

5. Resultados e Análises.

5.1. Ensaio de Recebimento Característicos dos Tirantes.

Através dos boletins dos ensaios de recebimento fornecidos como característicos dos tirantes instrumentados obtiveram-se os valores de deslocamento para as cargas aplicadas, e então construídas as curvas carga-deslocamento diferenciando os deslocamentos (d_e) elásticos e plásticos (d_p), apresentando-se nos gráficos os limites para o tipo usual de ensaio denominado de Tipo B segundo a norma vigente NBR-5629 de abril de 2006 aplicável obrigatoriamente em todos os tirantes executados em obra.

A norma NBR-5629 estabelece os deslocamentos elásticos máximos e mínimos que o comprimento livre de cada tirante deve registrar durante o ensaio de recebimento, esses limites são representados mediante três linhas (A, B e C) plotadas nos gráficos de repartição de deslocamentos para cada tirante. A linha A do gráfico corresponde ao deslocamento elástico teórico do elemento resistente à tração do tirante, considerando o comprimento livre efetivo do mesmo igual ao comprimento livre de projeto, mais 50% do comprimento do bulbo, ($L_{le} = L_I + 0,5L_b$); a linha B corresponde ao deslocamento elástico teórico do elemento resistente à tração do tirante, considerando que o comprimento livre efetivo do mesmo seja igual a 80% do comprimento livre de projeto ($L_{le} = 0,8L_I$) e a linha C corresponde ao deslocamento elástico teórico do elemento resistente à tração do tirante, considerando o comprimento livre efetivo do mesmo igual ao comprimento livre de projeto.

5.1.1. Ensaio abaixo da “Linha C”

A Figura 55 mostra a curva carga versus deslocamento do tirante 57D, resultante do ensaio de recebimento do mesmo. O deslocamento total da cabeça do tirante (d) foi de 67,00 mm, enquanto que o deslocamento permanente (dp), que corresponde ao arrancamento do tirante, foi de aproximadamente 24,00 mm. Dessa forma, obteve-se um deslocamento elástico (de) igual a 43,00 mm.

A partir desses dados de deslocamento, traçou-se o gráfico de repartição entre deslocamentos elásticos e permanentes do tirante (Figura 56). Como pode se ver no gráfico, a linha real de deslocamentos elásticos do tirante 57D se situa entre as linhas A e B. Esse é justamente um dos critérios de aceitação do tirante quanto ao ensaio de recebimento, estabelecido pela NBR 5629 (2006). Além disso, a linha de deslocamentos elásticos reais está entre a linha B e a linha C, ou seja, o comprimento livre efetivo do tirante 57D é menor do que o comprimento livre de projeto.

Calculando-se o comprimento livre efetivo do tirante, através da Equação 22, encontra-se:

Equação 22

$$L_{le} = \frac{d \times E_{fios\ da\ seção} \times S_{fios\ da\ seção}}{F - F_0}$$

$$L_{le} = \frac{0,043m \times 210 \frac{kN}{mm^2} \times 503mm^2}{490kN - 70kN}$$

$$L_{le} = 10,80 m$$

Onde:

E é o módulo de Young;

S é a área da seção transversal;

L_{le} é o comprimento livre efetivo do tirante;

F é a força final do ensaio;

F_0 é a força inicial do ensaio.

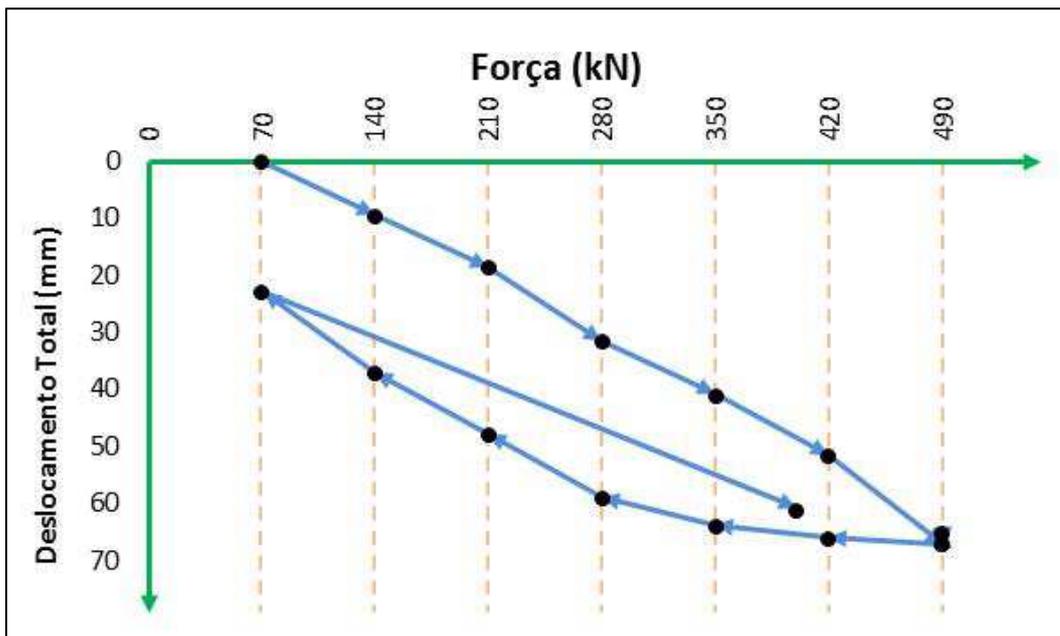


Figura 55. Ensaio de recebimento do tirante 57D, carga x deslocamentos totais.

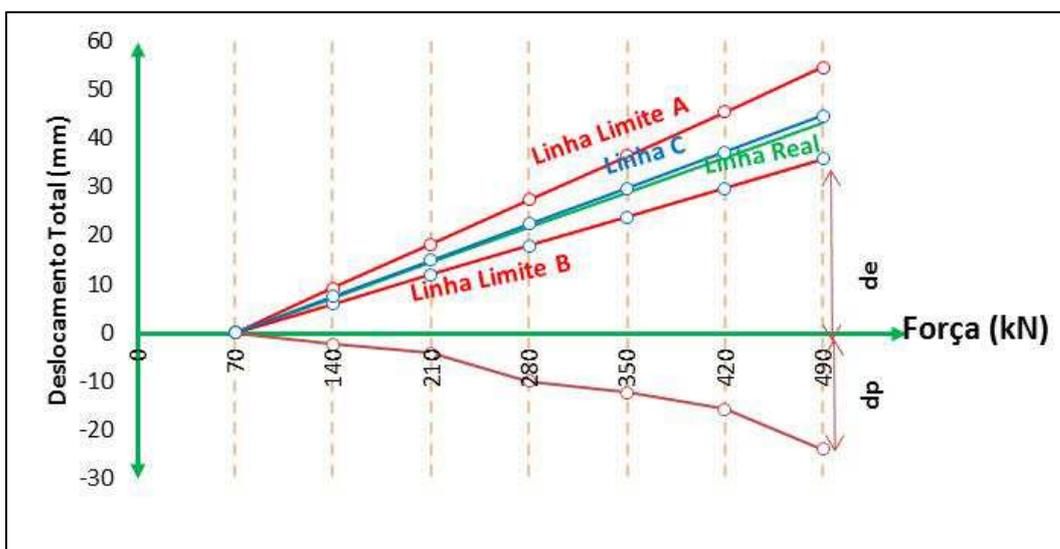


Figura 56. Repartição entre deslocamentos elásticos e plásticos do Tirante 57D, carga x deslocamentos totais.

Os tirantes que apresentaram esse tipo de comportamento durante o ensaio de recebimento com seus respectivos deslocamentos elásticos e plásticos totais estão apresentados na Tabela 7 a seguir:

Tabela 7. Tirantes que ficaram abaixo da “Linha C” da NBR 5629 no gráfico de carga contra deformação.

TIRANTE	de (mm)	dp (mm)
Tirante 34I-10ø8mm	30	14
Tirante 38J-10ø8mm	28	13
Tirante 45G-8ø8mm	26	9
Tirante 48K-10ø8mm	29	16
Tirante 51J-10ø8mm	27	13
Tirante 54E-10ø8mm	38	14
Tirante 54H-8ø8mm	25	13
Tirante 54K-10ø8mm	28	5
Tirante 57D-8ø8mm	43	24
Tirante 60E-8ø8mm	40	20
Tirante 60H-8ø8mm	26	7

5.1.2. Ensaio pertos da “Linha A”

Os resultados obtidos apresentados neste item correspondem aos tirantes nos quais os deslocamentos elásticos máximos ficaram muito próximos ao limite Superior denominado pela NBR-5629 de Linha A, é dizer, apresentaram quase o máximo deslocamento permitido pela citada norma.

Similarmente, a Figura 57 e a Figura 58 apresentam os gráficos de deslocamentos totais e a repartição de deslocamentos ao longo da aplicação de carga do tirante 51D, onde a linha real de deslocamentos elásticos se situa entre as linhas A e C, o que representa que o comprimento livre efetivo do tirante 51D é maior do que o comprimento livre de projeto correspondendo a 13,35 metros estimados através da Equação 22:

$$L_{ie} = \frac{0,053m \times 210 \frac{kN}{mm^2} \times 503mm^2}{490kN - 70kN}$$

$$L_{ie} = 13,35 m$$

Onde:

E é o módulo de Young;

S é a área da seção transversal;

L_{e} é o comprimento livre efetivo do tirante;

F é a força final do ensaio;

F_0 é a força inicial do ensaio.

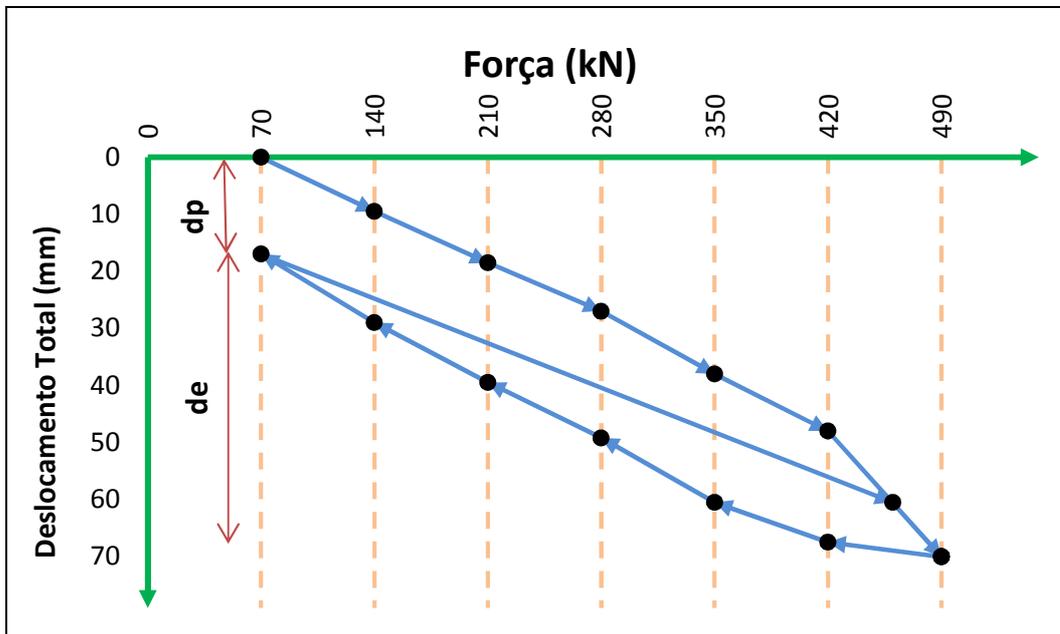


Figura 57. Ensaio de recebimento do tirante 51D, carga x deslocamentos totais.

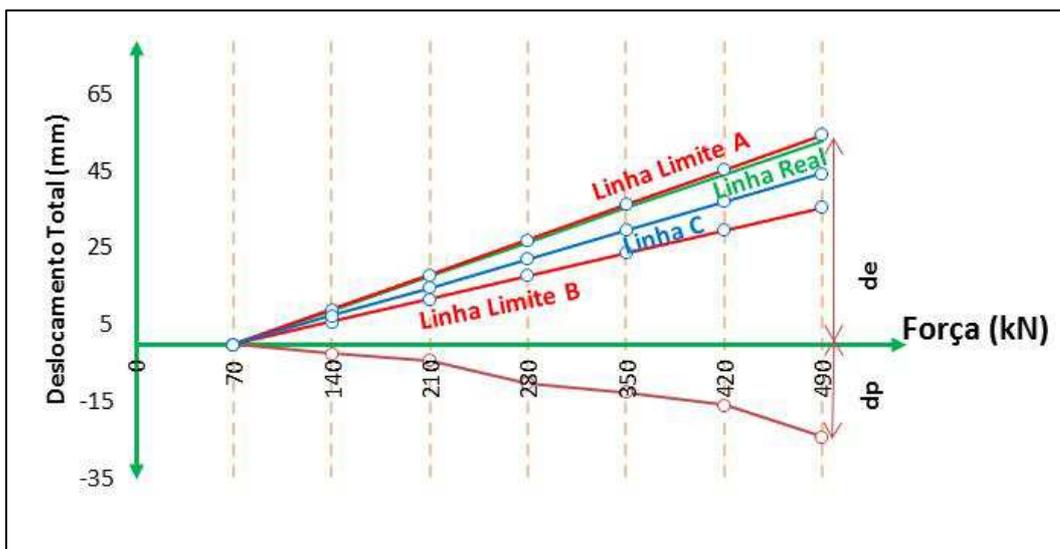


Figura 58. Repartição entre deslocamentos elásticos e plásticos do Tirante 51D, carga x deslocamentos totais.

O Tirante 51D foi o único que apresentou-se perto da “linha A” no gráfico carga contra deslocamento traçado com os dados obtidos do ensaio de recebimento.

5.1.3. Ensaio acima da “Linha C”.

Os tirantes cujos deslocamentos elásticos totais se apresentaram no gráfico de carga versus deslocamento entre as Linhas A e a linha C, e que não ficaram pertos do limite Superior são representados pelo comportamento do tirante 66C, que apresento um deslocamento elástico (d_e) total igual a 40,00 mm, e um comprimento livre efetivo do tirante de 10,06 m, 80, cm maior do que o comprimento de projeto.

A Figura 59 e a Figura 60 apresentam os resultados obtidos para o tirante 66C.

