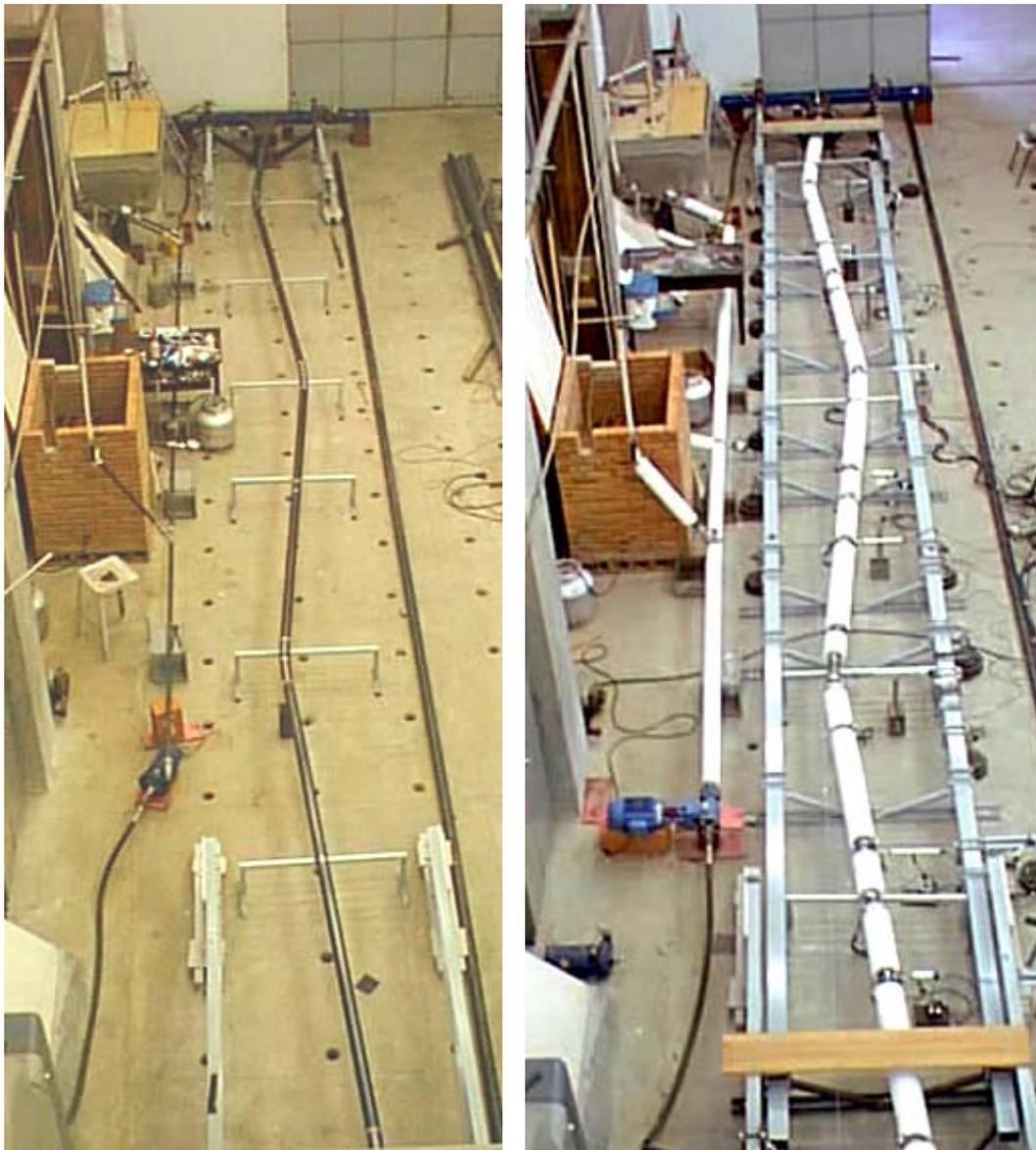


Figura 4.13 – Representação esquemática da bancada de ensaios

A bancada é constituída essencialmente de um circuito fechado dentro do qual circula um fluido, com os seguintes componentes:

- Mangueiras de alta pressão  $\phi = 1''$ ;
- Tubos metálicos  $\phi = 1''$ ;
- Duto (modelo) a ser ensaiado;
- Um aquecedor;
- Um resfriador;
- Uma bomba para circulação do fluido no interior do circuito duto/mangueiras;
- Registros para controle do fluxo no aquecedor e resfriador;
- Uma bomba *Amsler* para aplicação e manutenção da pressão interna;
- Manômetros para controle visual da pressão interna;
- Um transdutor de pressão para medição automática da pressão interna durante os ensaios;
- Termômetros analógicos para controle visual da temperatura nas saídas do aquecedor e do resfriador;
- Dispositivos para fixação do duto (Engastes 1 e 2);
- Isolantes térmicos constituídos de calhas de hidrossilicato de cálcio para reduzir a perda de temperatura ao longo do duto. (Figura 4.14b).

Os valores desejados de  $L_D$  (12m, 16m e 18m) são obtidos deslocando-se o engaste 2.



a) Durante a montagem

b) Montagem concluída

Figura 4.14 – Vista panorâmica da bancada de ensaios

Os modelos foram montados sobre apoios metálicos colocados a cada 2 m ao longo do comprimento do tubo (Figuras 4.14). Uma haste de *Teflon* foi colada em cada apoio a fim de minimizar o atrito entre o tubo e o apoio. Os apoios são dotados de sapatas rosqueadas que permitem manter o tubo num mesmo nível. O ajuste do nível é feito com um nível a laser.

O aquecimento do duto é obtido por meio do bombeamento de um fluido (mistura de água e óleo solúvel) através de um aquecedor constituído de uma

serpentina de cobre aquecida com queimadores a gás. Para resfriar o modelo, o fluxo é desviado para o resfriador que também é constituído de uma serpentina de cobre imersa num banho de água. Durante o processo de resfriamento, essa água é gradualmente substituída pela água fornecida por um *freezer* (a 2°C, aproximadamente).

#### 4.3.2. Detalhe dos Engastes

Os engastes foram projetados de modo a não permitir deslocamentos nem rotações. O engaste 1 foi projetado de forma a permitir a medição da reação de apoio na direção longitudinal do modelo. As Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 mostram detalhes destes engastes.

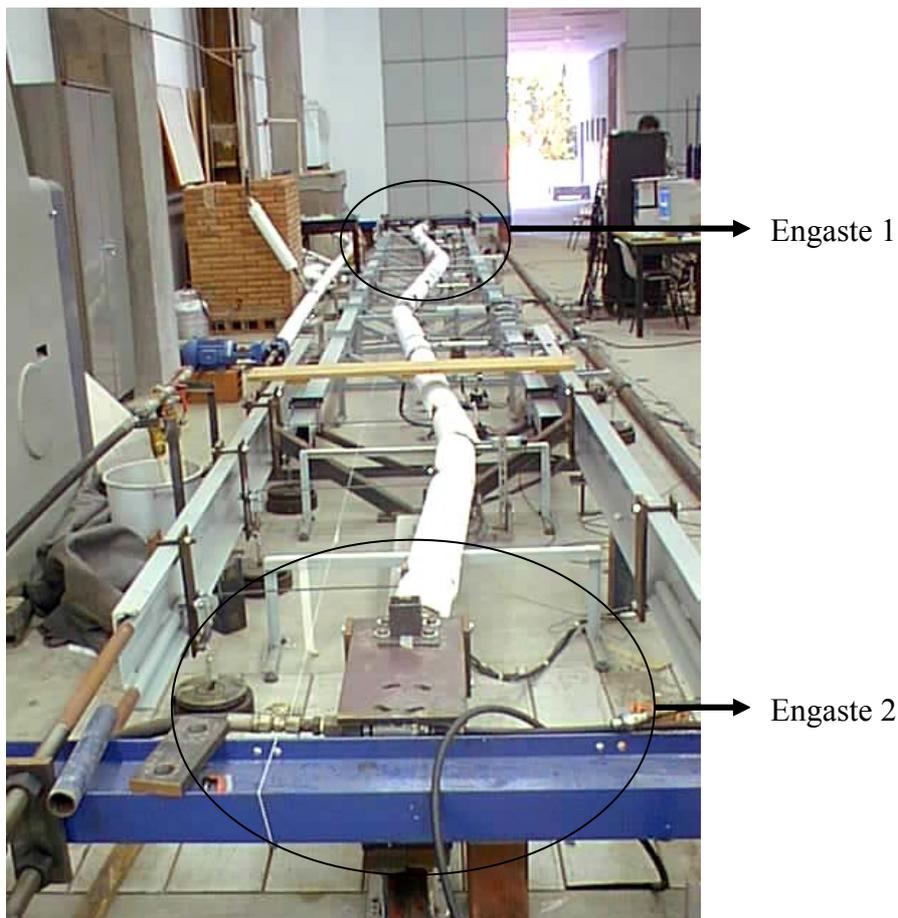
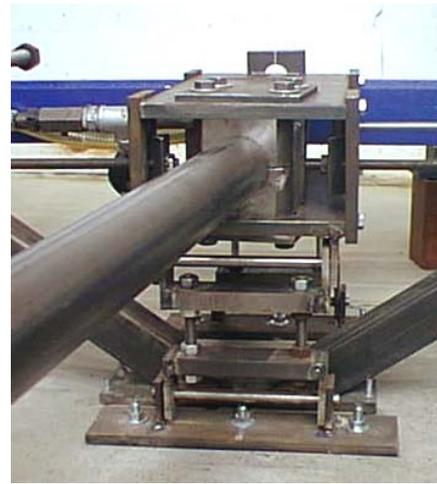
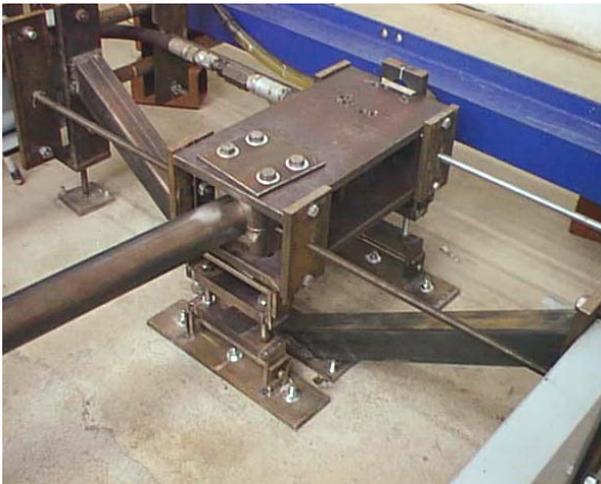
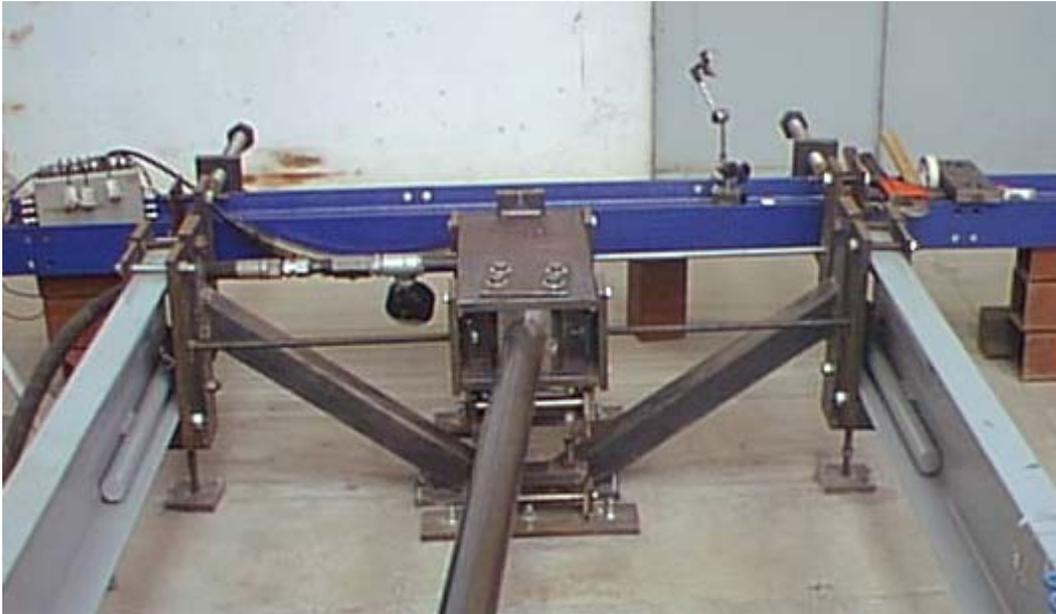


