

5 Apresentação e Análise dos Resultados

5.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos experimentalmente. A primeira comparação é feita entre os modelos reto e em ziguezague, para investigar a superioridade deste último com respeito ao seu comportamento a flambagem. Após esta comparação é estudada a influência do enterramento no modelo ziguezague. A segunda análise é feita para se estudar a influência do ângulo de ziguezague no comportamento do modelo. Por fim estuda-se o comportamento do modelo ao variar o seu comprimento.

5.2. Modelo Reto x Modelo Zig-Zag

Neste item é feita a comparação de deslocamentos, tensões e reação de apoio entre os modelos de duto reto e ziguezague. Esta comparação é feita entre um modelo de duto reto, de 16 metros de comprimento (Figura 5.69), e um modelo de duto ziguezague de mesmo comprimento (Figura 5.57), conforme o protótipo na sua configuração atual, ou seja, com ângulo de dobramento de 10° e comprimento do tramo igual a 2 metros.

Nas Figuras 5.1 e 5.2 é apresentado o deslocamento lateral ao longo dos modelos reto e em ziguezague, sem reação lateral do solo, para a temperatura inicial ($\cong 20^\circ\text{C}$), de operação ($\cong 80^\circ\text{C}$) e de pico ($\cong 105^\circ\text{C}$), com pressão interna igual a $4,5 \text{ MPa}$.

No ensaio do duto reto foi aplicada uma imperfeição no centro do modelo de 5 mm para garantir que sua flambagem ocorresse no sentido em que os transdutores de deslocamentos estavam posicionados.

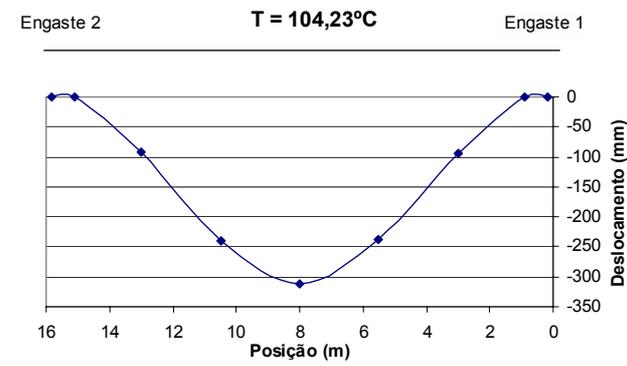
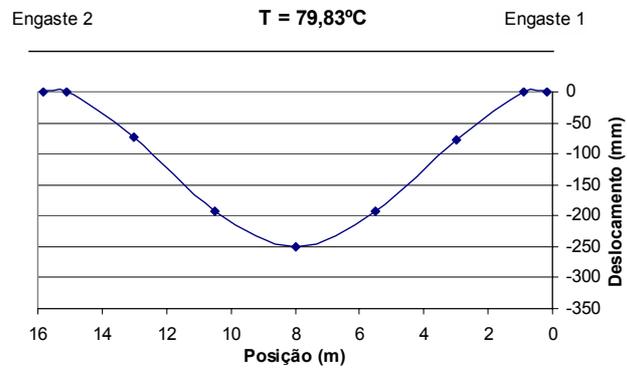
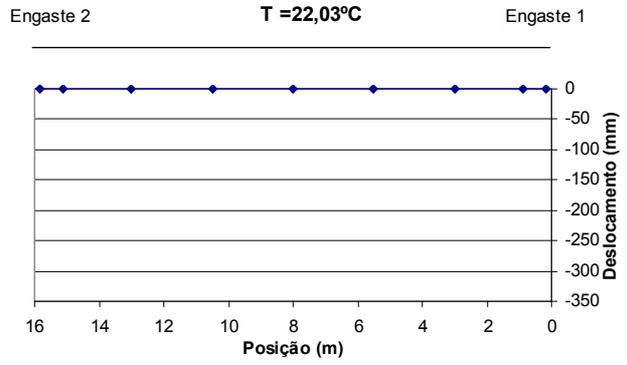
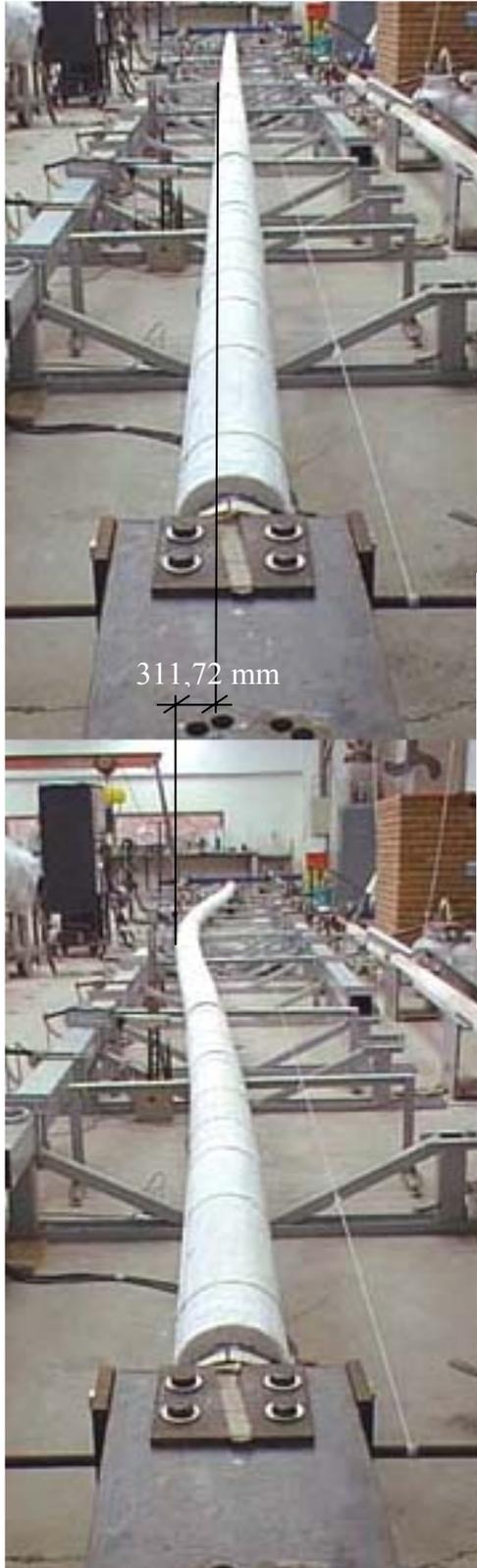


Figura 5.1 – Deslocamento lateral do duto reto (L16A0)

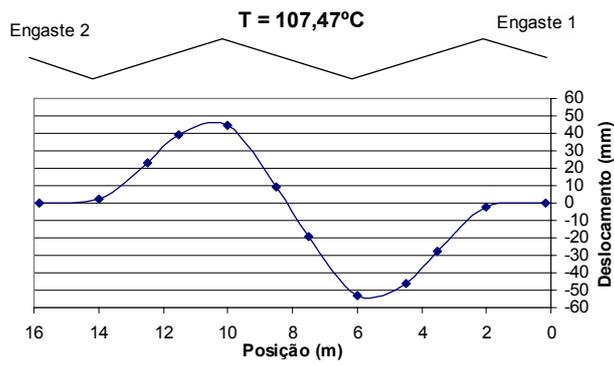
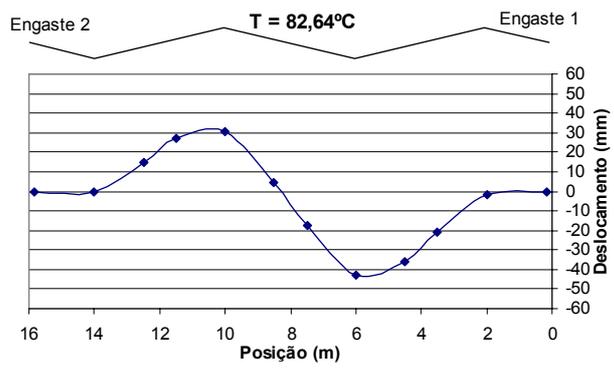
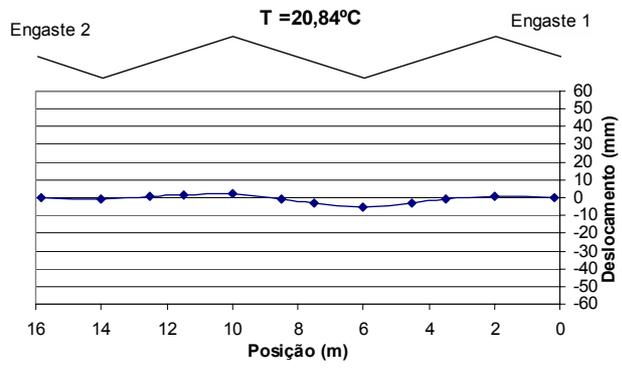
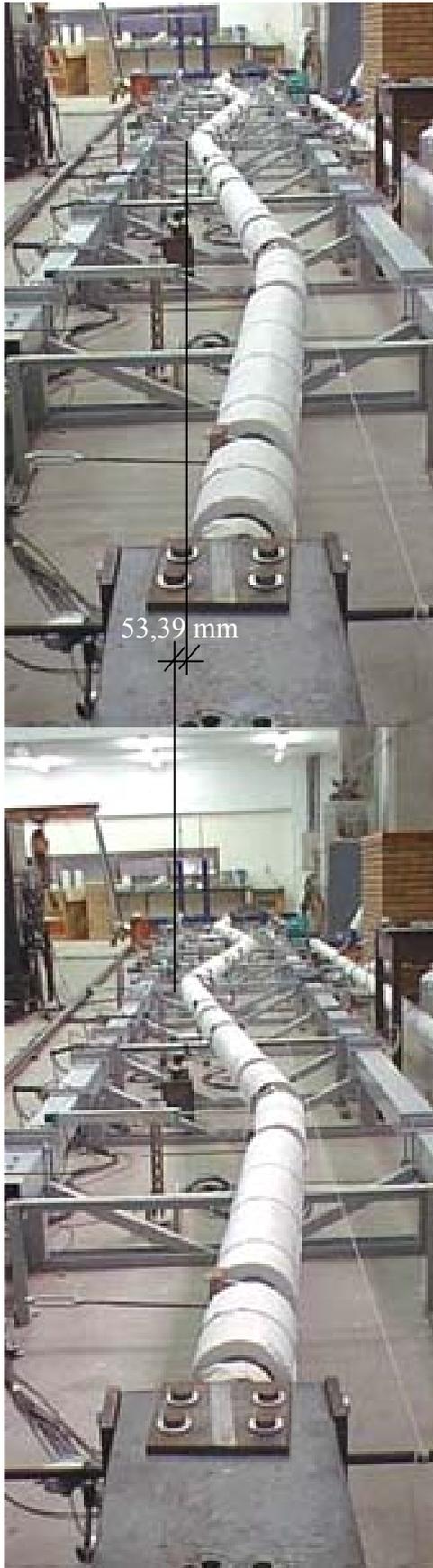


Figura 5.2 – Deslocamento lateral do duto ziguezague (L16A10)

O modelo de duto reto (L16A0), ao atingir a temperatura de pico (104,23°C), apresentou deslocamento máximo no centro do modelo e atingiu o valor máximo de 311,72 mm (no protótipo este valor corresponderia a 1870,32 mm). O modelo de duto em ziguezague (L16A10) teve seu deslocamento máximo de 53,39 mm medido a 6 metros do engaste 1. Pode-se observar que o deslocamento no modelo reto é quase 6 vezes maior do que no modelo *zig-zag*. No modelo *zig-zag* estes deslocamentos são reduzidos devido a sua configuração onde o deslocamento não se concentra em apenas um ponto como no duto reto, mas é distribuído por todas as curvas, reduzindo assim a força gerada pela expansão térmica do duto, como mostrado na Figura 5.3.

