

4

Resultados Experimentais

O programa experimental desenvolvido neste trabalho envolve ensaios realizados em três colunas de aço estaiadas e protendidas. Estas colunas tiveram as mesmas características geométricas variando somente o material empregado nos estais e seu nível de protensão.

A primeira e a segunda coluna foram idênticas e tiveram o objetivo de comparar e averiguar tanto os resultados obtidos quanto o processo de aplicação de carga. A única diferença foi a maneira em que foi realizado o processo de obtenção dos esforços nos estais, como pôde ser observado no capítulo anterior. Já na terceira coluna alterou-se o material dos estais em relação as outras duas colunas. Nesta coluna o mesmo processo de medição dos esforços nos estais da segunda coluna foi empregada.

Conseqüentemente este capítulo tem o objetivo de apresentar os resultados das três colunas ensaiadas no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio.

4.1

Primeira coluna de aço estaiada

Na primeira coluna de aço estaiada e protendida utilizou-se um cabo de aço de 6,3 mm de diâmetro nos estais. Foram realizados dezenove níveis de protensão aplicados na coluna, sendo doze níveis de protensão com a coluna em “modo x” [33] e sete níveis de protensão com a coluna em “modo +”. O valor máximo obtido durante o ensaio no “modo x” foi de 34,8 kN, de resistência última à compressão na coluna para o nível de protensão em cada estai de 2,85 kN. Já no ensaio no “modo +” a carga última foi de 32,48 kN de resistência última com nível de protensão em cada estai de 2,32 kN. Procurou-se ir além destes níveis de protensão em cada estai, porém, isto somente foi atingido no caso em “modo x” com valor de protensão de 3 kN. No caso do “modo +” o alto nível de protensão estava inserindo na coluna uma deformação inicial elevada e influenciou diretamente no resultado final da resistência. Isto gerou um desbalanceamento dos esforços nos estais, impedindo a obtenção de uma protensão igual nos quatro estais.

A Tabela 4.1 a seguir apresenta todos os resultados obtidos para os “modo x” e “modo +”, respectivamente, com o nível de protensão aplicado em cada estai. Apresenta-se também o gráfico com as curvas relacionadas à Tabela 4.1.

Primeira Coluna de Aço Estaiada					
Modo x		Modo +		Modelo Ansys	
Protensão	Resistência	Protensão	Resistência	Protensão	Resistência
0,00	10,95	0,00	14,17	0,00	11,28
0,00	10,43	0,25	17,46	0,02	21,13
0,23	15,64	0,61	20,19	0,16	21,49
0,70	26,70	1,53	27,24	1,57	28,69
1,04	23,10	1,72	25,91	2,35	30,92
1,31	27,96	2,02	29,06	3,14	30,66
1,72	28,61	2,32	32,48	4,71	30,13
2,33	35,76			7,85	26,80
2,70	30,22				
2,85	34,80				
3,00	33,07				
3,00	33,42				

Tabela 4.1 Primeira coluna, resultados experimentais e numéricos em termo de carga última. Valores em kN.

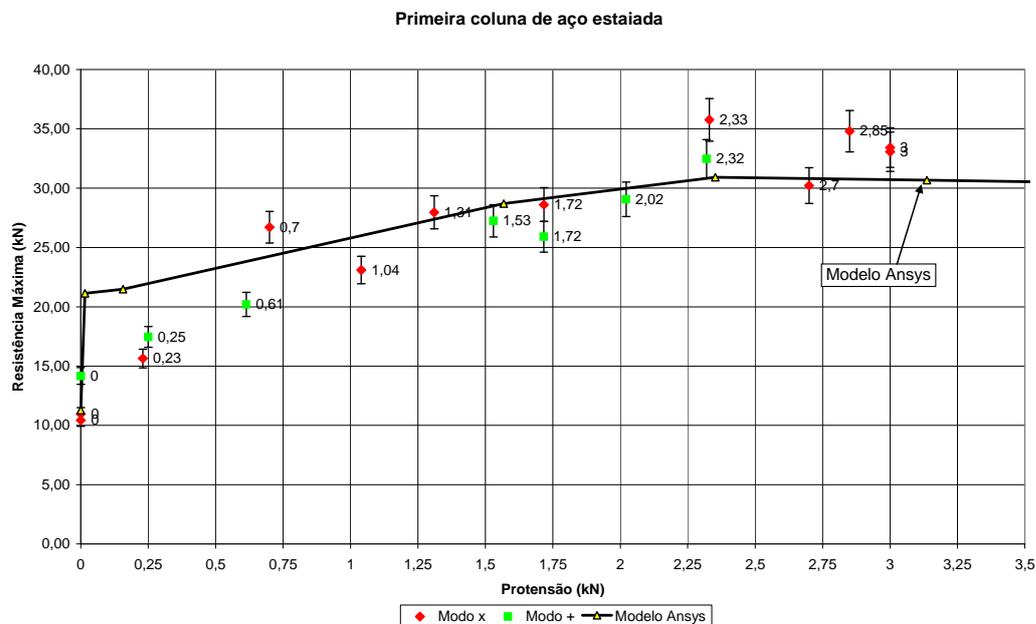


Figura 4.1 Comparações entre o nível de protensão aplicada em cada estai e a resistência da primeira coluna estaiada ensaiada.

Por ter sido o primeiro ensaio em “modo x”, o nível de protensão sem estais (0 kN) foi repetido com o intuito de aferir melhor a instrumentação e leitura dos esforços pelas células de carga. O nível de protensão de 3 kN também foi repetido pois pretendia-se descobrir se a ausência das presilhas colocadas nos estais no centro da coluna estaiada, para que após a protensão o mesmo não perdesse tensão, influenciava ou não no resultado final da resistência da coluna. Visto que os resultados foram muito próximos, a partir deste ensaio todos os outros foram realizados sem as presilhas colocadas nos estais no centro da coluna estaiada.

Os níveis de protensão 1,04 kN e 2,70 kN tiveram seus resultados abaixo do esperado provavelmente devido a um desalinhamento da coluna estaiada entre os aparelhos de aplicação e reação da carga ocorrido durante os ensaios. Mesmo assim, conseguiu-se obter resultados três vezes superiores que a carga de Euler para a coluna sem estaiamento em alguns níveis de protensão.

Este fato motivou a introdução no gráfico de um erro de 5% no valor da carga resistente da coluna para cada nível de protensão. Para os níveis de protensão baixos, a diferença entre o modelo numérico e os resultados obtidos nos ensaios são altos, mas ao se aproximar da carga ótima de protensão a diferença diminui e ultrapassa em ambos os modos: “modo x” e “modo +”. Vale lembrar que no modelo numérico somente foi imposta uma imperfeição no centro da coluna para um dos lados, o lado em que somente um dos estais atuaria gerando uma força oposta a deformação da coluna [1].

Como pode ser observado no gráfico existem duas fases características: uma antes da protensão ótima e a outra após a protensão ótima. A protensão ótima é aquela que constitui a maior carga crítica da coluna estaiada. A carga crítica da coluna estaiada aumenta consideravelmente com o aumento da carga de protensão até a protensão ótima. Após o nível da protensão ótima, a mesma passa a atuar negativamente na coluna estaiada tornando-a instável e diminuindo o valor da sua resistência por deixar a coluna com uma deformação inicial bem elevada.

Uma descrição dos resultados de cada modo de ensaio é apresentada a seguir. Os gráficos mostrarão as curvas dos instrumentos de medição, utilizados durante os ensaios, para todos os níveis de protensão.

4.1.1 Coluna em “modo x”

O gráfico da Figura 4.2 representa o terceiro LVDT, instalado o mais próximo do centro da coluna principal, cerca de 200 mm, para medir o deslocamento horizontal. Este LVDT foi instalado em paralelo ao segundo LVDT com o objetivo de medir qualquer torção ocorrida durante os ensaios, através da diferença entre os resultados obtidos pelo deslocamento horizontal.

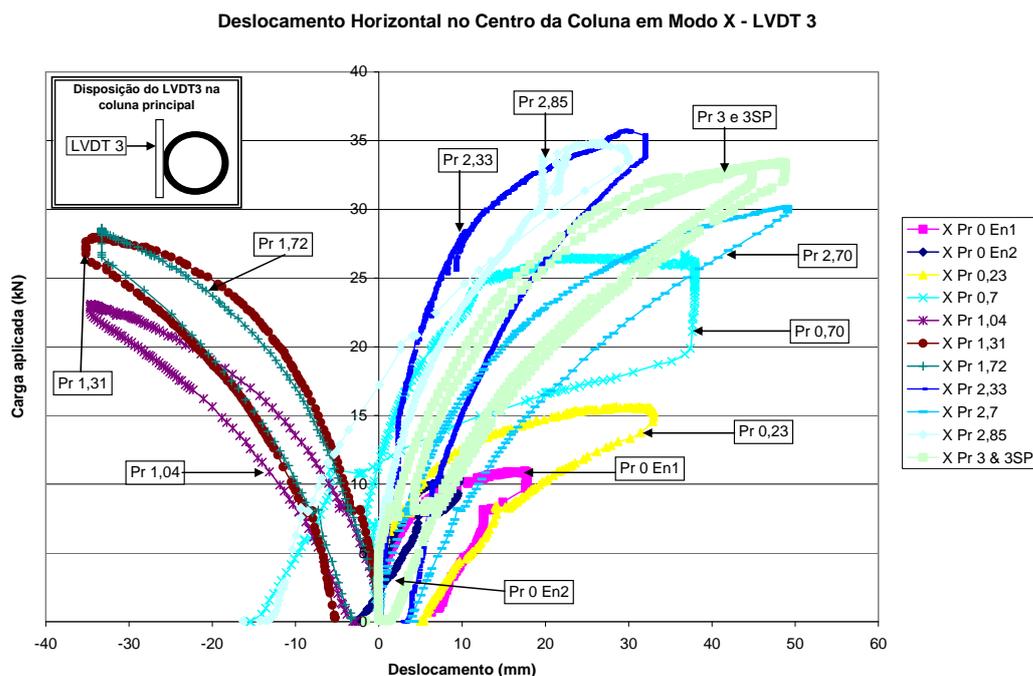


Figura 4.2 Gráfico do deslocamento horizontal para o LVDT 3. Onde SP = Sem Presilha; En1 = primeiro ensaio da coluna sem cabo; En2 = segundo ensaio da coluna sem cabo.

Nesta primeira coluna a aplicação de carga foi interrompida ao se perceber que a coluna principal estaria entrando em processo de flambagem pelo início de formação do patamar de resistência onde se tinha um deslocamento mais acelerado. Para que a coluna não sofresse nenhuma deformação plástica, mesmo sabendo da que a coluna principal tem uma esbeltez elevada, o ensaio foi interrompido mesmo antes de formar um patamar mais horizontal. Para a segunda e terceira coluna estes deslocamentos foram levados adiante como poderá ser visto mais a frente. Mesmo assim, percebe-se através do gráfico da Figura 4.2 um maior valor no deslocamento horizontal a partir do momento em que se aumenta o nível de protensão nos estais. Sem a utilização dos estais a coluna chega ao seu limite de resistência entre os 10 mm e 15 mm de deslocamento horizontal. Ao se adicionar os estais esse

deslocamento começa a partir dos 30 mm. Isto prova que a coluna se torna menos instável apresentando um deslocamento maior antes de atingir o seu limite de resistência. Também ao aumentar a protensão nos estais a rigidez da coluna diminui, fazendo com que as curvas se cruzem e não se mantém sempre a cima da que tem um nível de protensão menor, onde pode ser melhor explicado no capítulo da análise dinâmica desta dissertação.

O próximo gráfico representa o segundo LVDT (Figura 4.3) que está posicionando paralelamente ao terceiro LVDT como já mencionado anteriormente.

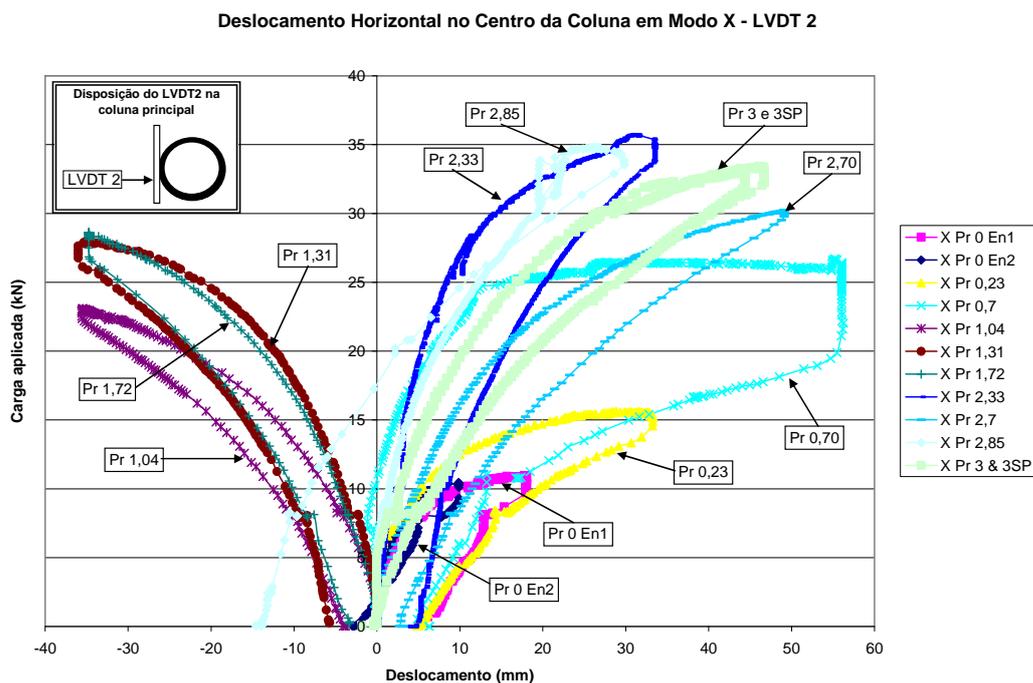


Figura 4.3 Gráfico do deslocamento horizontal para o LVDT 2

Comparando com o gráfico do terceiro LVDT (Figura 4.2) os deslocamentos são praticamente os mesmos, salvo para o nível de protensão de 0,70 kN onde o curso do terceiro LVDT terminou antes do curso do segundo LVDT impedindo o mesmo de medir o deslocamento total da coluna principal. Vale lembrar que neste nível de protensão o valor da resistência foi abaixo do esperado (Figura 4.1). A diferença entre os deslocamentos obtidos pelos segundo e terceiro LVDT são mínimas, indicando que não ocorre qualquer torção durante os ensaios.

O quarto e quinto LVDT estão localizados próximo ao centro da coluna principal no mesmo ponto de leitura dos segundo e terceiro LVDT, aferindo o

deslocamento vertical da estrutura. Assim como os anteriores, estes LVDTs estão ligados em paralelo para medir qualquer torção que apareça na estrutura.

Em ambos os instrumentos o deslocamento vertical é mínimo e nem todas as curvas podem ser vista no gráfico. Os deslocamentos abruptos de algumas curvas ocorreram devido ao deslocamento horizontal da coluna principal ter sido grande e também devido a retirada do seu apoio. Apenas nas curvas para o nível de protensão de 2,33 kN e 3,00 kN é que se obteve alguma variação, mesmo assim são mínimas e não se pode dizer que ocorreu uma torção.

Isto mostra que no centro da coluna principal somente ocorreram deslocamentos horizontais. Mas ao se observar os gráficos referentes aos LVDTs instalados a $\frac{1}{4}$ e $\frac{3}{4}$ da coluna principal percebe-se que para alguns níveis de protensão a coluna principal tende a sair do primeiro modo para o segundo modo de flambagem.

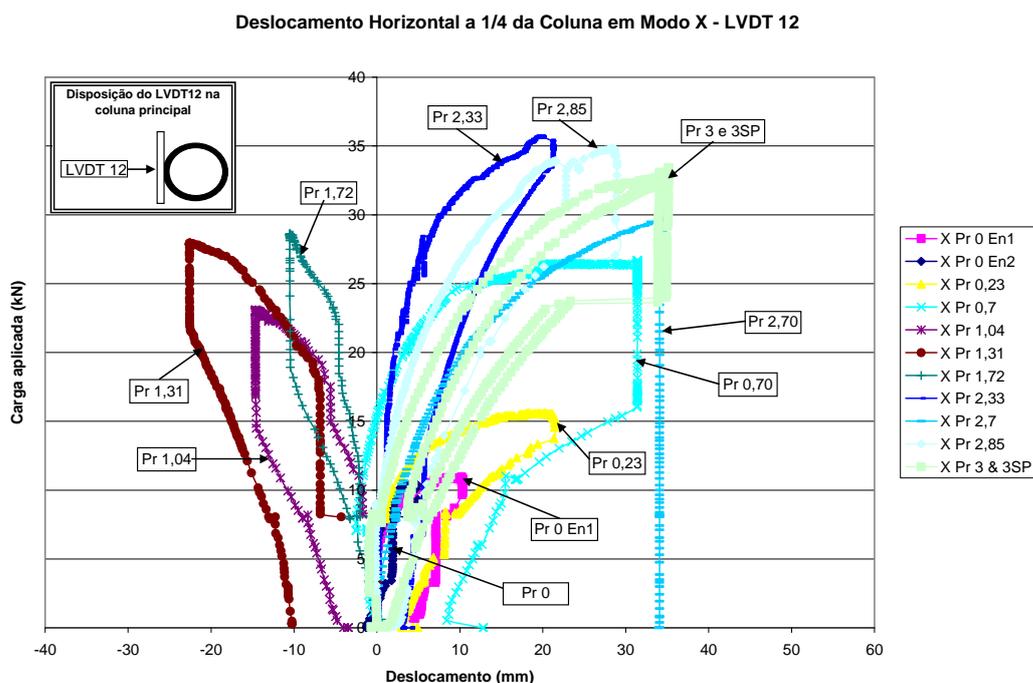


Figura 4.4 Gráfico do deslocamento horizontal para o LVDT 12

Isto ocorreu devido a restrição no centro da coluna principal aumentar com o aumento do nível de protensão aplicado nos estais tornando-o mais restrito aos deslocamentos. Mesmo assim o deslocamento vertical é pequeno quando comparado com o deslocamento horizontal nesses pontos de leitura. Salvo para o nível de protensão de 2,33 kN em cada estai, onde se pode

observar um maior deslocamento vertical atingindo a ordem de 15 mm aproximadamente no gráfico da Figura 4.7.

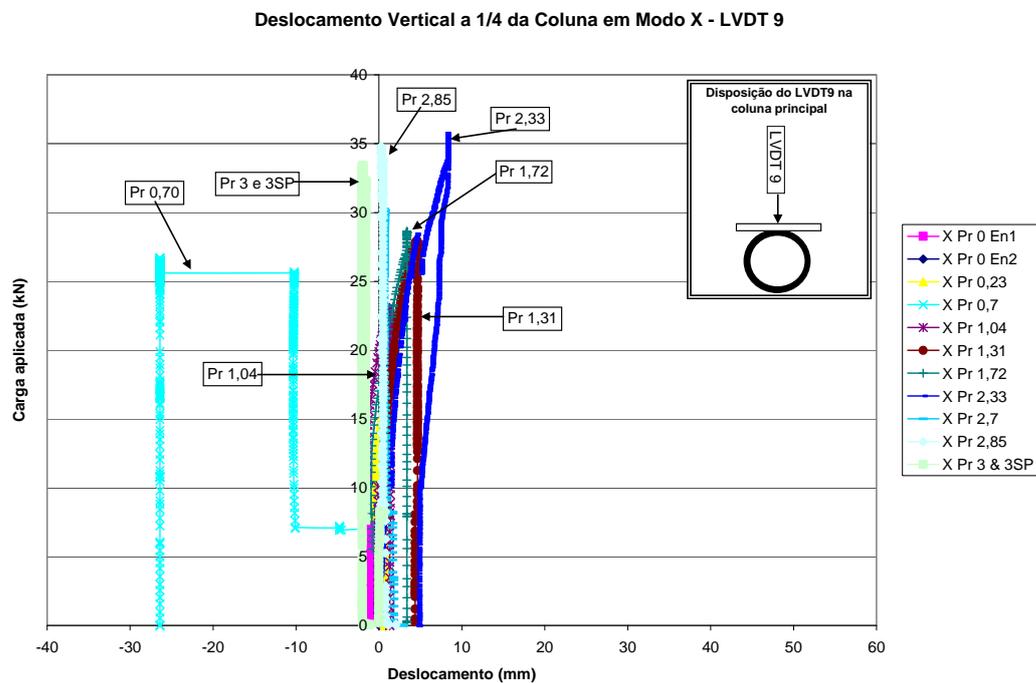


Figura 4.5 Gráfico do deslocamento vertical para o LVDT 9

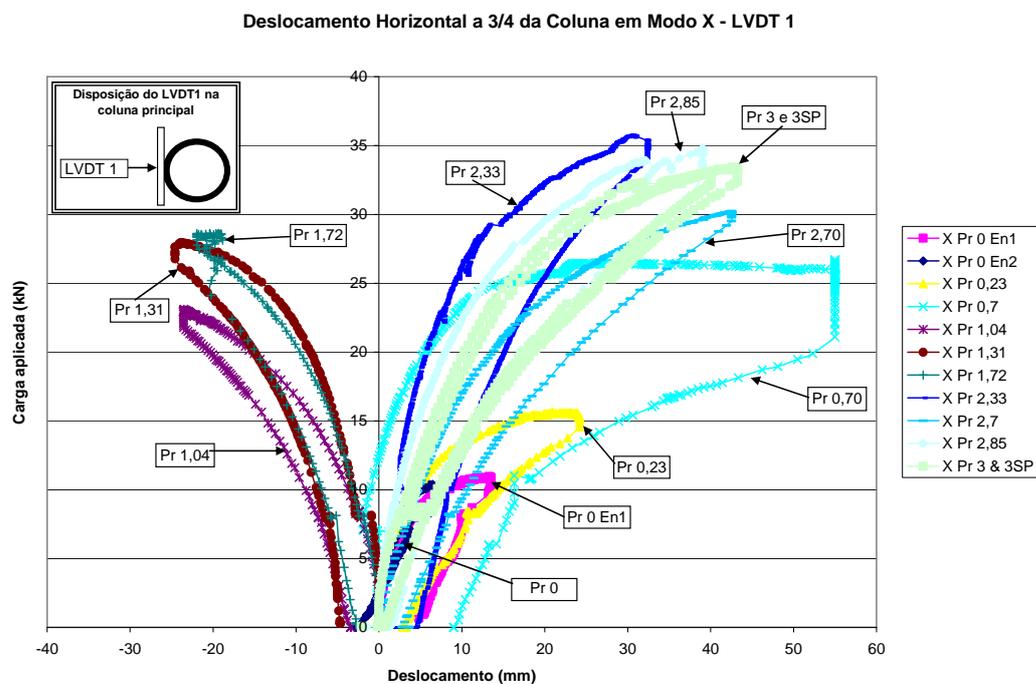


Figura 4.6 Gráfico do deslocamento horizontal para o LVDT 1

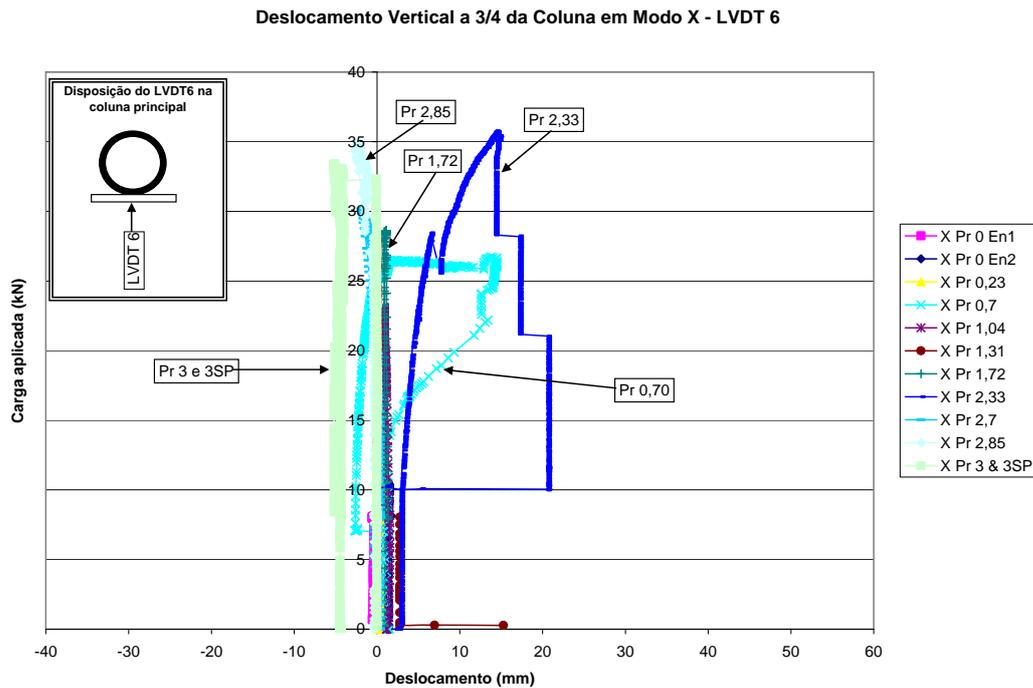


Figura 4.7 Gráfico do deslocamento vertical para o LVDT 6

Os deslocamentos axiais não apresentaram a curva característica que se esperava próximo a carga de flambagem da estrutura com um patamar bem definido. Somente o caso de 0,70 kN apresentou esse patamar, mas os resultados são duvidos devido ao seu resultado final ter sido muito além do que se esperava ao se comparar com o modelo numérico. Para se ter uma melhor visualização dos resultados obtidos para o LVDT que media o deslocamento axial, fez-se necessário ampliar o gráfico perdendo um pouco a padronização com os gráficos anteriores (Figura 4.8).

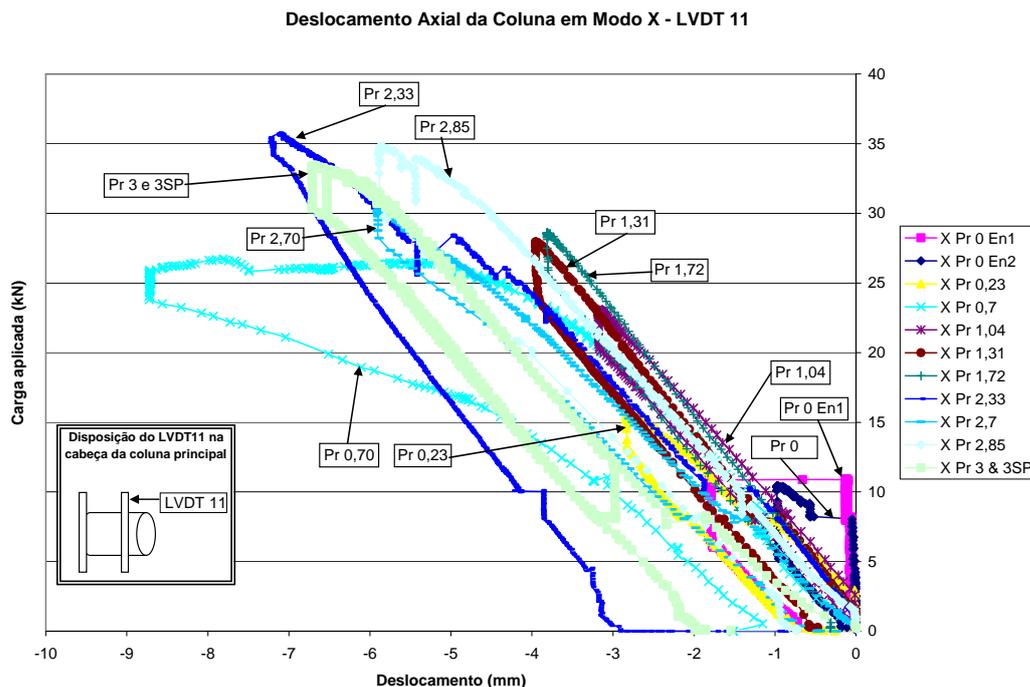


Figura 4.8 Gráfico do deslocamento axial para o LVDT 11

Foi interessante observar a clara perda de rigidez da estrutura, visto que as curvas de maior nível de protensão tem um ângulo menor que as de menor nível de protensão, apresentando um maior deslocamento axial para a carga aplicada na estrutura durante os ensaios.

Em contrapartida pode-se perceber que os pórticos de apoio da estrutura também sofreram deslocamentos axiais em relação à coluna principal colocando em prova o resultado real do deslocamento axial ocorrido na estrutura, como pode ser visto nos gráficos das Figura 4.9 e Figura 4.10. Os décimo e décimo terceiro LVDT foram instalados na parte de trás dos pórticos de reação para medir a deformação do pórtico e qualquer deslize que ocorresse entre o pórtico e a laje de reação onde estava fixado. Durante os ensaios ouvia-se alguns estalos, para os níveis de protensão onde a carga aplicada ultrapassava os 20 kN, de ajuste da fixação dos pórticos na laje de reação, o que provavelmente explica alguns pequenos patamares de deslocamento.

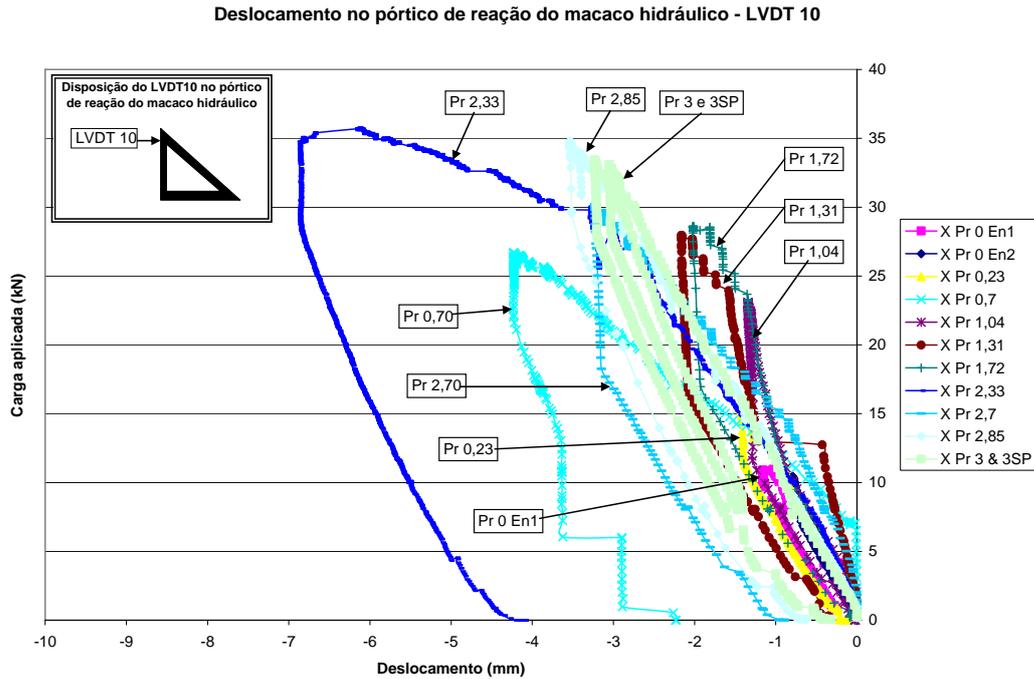


Figura 4.9 Gráfico do deslocamento axial no pórtico de reação do macaco hidráulico para o LVDT 10

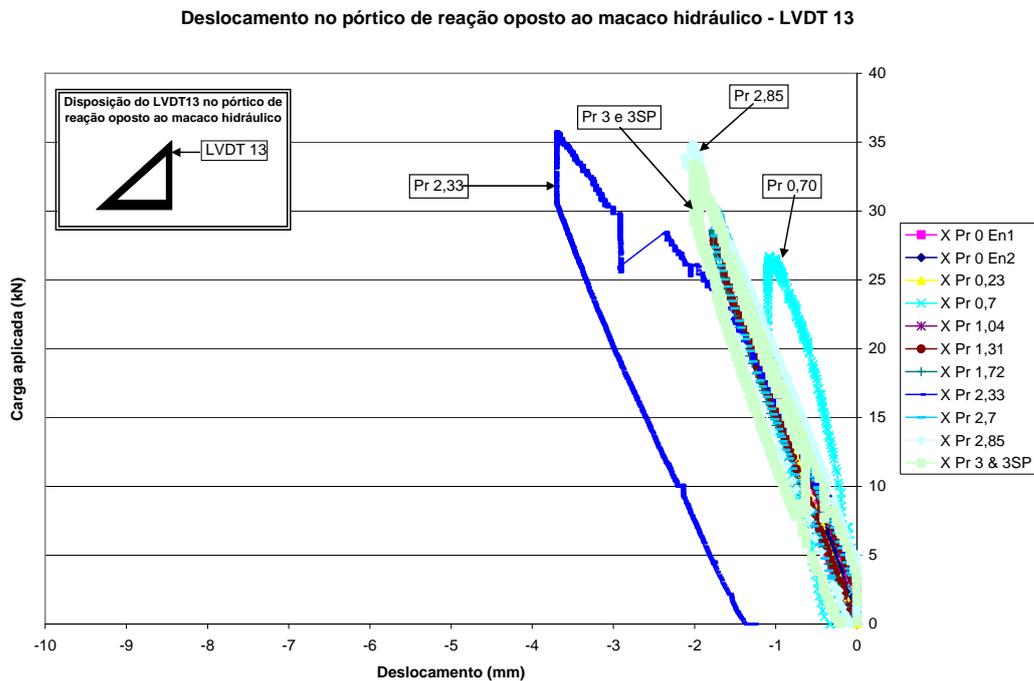


Figura 4.10 Gráfico do deslocamento axial no pórtico de reação oposto ao macaco hidráulico para o LVDT 10

Desta forma o real valor do deslocamento axial da coluna principal é diminuindo o valor obtido pelo décimo primeiro LVDT pelo valor medido pelo décimo terceiro LVDT. Já o valor do curso total do macaco hidráulico é o valor

medido pelo décimo LVDT somado ao valor medido pelo décimo primeiro LVDT. Por exemplo, para o nível de protensão de 2,33 kN o encurtamento da coluna principal é da ordem de quatro milímetros aproximadamente.

Com o gráfico da Figura 4.11 pretende-se mostrar a rigidez pós-limite da estrutura. Nota-se que em todas as curvas a relação entre carga aplicada e carga interna de compressão no tubo central é praticamente linear apresentando um flambagem abrupta e não apresentou distinção entre os níveis de protensão.

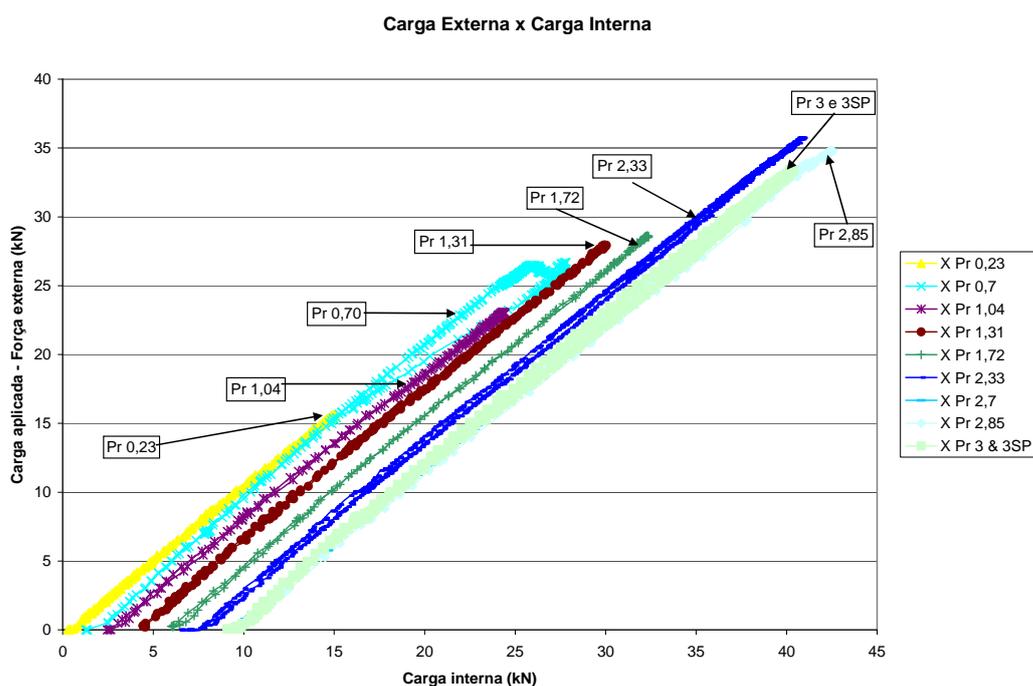


Figura 4.11 Carga externa versus carga interna (carga aplicada + carga dos quatro estais) na coluna principal.

A seguir apresentam-se os gráficos referentes ao comportamento dos estais durante os ensaios nas Figura 4.12, Figura 4.13, Figura 4.14 e Figura 4.15. Verifica-se que os estais acompanham o deslocamento da estrutura aumentando o nível de tensão nos estais do lado convexo e diminuindo no lado côncavo gerando uma curva não linear onde o aumento ou diminuição do esforço era mais rápido ao se aproximar da carga crítica da estrutura. Não foi uma tarefa simples aplicar a protensão na coluna para os níveis de protensão elevados visto que a deformação inicial da coluna principal aumentava tornando o equilíbrio de carga nos estais uma tarefa muito difícil de ser realizada.

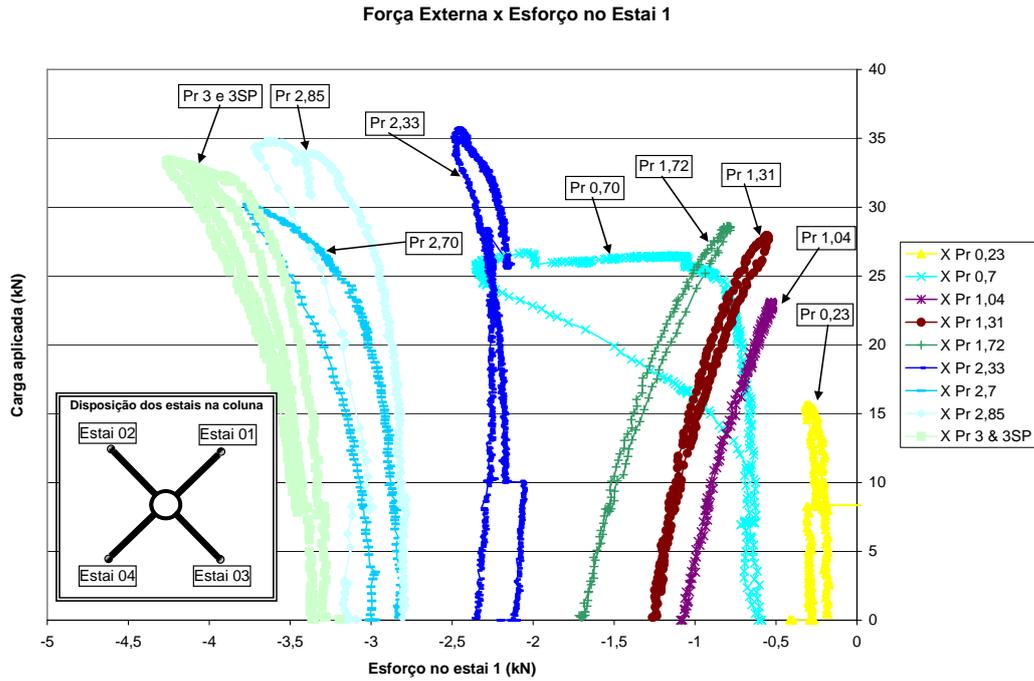


Figura 4.12 Comportamento do estai 1 durante a aplicação da carga externa na estrutura.

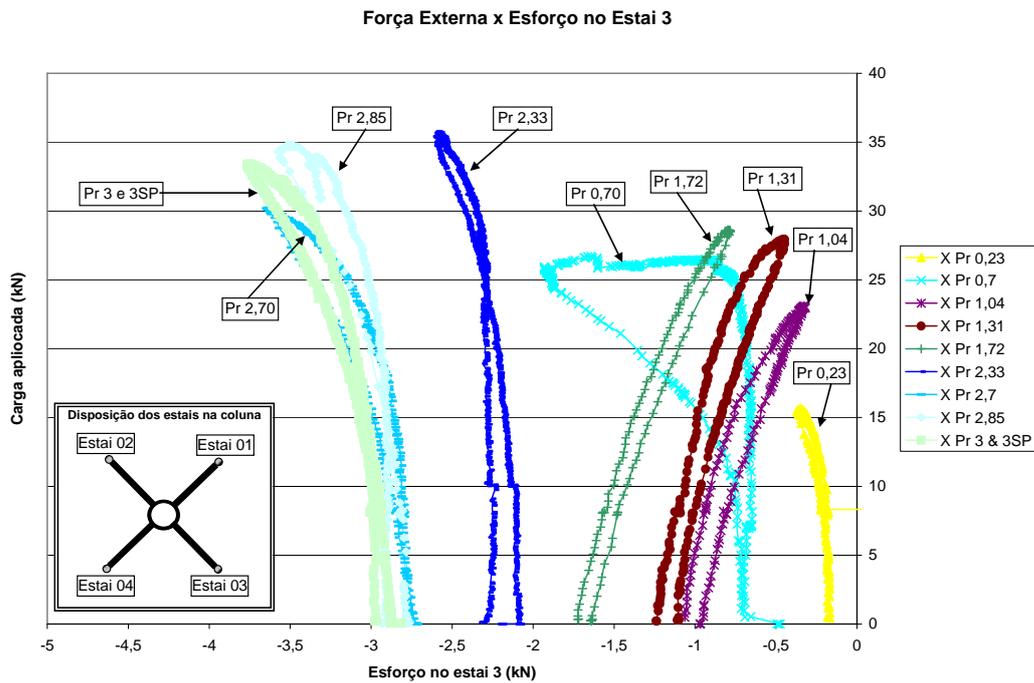


Figura 4.13 Comportamento do estai 3 durante a aplicação da carga externa na estrutura.

