

Categoria 3 – Engenharia

Estudo de caso da transferência de carga aplicada na interface das estruturas de ligação da  
estação Congonhas da Linha 17 - Ouro com o Aeroporto de Congonhas.

## Introdução

A interface entre estruturas novas e antigas sempre foi um dos grandes desafios do desenvolvimento urbano nas grandes cidades, especialmente naquelas em que a expansão é acompanhada da preservação de construções históricas e com valor arquitetônico significativo. A Companhia do Metropolitano de São Paulo, justamente pela natureza da sua atuação, constrói a mais de 50 anos enfrentando esse tipo de situação com uma certa regularidade, pode-se citar exemplos como as transferências de carga ocorridas durante a construção da linha 3 na subfundação do pilar P42 do Elevado Costa e Silva, da linha 2 em edifícios vizinhos ao túnel NATM na Rua Paraíso altura do número 99 e também, mais recentemente, no edifício Consolata<sup>1</sup> durante a construção da linha 4.

Foi, porém, durante a construção da linha 17 – Ouro que pela primeira vez se realizou transferência de carga e ampliação da capacidade estrutural em um já bem estabelecido aeroporto da cidade e patrimônio municipal tombado.

A linha 17 - Ouro foi lançada no ano de 2012, com o objetivo de conectar a estação Jabaquara da linha 1 - Azul com a estação Morumbi da linha 4 - Amarela. O modal de transporte escolhido foi o de monotrilho devido a demanda da região ser relativamente inferior à capacidade do Metrô. A linha foi dividida em três trechos, sendo que atualmente o trecho 1 está em construção ligando a estação Morumbi da CPTM a estação Jardim aeroporto, está incluso nessa linha também um enlace a ser realizado na estação Brooklin Paulista finalmente conectando o aeroporto de Congonhas a malha metroviária da cidade (Figura 1).

---

<sup>1</sup> Monitoramento e reforços de estruturas – O caso do edifício Consolata – 17ª Sem. de Tec. Metroferroviária – 2011 – LIMA, J. J.; UEMA, Y.; LEME, S. R. A.



Figura 1 - Visão geral das estações que compõem a linha 17 - Ouro – Fonte: SILVA (2015)

Inicialmente a transferência de carga foi prevista para 8 pilares localizados no pavimento do subsolo, interferindo com áreas da Infraero destinadas na época ao departamento de segurança do trabalho e a identificação de fornecedores, que foram devidamente realocadas. Após vistorias em campo dos elementos estruturais e análise dos parâmetros de cálculo constatou-se que seriam necessários realizar a transferência de carga de apenas 4 pilares. Esse artigo tem o objetivo demonstrar os resultados obtidos durante todo o processo, os tipos de instrumentos utilizados, os desafios enfrentados bem como os resultados observados.

### O processo de transferência de carga

A principal justificativa para a execução da transferência de carga, decorre da necessidade de construção de estruturas de acesso interligando a plataforma da estação diretamente ao saguão do aeroporto, área de embarque/desembarque. A criação dessas estruturas acarreta a introdução de novas cargas as quais a estrutura do aeroporto não estava preparada para

receber, lembrando que essas estruturas já têm a função de suportar 3 pistas de tráfego de veículos para embarque e desembarque de passageiros (cargas dinâmicas). Inicialmente foram identificados 8 pilares (para futura referência os pilares existentes são chamados de PE1 a PE8) na região do subsolo do aeroporto que precisariam ter suas fundações reforçadas, devido a necessidade de escavação de diferentes cotas para os blocos, a transferência deveria ocorrer em 6 pilares na primeira fase (Figura 2) e 2 pilares na segunda (Figura 3). Durante as primeiras reuniões para a preparação do procedimento foram feitas algumas propostas com base em novas informações obtidas em campo, bem como a expertise da empresa que iria executar o macaqueamento (Figura 4).

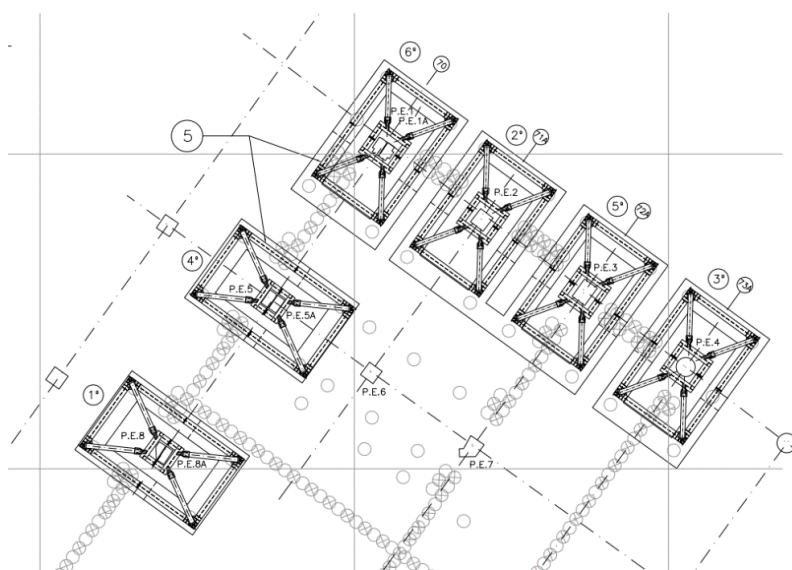


Figura 2 - Primeira etapa da transferência de carga, instalação da estrutura de suporte nos pilares PE1 a PE4, PE5 e PE8.

Dos levantamentos prévios previstos em projeto, as dimensões exatas dos elementos estruturais subsidiaram uma reanálise estrutural, concluindo-se pela supressão da transferência de carga para os pilares PE1 a PE4, mantendo-se apenas o reforço pelo aumento da seção desses pilares (foi constatado também que os blocos de fundação existentes desses pilares estavam abaixo da cota do fundo de laje do saguão do aeroporto).

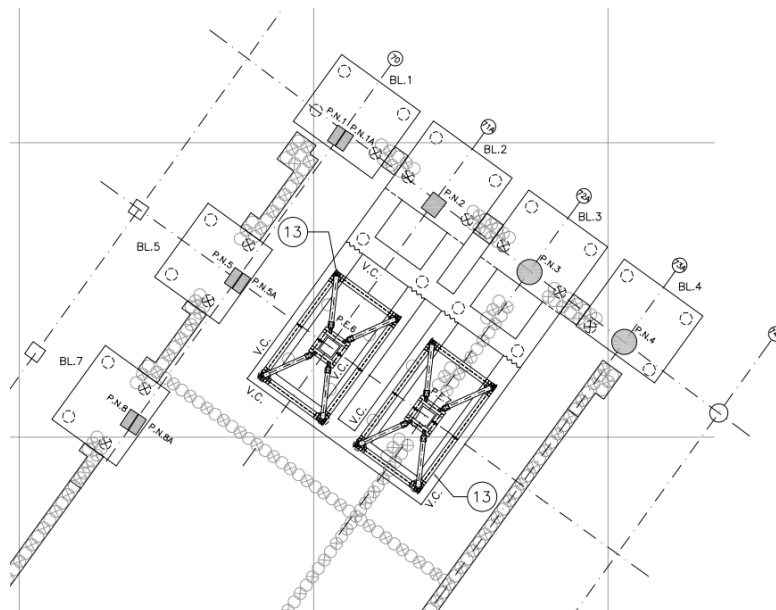


Figura 3 - Segunda etapa da transferência de carga, instalação da estrutura de suporte nos pilares PE6 e PE7.