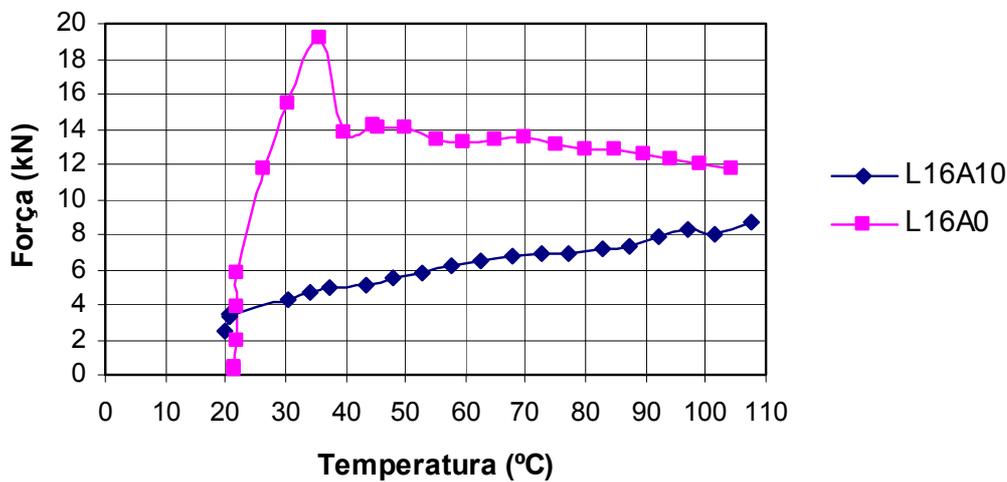


Figura 5.3 – Força axial x Temperatura dos modelos L16A0 (reto) e L16A10 (zi-zag)

Para o modelo reto, a carga axial provocada pela expansão térmica cresce rapidamente para pequenas variações de temperatura até atingir a carga crítica. Quando esta é atingida ocorre o fenômeno conhecido como “*snap-through*”, quando o duto dá um “salto” e inicia-se sua flambagem lateral. A flambagem ocorreu em torno dos 36°C e o valor da força axial era próxima a 20,0 kN neste momento. No duto em ziguezague a carga axial máxima foi de 8,68 kN.

Mais uma vez o modelo *zig-zag* apresentou um comportamento melhor quando comparado com o modelo reto.

As Figuras 5.4 e 5.5 apresentam os valores das tensões principais máximas (S_u) e mínimas (S_v) ao longo dos modelos reto e em ziguezague. Para temperaturas de aproximadamente 20°C os valores correspondentes de tensão são devidos somente à pressão interna e em seguida é adicionada variação de temperatura. Estas tensões foram calculadas pelas equações 4.1 e 4.2.

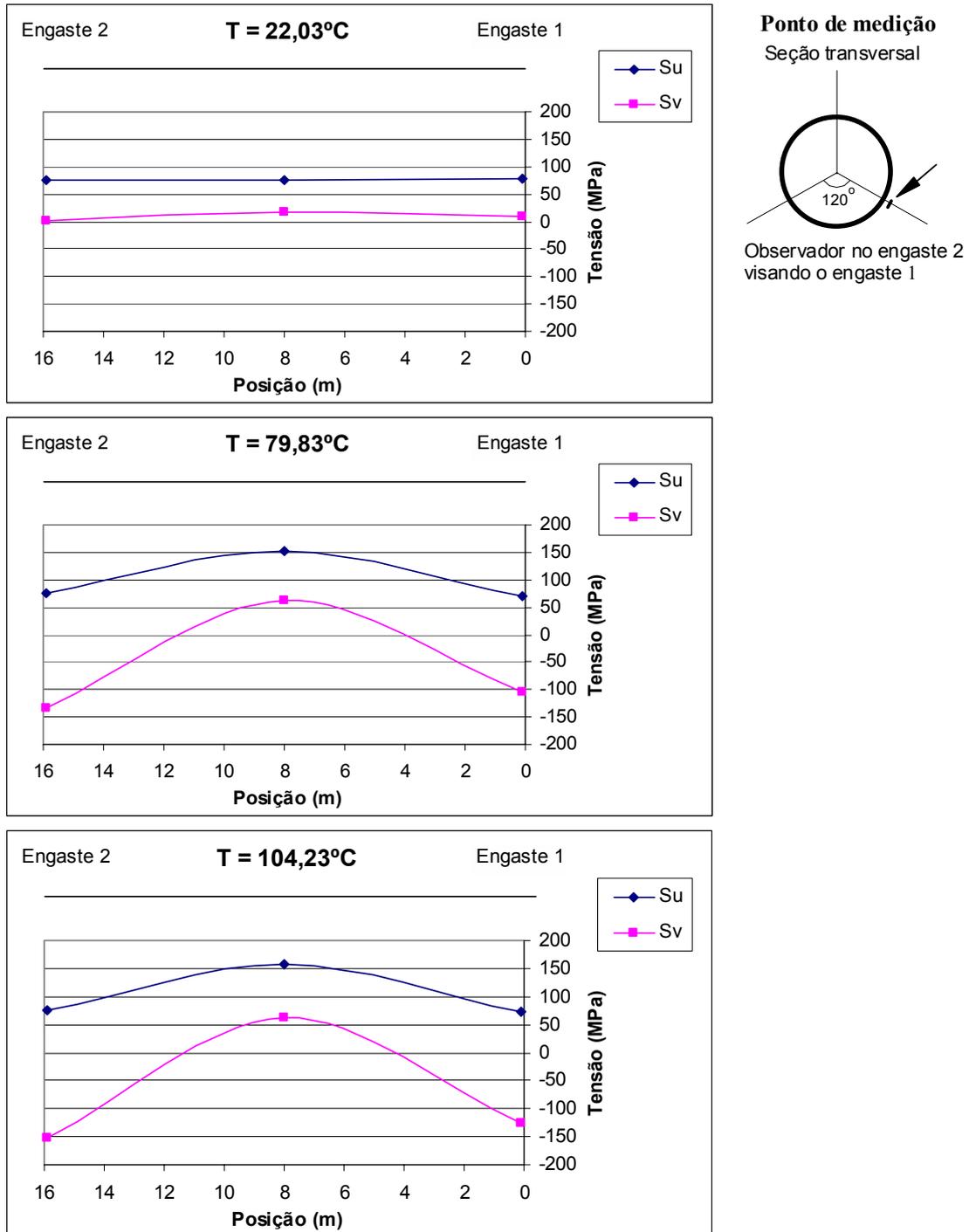


Figura 5.4 – Tensões principais máximas e mínimas ao longo do modelo L16A0 (reto) com pressão interna de 4,5 MPa

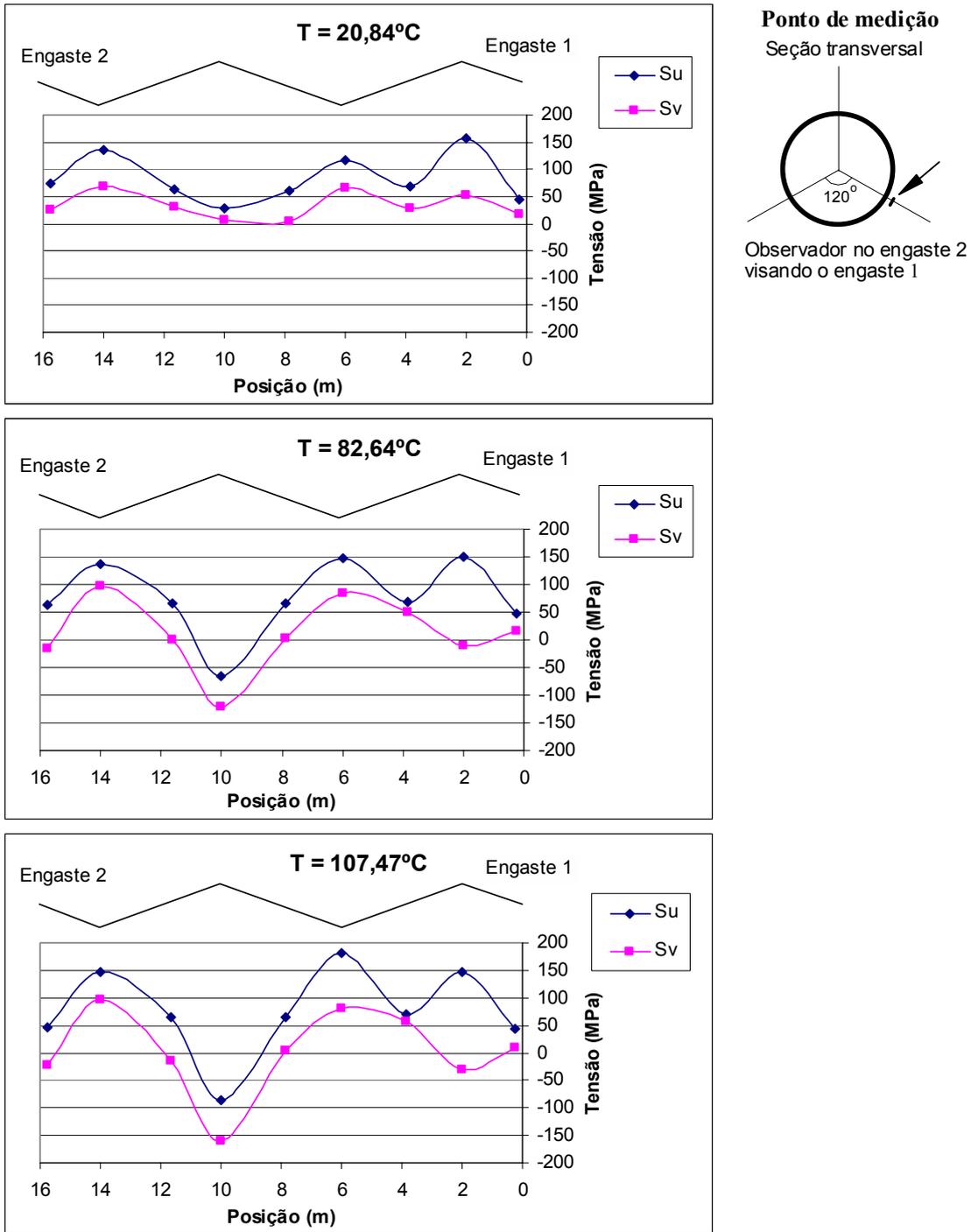


Figura 5.5 – Tensões principais máximas e mínimas ao longo do modelo L16A10 (zig-zag) com pressão interna de 4,5 MPa

Nos modelos sem reação lateral do solo, as tensões longitudinais máximas, que ocorreram nas seções indicadas na Figura 6.6, apresentaram valores de mesma magnitude, com 180,38 MPa para o duto em ziguezague, e 166,81 MPa para o duto reto, ambas de tração. No modelo reto, a tensão longitudinal de compressão máxima atingiu 181,96 MPa. Estas tensões foram calculadas pelas equações 4.3 e 4.4.