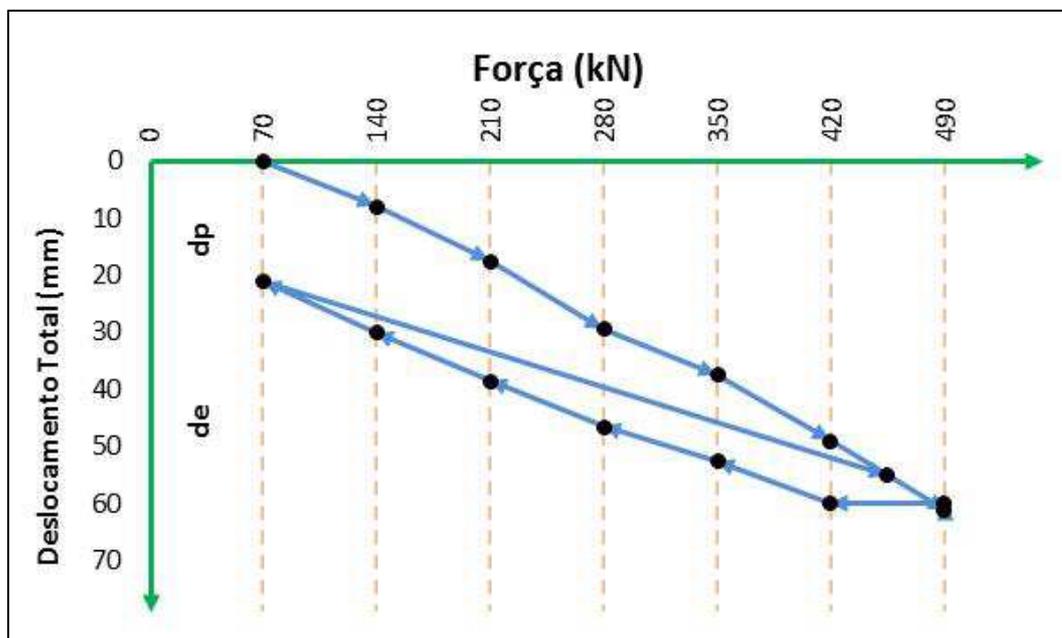


Figura 59. Ensaio de recebimento do tirante 66C, carga x deslocamentos totais.

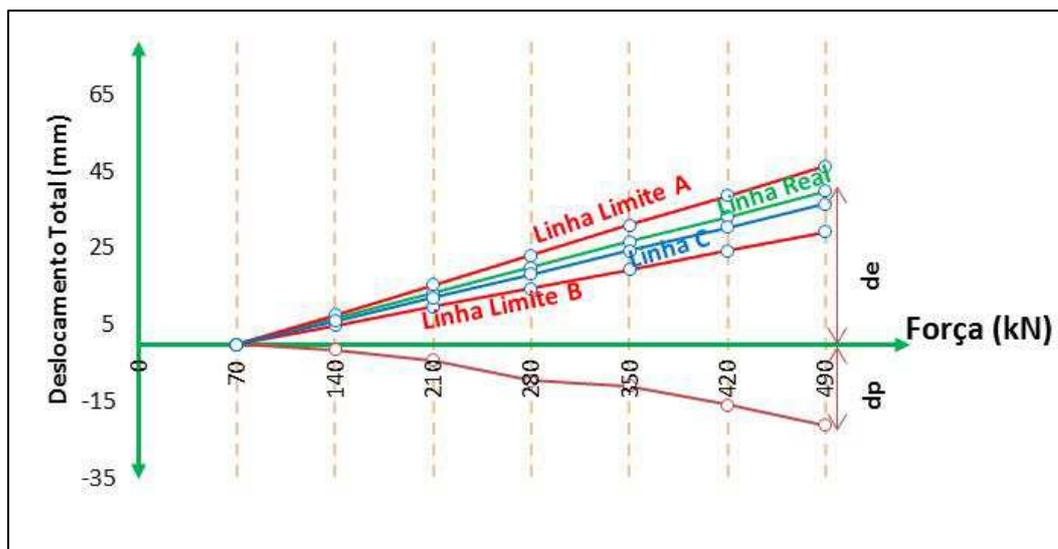


Figura 60. Repartição entre deslocamentos elásticos e plásticos do Tirante 66C, carga x deslocamentos totais.

A Tabela 8 a seguir, apresenta o resumo dos deslocamentos dos tirantes que apresentaram o mesmo comportamento do tirante 66C durante o ensaio de recebimento.

Tabela 8. Tirantes que ficaram acima da “Linha C” da NBR 5629 no gráfico de carga contra deformação.

TIRANTE	de (mm)	dp (mm)
Tirante 45D-10ø8mm	36	7
Tirante 51A-8ø8mm	57	22
Tirante 54B-8ø8mm	66	14
Tirante 57A-8ø8mm	47	26
Tirante 66C-8ø8mm	40	21
Tirante 69A-8ø8mm	47	10
Tirante 69I-10ø8mm	35	10

Onde:

de é o deslocamento elástico do tirante;

dp é o deslocamento plástico do tirante.

5.1.4. Ensaio pertos da “Linha B”.

Finalmente, o ultimo comportamento identificado durante os ensaios de recebimento foi o que apresentaram os tirantes cujos deslocamentos

ficaram dentro dos estabelecidos pela norma brasileira, mas ficaram muito pertos do limite inferior, ou seja, os deslocamentos elásticos totais ficaram muito pertos da chamada Linha B.

Este comportamento foi representado pelo tirante 45A, a Figura 61 e a Figura 62 apresentadas a seguir mostram os resultados obtidos a partir dos dados de deslocamento e carregamento fornecidos pelo ensaio de recebimento.

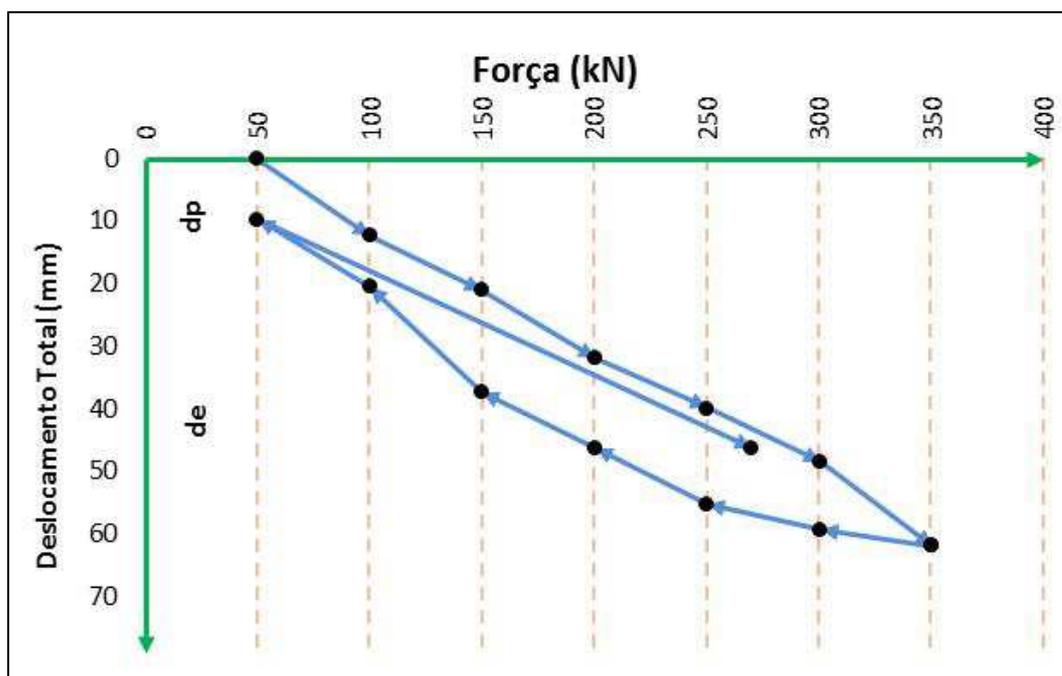


Figura 61. Ensaio de recebimento do tirante 45A, carga x deslocamentos totais.

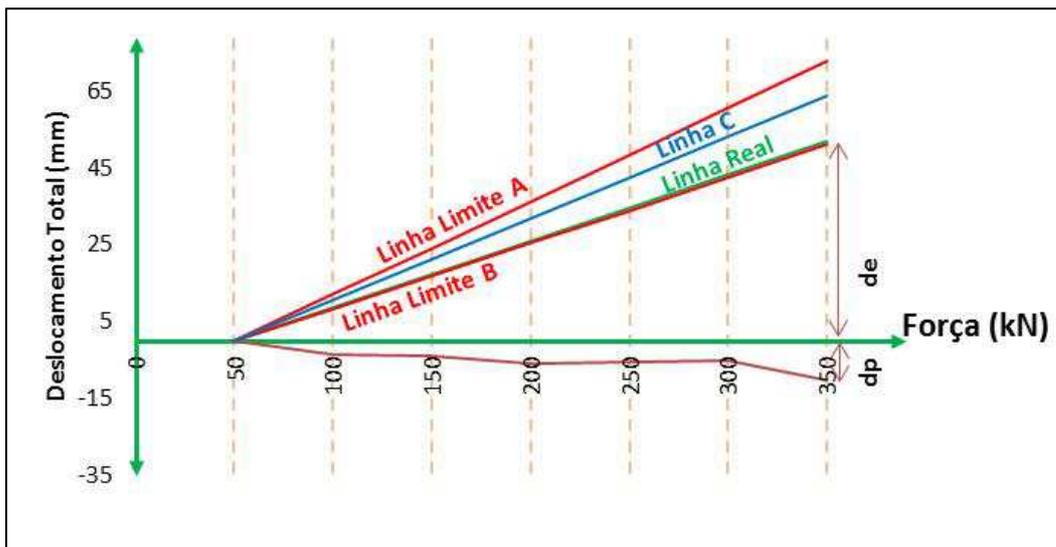


Figura 62. Repartição entre deslocamentos elásticos e plásticos do Tirante 45A, carga x deslocamentos totais.

A Tabela 9 apresenta o resumo dos tirantes cujos deslocamentos plásticos ficaram perto do limite inferior (Linha B).

Tabela 9. Tirantes que ficaram perto da “Linha B” da NBR 5629 no gráfico de carga contra deformação.

TIRANTE	DE (mm)	DP (mm)
Tirante 34A-10ø8mm	72	6
Tirante 38C-10ø8mm	42	17
Tirante 45A-8ø8mm	52	10
Tirante 60K-8ø8mm	26	13
Tirante 69E-10ø8mm	35	15

Onde:

de é o deslocamento elástico do tirante;

dp é o deslocamento plástico do tirante.

Os tirantes que não foram apresentados nas Tabela 7 a Tabela 9 ficaram na “Linha C”, que corresponde a um comportamento de comprimento livre efetiva igual a comprimento real livre do tirante.

5.2. Análises da Capacidade de Carga dos Tirantes

Conforme o exposto no Capítulo 4 os tirantes foram projetados para suportar cargas de ensaio de 35 e 49 toneladas respectivamente, após da realização dos ensaios de recebimento se verificou que todos os tirantes instrumentados suportavam as cargas aplicadas, mas no decorrer do tempo teve alguns tirantes que estabilizaram sua carga em valores menores as cargas de projeto. A seguir, é apresentado a modo comparativo as capacidades de carga para cada tirante com os métodos mostrados no capítulo 2.

5.2.1. Método da NBR 5629 (2006)

Para o cálculo da capacidade de carga dos tirantes, através do método proposto pela NBR 5629 (2006), e devido a pouca informação correspondente a ensaios de laboratório feitos no solo local, se decidiu abordar parâmetros de resistência registrados na literatura e conforme apenas na descrição geológica- geotécnica da seção 4.4 desse documento. A Tabela 10 a seguir, apresenta os valores dos parâmetros de resistência para diferentes tipos de solo propostos por Bowles (1996).

Tabela 10. Avaliação dos Parâmetros de Resistência e de deformabilidade em Função do SPT (correlações empíricas).

Areias e Solos Arenosos					
Compacidade	γ (t/m ³)	C (t/m ²)	$\phi\phi$	E (t/m ²)	VV
Fofa	1,6	0	25 - 30	100 - 500	0,3 a 0,4
Pouco Compacta	1,8	0	30 - 35	500 - 1400	
Medianamente Compacta	1,9	0	35 - 40	1400 - 4000	
Compacta	2,0	0	40 - 45	4000 - 7000	
Muito Compacta	> 2,0	0	> 45	> 7000	
Argilas e Solos Argilosos					
Consistência	γ (t/m ³)	C (t/m ²)	$\phi\phi$	E' (t/m ²)	VV
Muito Mole	1,3	0 - 1,2	0	30 - 120	0,4 a 0,5
Mole	1,5	1,2 - 2,5	0	120 - 280	
Média	1,7	2,5 - 5,0	0	280 - 500	
Rija	1,9	5,0 - 15,0	0	500 - 1500	
Dura	> 2,0	> 15,0	0	> 1500	

Ondé:

γ = Peso Específico Natural do Solo

ϕ = Ângulo de Atrito Interno

C = Coesão

E = Módulo de Elasticidade (Não Drenado)

E' = Módulo de Elasticidade (Drenado)

μ = Módulo de Poisson

Portanto, os valores das variáveis do problema em estudo adotadas nas seguintes análises são apresentados a seguir:

- ✓ Profundidade do ponto médio da ancoragem, sendo para cada nível de tirantes os seguintes:
 - Nível A: 11,85 m
 - Nível B: 12,75 m
 - Nível C: 13,65 m
 - Nível D: 14,50 m
 - Nível E: 15,40 m
 - Nível F: 16,25 m
 - Nível G: 17,15 m
 - Nível H: 18,00 m
 - Nível I: 18,90 m
 - Nível J: 19,75 m
 - Nível K: 20,65 m
- ✓ Peso específico aparente do solo $\gamma = 18,0 \text{ kN/m}^3$.
- ✓ Diâmetro médio da ancoragem $D = 0,165 \text{ m}$ (foi usado coeficiente de majoração do diâmetro do bulbo $\beta = 1,45$, conforme Bustamante e Doix (1985)).
- ✓ Comprimento do bulbo do tirante $L_b = 5$ e 6 m respectivamente.
- ✓ Coeficiente de ancoragem $k_f = 0,5$ (Tabela 2).

Dessa forma, o valor da capacidade de carga do tirante (T) encontrado para nível da cortina é apresentado na Tabela 11. Observa-se que esse valor é maior que os valores da carga de ensaio (350 e 490 kN).