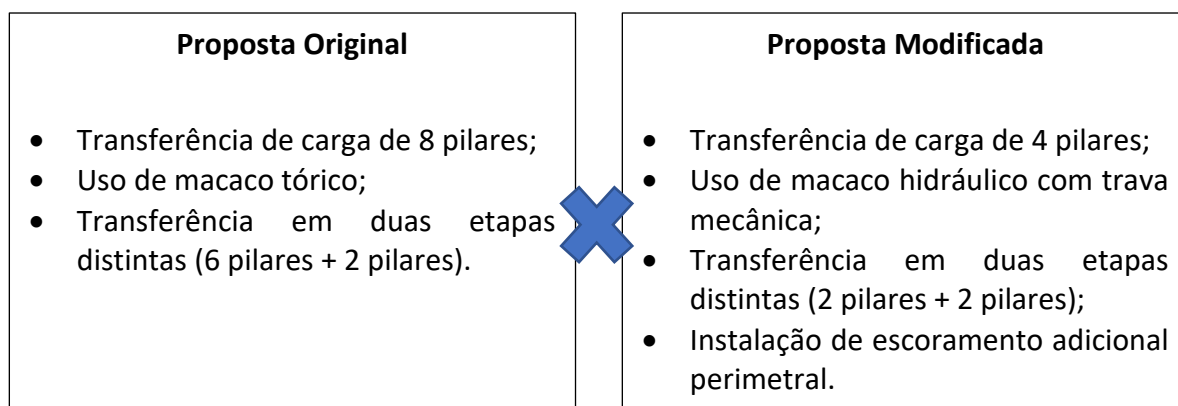


Figura 4 - Modificação da proposta inicial da transferência de carga.

Como medida contingencial de segurança, foi sugerida e implementada a instalação de um escoramento na periferia da área de influência (Figura 7) dos serviços a serem realizados (dimensionado para carga permanente de 5 kN/m<sup>2</sup> + sobrecarga acidental de 8,5 kN/m<sup>2</sup>). Assim, a transferência de carga ficou restrita para o PE5 e PE8 (pilares de junta) numa primeira etapa e a dos pilares PE6 e PE7, mais complexa devido a necessidade de reconstrução de suas fundações em cotas inferiores, ocorreria numa segunda etapa. A supressão do processo para

pilares PE1 a PE4, possibilitou a diminuição da zona de influência de todo o procedimento, o que representou grande vantagem em relação a uma das premissas de projeto na qual os veículos deveriam transitar no máximo a 5 km/h na área de influência (Figura 5). A diminuição da área de influência foi suficiente para uma das pistas de tráfego sair da restrição, facilitando as interfaces externas (Figura 6).

Outra melhoria, foi a alteração do uso dos macacos tóricos para macacos hidráulicos, principalmente devido a facilidade operacional em caso de remaqueamento, o descarte do uso de calços sob o macaco, os ganhos de agilidade no processo e na segurança<sup>2</sup>.

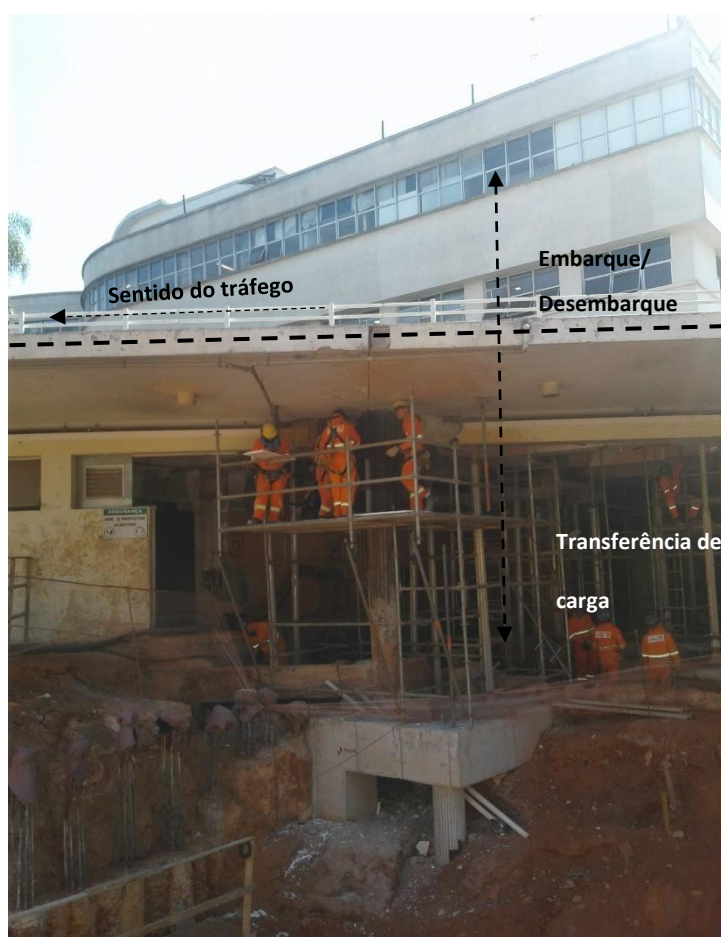


Figura 5 – Aspecto da área da transferência de carga e indicação das pistas de tráfego de veículos.

<sup>2</sup> existência de trava mecânica que impede retrocesso do macaco em caso de sobrecarga inesperada

Concomitante às alterações nos procedimentos executivos e projetos cabíveis, a instrumentação necessária também foi otimizada.

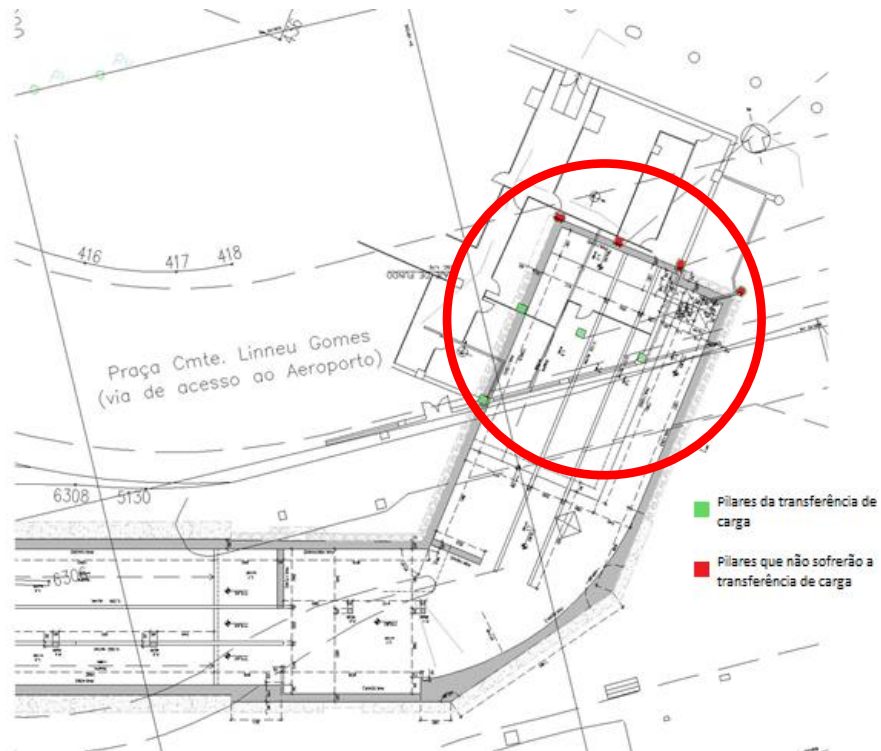


Figura 6 - Área da transferência de carga em relação a projeção da pista existente – ver ampliação – figura 7