Duto em zig-zag

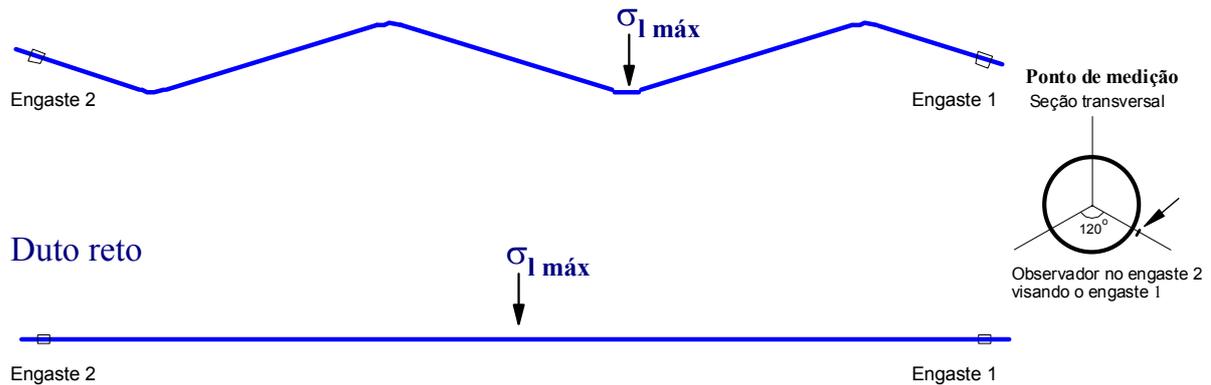


Figura 5.6 – Tensão longitudinal máxima medida na seção indicada

Nos modelos com 1 metro de enterramento veremos que as diferenças são bem mais expressivas.

A Figura 5.7 mostra que com o enterramento do modelo *zig-zag* (L16A10S90a), o deslocamento lateral máximo é reduzido em 56% quando comparado com o modelo livre (Figura 5.2).

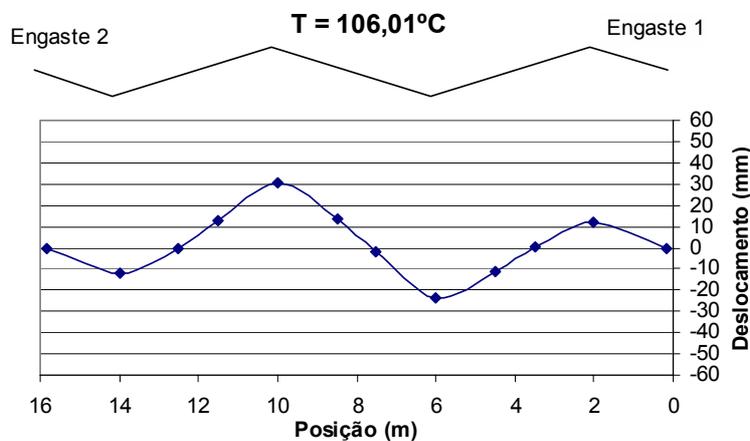


Figura 5.7 – Deslocamento lateral ao longo do modelo L16A10S90a

O modelo reto (L16A0S90a) quando enterrado não flambou lateralmente como o modelo livre (sem reação lateral do solo), isto porque a carga vertical (7,80 kg/m), correspondente ao peso do modelo cheio, era menor do que a reação lateral (88,0 kg/m), ocorrendo assim a flambagem no plano vertical. Este enterramento do modelo gerou tensões elevadas no duto, como será mostrado a

era superior a $64,0 \text{ kN}$, o que no protótipo corresponderia a quase $2304,0 \text{ kN}$. No modelo *zig-zag* a carga axial máxima foi de $18,76 \text{ kN}$.

Na Figura 5.10 é apresentada a tensão longitudinal em função da temperatura para os modelos reto e em ziguezague, valores tomados nos mesmos pontos vistos na Figura 5.6.

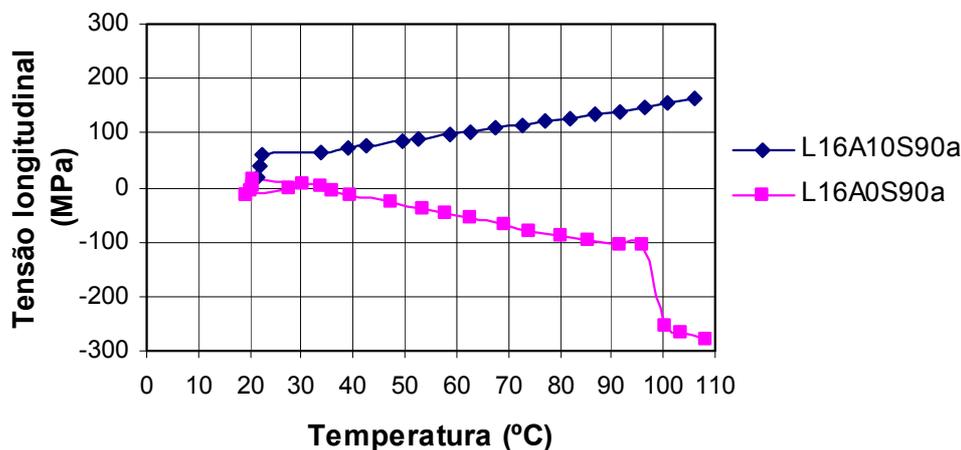


Figura 5.10 – Tensão longitudinal x Temperatura dos modelos L16A0S90a e L16A10S90a

No modelo reto a tensão longitudinal máxima de compressão medida no modelo foi de $277,62 \text{ MPa}$, que equivale a 80,5% da tensão de escoamento do material. Já no duto em ziguezague este valor foi de $163,59 \text{ MPa}$, ou 47,4% da tensão de escoamento.

Observou-se que, ao final do ensaio do modelo reto, este não retornou à posição de origem, o que indica que houve escoamento em algum ponto fora dos que estão sendo medidos (Figura 4.27). Para saber onde ocorreram estas tensões elevadas foram utilizadas as equações 4.5 a 4.8 (Rocha et al, 2002 [31]), onde pode-se constatar que a tensão mínima na seção, ou tensão máxima de compressão, atingiu a tensão de escoamento.

Com o enterramento dos modelos os deslocamentos obtidos foram menores, mas as tensões e a força axial foram maiores, sendo que o modelo *zig-zag* apresentou melhores resultados.

5.3. Influência do Enterramento no Modelo *Zig-Zag*

Neste item é estudada a influência do enterramento sobre os deslocamentos, tensões e reação de apoio para o mesmo modelo *zig-zag* com $L_D = 16 m$ e ângulo de dobramento de 10° .

Na Figura 5.11 é apresentado o deslocamento lateral ao longo do modelo com 1 metro de enterramento. Observa-se que, mesmo com o enterramento, o modelo tenta se deslocar da mesma forma como se estivesse livre, só que os dispositivos que simulam o solo reduzem este movimento, como pode ser visto a seguir.

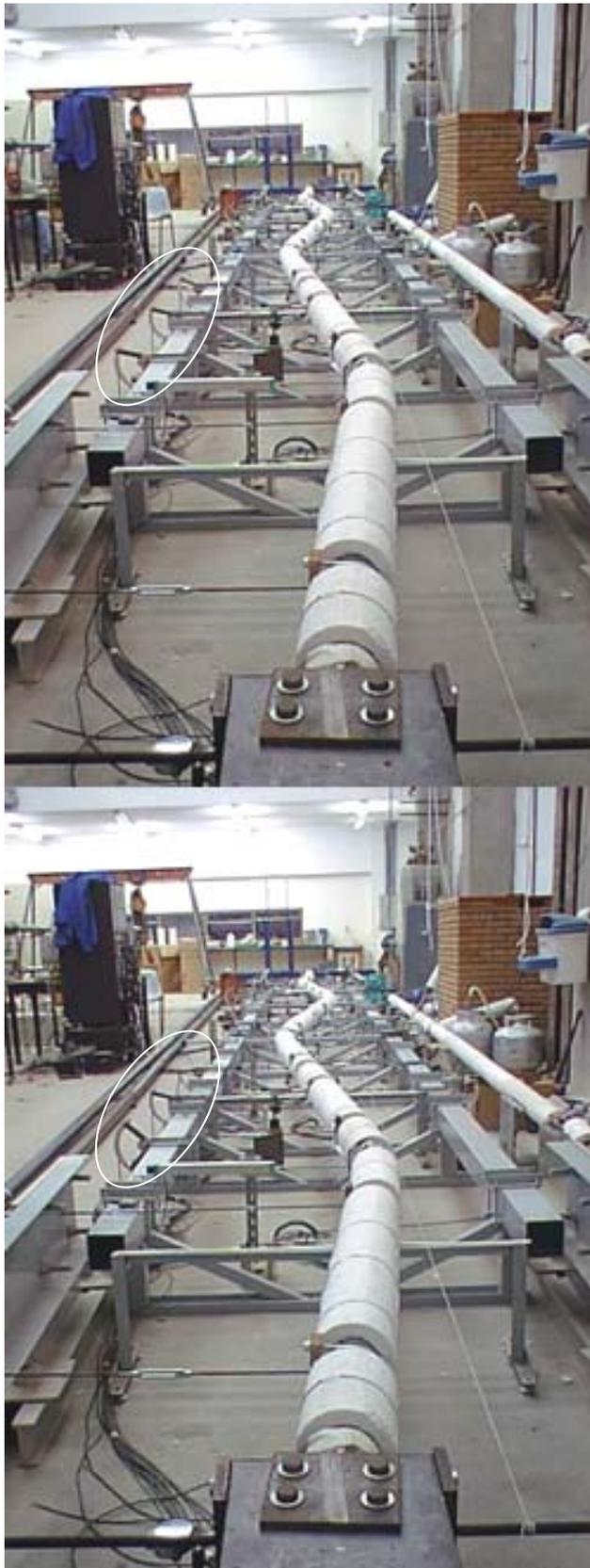


Figura 5.11 – Funcionamento dos dispositivos que simulam o solo ao longo do modelo L16A10S90a

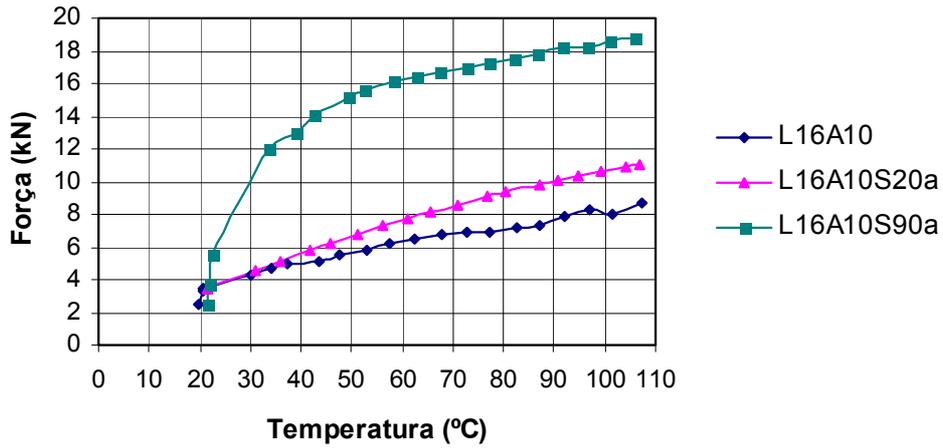


Figura 5.13 – Força axial x Temperatura para os modelos L16A10, L16A10S20a e L16A10S90a

Pode-se observar que no modelo com até 50% de enterramento o sistema apresenta boa flexibilidade e a força axial é reduzida.