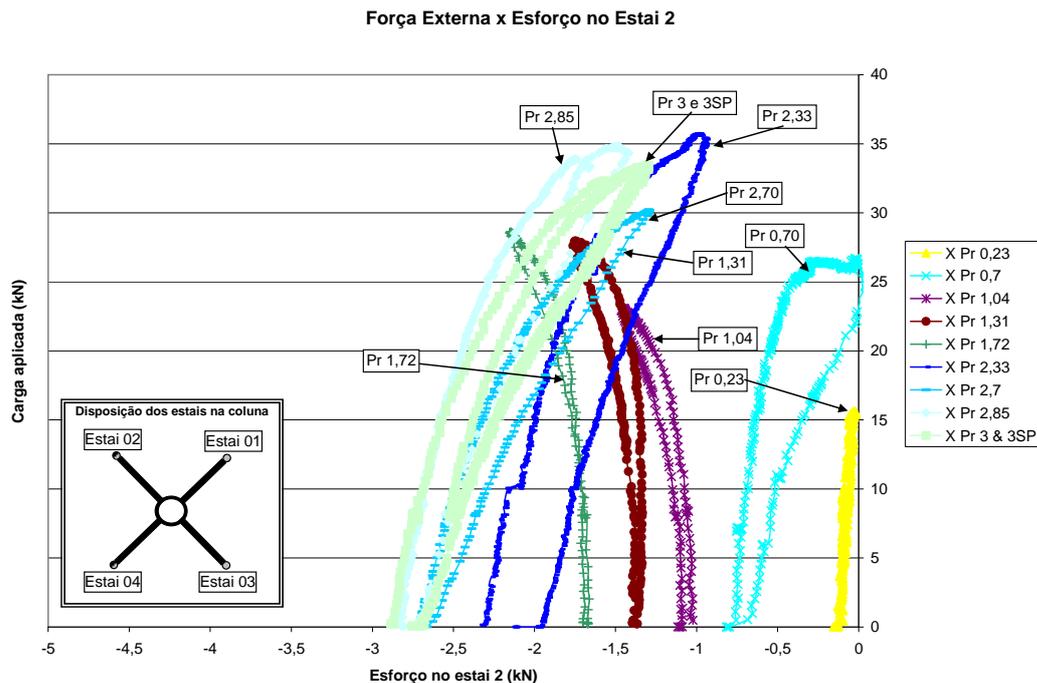


Figura 4.14 Comportamento do estai 2 durante a aplicação da carga externa na estrutura.

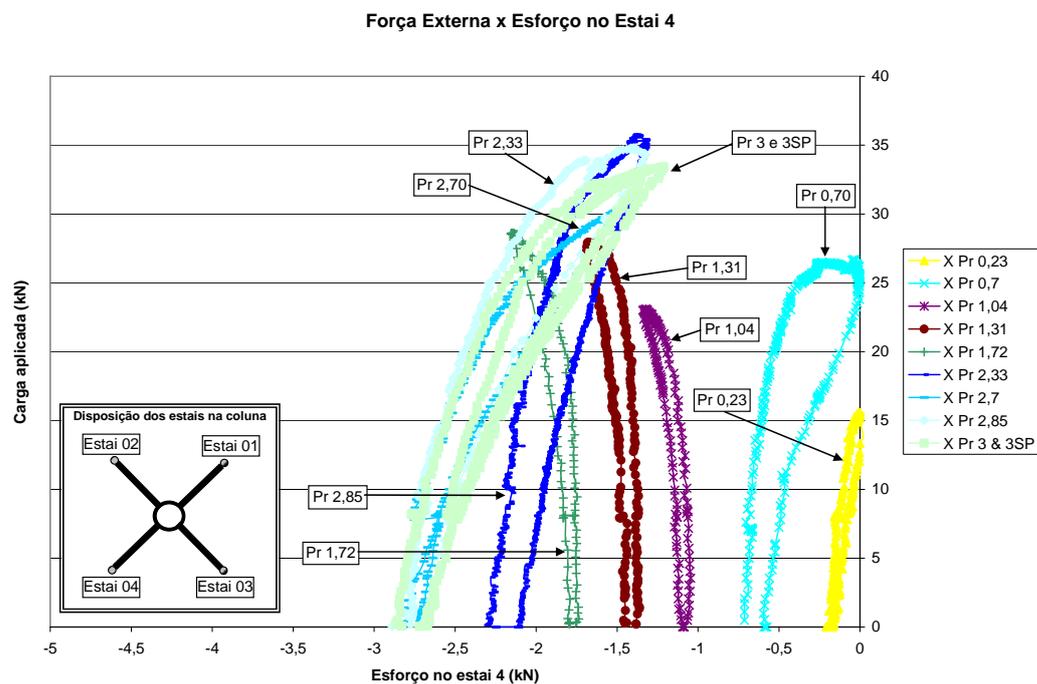


Figura 4.15 Comportamento do estai 4 durante a aplicação da carga externa na estrutura.

Vale ressaltar que a medição dos esforços em cada estai pôde ser feita devido ao projeto realizado na elaboração das células de carga com utilização de extensômetros lineares. Nos ensaios apresentados na dissertação de mestrado

[1] estes resultados ficaram limitados somente a célula de carga interna onde o nível de protensão nos estais era previsto através de um valor médio e algum desbalanceamento era observado somente através de alguma alteração física na estrutura como a deformação inicial. Com o processo de medição dos esforços em cada estai estas dificuldades foram superadas gerando um melhor refinamento nos resultados finais.

Como já mencionado no capítulo de montagem da estrutura foram utilizados vinte e quatro extensômetros de resistência elétrica (ERE) lineares, sendo oito EREs próximo ao centro da coluna principal e dezesseis EREs nos “braços” (quatro em cada “braço”) para medição das deformações ocorridas durante a aplicação de carga na estrutura. Uma alteração na instrumentação foi realizada em relação ao ensaio durante o mestrado[1] instalando mais dois extensômetros em cada “braço” da estrutura visto que os resultados obtidos anteriormente não foram satisfatórios. Os gráficos que aparecem a seguir são dos extensômetros instalados na coluna principal. O limite da deformação devido ao escoamento da seção de aço da coluna é de $1809 \mu\epsilon$ aproximadamente e nenhum dos extensômetros chegou próximo a este limite.

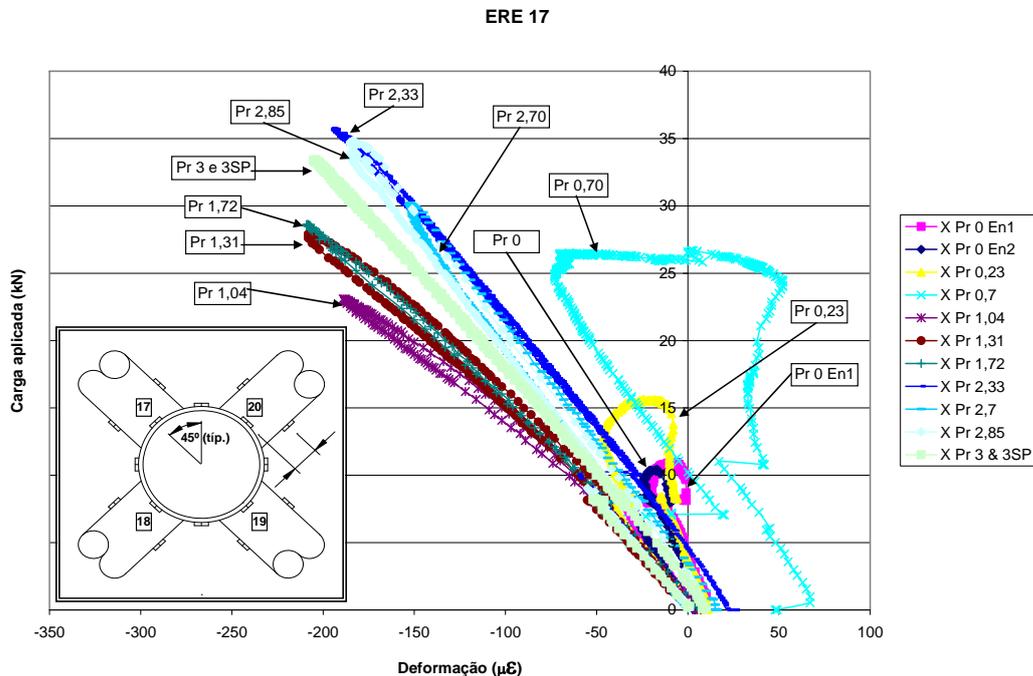


Figura 4.16 Gráfico referente ao extensômetro 17.

Os gráficos dos extensômetros ERE17, ERE18, ERE19 e ERE20 dispostos na coluna principal paralelos ao eixo dos estais estão representados

pelas Figura 4.16, Figura 4.17, Figura 4.18 e Figura 4.19 respectivamente. O outro conjunto de extensômetros: ERE21, ERE22, ERE23 e ERE24; estão representados pelos gráficos das Figura 4.20, Figura 4.21, Figura 4.22 e Figura 4.23 respectivamente. Pode-se observar um comportamento praticamente linear inicialmente tornando-se não-linear próximo a carga de flambagem da coluna em todos os gráficos. Pela diferença de inclinação da curva para o mesmo nível de protensão foi possível observar que ocorreu uma flexo-compressão na estrutura. Isto pode ser melhor observado nos gráficos referentes aos extensômetros que foram instalados na lateral do tubo da coluna principal: os extensômetros ERE22 (Figura 4.21) e ERE24 (Figura 4.23).

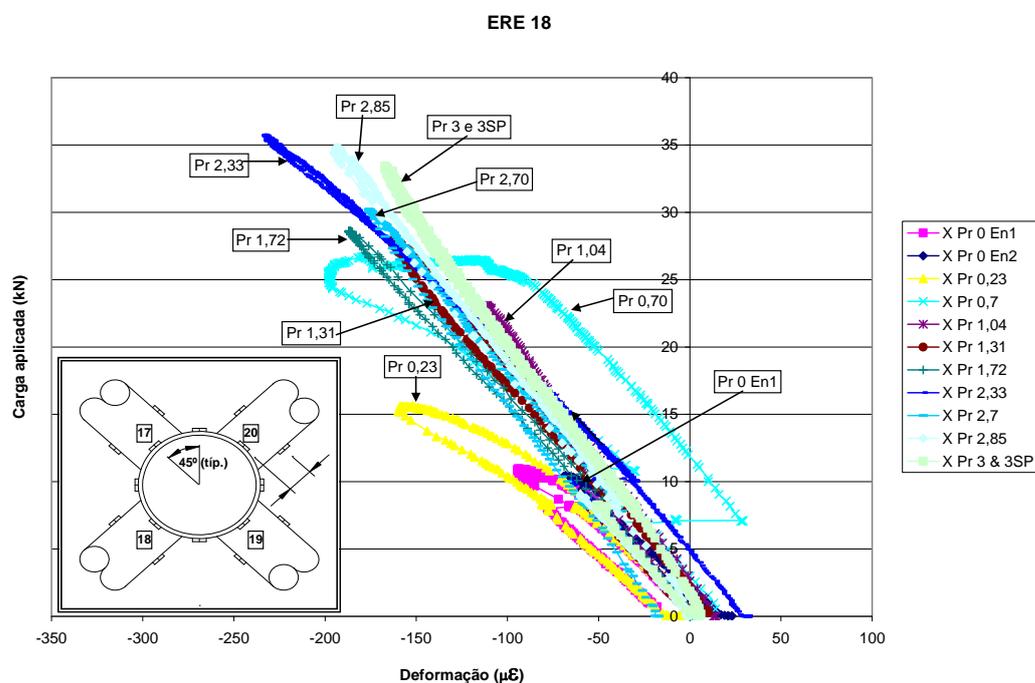


Figura 4.17 Gráfico referente ao extensômetro 18.

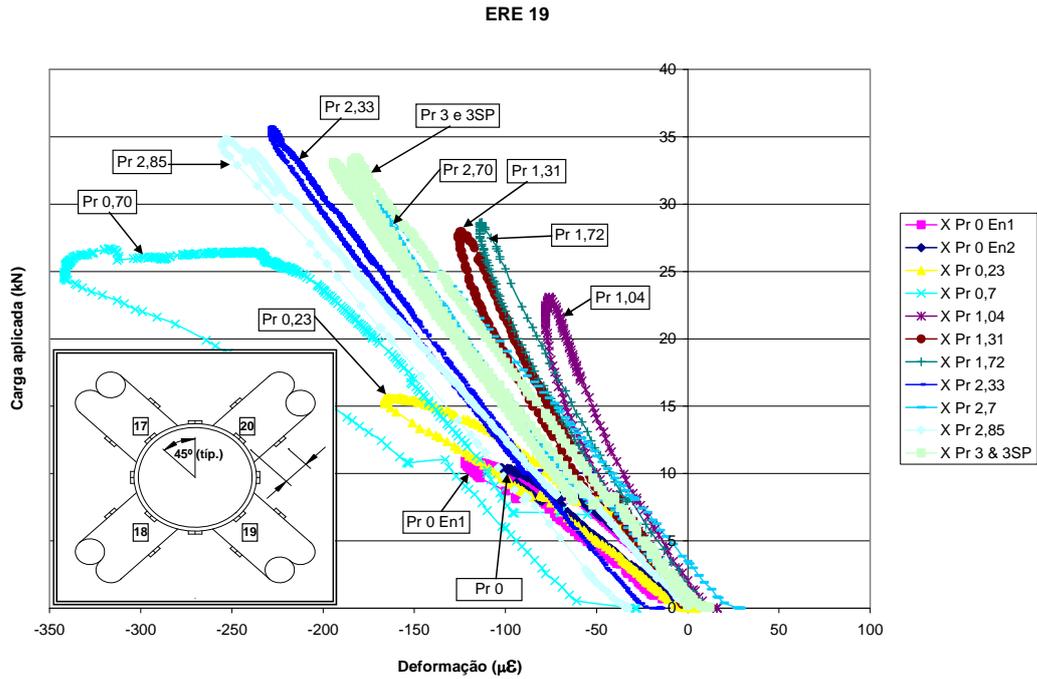


Figura 4.18 Gráfico referente ao extensômetro 19.

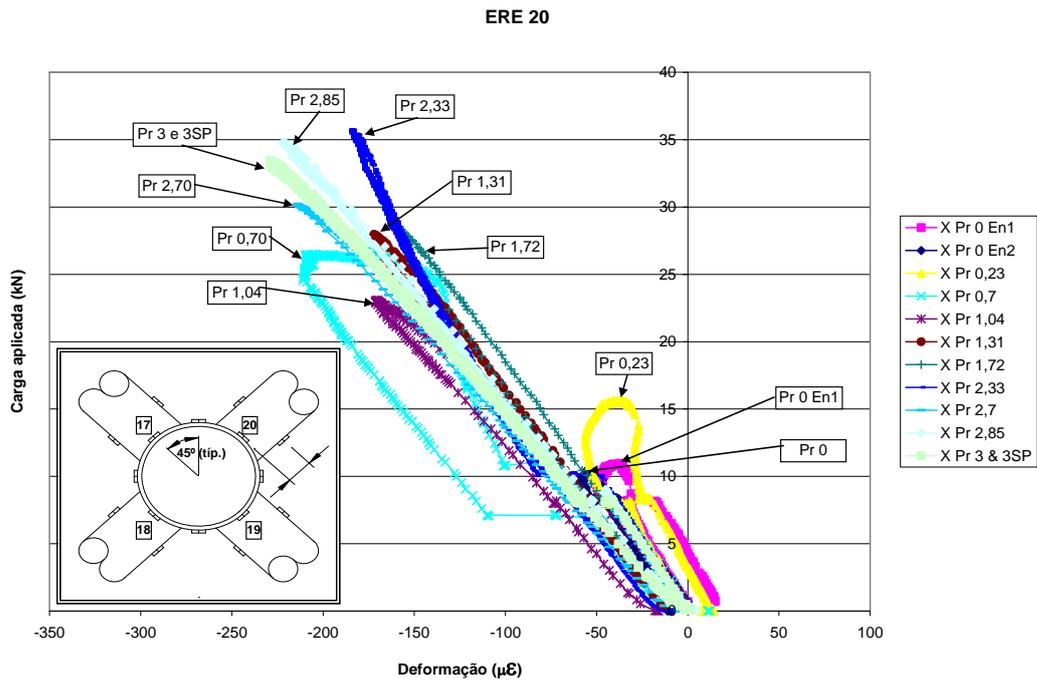


Figura 4.19 Gráfico referente ao extensômetro 20.

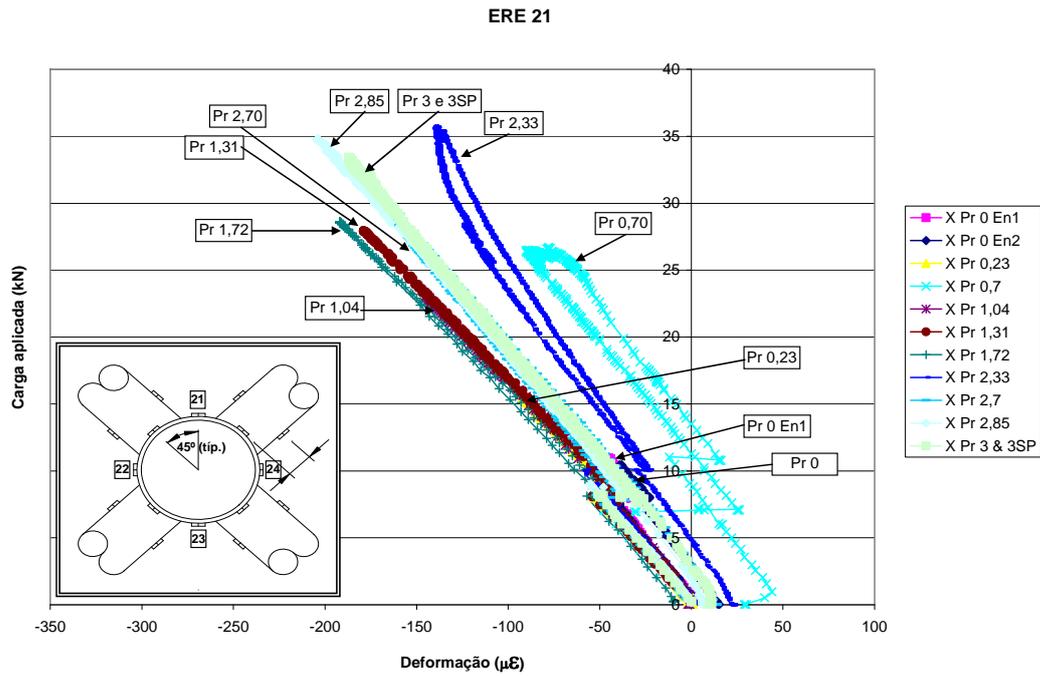


Figura 4.20 Gráfico referente ao extensômetro 21.

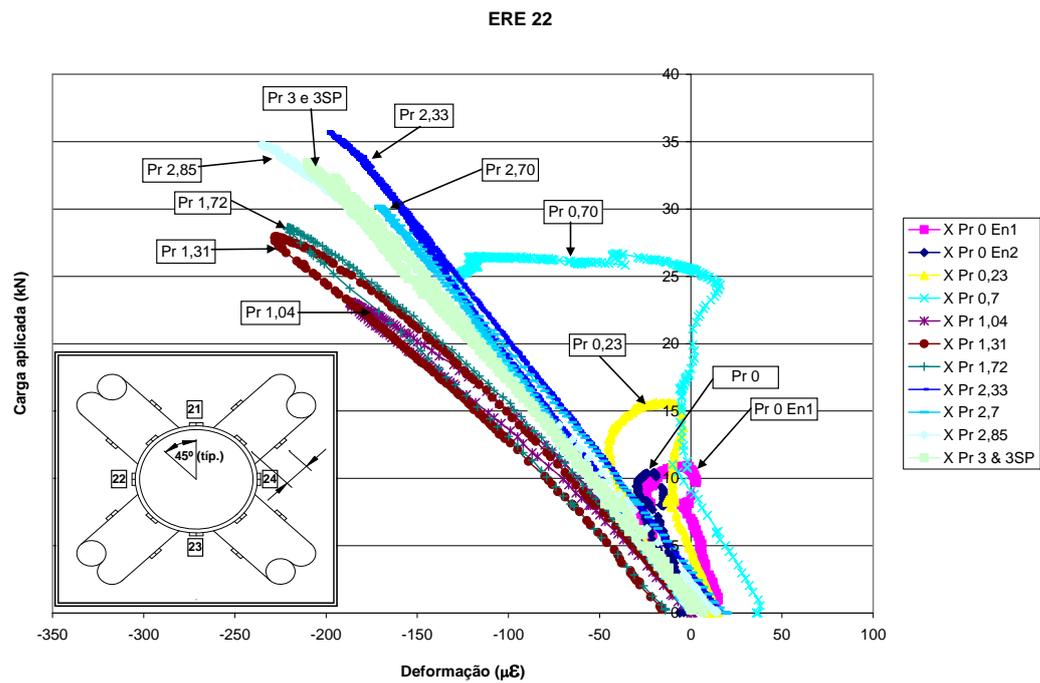


Figura 4.21 Gráfico referente ao extensômetro 22.

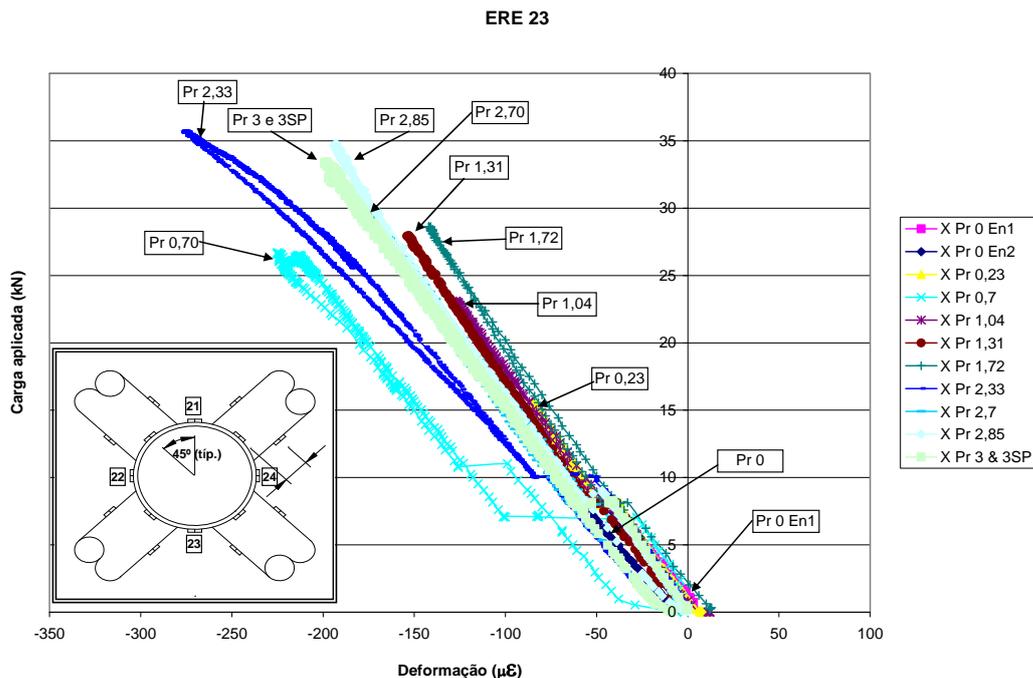


Figura 4.22 Gráfico referente ao extensômetro 23.

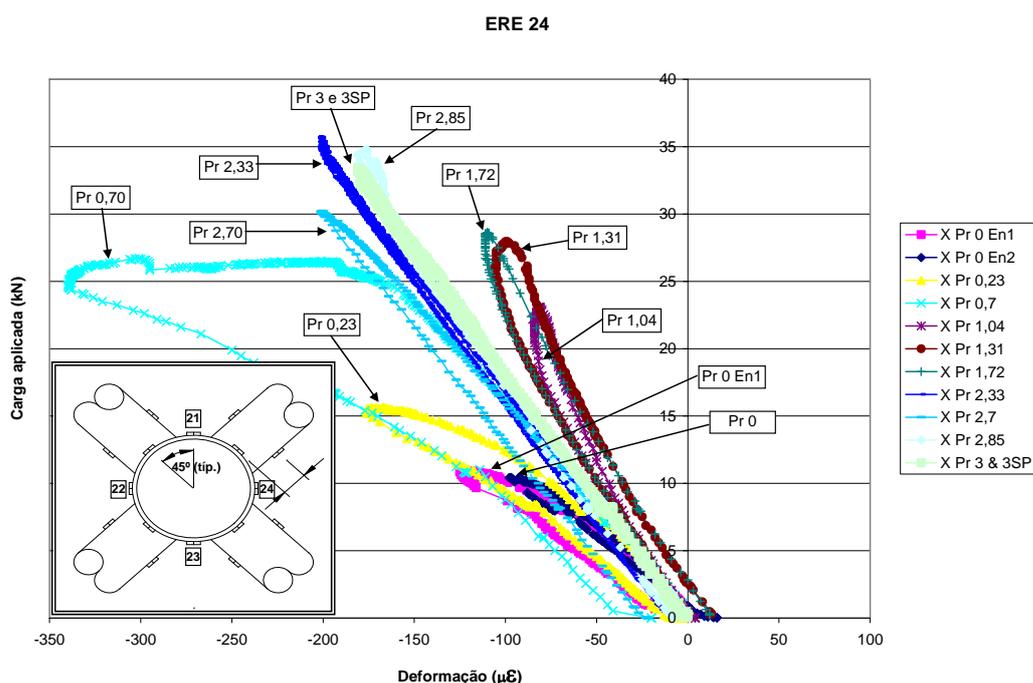


Figura 4.23 Gráfico referente ao extensômetro 24.

Para uma melhor comparação entre todos os gráficos dos extensômetros instalados nos “braços” fez-se uma padronização nos gráficos na escala dos extensômetros instalados na coluna principal. Também serão apresentados em ordem paralela ao que foram instalados em vez da adjacente, por exemplo: ERE25 e em seguida ERE27; depois o gráfico do ERE26 e em seguida o

ERE28. Deste modo a visualização de flexão que possa aparecer durante os ensaios é melhor apresentada através da comparação entre os gráficos. A seguir apresentam-se as curvas dos extensômetros instalados no “braço” referente ao estai 1. Através dos extensômetros ERE26 e ERE28 percebe-se uma pequena flexão na direção axial da coluna principal na ordem de $50\mu\epsilon$ à $100\mu\epsilon$ que não foi observada a olho nu.

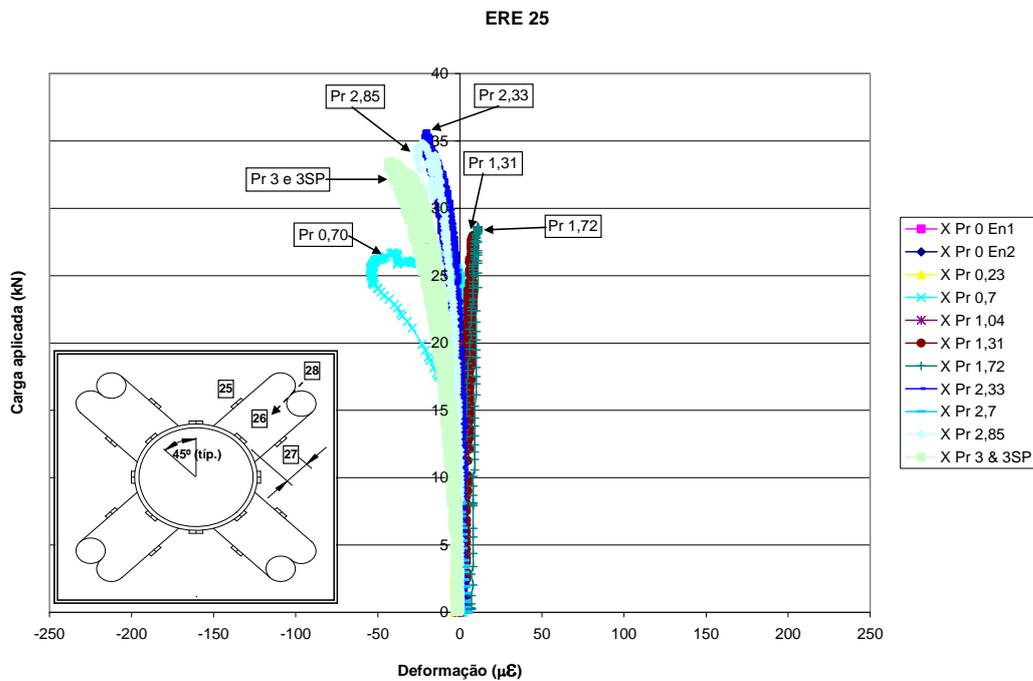


Figura 4.24 Gráfico referente ao extensômetro 25.

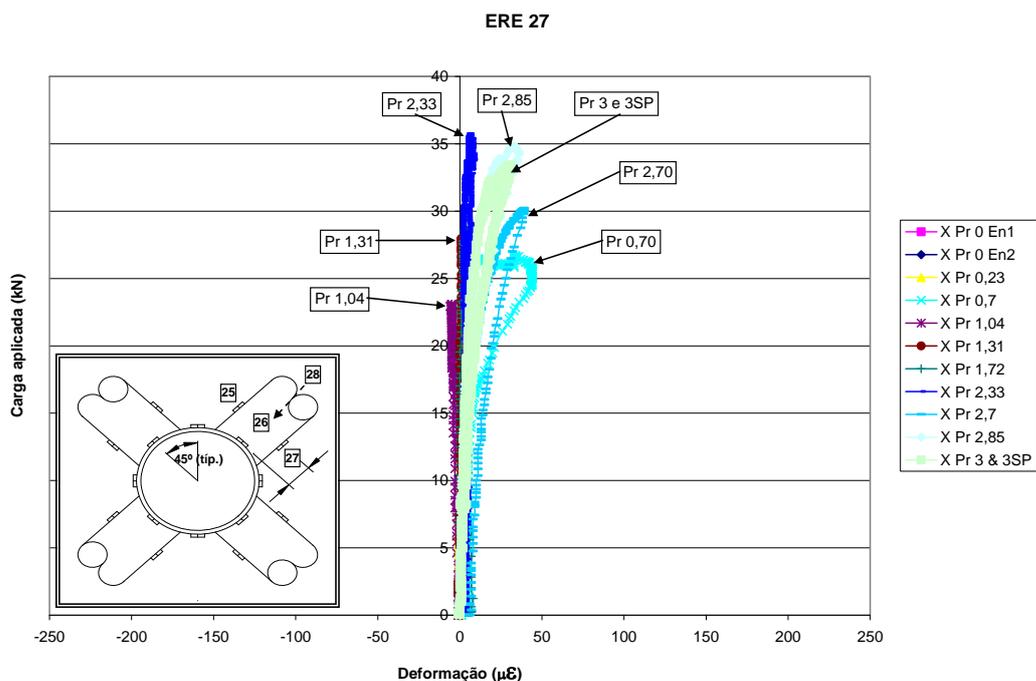


Figura 4.25 Gráfico referente ao extensômetro 27.



Figura 4.28 Ensaio da primeira coluna em modo x apresentando o primeiro modo de flambagem.

4.1.2 Primeira Coluna em “modo +”

Com o ensaio a ser realizado na horizontal, esperava-se que a realização do ensaio em “modo +” obtivesse um valor de carga última bem abaixo do valor obtido em “modo x” porque neste ensaio apenas um dos estais é que teria a função de restringir o deslocamento horizontal em vez de dois estais. Sendo que para o “modo +” o valor da força de restrição gerada pelo estai no centro da coluna é maior. O gráfico da Figura 4.29 representa o terceiro LVDT.

Nesta primeira coluna a aplicação de carga também foi interrompida ao se perceber que a coluna principal estaria entrando em processo de flambagem pelo início de formação do patamar de resistência onde se tinha um deslocamento mais acelerado. Percebe-se através deste gráfico que quanto maior o nível de protensão nos estais maior é o valor no deslocamento horizontal para se atingir a carga última. Neste ensaio para a coluna sem estais, o deslocamento horizontal foi mínimo antes de atingir a resistência da mesma, menos de 5 mm aproximadamente. Ao chegar no limite, a coluna deslocou-se rapidamente tendo a sua carga aplicada interrompida abruptamente. Ao aumentar a protensão nos estais, estes deslocamentos se tornam maiores até

atingir a carga de flambagem da coluna estaiada. Isto é mais uma prova que a coluna se torna menos instável apresentando um deslocamento maior antes de atingir o seu limite de resistência.

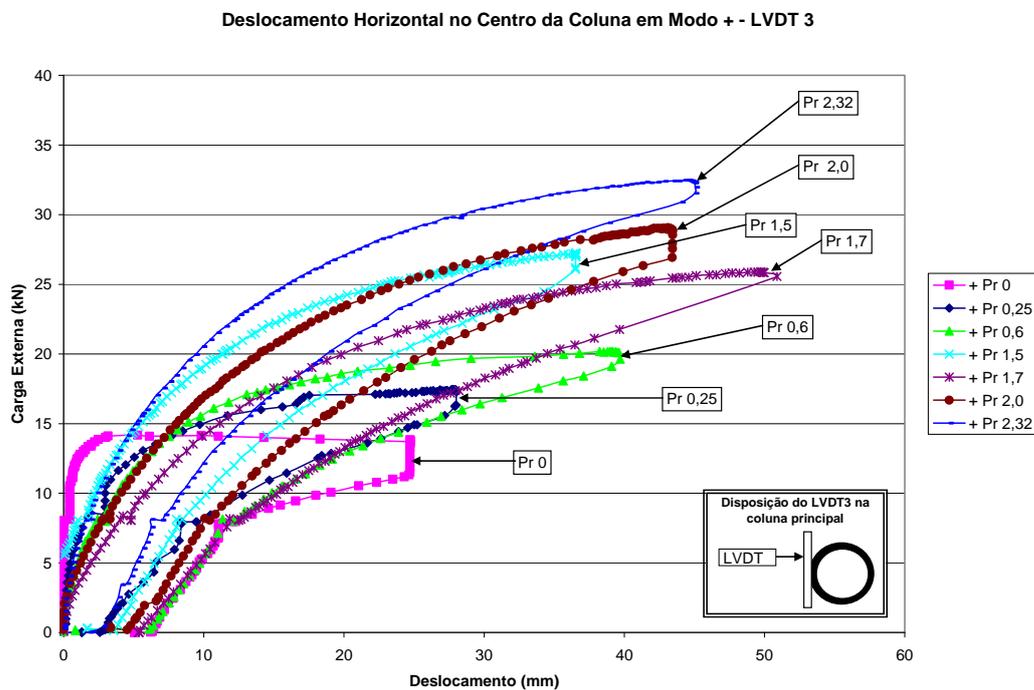


Figura 4.29 Gráfico do deslocamento horizontal para o LVDT 3 em “modo +”

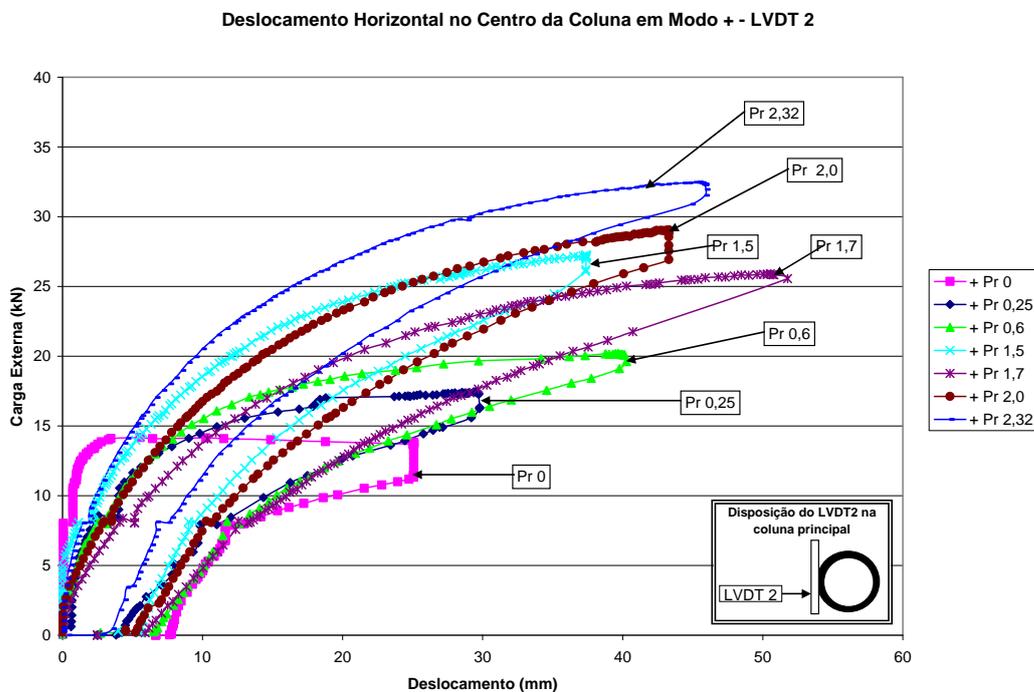


Figura 4.30 Gráfico do deslocamento horizontal para o LVDT 2 “em modo +”

Mas também, deve-se levar em consideração que em uma protensão elevada, a carga interna na coluna também aumenta e como consequência a imperfeição inicial também. Este problema explica o motivo pelo qual o ensaio com protensão de 1,7 kN em cada estai gerou um valor de carga última abaixo dos resultados obtidos para as protensão de 1,5 kN e 2,0 kN por exemplo. O próximo gráfico representa o segundo LVDT (Figura 4.30) que está posicionando paralelamente ao terceiro LVDT como já mencionado anteriormente.

Assim como no “modo x” a coluna não sofreu torção, pois comparando-se os gráficos das Figura 4.29 e Figura 4.30 a diferença entre os deslocamentos é praticamente zero. O LVDTs que mediam os deslocamentos verticais, apresentaram deslocamentos muito pequenos não ultrapassando 3 mm. Já os que mediam a um quarto (Figura 4.31) e a três quartos (Figura 4.32) da coluna tiveram deslocamentos menores que os centrais e na mesma direção, comprovando o primeiro modo de flambagem. Seus gráficos podem ser vistos no Anexo B.