Tabela 11. Capacidade de cargas dos tirantes analisados para cada nível da cortina segundo o Método da NBR 5629 (2006)

Nível	Capacidade de Carga (kN)
A	472,9
B	494,0
C	515,1
D	535,0
E	556,1
F	576,0
G	597,1
H	617,0
I	638,1
J	658,0
K	679,1

5.2.2. Método de Ostermayer (1975)

Nesse método utiliza-se o gráfico da Figura 16. Os dados de entrada se restringem à compactidade do solo (solo pouco compacto, N_{SPT} médio de 6) e ao comprimento do bulbo de 5 m e 6 m.

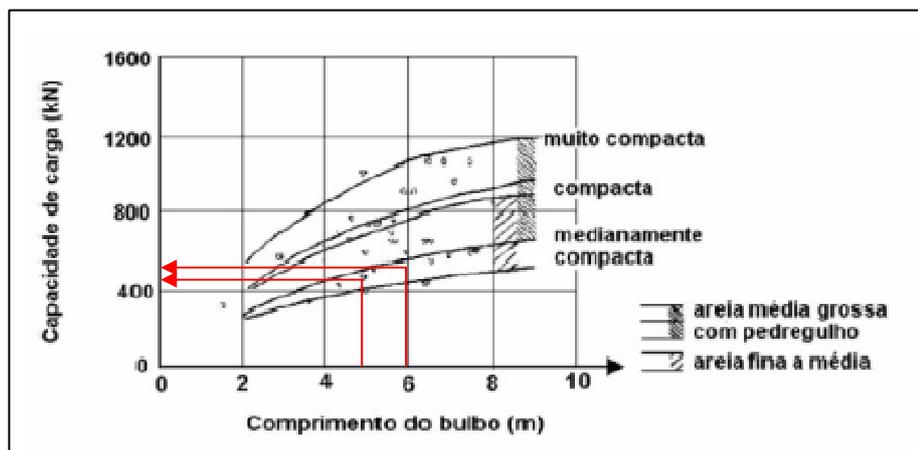


Figura 63. Capacidade de carga das ancoragens média de 550 para as condições do caso em estudo pelo Método de Ostermayer (1975)

Da Figura 63, obtém-se a capacidade de carga da ancoragem na faixa de 550 kN, o que representa um valor aproximado da média observada no Método da NBR 5629 (2006), para essa obra. Pelo valor

estimado para T, fica claro que o Método de Ostermayer pode se aplicar ao caso em estudo.

5.2.3. Método de Bustamante e Doix (1985)

Para o cálculo da capacidade de carga dos tirantes através do método proposto por Bustamante e Doix (1985), utilizaram-se os seguintes dados:

- ✓ Diâmetro perfurado do comprimento ancorado $D_p = 0,1143$ m;
- ✓ Coeficiente de majoração do diâmetro do bulbo devido à injeção $\beta = 1,45$ (Tabela 3);
- ✓ Comprimento do bulbo do tirante $L_b = 5$ m e 6 m;
- ✓ Resistência ao cisalhamento na interface solo bulbo média de 60 kPa, conforme a Figura 64, em função do NSPT.

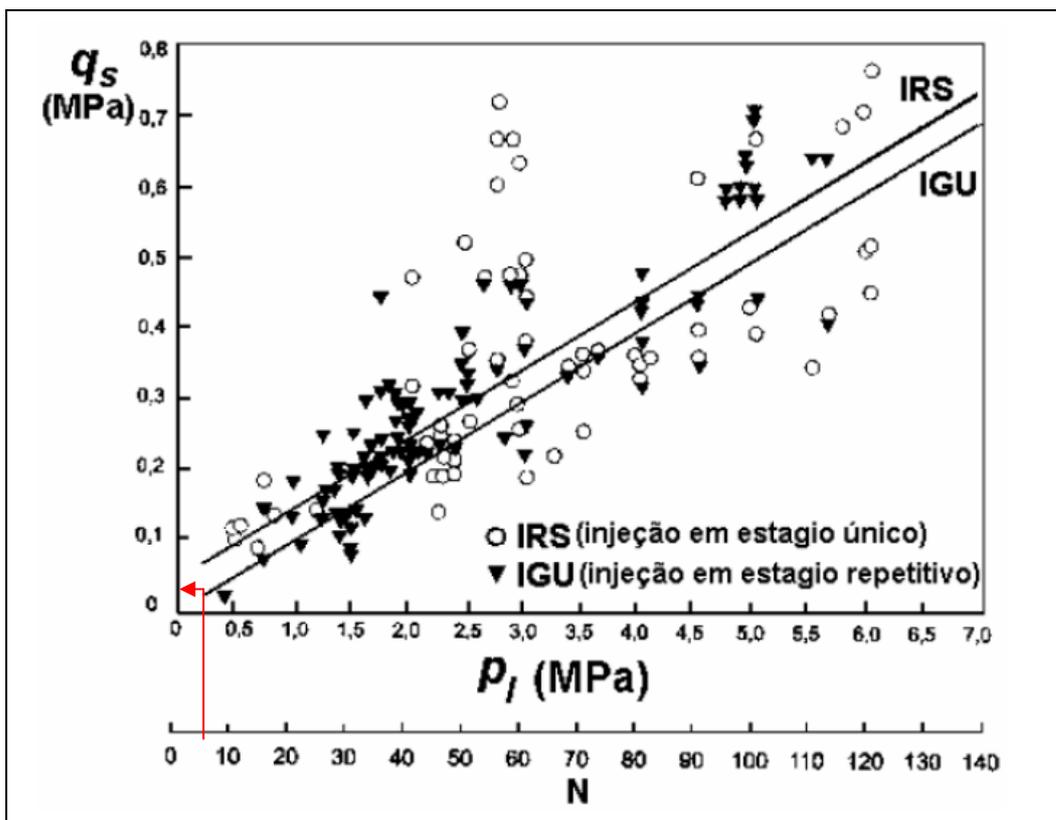


Figura 64. Resistência ao cisalhamento na interface solo bulbo média de $q_s = 60$ kPa para as condições do caso em estudo pelo Método de Bustamante e Doix (1985)

Dessa forma, o valor da capacidade de carga do tirante (T) encontrado ficou na faixa de 150 kN. Observa-se que esse valor é menor do que a carga de ensaio especificada em projeto (350 e 490 kN), portanto, por esse método, era previsível que os tirantes sofreriam ruptura durante a realização dos ensaios de recebimento, fato que não ocorreu na realidade. Isso demonstra que o procedimento proposto por Bustamante e Doix (1985) não é indicado para as condições da obra estudada.

5.3. Comportamento dos Tirantes Instrumentados

As cargas nos tirantes instrumentados foram medidas através de extensômetros elétricos de resistência, conforme exposto no Capítulo 4. Observou-se que quando os tirantes foram instalados e após a cura da nata de cimento, os extensômetros funcionavam adequadamente.

Após de ter estudado os dados de instrumentação, procede-se a seguir uma análise do comportamento dos tirantes instrumentados, em função das características apresentadas pela curva carga-tempo, considerando o período de tempo compreendido entre o momento de protensão do tirante, durante o processo construtivo e até seis meses após de construção da cortina. Essa análise é feita para cada seção instrumentada da cortina e é apresentada a seguir.

5.3.1. Seção 34 da Cortina.

Após a incorporação de cada tirante, foram feitas as leituras nas células de carga instaladas ao longo do tempo. A Figura 65 mostra os valores de carga medidos ao longo do tempo.

O primeiro tirante instrumentado em se fazer a cravação foi o Tirante 34E. O comportamento de esse tirante foi caracterizado pelo aumento de carga após a perda durante o processo construtivo, nesse caso o tirante não apresentou perda de carga instantânea e atingiu sua estabilização imediatamente após do aumento de carga, que corresponde a um total de 45 dias. O valor de carga final deste tirante ficou na faixa de 370 kN,

apresentando assim uma perda de carga total aproximada aos 6% da carga de cravação.

Seguindo o processo construtivo, foi cravado o tirante T34A, que se caracterizou por apresentar uma perda de carga instantânea de aproximadamente 60 kN, após a dessa queda houve um aumento gradativo de carga durante o processo construtivo e finalmente uma estabilização que foi atingida perto de cinco meses após da cravação.

Finamente foi realizada a cravação do tirante 34I, o qual apresenta em sua grande maioria somente queda instantânea, estabilizando se aproximadamente em uma carga de toneladas após de um mês executada sua cravação.

Respeito à carga de trabalho, a carga final do tirante 34A ficou muito próxima à carga de projeto, quanto que para o tirante 34E ficou levemente maior, para o tirante 34I ficou cinco toneladas abaixo da carga de trabalho.

A Figura 66 apresenta as parcelas de variação de carga dos tirantes dessa seção, onde pode se observar que a maior perda de carga ocorreu no tirante 34I e foi de aproximadamente 32%.

As cargas finais dos três tirantes ficaram acima da carga de incorporação de projeto, que corresponde ao 80% da carga de trabalho (280 e 200 kN respectivamente para os tirantes de carga de trabalho de 350 e 250 kN).

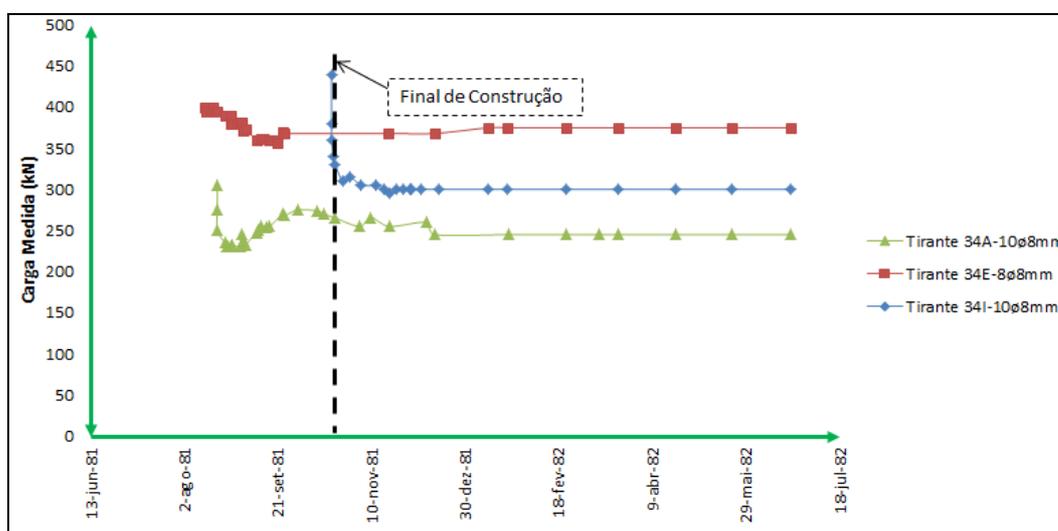


Figura 65. Curva Carga contra Tempo dos Tirantes instrumentados da Seção 34.

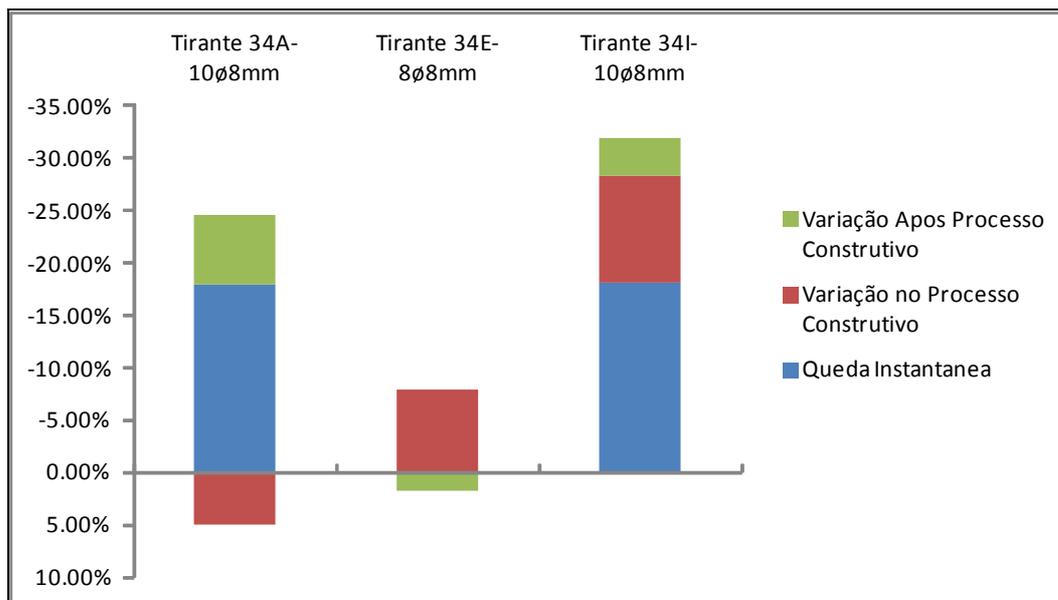


Figura 66. Perdas e Ganhos de Carga dos Tirantes instrumentados da Seção 34.

5.3.2. Seção 38 da Cortina.

Nessa seção foram três os tirantes instrumentados, o primeiro em se executar foi o tirante 38C, que apresentou sua estabilização após de um aumento de carga durante o processo construtivo, a perda de carga total desse tirante ficou na faixa de 10% da carga de cravação.

O tirante 38F foi o segundo tirante instrumentado dessa seção em se executar, seu comportamento foi quase o mesmo que do tirante 38C, com a diferença de que esse apresentou uma queda instantânea de aproximadamente 5 Toneladas, o tempo de estabilização foi igual que do tirante 38C e corresponde aproximadamente a 4 meses.

O último tirante instrumentado executado nessa seção, foi o tirante 38J, que não apresentou aumento de carga ao longo de tempo, esse tirante apresentou um tempo de estabilização muito curto de 15 dias e sua perda de carga total foi quase que instantânea.

A Figura 67 apresenta a curva de carga ao longo do tempo dos três tirantes e a Figura 68 apresenta as parcelas de variação de carga dos tirantes, as perdas totais variam dos 10% para o tirante 38C aos 30% para o tirante 38J.