Para o resultado das tensões, a seção onde estes valores são tomados é apresentado na Figura 5.14:

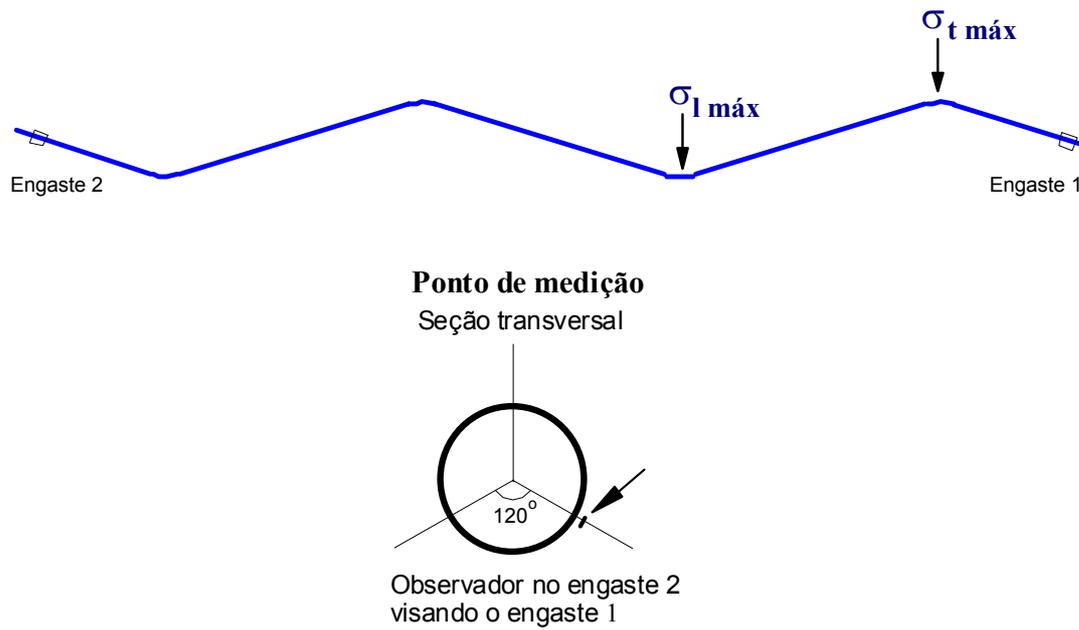


Figura 5.14 – Local onde foram medidas as tensões longitudinal e transversal máximas

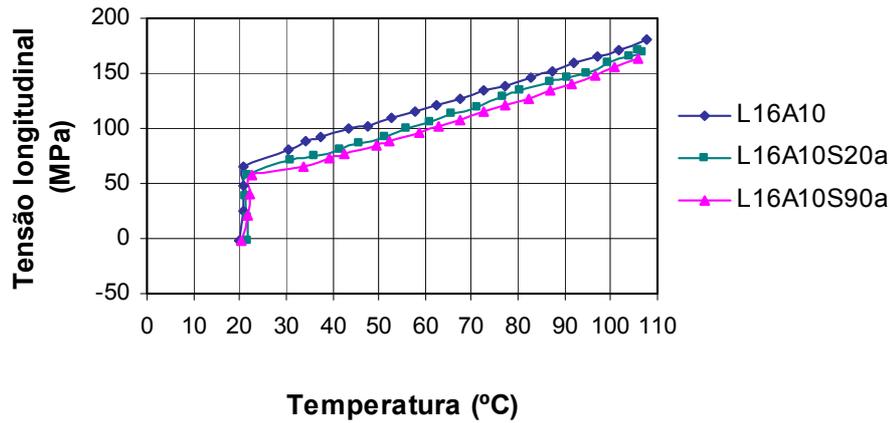


Figura 5.15 – Tensão longitudinal x Temperatura dos modelos L16A10, L16A10S20a e L16A10S90a

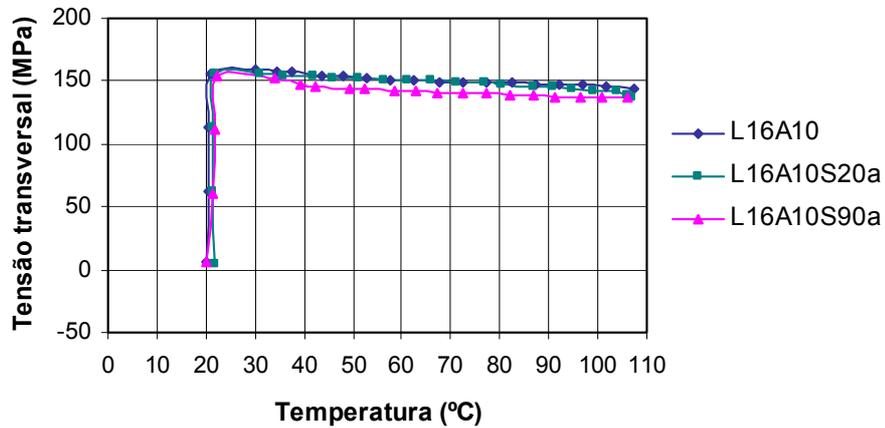


Figura 5.16 – Tensão transversal x Temperatura dos modelos L16A10, L16A10S20a e L16A10S90a

Observa-se que no modelo *zig-zag* o enterramento não influencia as tensões que surgem durante sua operação (Figuras 5.15 e 5.16).

O próximo passo é avaliar o comportamento do modelo ao variar o ângulo do zigzague e o seu comprimento.

5.4. Influência do Ângulo de Dobramento no Modelo Zig-Zag

Para o estudo da influência do ângulo de zig-zague no comportamento do modelo foram utilizados dois modelos: o primeiro com 12 metros de comprimento ($L_D = 12\text{ m}$), e o segundo com 18 metros de comprimento ($L_D = 18\text{ m}$). Em ambos os modelos foram realizados ensaios para o ângulo de zig-zague assumindo valores de 5° , 10° e 15° .

Para os resultados de deslocamento, a seção correspondente ao deslocamento máximo será sempre no centro do modelo. Para os resultados de tensões as seções e seus respectivos pontos de medição serão sempre os apresentados na Figura 6.14.

A Figura 5.17 apresenta o deslocamento ao longo do modelo de 12 metros de comprimento, sem reação lateral do solo, para os diferentes ângulos de zig-zague.

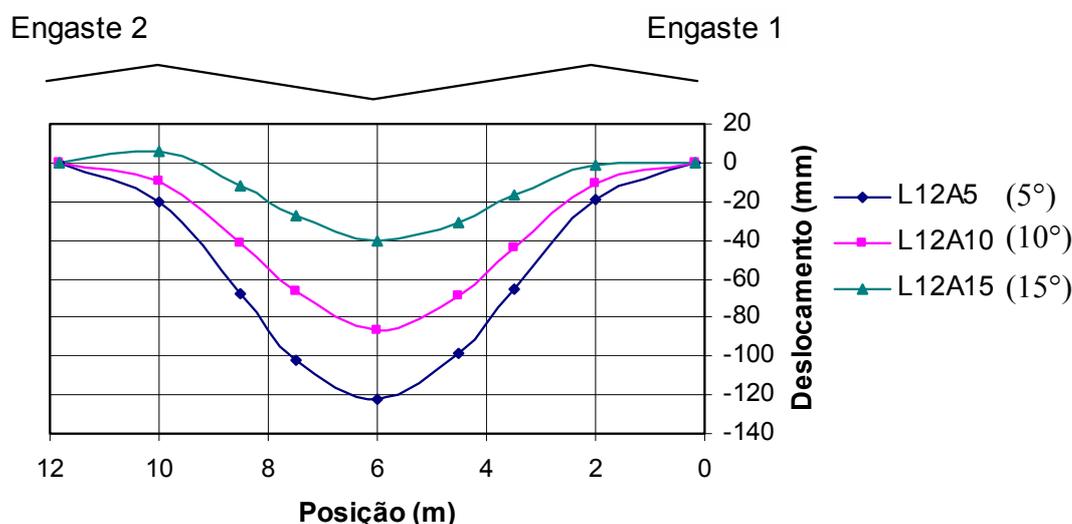


Figura 5.17 – Deslocamento ao longo dos modelos L12A5, L12A10 e L12A15

Como pode-se observar quanto maior o ângulo de zig-zague mais estável é o modelo, ou seja, o deslocamento lateral varia inversamente com o ângulo de zig-zague. Nos modelos com ângulo de dobramento de 5° e 10° todo o conjunto se desloca para o mesmo lado, indicando a ocorrência da flambagem.

O mesmo comportamento é visto para o modelo de 18 metros de comprimento variando-se o ângulo de zigzague (Figura 5.18), sendo que apenas no modelo com ângulo de dobramento de 5° ocorre flambagem.

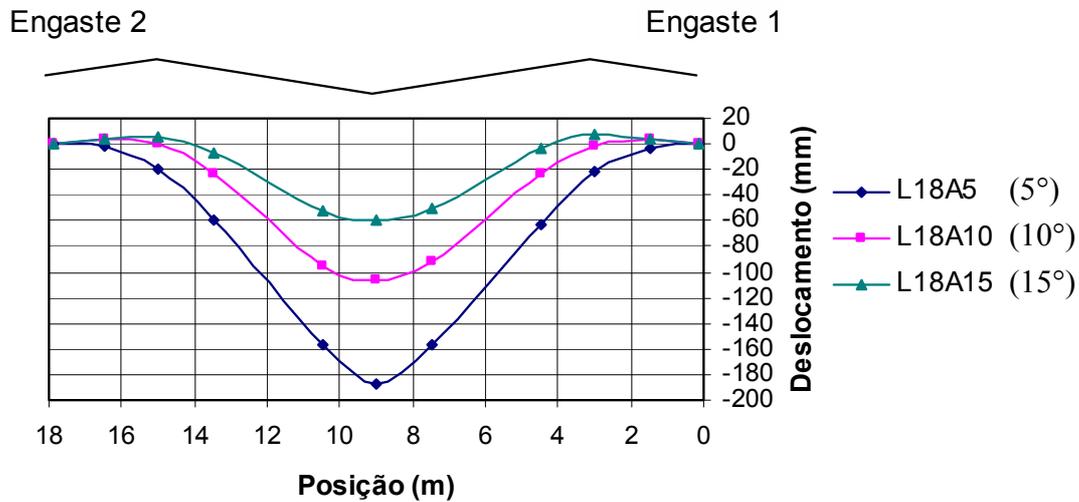


Figura 5.18 – Deslocamento ao longo dos modelos L18A5, L18A10 e L18A15

Os valores da reação de apoio no modelo de 12 e 18 metros de comprimento com 1 metro de enterramento e vão central livre, para os diferentes ângulos de zigzague, são mostrados na Figura 5.19.