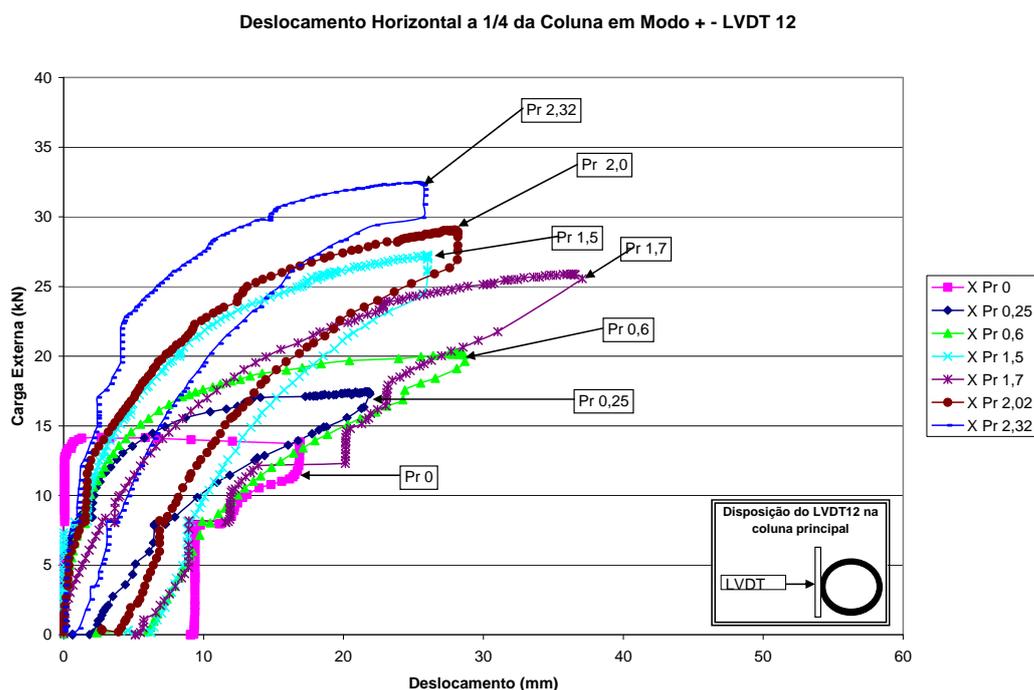


Figura 4.31 Gráfico do deslocamento horizontal para o LVDT 12 em “modo +-”

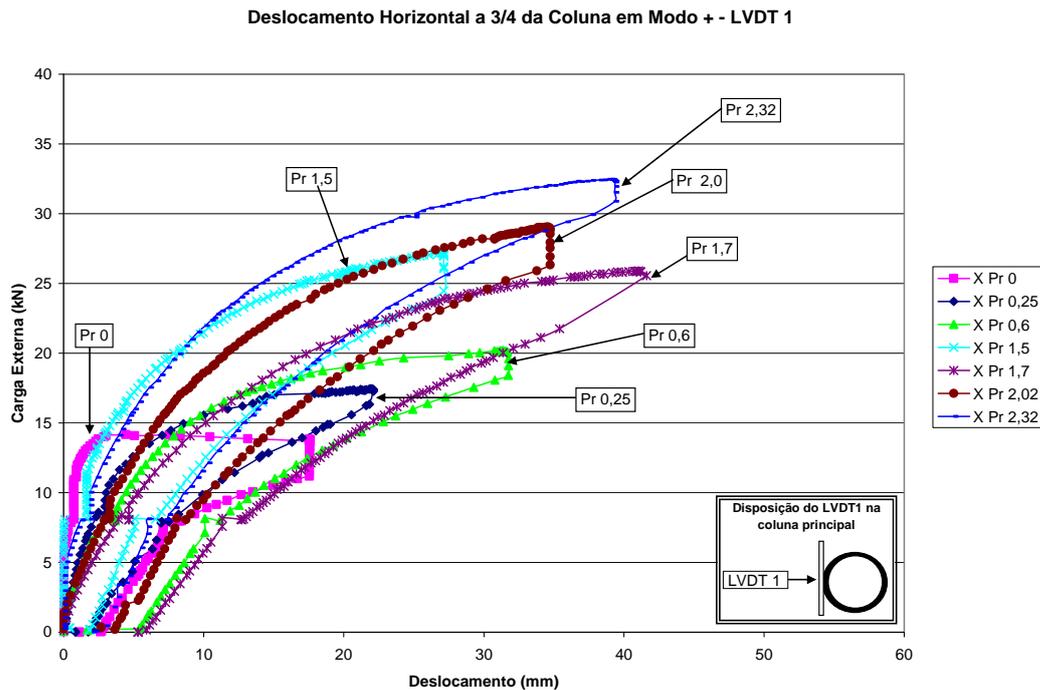


Figura 4.32 Gráfico do deslocamento horizontal para o LVDT 1 em “modo +”

Da mesma maneira como no “modo x” os deslocamentos axiais não apresentaram a curva característica que se esperava próximo a carga de flambagem da estrutura com um patamar bem definido em comparação a análise numérica. Também foi necessário ampliar o gráfico das Figura 4.33, Figura 4.34 e Figura 4.35 para se ter uma melhor visualização dos resultados obtidos para os LVDTs que mediam o deslocamento axial da coluna e dos pórticos de reação. O gráfico da Figura 4.33 apresenta apenas o deslocamento aferido pelo décimo primeiro LVDT. O encurtamento da coluna é calculado diminuindo o deslocamento medido pelo décimo primeiro LVDT pelo décimo terceiro LVDT que se encontrava no pórtico de reação oposto ao local de aplicação da carga externa. Já o alongamento do curso do macaco hidráulico foi medido somando-se os resultados do décimo como o décimo primeiro LVDT. Visualmente é fácil verificar o encurtamento da coluna para o nível de protensão de 2,32 kN que foi da ordem de quatro milímetros.

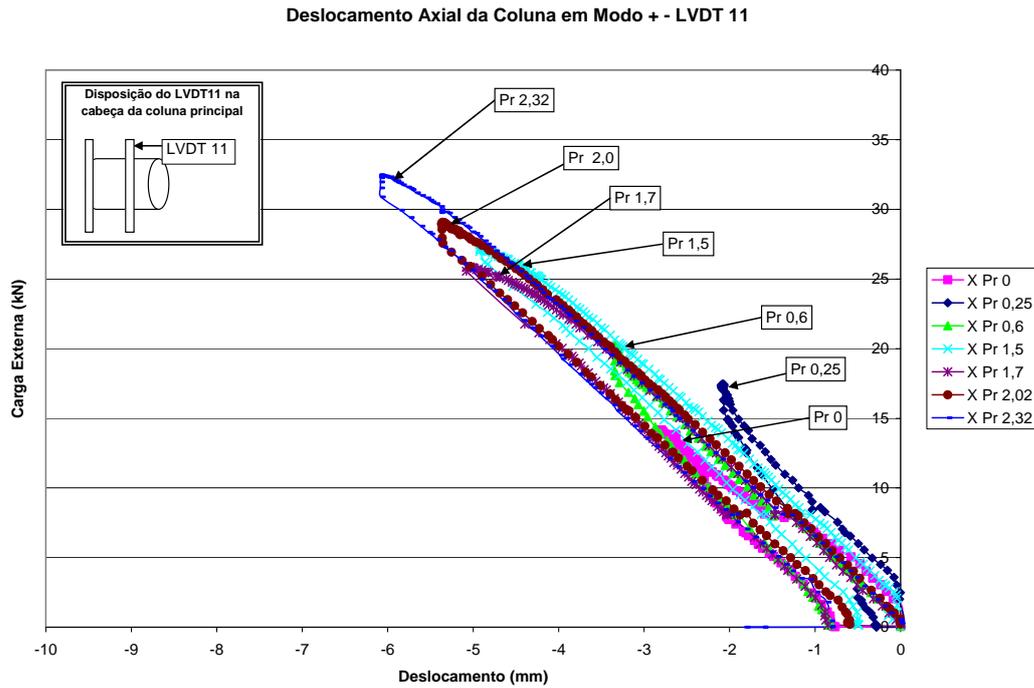


Figura 4.33 Gráfico do deslocamento axial medido pelo LVDT 11 em “modo +”

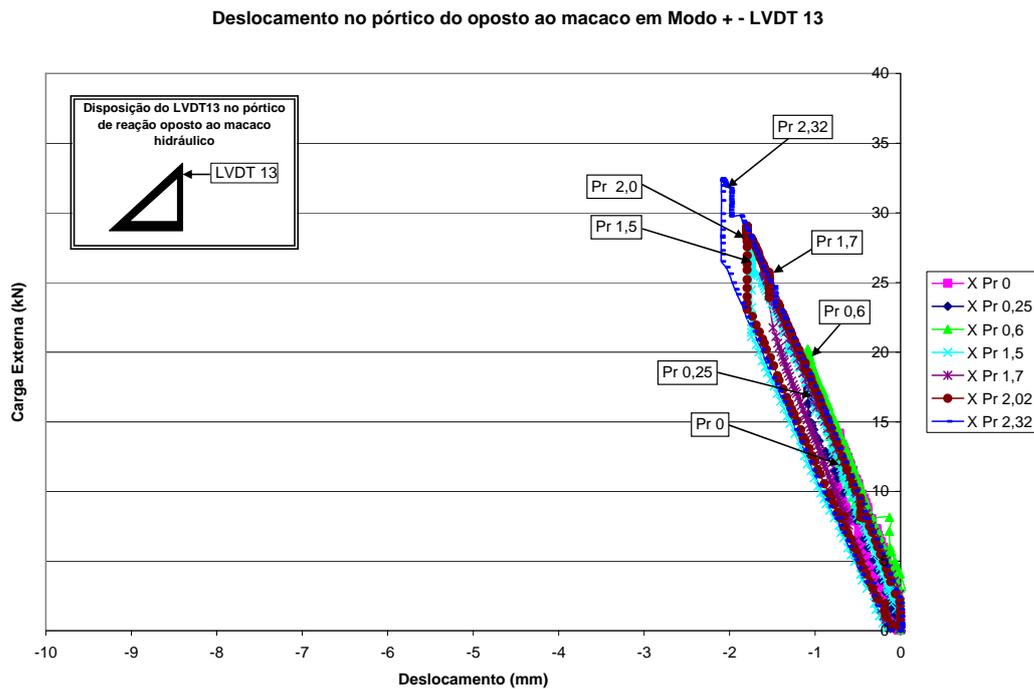


Figura 4.34 Gráfico do deslocamento axial no pórtico de reação oposto ao macaco hidráulico para o LVDT 13 em “modo +”

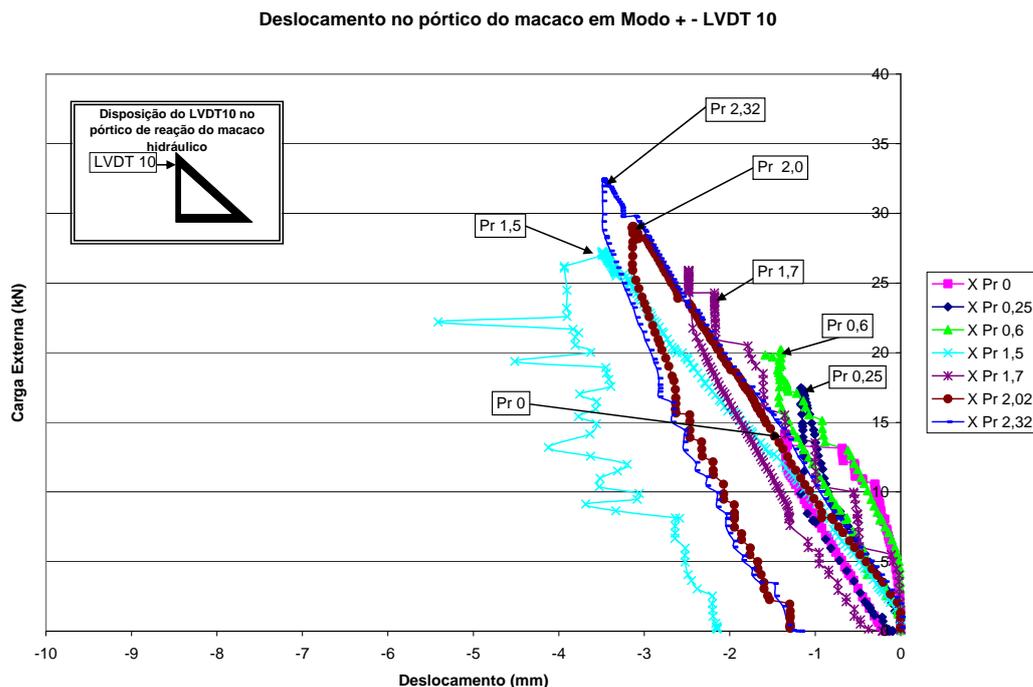


Figura 4.35 Gráfico do deslocamento axial no pórtico de reação do macaco hidráulico para o LVDT 10 em “modo +”

Nota-se que para o “modo +” que a relação entre carga aplicada e carga interna no tubo central na Figura 4.36 é praticamente linear apresentando um flambagem abrupta e não tem distinção entre os níveis de protensão.

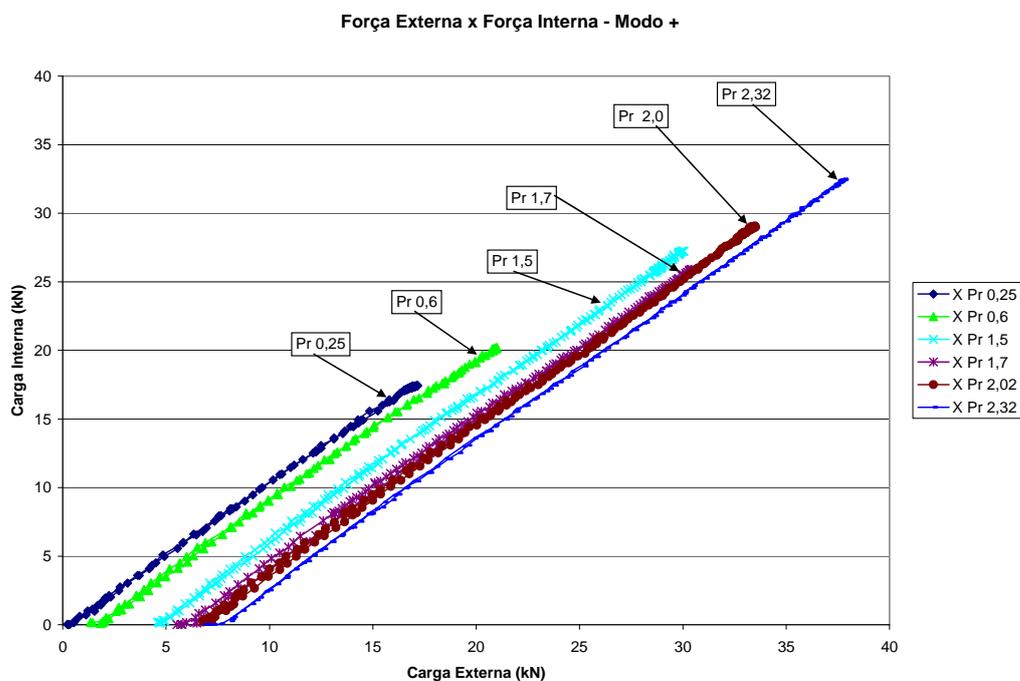


Figura 4.36 Carga externa versus carga interna (carga aplicada + carga dos quatro estais) na coluna principal em “modo +”.

Neste ensaio somente um dos estais trabalhava na restrição durante a aplicação da carga externa, o estai 1. Este estai ganhava tensão conforme a coluna ia deslocando horizontalmente na sua direção, fato que era esperado. Os estais 2 e 3 tiveram pouca perda de protensão, somente devido ao encurtamento da coluna. O estai 4, que trabalhava opostamente ao estai 1, perdeu muita protensão chegando a praticamente zero em alguns níveis de protensão. O gráfico da Figura 4.37 mostra como o estai 1 ganha protensão durante a aplicação da carga. Os gráficos referentes aos outros estais encontram-se no Anexo B. Como já foi mencionado no início do capítulo, não foi simples aplicar a protensão na coluna para os níveis de protensão elevados porque se gerava uma deformação inicial da coluna principal, tornando o equilíbrio de carga nos estais uma tarefa muito difícil de ser realizada.

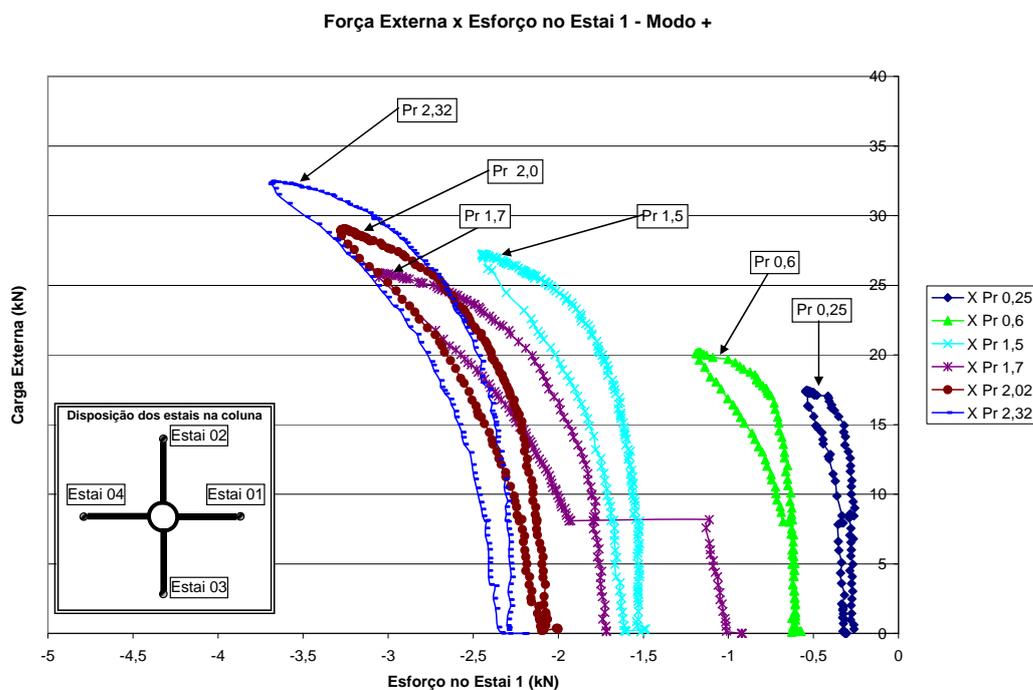


Figura 4.37 Comportamento do estai 1 durante a aplicação da carga externa na estrutura em “modo +”.

Os esforços nos estais foram obtidos através de células de carga elaboradas especialmente para tal medição.

Os gráficos a seguir são dos extensômetros instalados na coluna principal. O limite da deformação devido ao escoamento da seção de aço da coluna foi de $1809 \mu\epsilon$ aproximadamente, sendo que nenhum dos extensômetros atingiu este limite. Os gráficos dos extensômetros ERE17, ERE18, ERE19 e

ERE20 dispostos na coluna principal paralelos ao eixo dos estais estão representados pelas Figura 4.38, Figura 4.39, Figura 4.40 e Figura 4.41 respectivamente. O outro conjunto de extensômetros: ERE21, ERE22, ERE23 e ERE24; estão no Anexo B por terem deformações similares ainda não ultrapassando o limite de escoamento. Pode-se observar, assim como no “modo x” um comportamento praticamente linear inicialmente tornando-se não-linear próximo a carga de flambagem da coluna em todos os gráficos. Pela diferença de inclinação da curva para o mesmo nível de protensão foi possível observar que ocorreu uma flexo-compressão na estrutura. Isto pode ser melhor observado nos gráficos referentes aos extensômetros que foram instalados na lateral do tubo da coluna principal: os extensômetros ERE17 (Figura 4.38) e ERE19 (Figura 4.40).

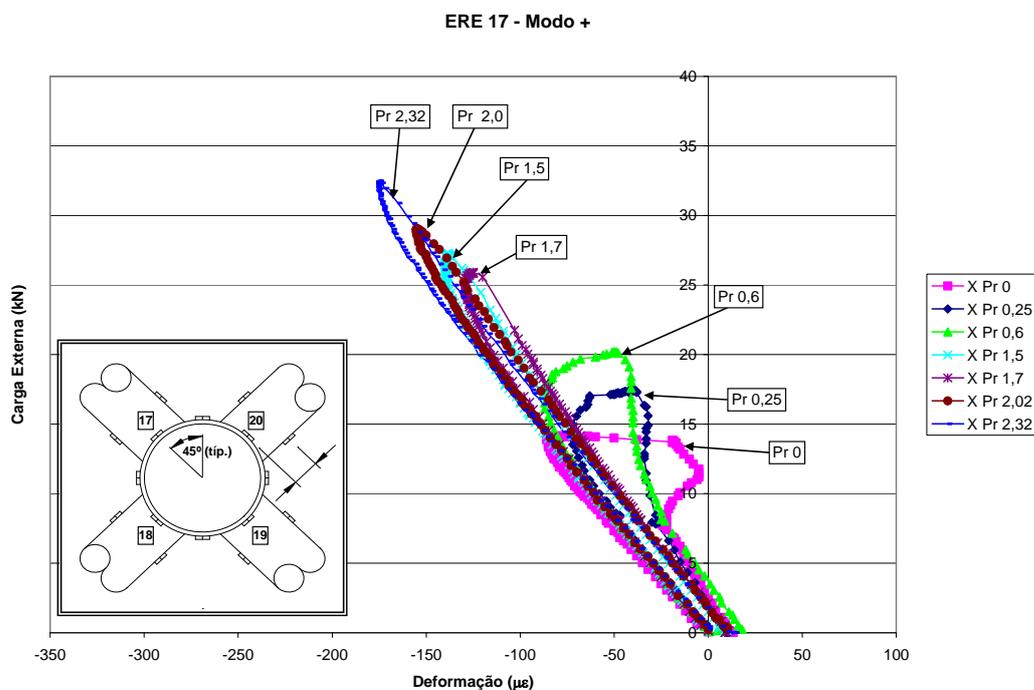


Figura 4.38 Gráfico referente ao extensômetro 17 em “modo +”.

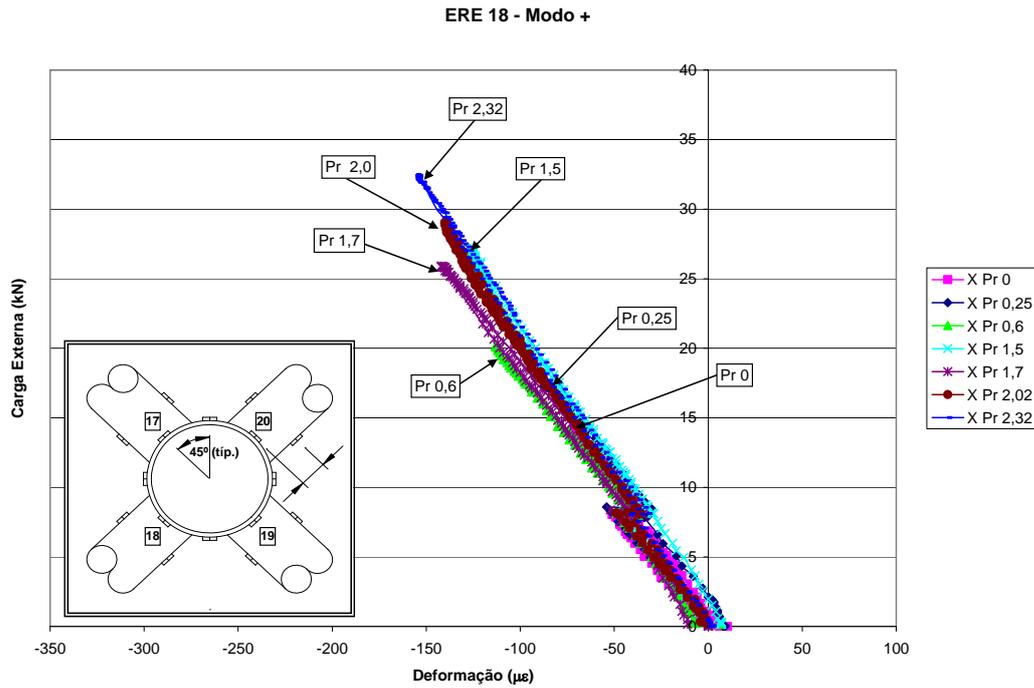


Figura 4.39 Gráfico referente ao extensômetro 18 em “modo +”.

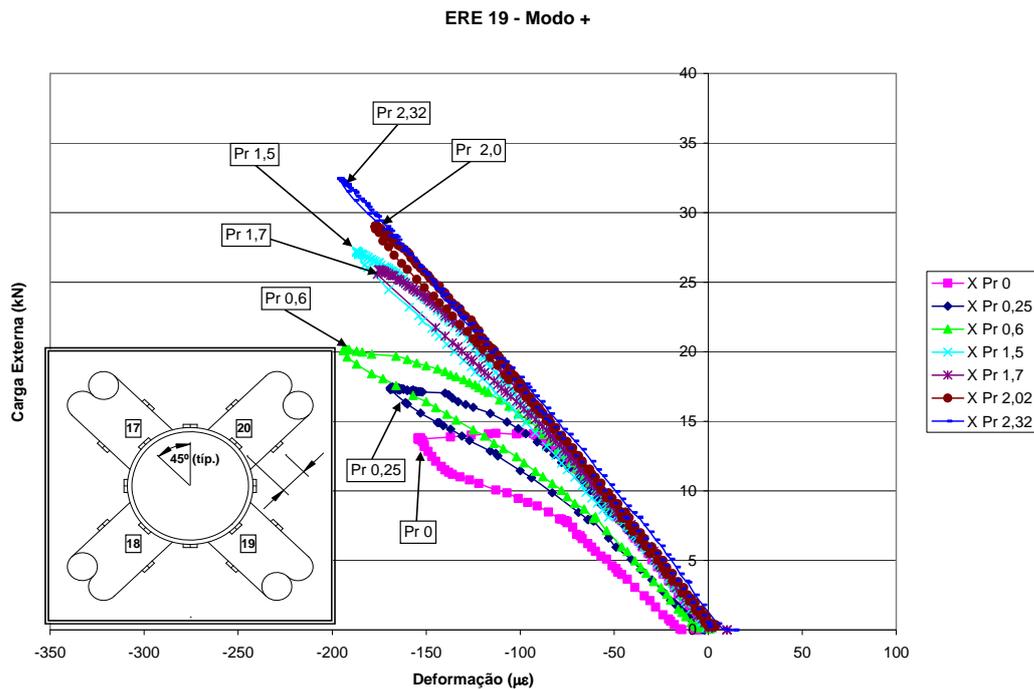


Figura 4.40 Gráfico referente ao extensômetro 19 em “modo +”.

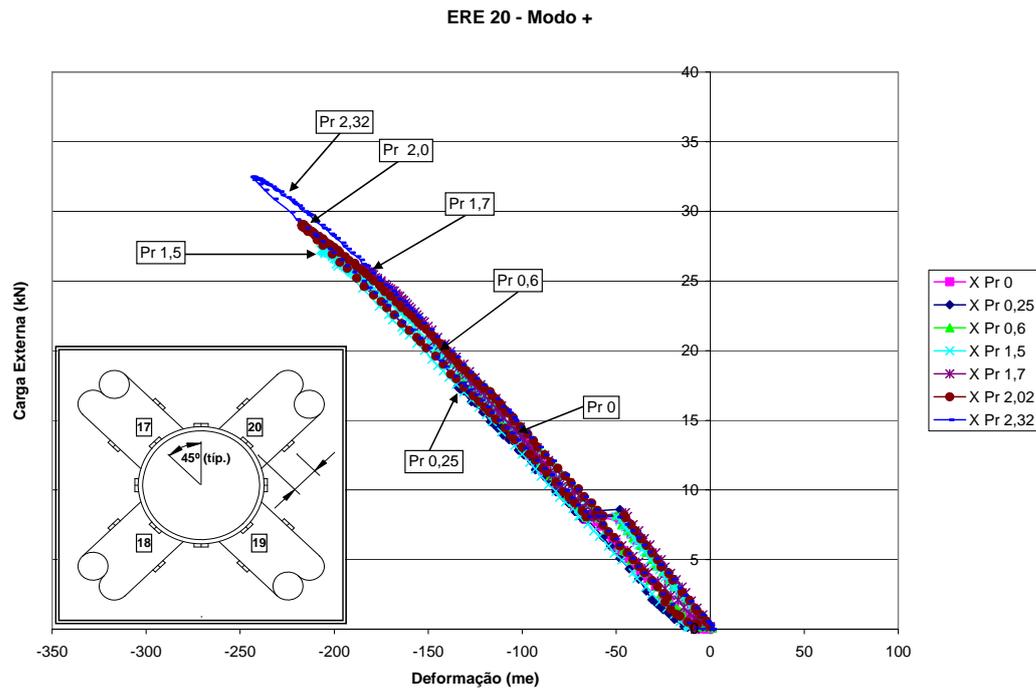


Figura 4.41 Gráfico referente ao extensômetro 20 em “modo +”.

Realizou-se uma padronização para uma melhor comparação entre os gráficos dos extensômetros instalados nos braços. Conforme já apresentado no “modo x” os gráficos serão mostrados aos pares e somente do braço mais carregado, pois foi onde o estai 1 aplicou maior tensão durante a aplicação da carga externa. Os extensômetros instalados nos outros braços estão dispostos no Anexo B. Os extensômetros 25 (Figura 4.42) e 27 (Figura 4.43) praticamente não tiveram deformação considerável. Os extensômetros 26 e 28 apresentam deformação típica de flexão. Esta flexão ocorreu no mesmo sentido dos estais, paralela a coluna principal, apesar dos valores medidos serem pequenos em relação ao da coluna principal.

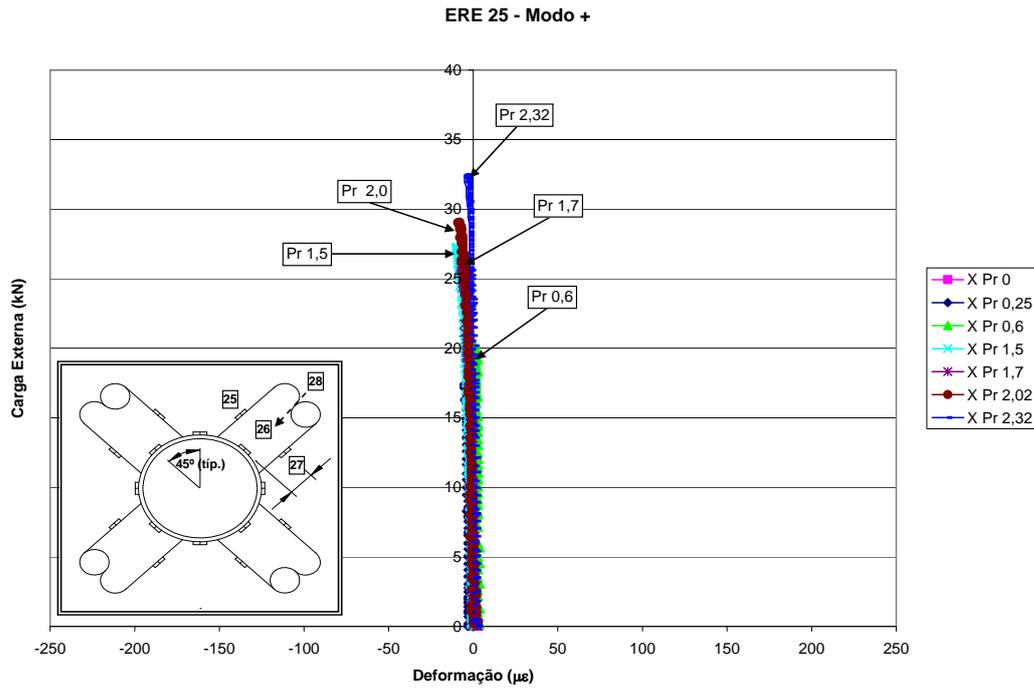


Figura 4.42 Gráfico referente ao extensômetro 25 em “modo +”.

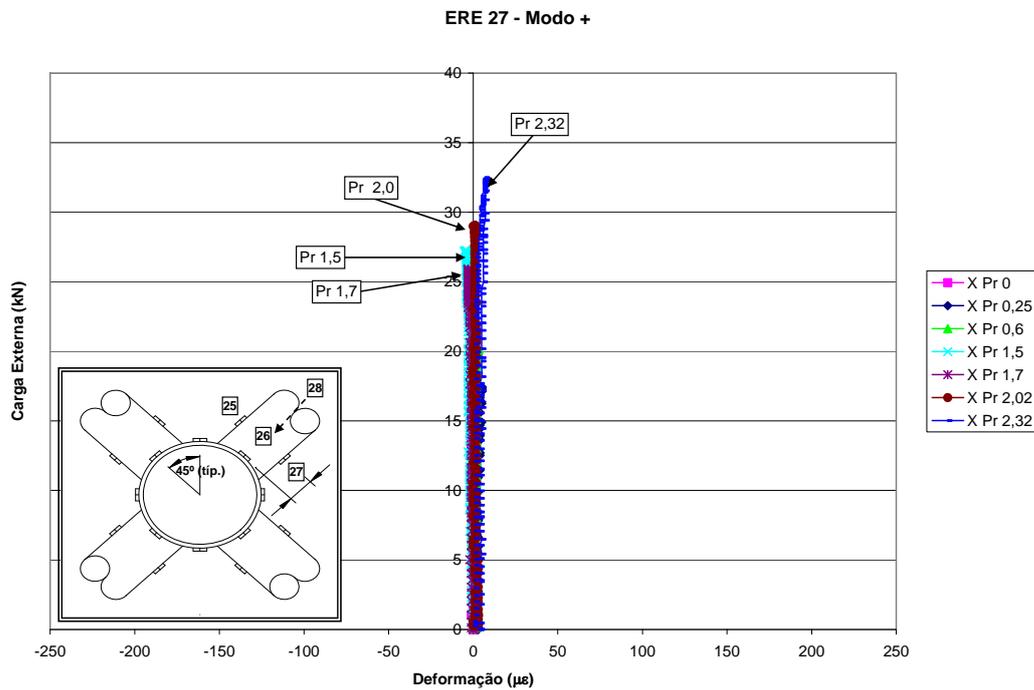


Figura 4.43 Gráfico referente ao extensômetro 27 em “modo +”.

4.2 Segunda coluna de aço estaiada

Na segunda coluna de aço estaiada e protendida utilizou-se a mesma configuração geométrica e de material que a primeira coluna. Foram realizados dezesseis níveis de protensão aplicados na coluna, sendo oito níveis de protensão com a coluna em “modo x” [30] e oito níveis de protensão com a coluna em “modo +”. O valor máximo obtido durante o ensaio no “modo x” foi de 23,73 kN, de resistência última à compressão na coluna para o nível de protensão em cada estai de 1,05 kN. Já no ensaio no “modo +” foi de 26,13 kN de resistência última com nível de protensão em cada estai de 1,31 kN. Com isto, para esta segunda coluna conseguiu-se obter 2 vezes mais que a carga de Euler para a coluna sem estaiamento.

Também procurou-se ir além destes níveis de protensão em cada estai, porém estava inserindo na coluna uma deformação inicial elevada influenciando diretamente nos resultados, gerando um desbalanceamento dos esforços nos estais e impedindo a obtenção de uma protensão igual nos quatro estais.

A Tabela 4.2 apresenta todos os resultados obtidos para os “modo x” e “modo +” respectivamente com o nível de protensão aplicado em cada estai. Apresenta-se também o gráfico com as curvas relacionada à Tabela 4.2.

Segunda Coluna de Aço Estaiada					
Modo x		Modo +		Modelo Ansys	
Protensão	Resistência	Protensão	Resistência	Protensão	Resistência
0,00	9,60	0,00	9,64	0,00	11,28
0,31	15,26	0,30	15,99	0,02	21,13
0,71	23,05	0,70	21,34	0,16	21,49
1,05	23,73	1,01	24,67	1,57	28,69
1,32	22,84	1,31	26,13	2,35	30,92
1,71	22,45	1,51	25,75	3,14	30,66
2,04	21,88	2,01	25,23	4,71	30,13
2,33	20,85	2,30	23,89	7,85	26,80

Tabela 4.2 Segunda coluna, resultados experimentais e numéricos em termo de carga última. Valores em kN.

Para esta coluna é fácil observar através do gráfico da Figura 4.46 a perda de rigidez com o aumento da protensão. Entre os níveis de protensão de 0,75 kN e 1,25 kN aproximadamente, onde a coluna começa a perder resistência apresentando o que seria o início da Zona 3 no modelo de estudo do Hafez [5]

onde após o nível que seria a protensão ótima passa a atuar negativamente na coluna estaiada tornando-a instável e diminuindo o valor da sua carga última por deixar a coluna com uma deformação inicial bem elevada..

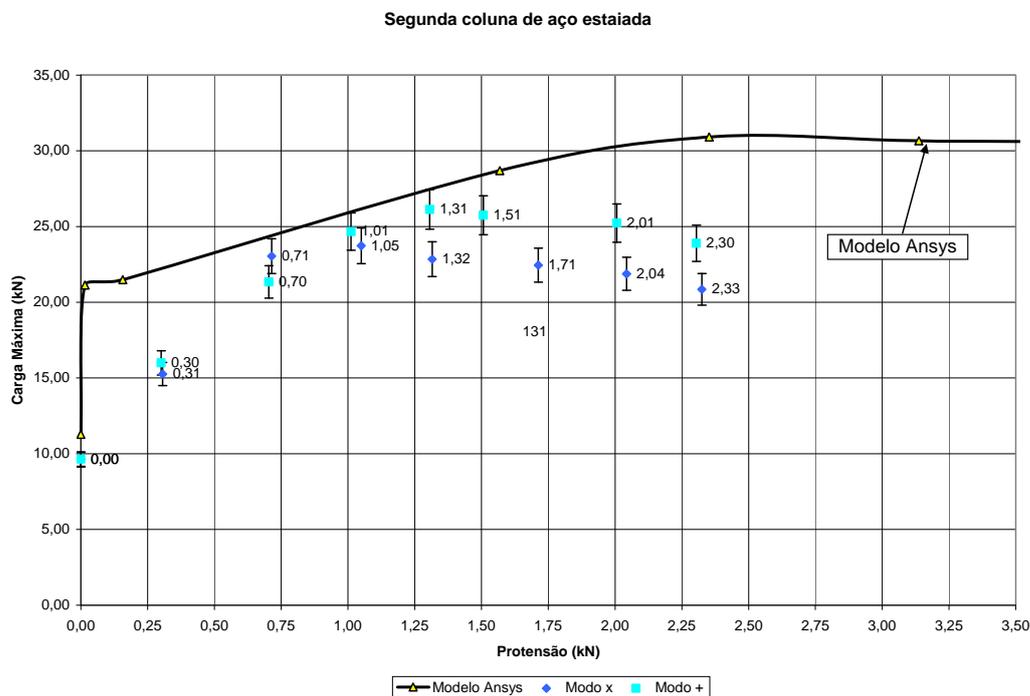


Figura 4.46 Comparações entre o nível de protensão aplicada em cada estai e a resistência da segunda coluna estaiada ensaiada.

Apenas em alguns níveis de protensão o erro de 5% atingi o modelo numérico. Isto pode ter ocorrido na comparação pois com modelo numérico com apenas a imperfeição de oito milímetros no centro [1] pode não ter sido o ideal. Até porque, como será apresentado, em níveis de protensão elevado a coluna estaiada apresenta o segundo modo de flambagem.

Uma descrição dos resultados de cada modo de ensaio é apresentada a seguir. Os gráficos mostrarão as curvas para cada instrumento de medição, utilizado durante os ensaios, para todos os níveis de protensão.

4.2.1 Segunda Coluna em “modo x”

Os gráficos das Figura 4.47 e Figura 4.48 representam o terceiro e segundo LVDT respectivamente, instalado o mais próximo do centro da coluna principal medindo o deslocamento horizontal. Estes LVDTs, assim como na primeira coluna, foram instalados em paralelo com o objetivo de medir qualquer torção ocorrida durante os ensaios.

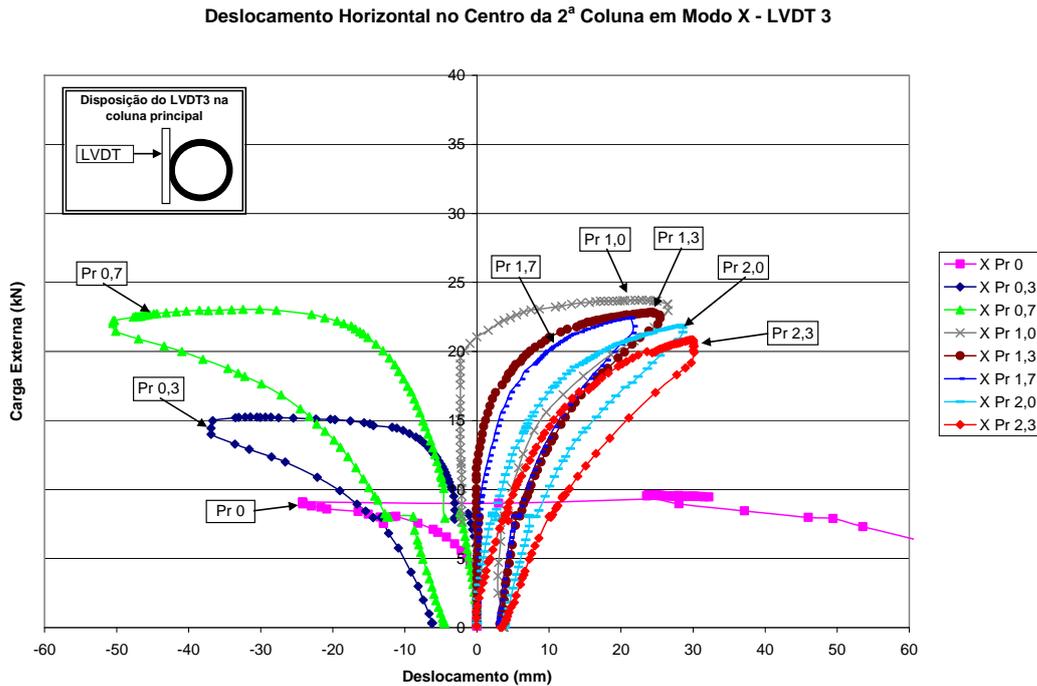


Figura 4.47 Gráfico do deslocamento horizontal para o LVDT 3 para a segunda coluna.