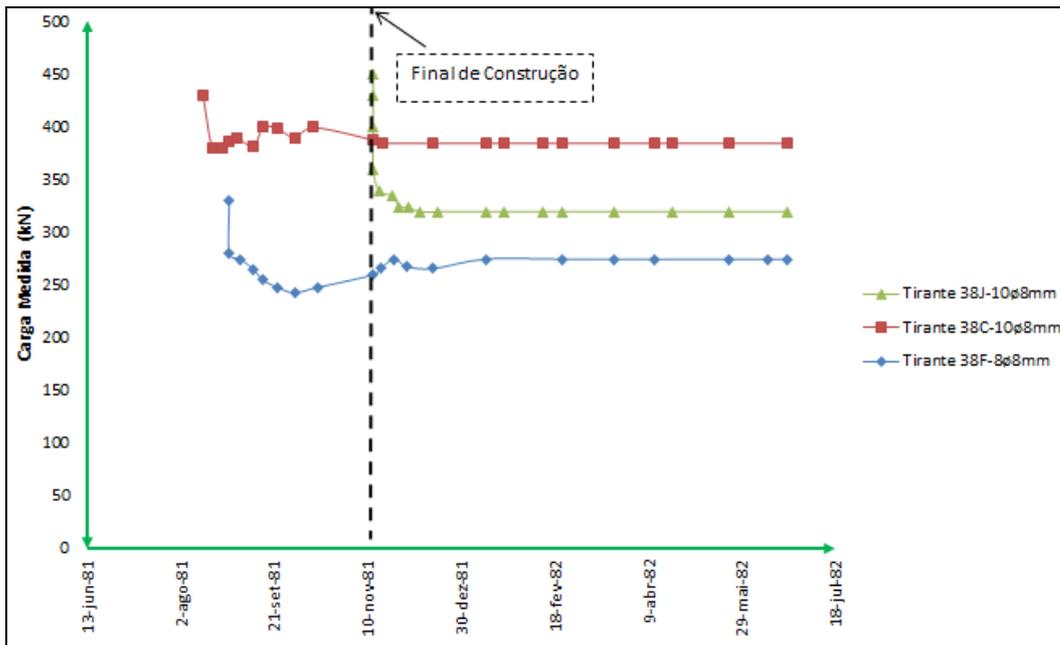


Figura 67. Curva Carga contra Tempo dos Tirantes instrumentados da Seção 38.

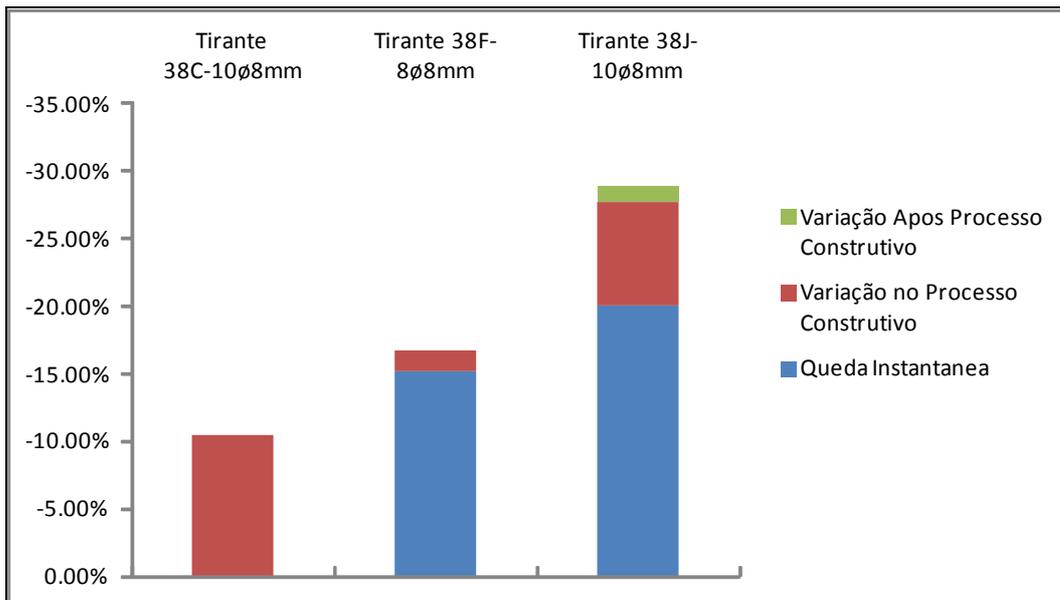


Figura 68. Perdas e Ganhos de Carga dos Tirantes instrumentados da Seção 38.

5.3.3. Seção 45 da Cortina.

Nessa seção foram quatro os tirantes instrumentados, o comportamento de três deles foi caracterizado por apresentar perda instantânea próxima aos 15% da carga de cravação e posteriormente

apresentar uma perda gradativa pelo processo construtivo, as perdas totais foram aproximadamente de 33%, 30% e 16% para os tirantes 45A, 45G e 45J respectivamente.

O tirante 45D, apresentou igual que todos nessa seção uma perda instantânea, mas também foi caracterizado por apresentar aumentos de carga ao longo do processo construtivo.

Os tempos de estabilização para esses tirantes foram de 6 e 5 meses para o 45A e 45D respectivamente, em quanto para o s tirantes 45G e 45J os tempos foram mais curtos, apresentando um tempo total em estabilizar de 1,5 e 4 semanas respectivamente.

A Figura 69 e a Figura 70 apresentam como acostuma a curva carga ao longo de tempo e as parcelas de variação de carga para cada tirante respectivamente.

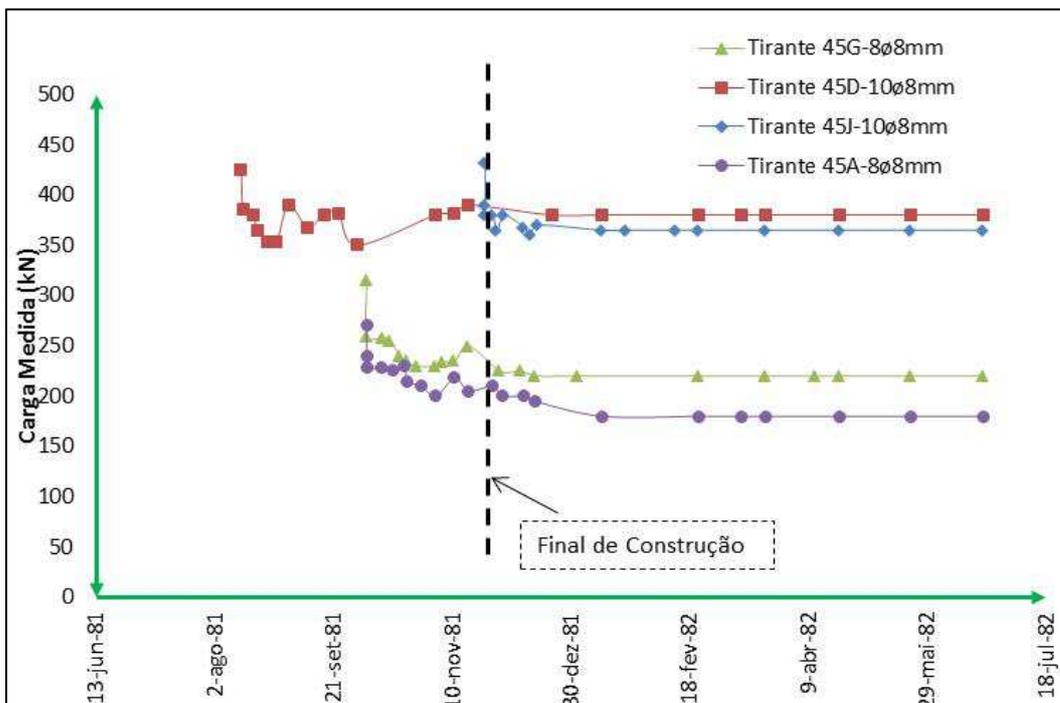


Figura 69. Curva Carga contra Tempo dos Tirantes instrumentados da Seção 45.

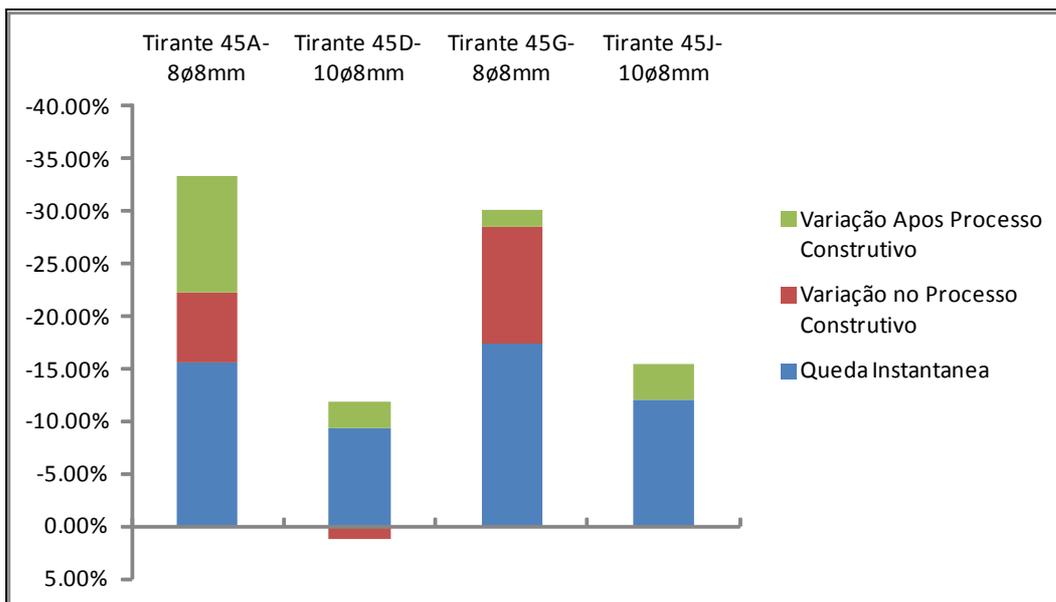


Figura 70. Perdas e Ganhos de Carga dos Tirantes instrumentados da Seção 45.

5.3.4. Seção 48 da Cortina.

Os quatro tirantes instrumentados nessa seção apresentaram o mesmo comportamento, caracterizado por uma perda instantânea com média de 17%, e posteriormente uma variação ondulatória ao longo do processo construtivo, chegando se a uma perda total em torno de 25%.

Os tirantes 48E, 48H e 48K estabilizaram após de um aumento da carga durante as oscilações da curva apresentadas durante o processo construtivo.

Se bem os tirantes apresentaram o mesmo comportamento, o tempo de estabilização para eles foi bem diferente, sendo o menor para o tirante 48H e correspondente a 15 dias, e sendo o maior para o tirante 48B pero dos 4 meses após da cravação.

A Figura 71 e a Figura 72 a seguir, apresentam os resultados das leituras realizadas nas células de carga instaladas nos tirantes dessa seção.

Em quanto à carga de trabalho de projeto, os tirantes 48H e 48K apresentaram sua carga final igual à carga de trabalho, e os tirantes 48B e 48E sua carga final medida foi menor em aproximadamente 15% da carga de trabalho projetada.

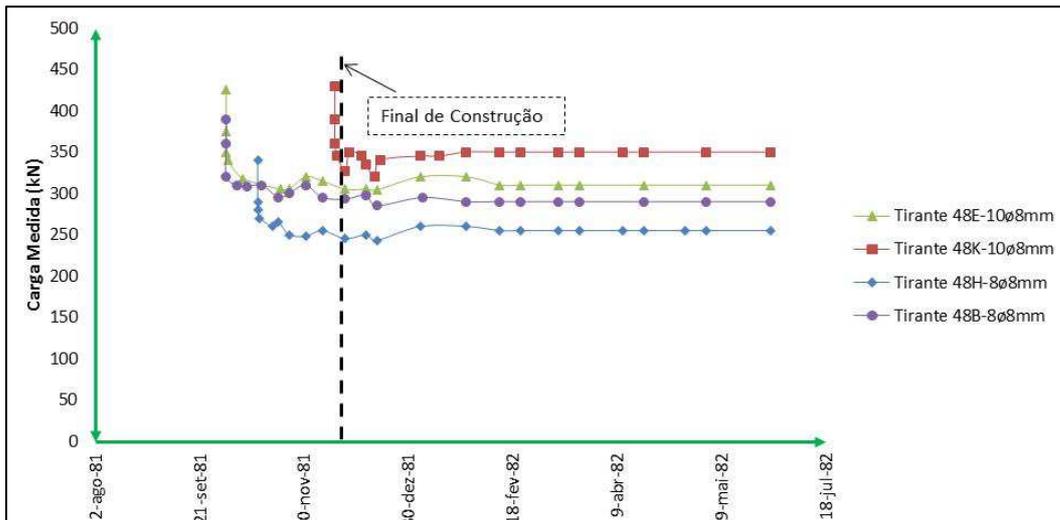


Figura 71. Curva Carga contra Tempo dos Tirantes instrumentados da Seção 48.

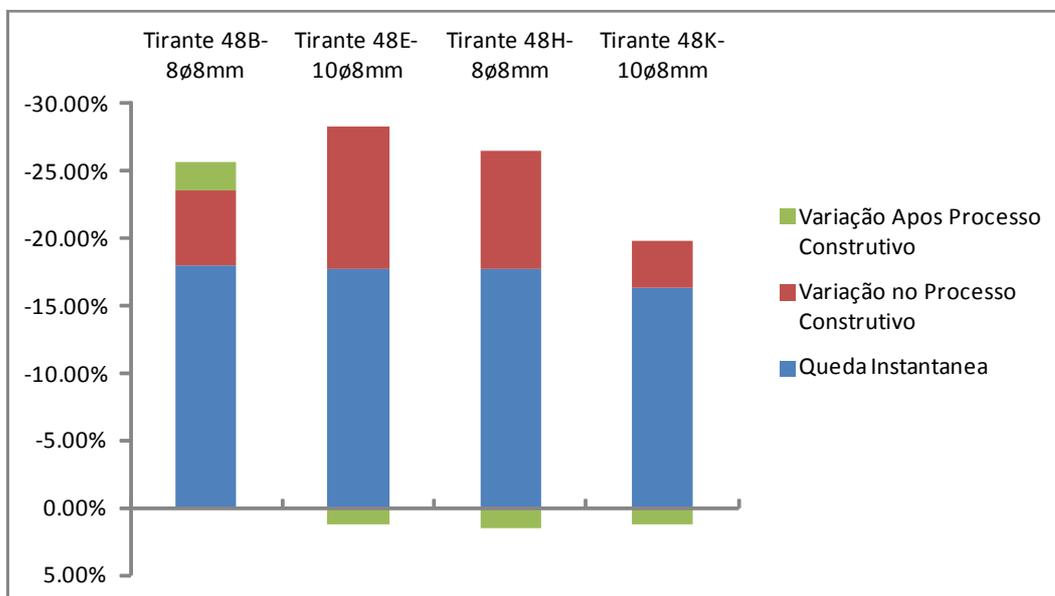


Figura 72. Perdas e Ganhos de Carga dos Tirantes instrumentados da Seção 48.