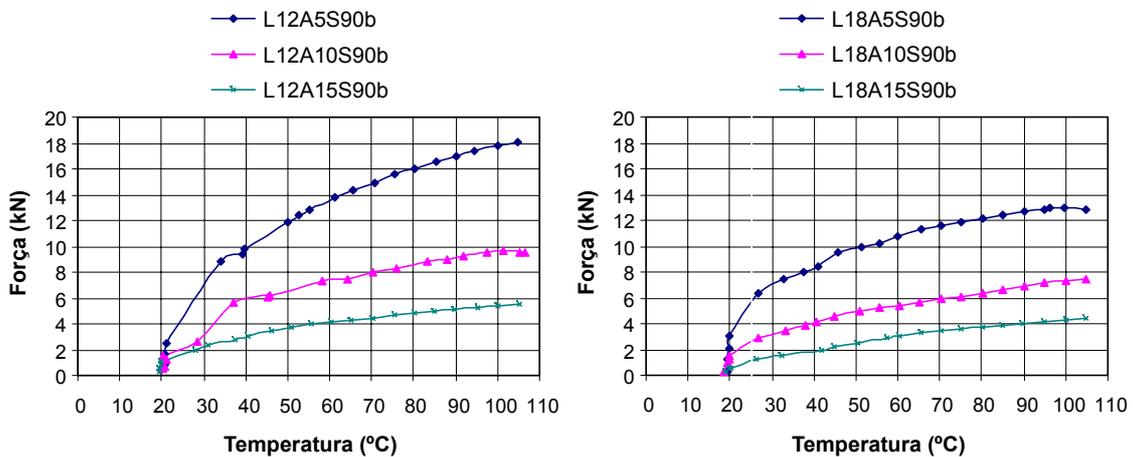


Figura 5.19 – Força axial x Temperatura para os modelos de 12 metros (L12A5S90b, L12A10S90b e L12A15S90b) e 18 metros (L18A5S90b, L18A10S90b e L18A15S90b)

Observa-se que para os modelos de 12 e 18 metros de comprimento, quanto menor o ângulo de zigzague, maior será a força axial exercida no duto devido a expansão térmica.

As tensões longitudinal e transversal no modelo de 18 metros de comprimento, com 1 metro de enterramento e vão central livre são mostradas nas Figuras 5.21 e 5.22. Os pontos onde estas tensões são medidas estão indicadas na Figura 5.20

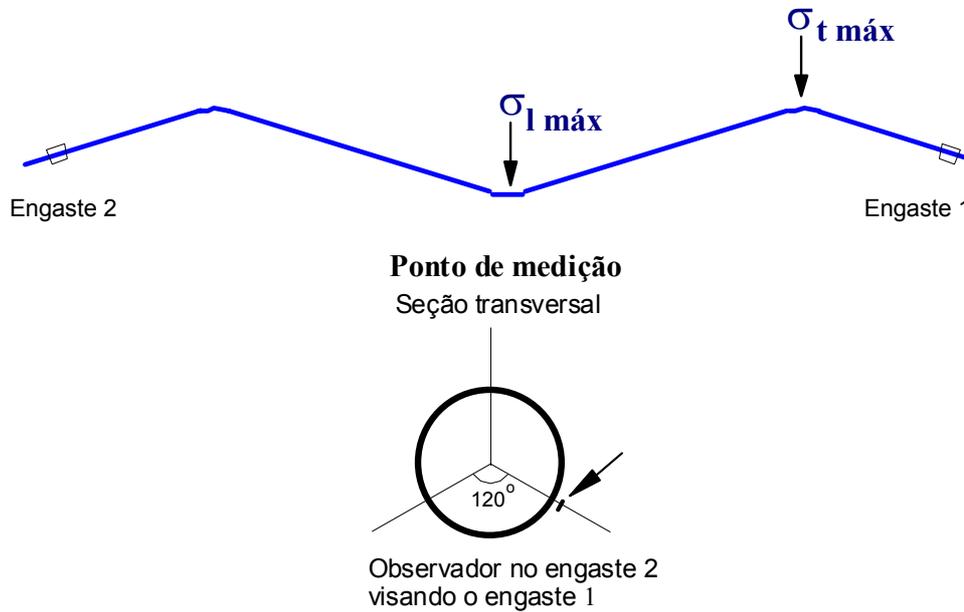


Figura 5.20 – Local onde são medidas as tensões longitudinal e transversal máxima

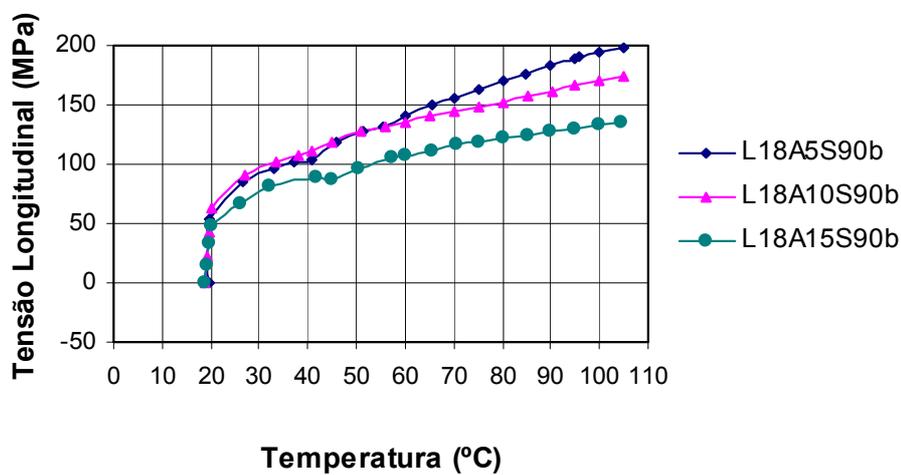


Figura 5.21 – Tensão longitudinal x Temperatura dos modelos L18A5S90b, L18A10S90b e L18A15S90b

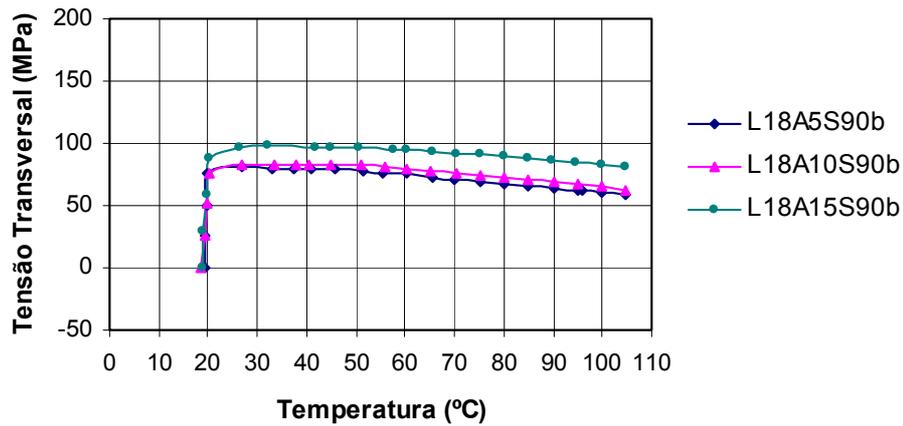


Figura 5.22 – Tensão transversal x Temperatura dos modelos L18A5S90b, L18A10S90b e L18A15S90b

Para este modelo observa-se que quanto maior o aumento do ângulo de ziguezague menor é a tensão longitudinal e maior é a tensão transversal medida.

5.5. Influência do Comprimento no Modelo *Zig-Zag*

Para o estudo da influência do comprimento no comportamento do modelo serão utilizados os mesmos modelos vistos anteriormente: o primeiro com $L_D = 12$ m, e o segundo com $L_D = 18$ m. Em ambos os modelos foram feitos ensaios para o ângulo de ziguezague de 5° , 10° e 15° .

A Figura 6.23 apresenta a comparação do deslocamento no centro dos modelos com ângulo de ziguezague de 5° e sem reação lateral do solo. Pode-se observar que com o aumento do comprimento dos modelos os deslocamentos medidos também são maiores.

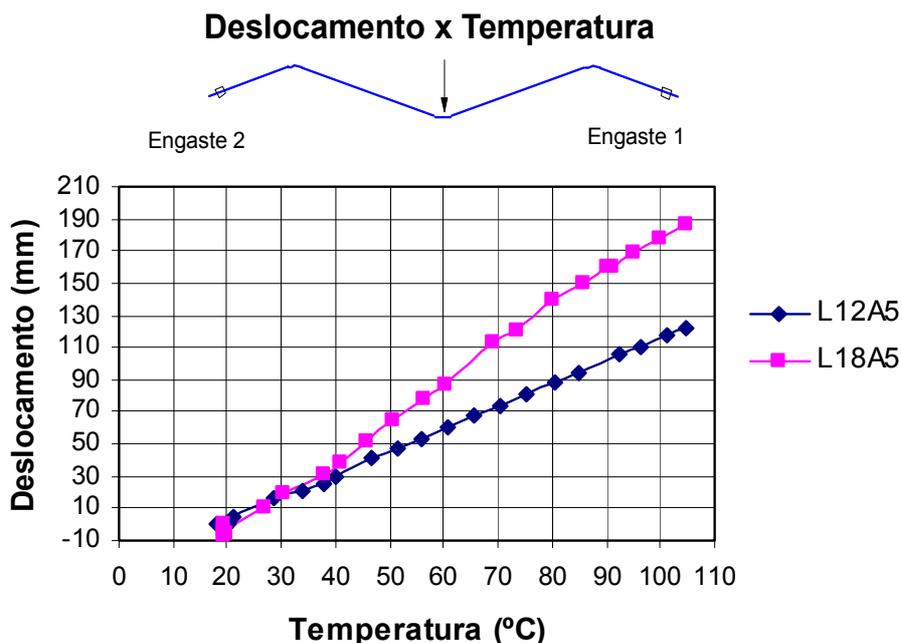


Figura 5.23 – Deslocamento no centro dos modelos L12A5, L18A5

A força axial provocada pela dilatação térmica dos modelos diminui com o aumento do comprimento para os modelos que não têm reação lateral de solo em toda sua extensão, que é o caso do modelo livre e o modelo com 1 metro de enterramento e vão central livre. Para os modelos com reação lateral de solo em toda sua extensão, que é o caso do modelo com 1 metro de enterramento e com imperfeição horizontal, a força axial aumenta com o aumento do comprimento. Um destes exemplos pode ser visto nas Figuras 5.24 e 5.25 para modelos com ângulo de dobramento de 15°.