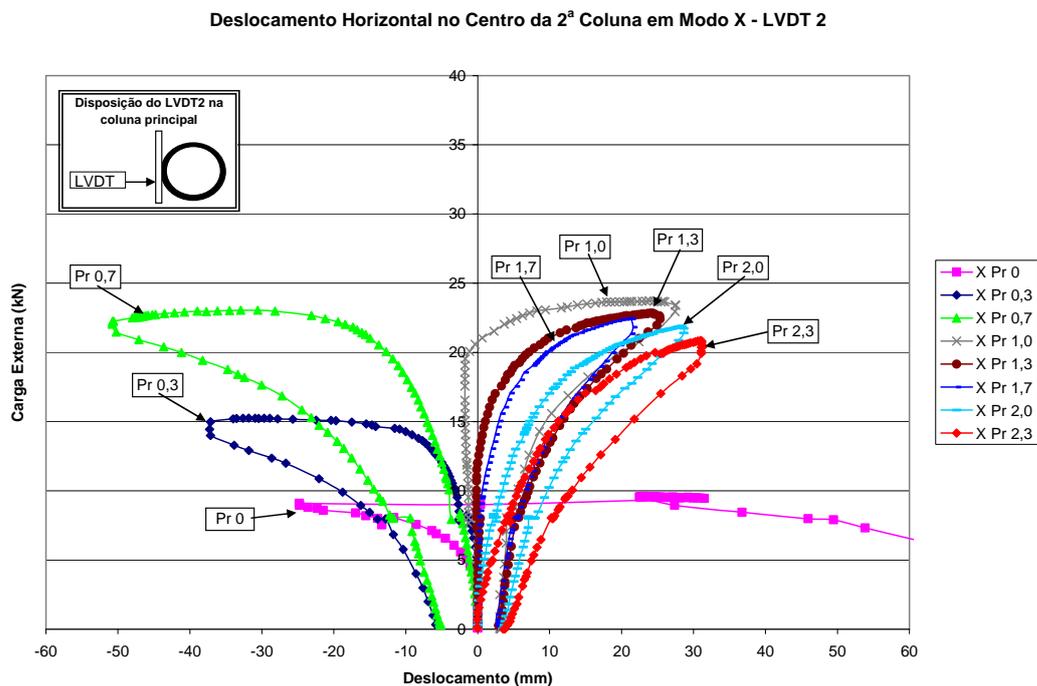


Figura 4.48 Gráfico do deslocamento horizontal para o LVDT 2 para a segunda coluna.

Nos primeiros ensaios desta coluna procurou-se manter o patamar característico de flambagem da coluna. Percebe-se que nestes ensaios a coluna praticamente volta ao seu ponto inicial comprovando a sua flambagem elástica.

Com isto não foi necessário ir aquém deste limite por motivo de segurança local das pessoas envolvidas nos ensaios. Também é claro a perda de rigidez através da angulação em que começa os ensaios com o aumento do nível de protensão, gerado pela aumento da imperfeição inicial da coluna. Ao se comparar os dois gráficos verifica-se que não ocorreu torção em todos os níveis de protensão ensaiadas. No ensaio onde não se tinha protensão nos estais o segundo e terceiro LVDTs perderam o seus cursos.

Os LVDTs centrais quarto e quinto apresentaram deslocamentos verticais muito pequenos não ultrapassando 3 mm, o que é considerável desprezível e se encontram no Anexo B.

Os deslocamentos a um quarto e a três quartos da coluna, nos níveis de protensão mais elevados, tiveram deslocamentos maiores que o vão central, apresentando uma transição do primeiro para o segundo modo de flambagem, como poderá ser observado nos gráficos que mostram os deslocamentos horizontais e verticais (Figura 4.49, Figura 4.50, Figura 4.51 e Figura 4.52) nestas seções.

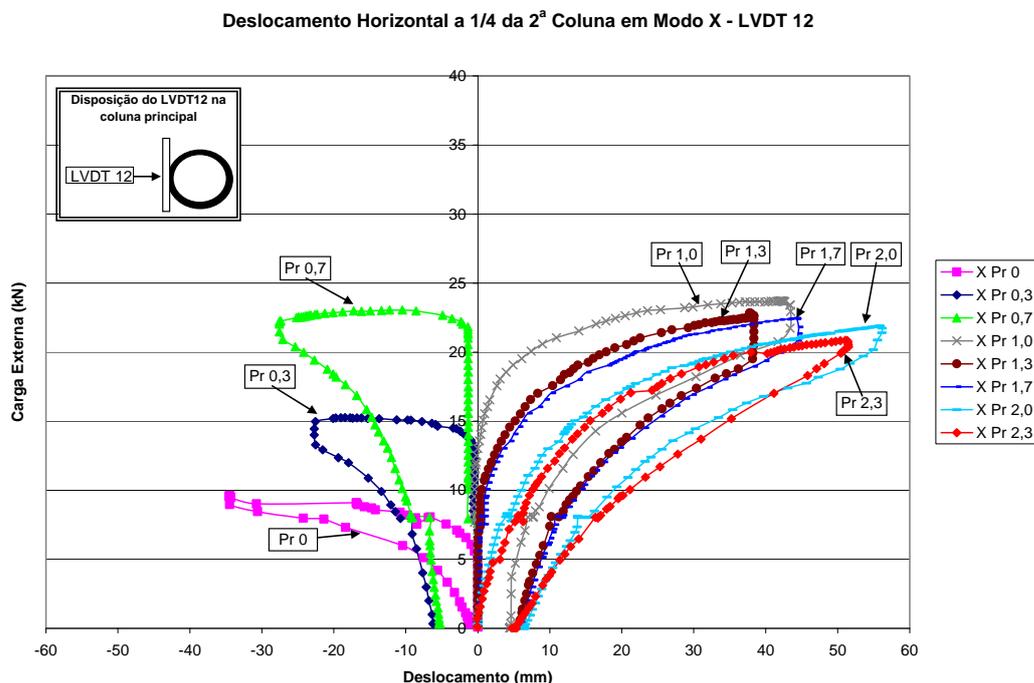


Figura 4.49 Gráfico do deslocamento horizontal para o LVDT 12

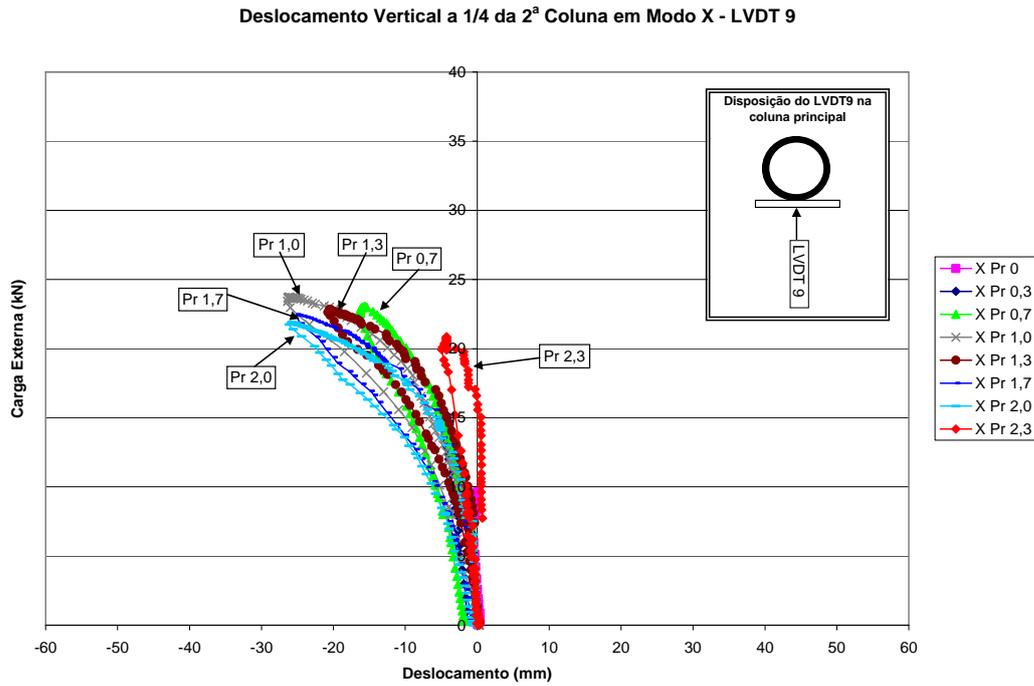


Figura 4.50 Gráfico do deslocamento vertical para o LVDT 9

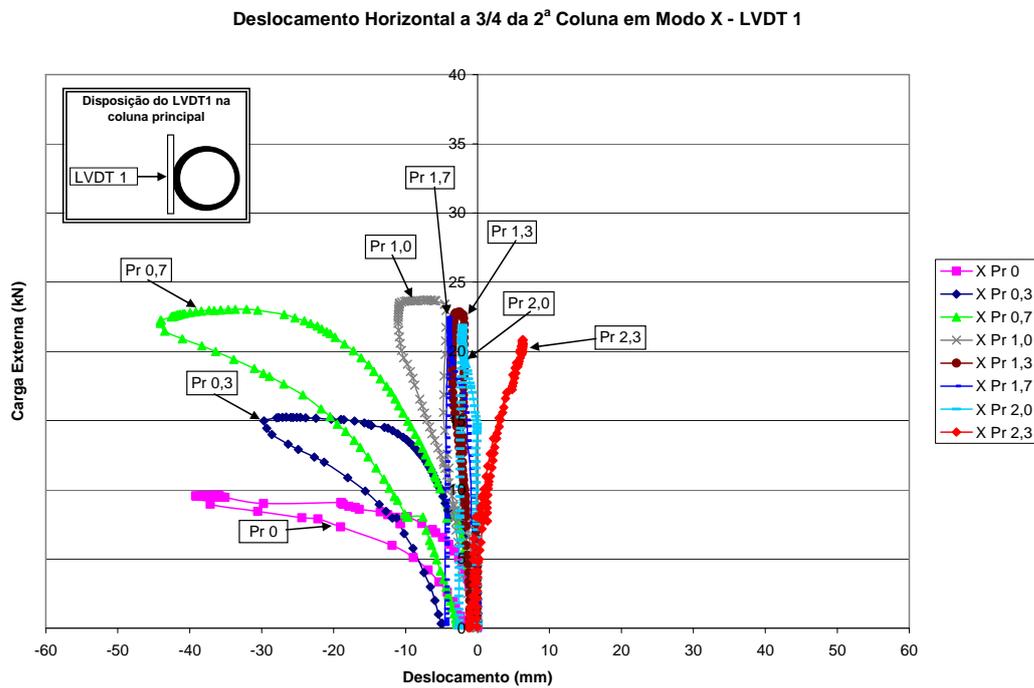


Figura 4.51 Gráfico do deslocamento horizontal para o LVDT 1

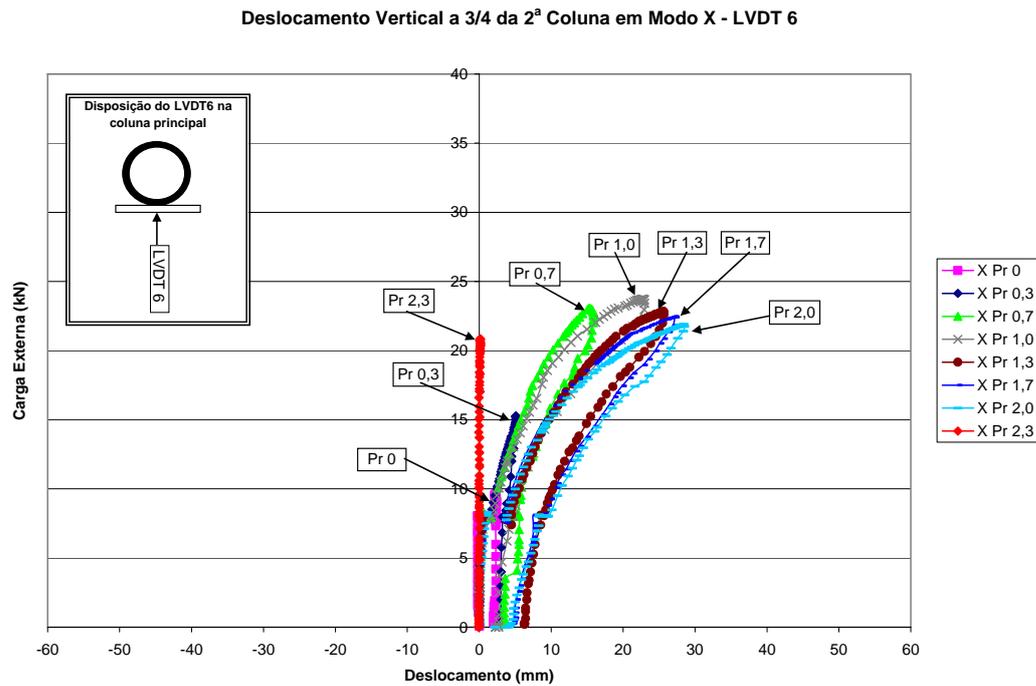


Figura 4.52 Gráfico do deslocamento vertical para o LVDT 6

Na Figura 4.53 observa-se como a coluna estaiada se comportou durante um dos ensaios apresentando uma configuração próxima do segundo modo de flambagem.



Figura 4.53 Ensaio da segunda coluna em modo x

O gráfico da Figura 4.54 apresenta apenas o deslocamento aferido pelo décimo primeiro LVDT. O encurtamento da coluna é calculado diminuindo o deslocamento medido pelo décimo primeiro LVDT pelo décimo terceiro LVDT que se encontrava no pórtico de reação oposto ao local de aplicação da carga externa. Já o alongamento do curso do macaco hidráulico é medido somando-se os resultados do décimo como o décimo primeiro LVDT. Visualmente é fácil verificar o encurtamento da coluna para o nível de protensão de 2,0 kN que é da ordem de sete milímetros. No gráfico da Figura 4.57 é claro a formação do patamar de flambagem assim como aparece no modelo numérico para os níveis elevados de protensão.

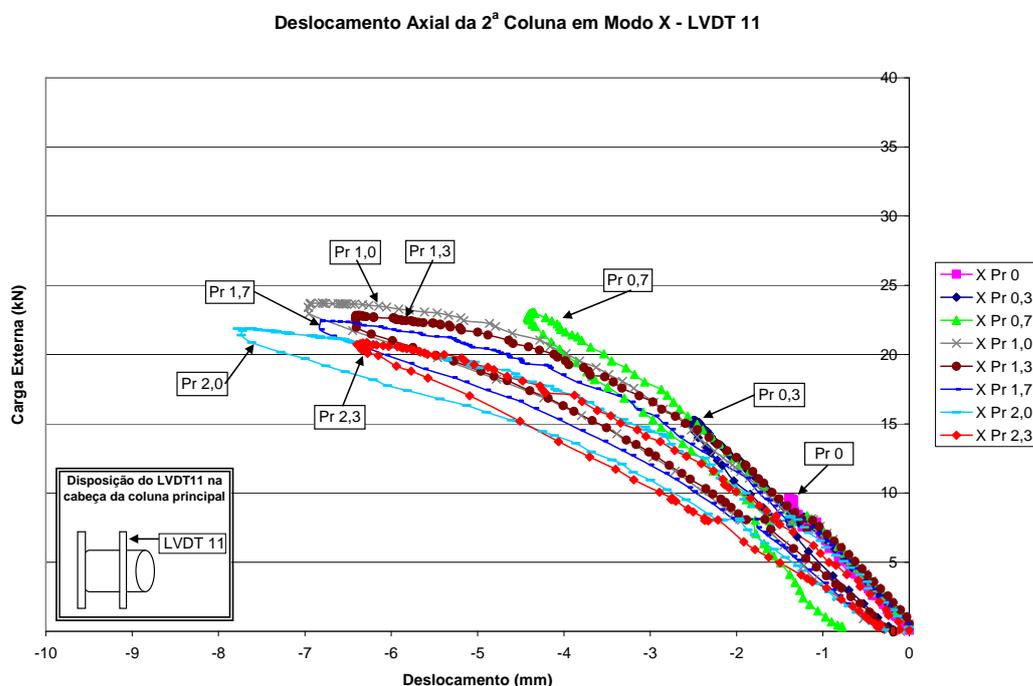


Figura 4.54 Gráfico do deslocamento axial medido pelo LVDT 11

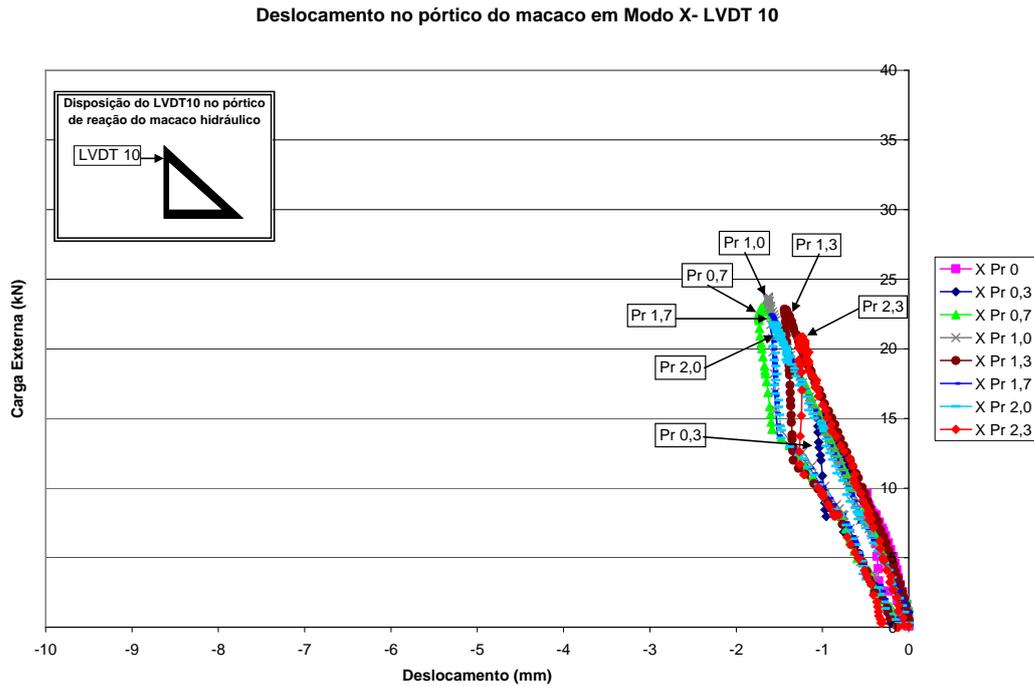


Figura 4.55 Gráfico do deslocamento axial no pórtico de reação oposto ao macaco hidráulico para o LVDT 13

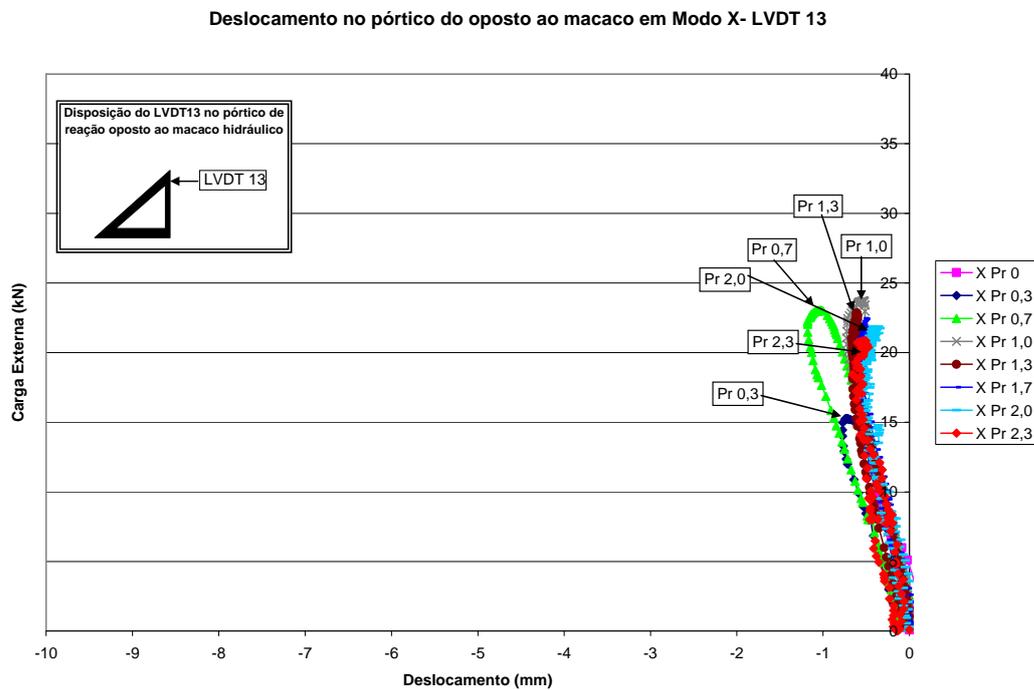


Figura 4.56 Gráfico do deslocamento axial no pórtico de reação do macaco hidráulico para o LVDT 10

Nota-se também que a relação entre carga aplicada e carga interna no tubo central na Figura 4.57 é praticamente linear apresentando um flambagem abrupta e não gerando distinção entre os níveis de protensão.

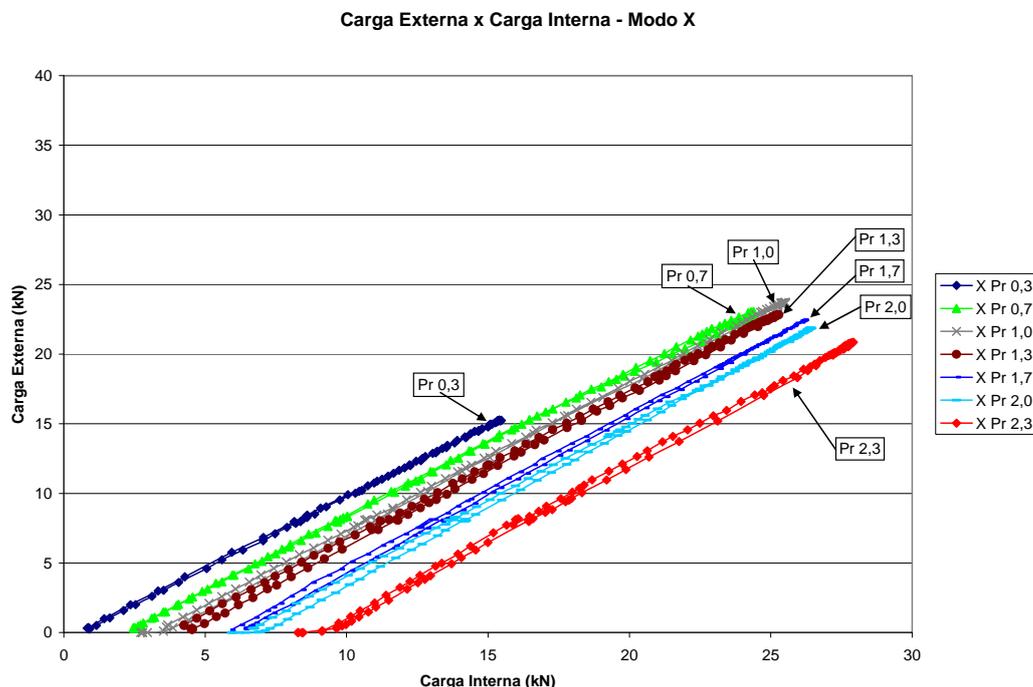


Figura 4.57 Carga externa versus carga interna (carga aplicada + carga dos quatro estais) na coluna principal

Neste ensaio somente dois estais trabalhavam na restrição durante a aplicação da carga externa quando a coluna tendia para o primeiro modo de flambagem. Mas quando a coluna tendia para o segundo modo de flambagem todos os quatro estais trabalhavam perdendo um pouco de tração devido ao encurtamento da coluna principal. O gráfico das Figura 4.58 e Figura 4.59, referentes aos estais 1 e 2 respectivamente, mostram como os estais ganham e perdem protensão durante a aplicação da carga, sendo que em nenhum caso a protensão é totalmente perdida. Os outros dois gráficos referentes aos estais 3 e 4 se encontram no Anexo B. Os esforços nos estais foram obtidos através de células de carga elaboradas especialmente para tal medição e que para esta coluna ela deixaram de medir os extensômetros individualmente e passaram a realizar a ponte de whitstone, conforme explicado no capítulo 4.

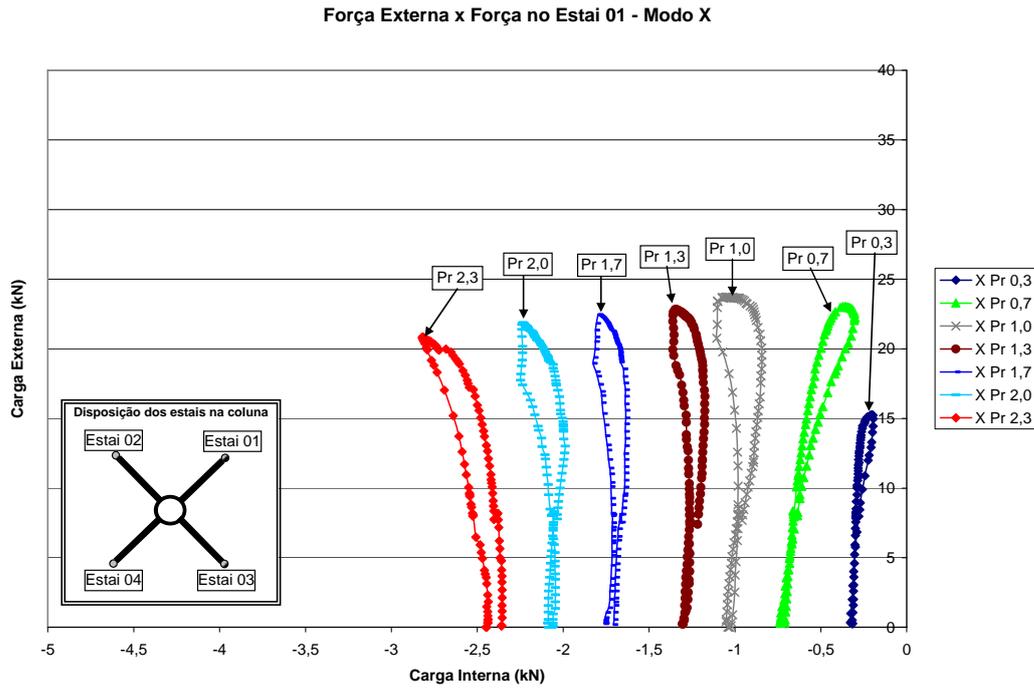


Figura 4.58 Comportamento do estai 1 durante a aplicação da carga externa na estrutura em “modo +”.

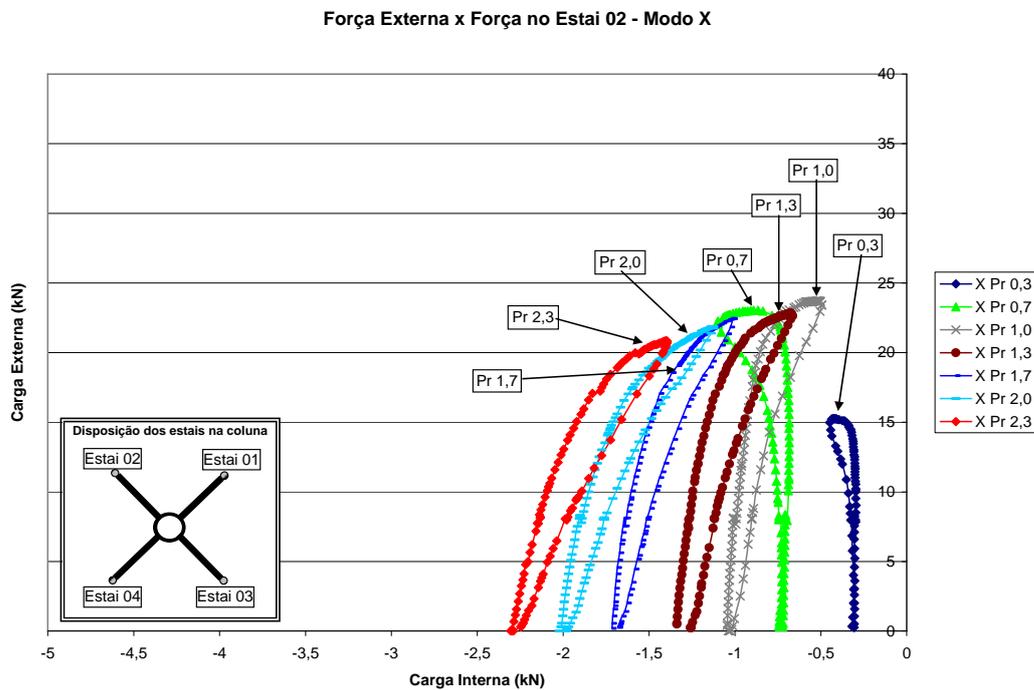


Figura 4.59 Comportamento do estai 2 durante a aplicação da carga externa na estrutura em “modo +”.

Os extensômetros instalados tanto na coluna principal como nos braços tem seu limite da deformação devido ao escoamento da seção de aço da coluna da ordem de $1809 \mu\epsilon$ aproximadamente. Do mesmo modo que os anteriores, para esta segunda coluna nenhum dos extensômetros atingiu este limite. Os gráficos dos extensômetros referentes aos ERE17, ERE18, ERE19 e ERE20 dispostos na coluna principal paralelos ao eixo dos estais estão representados pelas Figura 4.60, Figura 4.61, Figura 4.62 e Figura 4.63 respectivamente. O outro conjunto de extensômetros referentes aos ERE21, ERE22, ERE23 e ERE24; estão no Anexo B por terem deformações parecidas e também não ultrapassando o limite de escoamento. É possível observar uma mudança no comportamento da coluna, durante o ensaio, em que ela sai do primeiro modo de flambagem para o segundo modo de flambagem através da diferença de inclinação e da mudança de sentido da curva para o mesmo nível de protensão, onde pode ser melhor observado nos gráficos referentes aos extensômetros ERE17 (Figura 4.60) e ERE19 (Figura 4.62).

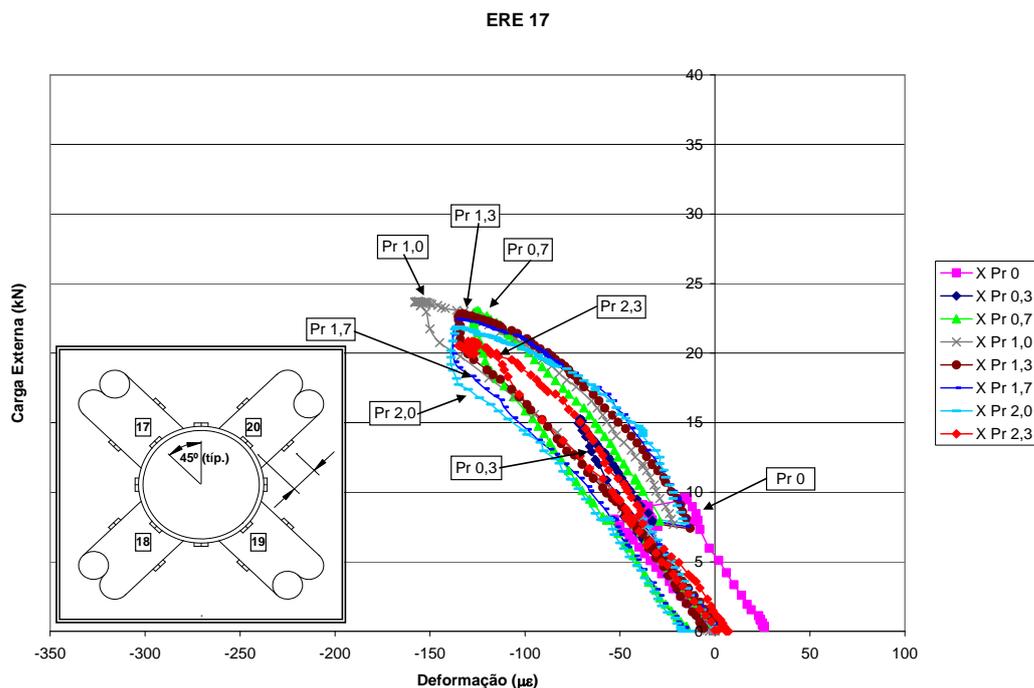


Figura 4.60 Gráfico referente ao extensômetro 17.

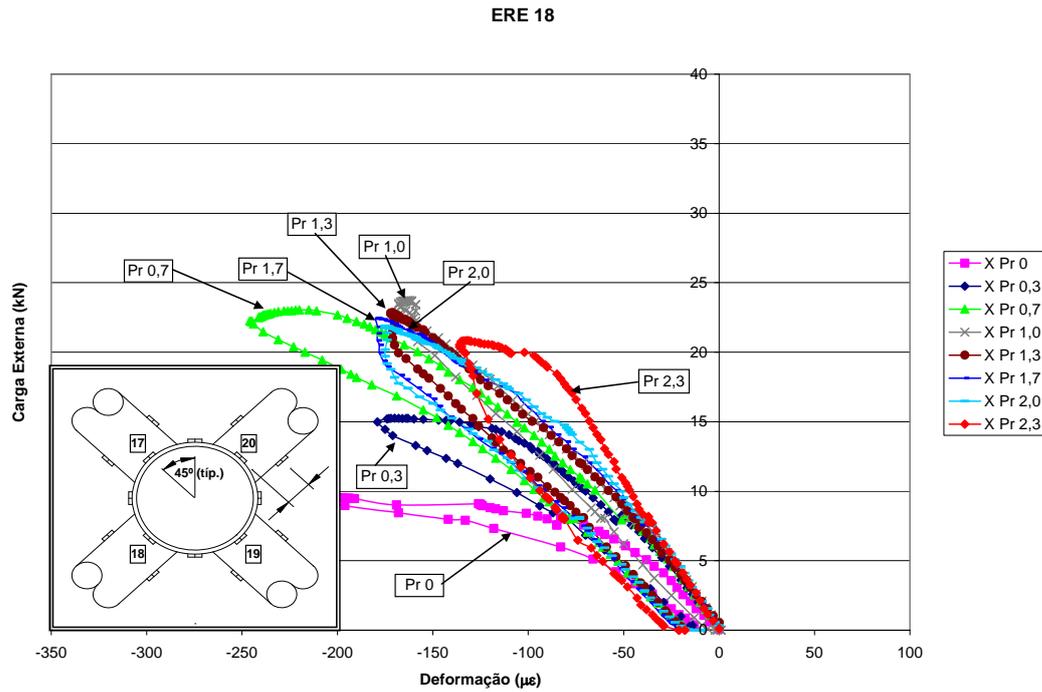


Figura 4.61 Gráfico referente ao extensômetro 18.

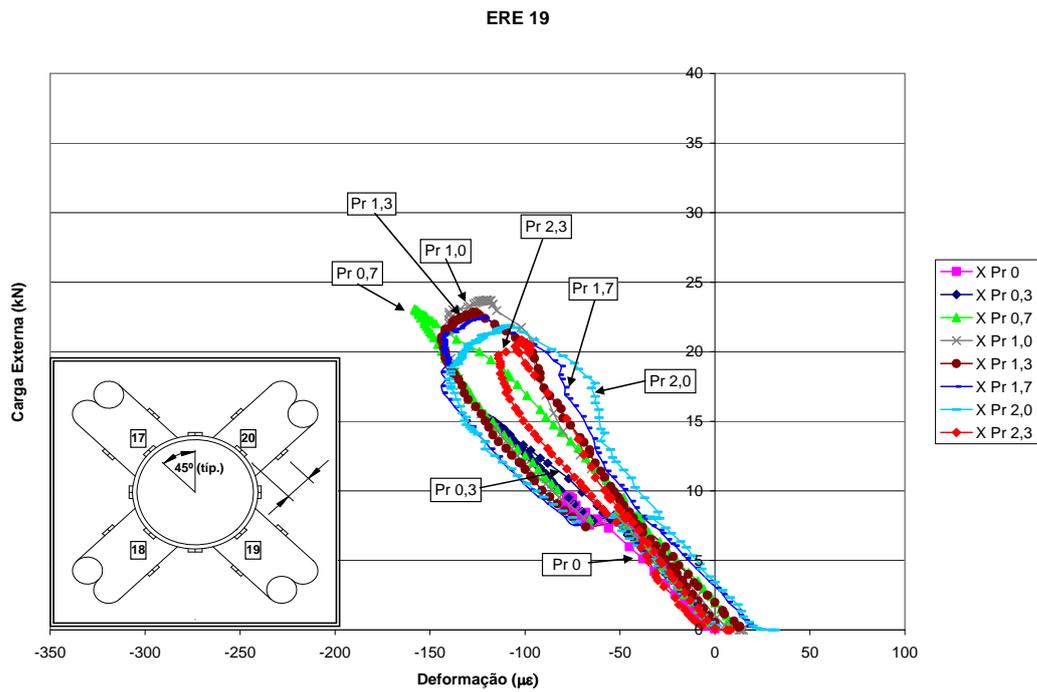


Figura 4.62 Gráfico referente ao extensômetro 19.

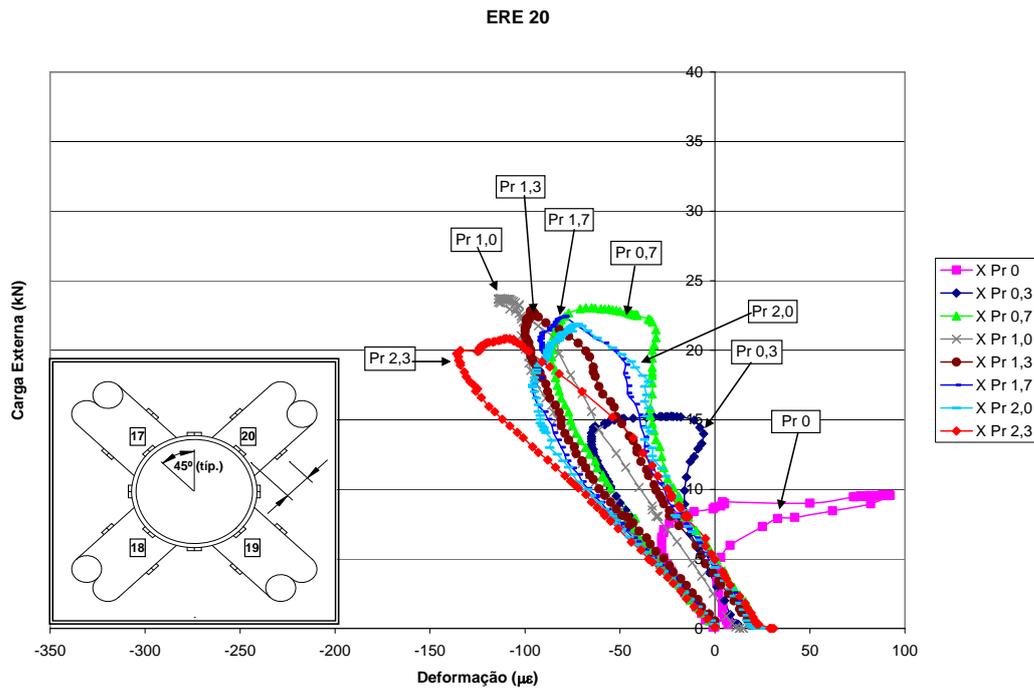


Figura 4.63 Gráfico referente ao extensômetro 20.

Conforme já explicado para os extensômetros instalados nos braços, os gráficos serão mostrados aos pares e somente do braço mais carregado que neste caso é o braço do estai 2. Os extensômetros instalados nos outros braços estão dispostos no Anexo B. Os extensômetros 37 e 39 praticamente não tiveram deformação considerável. Os extensômetros 38 (Figura 4.66) e 40 (Figura 4.67) apresentam deformação típica de flexão. Esta flexão ocorreu no mesmo sentido dos estais, paralela a coluna principal, apesar dos valores medidos serem pequenos em relação ao da coluna principal.

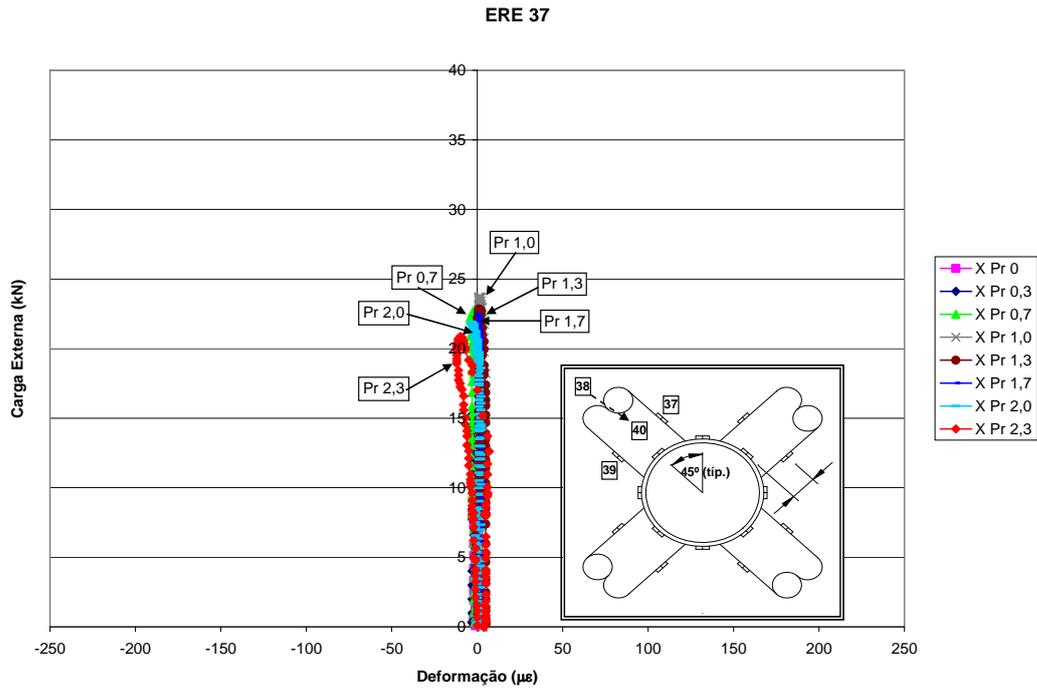


Figura 4.64 Gráfico referente ao extensômetro 37.