5.3.5. Seção 51 da Cortina.

Nessa seção foram registrados dois comportamentos novos nos tirantes instrumentados, um deles corresponde ao tirante 51D, o qual se caracterizo por ter uma acentuada perda durante o período do processo construtivo, a qual correspondeu aproximadamente ao 50% da carga de cravação que somada a perda instantânea deu uma perda total de 58%. A carga final desse tirante foi de 200 kN, muito baixa com respeito a carga de trabalho de 350 kN, a modo de diminuir os deslocamentos e aproveitar o trabalho do tirante, se realizou uma reprotensão do tirante após da

construção da cortina, com a qual a carga final do tirante ficou muito próxima da carga de trabalho.

O outro comportamento novo se apresentou no tirante 51A, o qual foi característico por apresentar uma queda instantânea acompanhada de oscilações desde o dia de protensão até o dia de estabilização. Ditas oscilações podem se explicar por a ação de cargas móveis acima da cortina, como pode ser equipamentos o devido ao funcionamento da via férrea. Esse tirante apresentou uma perda total de carga total de aproximadamente 55% e sua carga final foi de 125 kN a metade da carga de trabalho projetada.

O tirante 51J apresentou uma perda instantânea maior aos 20%, mas teve um aumento durante o período do processo construtivo quase o 5% da carga de instalação.

Os tirantes 51G e 51J estabilizaram-se com uma carga final de 23 de 34 toneladas respectivamente, cargas levemente menores a carga de trabalho.

Os tempos de estabilização variaram de 15 dias a 7 meses, correspondendo aos tirantes 51G e 51A respectivamente.

A Figura 73 e a Figura 74 a seguir apresentam o comportamento e variações de carga dos tirantes.

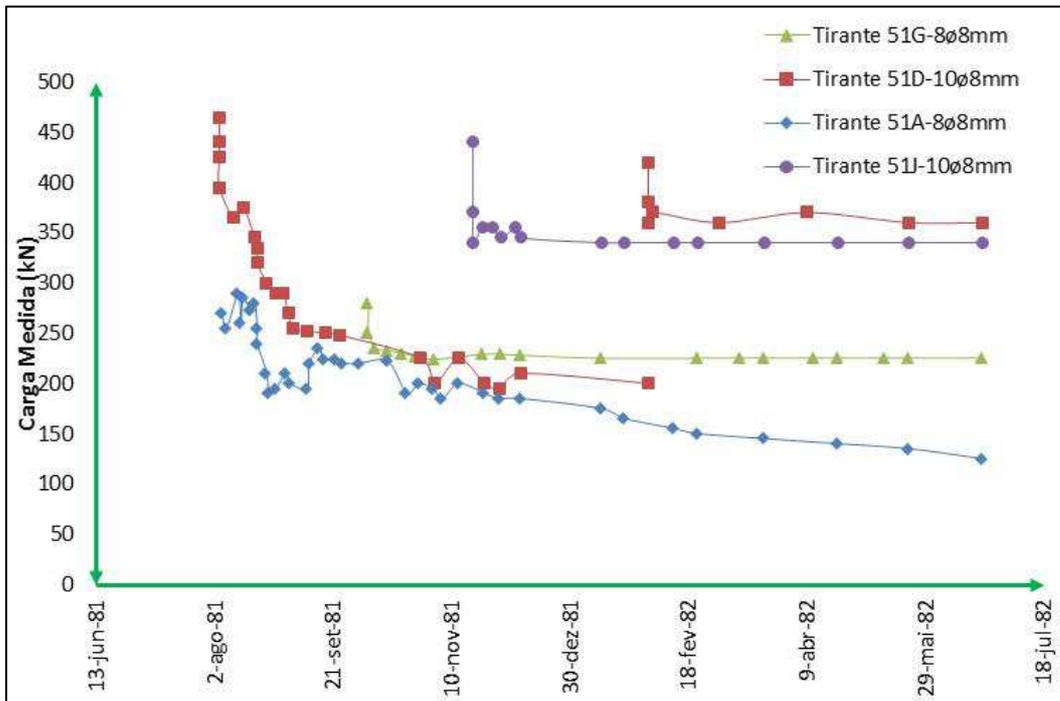


Figura 73. Curva Carga contra Tempo dos Tirantes instrumentados da Seção 51.

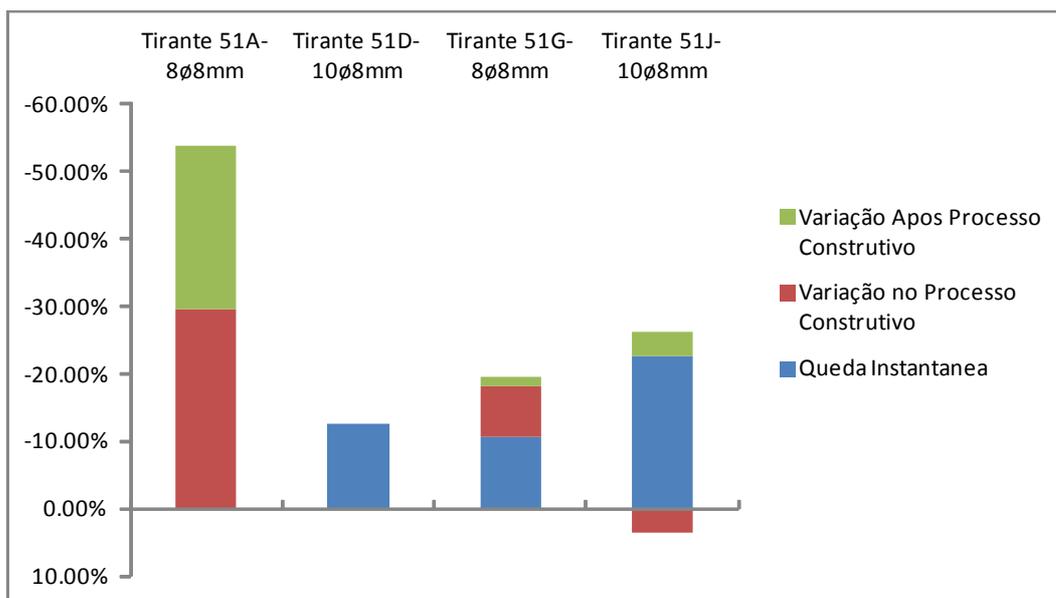


Figura 74. Perdas e Ganhos de Carga dos Tirantes instrumentados da Seção 51.

5.3.6. Seção 54 da Cortina.

O comportamento dos tirantes dessa seção já tem sido apresentado por tirantes das seções anteriores, correspondendo para o tirante 54B as oscilações desde o dia de instalação e para os outros uma queda

instantânea acompanhada por uma queda em menor proporção gradativa ao longo do período de construção.

Os tirantes dos níveis B, E e K desta seção estabilizaram sua carga em um valor de 300 kN e apresentaram perdas totais até de 30%, o tirante 54H apresentou uma perda de carga total de 35% o que corresponde a um valor de carga final de 210 kN igual à carga de incorporação para os tirantes de 250 kN de carga de trabalho.

Os tempos de estabilização foram como observados anteriormente dispersos, variando entre 1 e 3 meses após da cravação.

A Figura 75 apresenta a curva carga ao longo de tempo e a Figura 76 mostra os valores de perda de carga instantânea, ao longo do processo construtivo a pós de terminada a construção da cortina para os tirantes instrumentados nessa seção.

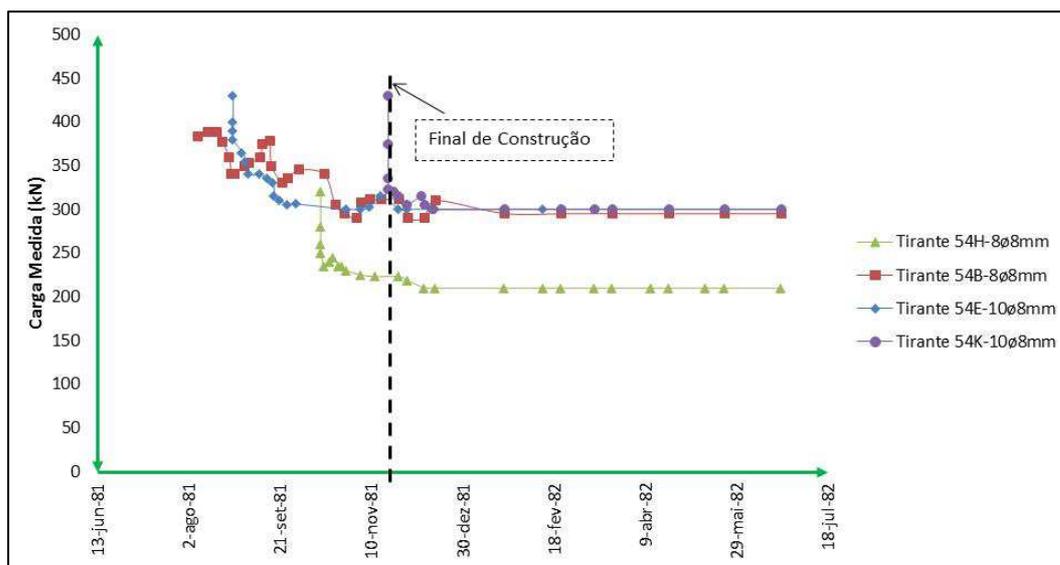


Figura 75. Curva Carga contra Tempo dos Tirantes instrumentados da Seção 54.

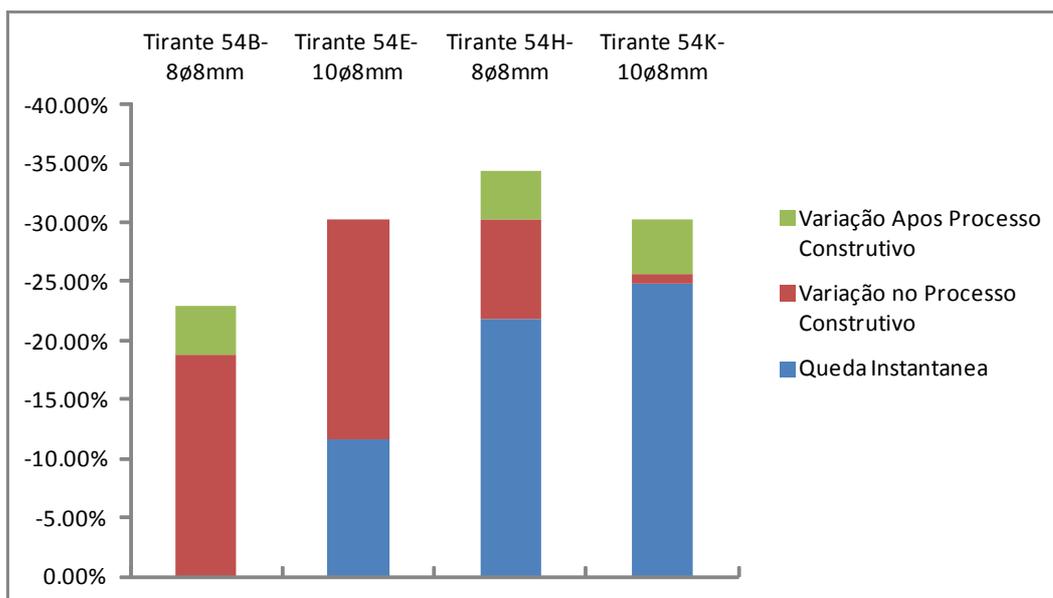


Figura 76. Perdas e Ganhos de Carga dos Tirantes instrumentados da Seção 54.

5.3.7. Seção 57 da Cortina.

Nessa seção se apresentou um novo tirante com uma queda acentuada durante o processo construtivo, portanto se decidiu fazer uma reprotensão após da construção da cortina para verificar as cargas reais nesse nível da seção. O tirante em menção foi o 57D, que estabilizou em um valor de carga final após da reprotensão de 300 kN.

Nos tirantes instrumentados dessa seção não foi verificado perda de carga após do processo construtivo, as perdas registradas após da construção da cortina foram as correspondentes à reprotensão do tirante 57D.

O tirante 57G apresentou um aumento de carga ao final do processo construtivo, mas durante todo o período de atividades de construção se reportou uma perda de aproximadamente o 3%.

As cargas finais dos quatro tirantes instrumentados nessa seção foram menores que a carga de trabalho, ao único tirante que ficou com uma carga menor à carga de incorporação foi o tirante 57A, que correspondeu a 180 kN. A Figura 77 e a Figura 78 a seguir apresentam o comportamento dos tirantes dessa seção.

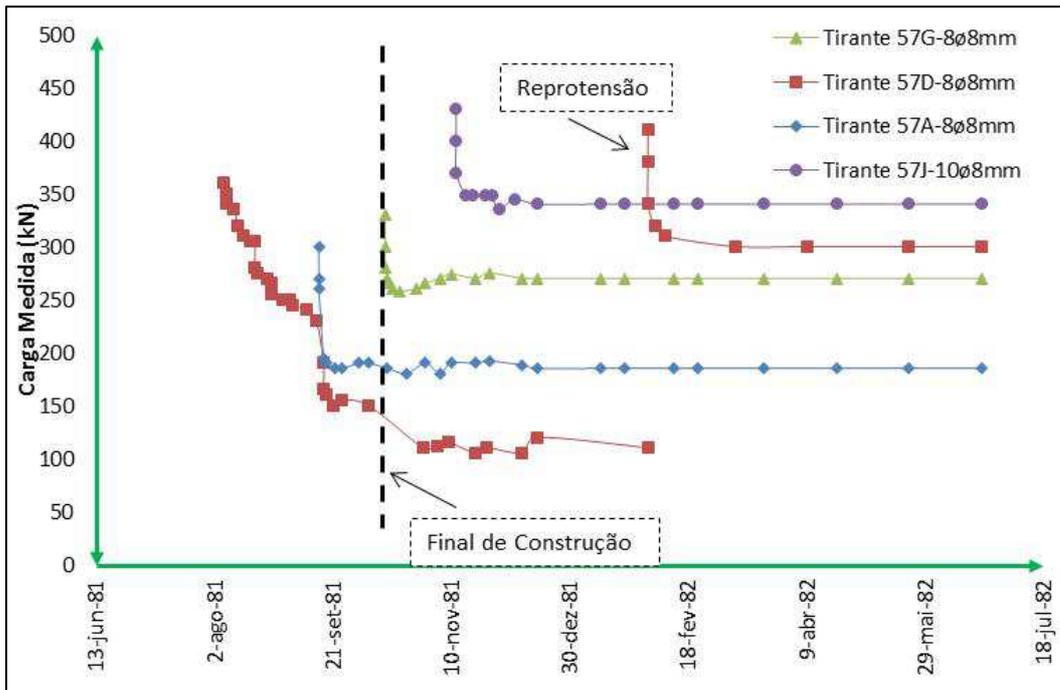


Figura 77. Curva Carga contra Tempo dos Tirantes instrumentados da Seção 57.