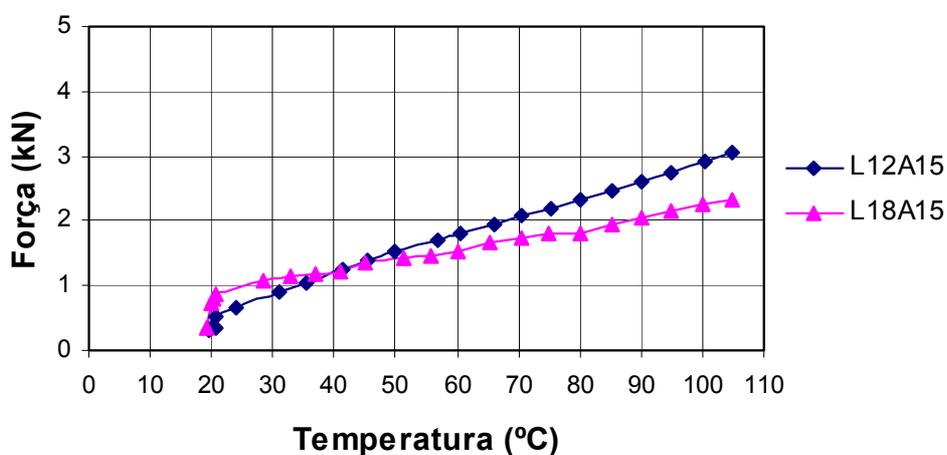


Figura 5.24 – Força axial x Temperatura para os modelos L12A5 e L18A5

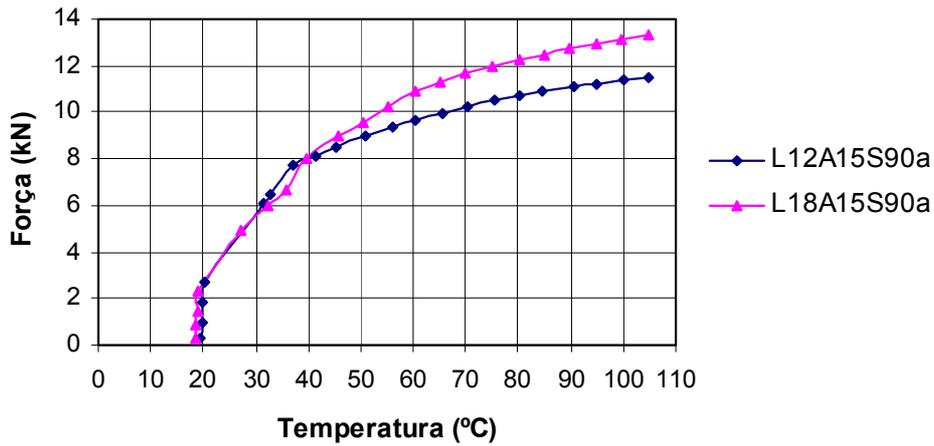


Figura 5.25 – Força axial x Temperatura para os modelos L12A15S90a e L18A15S90a

Como visto na Figura 5.23, o deslocamento do modelo de 18 metros é maior do que o do modelo de 12 metros, e suas respectivas curvaturas são: 0,0101 e 0,0104. Isto implicará em tensões maiores nos modelos de 18 metros. A Figura 5.26 apresenta o resultado das tensões mínimas, ou tensões de compressão, que surgem no centro dos modelos sem reação lateral de solo.

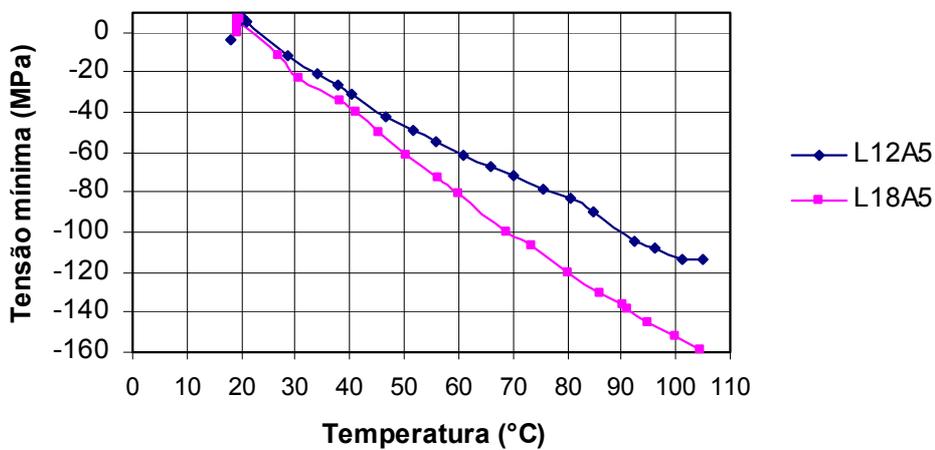


Figura 5.26 – Tensão mínima x Temperatura para os modelos L12A5 e L18A5

Pode-se observar que no início do ensaio os modelos estão submetidos somente à pressão interna e, devido ao efeito de Poisson, a seção do duto fica toda tracionada. Após o aquecimento surgem as tensões de compressão, cujos valores em módulo são superiores aos da tensão de tração.

5.6. Resultados Gerais

A seguir é apresentado um quadro com o resumo dos principais resultados de todos os ensaios realizados. Para os valores das tensões o sinal negativo indica compressão. As tensões máxima e mínima são tensões encontradas na seção como indicada na Figura 5.27.

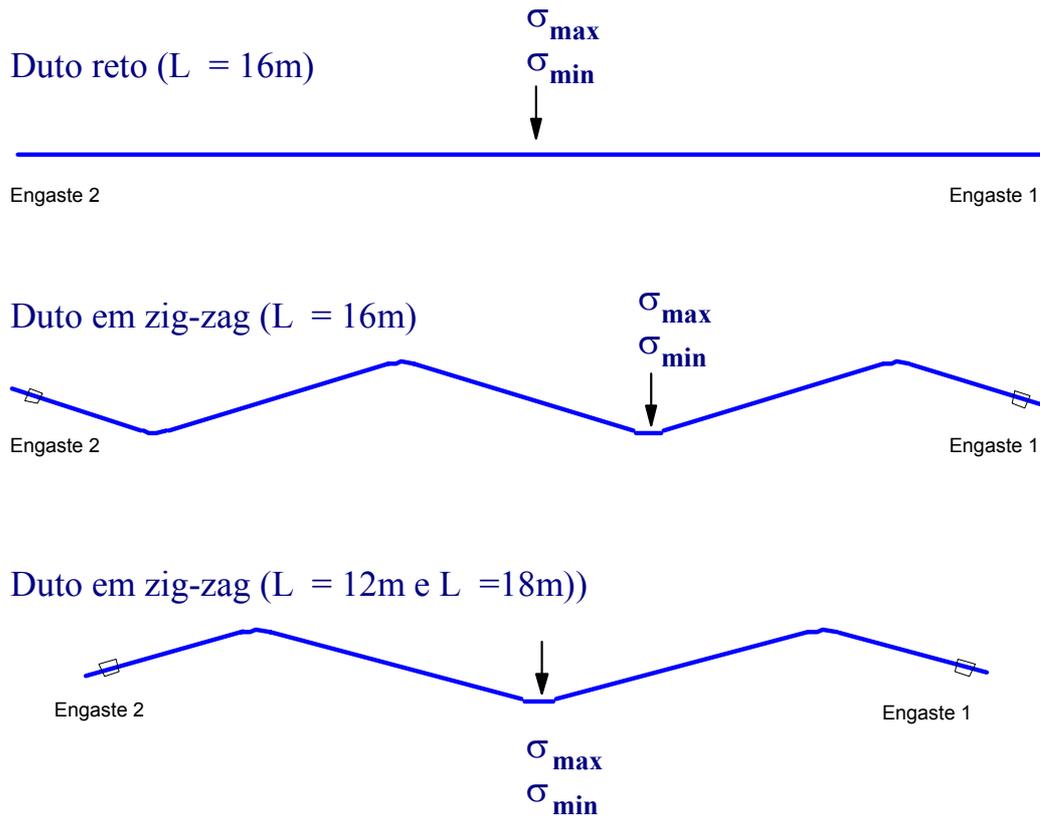


Figura 5.27 – Seções em que foram medidas as tensões máxima e mínima

Tabela 5.1 – Quadro resumo dos resultados

MODELO	F_{\max} (kN)	δ_{\max} (mm)	Dist. do Eng. 1 (m)	σ_1 (MPa)	σ_t (MPa)	σ_{\max} (MPa)	σ_{\min} (MPa)	ϕ_{\max}	ϕ_{\min}
L16A10	8,68	53,39	6,00	180,38	158,44	275,67	-114,10	36,7	-143,3
L16A10IH	6,62	138,81	6,00	198,37	150,99	190,26	-152,92	174,7	-5,3
L16A10S20a	11,00	35,31	8,00	171,03	156,34	161,78	-137,42	173,5	-6,5
L16A10S20b	8,68	49,06	8,00	178,98	159,55	181,08	-132,61	1,6	-178,4
L16A10S90a	18,76	30,42	14,00	163,59	157,36	154,80	-159,34	174,9	-5,1
L16A10S90b	10,10	44,31	14,00	185,24	160,94	181,93	-151,07	176,9	-3,1
L16A0	19,22	311,72	8,00	166,81	82,79	185,33	-219,40	4,1	-175,9
L16A0S90a	63,00	135,00	8,00	-277,62	144,67	216,33	-345,00	87,7	-92,3
L12A5	9,98	121,72	6,00	142,18	73,43	129,87	-113,83	3,3	-176,7
L12A5S90a	32,45	34,74	6,00	86,47	73,38	79,87	-165,86	178,4	-1,6
L12A5S90b	18,09	79,14	6,00	150,66	70,88	139,98	-158,20	3,9	-176,1
L12A5S90IH	30,63	116,98	6,00	144,26	77,77	138,40	-209,74	1,3	-178,7
L12A10	5,77	86,52	6,00	170,79	159,52	164,55	-129,40	176,6	-3,4
L12A10S90a	18,20	21,71	6,00	140,83	157,42	129,34	-137,63	174,4	-5,6
L12A10S90b	9,70	54,39	6,00	180,00	158,45	181,72	-149,25	178,7	-1,3
L12A10S90IH	18,58	107,29	6,00	215,34	154,06	221,42	-221,60	175,8	-4,2
L12A15	3,06	40,28	6,00	45,69	63,60	52,91	-37,80	27,9	-152,1
L12A15S90a	11,50	19,55	6,00	55,67	64,20	59,70	-43,11	36,5	-143,5
L12A15S90b	5,51	40,88	6,00	72,25	62,96	76,08	-47,46	23,8	-156,2
L12A15S90IH	12,21	97,19	6,00	99,03	46,49	100,66	-84,29	16,1	-163,9
L18A5	5,30	187,22	9,00	138,76	80,51	142,21	-159,19	3,3	-176,7
L18A5S90a	35,90	43,73	15,00	78,74	80,01	83,93	-221,96	4,8	-175,2
L18A5S90b	12,99	132,58	9,00	198,06	80,30	219,07	-266,45	4,5	-175,5
L18A5S90IH	33,10	154,82	9,00	154,67	80,80	183,54	-291,55	8,3	-171,7
L18A10	3,61	106,06	9,00	119,61	83,18	116,59	-109,89	2,2	-177,8
L18A10S90a	20,12	32,63	15,00	135,72	81,80	145,76	-211,68	4,5	-175,5
L18A10S90b	7,40	87,10	9,00	174,09	83,60	185,29	-196,49	4,0	-176,0
L18A10S90IH	19,82	146,45	9,00	169,98	81,22	261,10	-226,62	27,5	-152,5
L18A15	2,34	59,68	9,00	87,92	98,80	84,67	-72,24	5,8	-174,2
L18A15S90a	13,28	20,66	9,00	127,64	96,36	135,65	-171,84	4,2	-175,8
L18A15S90b	4,42	58,20	9,00	135,24	97,92	140,09	-142,38	2,9	-177,1
L18A15S90IH	13,03	134,24	9,00	139,58	95,77	150,86	-182,74	5,2	-174,8

Onde:

F_{\max} = Força axial máxima;

δ_{\max} = Deslocamento máximo medido a partir do engaste 1;

σ_1 = Tensão longitudinal medida no ponto apresentado nas Figuras 5.6, 5.14 e 5.20;

σ_t = Tensão transversal medida no ponto apresentado nas Figuras 5.6, 5.14 e 5.20;

σ_{max} = Tensão máxima medida na seção apresentada na Figuras 5.27;

σ_{min} = Tensão mínima medida na seção apresentada na Figuras 5.27;

ϕ_{max} = ângulo em que ocorre a tensão máxima com o eixo x ;

ϕ_{min} = ângulo em que ocorre a tensão mínima com o eixo y .