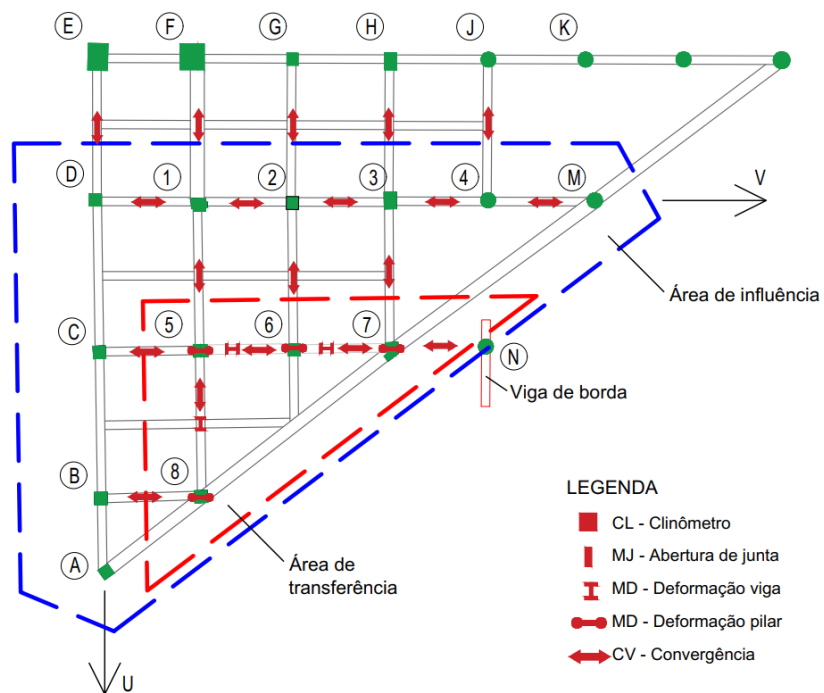


Figura 7 - Demonstração da área de transferência versus a área da influência da transferência de carga

## Instrumentação

Toda a instrumentação foi instalada e monitorada pela empresa Bureau, sendo os instrumentos instalados na medida da necessidade em que o processo da transferência de carga foi sendo desenvolvido. Considerou-se a aquisição de dados de duas maneiras distintas, uma onde os dados eram obtidos digitalmente através de instrumentos automatizados e outra com leituras manuais que deveriam ser lidos em campo com periodicidade variável conforme a necessidade de cada operação e de confirmação de estabilização.

*Tabela 1 - Lista de instrumentos a serem utilizados durante os trabalhos de transferência de carga.*

<b>Instrumentos de Leitura Digital</b>	<b>Instrumentos de Leitura Manual</b>
Clinômetro (CL)	Pinos de recalque superiores (PS, laje de cobertura)
Medidor de abertura de junta (MJ)	Pinos de convergência (PC)
Medidor de deformação (MD)	Pinos de recalque nos pilares (PR)
	Pinos de recalque nos blocos (PB)
	Pinos de recalque nas vigas de coroamento (PV)
	Abertura dos macacos
	Reação e apoio atuante nos macacos

Os medidores de deformação (Figura 11) eram do tipo Strain Gauges com método de medição do tipo corda vibrante. O princípio de funcionamento é baseado no fato de que um fio uma vez tensionado, ao ser pinçado vibra na sua frequência de ressonância. O quadrado do valor dessa frequência é proporcional a tensão gerada no fio. O instrumento é instalado entre dois blocos fixados na estrutura e uma bobina eletromagnética é usada para “pinçar” a corda e assim ler o valor da frequência da corda. Qualquer deformação na estrutura muda a distância entre os blocos fixos alterando, conseqüentemente, a tensão na corda e a frequência de ressonância, grandeza essa captada e convertida em unidades de microstrain ( $\mu\epsilon$ ). As



deformações medidas com o strain gauge possuem valores muito baixos e no caso estudado eram medidos em  $m/m^{-6}$ , portanto foi utilizado a unidade de microstrain (deformação  $\times 10^{-6}$ ).

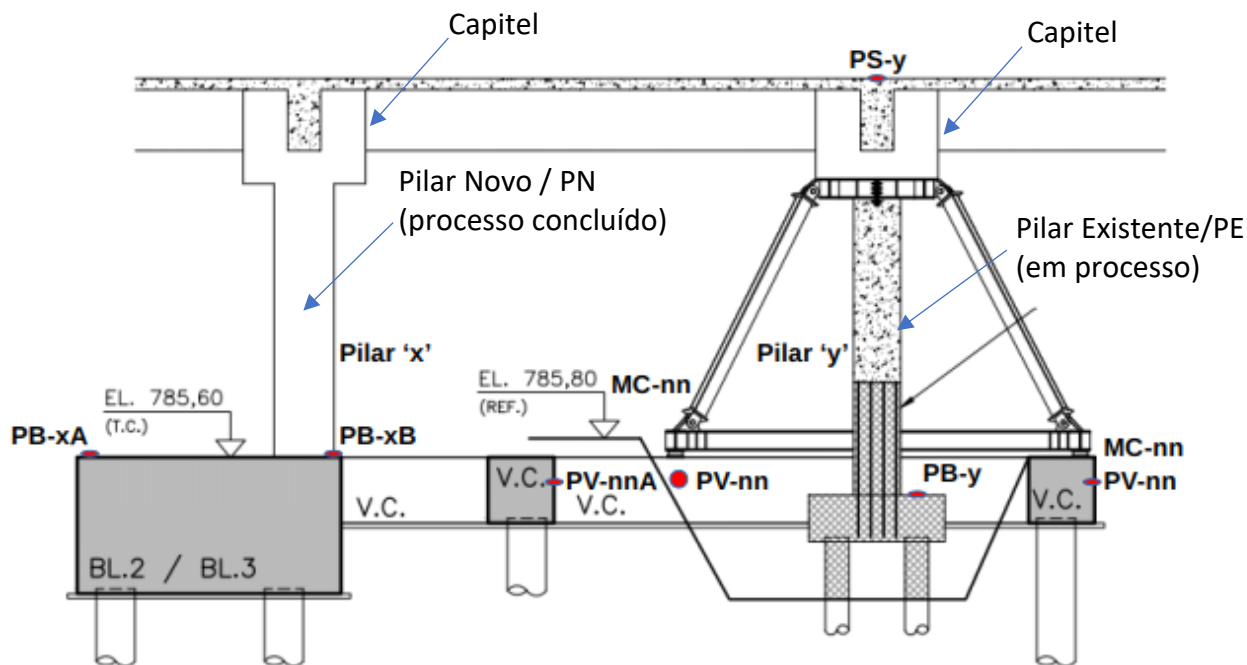


Figura 8 - Localização dos instrumentos de leitura manual - modificado de FONTE (2018)

## Os preparativos para o processo

Para realizar o procedimento com segurança, foram executados o escoramento de contingência, bem como apoios complementares da estrutura metálica junto aos macacos e calços eliminando os vãos entre o capitel e o quadro superior da estrutura metálica. O processo se desenvolve em fases que têm duração variável dependendo de sua complexidade e intercorrências, sendo que muitas se iniciaram meses antes das transferências de carga propriamente ditas:

1. Escavação manual ao redor dos pilares existentes procurando checar as dimensões dos blocos e possíveis interferências (Figura 9);



Figura 9 - Escavação manual para verificação das dimensões das vigas baldrame/blocos existentes.

2. Execução e arrasamento das estacas das fundações temporárias e definitivas;
3. Execução das vigas de coroamento consolidando os apoios existentes (Figura 10);
4. Execução dos capitéis de reação na cabeça dos pilares;
5. Instalação da estrutura metálica e instrumentação (Figura 11).



Figura 10 - Vista dos pilares PE1 a PE4 com as vigas de coroamento já devidamente concretadas.



Figura 11 - Medidor de deformação utilizado durante a transferência de carga.

## Os eventos de transferência de carga – Primeiro evento 04, 08 e 09/10/2018 – Carga dos pilares PE5 e PE8

Antes do primeiro evento da transferência, o sistema foi testado com uma carga inicial nos pilares PE5 e PE8 (tal evento ocorreu no dia 04/10/2018). Nesse primeiro teste, o carregamento ocorreu em duas etapas, a primeira com 10% da sobrecarga prevista e a segunda com mais 10%, totalizando 20% da sobrecarga prevista (Figura 12 e Figura 13). No total foram realizadas cinco leituras considerando os pinos de recalque superior para os pilares PE5 e PE8 (a leitura de recalque positiva significa elevação, e negativa recalque):

Tabela 2 - Leitura inicial de calibração e teste dos instrumentos para o pilar PE5.