Figura 4.15 – Vista panorâmica dos engastes



Célula de carga

Figura 4.16 – Detalhes do Engaste 1

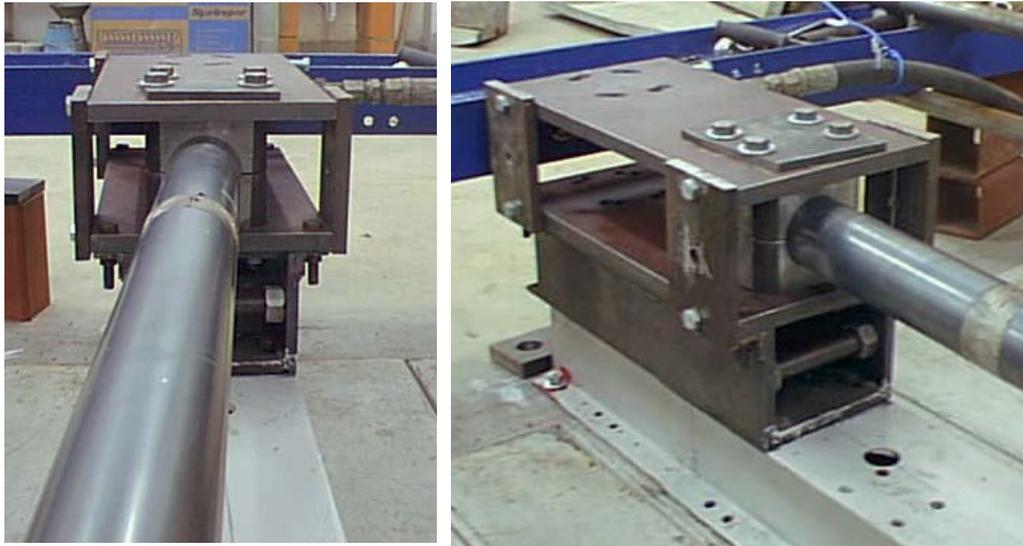
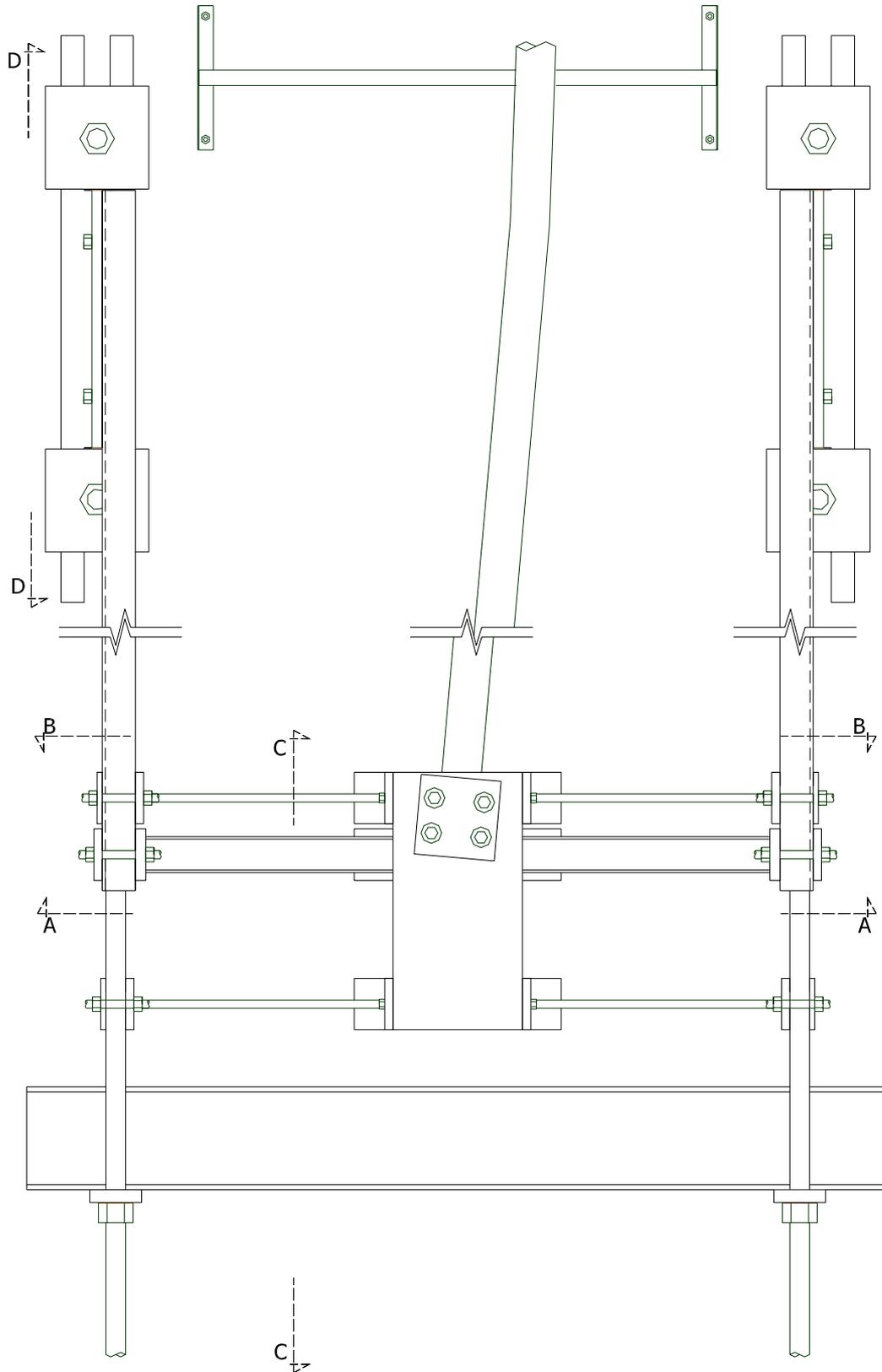


Figura 4.17 – Detalhes do Engaste 2

### 4.3.3. Detalhe das Peças

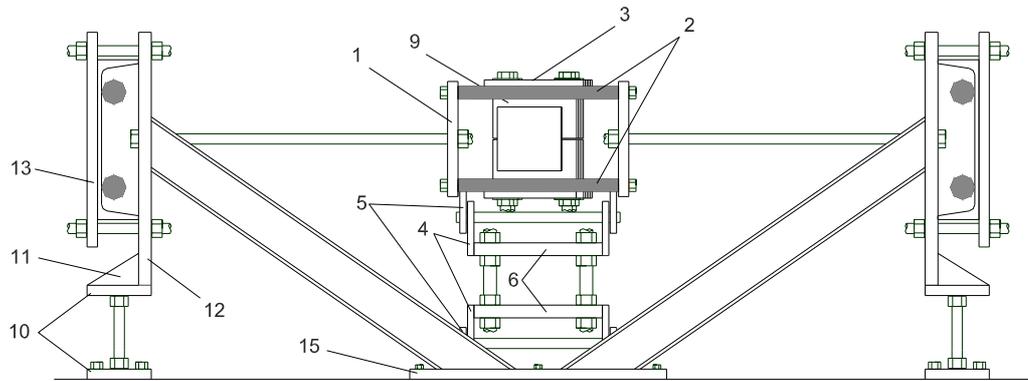
A seguir são apresentados os desenhos da vista superior dos engastes 1 e 2 (Figuras 4.18 e 4.22), com os respectivos cortes. A numeração utilizada nas Figuras 4.19, 4.20 e 4.23 para as peças é apresentado em detalhes nas Figuras 4.21 e 4.24.

VISTA SUPERIOR DO ENGASTE 1  
(SEM ESCALA)

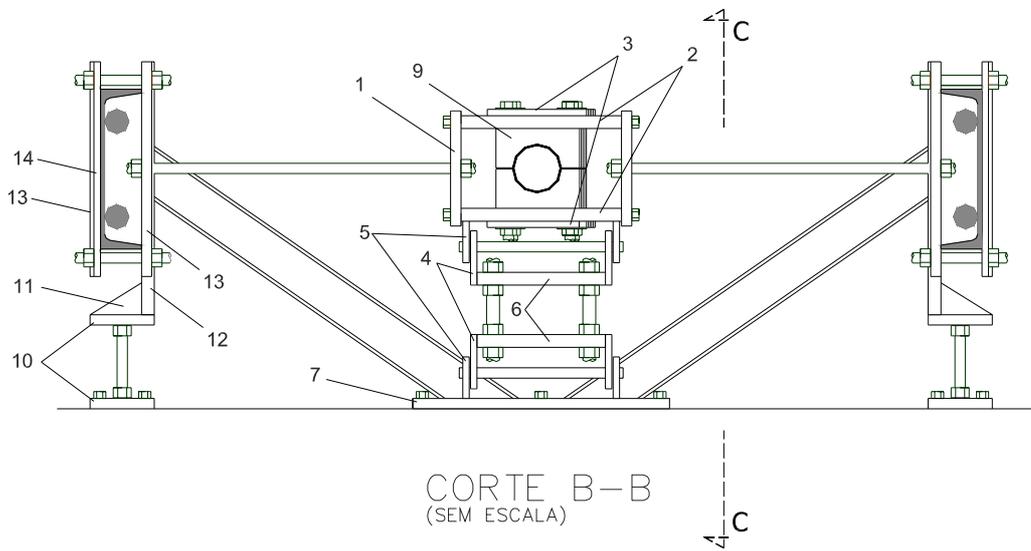


PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0124954/CA

Figura 4.18 – Vista superior do engaste 1

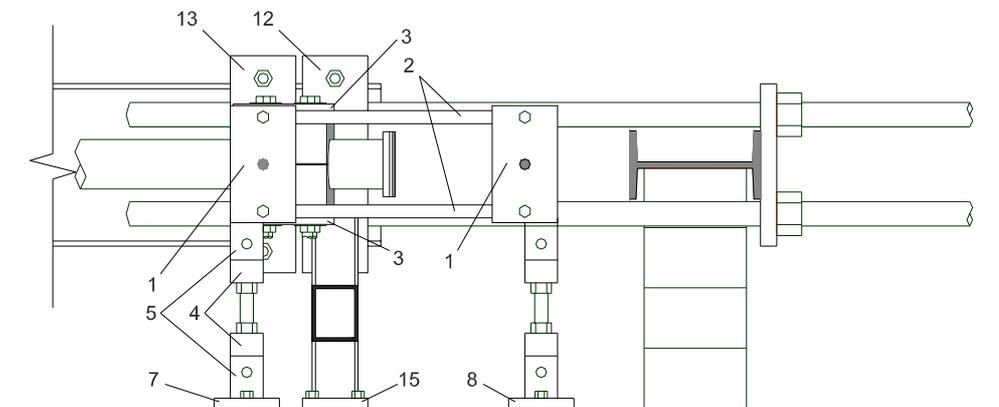


CORTE A-A  
(SEM ESCALA)

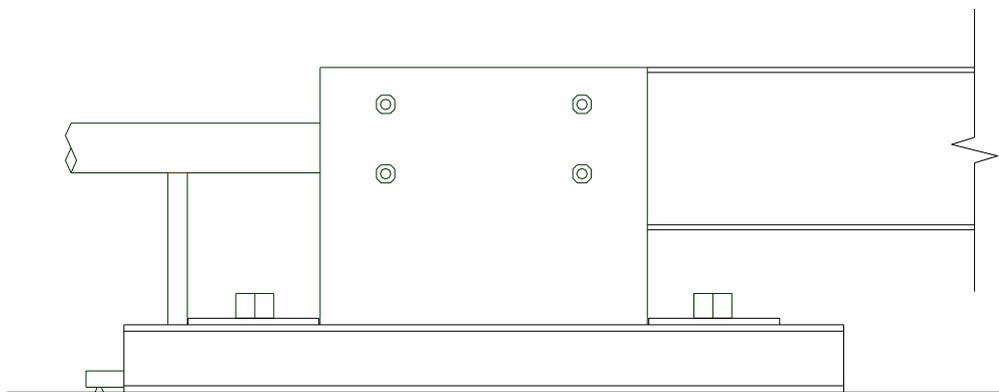


CORTE B-B  
(SEM ESCALA)

Figura 4.19 – Cortes A-A e B-B do engaste 1



CORTE C-C  
(SEM ESCALA)



CORTE D-D  
(SEM ESCALA)

Figura 4.20 – Cortes C-C e D-D do engaste 1

PEÇAS QUE COMPÕE O ENGASTE 1

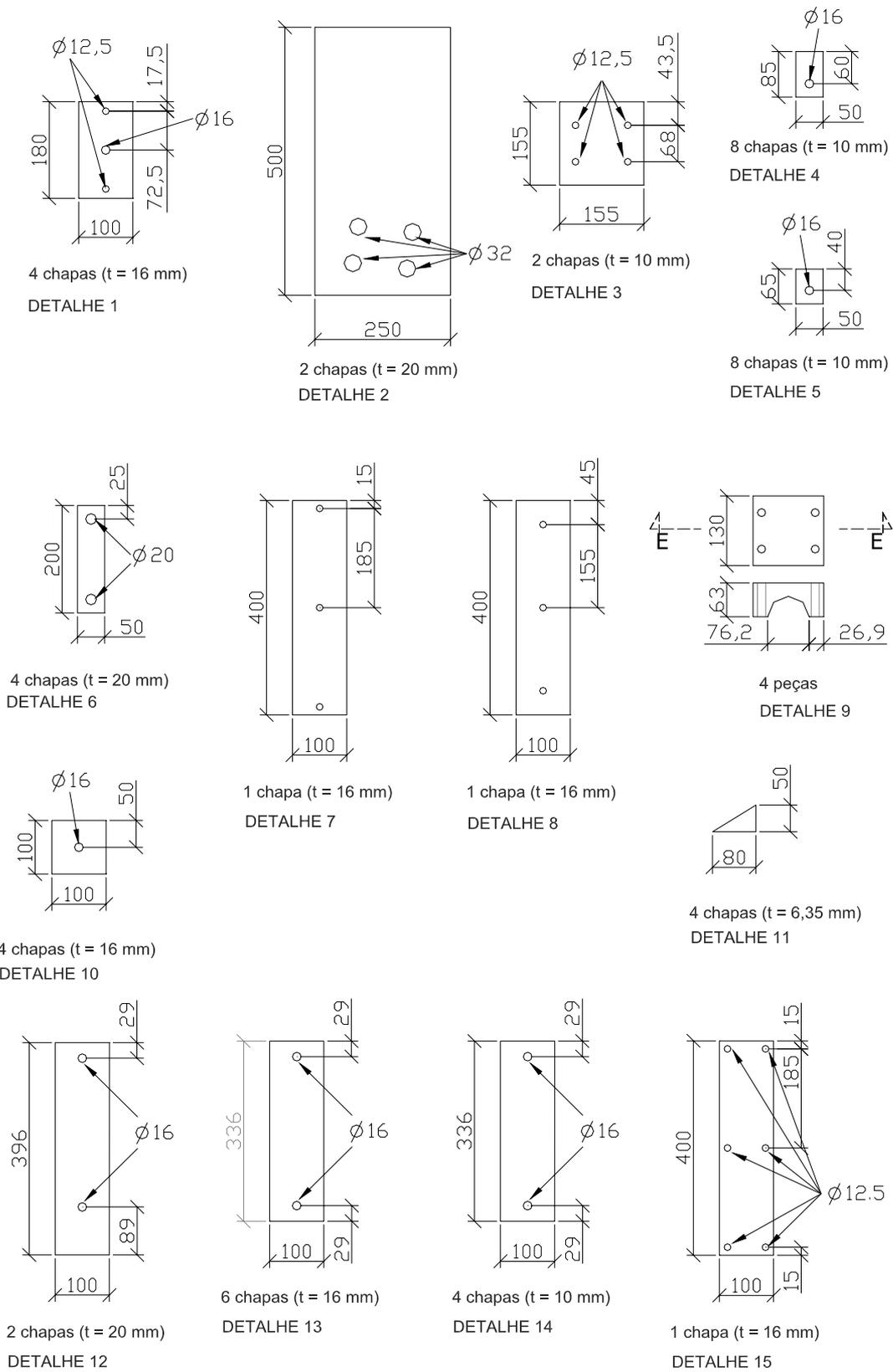
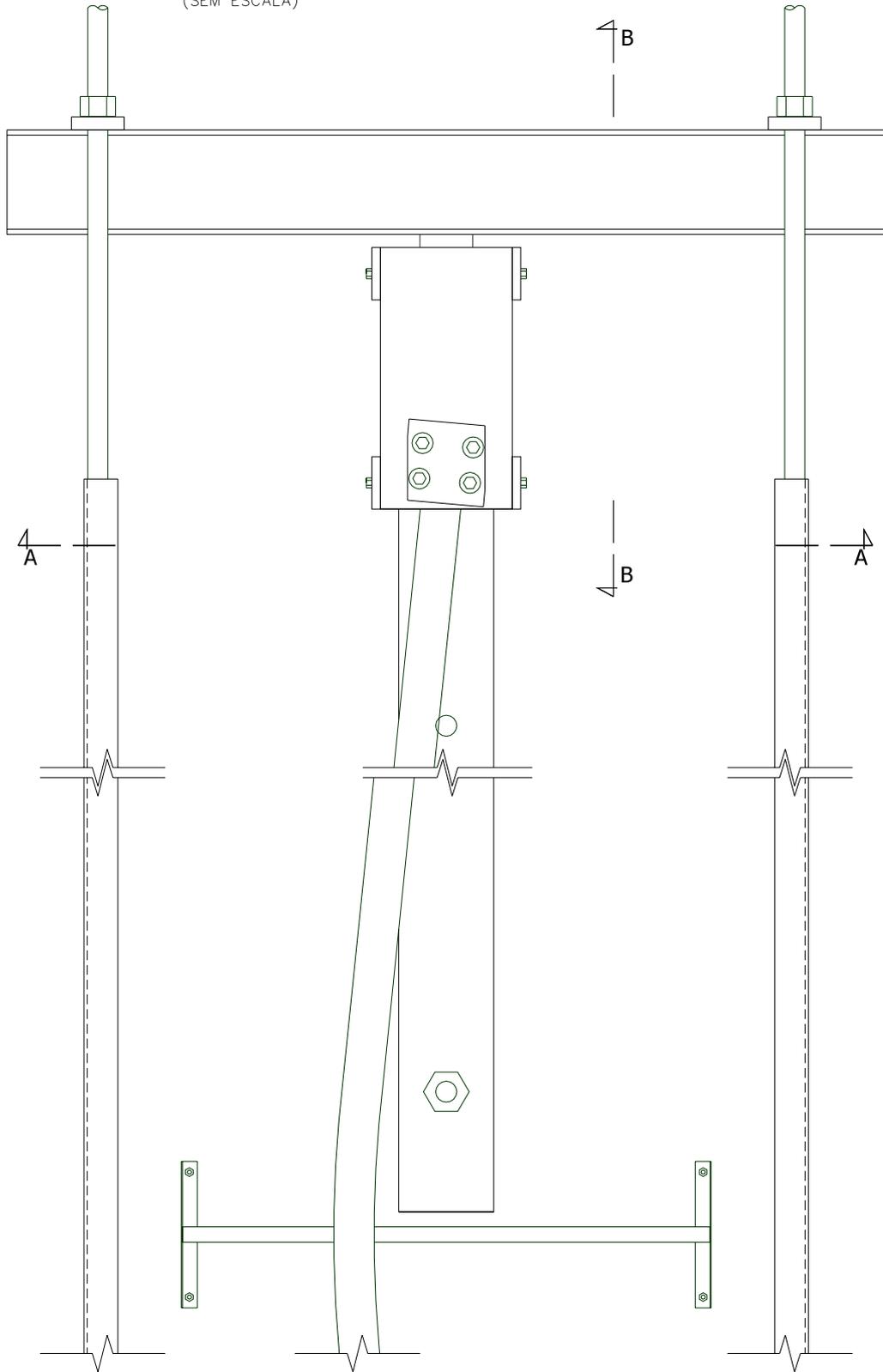