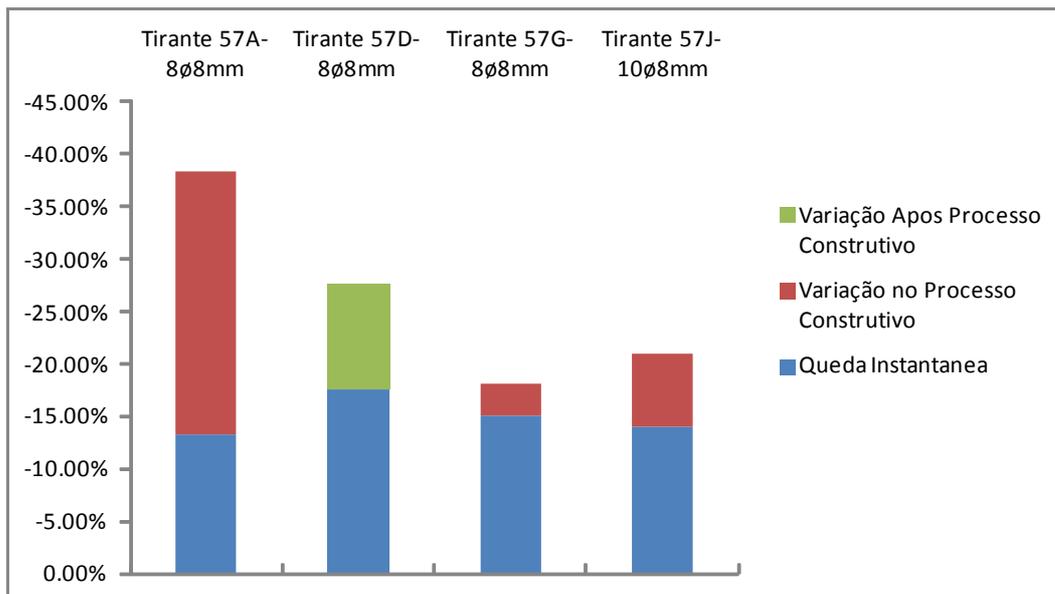


Figura 78. Perdas e Ganhos de Carga dos Tirantes instrumentados da Seção 57.

5.3.8. Seção 60 da Cortina.

Os tirantes dos níveis superiores que correspondem ao 60B e 60E de carga de trabalho de 30 toneladas apresentaram o mesmo comportamento, com uma perda de carga instantânea de 14% seguidos de uma perda adicional de 15 e 20% respectivamente, para finalmente ficar em um valor de carga de 300 kN.

O tirante 60H de carga de trabalho de 250 kN registrou uma perda inicial de aproximadamente 60 kN, seguido de uma perda durante o período construtivo de 10 kN até o dia de sua estabilização, antes de terminar a construção da cortina.

Os três tirantes mencionados acima não apresentaram perdas de carga após da construção da cortina e seu tempo de estabilização foi relativamente curto, indo desde uma semana até um mês após sua cravação.

O tirante 60K, o único tirante que apresentou perdas de carga após da construção da cortina, demora um tempo igual a um mês para estabilizar sua carga em um valor final de 240 kN.

A Figura 79 e a Figura 80 a seguir apresentam as curvas de carga ao longo do tempo e o resumo das variações de carga para os quatro tirantes.

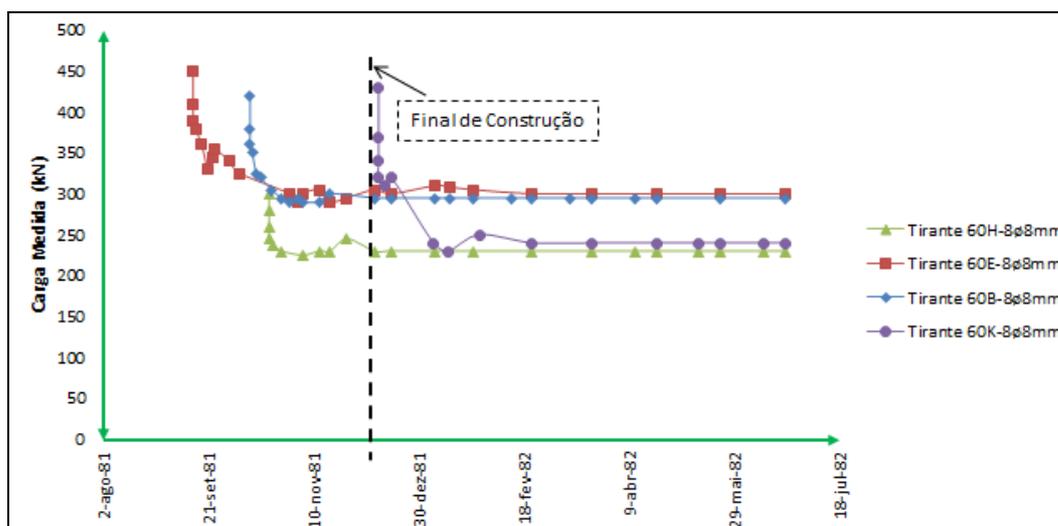


Figura 79. Curva Carga contra Tempo dos Tirantes instrumentados da Seção 60.

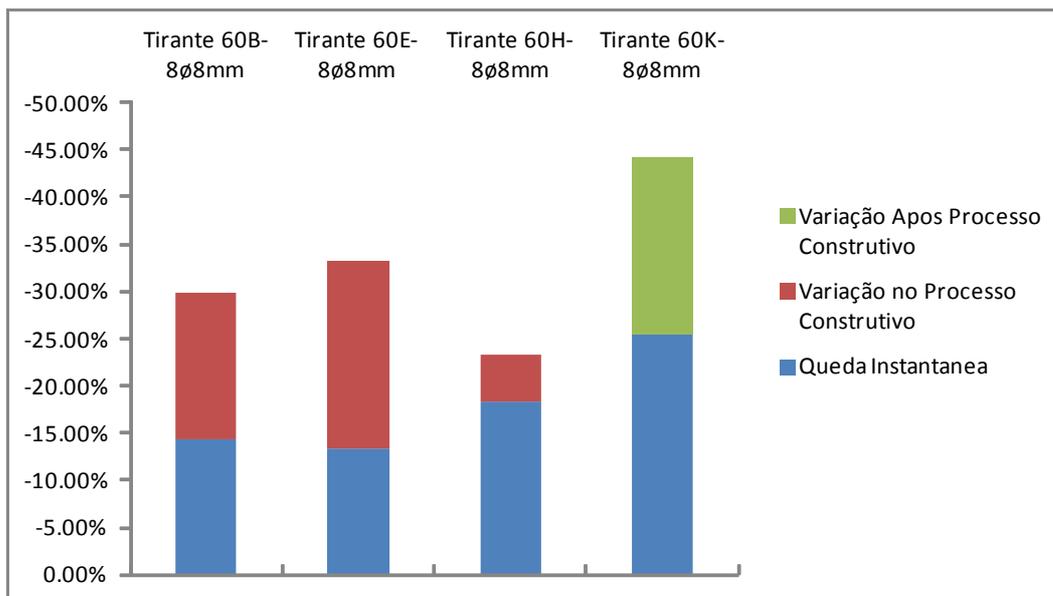


Figura 80. Perdas e Ganhos de Carga dos Tirantes instrumentados da Seção 60.

5.3.9. Seção 66 da Cortina.

Novamente nessa seção se apresentou um tirante com uma perda acentuada, o tirante em menção é o tirante 66C, que em um período de três dias após sua cravação registro uma perda de 100 kN e em os dias seguintes até o momento de sua reprotensão registro uma perda de 290 kN adicionais, chegando até um valor de 60 kN. Após da sua reprotensão o tirante apresentou uma perda instantânea de 60 kN e atingiu sua estabilização em uma carga final correspondente a 320 kN, menor que a carga de trabalho.

Os outros dois tirantes apresentaram um comportamento já mencionado em outros tirantes, onde a maior perda se apresenta no instante após da protensão seguido de uma pequena parcela de perda de carga durante o período de construção, e atingindo sua estabilização antes da terminação final das atividades de construção.

As perdas totais variaram entre o 20 e 30% da carga de cravação como pode ser observado na Figura 81 e na Figura 82 a seguir.

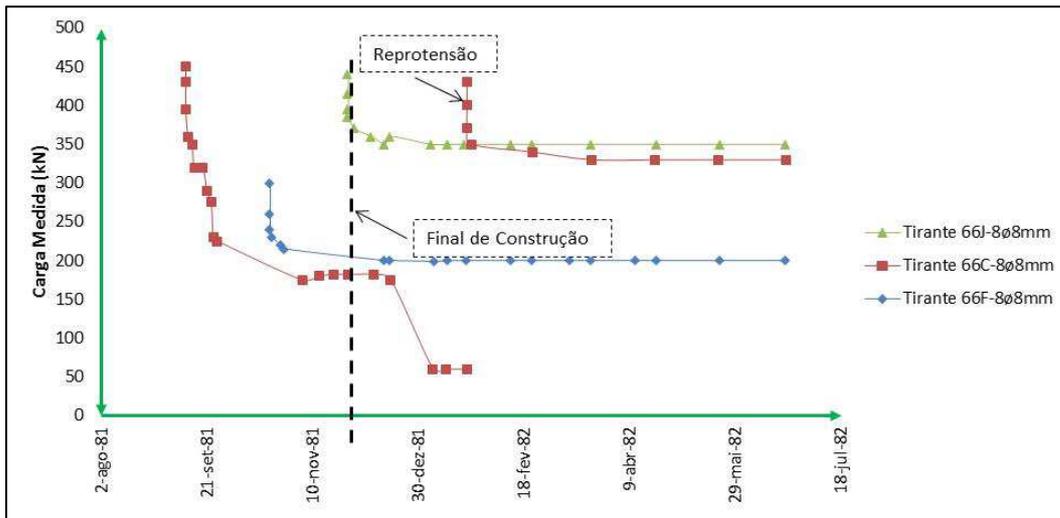


Figura 81. Curva Carga contra Tempo dos Tirantes instrumentados da Seção 66.

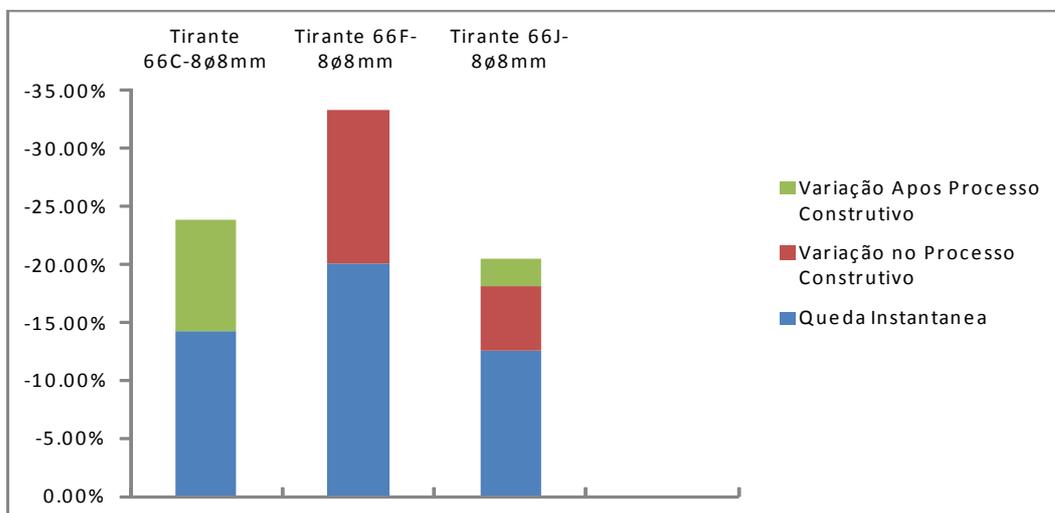


Figura 82. Perdas e Ganhos de Carga dos Tirantes instrumentados da Seção 66.

5.3.10. Seção 69 da Cortina.

Finalmente, a última seção instrumentada não apresentou novos comportamentos dos tirantes, sendo a característica representativa para os tirantes dos níveis inferiores a perda instantânea a maior parcela da perda total de carga.

As perdas totais registradas nas leituras das células de carga para os tirantes dessa seção foram de 25% para o 69I e de 36% para o 69E e o 69E.

O tempo de estabilização dos dois tirantes dos níveis superiores variou de uma semana a um mês, sendo para o nível superior de perto de 6 meses.

As cargas finais para os três tirantes foram menores de que 80% da carga de trabalho de projeto.

A Figura 83 e a Figura 84 a seguir apresentam como foi costume o comportamento dos tirantes instrumentados dessa seção.