#	Evento	Carga Aplicada (tf)	Recalque Previsto (mm)	Recalque medido (mm)
0	Início	-	-	-0,5
1	Acomodação (10% PP)	3,24	0,08	-0,4
1.A	Acomodação (20% PP)	6,48	0,16	-0,9
1.B	Leitura 15 min após acomodação	-	0,16	0,1
1.C	Leitura 30 min após acomodação	-	0,16	-0,1

Tabela 3 - Leitura inicial de calibração e teste dos instrumentos para o pilar PE8.

#	Evento	Carga Aplicada (tf)	Recalque Previsto (mm)	Recalque medido (mm)
0	Início	-	-	0,0
1	Acomodação (10% PP)	3,24	0,08	+0,2
1.A	Acomodação (20% PP)	6,48	0,16	-0,2
1.B	Leitura 15 min após acomodação	-	0,16	+0,4
1.C	Leitura 30 min após acomodação	-	0,16	0,0

Como as leituras foram realizadas com o fluxo de tráfego não interrompido, elas foram variadas e sofreram com a interferência dos veículos passantes, isso reforçou a necessidade de que todo o processo ocorresse na parte noturna, quando a passagem de veículos é mais restrita e muitas vezes inexistente. Todos os preparativos foram finalizados e a primeira etapa foi iniciada na madrugada do dia 08 para o dia 09/10/2019. O objetivo era obter uma elevação de 1,0 mm nos PS's 5 e 8 após as etapas de carga, considerando assim a conclusão do processo.



Figura 12 - Preparativos para início dos serviços concluídos durante o período diurno de 08/10/2018



Figura 13 - Detalhe do macaco hidráulico utilizado para o carregamento da estrutura.

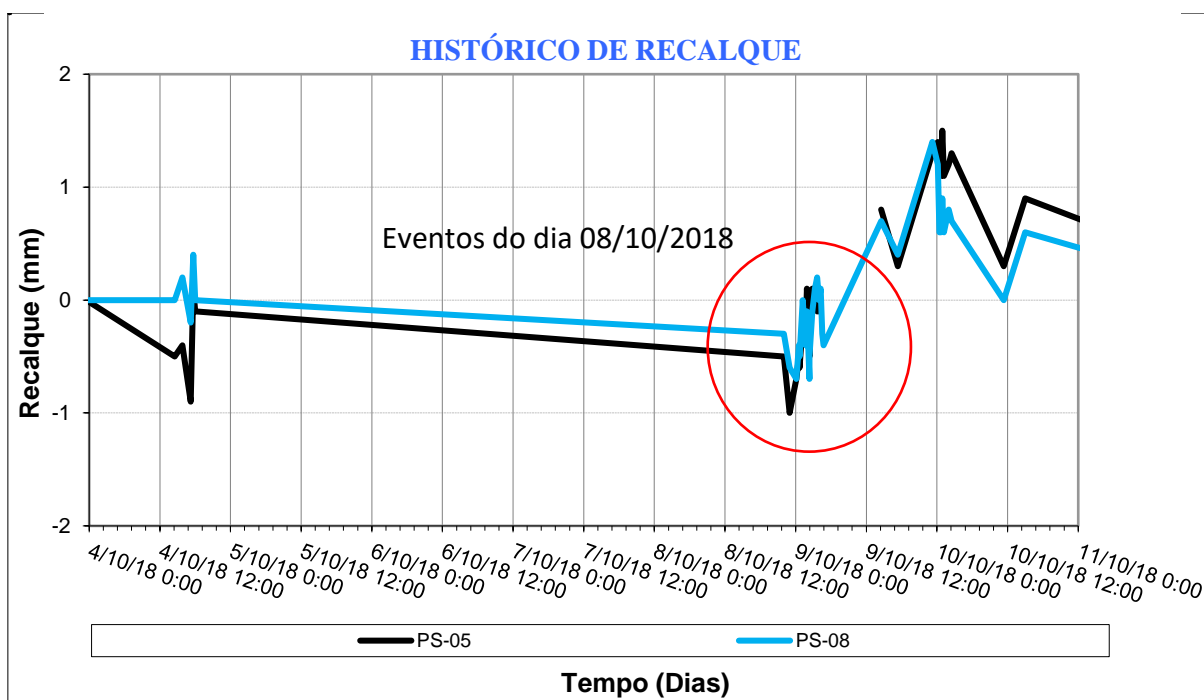


Gráfico 1 - Histórico de recalque para os pilares PE5 e PE8

Tabela 4 - Resultados obtidos no primeiro evento de transferência de carga do pilar PE5

#	Evento	Carga Aplicada (tf)	Abertura prevista do macaco (mm)	Abertura observada (mm)	Recalque Previsto (mm)	Deformação de alívio do pilar previsto $\mu\epsilon$ (m/m <sup>6</sup> )	Recalque medido (mm)	MD-5A (Pilar) $\mu\epsilon$ (m/m <sup>6</sup> )	MD-5B (Pilar) $\mu\epsilon$ (m/m <sup>6</sup> )
1.D	Leitura após interrupção do tráfego	-	-0,42	0,00	0,16	23,3	-1,0	38	-227
2	Carga 50% PP	17,01	-1,08	0,85	0,42	61,1	-0,7	68	9
3	Carga 60% PP	20,25	-1,28	1,03	0,50	72,7	-0,5	79	40
4	Carga 70% PP	23,49	-1,49	1,38	0,58	84,4	-0,6	97	78
5	Carga 80% PP	26,73	-1,69	1,63	0,66	96,0	-0,2	110	115
6	Carga 90% PP	29,97	-1,90	1,91	0,74	107,7	-0,3	124	152
7	Carga 100% PP	34,02	-2,15	2,39	0,84	122,2	0,1	156	231
8	Avaliação Geral	-	-	-	-	-	-	-	-
9	Carga 110% PP	37,26	-2,36	2,57	0,92	133,9	-0,4	167	229
10	Carga 120% PP	40,50	-2,56	2,75	1,00	145,5	0,1	187	230
11	Checagem Estrutural	-	-	-	-	-	-	-	-
11.A	Carga 130% PP	43,76	-	2,98	-	-	0,1	205	218
12	Desativar macacos (travar)	-	-	2,98	-	-	-	-	-
12.A	Leitura da Instrumentação 15 min após o travamento dos macacos	-	-	-	-	-	-0,1	212	217
12.B	Leitura da Instrumentação 30 min após o travamento dos macacos	-	-	-	-	-	-0,1	212	219
12.C	Leitura da Instrumentação 45 min após o travamento dos macacos	-	-	-	-	-	-0,1	215	218

Tabela 5 - Resultados obtidos no primeiro evento de transferência de carga do pilar PE8