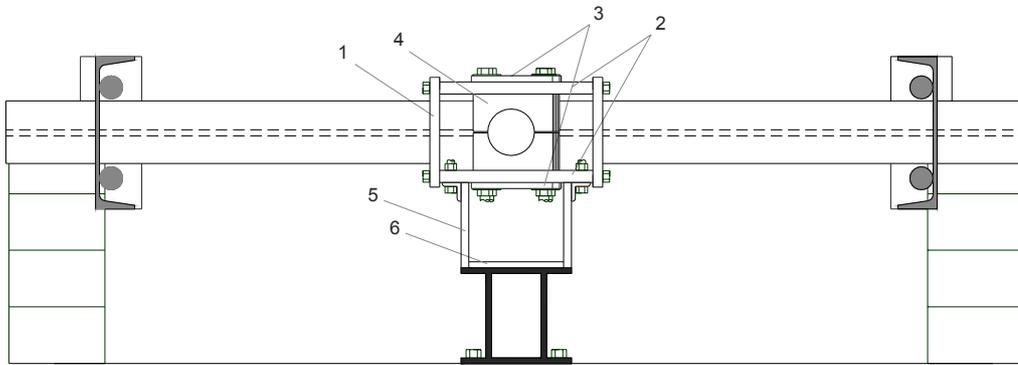
Figura 4.21 – Detalhes das chapas utilizadas no engaste 1 (medidas em milímetro)

VISTA SUPERIOR DO ENGASTE 2  
(SEM ESCALA)

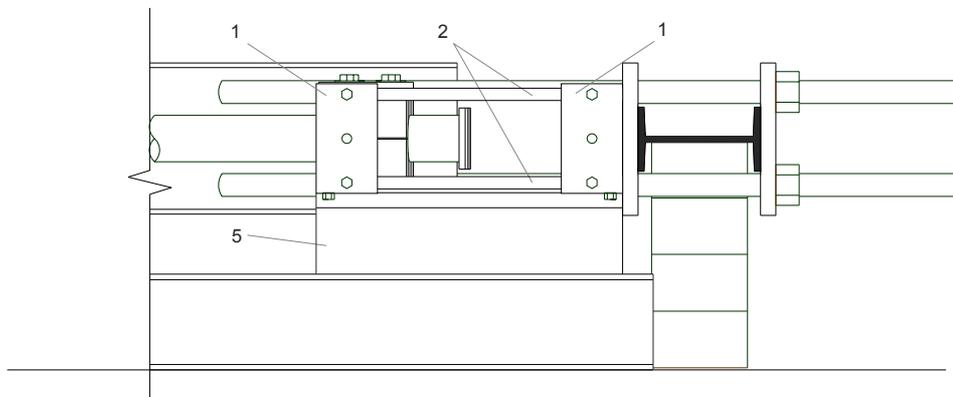


PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0124954/CA

Figura 4.22 – Vista superior do engaste 2



CORTE A-A  
(SEM ESCALA)



CORTE B-B  
(SEM ESCALA)

Figura 4.23 – Cortes A-A e B-B do engaste 2

PEÇAS QUE COMPÕE O ENGASTE 2

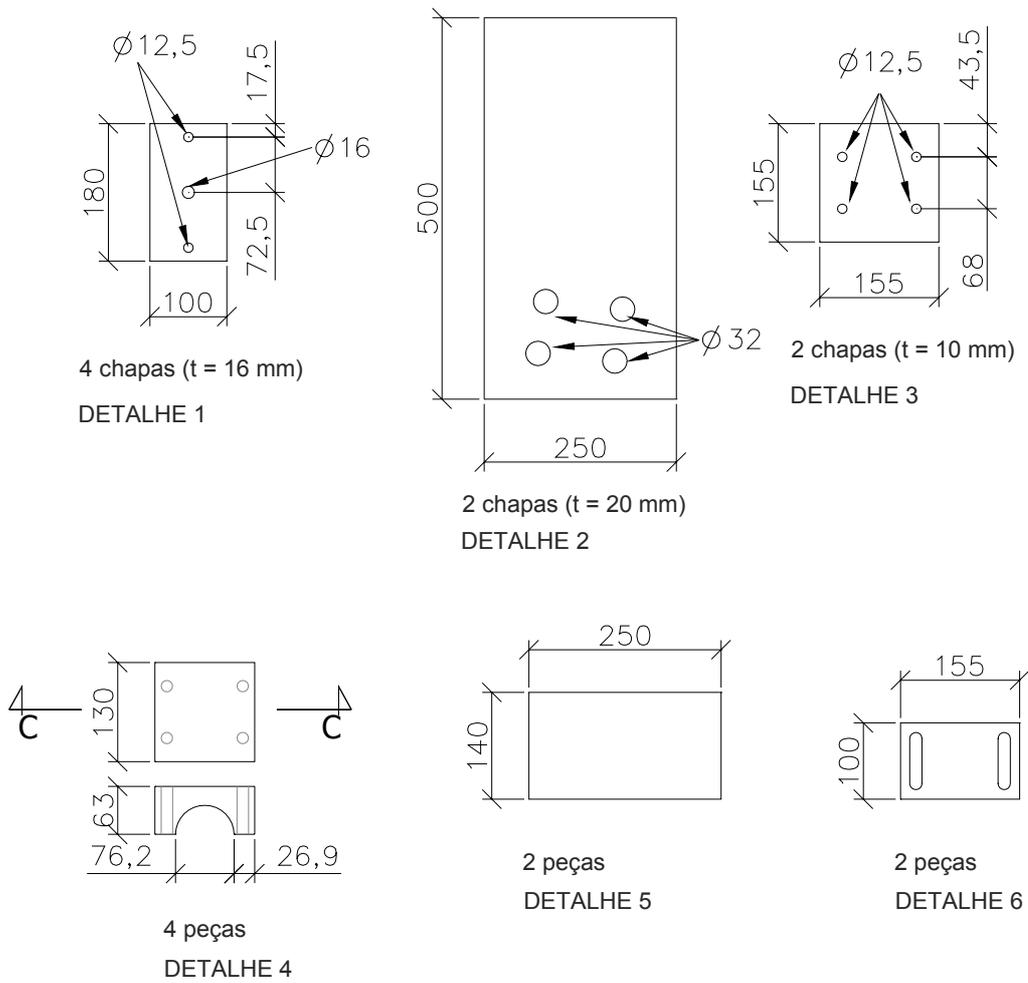


Figura 4.24 – Detalhes das chapas utilizadas no engaste 2 (medidas em milímetro)

#### 4.3.4. Instrumentação

Neste trabalho foram medidos: deformações específicas, deslocamentos transversais, reação de apoio longitudinal, pressão interna, temperatura e tempo.

E para esta aquisição de dados foi utilizada uma unidade de controle HP3497A (Figura 4.25). A taxa de amostragem do equipamento é de 50 leituras por segundo no modo de 5½ dígitos. O monitoramento dos ensaios foi feito automaticamente com um microcomputador conectado a esse equipamento via uma interface HPIB.



Figura 4.25 – Sistema de aquisição de dados

##### 4.3.4.1. Deformações

As deformações específicas foram medidas com extensômetros elétricos de resistência, tipo Roseta (Figura 4.26), marca Excel, modelo PA-06-250RB-120-L, colados com o adesivo LOCTITE 4210. As deformações foram medidas em várias seções de cada modelo, com três rosetas em cada seção, posicionadas conforme indicado na Figura 4.27.



Figura 4.26 – Roseta instalada

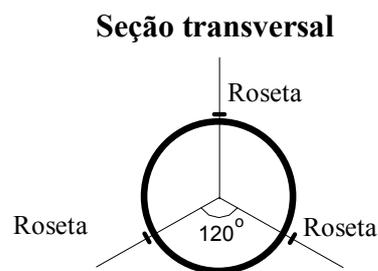


Figura 4.27 – Posicionamento das rosetas nas seções – Observador no Engaste 2 visando o Engaste 1

A direção das deformações medidas em cada roseta está apresentada na Figura 4.28. A direção 1 coincide com o eixo longitudinal do modelo.

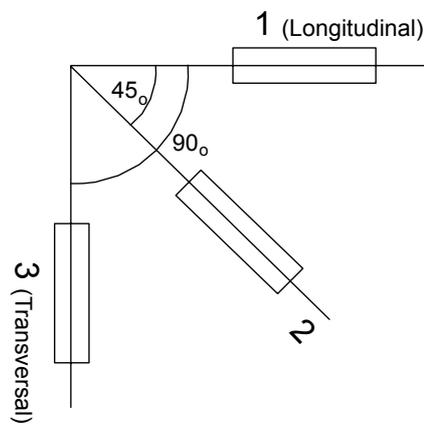


Figura 4.28 – Direção das deformações medidas

A tensão principal máxima  $S_u$  e a tensão principal mínima  $S_v$ , calculadas nos pontos indicados na Figura 4.27, são calculadas em função das deformações  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  e  $\varepsilon_3$  medidas em cada roseta, e pelas expressões (Dove & Adams, 1965 [12]):

$$S_u = \frac{E}{2(1-\nu)} \Sigma_{13} + \frac{E}{\sqrt{2}(1+\nu)} \sqrt{\Delta_{12}^2 + \Delta_{23}^2} \quad (4.1)$$

$$S_v = \frac{E}{2(1-\nu)} \Sigma_{13} - \frac{E}{\sqrt{2}(1+\nu)} \sqrt{\Delta_{12}^2 + \Delta_{23}^2} \quad (4.2)$$

onde,  $\Sigma_{13} = \varepsilon_1 + \varepsilon_3$   
 $\Delta_{12} = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$   
 $\Delta_{23} = \varepsilon_2 - \varepsilon_3$

As tensões longitudinais e transversais, calculadas nos pontos indicados na Figura 4.27, são calculadas pelas expressões: (Timoshenko, 1994 [10])

$$\sigma_l = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_3) \quad (4.3)$$

$$\sigma_t = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_3 + \nu\varepsilon_1) \quad (4.4)$$

Onde:

- $\sigma_l$  = tensão longitudinal à tubulação;
- $\sigma_t$  = tensão transversal à tubulação;
- $E$  = módulo de elasticidade;
- $\nu$  = coeficiente de Poisson

As tensões longitudinais máxima e mínima na seção transversal são calculadas em função das deformações longitudinais  $\varepsilon_{11}$ ,  $\varepsilon_{12}$ ,  $\varepsilon_{13}$  medidas nas rosetas instaladas nos pontos indicados na Figura 4.29, empregando as equações (Rocha et al, 2002 [31]):

## Seção transversal

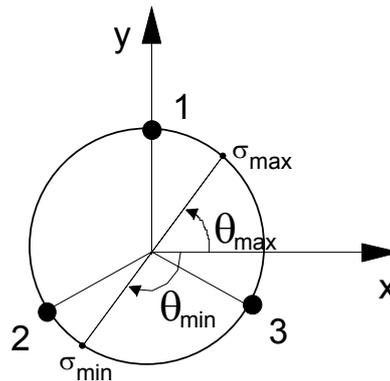


Figura 4.29 – Numeração utilizada para o cálculo das tensões máxima e mínima na seção

$$\sigma_{\max} = \frac{E}{3} \left[ (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{12} + \varepsilon_{13}) + \sqrt{(2\varepsilon_{11} - \varepsilon_{12} - \varepsilon_{13})^2 + 3(\varepsilon_{12} - \varepsilon_{13})^2} \right] \quad (4.5)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{E}{3} \left[ (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{12} + \varepsilon_{13}) - \sqrt{(2\varepsilon_{11} - \varepsilon_{12} - \varepsilon_{13})^2 + 3(\varepsilon_{12} - \varepsilon_{13})^2} \right] \quad (4.6)$$

$$\theta_{\max} = \arctan \frac{\sqrt{3} \cdot (\varepsilon_{12} - \varepsilon_{13})}{2\varepsilon_{11} - \varepsilon_{12} - \varepsilon_{13}} + \frac{\pi}{2} \quad (4.7)$$

$$\theta_{\min} = \arctan \frac{\sqrt{3} \cdot (\varepsilon_{12} - \varepsilon_{13})}{2\varepsilon_{11} - \varepsilon_{12} - \varepsilon_{13}} - \frac{\pi}{2} \quad (4.8)$$

Onde a tensão longitudinal máxima é a tensão longitudinal máxima de tração na seção, e tensão longitudinal mínima é a tensão longitudinal máxima de compressão na seção.

A localização dos pontos onde foram medidas as deformações nos modelos está apresentada na Figura 4.30.