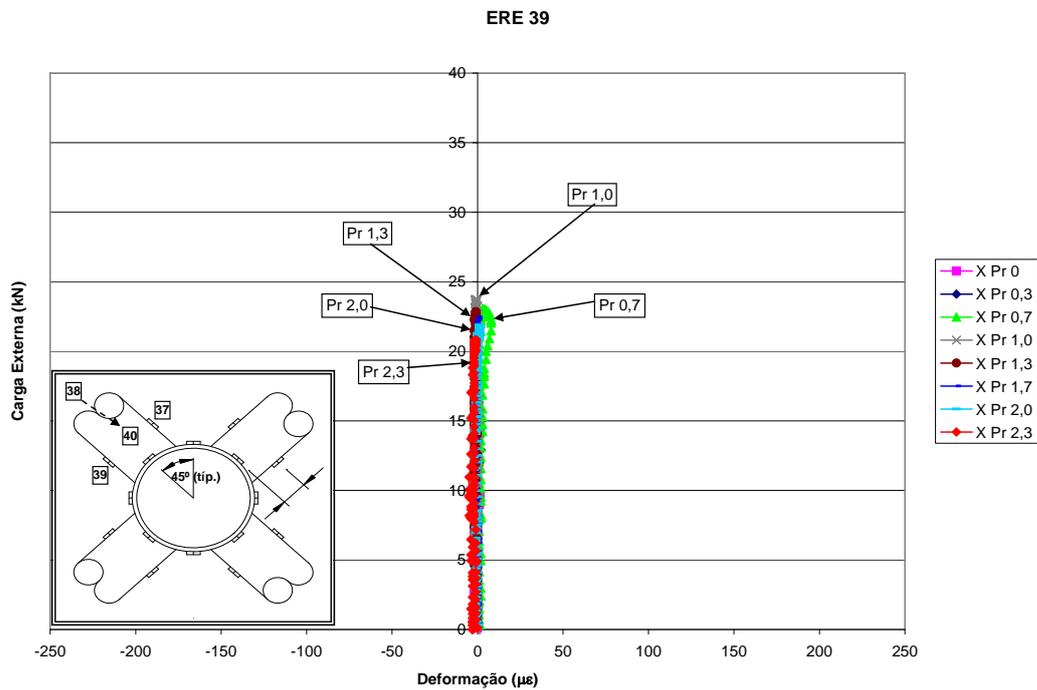


Figura 4.65 Gráfico referente ao extensômetro 39.

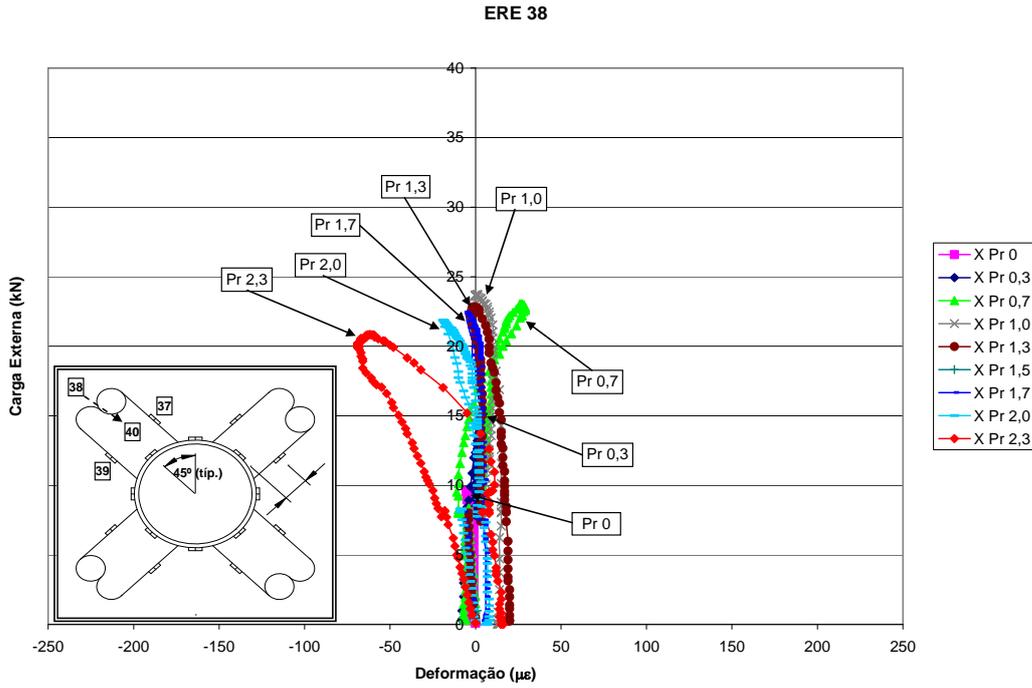


Figura 4.66 Gráfico referente ao extensômetro 38.

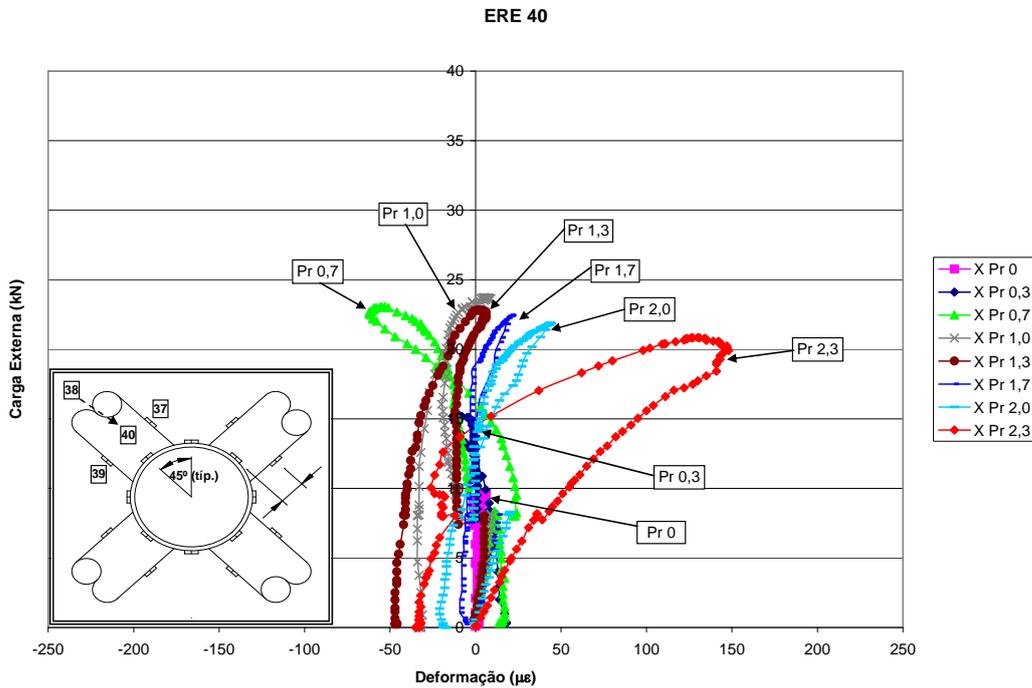


Figura 4.67 Gráfico referente ao extensômetro 40.

4.2.2 Segunda Coluna em “modo +”

Após o ensaio da primeira coluna, esperava-se que a realização deste modo em “+” para a segunda coluna tivesse um valor de carga última bem abaixo do valor obtido em “modo x”, porém, para os primeiros níveis de protensão, como pode ser visto pelo gráfico da Figura 4.46, os valores de carga última foram maiores e depois os dois modos praticamente se igualaram. Uma explicação plausível é o fato da imperfeição inicial ter sido diferente no plano horizontal. Assim como, também, os resultados da segunda coluna foram abaixo do esperado quando comparado à primeira coluna. Porém o modo de flambagem para a segunda coluna, apesar de ter as mesmas características geométricas, foi diferente do modo de flambagem da primeira coluna. Tanto o ensaio em “modo x” quanto o ensaio em “modo +” (como será apresentado a seguir) da segunda coluna manifestaram o segundo modo de flambagem, enquanto que a primeira coluna manifestou o primeiro modo de flambagem em ambos os ensaios “modo x” e “modo +”.

Os gráficos das e representam o terceiro e segundo LVDT respectivamente, mediram o deslocamento não apresentando qualquer torção ocorrida durante os ensaios.

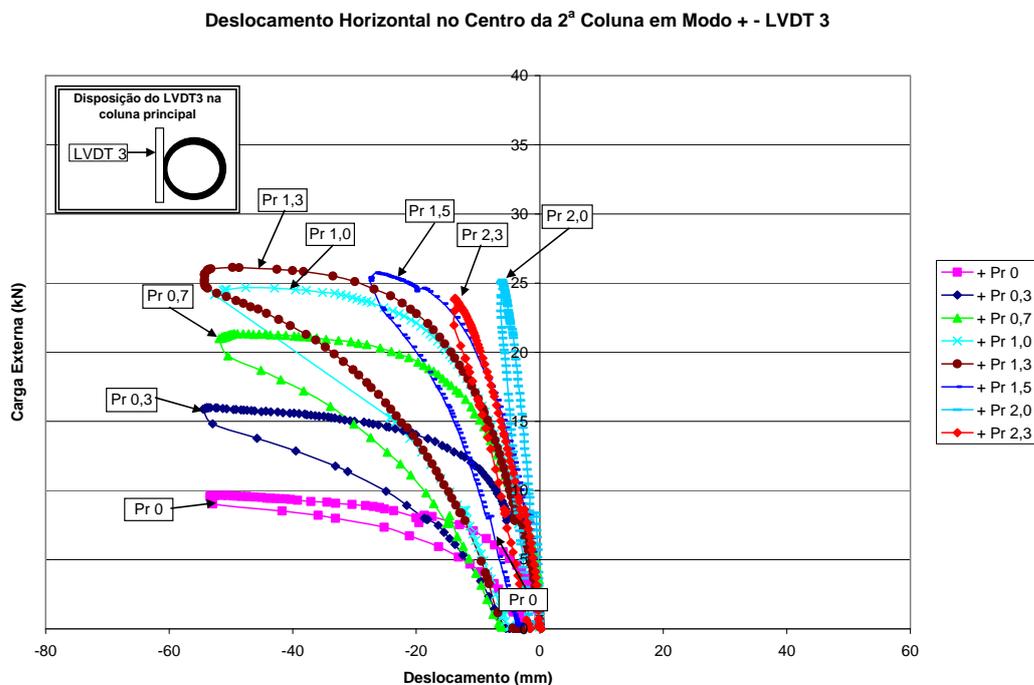


Figura 4.68 Gráfico do deslocamento horizontal para o LVDT 3 em “modo +”

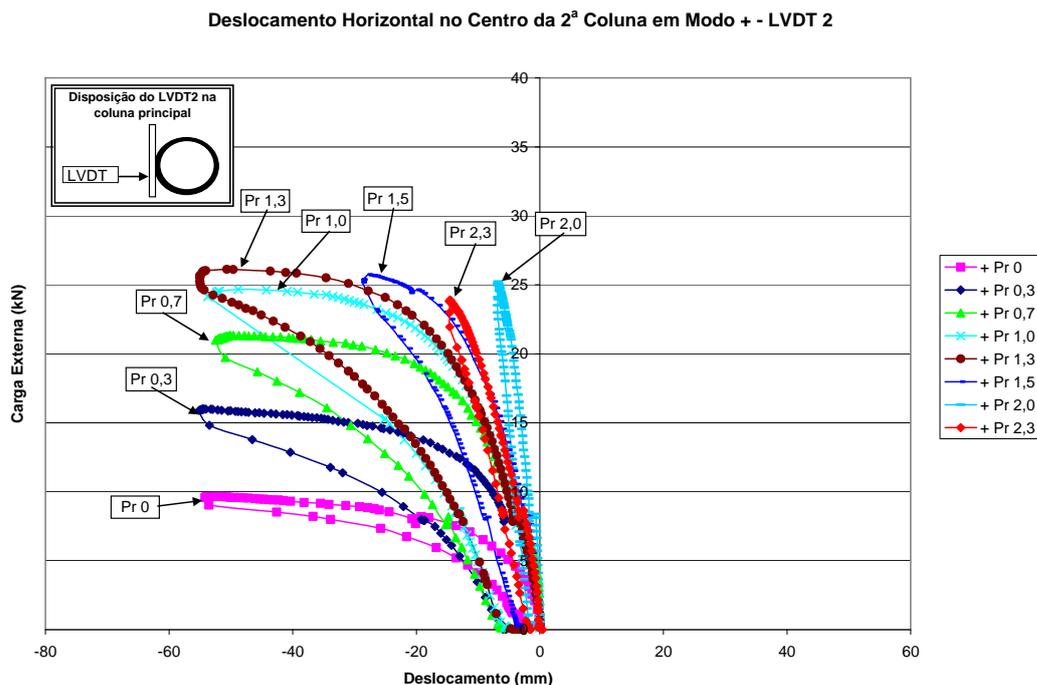


Figura 4.69 Gráfico do deslocamento horizontal para o LVDT 2 “em modo +”

Os LVDTs centrais quarto e quinto apresentaram deslocamentos verticais muito pequeno e se encontram no Anexo B. A partir da protensão de 1,3 kN a coluna mudou do primeiro para o segundo modo de flambagem. Através dos gráficos a um quarto e três quartos do vão, percebe-se bem esta transição.

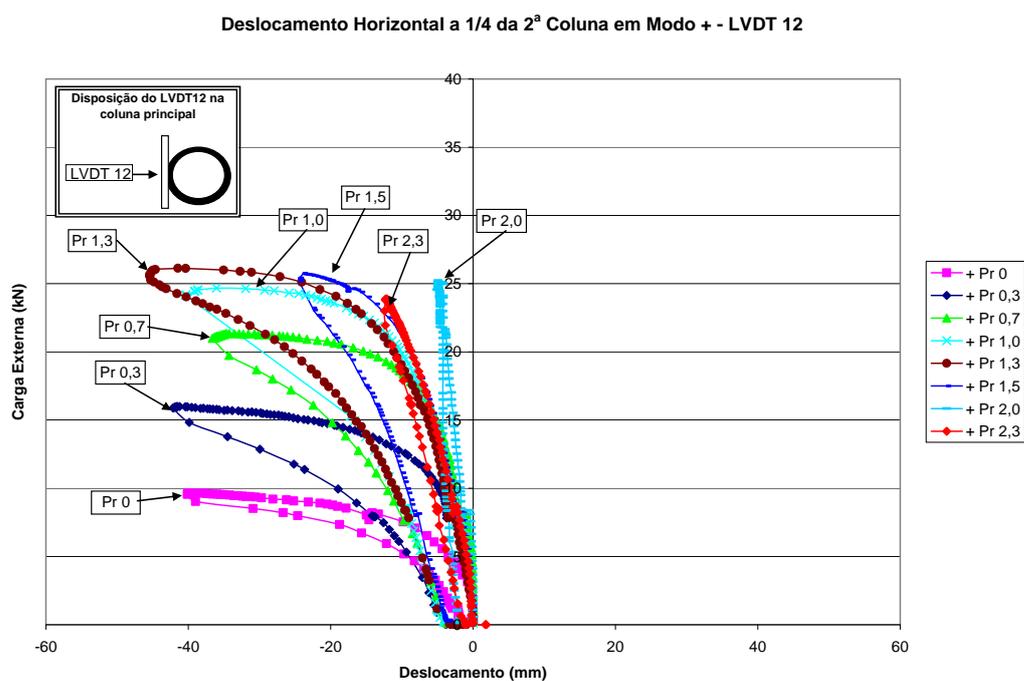


Figura 4.70 Gráfico do deslocamento horizontal para o LVDT 12 em “modo +”

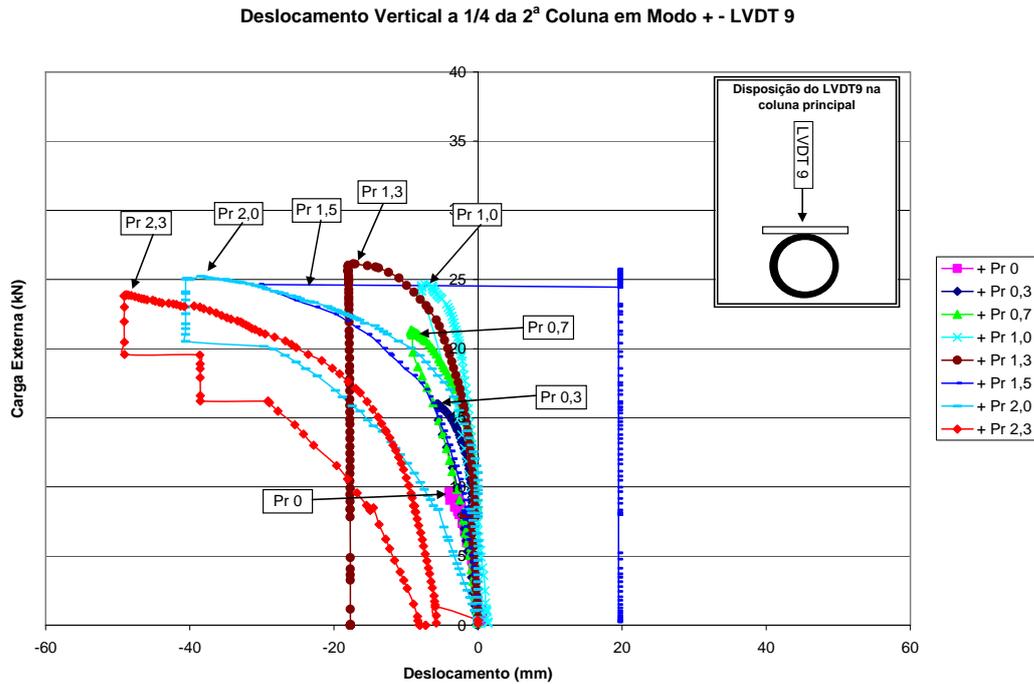


Figura 4.71 Gráfico do deslocamento vertical para o LVDT 9 em “modo +”

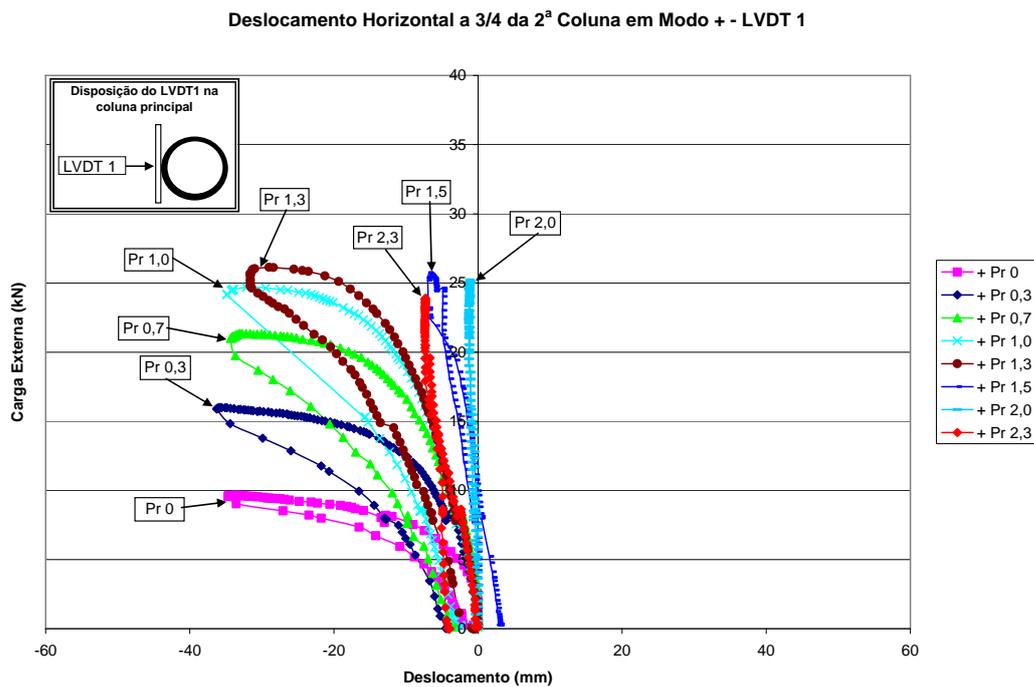


Figura 4.72 Gráfico do deslocamento horizontal para o LVDT 1 em “modo +”

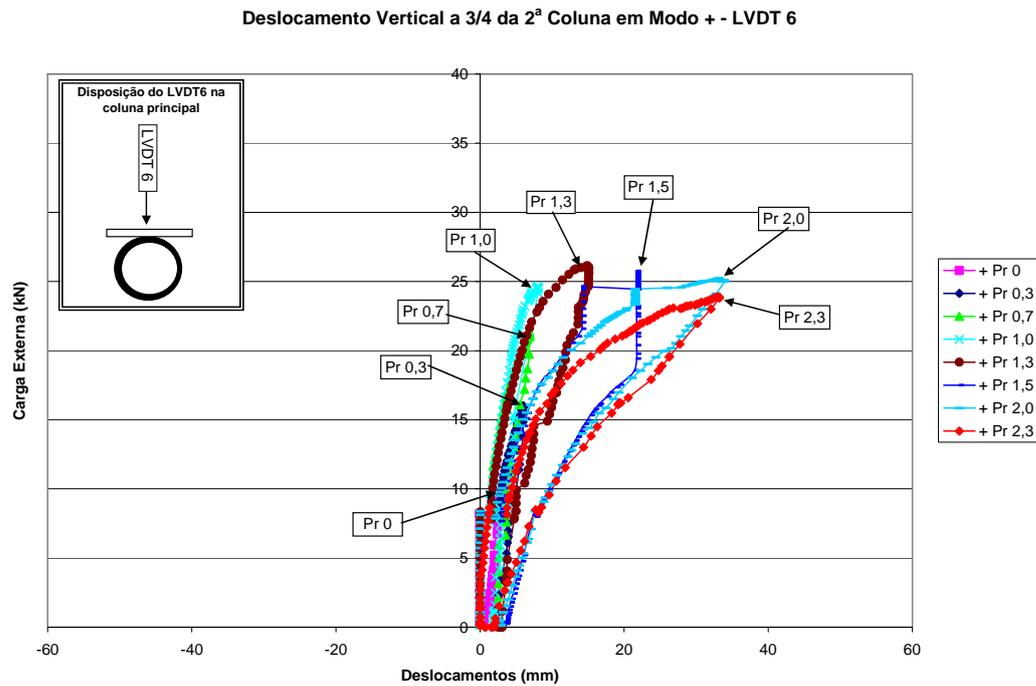


Figura 4.73 Gráfico do deslocamento vertical para o LVDT 6 em “modo +”



Figura 4.74 Ensaio apresentando o segundo modo de flambagem



Figura 4.75 Visão oposta do ensaio apresentando o segundo modo de flambagem



Figura 4.76 Ensaio apresentando o primeiro modo de flambagem

Os deslocamentos axiais, em alguns níveis de protensão, não apresentaram a curva característica que se esperava próximo a carga de flambagem da estrutura com um patamar bem definido. Todavia foi necessário ampliar o gráfico das Figura 4.77, Figura 4.78 e Figura 4.79 para se ter uma melhor visualização dos resultados. O gráfico da Figura 4.77 apresenta o deslocamento aferido pelo décimo primeiro LVDT, onde nos ensaios com nível de protensão de 1 kN e de 1,3 kN estes deslocamentos foram abruptos tornando os resultados duvidosos. O encurtamento da coluna foi calculado diminuindo o deslocamento medido pelo décimo primeiro LVDT pelo décimo terceiro LVDT. Já o alongamento do curso do macaco hidráulico foi medido somando-se os resultados do décimo como o décimo primeiro LVDT. Visualmente é fácil verificar o encurtamento da coluna para o nível de protensão de 1,5 kN que é da ordem de seis milímetros.

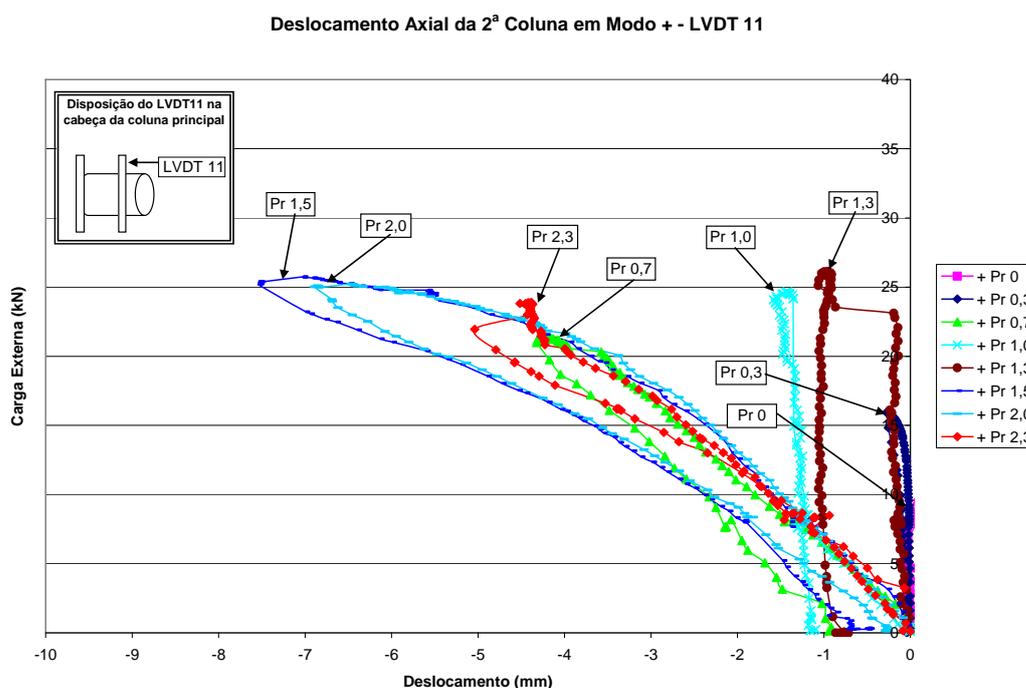


Figura 4.77 Gráfico do deslocamento axial medido pelo LVDT 11 em “modo +”

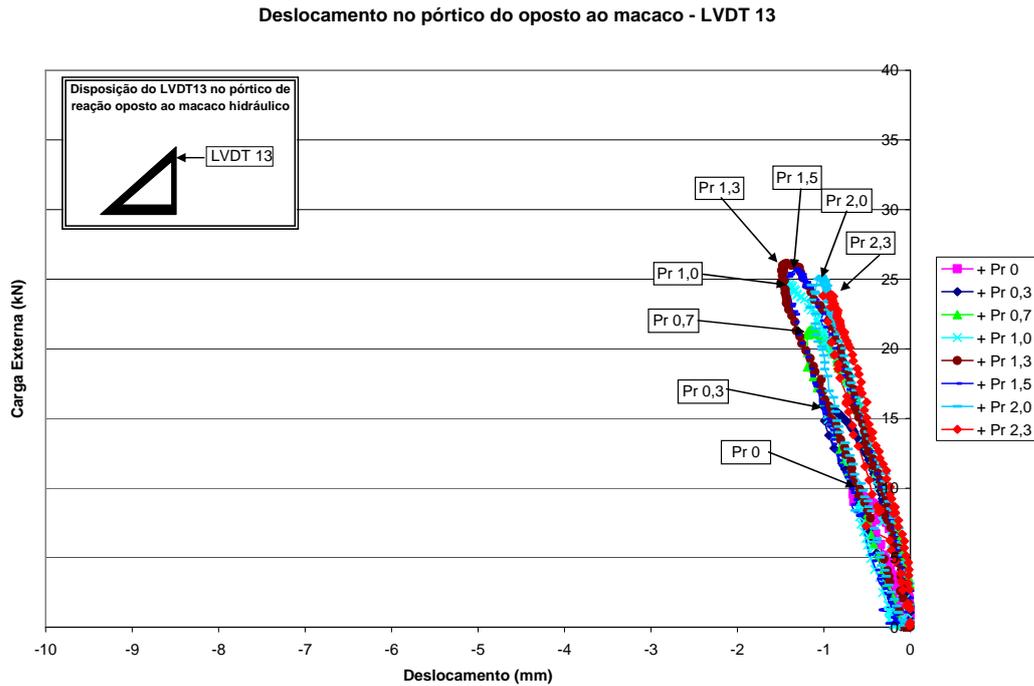


Figura 4.78 Gráfico do deslocamento axial no pórtico de reação oposto ao macaco hidráulico para o LVDT 13 em “modo +”

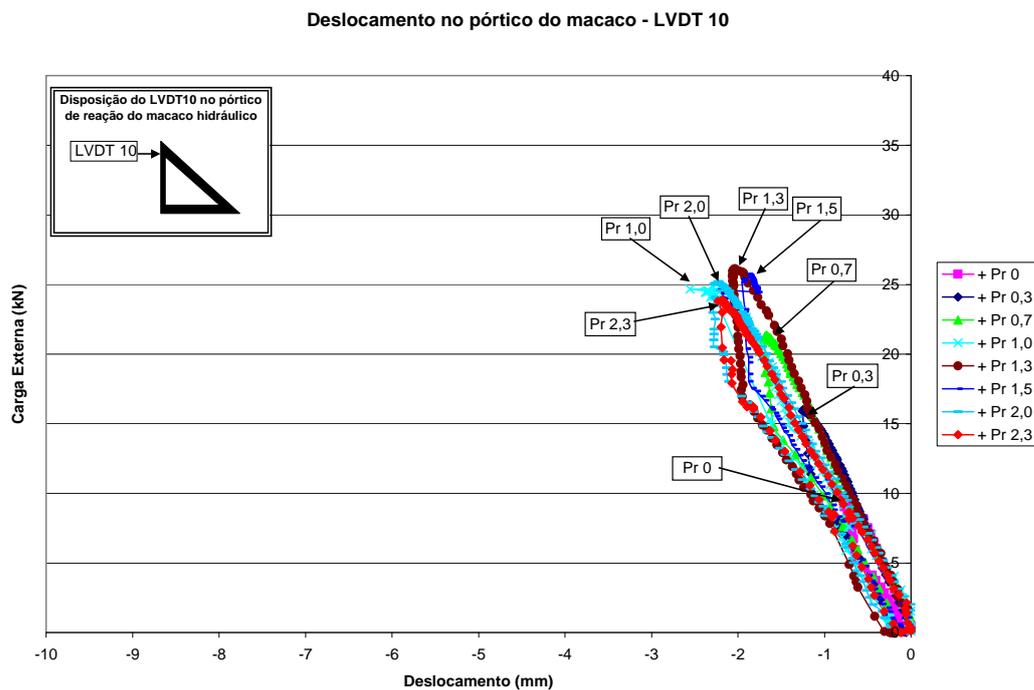


Figura 4.79 Gráfico do deslocamento axial no pórtico de reação do macaco hidráulico para o LVDT 10 em “modo +”

Do mesmo modo que nos ensaios anteriores, a relação entre carga aplicada e carga interna no tubo central na Figura 4.80 é praticamente linear e não gerando distinção entre os níveis de protensão.

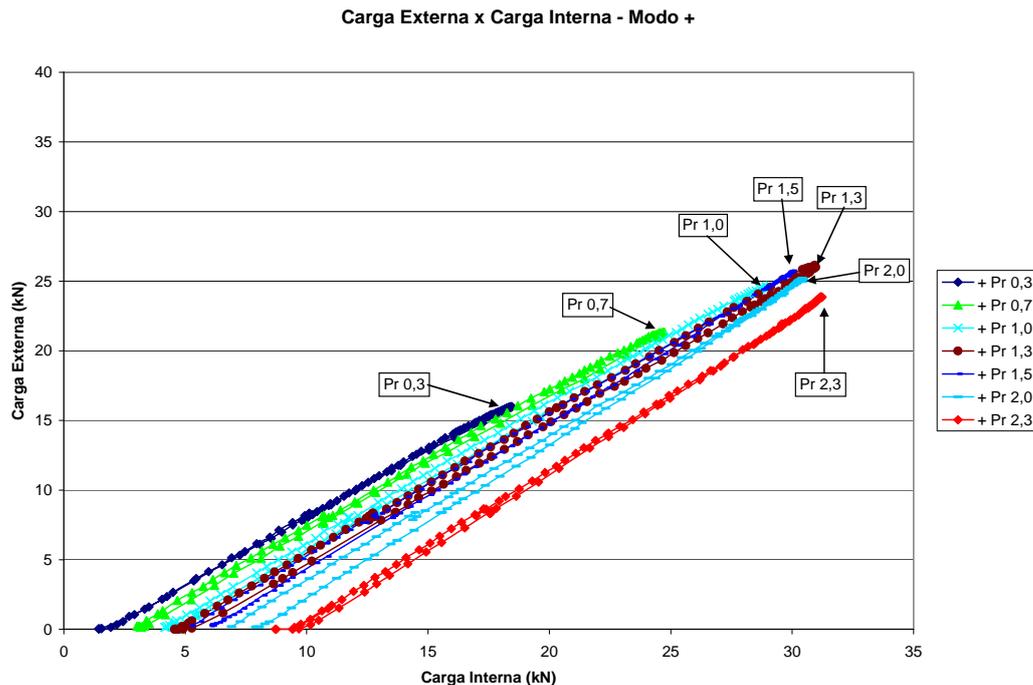


Figura 4.80 Carga externa versus carga interna (carga aplicada + carga dos quatro estais) na coluna principal em “modo +”.

Assim como na primeira coluna, somente um dos estais trabalhava na restrição durante a aplicação da carga externa. Porém, para alguns níveis de protensão os estais 2 e 3 trabalharam perdendo ou ganhando tensão. Isto ocorreu devido a coluna deformar conforme o segundo modo de flambagem de uma coluna, fazendo com que os estais 1 e 4 tivessem perdas de tensão somente devido ao encurtamento da coluna. O gráfico da Figura 4.81 mostra como o estai 2 ganha protensão durante a aplicação da carga em alguns níveis de protensão. Os gráficos referentes aos outros estais encontram-se no Anexo B. Assim como nos ensaios anteriores, não foi simples aplicar a protensão na coluna para os níveis de protensão elevados porque gerava uma deformação inicial da coluna principal, tornando o equilíbrio de carga nos estais uma tarefa muito difícil de ser realizada.

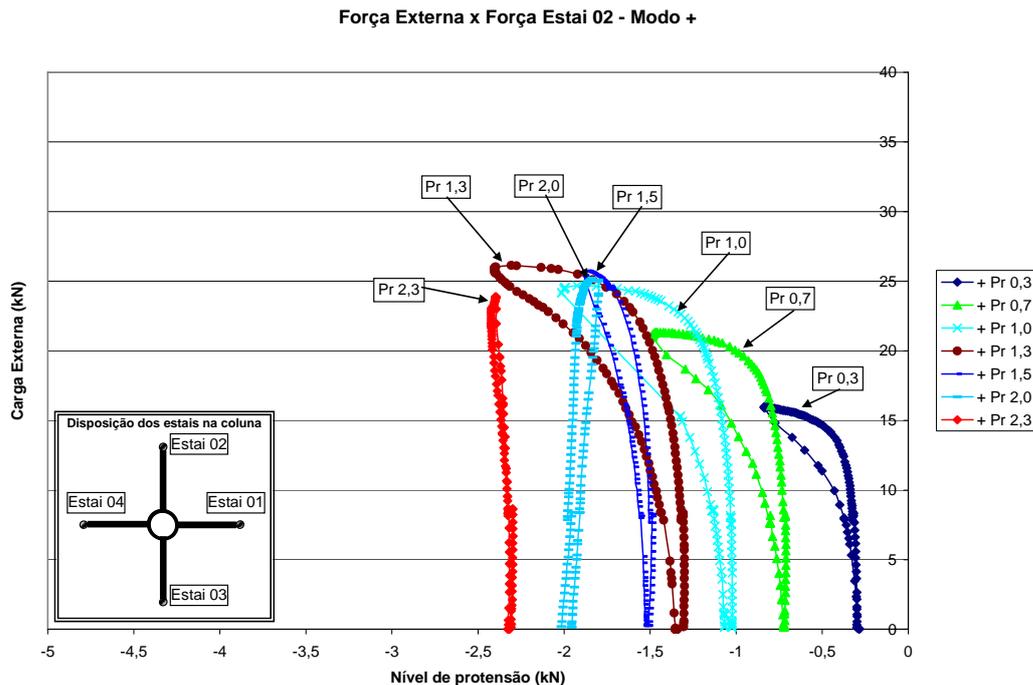


Figura 4.81 Comportamento do estai 2 durante a aplicação da carga externa na estrutura em “modo +”.

Os esforços nos estais foram obtidos através de células de carga elaboradas especialmente para tal medição.

Os gráficos a seguir são dos extensômetros instalados na coluna principal. O limite da deformação devido ao escoamento da seção de aço da coluna é de $1809 \mu\epsilon$ aproximadamente, sendo que nenhum dos extensômetros atingiu este limite neste ensaio. Os gráficos dos extensômetros ERE17, ERE18, ERE19 e ERE20 dispostos na coluna principal estão representados pelas Figura 4.38, Figura 4.39, Figura 4.40 e Figura 4.41 respectivamente. O outro conjunto de extensômetros: ERE21, ERE22, ERE23 e ERE24; estão no Anexo B por terem deformações similares não ultrapassando o limite de escoamento. Pode-se observar, assim como no “modo x” um comportamento praticamente linear inicialmente tornando-se não-linear próximo a carga de flambagem da coluna em todos os gráficos. Pela diferença de inclinação da curva para o mesmo nível de protensão foi possível observar que ocorreu uma flexo-compressão na estrutura e uma tendência da coluna para uma deformação conforme o segundo modo de flambagem. Isto pode ser melhor observado nos gráficos referentes aos extensômetros que foram instalados na lateral do tubo da coluna principal: os extensômetros ERE17 (Figura 4.38) e ERE19 (Figura 4.40).

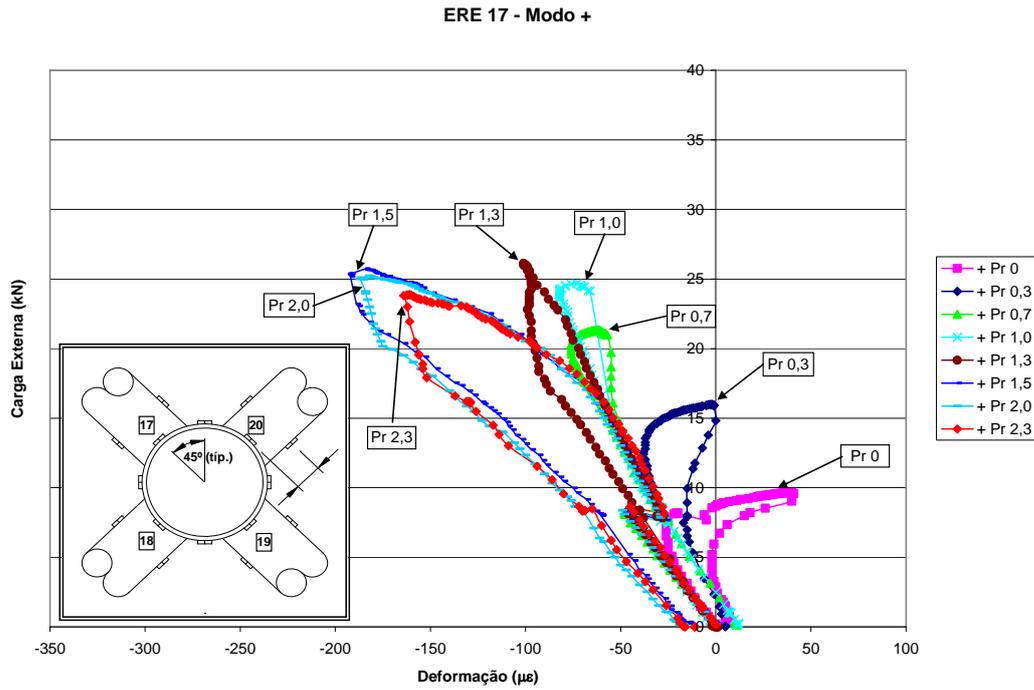


Figura 4.82 Gráfico referente ao extensômetro 17 em “modo +”.