#	Evento	Carga Aplicada (tf)	Abertura prevista do macaco (mm)	Abertura observada (mm)	Recalque Previsto (mm)	Deformação de alívio do pilar previsto $\mu\epsilon$ (m/m <sup>-6</sup> )	Recalque medido (mm)	MD-8A (Pilar) $\mu\epsilon$ (m/m <sup>-6</sup> )	MD-8B (Pilar) $\mu\epsilon$ (m/m <sup>-6</sup> )
1.D	Leitura após interrupção do tráfego	-	-0,42	0,00	0,16	23,3	-0,6	-81	-9
2	Carga 50% PP	17,01	-1,08	0,93	0,42	61,1	-0,7	-83	-9
3	Carga 60% PP	20,25	-1,28	1,21	0,50	72,7	-0,4	-82	-10
4	Carga 70% PP	23,49	-1,49	1,58	0,58	84,4	-0,5	-77	-8
5	Carga 80% PP	26,73	-1,69	2,01	0,66	96,0	0,0	-72	-5
6	Carga 90% PP	29,97	-1,90	2,41	0,74	107,7	-0,4	-66	-4
7	Carga 100% PP	34,02	-2,15	2,99	0,84	122,2	-0,1	-55	-1
8	Avaliação Geral	-	-	-	-	-	-	-	-
9	Carga 110% PP	37,26	-2,36	3,32	0,92	133,9	-0,5	-52	-1
10	Carga 120% PP	40,50	-2,56	3,59	1,00	145,5	-0,1	-42	4
11	Checagem Estrutural	-	-	-	-	-	-	-	-
11.A	Carga 130% PP	43,76	-	3,89	-	-	0,1	-33	10
11.B	Carga 140% PP	47,00	-	4,32	-	-	0,2	-29	19
11.C	Carga 150% PP	50,24	-	4,60	-	-	0,0	-21	30
12	Desativar macacos (travar)	-	-	4,60	-	-	-	-	-
12.A	Leitura da Instrumentação 15 min após o travamento dos macacos	-	-	-	-	-	-0,1	-19	31
12.B	Leitura da Instrumentação 30 min após o travamento dos macacos	-	-	-	-	-	-0,1	-19	31
12.C	Leitura da Instrumentação 45 min após o travamento dos macacos	-	-	-	-	-	-0,1	-21	28

O primeiro evento da transferência de carga ocorreu com poucos contratempos para o PE5, sendo que os valores esperados de recalque e deformação do pilar foram atingidos com a aplicação de apenas 10% a mais de carga esperada (Gráfico 1). O procedimento solicitava leituras de deformação 12 horas após a finalização do processo de macaqueamento para observar se os valores permaneciam compatíveis, ficando clara a sensível influência da temperatura em todo o processo: última leitura da noite = +0,1 mm, após 12 horas - as 14:30 = +0,8 mm, após 15 horas - as 17:20 = +0,3 mm, após 22 horas - a 0:00 = +1,5 mm, (valor máximo atingido antes do seccionamento do pilar em relação a estrutura original), para em seguida ocorrer uma queda até o valor de +0,3 mm as 11:20 do dia 10/10/2018.

Já para o pilar PE8, foram necessários passos extras de carga e, mesmo assim, não foi possível obter o recalque e a deformação esperada. O processo seguia normalmente, porém a estrutura começou a ter deformações negativas não esperadas, no ponto mínimo durante a noite foi constatado que a estrutura recalcaria novamente até o valor de -0,7 mm (Gráfico 1), com alguns passos extras de carregamento atingiu-se uma deformação de valor +0,2 mm, porém não estabilizado, obtendo-se na última leitura da noite do dia 08 o valor de -0,4 mm. As 14:30 do dia 09, constatou-se uma melhora significativa com valor de recalque de +0,7 mm, seguida de uma ligeira queda para 0,4 mm as 17:20 para uma leitura final de +1,4 mm as 23:15 antes do corte do pilar. Em leitura as 11:20 do dia 10/10/2018 por fim se obteve o valor de 0,0 mm, o que na época foi considerado como suficiente em comparação ao valor de -0,6 mm obtido antes do início do processo.



## Os eventos de transferência de carga – Segundo evento 29/10/2018 – Descarga dos pilares PE5 e PE8

Foram necessários aproximadamente 20 dias entre a carga dos pilares PE5 e PE8 até a conclusão das estruturas de fundação e de reforço deles. Foi considerado nesse tempo também a necessidade de aquisição da resistência necessária pelo concreto antes do início da descarga e finalização da transferência de carga.

O evento de descarga correu sem problemas, as estruturas foram descarregadas e as deformações observadas estavam dentro do esperado (Tabela 6 e Tabela 7). Dias depois pode ser observado uma estabilização nas leituras dos instrumentos o que pode ser considerado como o sucesso da operação (Gráfico 2).

Tabela 6 - Deformações observadas durante as etapas de descarga do pilar PE5.

#	Evento	Recalque medido (mm)	MD-5A (Pilar) $\mu\epsilon$ (m/m <sup>-6</sup> )	MD-5B (Pilar) $\mu\epsilon$ (m/m <sup>-6</sup> )
17	Escavação e Escoramento	-	-	-
18	Reavaliação Estrutural	-	-	-
19	Pilar Concretado (130 %PP; macacos travados)	-0,7	-78	179
19.A	Pilar Concretado (Macacos em carga hidráulica)	-	-70	190
20	Descarga de 50% da carga total	-	-74	172
21	Descarga de 75% da carga total	-	-79	165
22	Transferência Total (Descarga total dos macacos)	-0,6	-80	157

Tabela 7 - Deformações observadas durante as etapas de descarga do pilar PE8

#	Evento	Recalque medido (mm)	MD-8A (Pilar) $\mu\epsilon$ (m/m <sup>6</sup> )	MD-8B (Pilar) $\mu\epsilon$ (m/m <sup>6</sup> )
17	Escavação e Escoramento	-	-	-
18	Reavaliação Estrutural	-	-	-
19	Pilar Concretado (150 %PP; macacos travados)	-0,9	919	1303
19.A	Pilar Concretado (Macacos em carga hidráulica)	-1,2	927	1311
20	Descarga de 50% da carga total	-1,3	910	1302
21	Descarga de 75% da carga total	-0,7	905	1296
22	Transferência Total (Descarga total dos macacos)	-0,9	900	1294

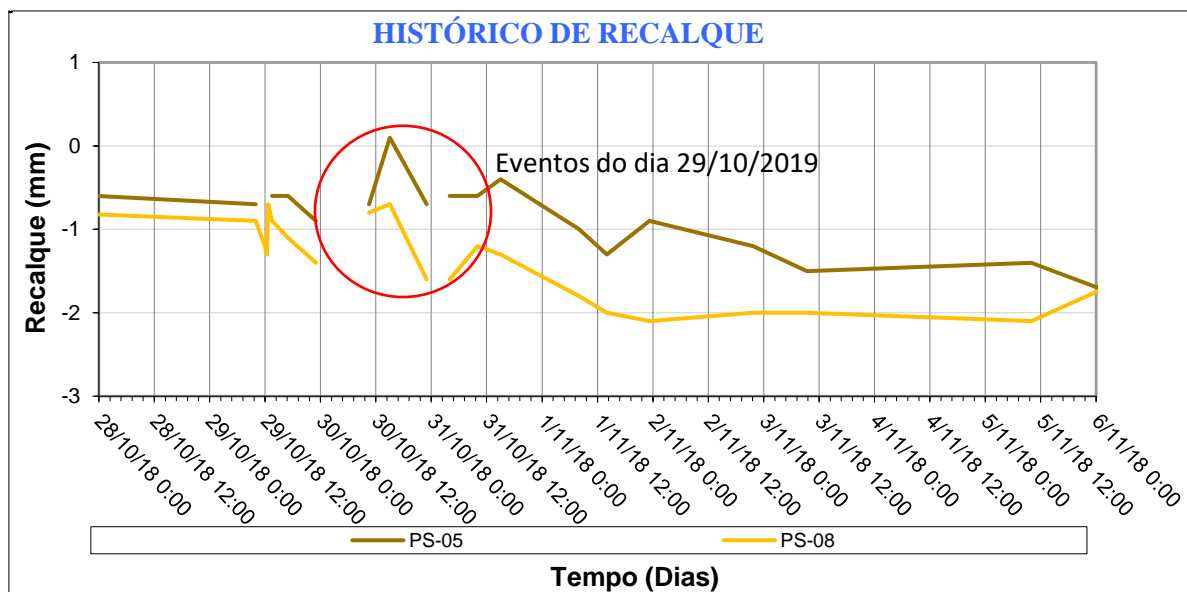
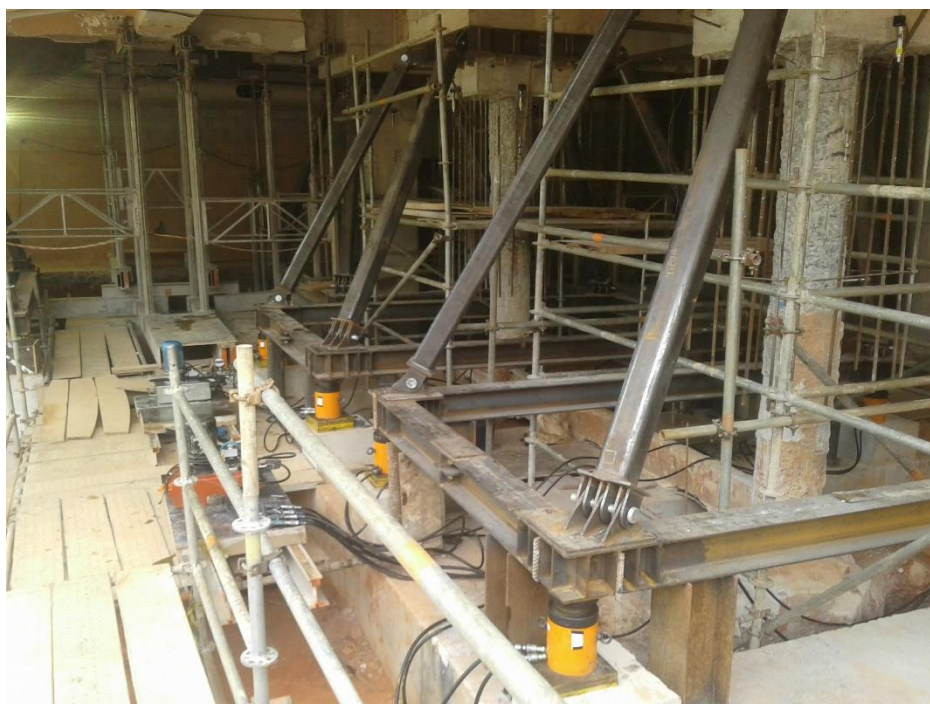