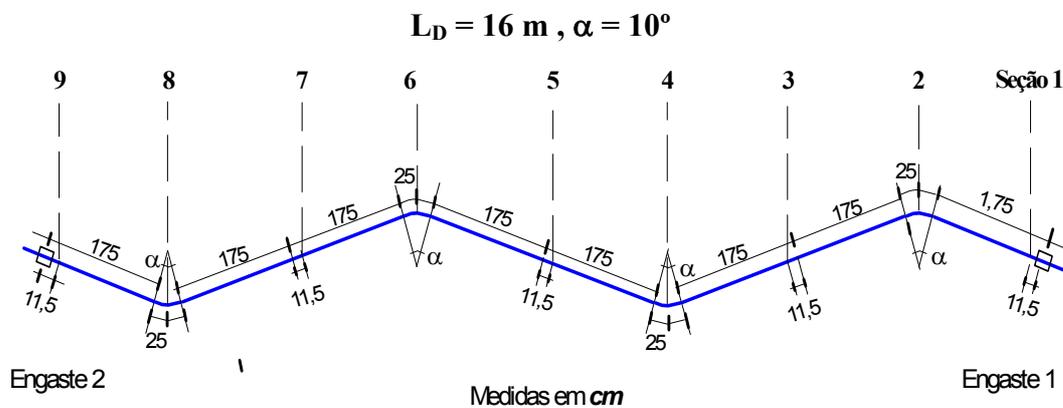
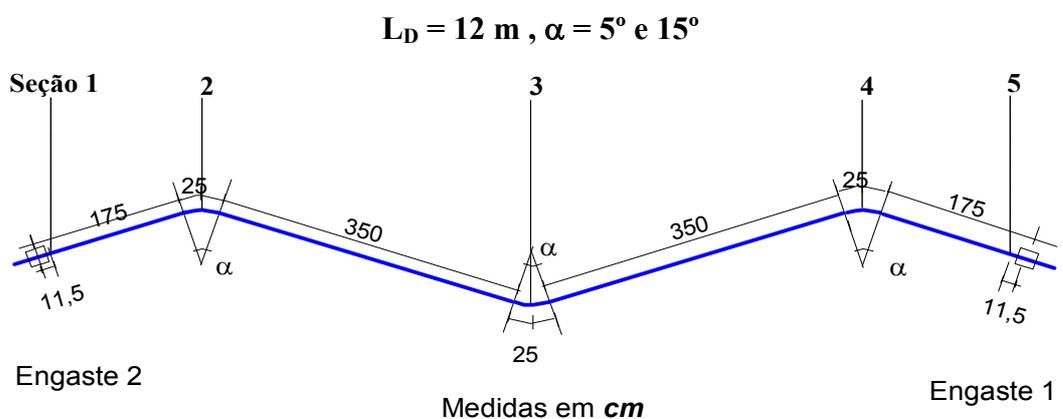
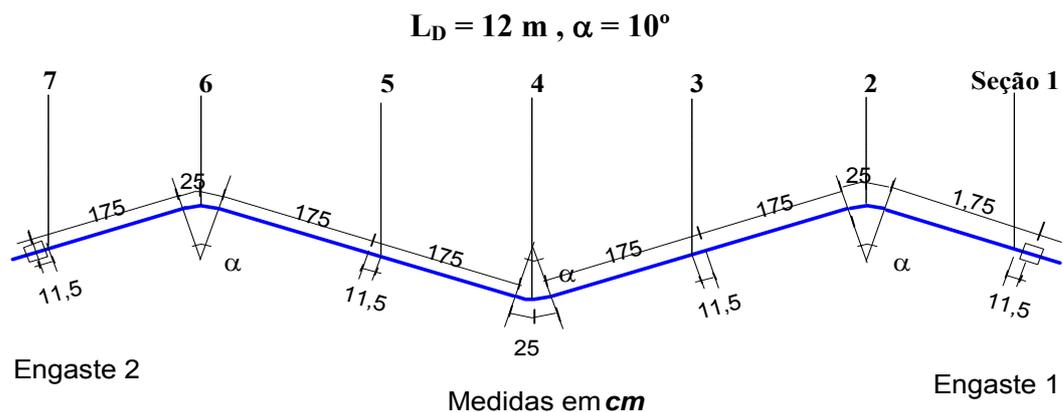


Figura 4.30 – Localização das seções onde foram medidas as deformações (continua)

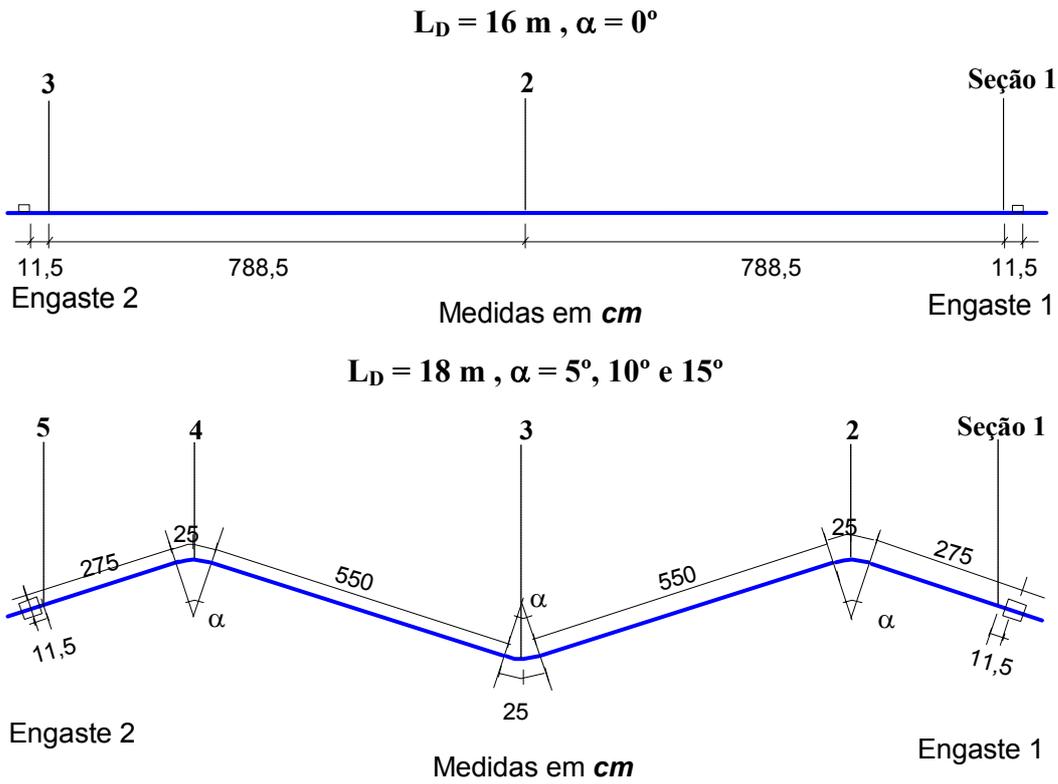


Figura 4.30 –Localização das seções onde foram medidas as deformações (continuação)

#### 4.3.4.2. Deslocamentos

Os deslocamentos no plano horizontal foram medidos com transdutores de deslocamentos posicionados ao longo do comprimento dos modelos (Figura 4.31).

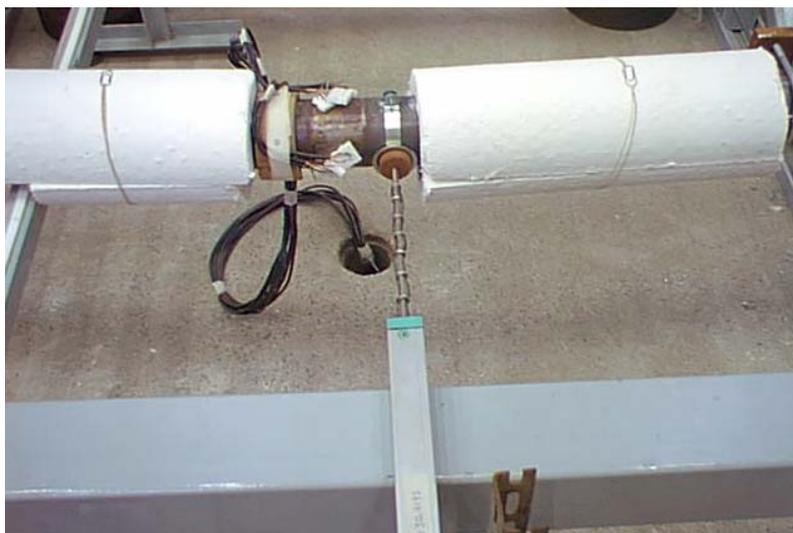


Figura 4.31 – Transdutor de deslocamento (LVDT)

A localização dos pontos onde foram medidos os deslocamentos está indicada na Figura 4.32.

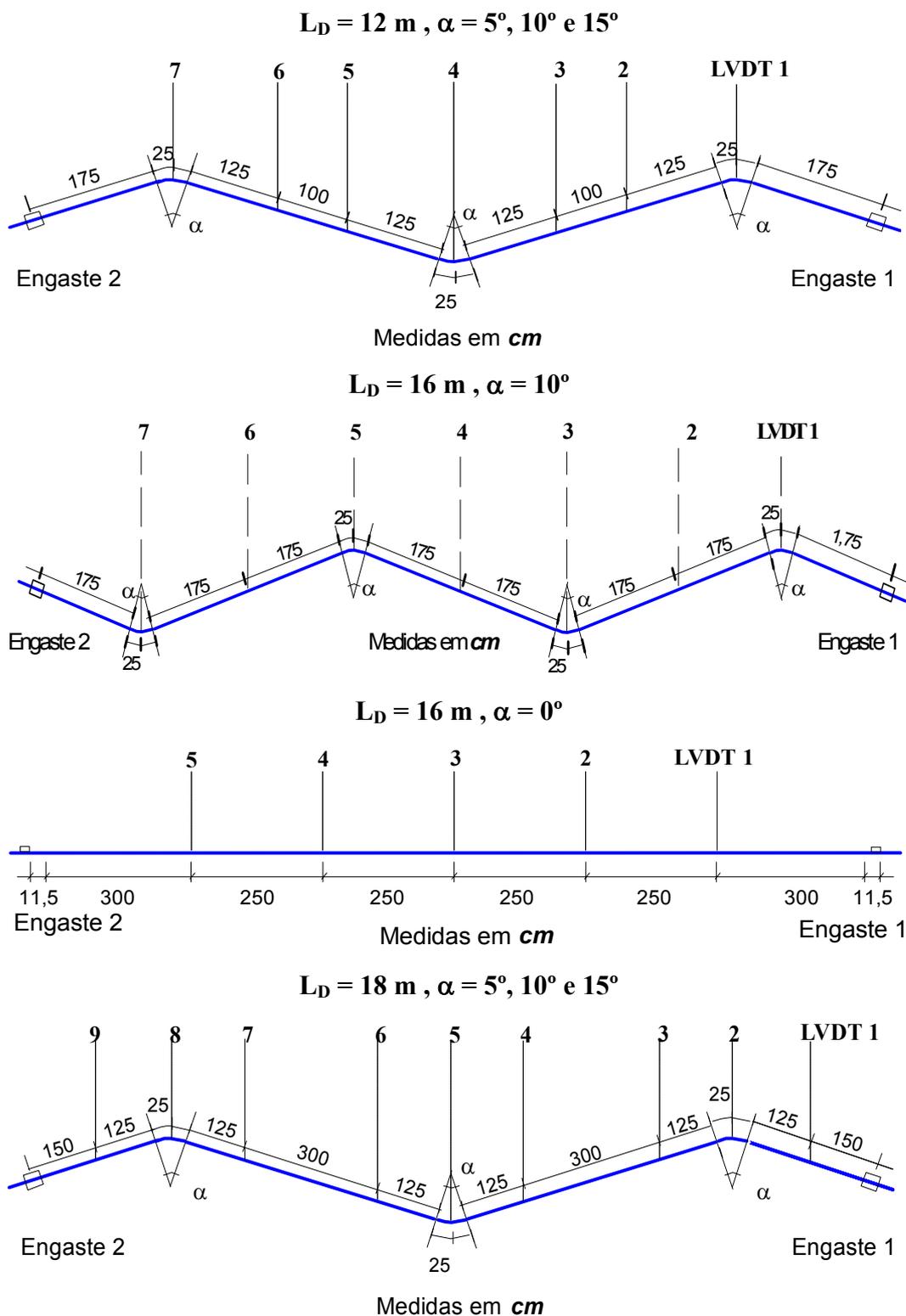


Figura 4.32 – Localização dos transdutores de deslocamento (LVDT)

#### 4.3.4.3. Reação de Apoio Longitudinal

A reação de apoio (força axial), na direção da linha que liga os dois engastes, foi medida por meio de uma célula de carga posicionada no engaste 1 (Figura 4.33)

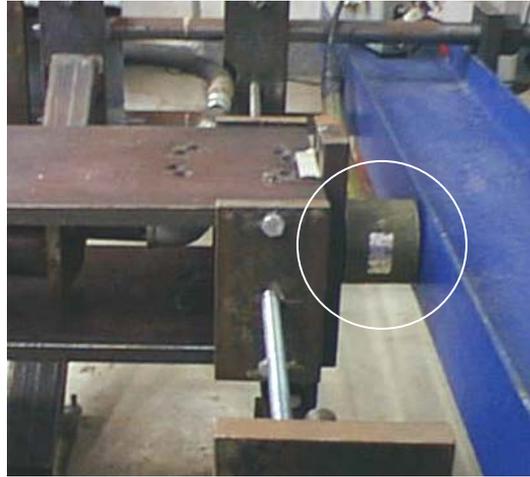


Figura 4.33 – Célula de carga no engaste 1

#### 4.3.4.4. Pressão Interna

A pressão interna foi aplicada e mantida durante o ensaio por meio de uma bomba Amsler (Figura 4.34) e monitorada com um transdutor de pressão (Figura 4.35).



Figura 4.34 – Bomba Amsler



Figura 4.35 – Transdutor de pressão

#### 4.3.4.5. Temperatura

A temperatura foi monitorada por meio de três termopares (Figura 4.36) posicionados na seção média e nas seções distantes de 1 m de cada engaste.

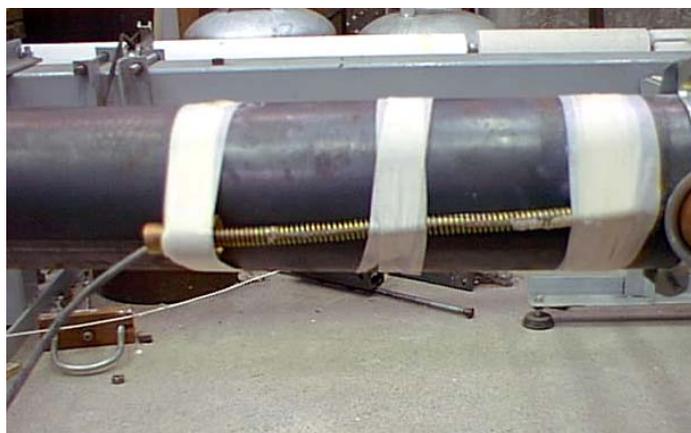


Figura 4.36 – Termopar

#### 4.3.5. Reação Lateral do Solo

A força exercida pelo solo sobre o duto (protótipo), agindo no plano horizontal, como resposta ao deslocamento imposto pelo duto, está relacionada com este deslocamento de acordo com o mostrado na Figura 4.37. Esta interação solo-duto foi simulada em duas situações:

- duto com 50% (meio diâmetro) de enterramento: nesta situação o valor da força máxima resistida pelo solo indicado na Figura 4.37 é de 20 kg/m ao longo do modelo reduzido;
- duto com 1 m de enterramento: nesta situação o valor da força máxima resistida pelo solo indicado na Figura 4.37 é de 88 kg/m ao longo do modelo reduzido.