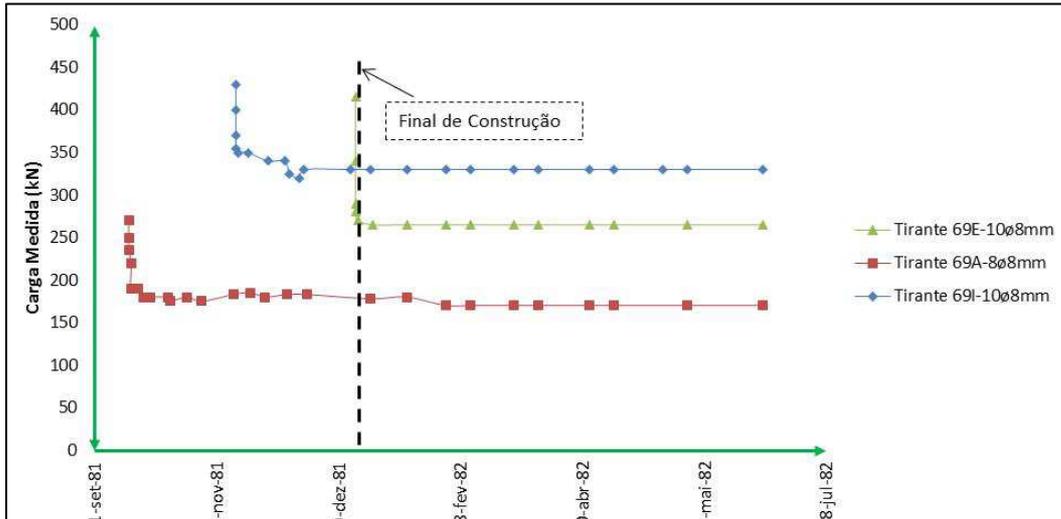


Figura 83. Curva Carga contra Tempo dos Tirantes instrumentados da Seção 69.

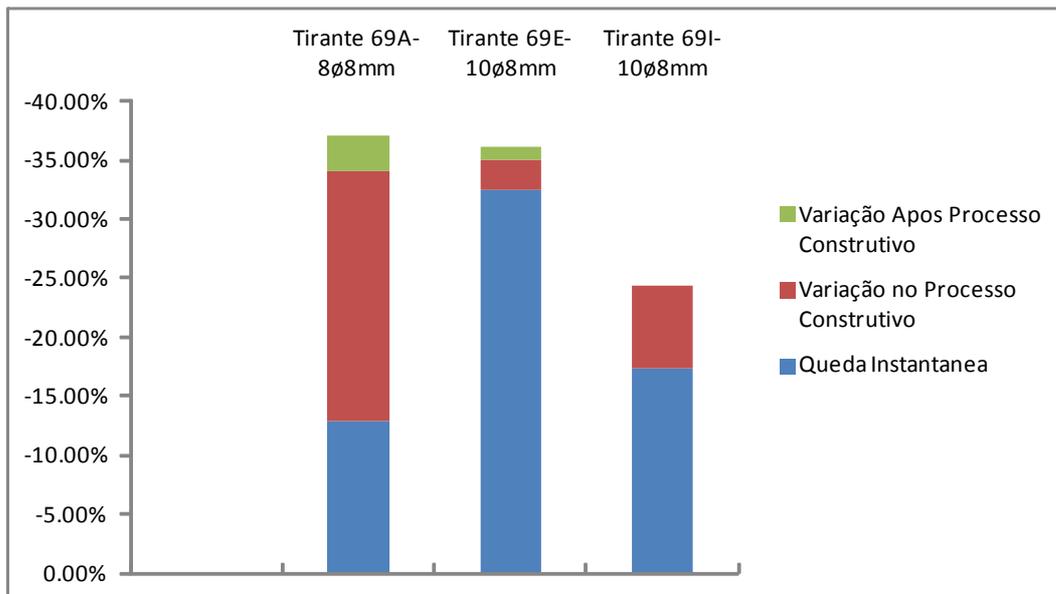


Figura 84. Perdas e Ganhos de Carga dos Tirantes instrumentados da Seção 69.

Em geral para as dez seções instrumentadas, as maiores perdas de carga foram apresentadas nos níveis superiores, registrando uma carga final de aproximadamente de 80% da carga de trabalho, em quanto os níveis inferiores ficaram com carga final muito perto à carga de trabalho, portanto registraram menores perdas.

5.4.

Comparação entre os valores de carga medidos e os teóricos encontrados na literatura.

A seguir, é apresentada uma comparação entre as cargas finais medidas entre os tirantes e as cargas de projeto para garantir a estabilidade com um fator de segurança de 1,5, estimadas segundo dois dos métodos apresentados no capítulo 2.

As seções escolhidas para o estudo comparativo foi a que apresentou o menor e o maior somatório de forças em todos os tirantes, o valor da força nos tirantes não instrumentados para as seções entre a 38 e a 66 foi estimado com interpolação linear com os valores entre os dois tirantes instrumentados adjacentes do mesmo nível um de cada lado do tirante, por exemplo, para o tirante 54C, se utilizaram os valores medidos nos tirantes 38C e 66C, e se realizou interpolação linear da carga com respeito a distancia horizontal. Os valores para os tirantes sem instrumentar das seções 34 e 69 foram obtidos a partir de extrapolação com os dois tirantes adjacentes e internos, por exemplo, para o tirante 34G se utilizaram os dados medidos nos tirantes 45G e 51G, e se realizou extrapolação linear com respeito à distancia entre eles. A Tabela 12 a seguir apresenta os valores de carga finais nos tirantes, sendo os números em negrito os correspondentes aos tirantes instrumentados.

Tabela 12. Forças finais nos tirantes e somatório em toneladas.

		SEÇÃO									
		34	38	45	48	51	54	57	60	66	69
NÍVEL	A	245,0	221,4	180,0	152,5	125,0	155,0	185,0	181,3	173,8	170,0
	B	278,3	281,7	287,5	290,0	292,5	295,0	295,0	295,0	295,0	295,0
	C	394,3	385,0	368,8	361,8	354,8	347,9	340,9	333,9	320,0	313,0
	D	435,0	415,0	380,0	365,0	350,0	320,0	290,0	260,0	200,0	170,0
	E	375,0	356,4	323,9	310,0	305,0	300,0	300,0	300,0	276,7	265,0
	F	285,7	275,0	256,3	248,2	240,2	232,1	224,1	216,1	200,0	192,0
	G	210,8	214,2	220,0	222,5	225,0	247,5	270,0	292,5	337,5	360,0
	H	360,0	330,0	277,5	255,0	232,5	210,0	220,0	230,0	250,0	260,0
	I	300,0	302,9	307,9	310,0	312,1	314,3	316,4	318,6	322,9	325,0
	J		320,0	365,0	352,5	340,0	340,0	340,0	343,3	350,0	353,3
	K		433,3	375,0	350,0	325,0	300,0	270,0	240,0	180,0	
	L			385,0	347,5	310,0	260,0	200,0			
SOMATÓRIO		2884,2	3534,8	3341,8	3217,5	3102,1	3061,8	3051,4	3010,7	2905,8	2703,3

Como pode se observar na Tabela 12, a seção 57 foi a que se estima que tem a o menor somatório das cargas dos tirantes na parte de maior altura de cortina e a seção 45 corresponde ao maior somatório de forças nos tirantes para a mesma altura de cortina, essas secos são as que foram comparadas com os empuxos teóricos a seguir.

5.4.1. Verificação da Estabilidade pelo Método de Costa Nunes e Velloso (1963)

Para a estimativa da força total da ancoragem por este método utilizaram-se os seguintes parâmetros de resistência do solo adotados e geometria da cortina:

- ✓ Altura da cortina = 18 m;
- ✓ Peso específico aparente do solo $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$;
- ✓ Ângulo de resistência ao cisalhamento do solo = 20, conforme a Tabela 10°;
- ✓ Inclinação da cortin = 90°;
- ✓ Inclinação dos tirantes com a horizontal = 20°;
- ✓ Fator de segurança requerido = 1,5;
- ✓ Sobrecarga devido ao uso = 20 kN por metro linear;

Com a geometria da cortina e o peso específico do solo se tem um peso da cunha crítica correspondente a 188 toneladas por metro linear.

Substituindo os valores acima na Equação 2 se tem um valor de ancoragem por metro linear de 1660 kN. A separação de cada coluna de tirantes é de dois metros, portanto a força total nos tirantes para garantir um fator de segurança de 1,5 estimada por esse método é de 332 toneladas.

Esse valor é similar ao valor obtido nas medições e interpolações das cargas nos tirantes da seção 45, o que representa que o método de Costa Nunes e Velloso é aplicável com grande exatidão ao caso em estudo. Em comparação com a seção em que se obtiveram os menores valores de força nos tirantes, correspondente a seção 57, pode se dizer que os empuxos reais nesta seção são menores que os de projeto em quase 10%, o que pode garantir um fator de segurança maior a 1,5 para essa seção.

5.4.2.

Forças nos tirantes pelo diagrama de empuxo proposto por Terzaghi e Peck (1967) e pela FHWA (USA 1999).

O comparativo feito neste item envolve as forças medidas nos tirantes e as forças estimadas seguindo os procedimentos descritos no Ground Anchors and Anchored Systems publicado pela FHWA. Para o cálculo das cargas de pressão de terra sobre a estrutura, se utilizou um diagrama de pressão de terras aparente. O uso de diagramas de pressão de terras se remonta aos trabalhos apresentados por Terzaghi e Peck na década de 1940. Os diagramas semi-empíricos foram desenvolvidos a partir das cargas pontuais medidas para escavações ancoradas internamente. Os diagramas originais de Terzaghi e Peck se têm modificado nos últimos anos, mas em geral são consistentes com a investigação original. Os procedimentos da FHWA recomendam um diagrama trapezoidal para areias com a forma dependendo da posição dos tirantes superior e inferior. A Figura 85 apresenta o diagrama resultante segundo o procedimento da FHWA para tirantes simples e

múltiplos tirantes assim como os diagramas recomendados por Terzaghi e Peck.

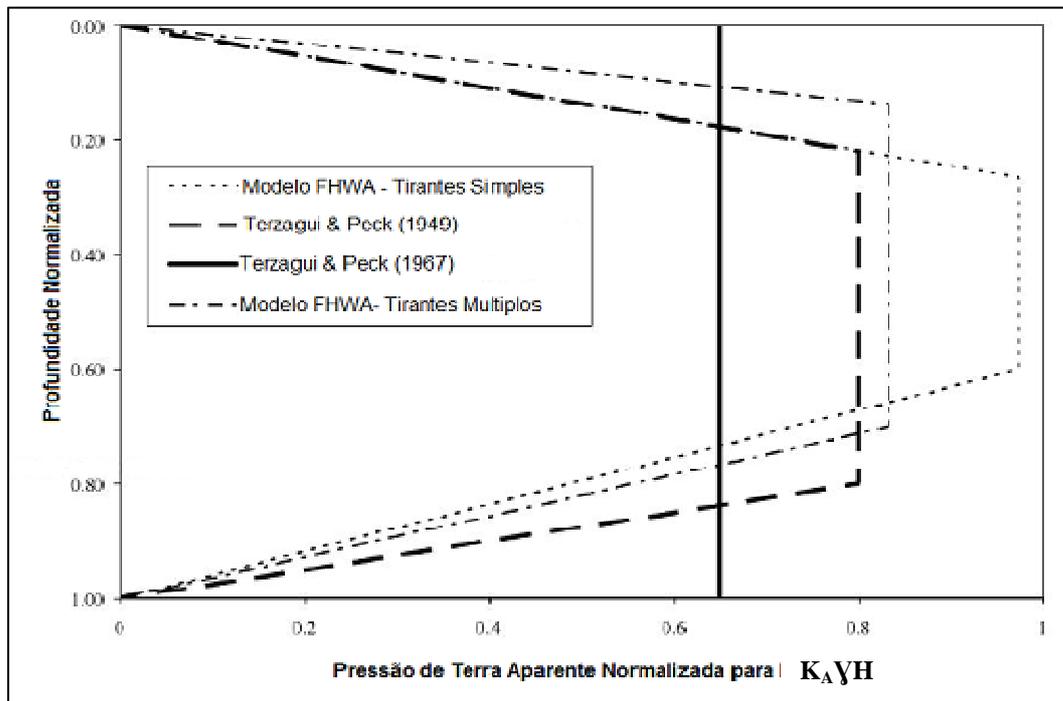


Figura 85. Diagramas de pressão de terras propostos para areias.

Como foi apresentado no capítulo 2 na Figura 10, a máxima carga total de pressão em solos arenosos obtida dos diagramas teóricos propostos por Terzaghi e Peck (1967), está definida por:

$$T_l = 0,65 \cdot K_A \cdot \gamma \cdot H^2 + q \cdot K_A \cdot H$$

Equação 23

Onde:

T_l é a Carga total de pressão de terra (kN/m).

K_A é coeficiente lateral de empuxo ativo de terras de Rankine;

q é a sobrecarga estimada;

H é a altura da cortina.

Os valores de carga de pressão total para solos granulares, tanto para estruturas onde se permite deformação ou para as estruturas onde não se permite, devem ser convertidas a um diagrama de pressão

aparente como se apresenta na Figura 86 como é recomendada pela FHWA dos Estados Unidos.

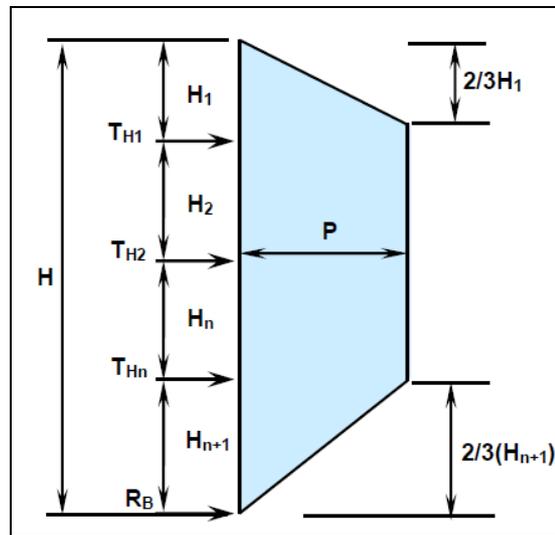


Figura 86. Diagrama aparente para estruturas com múltiplos tirantes.

A pressão de transformação que estabiliza o corte segundo o diagrama de pressão aparente para estruturas com múltiplos níveis de tirantes é:

$$P = \frac{T_L}{H - \frac{1}{3}H_1 - \frac{1}{3}H_{n+1}} \quad \text{Equação 24}$$

Onde:

H_1 = Profundidade do primeiro tirante (m).

T_H = Componente horizontal da força do tirante (kN/m).

T_L = Carga total de pressão de terra (kN/m).

P = Carga de pressão que estabiliza o corte (kN/m²).

H_{n+1} = Profundidade inferior ao enésimo tirante (m).

R_B = Carga de reação na base (kN/m).