Gráfico 2 - Histórico de recalques observados durante a descarga dos pilares PE5 e PE8

### Os eventos de transferência de carga – Terceiro evento 29/10/2018 – Carga dos pilares PE6 e PE7

A transferência de carga dos pilares PE6 e PE7 (Figura 14 e Figura 15) era considerada mais complexa, uma vez que a estrutura precisaria ficar com os macacos hidráulicos travados por um longo período enquanto os arredores eram escavados em pelo menos 5,50 m até a

chegada da cota de execução do bloco de fundação desses pilares. O objetivo nesse caso também era obter uma leitura recalque de 1,0 mm nos PS's após as etapas de carga.



*Figura 14 - Estruturas de transferência de carga dos PE6 e PE7 concluídas com macacos posicionados.*

Tabela 8 - Valores observados de recalque e deformação para o carregamento do pilar PE6.

#	Evento	Carga Aplicada (tf)	Abertura prevista do macaco (mm)	Abertura observada (mm)	Recalque Previsto (mm)	Deformação de alívio do pilar previsto $\mu\epsilon$ (m/m <sup>-6</sup> )	Recalque medido (mm)	MD-6A (Pilar) $\mu\epsilon$ (m/m <sup>-6</sup> )	MD-6B (Pilar) $\mu\epsilon$ (m/m <sup>-6</sup> )
0	Início	-	-	-	0,00	0	-1,1	-66	53
1	Acomodação (10% PP)	5,67	-	-	0,08	20	-1,0	-66	53
2	Carga 50% PP	28,36	-	0,00	0,42	102	-0,9	-62	82
3	Carga 60% PP	34,03	-	0,40	0,50	122	-0,5	-58	90
4	Carga 70% PP	39,70	-	0,78	0,58	143	-0,5	-58	98
5	Carga 80% PP	45,38	-	1,13	0,67	163	-0,5	-56	106
6	Carga 90% PP	51,05	-	1,46	0,75	183	-0,4	-56	114
7	Carga 100% PP	56,72	-	1,79	0,83	204	-0,1	-55	122
8	Avaliação Geral	56,72	-	-	0,83	204	-	-	-
9	Carga 110% PP	62,39	-	2,12	0,92	224	-0,4	-54	131
10	Carga 120% PP	68,06	-	2,42	1,00	244	-0,3	-53	140
11	Checagem Estrutural	-	-	-	-	-	-	-	-
11.A	Carga 130% PP	-	-	2,75	-	-	-0,6	-	-
12	Desativar macacos (travar)	-	-	-	-	-	-	-	-
12.A	Leitura da Instrumentação 15 min após o travamento dos macacos	-	-	2,75	-	-	-0,7	-	-

Tabela 9 - Valores observados de recalque e deformação para o carregamento do pilar PE7.

#	Evento	Carga Aplicada (tf)	Abertura prevista do macaco (mm)	Abertura observada (mm)	Recalque Previsto (mm)	Deformação de alívio do pilar previsto $\mu\epsilon$ (m/m <sup>-6</sup> )	Recalque medido (mm)	MD-7A (Pilar) $\mu\epsilon$ (m/m <sup>-6</sup> )	MD-7B (Pilar) $\mu\epsilon$ (m/m <sup>-6</sup> )
0	Início	-	-	-	0,00	0	-1,0	-66	53
1	Acomodação (10% PP)	4,05	-	-	0,08	15	-1,0	-66	53
2	Carga 50% PP	20,26	-	0,00	0,42	73	-0,7	-62	82
3	Carga 60% PP	24,31	-	0,43	0,50	87	-0,4	-58	90
4	Carga 70% PP	28,36	-	0,78	0,58	102	-0,4	-58	98
5	Carga 80% PP	32,41	-	1,16	0,67	116	-0,4	-56	106
6	Carga 90% PP	36,46	-	1,46	0,75	131	-0,2	-56	114
7	Carga 100% PP	40,51	-	1,76	0,83	146	0,2	-55	122
8	Avaliação Geral	40,51	-	-	0,83	146	-	-	-
9	Carga 110% PP	44,57	-	2,06	0,92	160	0,0	-54	131
10	Carga 120% PP	48,62	-	2,34	1,00	175	0,1	-53	140
11	Checagem Estrutural	-	-	-	-	-	-	-	-
12	Desativar macacos (travar)	-	-	2,34	-	-	-	-	-
12.A	Leitura da Instrumentação 15 min após o travamento dos macacos	-	-	-	-	-	-0,3	-17	69
12.B	Leitura da Instrumentação 30 min após o travamento dos macacos	-	-	-	-	-	-0,3	-17	70