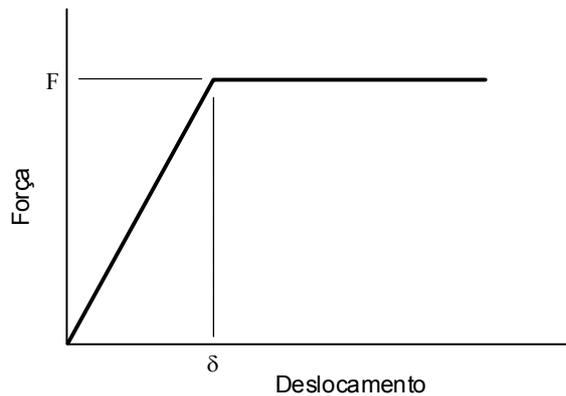


Figura 4.37 – Representação esquemática da relação força-deslocamento para a reação lateral do solo

Estes valores são apresentados no trabalho realizado por *Costa et al* [29], onde foi medida a reação lateral do solo para diferentes profundidades de enterramento.

Ao longo do texto quando tiver *modelo com 50% de enterramento* ou *modelo com 1 metro de enterramento*, significa que o modelo está simulando 50% ou 1 metro de enterramento no protótipo.

Os dispositivos empregados nos ensaios dos modelos, para simular a reação lateral do solo, estão mostrados nas Figuras 4.38 e 4.39. Esses dispositivos foram posicionados a cada metro ao longo do modelo. O dispositivo mostrado na Figura 4.38, correspondente à situação de 50% de enterramento, onde no instante em que o modelo tenta se deslocar lateralmente a força de 20 kg exercida pelo peso é transmitida para o modelo pelo sistema de barras, correntes e roldanas mostrado nas figuras.

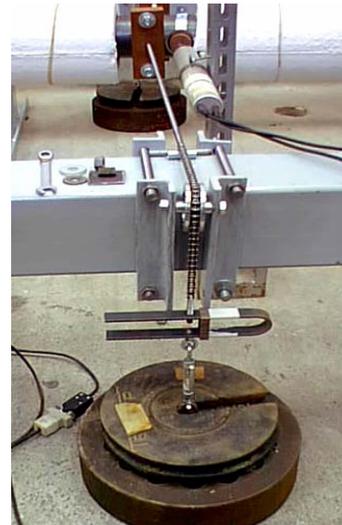


Figura 4.38 – Dispositivo para simular a força lateral de 20 kg/m

No dispositivo da Figura 4.39 a força exercida pelo mesmo peso de 20 kg é multiplicada pelo braço de alavanca proporcionado pelo dispositivo fixado na roldana, de modo a se obter a força de 88 kg. O detalhe da ligação da barra horizontal com o modelo, através da qual a força é transmitida ao modelo, está mostrado na Figura 4.40.



Figura 4.39 – Dispositivo para simular a força lateral de 88 kg/m



Figura 4.40 – Detalhe da ligação da barra que transmite a carga ao modelo

Para validação do sistema utilizado foram testados três dispositivos escolhidos aleatoriamente tanto para a simulação da condição de 50% de enterramento quanto para 1 metro de enterramento. Suas respectivas curvas de calibração são fornecidas nas Figuras 4.41 e 4.42.

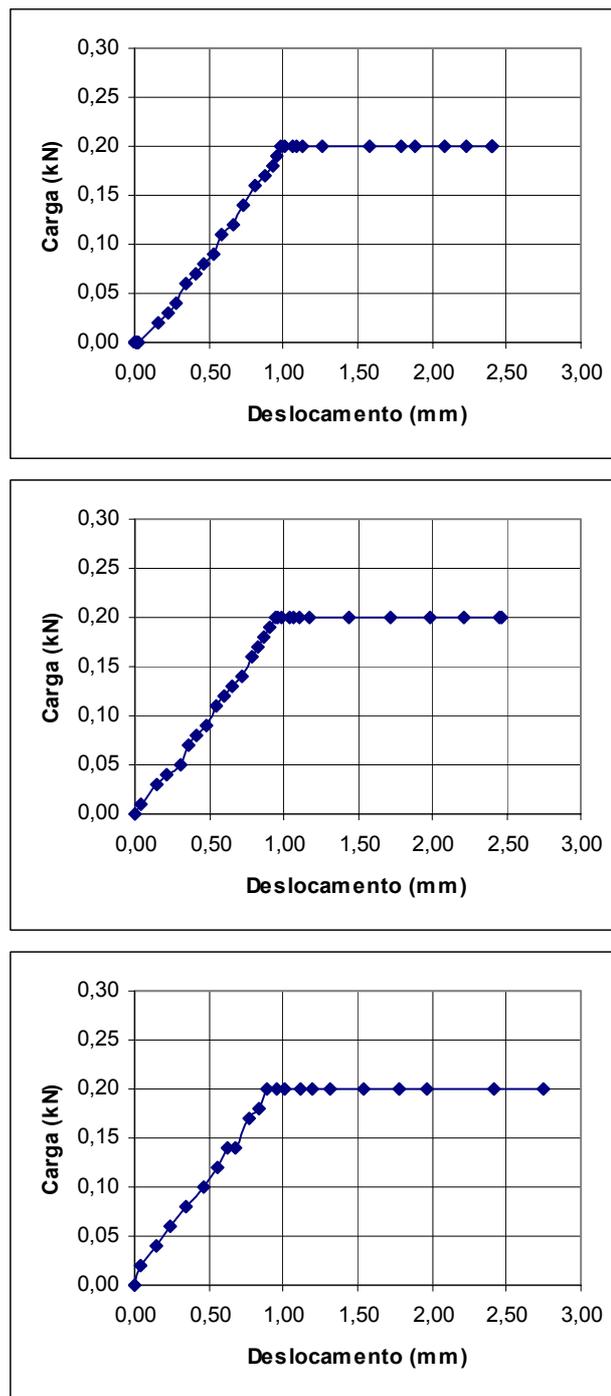


Figura 4.41 – Curvas de calibração dos dispositivos que simulam a condição de 50% de enterramento – Três dispositivos escolhidos aleatoriamente.

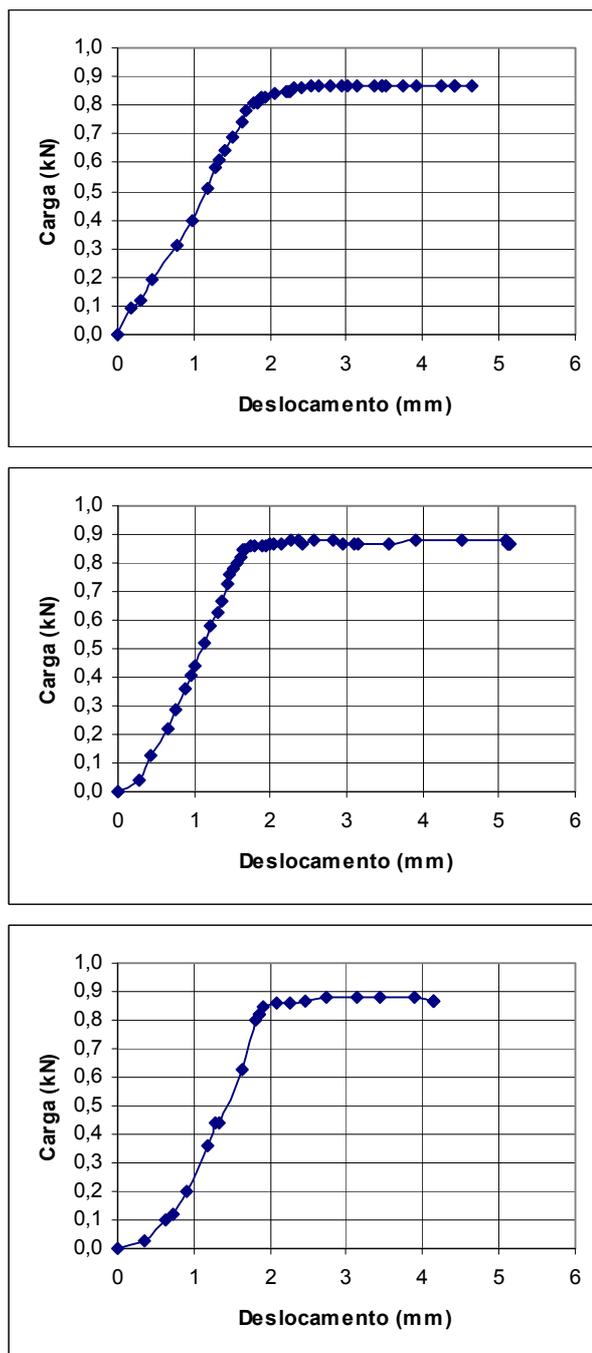


Figura 4.42 – Curvas de calibração dos dispositivos que simulam a condição de 1 metro de enterramento – Três dispositivos escolhidos aleatoriamente.

A localização dos pontos onde foram posicionados os dispositivos que representam a reação do solo estão indicados na Figura 4.43.

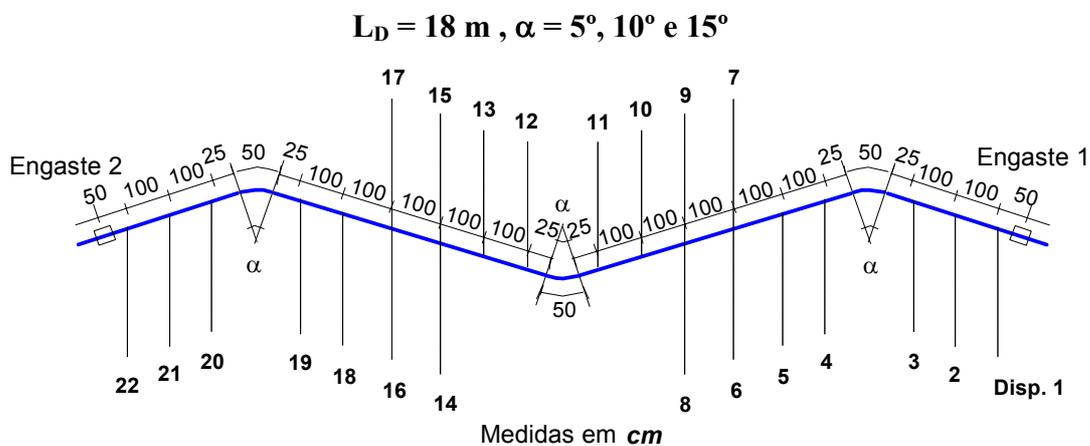
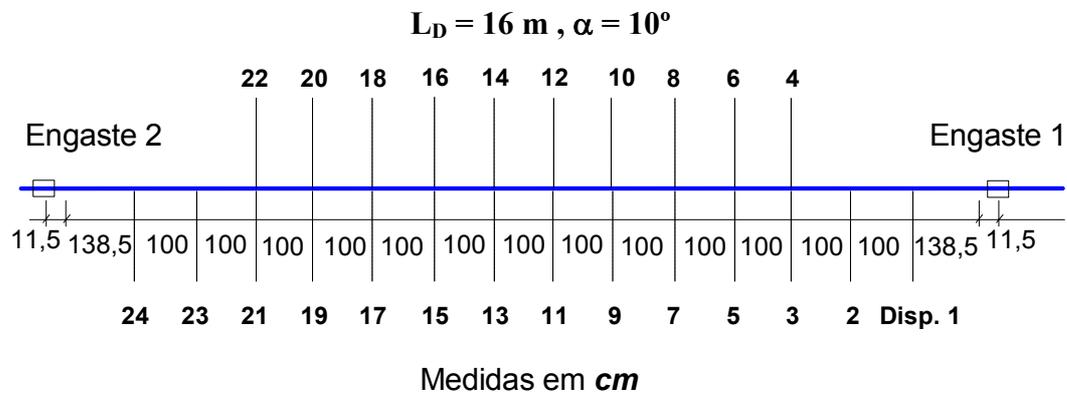
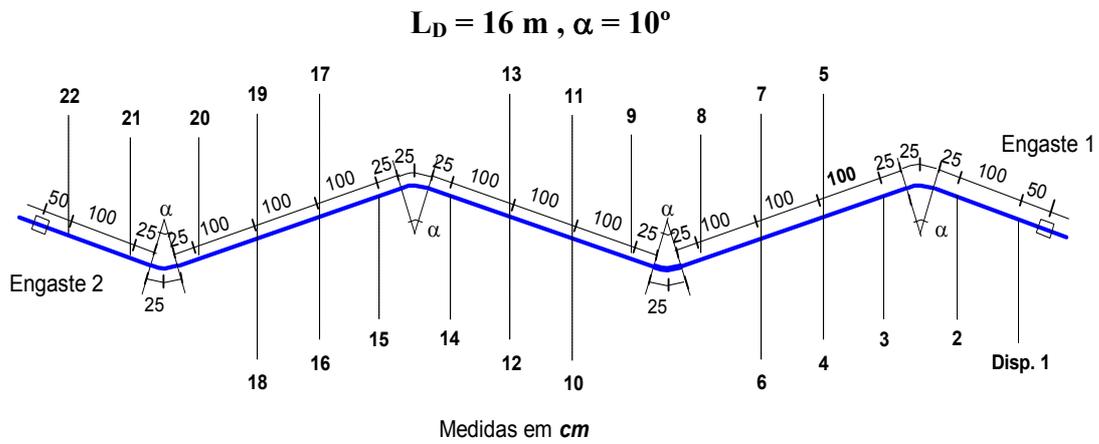
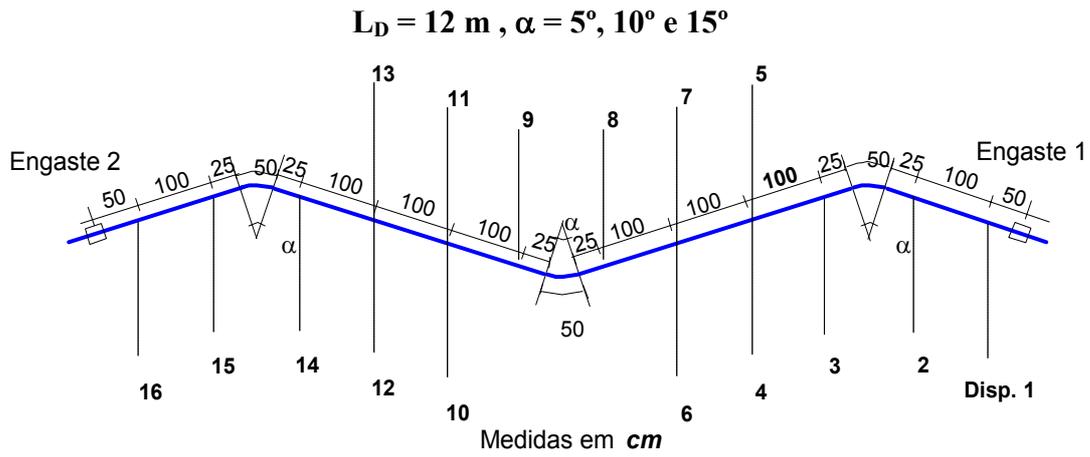


Figura 4.43 – Localização dos dispositivos que representam os apoios não-uniformes

#### 4.4. Programa de Ensaio

O programa de ensaios foi dividido em duas fases. Na Fase 1, os modelos representam o protótipo na configuração em que vem sendo empregados, ou seja, com ângulo de dobramento de  $10^\circ$  e comprimento do trecho reto igual a 2 m ( $L_m = L_p / s_l = 12 / 6 = 2$  m). Na Fase 2, foi feito um estudo paramétrico variando-se o ângulo de dobramento e o comprimento dos trechos retos.