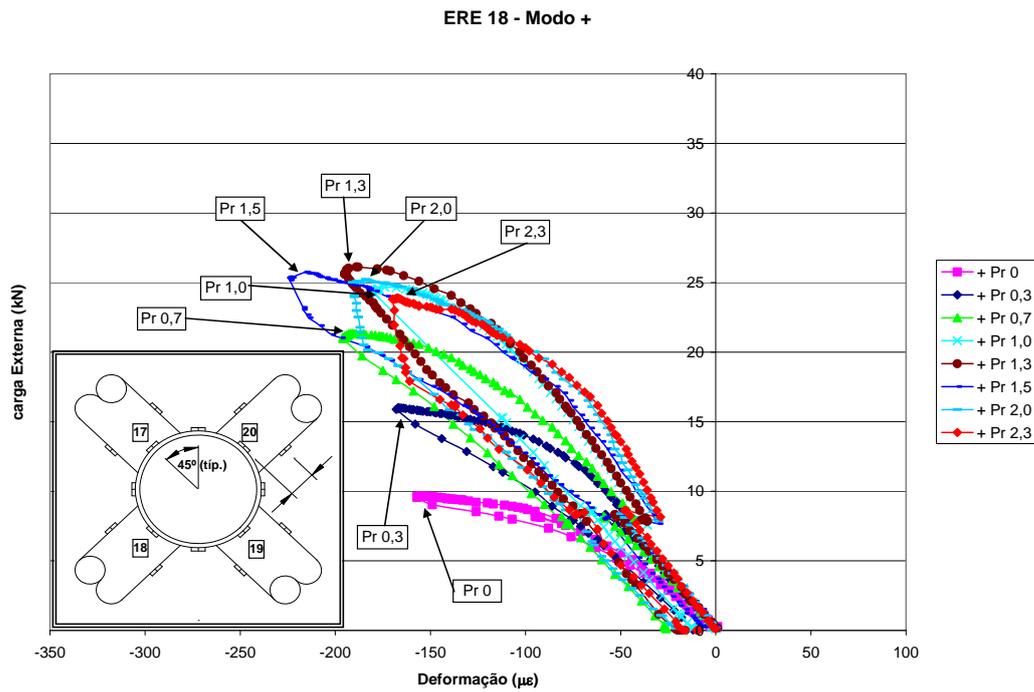


Figura 4.83 Gráfico referente ao extensômetro 18 em “modo +”.

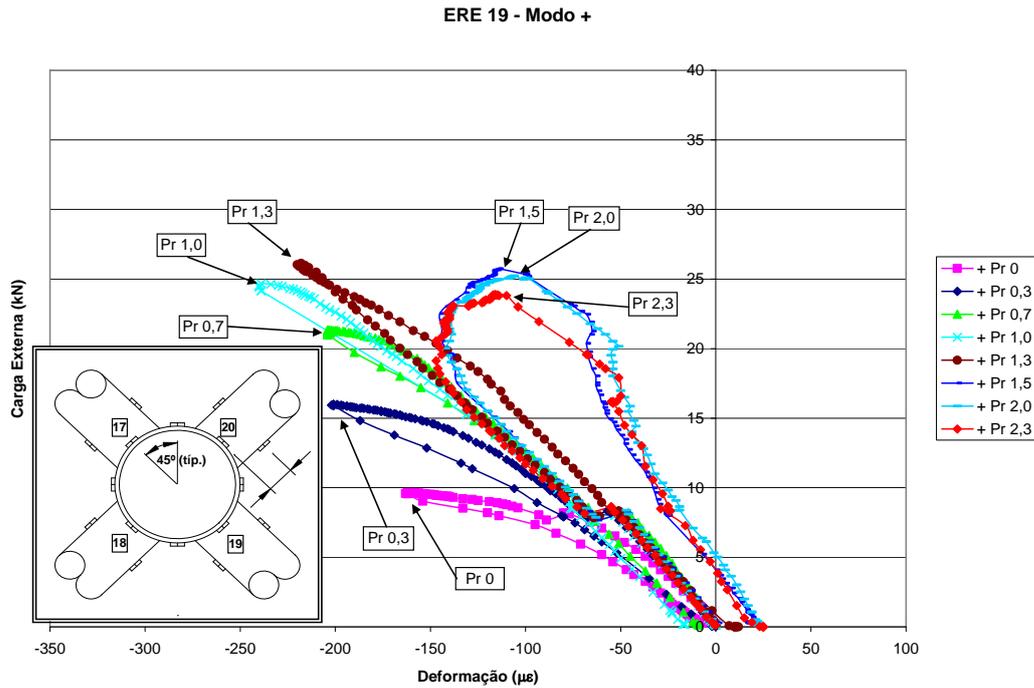


Figura 4.84 Gráfico referente ao extensômetro 19 em “modo +”.

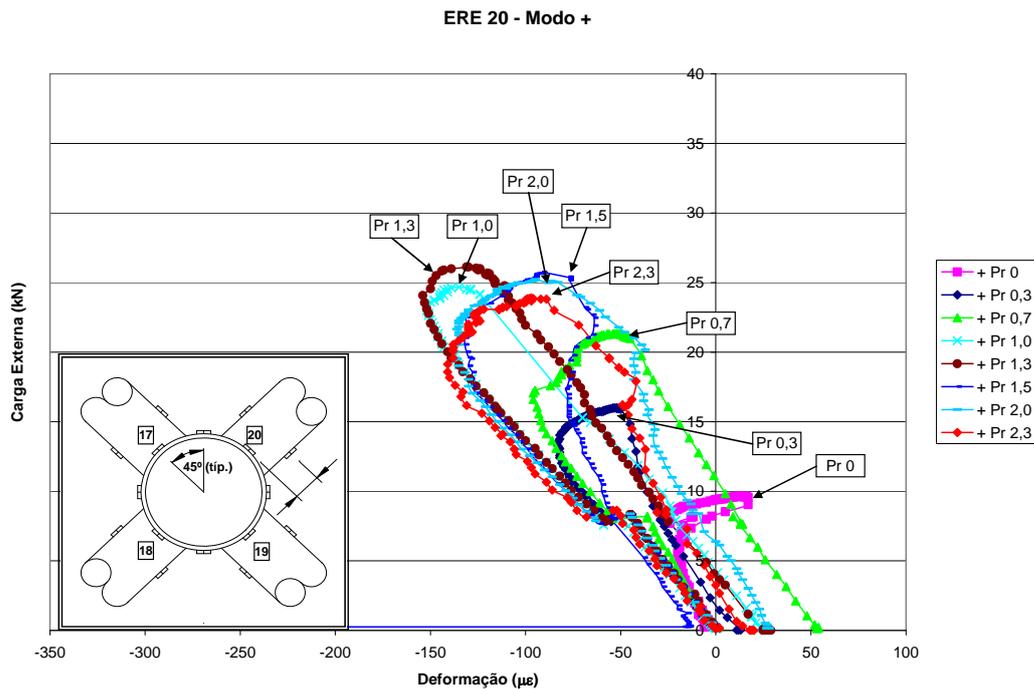


Figura 4.85 Gráfico referente ao extensômetro 20 em “modo +”.

Do mesmo modo que o ensaio em “modo x” os gráficos dos extensômetros instalados nos braços serão mostrados aos pares e somente do braço mais carregado. Neste ensaio os estais mais carregados foram o 2 e o 3 devido a maioria das deformações terem ocorrido através do segundo modo de

flambagem, onde obteve um resultado mais evidenciado no estai 2. Os extensômetros dos outros braços estão no Anexo B. Os extensômetros 37 e 39 praticamente não tiveram deformação considerável. Os extensômetros 38 (Figura 4.88) e 40 (Figura 4.89) apresentam deformação típica de flexão somente quando o nível de protensão inicial nos estais foram elevados. Esta flexão ocorreu no mesmo sentido dos estais, paralela a coluna principal, apesar dos valores medidos serem pequenos em relação ao da coluna principal.

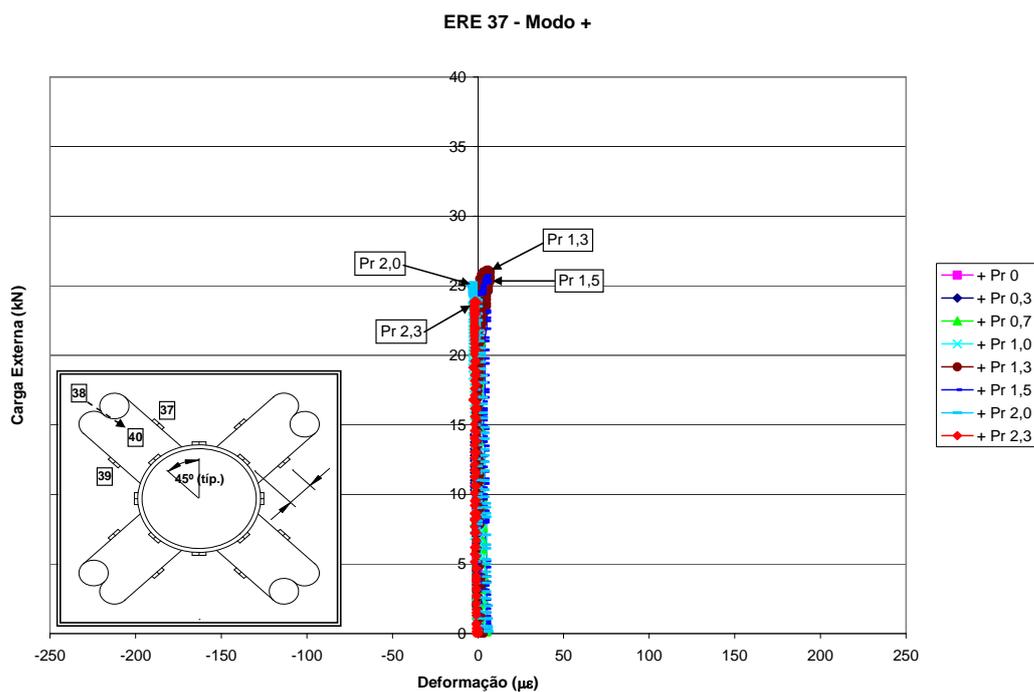


Figura 4.86 Gráfico referente ao extensômetro 37 em “modo +”.

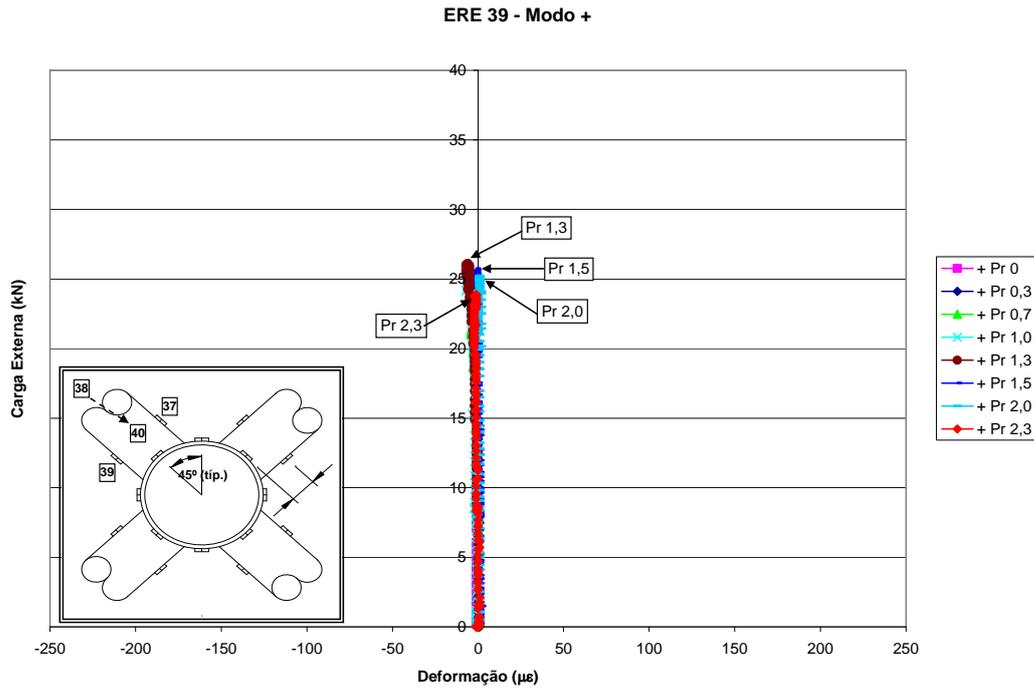


Figura 4.87 Gráfico referente ao extensômetro 39 em “modo +”.

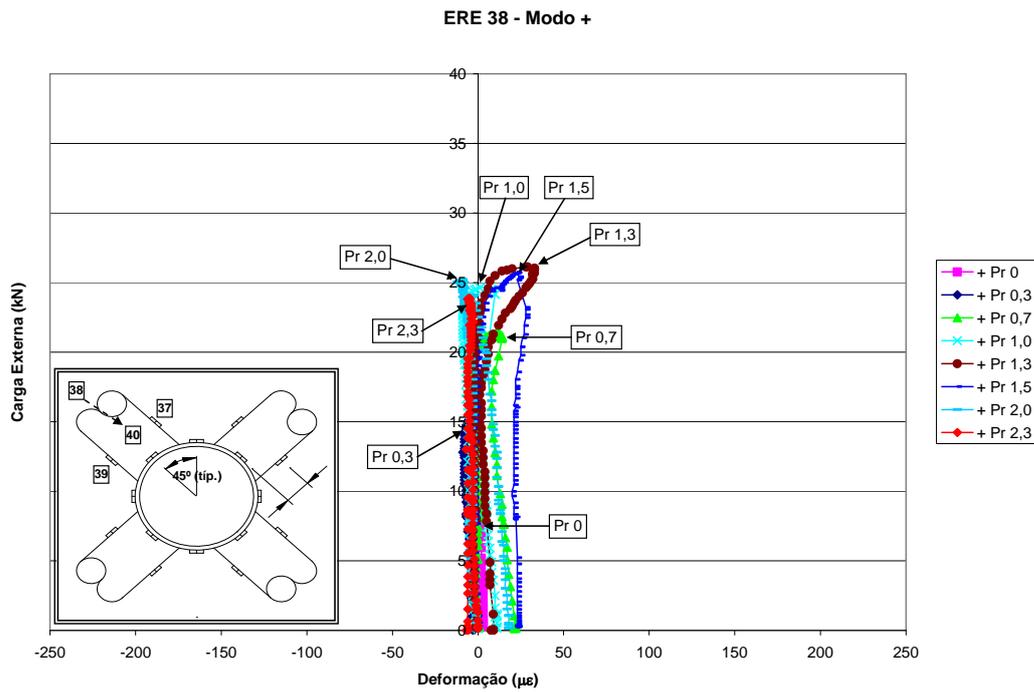


Figura 4.88 Gráfico referente ao extensômetro 38 em “modo +”.

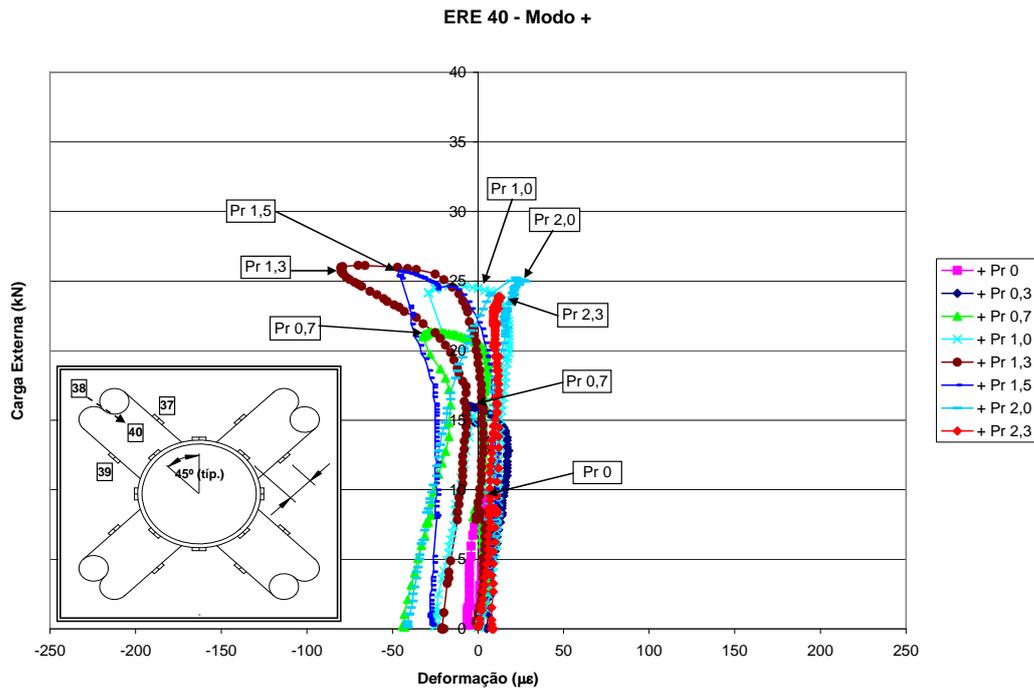


Figura 4.89 Gráfico referente ao extensômetro 40 em “modo +”.

4.3 Terceira coluna de aço estaiada

Com o intuito de verificar a influência da rigidez dos estais, nesta terceira coluna substituiu-se os cabos por vergalhões de aço, com 6,3 mm de diâmetro, como já foi comentado no capítulo anterior. Foram realizados vinte e oito níveis de protensão aplicados na coluna, sendo treze níveis de protensão com a coluna em “modo x” [29] e quinze níveis de protensão com a coluna em “modo +”. O valor máximo obtido durante o ensaio no “modo x” foi de 33,50 kN, de resistência última à compressão na coluna para o nível de protensão em cada estai de 2,28 kN. Já no ensaio em “modo +” foi de 34,04 kN de resistência última com nível de protensão em cada estai de 0,76 kN. Sendo que a média dos resultados gira em torno dos 32 kN a partir do nível de protensão inicial nos estais de 0,7 kN. Assim como nas outras duas colunas estaiadas já estudadas os níveis de protensão inicial nos estais acima de 1,0 kN infligia na coluna uma imperfeição inicial que aumentava de acordo com o aumento da protensão, dificultando a aplicação igual da protensão nos estais e gerando um desbalanceamento dos esforços. Para esta terceira coluna conseguiu-se obter três vezes mais que a carga de Euler para a coluna sem estaiamento.

A Tabela 4.3 apresenta todos os resultados obtidos para os “modo x” e “modo +” respectivamente com o nível de protensão aplicado em cada estai. Apresenta-se também o gráfico com as curvas relacionada à Tabela 4.3.

Terceira Coluna de Aço Estaiada					
Modo x		Modo +		Modelo Ansys	
Protensão	Resistência	Protensão	Resistência	Protensão	Resistência
0,00	11,43	0,00	9,90	0,00	42,60
0,30	20,94	0,00	15,97	0,06	42,74
0,77	30,96	0,50	32,14	0,56	43,91
1,01	31,75	0,51	30,92	1,12	45,44
1,03	31,66	0,76	34,04	1,69	47,32
1,33	31,54	1,04	33,03	2,25	48,22
1,51	28,33	1,24	31,47	2,81	50,56
1,70	31,84	1,50	32,40	3,37	48,57
2,03	33,32	1,74	33,03		
2,28	33,50	1,96	33,00		
2,52	32,70	2,15	32,33		
2,75	32,65	2,38	32,87		
3,02	30,62	2,62	31,36		
		2,89	31,54		
		2,90	32,32		

Tabela 4.3 Terceira coluna, resultados experimentais e numéricos em termo de carga última. Valores em kN.

Para esta coluna é fácil observar através do gráfico da Figura 4.90 a um patamar na resistência última da coluna ensaiada, tanto para o modo em “X” quanto para o modo em “+”, a partir da protensão de 0,75 kN, apresentando uma perda de rigidez ínfima com o aumento da protensão. Entre os níveis de protensão de 0,5 kN e 3,0 kN aproximadamente, é difícil garantir que a coluna esteja na Zona 3 do modelo de estudo do Hafez [5], onde após o nível que seria a protensão ótima passa a atuar negativamente na coluna estaiada tornando-a instável e diminuindo o valor da sua carga última por deixar a coluna sensível a aplicações de novos carregamentos externos.

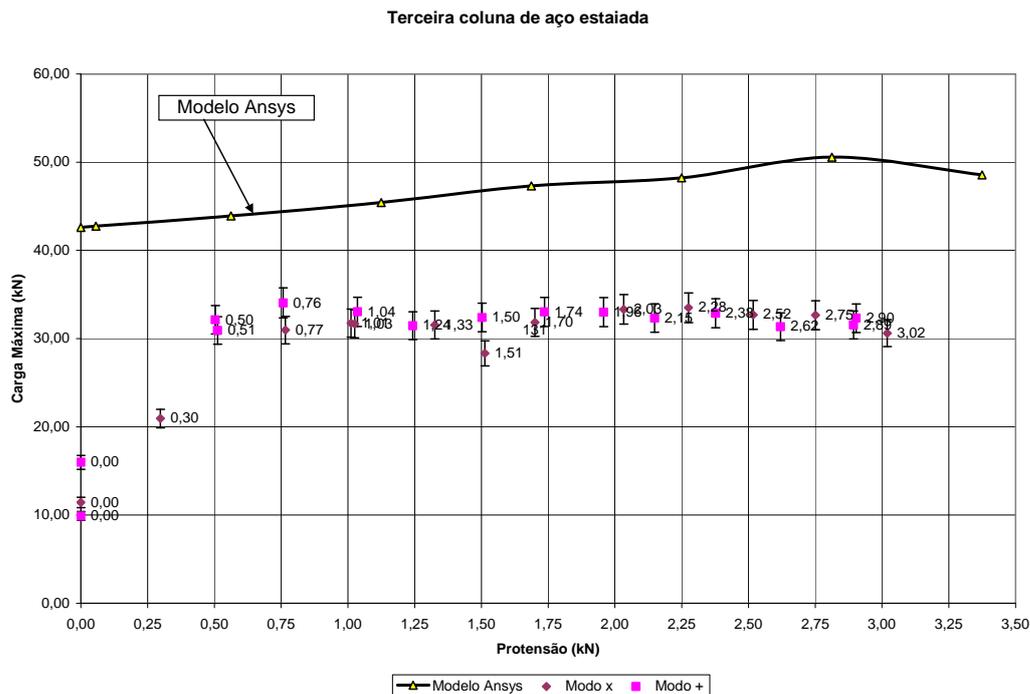


Figura 4.90 Comparações entre o nível de protensão aplicada em cada estai e a resistência da terceira coluna estaiada ensaiada.

Em todos os resultados obtidos nos ensaios, nenhum deles atingiu a curva do modelo numérico realizado no Ansys. Tendo em vista que o modelo numérico utilizado para uma rigidez menor (cabos como estais) apresentou resultados satisfatórios, o mesmo não se pode dizer quando se aumenta a rigidez dos estais. Sendo assim, uma melhora no modelo numérico está previsto para os trabalhos de pesquisa futuros no que tange esta área. Isto pode ter ocorrido, pois no modelo numérico, apenas uma imperfeição de oito milímetros no centro [1] pode não ter sido o ideal, porque, como será apresentado, em níveis de protensão elevado a coluna estaiada apresenta o segundo modo de flambagem.

Uma descrição dos resultados de cada modo de ensaio é apresentada a seguir. Os gráficos mostrarão as curvas para cada instrumento de medição, utilizado durante os ensaios, para todos os níveis de protensão.

4.3.1 Terceira Coluna em “modo x”

Os gráficos das Figura 4.91 e

Figura 4.92 representam o terceiro e segundo LVDT respectivamente, instalado o mais próximo do centro da coluna principal medindo o deslocamento

horizontal. Assim como nos ensaios anteriores, estes LVDTs foram instalados em paralelo com o objetivo de medir qualquer torção ocorrida durante os ensaios.

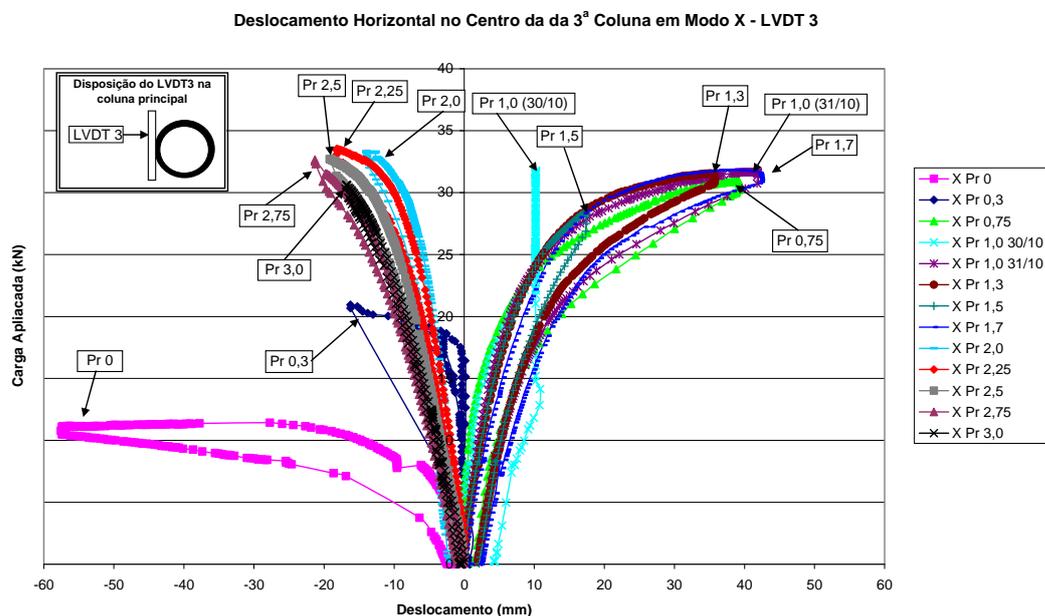


Figura 4.91 Gráfico do deslocamento horizontal para o LVDT 3 para a terceira coluna em modo X.

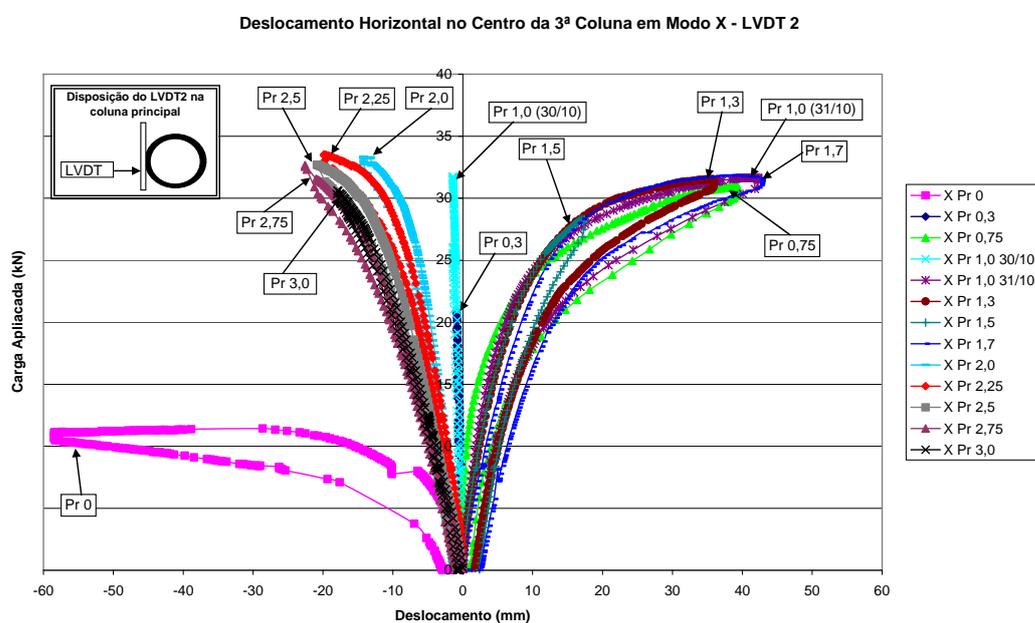


Figura 4.92 Gráfico do deslocamento horizontal para o LVDT 2 para a terceira coluna em modo X.

Como nos outros ensaios, o limite utilizado para determinar quando o ensaio era interrompido, foi o patamar de deslocamento gerado quando não se conseguiu aumentar a carga aplicada e a coluna tinha seu deslocamento central elevado. Em alguns níveis de protensão, os deslocamentos eram maiores no primeiro e terceiro quarto da coluna apresentando o segundo modo de flambagem. Percebe-se que nestes ensaios a coluna praticamente volta ao seu ponto inicial comprovando a sua flambagem elástica. Com isto não foi necessário ir aquém deste limite por motivo de segurança local das pessoas envolvidas nos ensaios. Ao se comparar os dois gráficos verifica-se que não ocorreu torção em todos os níveis de protensão ensaiadas.

Os LVDTs centrais quarto e quinto apresentaram deslocamentos verticais pequenos, o que é considerável desprezível e se encontram no Anexo B.

Os deslocamentos a um quarto e a três quartos da coluna, nos níveis de protensão mais elevados, tiveram deslocamentos maiores que o vão central, apresentando uma transição do primeiro para o segundo modo de flambagem, como poderá ser observado nos gráficos que mostram os deslocamentos horizontais e verticais (Figura 4.93, Figura 4.94, Figura 4.95 e Figura 4.96) nestas seções.

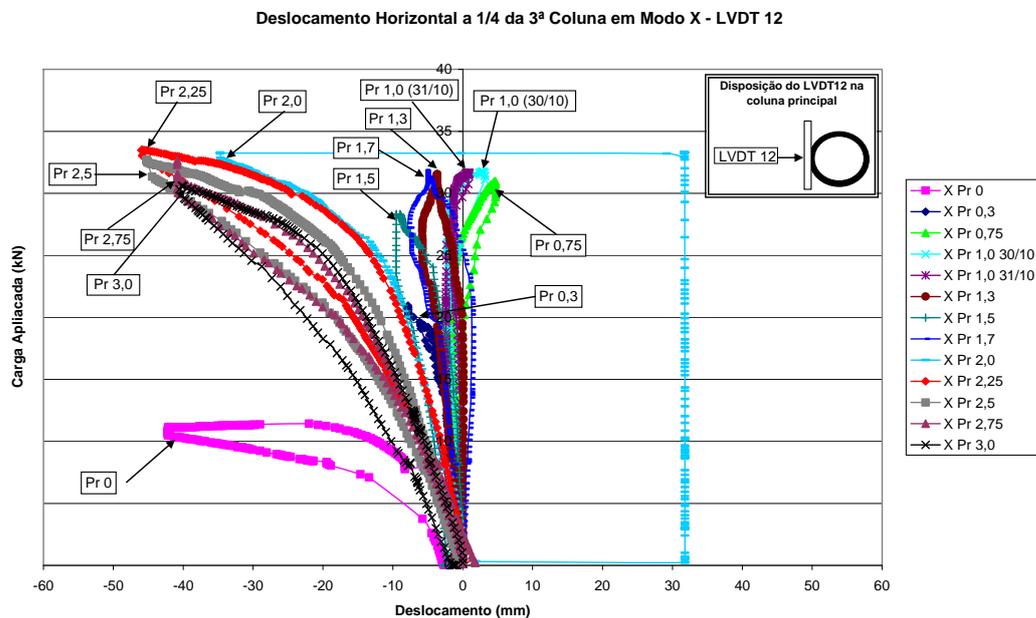


Figura 4.93 Gráfico do deslocamento horizontal para o LVDT 12 para a terceira coluna em modo X.

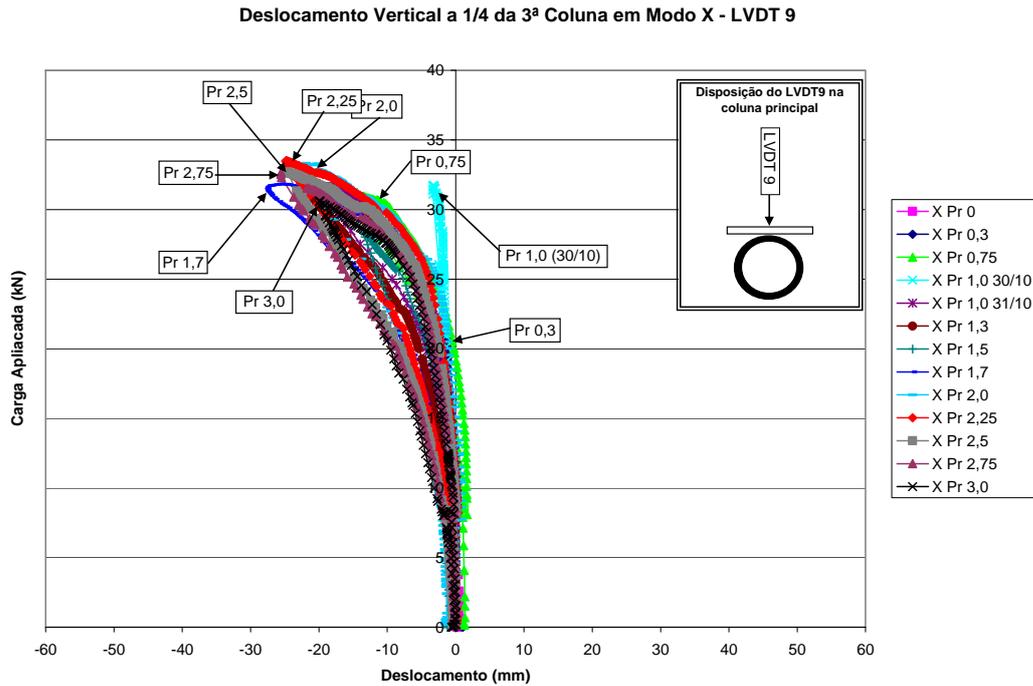


Figura 4.94 Gráfico do deslocamento vertical para o LVDT 9 para a terceira coluna em modo X.

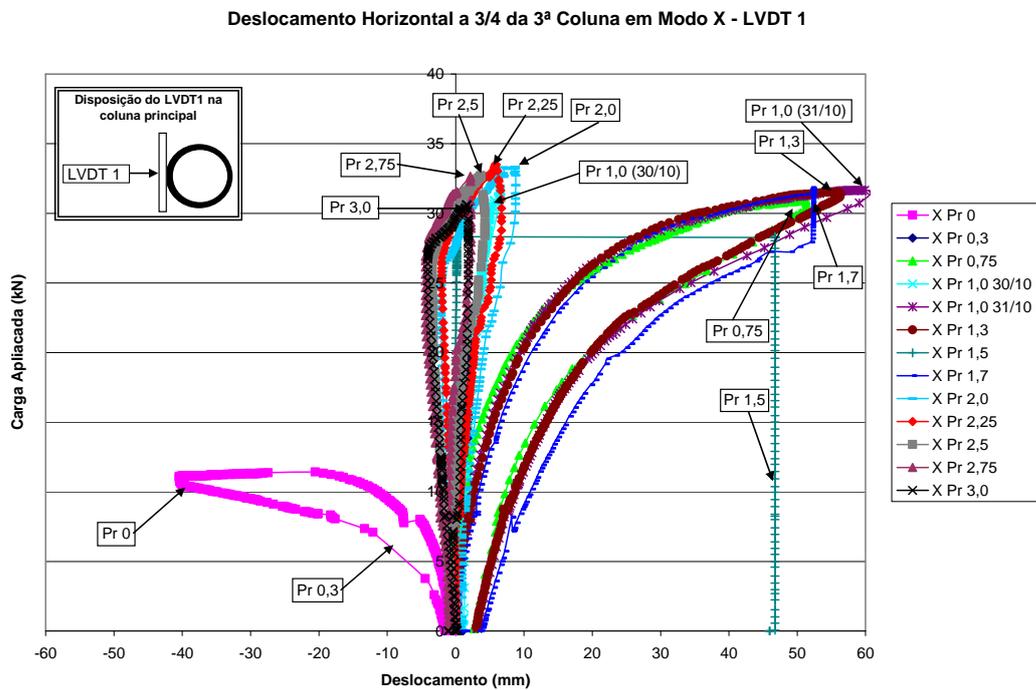


Figura 4.95 Gráfico do deslocamento horizontal para o LVDT 1 para a terceira coluna em modo X.

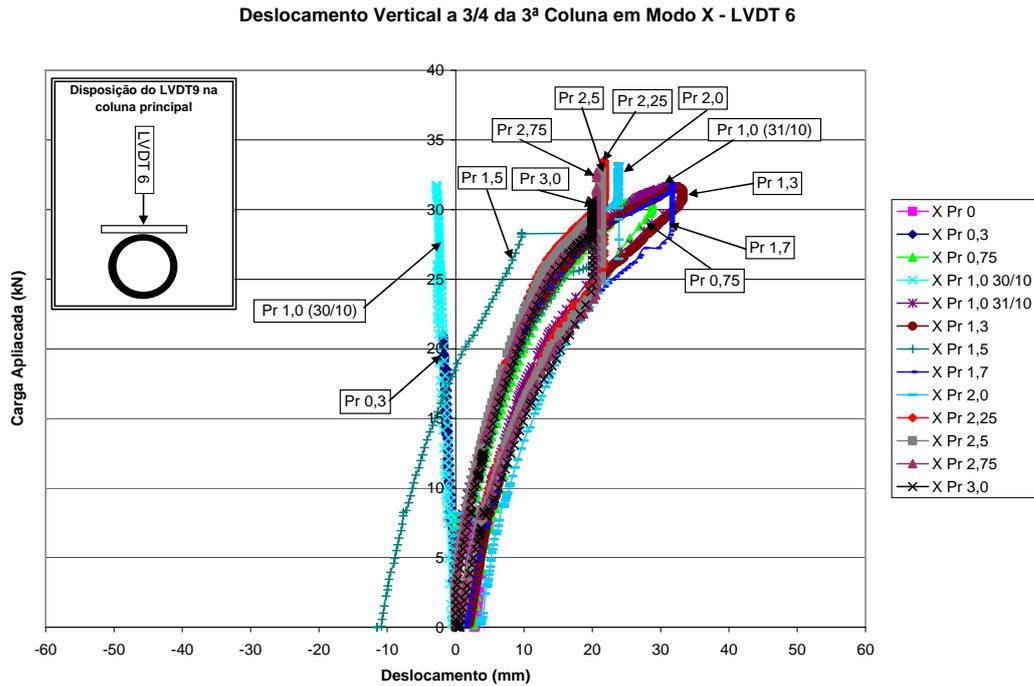


Figura 4.96 Gráfico do deslocamento vertical para o LVDT 6 para a terceira coluna em modo X.

Na Figura 4.97 observa-se como a coluna estaiada se comportou durante um dos ensaios apresentando uma configuração próxima do segundo modo de flambagem.

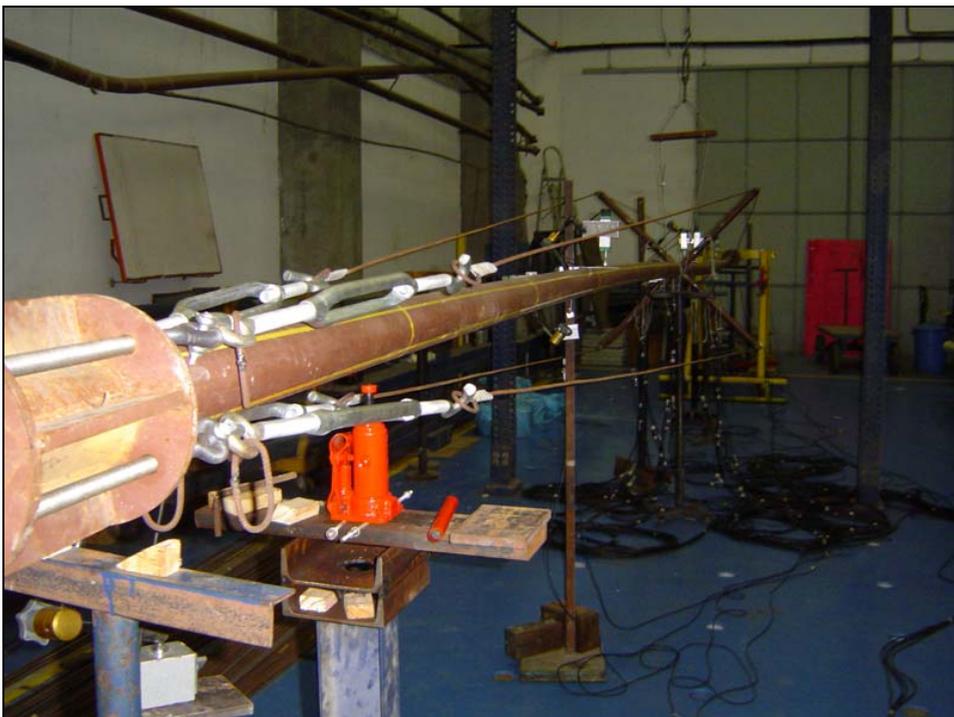


Figura 4.97 Ensaio da a terceira coluna em modo X

Os gráficos a seguir apresentam o deslocamento aferido pelo décimo, décimo primeiro e décimo segundo LVDTs que representam os deslocamentos da coluna principal e dos pórticos de reação respectivamente. Visualmente é fácil verificar o encurtamento da coluna para o nível de protensão de 2,0 kN que é da ordem de sete milímetros.