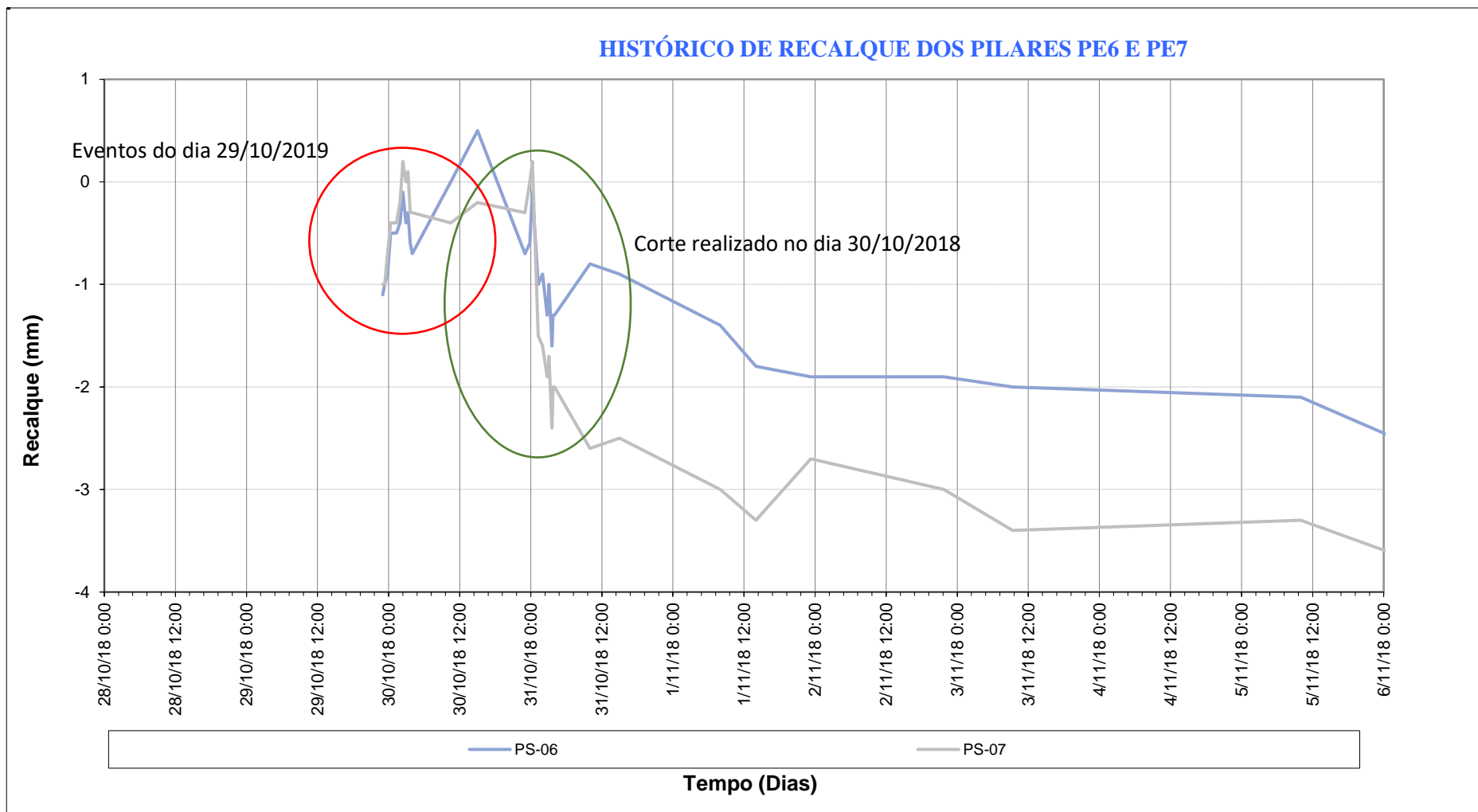


Gráfico 3 - Histórico de recalque dos pilares PE6 e PE7.

O processo de transferência de carga do pilar PE6 ocorreu da maneira esperada, havia uma deformação inicial e a partir dela, a cada passo de carga, a mesma ia se aproximando dos valores estipulados, isso não ocorreu de maneira tão direta para o pilar PE7, após algumas etapas de carga, notou-se uma degradação do nível de deformação, atingindo-se valores abaixo do esperado para cargas elevadas, valores estes que naquele momento ainda puderam ser considerados como suficientes. Além de as cargas dos pilares terem sido estimadas baseando-se em modelos numéricos e informações que não necessariamente representavam a real condição da estrutura, mesmo realizando-se diferentes prospecções das estruturas existentes, havia um grau de incerteza e foi no dia seguinte, quando o seccionamento dos pilares era preparado que o procedimento enfrentou alguns obstáculos inesperados:



*Figura 15 - Preparação para carga dos pilares PE6 e PE7.*

Tabela 10 - Valores de deformação atingidos antes e durante o seccionamento do pilar PE6.

#	Evento	Carga Aplicada (tf)	Abertura prevista do macaco (mm)	Abertura observada (mm)	Recalque Previsto (mm)	Deformação de alívio do pilar previsto $\mu\epsilon$ (m/m <sup>-6</sup> )	Recalque medido (mm)	MD-6A (Pilar) $\mu\epsilon$ (m/m <sup>-6</sup> )	MD-6B (Pilar) $\mu\epsilon$ (m/m <sup>-6</sup> )
12.B	Leitura da Instrumentação (checagem estrutural)	-	-	2,75	-	-	-0,7	-20	180
12.C	Remaqueamento (Carga 140% PP)	-	-	3,13	-	-	-0,6	-21	199
12.D	Remaqueamento (Carga 150% PP)	-	-	3,41	-	-	-0,1	-21	207
13	Corte do Pilar P7	-	-	-	-	-	-1,0	-45	189
13.A	Corte do Pilar P6	-	-	-	-	-	-0,5	-54	204
14	Reavaliação da transferência de carga (PP+SC) e Remaqueamento (Carga 160% PP)	-	-	3,49	-	-	-1,3	-63	204
15	Checagem Estrutural	-	-	-	-	-	-	-	-
16	Desativar macacos (travar)	-	-	-	-	-	-	-	-
16.A	Leitura da Instrumentação 15 min após o travamento dos macacos	-	-	-	-	-	-1,6	-	-
16.B	Leitura da Instrumentação 30 min após o travamento dos macacos	-	-	-	-	-	-1,3	-	-
16.C	Leitura da Instrumentação 45 min após o travamento dos macacos	-	-	-	-	-	-1,3	-63	204



Tabela 11 - Valores de deformação atingidos antes e durante o seccionamento do pilar PE7.

#	Evento	Carga Aplicada (tf)	Abertura prevista do macaco (mm)	Abertura observada (mm)	Recalque Previsto (mm)	Deformação de alívio do pilar previsto $\mu\epsilon$ (m/m <sup>6</sup> )	Recalque medido (mm)	MD-7A (Pilar) $\mu\epsilon$ (m/m <sup>6</sup> )	MD-7B (Pilar) $\mu\epsilon$ (m/m <sup>6</sup> )
12.B	Leitura da Instrumentação (checagem estrutural)	-	-	-	-	-	-0,3	7	87
12.C	Remaqueamento (Carga 130%PP)	-	-	2,84	-	-	0,0	8	82
12.D	Leitura da Instrumentação 15 min após o travamento dos macacos	-	-	-	-	-	0,2	4	83
13	Corte do Pilar P7	-	-	-	-	-	-1,5	18	158
13.A	Corte do Pilar P6	-	-	-	-	-	-0,4	Instrumento defeituoso	152
14	Reavaliação da transferência de carga (PP+SC) e Remaqueamento (Carga 140% PP)	-	-	2,84	-	-	-1,9	Instrumento defeituoso	148
15	Checagem Estrutural	-	-	-	-	-	-	-	-
16	Desativar macacos (travar)	-	-	-	-	-	-	-	-
16.A	Leitura da Instrumentação 15 min após o travamento dos macacos	-	-	-	-	-	-2,4	Instrumento defeituoso	-
16.B	Leitura da Instrumentação 30 min após o travamento dos macacos	-	-	-	-	-	-2,0	Instrumento defeituoso	-
16.C	Leitura da Instrumentação 45 min após o travamento dos macacos	-	-	-	-	-	-2,0	Instrumento defeituoso	144

Os valores observados no Gráfico 3 e nas Tabela 10 e Tabela 11 demonstram que após o corte (Figura 16), ambos os pilares tiveram deformações muito acima do esperado, além de constatação de uma perda na transferência por conta de problemas no contato entre capitel e o quadro metálico superior, causando fendilhamento em alguns pontos do capitel (pontos de maior contato). Isso ficou claro nos próximos dias onde chegou-se ao consenso de que a operação não estava completa, seria necessário sendo necessário o travamento dos macacos, para preparo de um remacaqueamento de ambas as estruturas para que os patamares de segurança fossem novamente atingidos.



Figura 16 - Vista do pilar PE7 após o seccionamento ocorrido na noite do dia 30/10/2018.