Os ensaios previstos para a Fase 1 são os relacionados na Tabela 4.6 e os da Fase 2 nas Tabelas 4.7 e 4.8. A nomenclatura da coluna dos modelos é a seguinte: “L” representa o comprimento do modelo; “A” representa o ângulo de ziguezague; “IH” representa imperfeição horizontal; “S20” representa 50% de enterramento ( $F = 20$  kg/m); e “S90” 1 metro de enterramento ( $F = 88$  kg/m).

Tabela 4.6 – Modelos da FASE 1 -  $L_p = 16$  m,  $L = 2$  m,  $\alpha = 10^\circ$

Ensaio	Modelo	Reação lateral do solo	Imperfeição horizontal (cm)
1	L16A10	Livre	0
2	L16A10IH	Livre	10,7
3	L16A10S20a	50% de enterramento	0
4	L16A10S20b	50% de enterramento, mas 8 metros centrais livres (um ziguezague completo livre)	0
5	L16A10S90a	1 metro de enterramento	0
6	L16A10S90b	1 metro de enterramento, mas 8 metros centrais livres (um ziguezague completo livre)	0
7	L16A0	Duto reto - sem apoio	0
8	L16A0S90a	Duto reto – com 1 metro de enterramento	0

Tabela 4.7 – Modelos da FASE 2 -  $L_D = 12\text{ m}$ ,  $L = 2\text{ m}$ 

Ensaio	Modelo	$\alpha$	Reação lateral do solo	Imp. horiz. (cm)
1	L12A5	5	Livre	0
2	L12A5S90a	5	1 m de enterramento	0
3	L12A5S90b	5	1 m de enterramento, 4 m centrais livres	0
4	L12A5S90IH	5	1 m de enterramento	8,0
5	L12A10	10	Livre	0
6	L12A10S90a	10	1 m de enterramento	0
7	L12A10S90b	10	1 m de enterramento, 4 m centrais livres	0
8	L12A10S90IH	10	1 m de enterramento	8,0
9	L12A15	15	Livre	0
10	L12A15S90a	15	1 m de enterramento	0
11	L12A15S90b	15	1 m de enterramento, 4 m centrais livres	0
12	L12A15S90IH	15	1 m de enterramento	8,0

Tabela 4.8 – Modelos da FASE 2 -  $L_D = 18\text{ m}$  ;  $L = 4\text{ m}$ 

Ensaio	Modelo	$\alpha$	Reação lateral do solo	Imp. horiz. (cm)
1	L18A5	5	Livre	0
2	L18A5S90a	5	1 m de enterramento	0
3	L18A5S90b	5	1 m de enterramento, 6 m centrais livres	0
4	L18A5S90IH	5	1 m de enterramento	12,0
5	L18A10	10	Livre	0
6	L18A10S90a	10	1 m de enterramento	0
7	L18A10S90b	10	1 m de enterramento, 6 m centrais livres	0
8	L18A10S90IH	10	1 m de enterramento	12,0
9	L18A15	15	Livre	0
10	L18A15S90a	15	1 m de enterramento	0
11	L18A15S90b	15	1 m de enterramento, 6 m centrais livres	0
12	L18A15S90IH	15	1 m de enterramento	12,0

#### 4.4.1.

##### Procedimento de Ensaio

Antes de se iniciar o ensaio, o duto era alinhado com um nível a laser posicionado no centro do engaste 1 mirando um anteparo no centro do engaste 2. Com o laser na posição correta, uma haste vertical com base magnética era colocada no centro do modelo, conforme mostra Figura 4.44 e o duto era então posicionado de tal forma a garantir que o centro do modelo e suas extremidades estivessem alinhados.

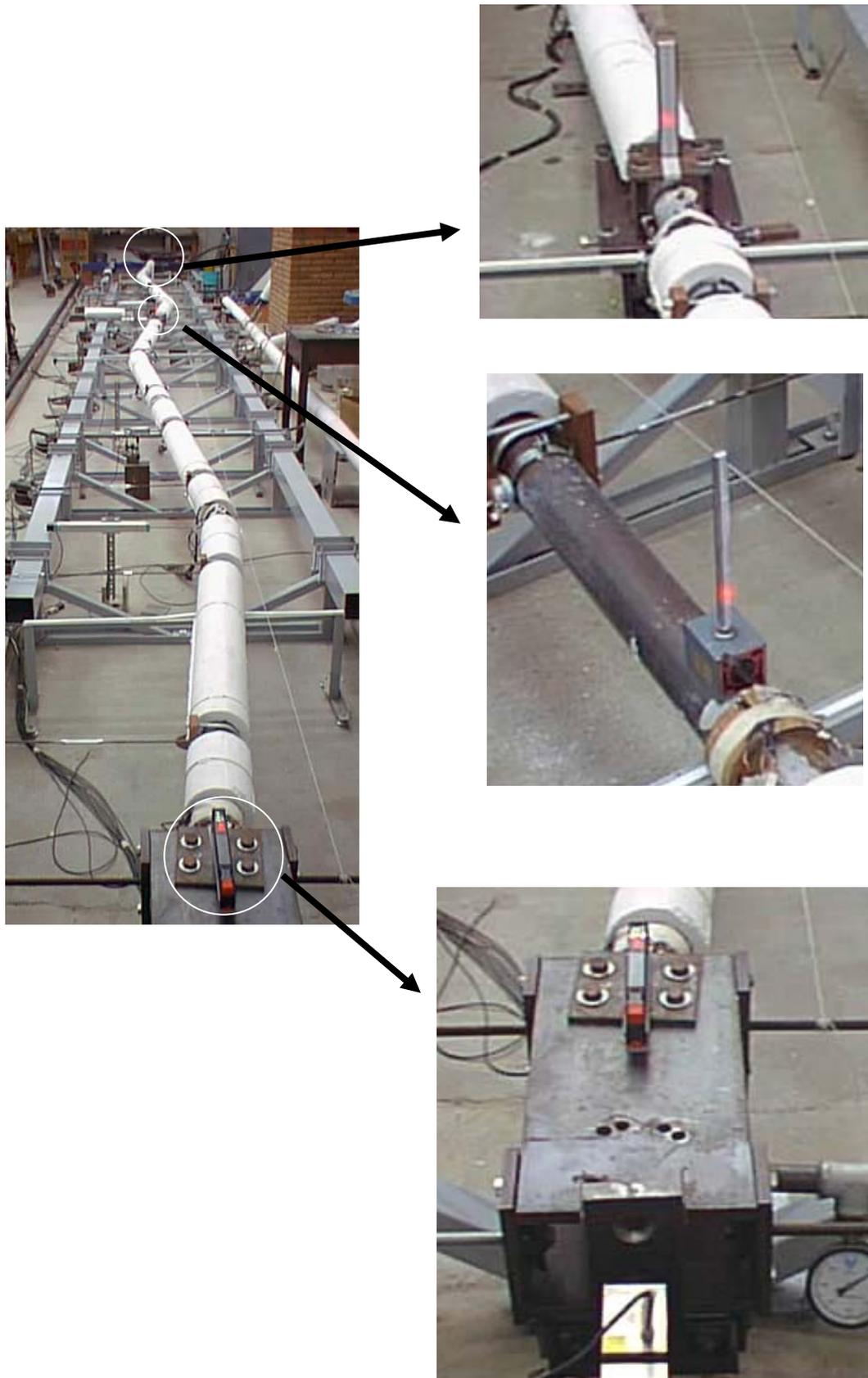


Figura 4.44 – Alinhamento do modelo zig-zag

O procedimento geral de ensaio é descrito abaixo e apresentado nas Figuras 4.45 e 4.46.

- 1 – Início do ensaio com o modelo sob temperatura de 20°C e pressão interna igual a zero;
- 2 – Aplicação da imperfeição horizontal (deslocamento de  $L_D / 150$  imposto na seção média do modelo), com o modelo sob temperatura de 20°C e pressão interna igual a zero; (*Realizado somente para os ensaios com imperfeição horizontal*)
- 3 – Aplicação da pressão interna de 4,5 MPa, com temperatura constante e igual 20°C;
- 4 – Elevação da temperatura, de 20°C para 105°C, com pressão interna constante e igual 4,5 MPa;
- 5 – Diminuição da temperatura de 105°C para 20°C, com pressão interna constante e igual 4,5 MPa;
- 6 – Diminuição da pressão interna, de 4,5 MPa para zero, com temperatura constante e igual 20°C;
- 7 – Retirada da imperfeição, reduzindo-a para zero, com o modelo sob temperatura de 20°C e pressão interna igual a zero; (*Realizado somente para os ensaios com imperfeição horizontal*)
- 8 – Término do ensaio, sob temperatura de 20°C.

O tempo de duração dos ensaios variou de 2:30 hs à 3:30 hs cada.

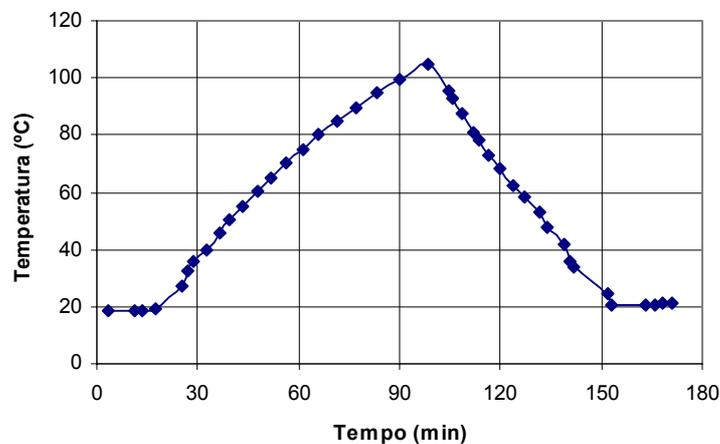


Figura 4.45 – Curva geral da variação de temperatura em função do tempo

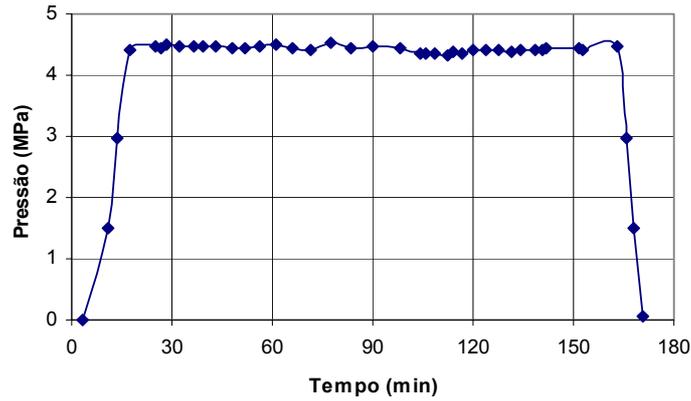


Figura 4.46 – Curva geral da variação da pressão em função do tempo

#### 4.5. Traçado Geométrico dos Modelos

Os traçados geométricos dos modelos como projetados e os traçados reais depois de construídos e montados na bancada de ensaios, são apresentados a seguir.

##### 4.5.1. Modelos L12A5, L12A5S90a, L12A5S90b, L12A5S90IH

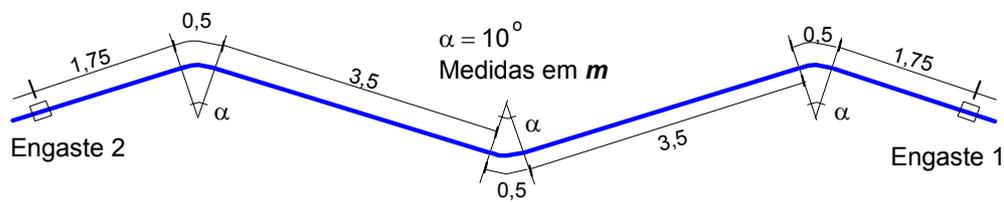


Figura 4.47 – Vista superior do modelo

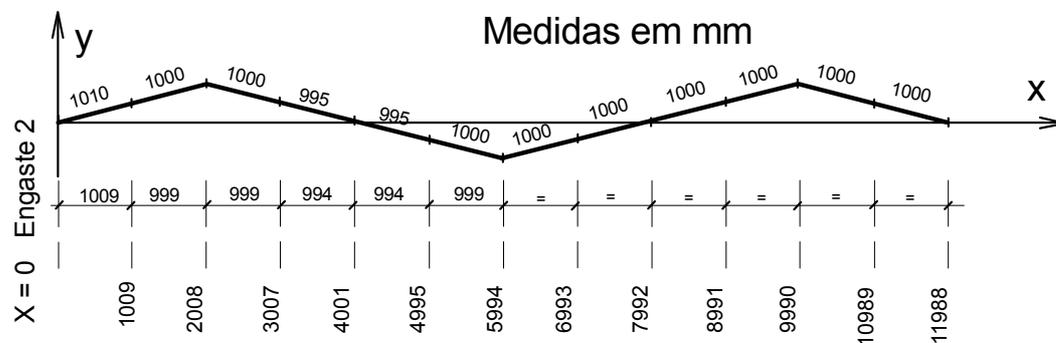


Figura 4.48 – Coordenadas dos modelos L12A5, L12A5S90a, L12A5S90b, L12A5S90IH como construídos

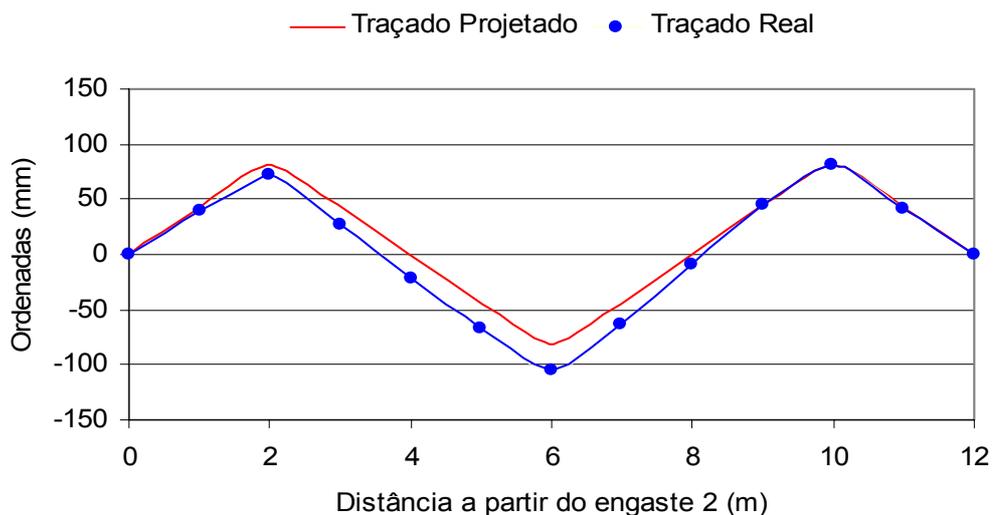


Figura 4.49 – Comparação entre os traçados projetado e real (como construído) para os modelos L12A5, L12A5S90a, L12A5S90b, L12A5S90IH

Tabela 4.9 – Traçados projetado e real dos modelos L12A5, L12A5S90a, L12A5S90b, L12A5S90IH. Distâncias medidas a partir do engaste 2.