As fórmulas utilizadas para o cálculo das componentes horizontais das forças nos tirantes pelos diagramas de pressão aparente incluindo a sobrecarga uniforme empregando o método de áreas tributárias são as seguintes:

$$T_{H1} = \left[\left(\frac{2}{3} \right) \cdot H_1 + \left(\frac{1}{2} \right) \cdot H_2 \right] \cdot P + \left(H_1 + \frac{H_2}{2} \right) \cdot q \cdot K_A \quad \text{Equação 25}$$

$$T_{H2} = \left[\left(\frac{1}{2} \right) \cdot H_2 + \left(\frac{1}{2} \right) \cdot H_n \right] \cdot P + \left(\frac{H_2}{2} + \frac{H_n}{2} \right) \cdot q \cdot K_A \quad \text{Equação 26}$$

$$T_{Hn} = \left[\left(\frac{1}{2} \right) \cdot H_n + \left(\frac{2}{3} \right) \cdot H_{n+1} \right] \cdot P + \left(\frac{H_n}{2} + H_{n+1} \right) \cdot q \cdot K_A \quad \text{Equação 27}$$

Utilizando a Equação 23, estima-se um valor de 2035,1 kN/m correspondente à carga total de pressão.

Obteve-se um valor de empuxo que estabiliza o corte definido pela Equação 24 de 119,7 kN/m².

A carga no tirante do nível A, é calculado a partir da

Equação 25, no qual corresponde a um valor 164,3 kN/m.

As cargas nos tirantes dos níveis B até K foram calculadas pela Equação 26, e se obteve um valor de 194,3 kN/m.

Finalmente o valor correspondente à carga do nível mais profundo (Nível L), foi estimado pela Equação 27, e se obteve um valor de 164,3 kN/m.

Os valores anteriores devem ser multiplicados pelo espaçamento entre colunas de tirantes, para estimar a carga total em kN, em nosso caso dito espaçamento é de 2 metros.

A Tabela 13 apresenta os valores calculados pelo método descrito acima para todos os níveis da cortina em sua parte central. Como pode se observar, em sua grande maioria os empuxos estimados são muito próximos que os empuxos medidos em campo nas seções instrumentadas.

Tabela 13. Valores de carga nos tirantes utilizando os diagramas de empuxo propostos pelo FHWA.

Nível	Carga (kN)
A	328,7
B	388,6
C	388,6
D	388,6
E	388,6
F	388,6
G	388,6
H	388,6
I	388,6
J	388,6
K	388,6
L	328,7

A Figura 87 a seguir apresenta a envoltória da componente horizontal dos empuxos medidos em campo para a seção 57 correspondente à de menor somatória de forças desde o momento de sua incorporação até a estabilização das cargas nos tirantes, e os estimados pelos Diagramas de empuxo propostos pela FHWA e por Terzaghi e Peck (1967).

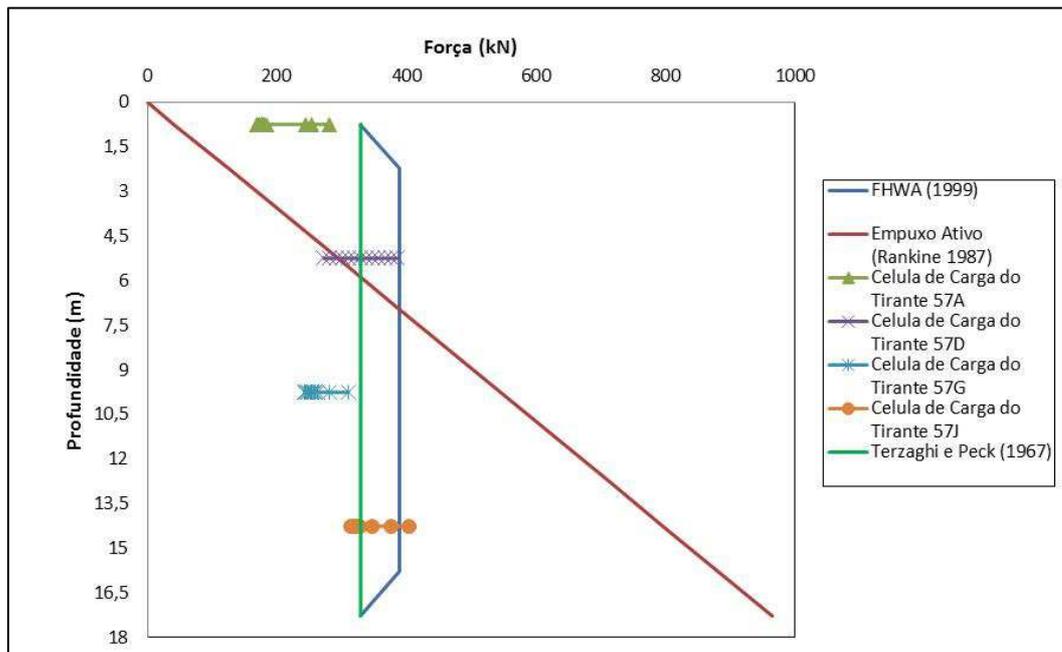


Figura 87. Envoltória de Forças medidas em campo e estimadas pelos Diagramas de empuxo propostos para a seção 57 pela FHWA e por Terzaghi e Peck (1967).

Similarmente a Figura 88 a seguir apresenta a envoltória da componente horizontal dos empuxos medidos em campo para a seção 45 correspondente à de maior somatória de forças desde o momento da cravação até estabilizar as forças nos tirantes, e os estimados pelos Diagramas de empuxo propostos pela FHWA e por Terzaghi e Peck (1967).

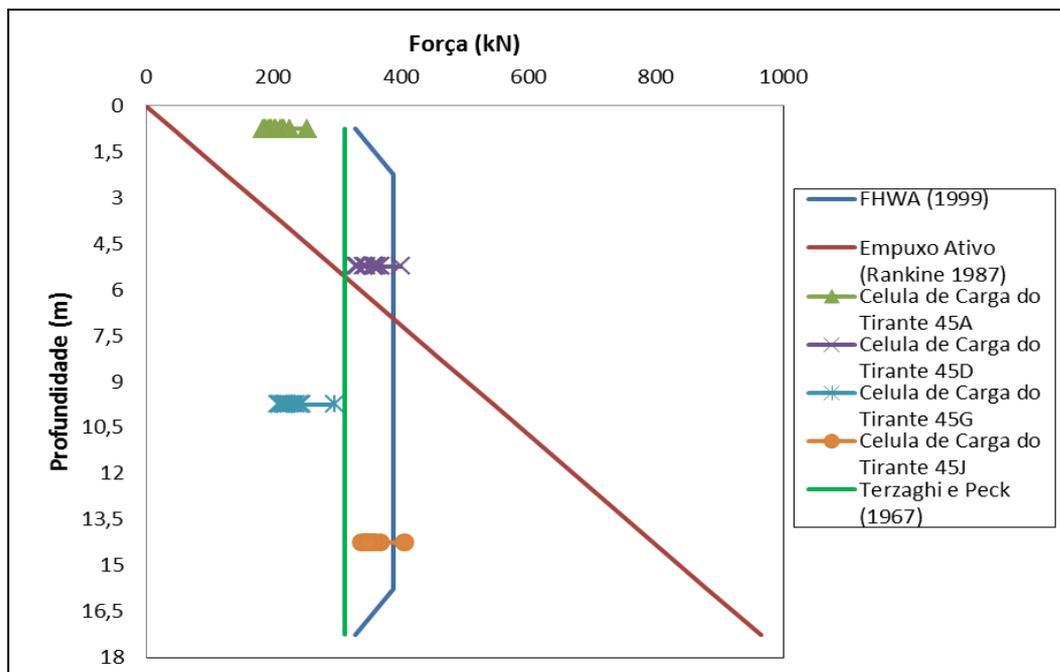


Figura 88. Envoltória de Forças medidas em campo e estimadas pelos Diagramas de empuxo propostos para a seção 45 pela FHWA e por Terzaghi e Peck (1967).

5.4.3. Retroanálise dos parâmetros de resistência

Estabelecendo a hipótese em que a somatória das forças nos tirantes é igual e contrária a resultante dos diagramas propostos por Terzaghi e Peck (1967), pode se obter o valor retro analisado de campo do ângulo de atrito do solo do local. O procedimento feito para as dez seções é o descrito a seguir:

- ✓ Igualando a somatória das forças medidas em campo para cada seção apresentados na Tabela 12 com o empuxo total definido pela Equação 23

- ✓ pode-se obter a seguinte expressão para o coeficiente lateral de empuxo somando a pressão devido à sobrecarga devido ao uso:

$$T_L = 0,65 \cdot K_A \cdot \gamma \cdot H^2 + q \cdot H \quad \text{Equação 28}$$

$$K = \frac{T_L}{0,65 \cdot \gamma \cdot H^2 + q \cdot H} \quad \text{Equação 29}$$

Os valores obtidos para o coeficiente de empuxo são apresentados na Figura 89, esses valores são menores ao valor do coeficiente de empuxo no repouso definido por Jaky (1944), para esse caso corresponde a um valor de 0,65; os valores retro analisados de campo na média 40% menores do teórico proposto por Jaky (1944), o que corresponde quase à condição limite ativa para umas poucas seções.

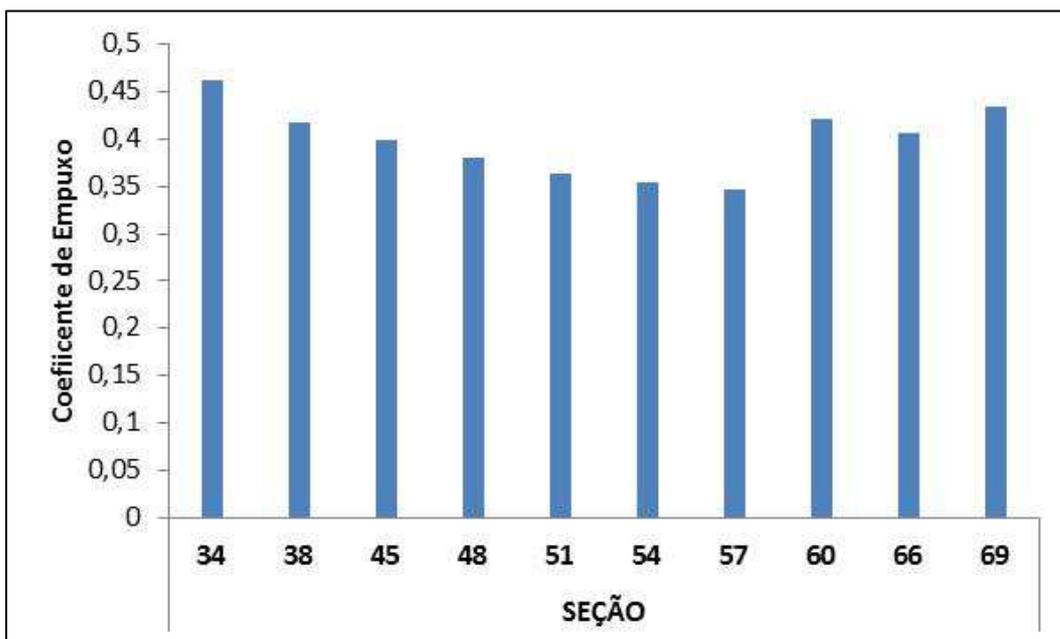


Figura 89. Valores retro analisados do coeficiente de empuxo lateral.

- ✓ Estimando o valor do coeficiente de empuxo para todas as seções instrumentadas pode-se obter o valor retroanalisado para o parâmetro do ângulo de atrito, correspondente ao ângulo de atrito mobilizado, mediante a formulação para a geometria da estrutura estudada e definida pela Equação 30 desenvolvida da equação do coeficiente lateral de empuxo original de Rankine e apresentada a seguir.

$$\varphi = 2 \tan^{-1} (45^\circ - \sqrt{K_A})$$

Equação 30

O valor obtido mediante essa análise é apresentado na Figura 90 para as dez seções instrumentadas.

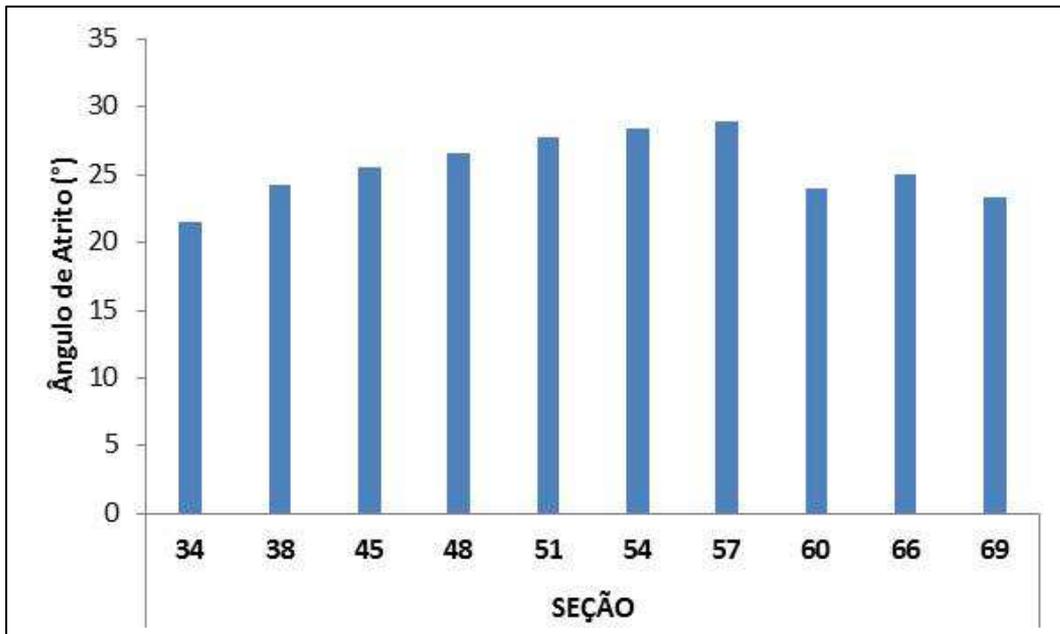


Figura 90. Valores retro analisados do ângulo de atrito mobilizado.

Pode se observar no gráfico acima que os valores retro analisados apresentam grande similitude, e no qual se estimou um valor médio de 25° para esse parâmetro de resistência, maior ao valor adotado para todas as estimativas feitas nesse trabalho e consistentes com os aportados na literatura consultada e apresentados na Tabela 10.