A partir destes resultados são apresentados os gráficos para o deslocamento (δ), força axial (P) e tensão máxima de compressão (σ_{min}) para a temperatura de pico ($\approx 105^\circ\text{C}$) variando-se o ângulo de zig-zag (α).

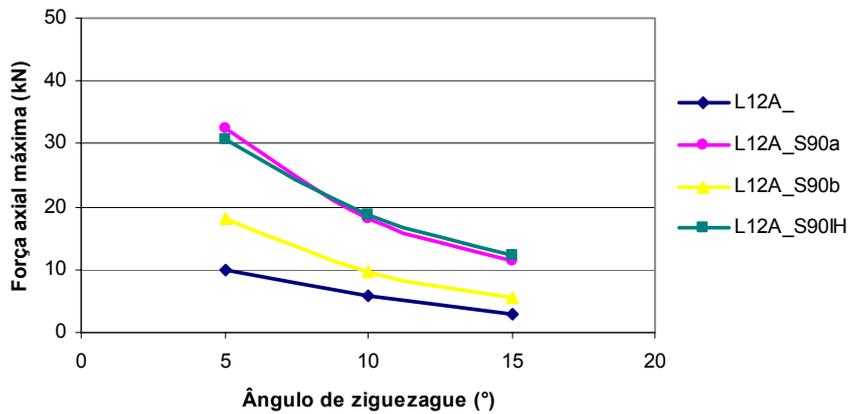


Figura 5.28 – Força axial máxima nos modelos de 12 metros para diferentes ângulos de zig-zague

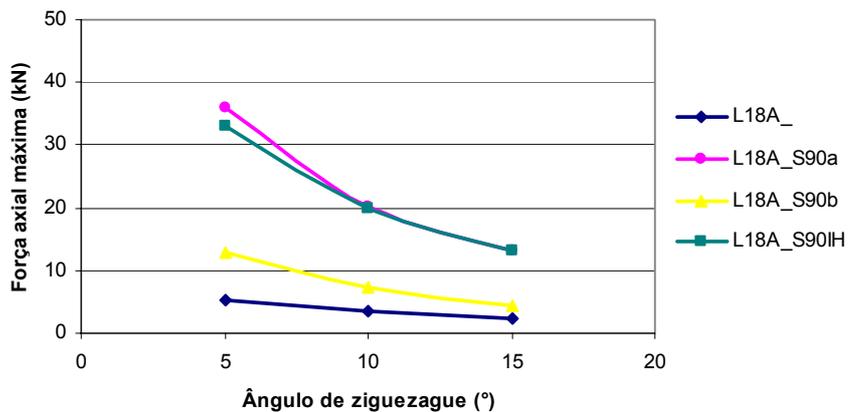


Figura 5.29 – Força axial máxima nos modelos de 18 metros para diferentes ângulos de zig-zague

Pode-se observar que para os modelos de 12 e 18 metros de comprimento (Figuras 5.28 e 5.29), o aumento do ângulo de ziguezague leva a uma redução da força axial máxima ($T \approx 105^\circ\text{C}$).

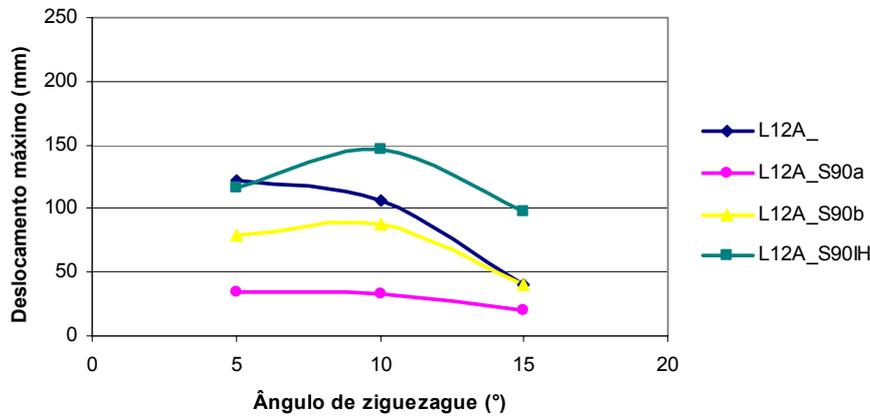


Figura 5.30 – Deslocamento máximo no centro dos modelos de 12 metros para diferentes ângulos de ziguezague

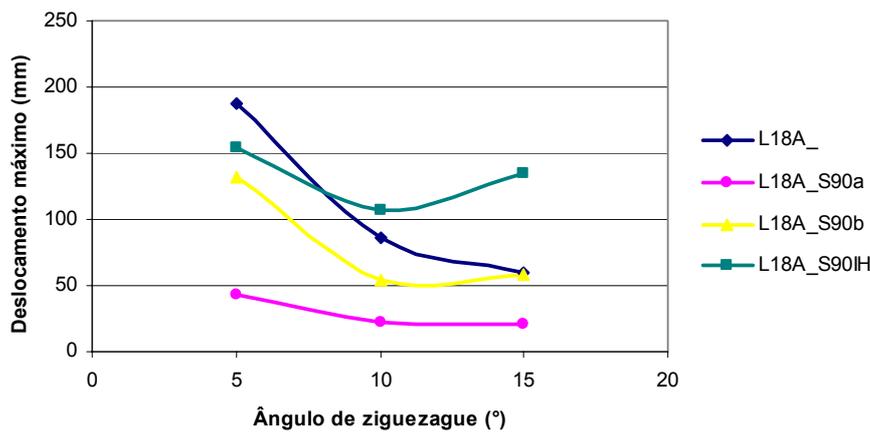


Figura 5.31 – Deslocamento máximo no centro dos modelos de 18 metros para diferentes ângulos de ziguezague

Para as curvas de deslocamento pode-se observar que para os modelos de 12 e 18 metros de comprimento (Figura 5.30 e 5.31), o aumento do ângulo de ziguezague leva a uma redução no deslocamento máximo medido no centro do modelo. A diferença entre os dois é que as curvas mudam de sua concavidade.

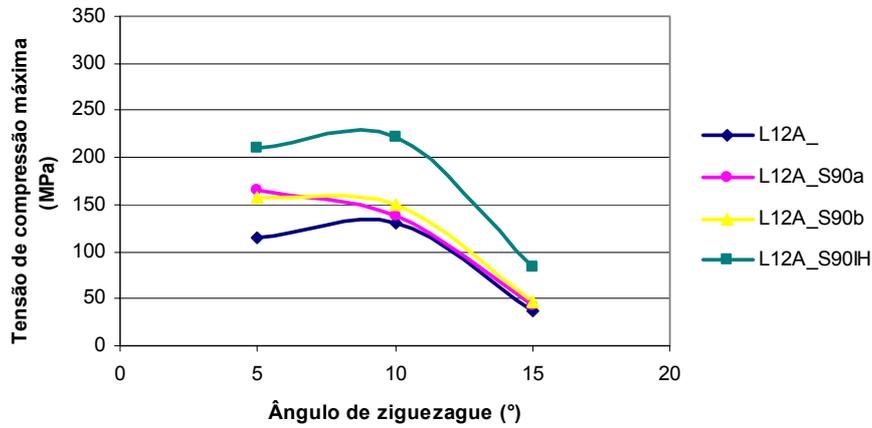


Figura 5.32 – Tensão de compressão máxima no centro dos modelos de 12 metros para diferentes ângulos de ziguezague

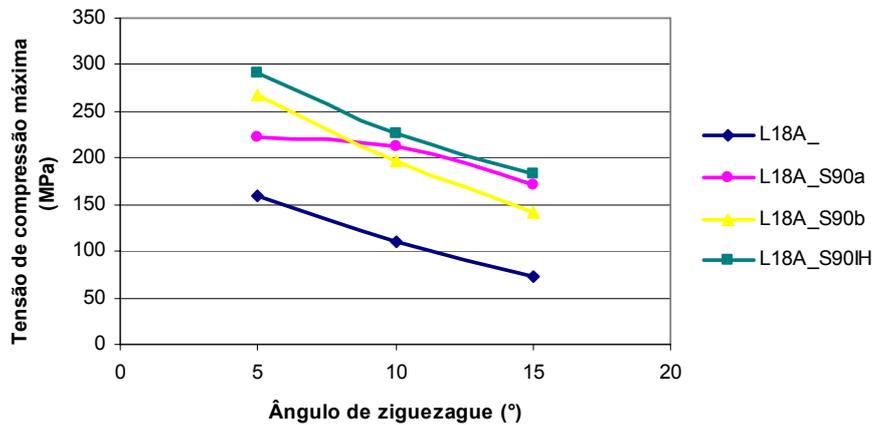


Figura 5.33 – Tensão de compressão máxima no centro dos modelos de 18 metros para diferentes ângulos de ziguezague

Observa-se que para os modelos de 12 e 18 metros de comprimento (Figuras 5.32 e 5.33), o aumento do ângulo de ziguezague leva a uma redução da tensão máxima de compressão (em módulo) medida no centro do modelo. Aqui também as curvas mudam de concavidade.