Traçado projetado		Traçado real	
Distância (m)	Ordenadas (mm)	Distância (m)	Ordenadas (mm)
0	0	0	0,00
1,009	44,06	1,009	40,40
1,998	82,22	2,008	71,40
2,997	44,06	3,007	26,40
3,996	0	4,001	-22,10
4,995	-44,06	4,995	-67,10
5,994	-82,22	5,994	-104,60
6,993	-44,06	6,993	-63,10
7,992	0	7,992	-9,10
8,991	44,06	8,991	44,90
9,990	82,22	9,990	81,90
10,989	44,06	10,989	41,90
11,988	0	11,988	0,00



Tabela 4.10 – Traçados projetado e real dos modelos L12A10, L12A10S90a, L12A10S90b, L12A10S90IH. Distâncias medidas a partir do engaste 2.

Traçado projetado		Traçado real	
Distância (m)	Ordenadas (mm)	Distância (m)	Ordenadas (mm)
0	0	0	0,00
1,742	152,52	0,996	79,96
1,992	163,42	1,992	158,22
2,242	152,52	2,988	86,07
5,727	-152,52	3,985	-0,01
5,977	-163,42	4,981	-85,28
6,227	-152,52	5,977	-167,63
9,712	152,52	6,973	-91,67
9,962	163,42	7,969	-8,84
10,212	152,52	8,966	82,95
11,955	0	9,962	159,76
		10,958	87,68
		11,955	0,00

**4.5.3. Modelos L12A15, L12A15S90a, L12A15S90b, L12A15S90IH**

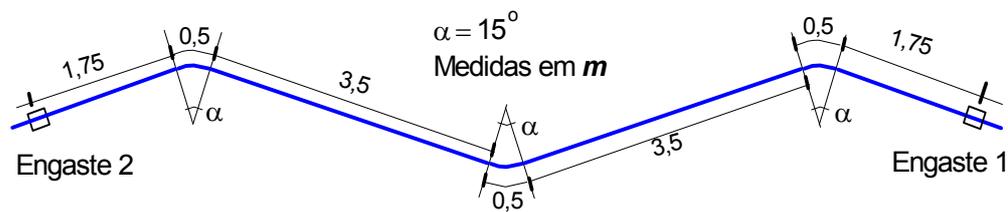


Figura 4.53 – Vista superior do modelo

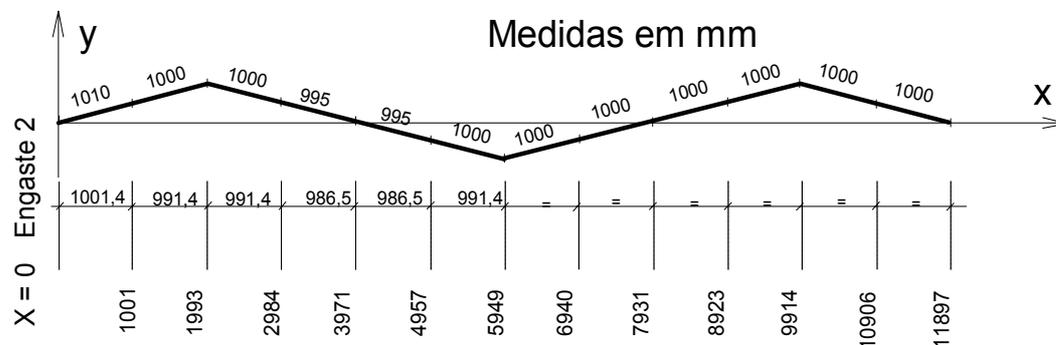


Figura 4.54 – Coordenadas dos modelos L12A15, L12A15S90a, L12A15S90b, L12A15S90IH como construídos

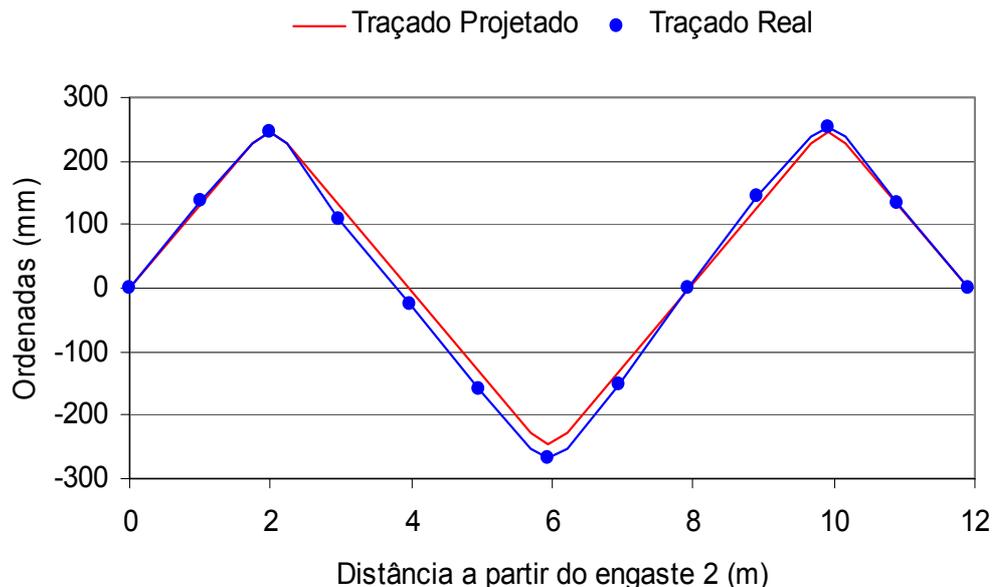


Figura 4.55 – Comparação entre os traçados projetado e real (como construído) para os modelos L12A15, L12A15S90a, L12A15S90b, L12A15S90IH

Tabela 4.11 – Traçados projetado e real dos modelos L12A15, L12A15S90a, L12A15S90b, L12A15S90IH. Distâncias medidas a partir do engaste 2.

Traçado projetado		Traçado real	
Distância (m)	Ordenadas (mm)	Distância (m)	Ordenadas (mm)
0	0	0	0,00
1,735	228,4	1,001	138,10
1,985	244,8	1,993	244,40
2,235	228,4	2,984	109,90
5,699	-228,4	3,971	-23,60
5,949	-244,8	4,957	-157,60
6,199	-228,4	5,949	-268,60
9,662	228,4	6,94	-151,50
9,914	244,8	7,931	0,00
10,162	228,4	8,923	142,90
11,897	0	9,914	253,90
		10,906	132,90
		11,897	0,00

**4.5.4.**  
**Modelos L16A10, L16A10S20a, L16A10S20b, L16A10S90a,**  
**L16A10S90b e L16A10IH**

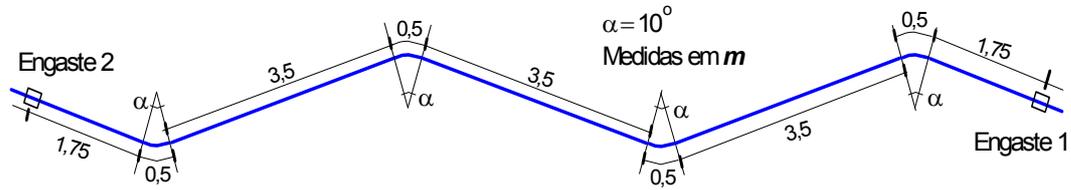


Figura 4.56 – Vista superior do modelo

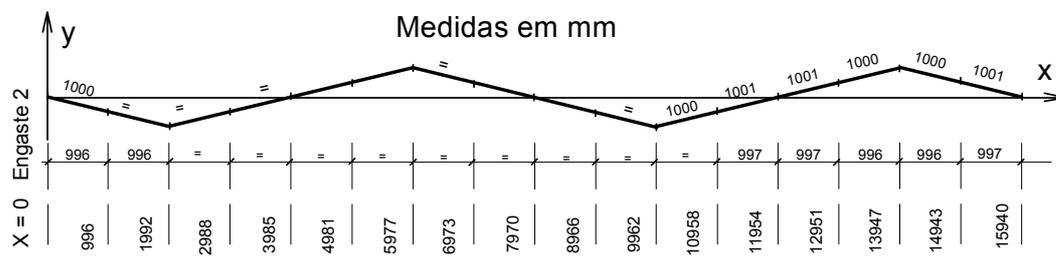


Figura 4.57 – Coordenadas dos modelos L16A10, L16A10S20a, L16A10S20b, L16A10S90a, L16A10S90b e L16A10IH como construídos

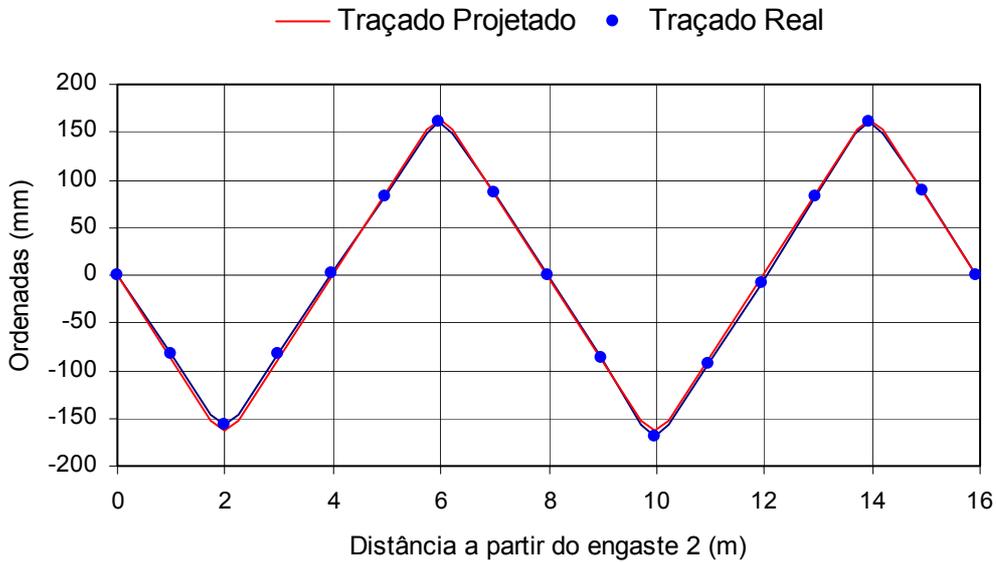


Figura 4.58 – Comparação entre os traçados projetado e real para os modelos L16A10, L16A10S20a, L16A10S20b, L16A10S90a, L16A10S90b e L16A10IH

Tabela 4.12 – Traçados projetado e real dos modelos L16A10, L16A10S20a, L16A10S20b, L16A10S90a, L16A10S90b e L16A10IH. Distâncias medidas a partir do engaste 2.

Traçado projetado		Traçado real	
Distância (m)	Ordenadas (mm)	Distância (m)	Ordenadas (mm)
0	0	0	0
0,996	-86,8	0,996	-81,7
1,992	-163,4	1,992	-156,7
2,988	-86,8	2,988	-81,7
3,985	0	3,985	2,8
4,981	86,8	4,981	82,3
5,977	163,4	5,977	159,8
6,973	86,8	6,973	86,8
7,970	0	7,970	0
8,966	-86,8	8,966	-85,7
9,962	-163,4	9,962	-168,2
10,958	-86,8	10,958	-92,2
11,954	0	11,954	-9,2
12,951	86,8	12,951	82,8
13,947	163,4	13,947	159,8
14,943	86,8	14,943	87,8
15,940	0	15,940	0

**4.5.5. Modelos L18A5, L18A5S90a, L18A5S90b, L18A5S90IH**

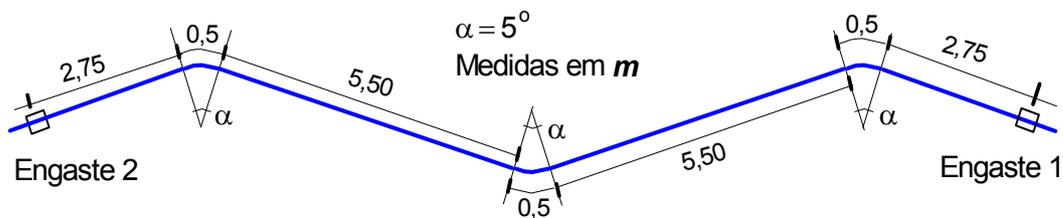


Figura 4.59 – Vista superior do modelo

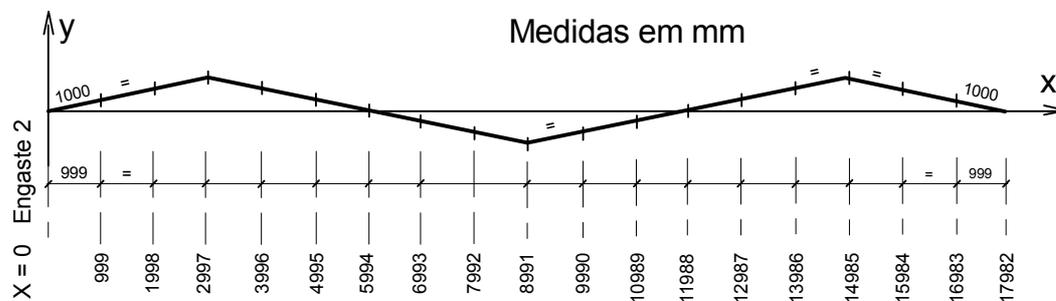


Figura 4.60 – Coordenadas dos modelos L18A5, L18A5S90a, L18A5S90b, L18A5S90IH como construídos

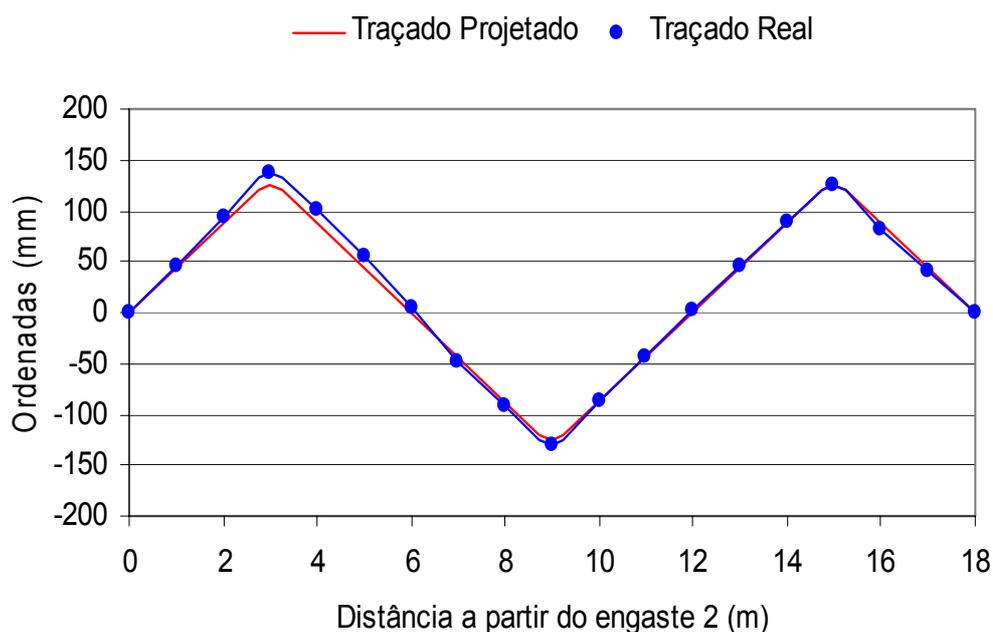


Figura 4.61 – Comparação entre os traçados projetado e real (como construído) para os modelos L18A5, L18A5S90a, L18A5S90b, L18A5S90IH

Tabela 4.13 – Traçados projetado e real dos modelos L18A5, L18A5S90a, L18A5S90b, L18A5S90IH. Distâncias medidas a partir do engaste 2.