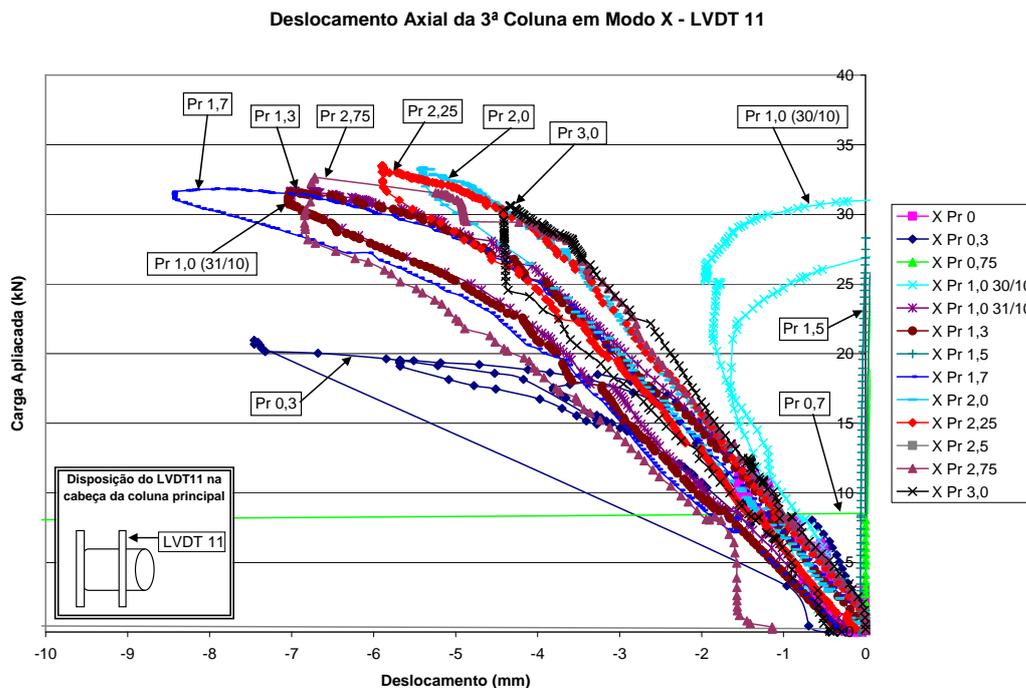


Figura 4.98 Gráfico do deslocamento axial medido pelo LVDT 11 para a terceira coluna em modo X.

Nota-se também que a relação entre carga aplicada e carga interna no tubo central na Figura 4.101 é praticamente linear apresentando um flambagem abrupta e não gerando distinção entre os níveis de protensão. Neste ensaio, devido ao plano principal de flambagem estar na horizontal, somente dois estais trabalhariam na restrição durante a aplicação da carga externa quando a coluna tendia para o primeiro modo de flambagem, porém dependendo do nível de protensão a coluna deformou conforme o segundo modo de flambagem, fazendo com que outro par de estais trabalhasse. O gráfico das Figura 4.102 e Figura 4.103, referentes aos estais 1 e 3 respectivamente, mostram como os estais ganham e perdem protensão durante a aplicação da carga, sendo que em nenhum caso a protensão é totalmente perdida. Os outros dois gráficos referentes aos estais 2 e 4 se encontram no Anexo B.

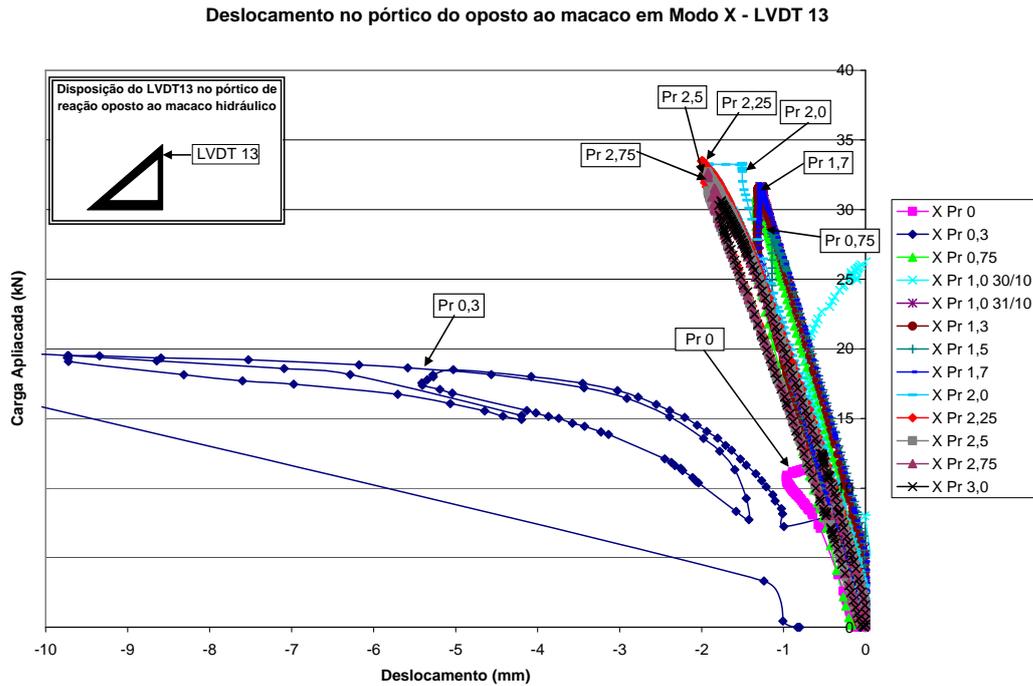


Figura 4.99 Gráfico do deslocamento axial no pórtico de reação oposto ao macaco hidráulico para o LVDT 13 para a terceira coluna em modo X.

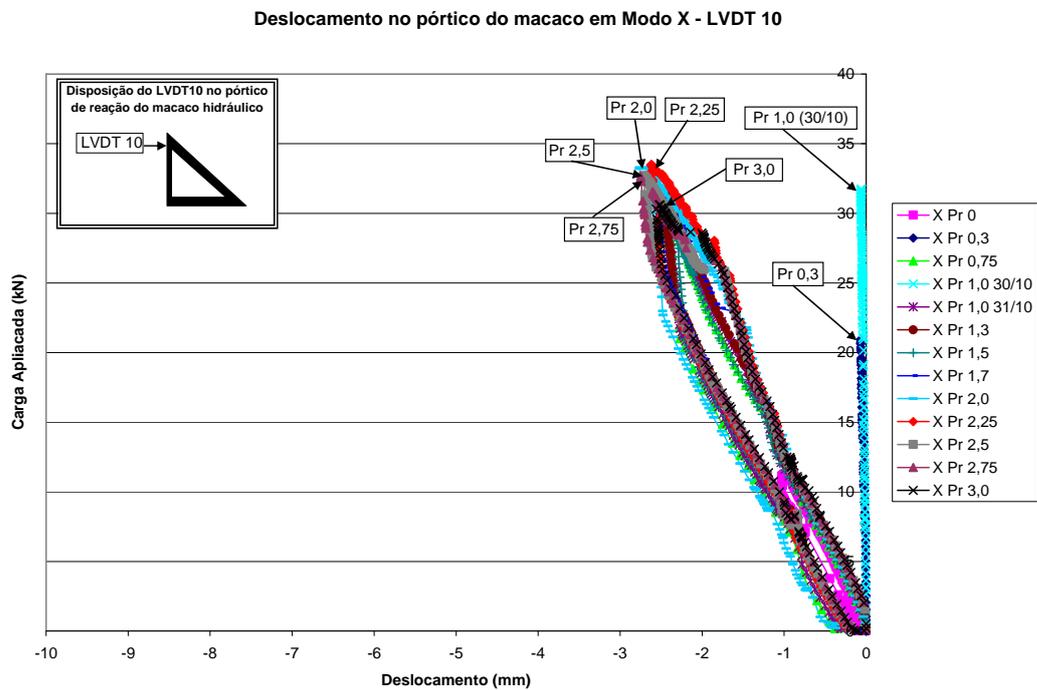


Figura 4.100 Gráfico do deslocamento axial no pórtico de reação do macaco hidráulico para o LVDT 10 para a terceira coluna em modo X.

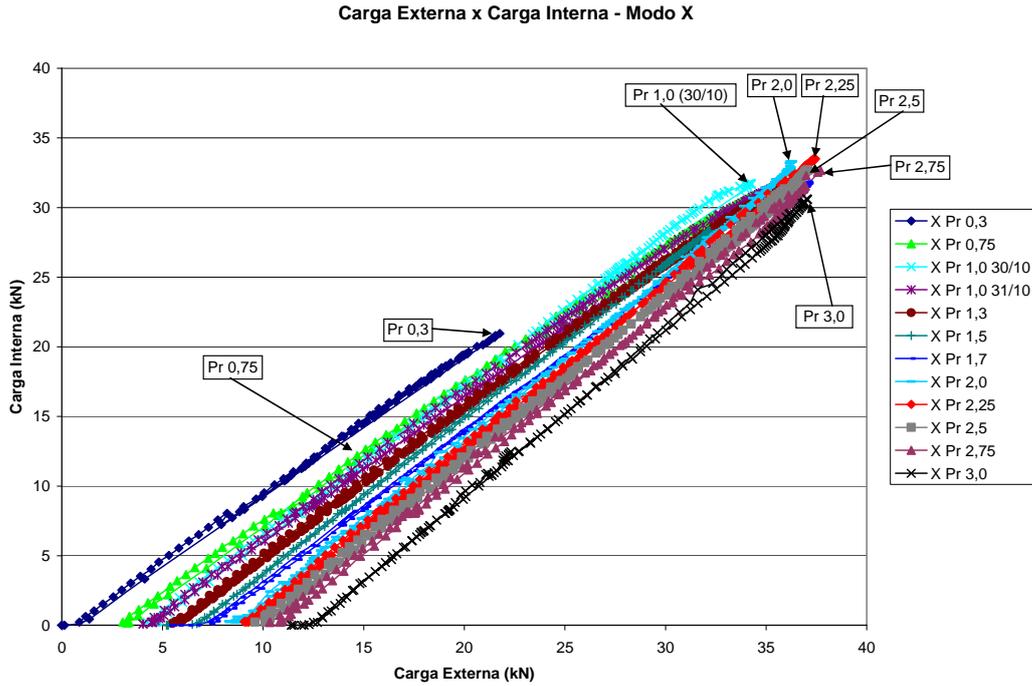


Figura 4.101 Carga externa versus carga interna (carga aplicada + carga dos quatro estais) na coluna principal para a terceira coluna em modo X-

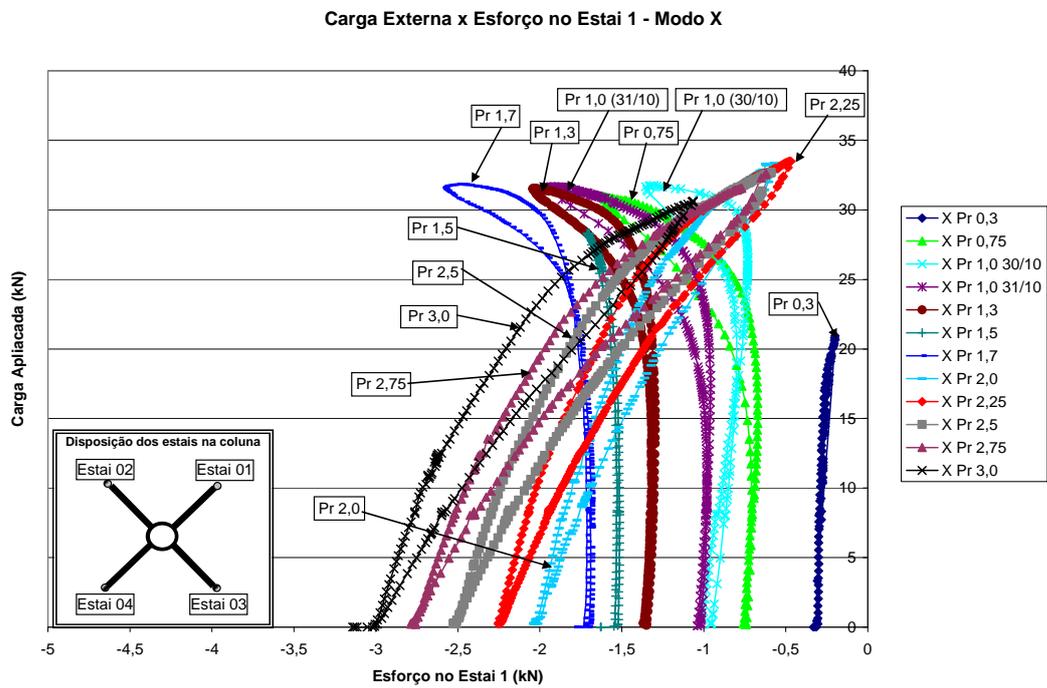


Figura 4.102 Comportamento do estai 1 durante a aplicação da carga externa na estrutura em “modo X”.

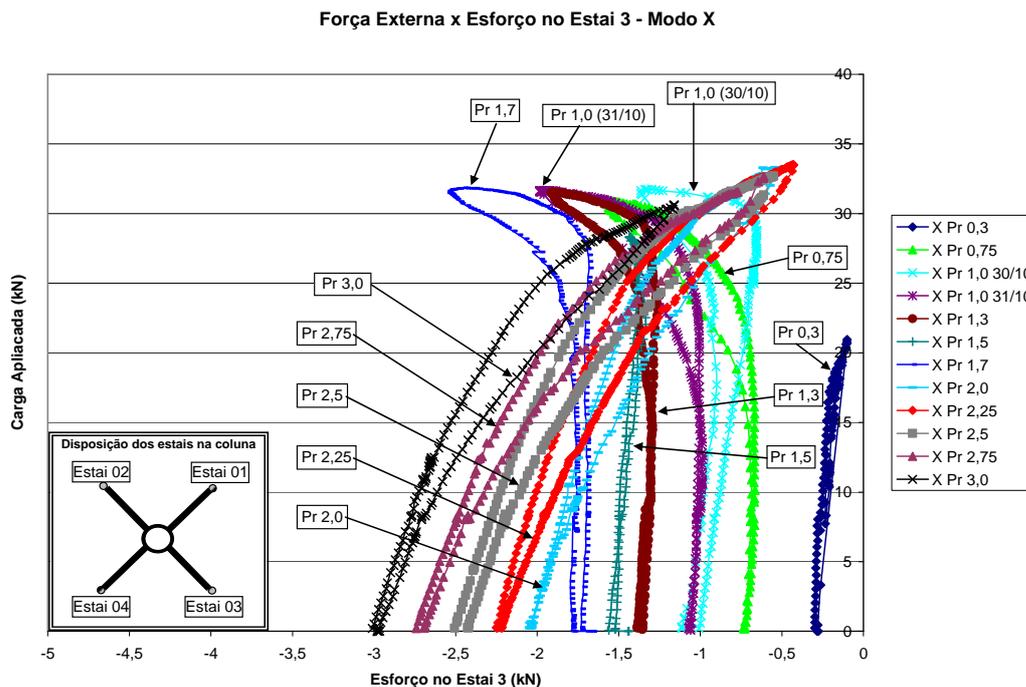


Figura 4.103 Comportamento do estai 3 durante a aplicação da carga externa na estrutura em “modo X”.

Os esforços nos estais foram obtidos através de células de carga elaboradas especialmente para tal medição e que para esta coluna ela deixaram de medir os extensômetros individualmente e passaram a realizar a ponte de whitstone, conforme explicado no capítulo 4.

Os extensômetros instalados tanto na coluna principal como nos braços tem seu limite da deformação devido ao escoamento da seção de aço da coluna da ordem de $1809 \mu\epsilon$ aproximadamente. Nenhum dos extensômetros da terceira coluna atingiram este limite. Os gráficos dos extensômetros referentes aos ERE17, ERE18, ERE19 e ERE20 dispostos na coluna principal paralelos ao eixo dos estais estão representados pelas Figura 4.104, Figura 4.105, Figura 4.106 e Figura 4.107 respectivamente. Os outros extensômetros instalados na coluna principal entre as os braços, referentes aos ERE21, ERE22, ERE23 e ERE24; estão no Anexo B por terem deformações parecidas e também não ultrapassando o limite de escoamento. É possível observar uma mudança no comportamento da coluna, durante o ensaio, em que ela sai do primeiro modo de flambagem para o segundo modo de flambagem através da diferença de inclinação e da mudança de sentido da curva para o mesmo nível de protensão, onde pode ser melhor observado nos gráficos referentes aos extensômetros ERE18 (Figura 4.105) e ERE19 (Figura 4.106).

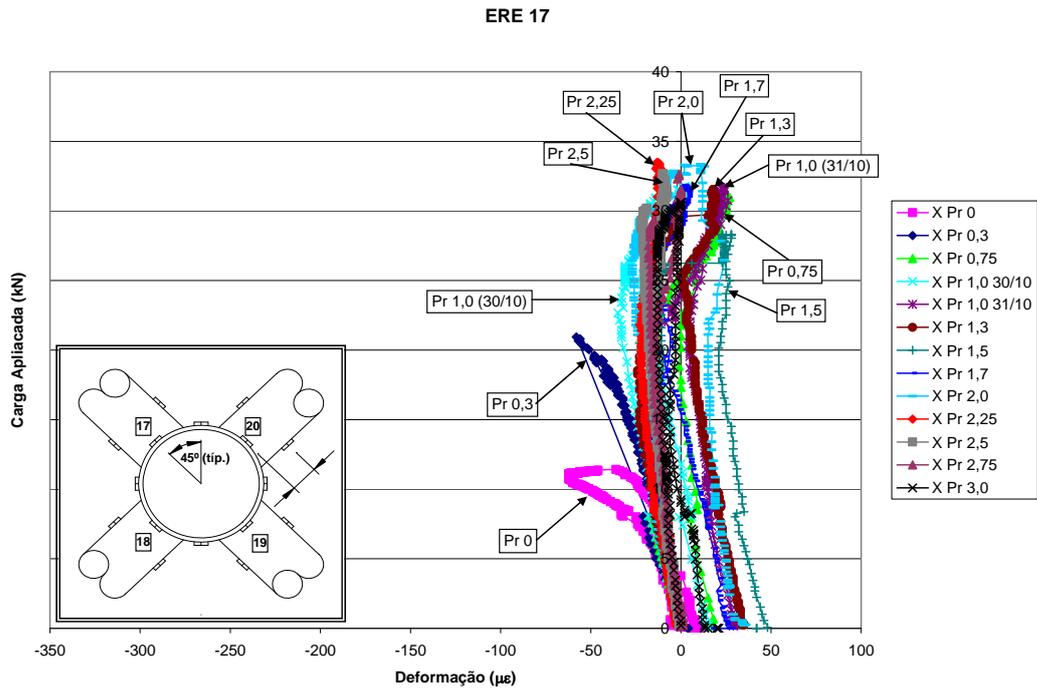


Figura 4.104 Gráfico referente ao extensômetro 17 para terceira coluna em modo X.

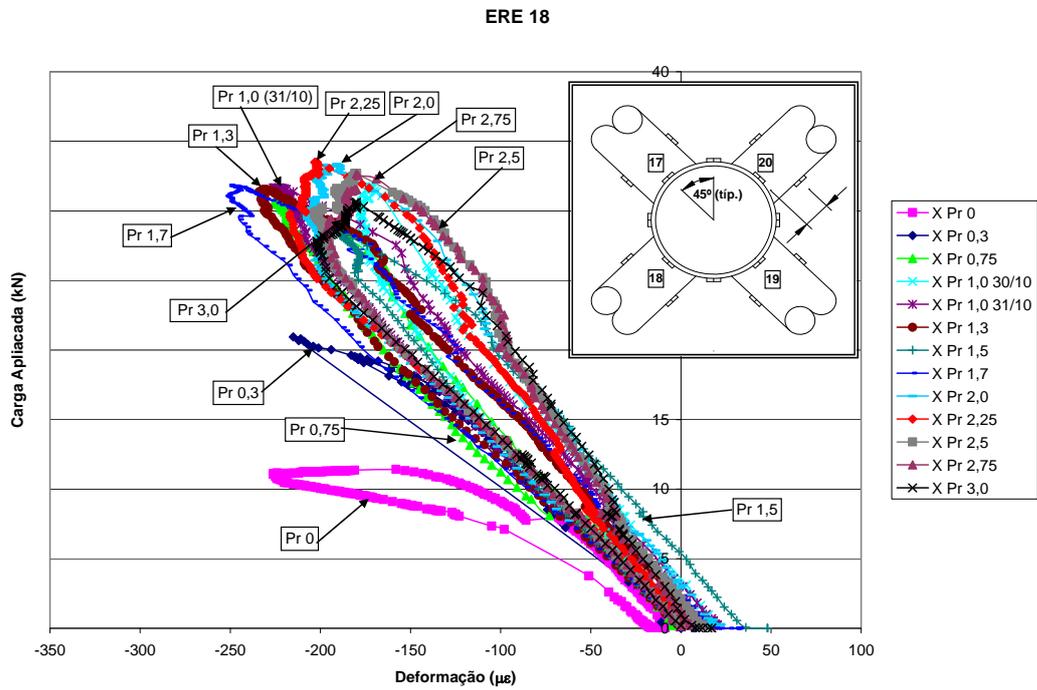


Figura 4.105 Gráfico referente ao extensômetro 18 para terceira coluna em modo X.

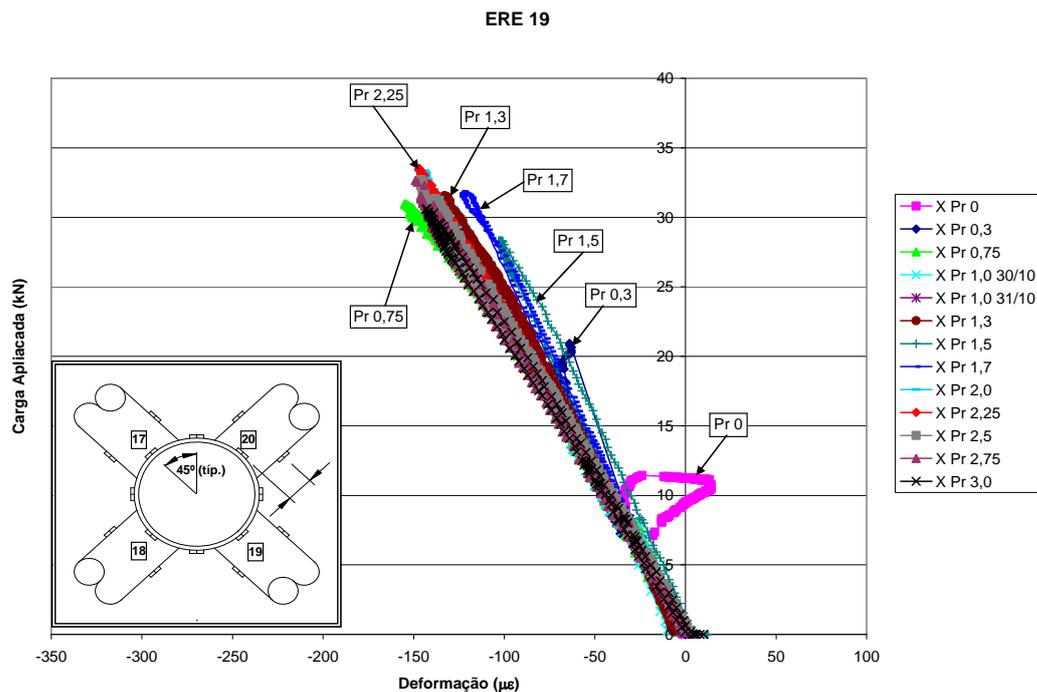


Figura 4.106 Gráfico referente ao extensômetro 19 para terceira coluna em modo X.

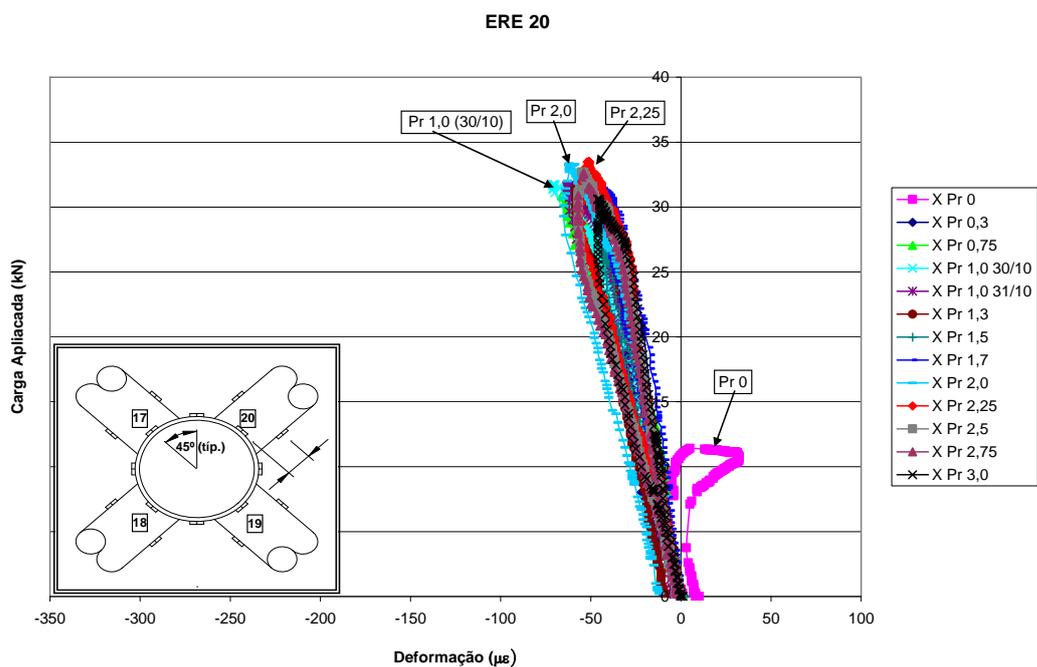


Figura 4.107 Gráfico referente ao extensômetro 20 para terceira coluna em modo X.

Os extensômetros dos braços, na maioria dos casos tiveram pouca deformação ou defeitos durante os ensaios. Sendo assim, somente o braço mais carregado, que foi o braço sobre o estai 2, serão apresentados a seguir os

extensômetros nele instalados. Os extensômetros instalados nos outros braços estão dispostos no Anexo B. Os extensômetros 37 e 39 praticamente não tiveram deformação considerável.

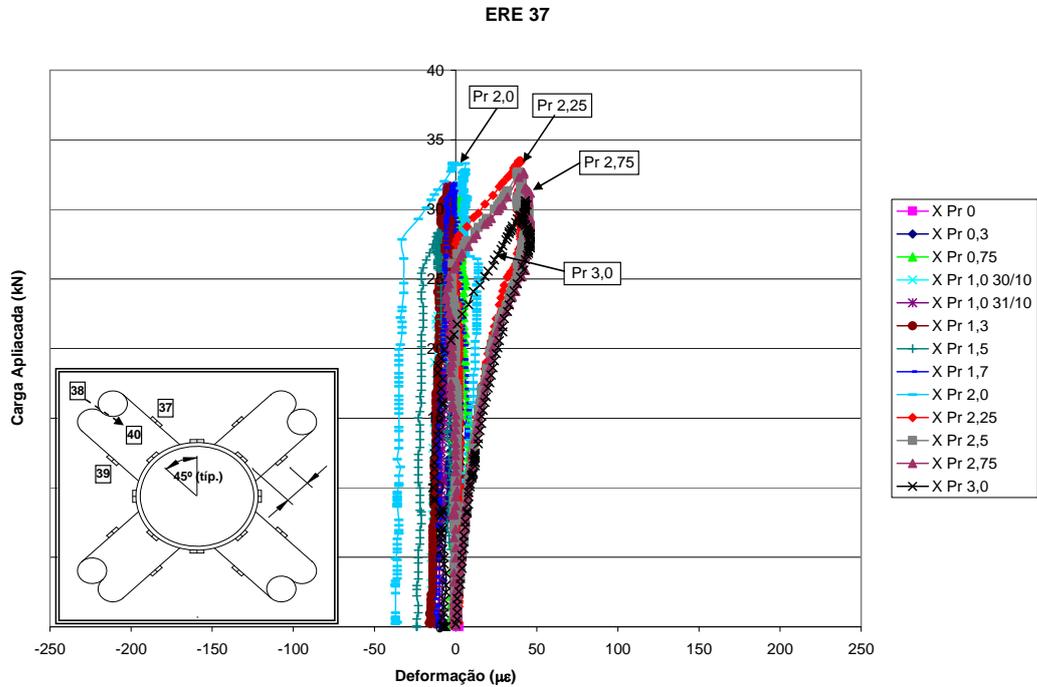


Figura 4.108 Gráfico referente ao extensômetro 37 para terceira coluna em modo X.

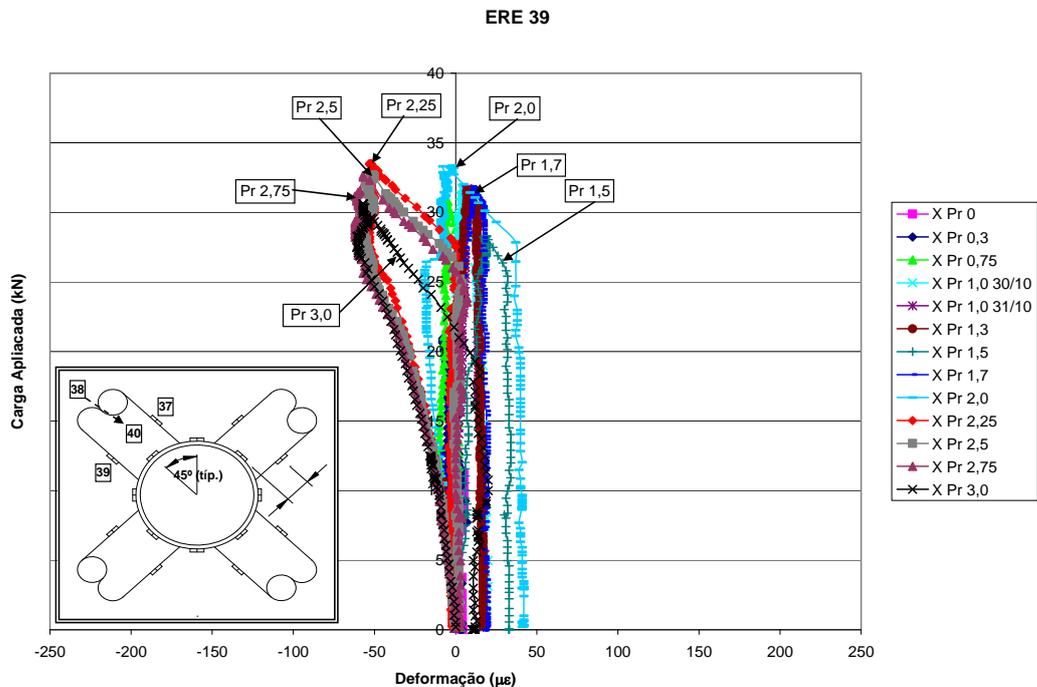


Figura 4.109 Gráfico referente ao extensômetro 39 para terceira coluna em modo X.

Os extensômetros 38 (Figura 4.108) e 40 (Figura 4.109) apresentam deformação típica de flexão. Esta flexão ocorreu no mesmo sentido dos estais, paralela a coluna principal, apesar dos valores medidos serem pequenos em relação ao da coluna principal.

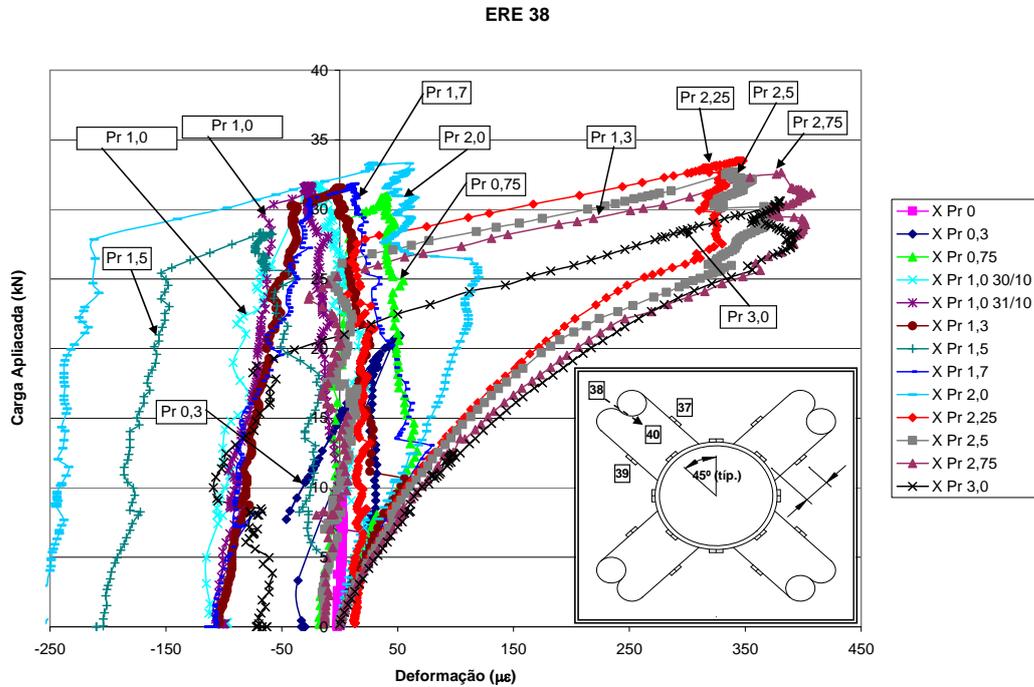


Figura 4.110 Gráfico referente ao extensômetro 38 para terceira coluna em modo X.

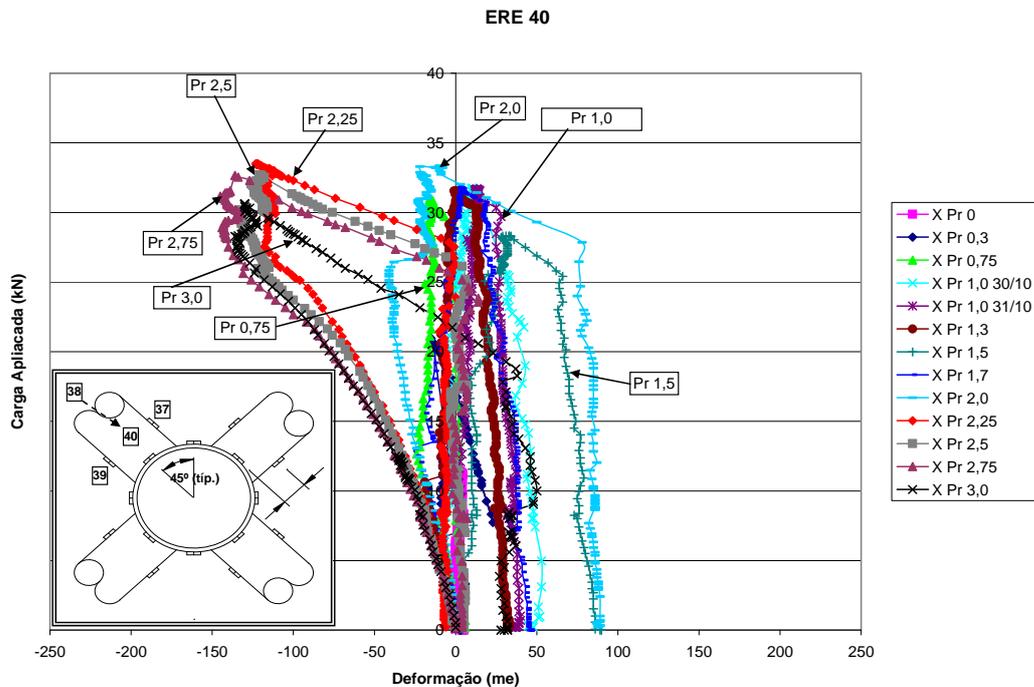


Figura 4.111 Gráfico referente ao extensômetro 40 para terceira coluna em modo X.

4.3.2 Terceira Coluna em “modo +”

Neste ensaio em “modo +” a ser realizado na horizontal, assim como em todos os ensaios anteriores, esperava-se que obtivesse um valor de carga última abaixo do valor obtido em “modo x” porque neste ensaio apenas um dos estais é que teria a função de restringir o deslocamento horizontal em vez de dois estais. Porém a força de restrição gerada pelo estai no centro da coluna é maior, devido ao ângulo de atuação da carga. Sendo que, assim como no ensaio em “modo X” a maioria dos modos de deformação da coluna foram conforme o segundo modo de flambagem. Como esta era a última coluna a ser realizada, repetimos alguns ensaios, com o mesmo nível de protensão inicial nos estais, para que se pudesse comparar os resultados obtidos no dia anterior. Assim, nos níveis de protensão inicial em cada estai de 0,5 kN e de 3,0 kN (o de menor e o de maior nível de protensão) foram repetidos e apresentados em todos os gráficos deste “modo +”. Para o nível de protensão de 3,0 kN foi aplicada a carga externa até atingir o patamar de deformação e retirada a carga. Já para o nível de protensão de 0,5 kN foi aplicada a carga externa, também até atingir o patamar, porém, ao retornar com a carga, não foi retirada totalmente, parando em 8 kN aproximadamente e re-aplicando a carga. Este processo de loop de carregamento foi executado somente uma vez. O que se pode observar foi que a coluna perdeu a restrição que os estais geravam no centro do vão fazendo com que o seu comportamento fosse de uma coluna sem estais e os resultados podem ser verificados nos gráficos a seguir.

Para o estudo da coluna sem estais foram executados dois ensaios. O primeiro obteve um valor de carga última em torno dos 15 kN com deformação abrupta ao se atingir este nível de carga. Resolveu-se girar a coluna em 90° e repetir o ensaio. Neste ensaio o resultado foi próximo do esperado para uma coluna com imperfeição inicial de 8 mm e próximo também da carga de Euler. No primeiro caso o que aconteceu, foi que a coluna estava praticamente reta, sem imperfeições iniciais, e quando chegou próximo ao ponto de bifurcação da instabilidade da estrutura ocorre uma deformação abrupta não gerando o patamar de deformação.

Os gráficos das Figura 4.112 e Figura 4.113 representam o terceiro e segundo LVDT respectivamente, mediram o deslocamento não apresentando qualquer torção ocorrida durante os ensaios.

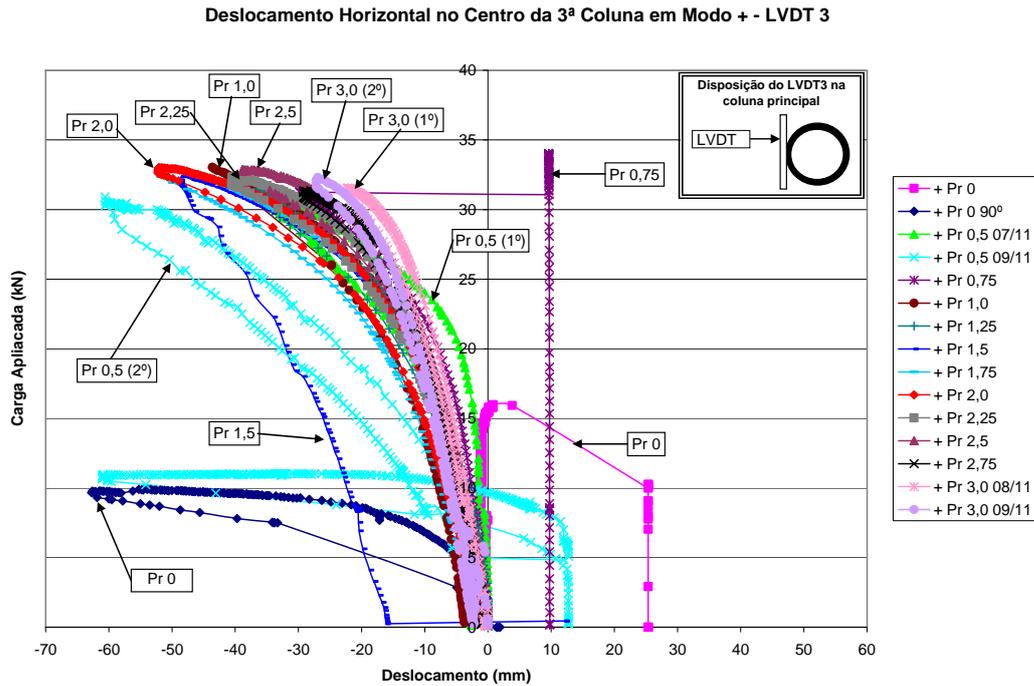


Figura 4.112 Gráfico do deslocamento horizontal para o LVDT 3 para terceira coluna em modo +.