Para o mesmo ângulo de dobramento e diferentes comprimentos (12 e 18 metros), são apresentados gráficos (Figuras 5.34 a 5.42) para deslocamento (δ), força axial (P) e tensão máxima de compressão (σ_{min}) para a temperatura de pico ($\approx 105^{\circ}\text{C}$)

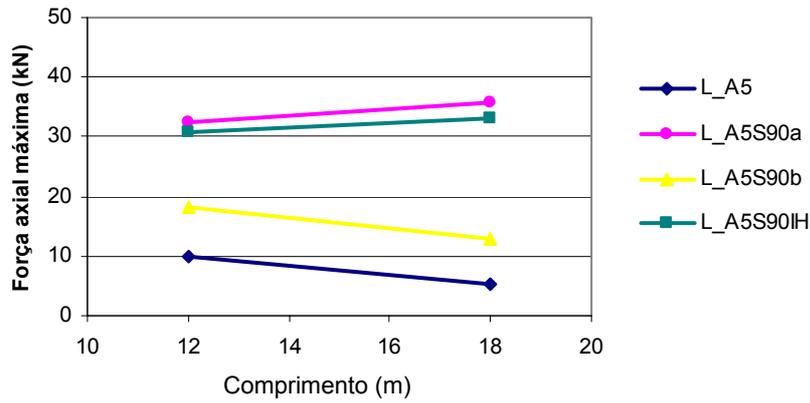


Figura 5.34 – Força axial máxima nos modelos com ângulo de dobramento de 5° para os comprimentos de 12 e 18 metros

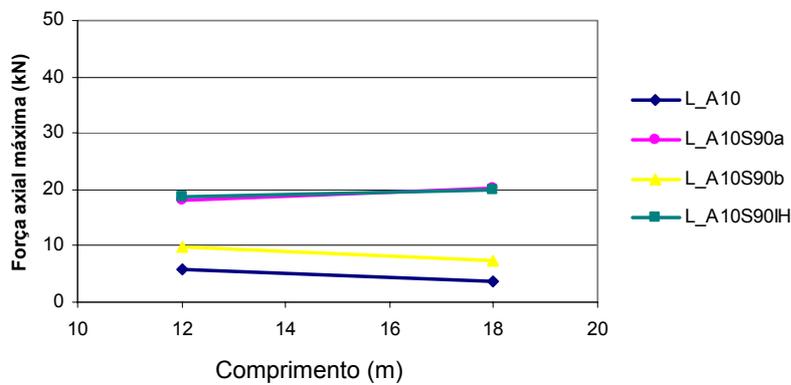


Figura 5.35 – Força axial máxima nos modelos com ângulo de dobramento de 10° para os comprimentos de 12 e 18 metros

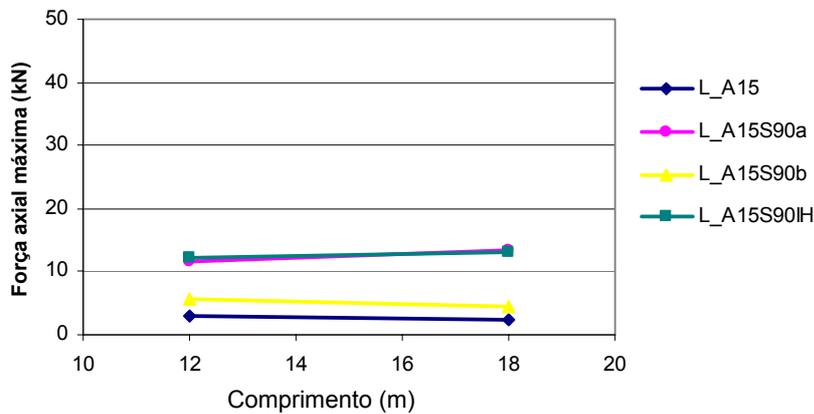


Figura 5.36 – Força axial máxima nos modelos com ângulo de dobramento de 15° de dobramento para os comprimentos de 12 e 18 metros

Com a mudança de comprimento, a força axial máxima ($T \approx 105^\circ$) diminuiu nos modelos sem reação lateral do solo e com o vão central livre. Para os modelos com 1 metro de enterramento a força axial aumentou, isto é explicado

por que neste caso não houve flambagem dos modelos, que se comportaram de modo elástico.

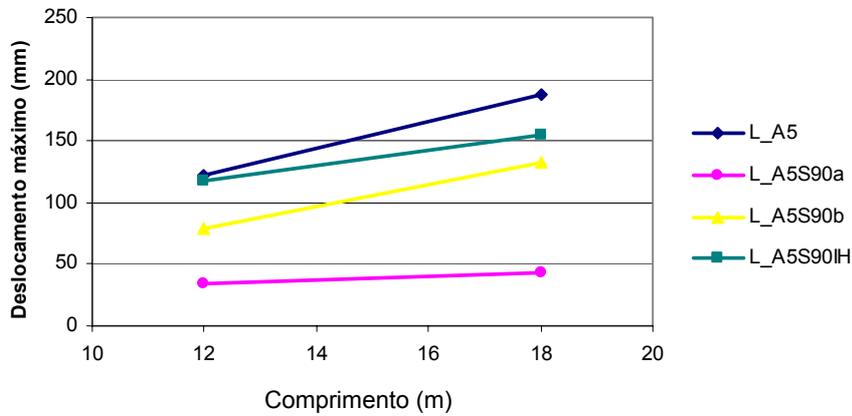


Figura 5.37 – Deslocamento máximo no centro dos modelos com ângulo de dobramento de 5° para os comprimentos de 12 e 18 metros

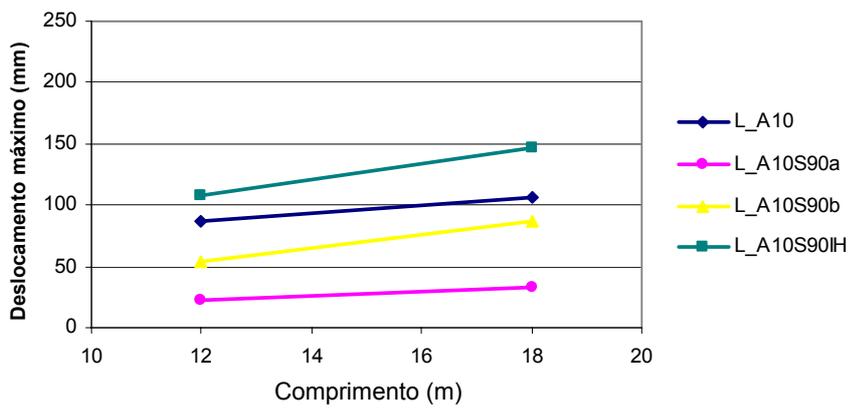


Figura 5.38 – Deslocamento máximo no centro dos modelos com ângulo de dobramento de 10° para os comprimentos de 12 e 18 metros

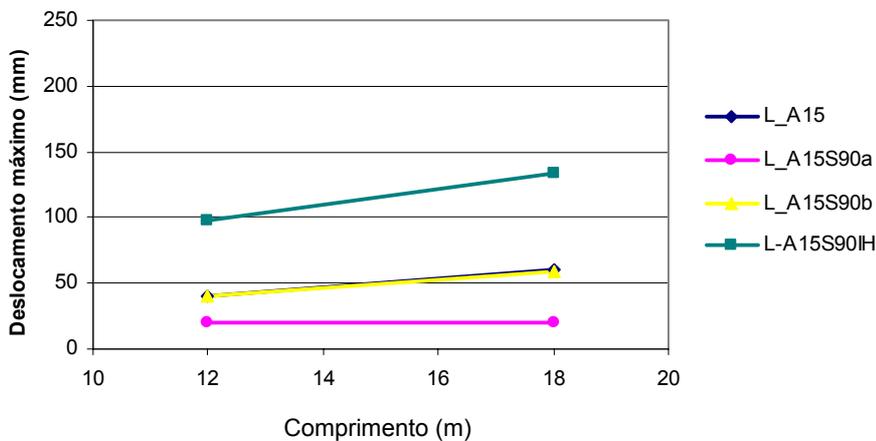


Figura 5.39 – Deslocamento máximo no centro dos modelos com ângulo de dobramento de 15° para os comprimentos de 12 e 18 metros

Para as curvas de deslocamento (Figura 5.37 , 5.38 e 5.39) pode-se observar que com o aumento do comprimento total estes também são maiores.

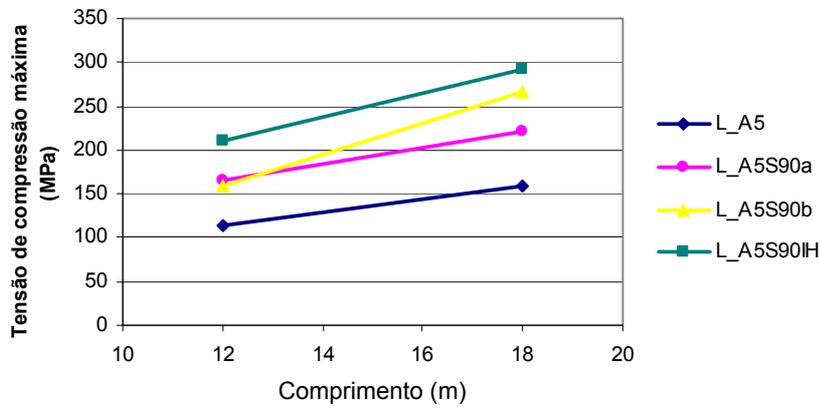


Figura 5.40 – Tensão de compressão máxima no centro dos modelos com ângulo de dobramento de 5° para os comprimentos de 12 e 18 metros

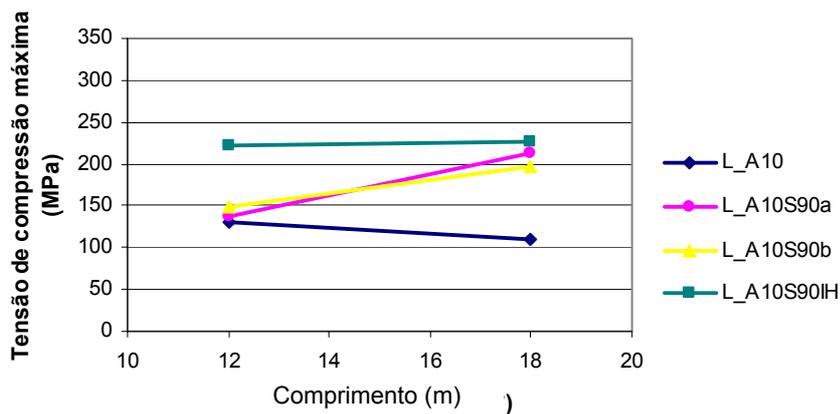


Figura 5.41 – Tensão de compressão máxima no centro dos modelos com ângulo de dobramento de 10° para os comprimentos de 12 e 18 metros

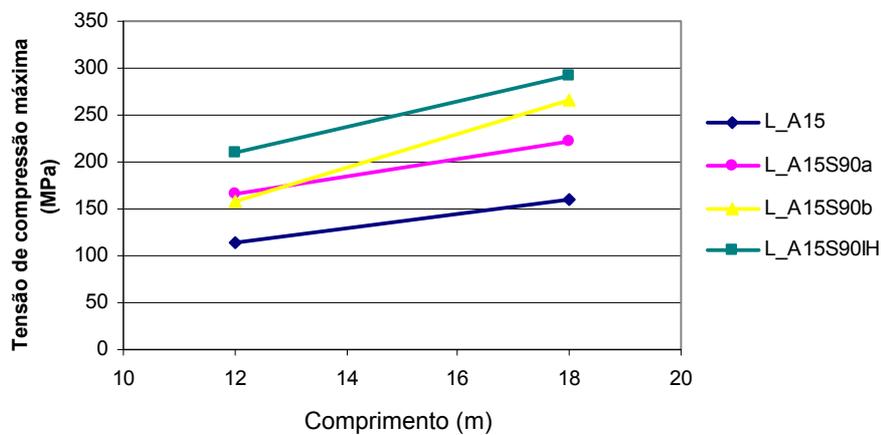


Figura 5.42 – Tensão de compressão máxima no centro dos modelos com ângulo de dobramento de 15° para os comprimentos de 12 e 18 metros

Nas Figuras 5.40 a 5.42 observa-se que a tensão máxima de compressão (em módulo) é maior nos modelos de 18 metros do que nos de 12 metros.