Traçado projetado		Traçado real	
Distância (m)	Ordenadas (mm)	Distância (m)	Ordenadas (mm)
0	0	0	0,00
2,747	120	0,999	46,40
2,997	125,4	1,998	94,90
3,247	120	2,997	137,40
8,741	-120	3,996	101,90
8,991	-125,4	4,995	54,90
9,241	-120	5,994	5,40
14,735	120	6,993	-47,10
14,985	125,4	7,992	-91,10
15,235	120	8,991	-129,60
17,982	0	9,99	-86,10
		10,989	-42,60
		11,988	2,90
		12,987	45,90
		13,986	89,40
		14,985	125,90
		15,984	82,40
		16,983	41,90
		17,982	0,00

**4.5.6.**  
**Modelos L18A10, L18A10S90a, L18A10S90b, L18A10S90IH**

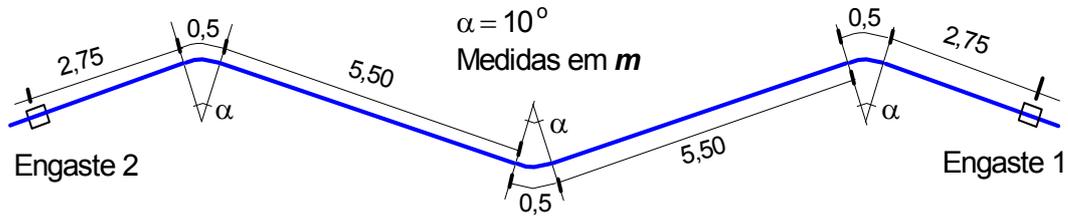


Figura 4.62 – Vista superior do modelo



Figura 4.63 – Coordenadas dos modelos L18A10, L18A10S90a, L18A10S90b, L18A10S90IH como construídos

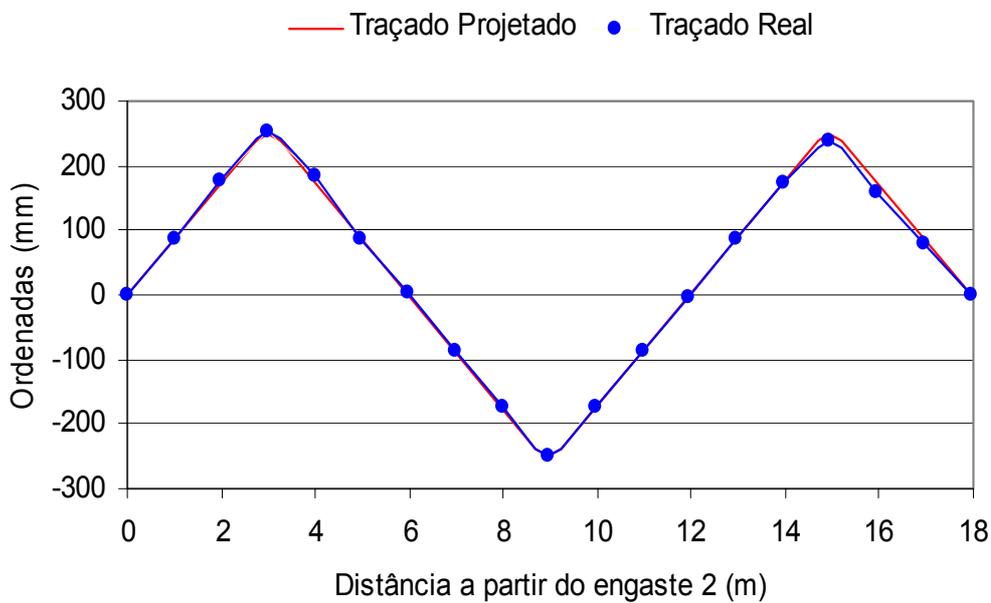


Figura 4.64 – Comparação entre os traçados projetado e real (como construído) para os modelos L18A10, L18A10S90a, L18A10S90b, L18A10S90IH

Tabela 4.14 – Traçados projetado e real dos modelos L18A10, L18A10S90a, L18A10S90b, L18A10S90IH. Distâncias medidas a partir do engaste 2.

Traçado projetado		Traçado real	
Distância (m)	Ordenadas (mm)	Distância (m)	Ordenadas (mm)
0	0	0	0,00
2,739	239,7	0,996	85,90
2,989	250,6	1,992	175,40
3,239	239,7	2,989	254,40
8,691	-239,7	3,985	184,90
8,966	-250,6	4,981	88,40
9,216	-239,7	5,977	2,90
14,693	239,7	6,973	-86,60
14,943	250,6	7,97	-174,60
15,193	239,7	8,966	-251,10
17,932	0	9,962	-173,10
		10,958	-87,10
		11,954	-2,10
		12,95	85,90
		13,947	172,90
		14,943	239,40
		15,939	159,90
		16,935	80,40
		17,932	0,00

**4.5.7. Modelos L18A15, L18A15S90a, L18A15S90b, L18A15S90IH**

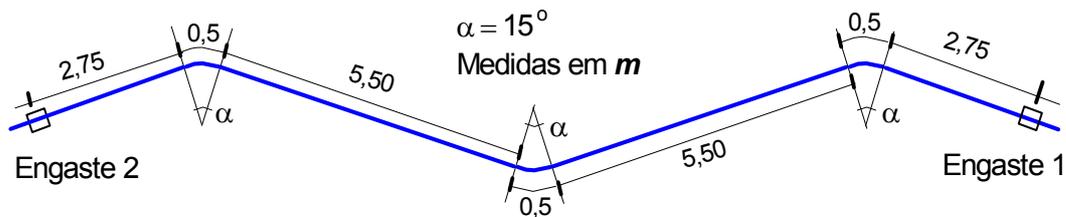


Figura 4.65 – Vista superior do modelo

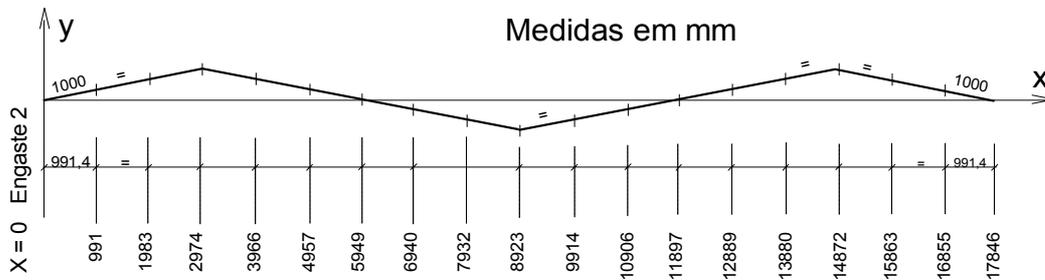


Figura 4.66 – Coordenadas dos modelos L18A15, L18A15S90a, L18A15S90b, L18A15S90IH como construídos

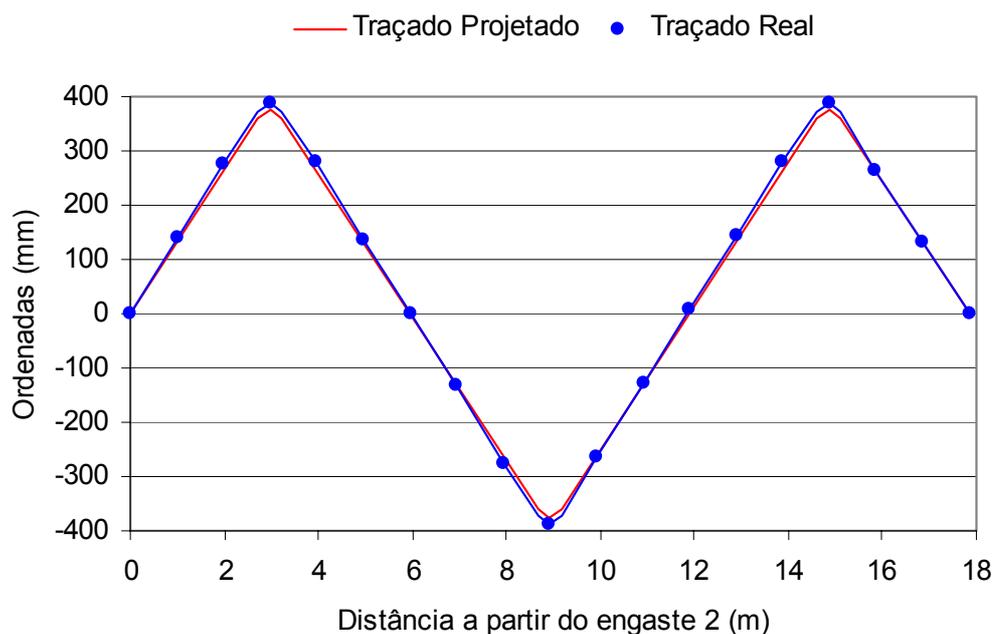


Figura 4.67 – Comparação entre os traçados projetado e real (como construído) para os modelos L18A15, L18A15S90a, L18A15S90b, L18A15S90IH

Tabela 4.15 – Traçados projetado e real dos modelos L18A15, L18A15S90a, L18A15S90b, L18A15S90IH. Distâncias medidas a partir do engaste 2.

Traçado projetado		Traçado real	
Distância (m)	Ordenadas (mm)	Distância (m)	Ordenadas (mm)
0	0	0	0,00
2,724	358,9	0,991	140,90
2,974	375,3	1,983	275,90
3,224	358,9	2,974	389,90
8,673	-358,9	3,966	278,90
8,923	-375,3	4,957	137,90
9,173	-358,9	5,949	-0,60
14,622	358,9	6,94	-131,10
14,872	375,3	7,932	-277,10
15,122	358,9	8,923	-389,10
17,846	0	9,914	-263,10
		10,906	-129,10
		11,897	6,90
		12,889	143,90
		13,88	279,90
		14,872	389,90
		15,863	262,90
		16,855	132,90
		17,846	0,00

**4.5.8.**  
**Modelos L16A0 e L16A0S90a**

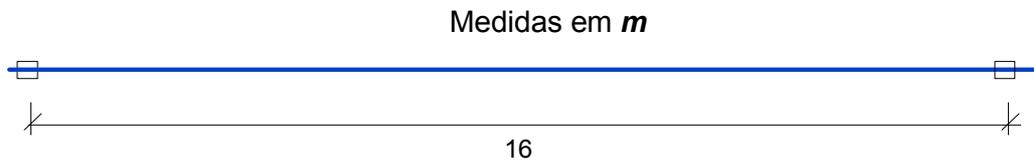


Figura 4.68 – Vista superior do modelo

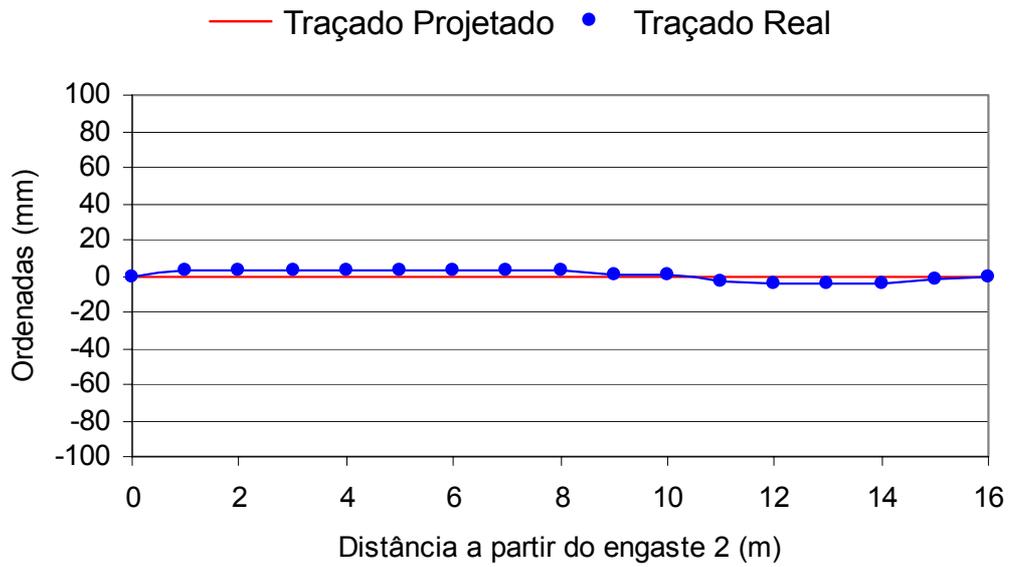


Figura 4.69 – Comparação entre os traçados projetado e real (como construído) para os modelos L16A0, L16A0S90a

Tabela 4.16 – Traçados projetado e real dos modelos L16A0, L16A0S90a. Distâncias medidas a partir do engaste 2.

Traçado projetado		Traçado real	
Distância (m)	Ordenadas (mm)	Distância (m)	Ordenadas (mm)
0	0	0	0,00
1	0	1	2,60
2	0	2	2,60
3	0	3	2,60
4	0	4	2,60
5	0	5	2,60
6	0	6	3,10
7	0	7	3,10
8	0	8	2,60
9	0	9	1,10
10	0	10	0,10
11	0	11	-3,40
12	0	12	-4,40
13	0	13	-4,40
14	0	14	-3,90
15	0	15	-2,40
16	0	16	0,00