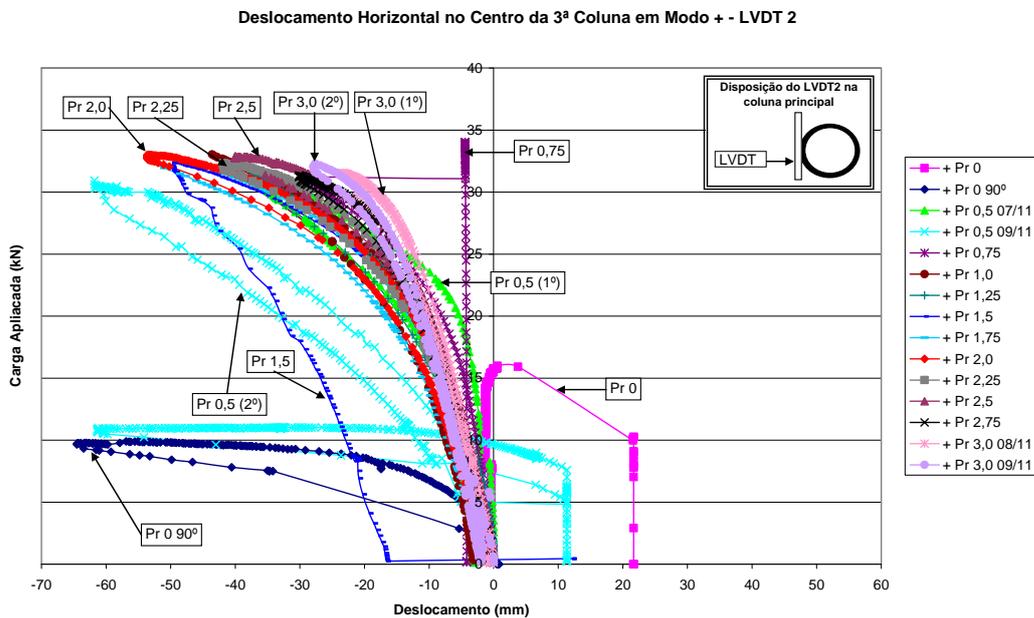


Figura 4.113 Gráfico do deslocamento horizontal para o LVDT 2 para terceira coluna em modo +.

Os LVDTs centrais quarto e quinto apresentaram deslocamentos verticais muito pequeno e se encontram no Anexo B. A partir da protensão de 1,5 kN a

coluna mudou do primeiro para o segundo modo de flambagem. Através dos gráficos a um quarto e três quartos do vão, percebe-se bem esta transição.

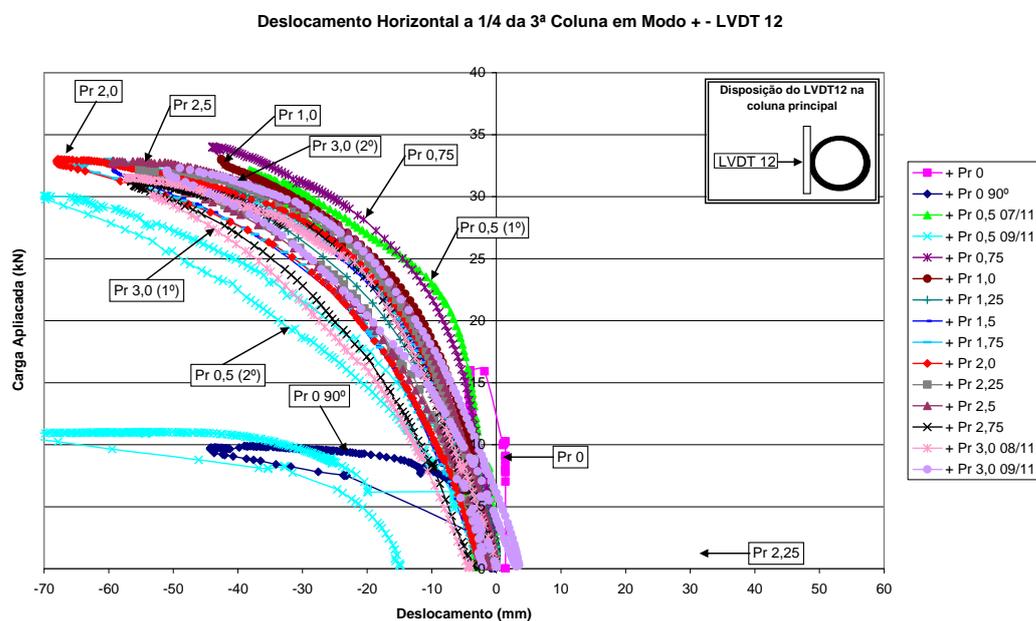


Figura 4.114 Gráfico do deslocamento horizontal para o LVDT 12 para terceira coluna em modo +.

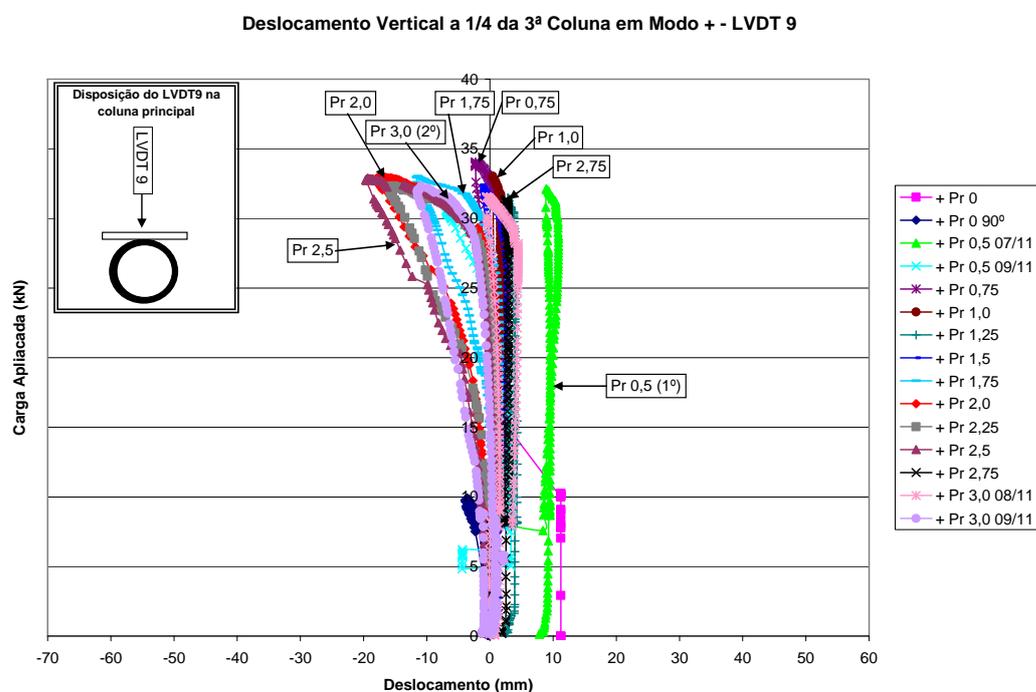


Figura 4.115 Gráfico do deslocamento vertical para o LVDT 9 para terceira coluna em modo +.

Deslocamento Horizontal a 3/4 da 3ª Coluna em Modo + - LVDT 1

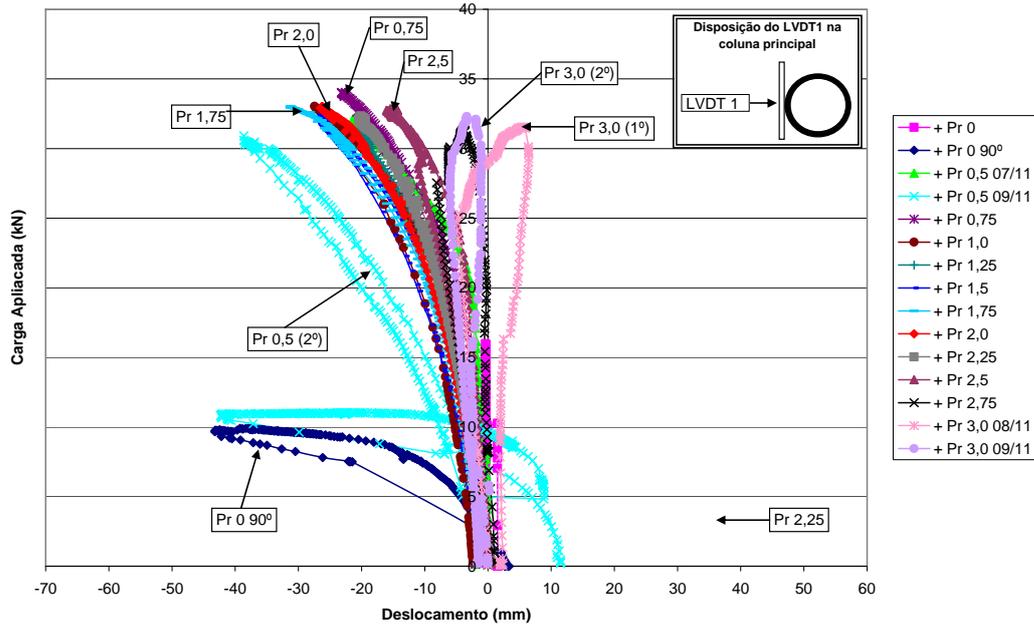


Figura 4.116 Gráfico do deslocamento horizontal para o LVDT 1 para terceira coluna em modo +.

Deslocamento Vertical a 3/4 da 3ª Coluna em Modo + - LVDT 6

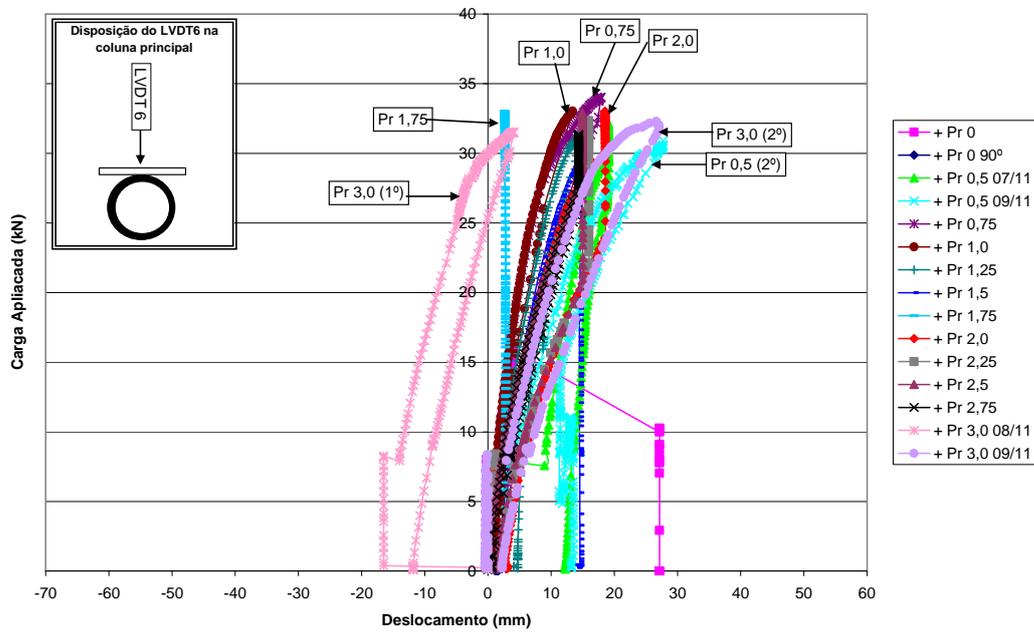


Figura 4.117 Gráfico do deslocamento vertical para o LVDT 6 para terceira coluna em modo +.



Figura 4.118 Ensaio apresentando o segundo modo de flambagem para terceira coluna em modo +.



Figura 4.119 Visão oposta do ensaio apresentando o segundo modo de flambagem para terceira coluna em modo +.



Figura 4.120 Ensaio apresentando o primeiro modo de flambagem para terceira coluna em modo +.

O gráfico da Figura 4.121 apresenta o deslocamento aferido pelo décimo primeiro LVDT. Percebe-se que nos ensaios com nível de protensão elevados há uma rotação na extremidade da coluna, devido ao segundo modo de flambagem, fazendo com que conclusões errôneas podem ser tiradas já que no gráfico a curva retorna próxima a carga última. O encurtamento da coluna é calculado diminuindo o deslocamento medido pelo décimo primeiro LVDT pelo décimo terceiro LVDT. Já o alongamento do curso do macaco hidráulico é medido somando-se os resultados do décimo como o décimo primeiro LVDT.

Do mesmo modo que nos ensaios anteriores, a relação entre carga aplicada e carga interna no tubo central na Figura 4.124 é praticamente linear e não gerando distinção entre os níveis de protensão.

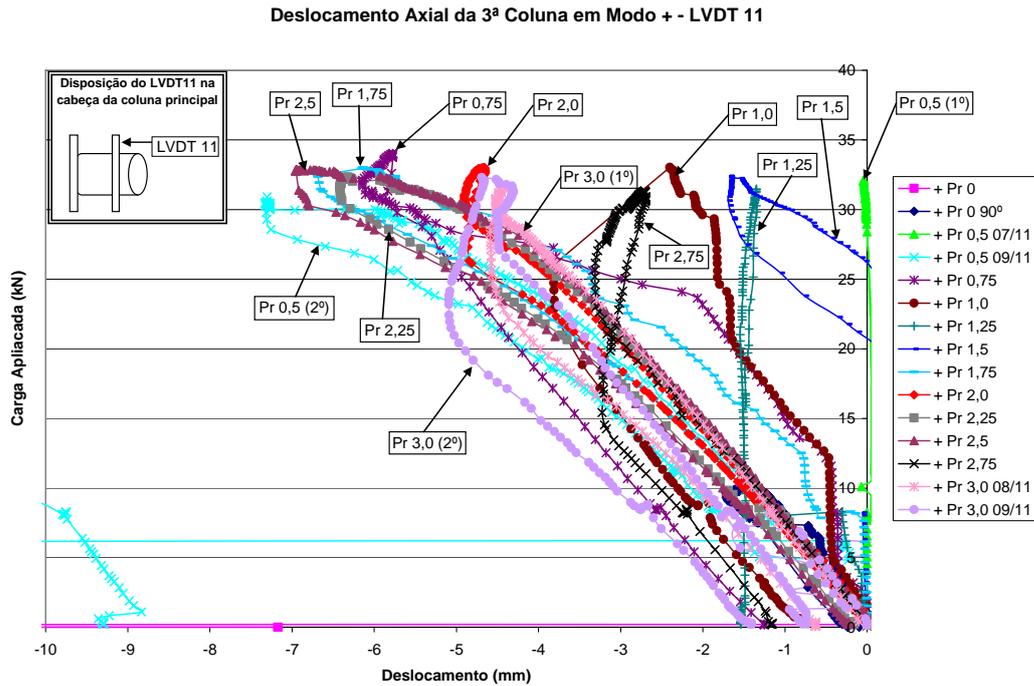


Figura 4.121 Gráfico do deslocamento axial medido pelo LVDT 11 para terceira coluna em modo +.

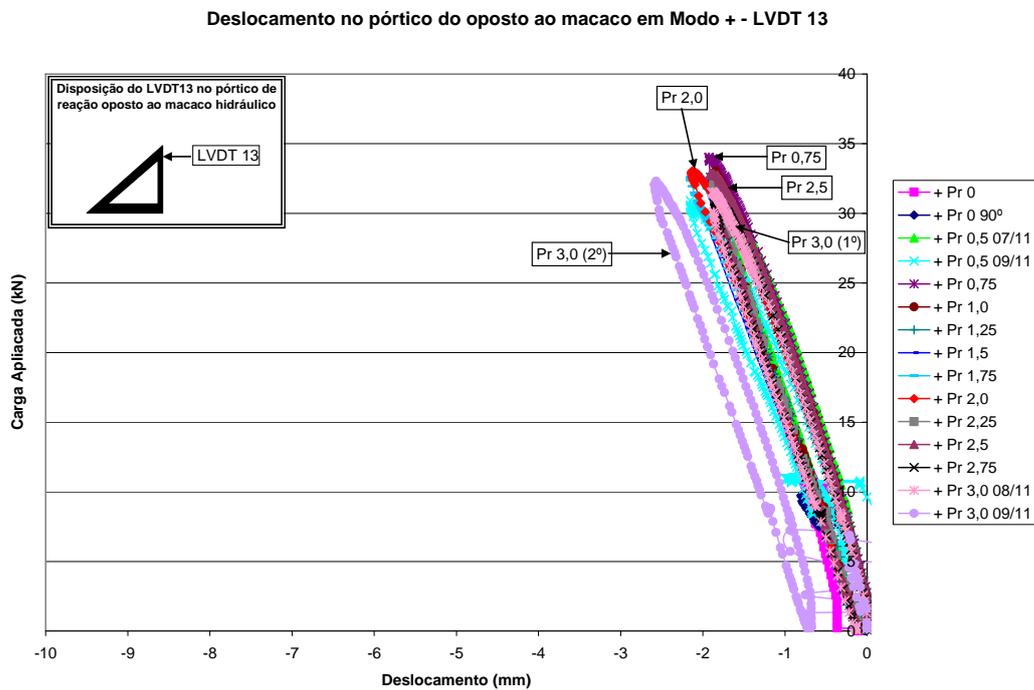


Figura 4.122 Gráfico do deslocamento axial no pórtico de reação oposto ao macaco hidráulico para o LVDT 13 para terceira coluna em modo +.

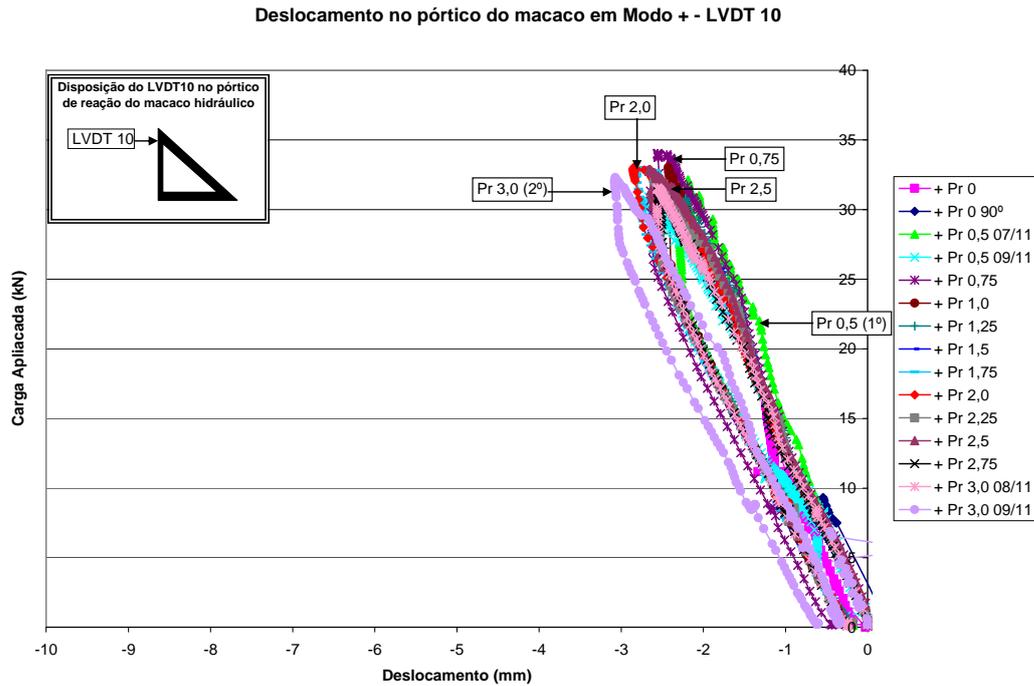


Figura 4.123 Gráfico do deslocamento axial no pórtico de reação do macaco hidráulico para o LVDT 10 para terceira coluna em modo +.

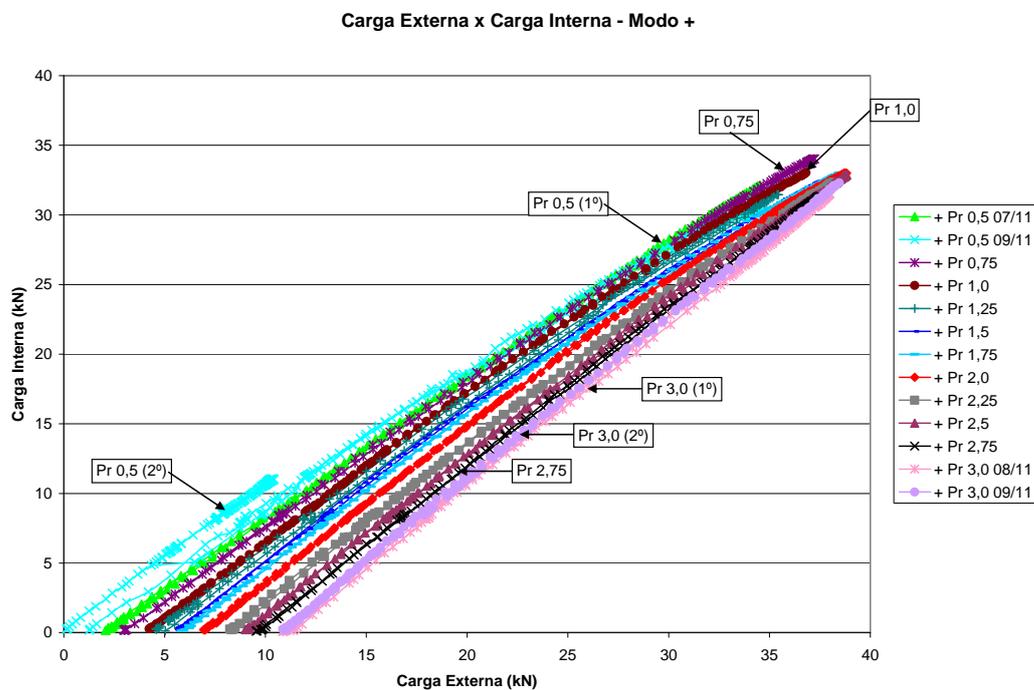


Figura 4.124 Carga externa versus carga interna (carga aplicada + carga dos quatro estais) na coluna principal para terceira coluna em modo +.

extensômetros: instalados na coluna principal estão no Anexo B por terem deformações similares não ultrapassando o limite de escoamento. Através dos gráficos verifica-se que para os níveis de protensão inicial elevados a coluna se deforma de acordo com o segundo modo de flambagem. Isto pode ser melhor observado nos gráficos referentes aos extensômetros que foram instalados na lateral do tubo da coluna principal: os extensômetros ERE17 (Figura 4.126) e ERE19 (Figura 4.127).

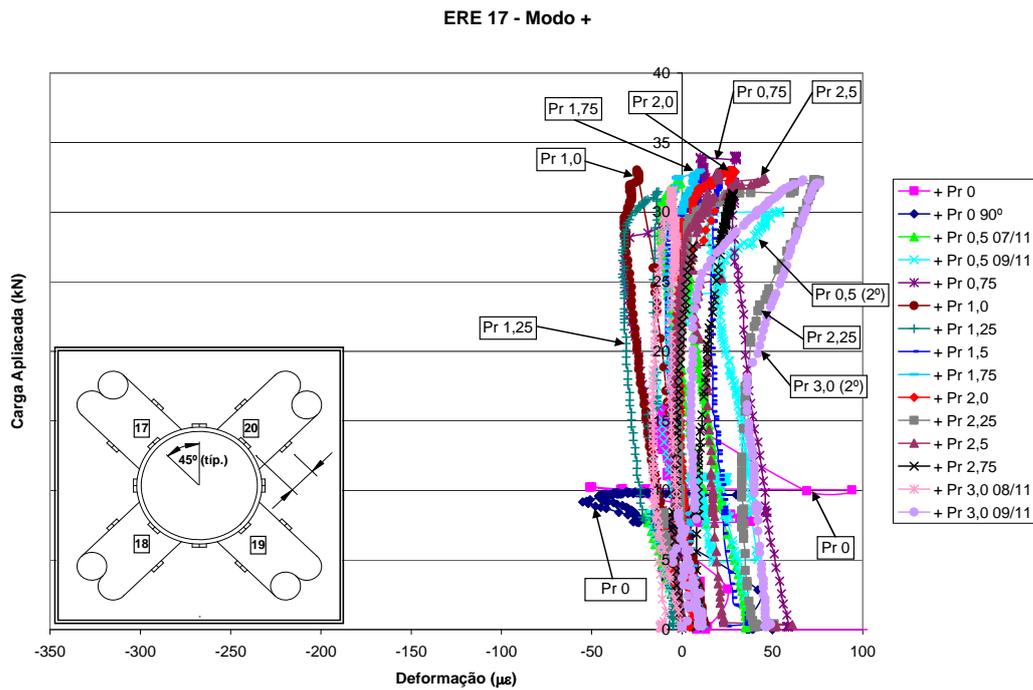


Figura 4.126 Gráfico referente ao extensômetro 17 para terceira coluna em modo +.

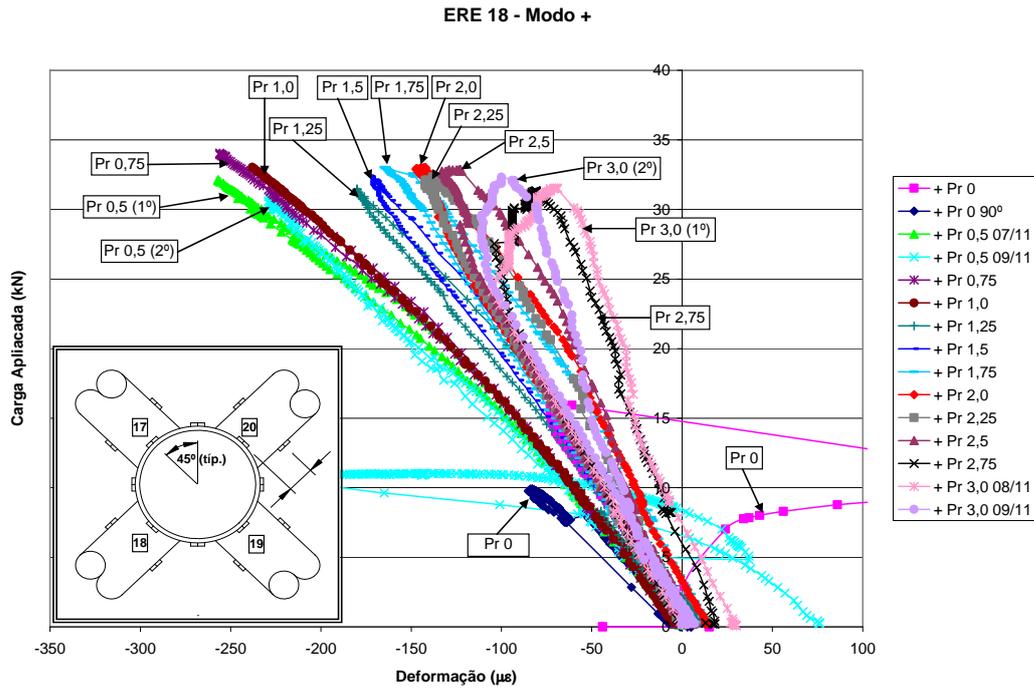


Figura 4.127 Gráfico referente ao extensômetro 18 para terceira coluna em modo +.

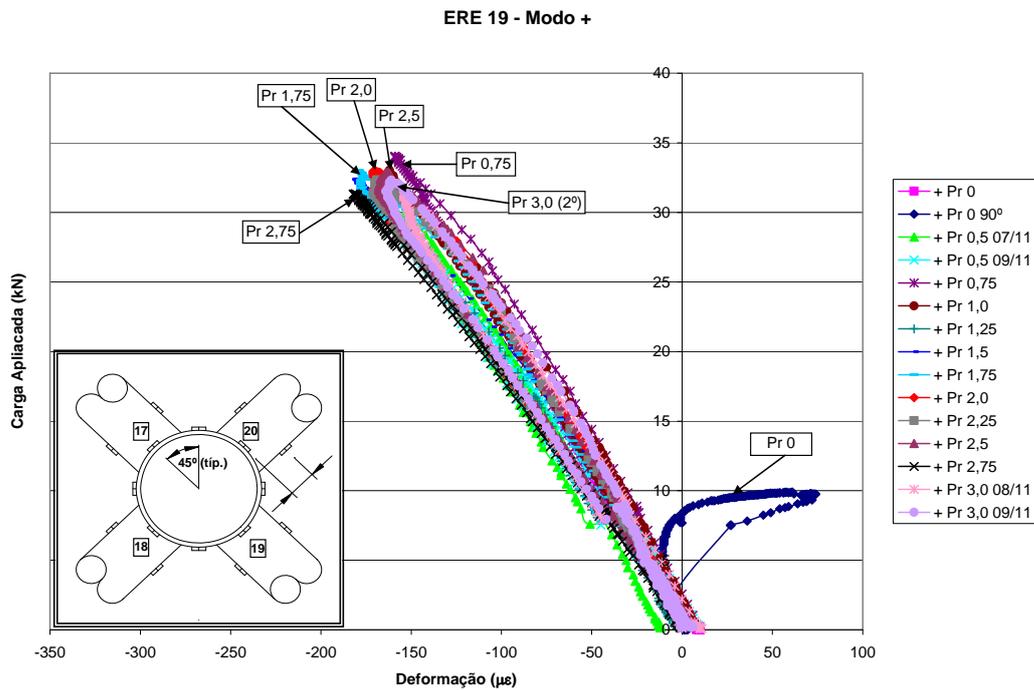


Figura 4.128 Gráfico referente ao extensômetro 19 para terceira coluna em modo +.

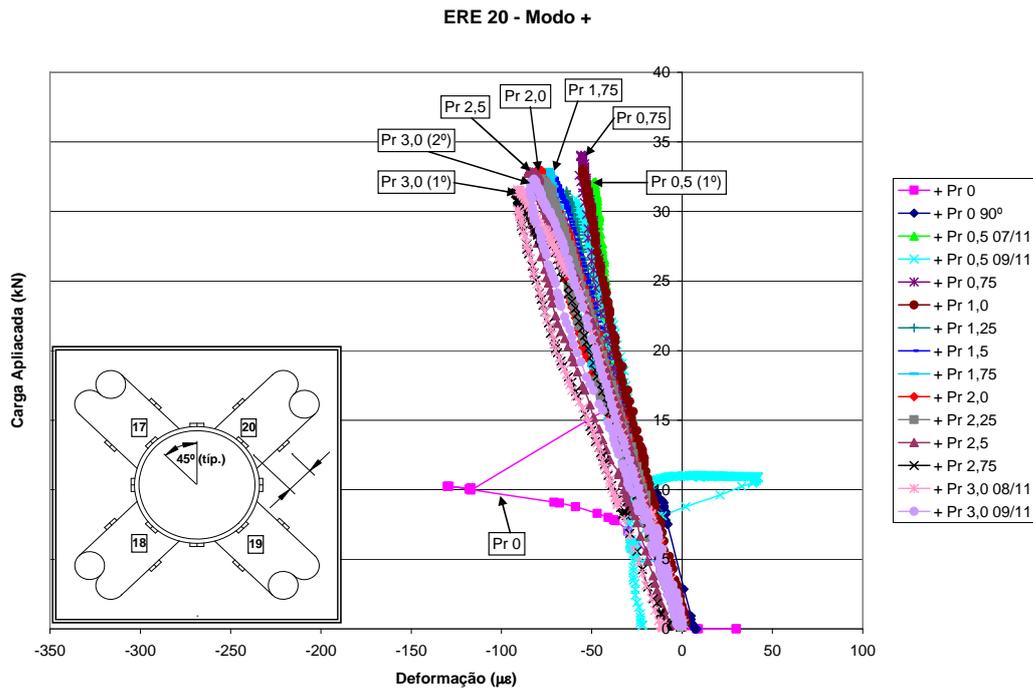


Figura 4.129 Gráfico referente ao extensômetro 20 para terceira coluna em modo +.

Do mesmo modo que o ensaio em “modo x” o estai mais carregados foi o 2 devido a maioria das deformações terem ocorrido através do segundo modo de flambagem, sendo apresentado somente os extensômetros deste braço. Os extensômetros dos outros braços estão no Anexo B. Os extensômetros 37 e 39 praticamente não tiveram deformação considerável, porém observa-se uma flexão no plano perpendicular ao estai, o que não ocorreu nos outros ensaios. Uma explicação para o ocorrido pode ser o limite empregado para determinar a parada de aplicação de carga, onde levou-se a coluna a um deslocamento central ou nos quartos maior do que nos outros ensaios, infligindo um aumento na tensão dos estais. Os extensômetros 38 (Figura 4.132) e 40 (Figura 4.133) apresentam deformação típica de flexão, principalmente quando o nível de protensão inicial nos estais era elevado. Esta flexão ocorreu no mesmo sentido dos estais, paralela a coluna principal.

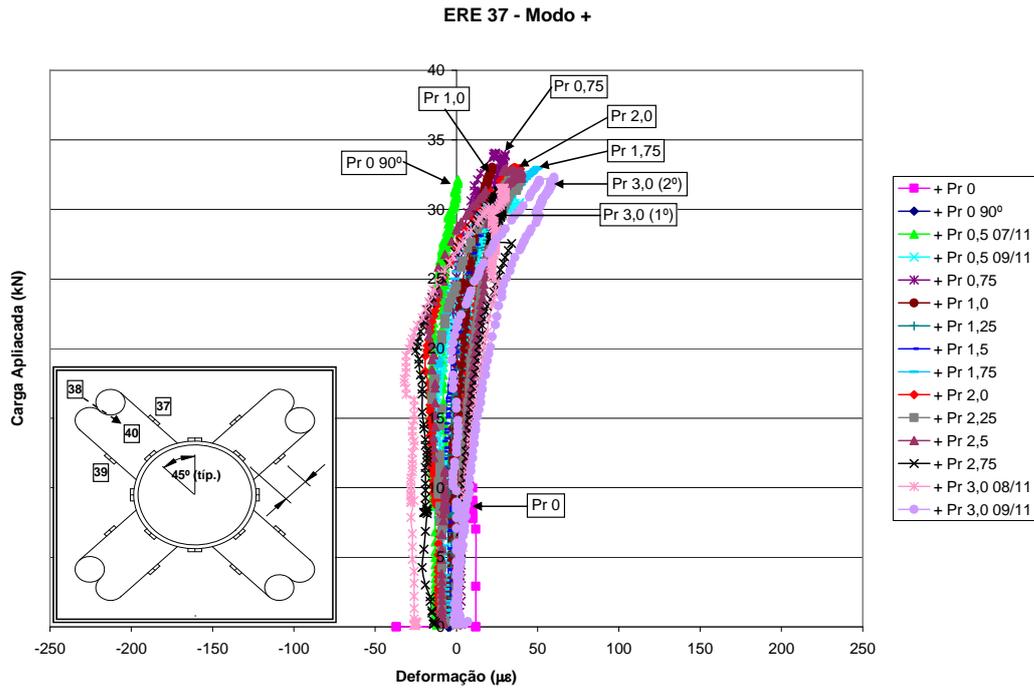


Figura 4.130 Gráfico referente ao extensômetro 37 para terceira coluna em modo +.

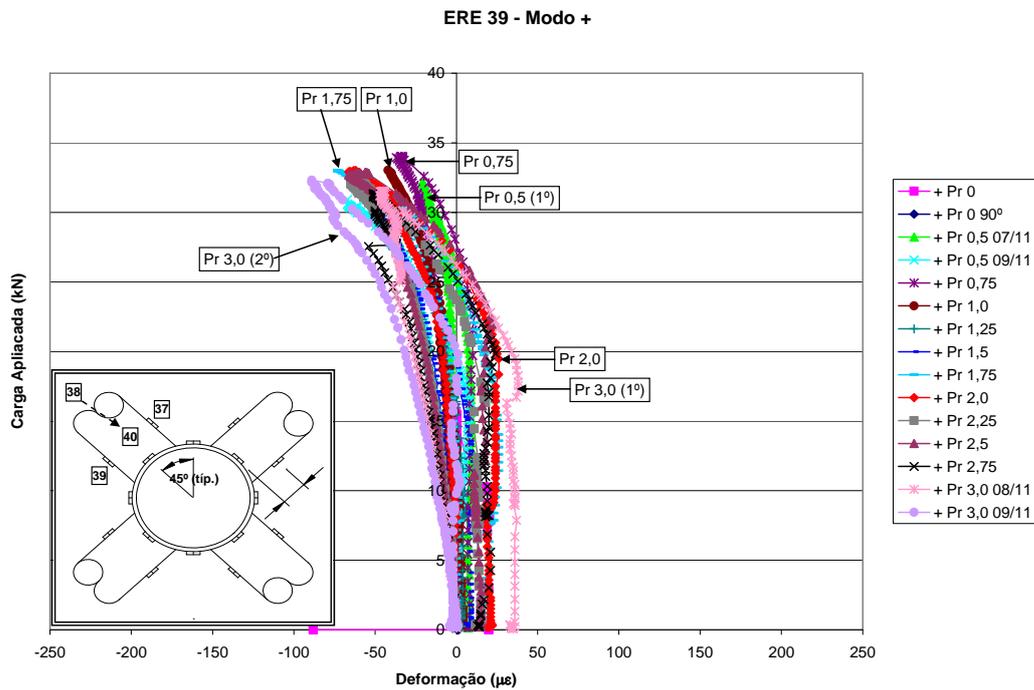


Figura 4.131 Gráfico referente ao extensômetro 39 para terceira coluna em modo +.

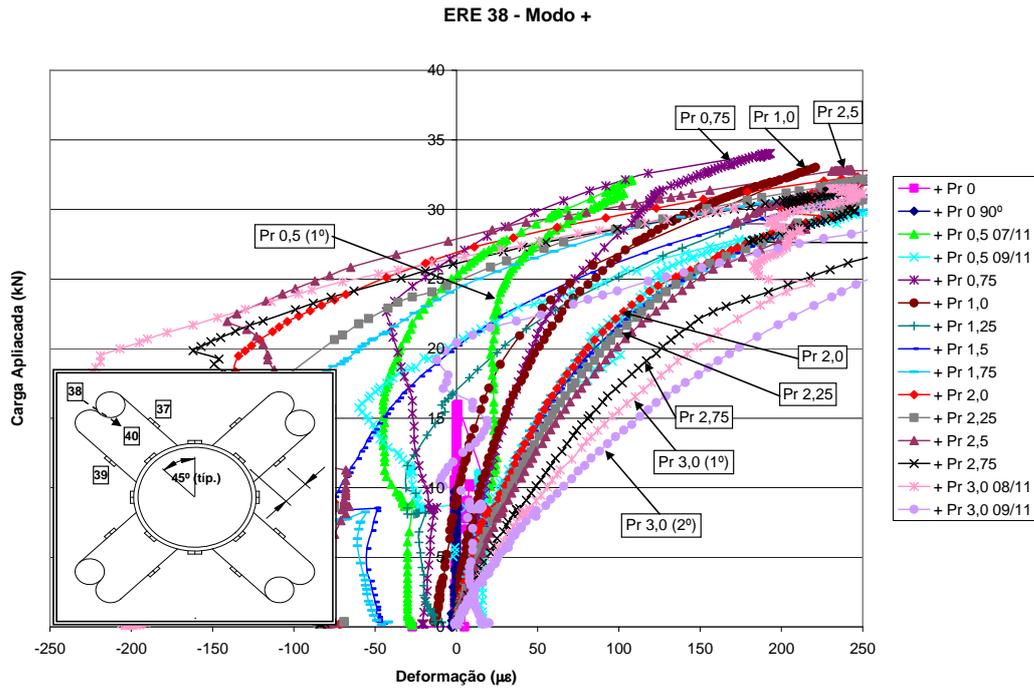


Figura 4.132 Gráfico referente ao extensômetro 38 para terceira coluna em modo +.

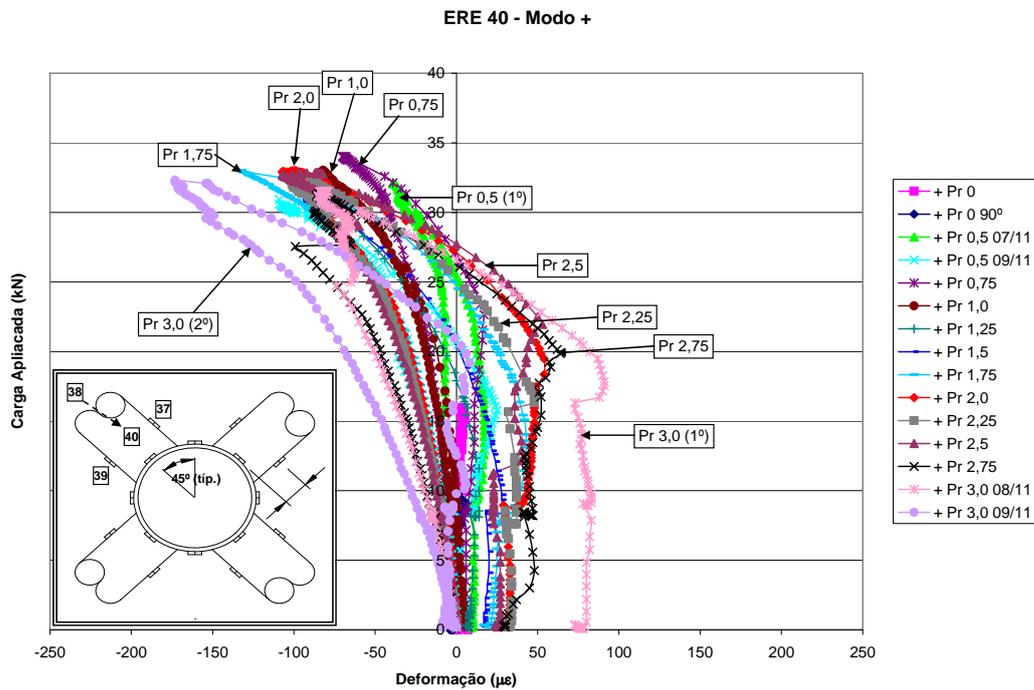


Figura 4.133 Gráfico referente ao extensômetro 40 para terceira coluna em modo +.