## Os eventos de transferência de carga – Quarto evento 06/11/2018 – Remaqueamento corretivo dos pilares PE6 e PE7

Essa fase intermediária começou a ser posta em prática no dia 06/11/2018 e consistiu na introdução de mais passos de carga no intuito de normalizar a deformação da estrutura para os patamares aceitáveis. Antes do procedimento ocorrer foi aplicado por injeção, resina epoxídica para preencher os espaços entre o perfil metálico e o capitel (Figura 17), aumentando assim a superfície de contato da estrutura metálica e procurando maior eficiência na transferência das cargas:

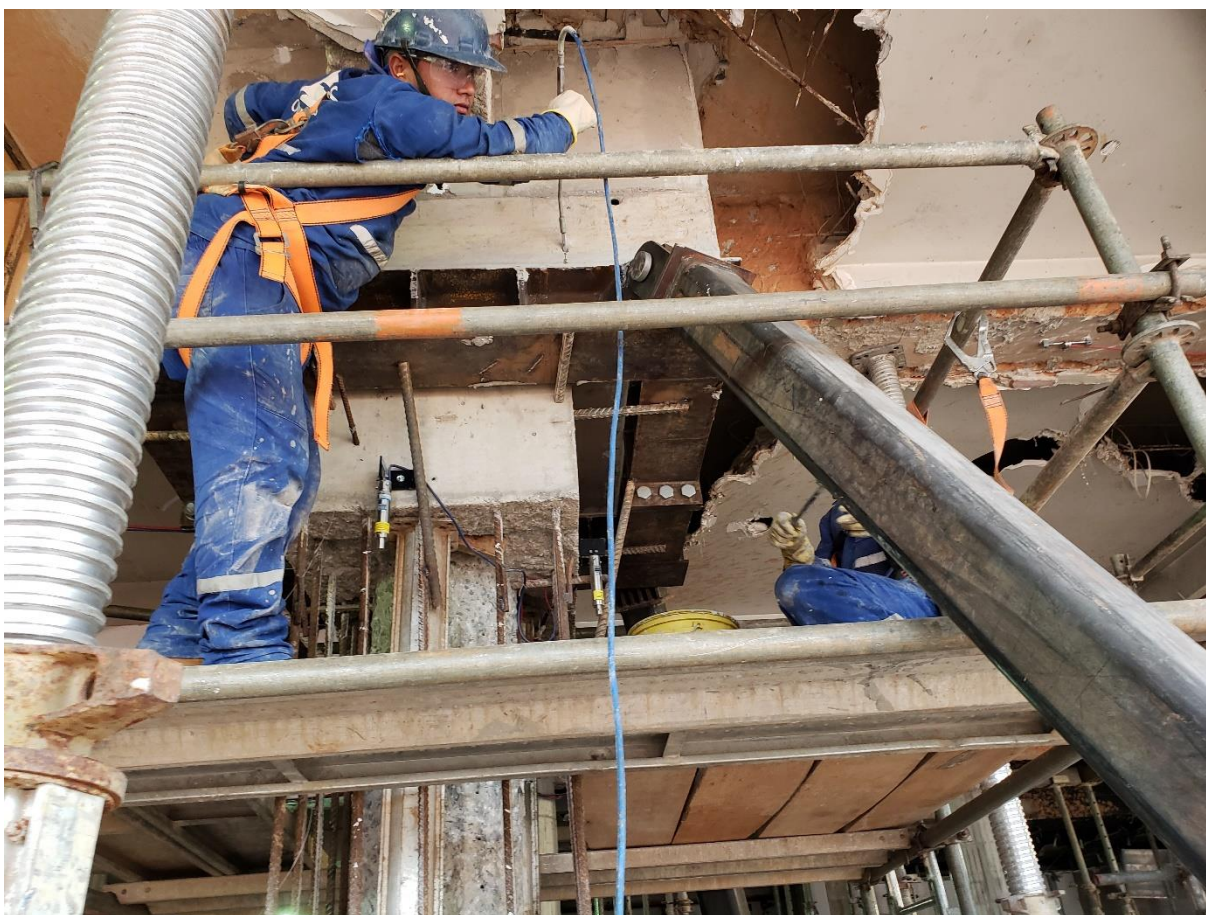


Figura 17 - Aplicação de resina de injeção MC-Injekt 1264 TF-TR

Infelizmente o produto aplicado não funcionou da maneira esperada, sendo que muitos dos espaços não foram preenchidos, nem o produto teve o desempenho satisfatório.

Tabela 12 - Valores de deformação atingidos durante o processo de remaqueamento do pilar PE6.

#	Evento	Abertura observada (mm)	Recalque medido (mm)	MD-6A (Pilar) $\mu\epsilon$ (m/m <sup>-6</sup> )	MD-6B (Pilar) $\mu\epsilon$ (m/m <sup>-6</sup> )
16.D	Macacos Travados, leitura da instrumentação e reavaliação estrutural	-	-2,0	-61	211
16.E	Destravamento dos macacos (colocados em carga hidráulica)	3,57	-1,7	-62	211
16.F	Remaqueamento (Carga 170% PP)	3,67	-1,8	-61	211
16.G	Remaqueamento (Carga 180% PP)	3,87	-1,5	-63	211
16.H	Remaqueamento (Carga 190% PP)	4,10	-1,3	-61	210
16.I	Remaqueamento (Carga 200% PP)	4,40	-0,6	-63	211
16.J	Remaqueamento (Carga 210% PP)	-	-0,2	-68	210
16.K	Remaqueamento (Carga 220% PP)	-	-0,2	-63	210
16.L	Leitura da Instrumentação 15 min após o travamento dos macacos	-	0,2	-68	210
16.M	Leitura da Instrumentação 30 min após o travamento dos macacos	-	-0,4	-68	210
16.N	Leitura da Instrumentação após o travamento dos macacos (Verificação da Estabilidade)	-	-0,9	-55	212

Tabela 13 - Valores de deformação atingidos durante o processo de remaqueamento do pilar PE7.

#	Evento	Abertura observada (mm)	Recalque medido (mm)	MD-7A (Pilar) $\mu\epsilon$ (m/m <sup>-6</sup> )	MD-7B (Pilar) $\mu\epsilon$ (m/m <sup>-6</sup> )
16.D	Macacos Travados, leitura da instrumentação e reavaliação estrutural	-	-3,0	Inst. def.	640
16.E	Destravamento dos macacos (colocados em carga hidráulica)	2,81	-2,6	Inst. def.	639
16.F	Remaqueamento (Carga 150% PP)	2,86	-2,7	Inst. def.	641
16.G	Remaqueamento (Carga 160% PP)	2,91	-2,4	Inst. def.	642
16.H	Remaqueamento (Carga 170% PP)	3,14	-2,0	Inst. def.	642
16.I	Remaqueamento (Carga 180% PP)	3,39	-1,2	Inst. def.	642
16.J	Remaqueamento (Carga 190% PP)	3,72	-0,5	Inst. def.	640
16.K	Remaqueamento (Carga 200% PP)	4,07	-0,4	Inst. def.	643
16.L	Leitura da Instrumentação 15 min após o travamento dos macacos	-	0,3	Inst. def.	640
16.M	Leitura da Instrumentação 30 min após o travamento dos macacos	-	-0,7	Inst. def.	639
16.N	Leitura da Instrumentação após o travamento dos macacos (Verificação da Estabilidade)	-	-1,1	Inst. def.	657

Optou-se em aguardar e realizar mais algumas leituras para verificar se haveria melhora na condição da resina. Embora as leituras indicassem melhora quanto a estabilidade dos recalques (Tabela 12 e Tabela 13), ainda não eram ideais mas, diante das dificuldades para uma nova intervenção na superfície de contato (impedida pela presença do invólucro externo e da própria resina), optou-se por não carregar mais a estrutura e continuar com o monitoramento. Ao longo dos próximos dias, verificou-se uma estabilização (como pode ser visto no Gráfico 4) que caracterizou o acerto no procedimento adotado.

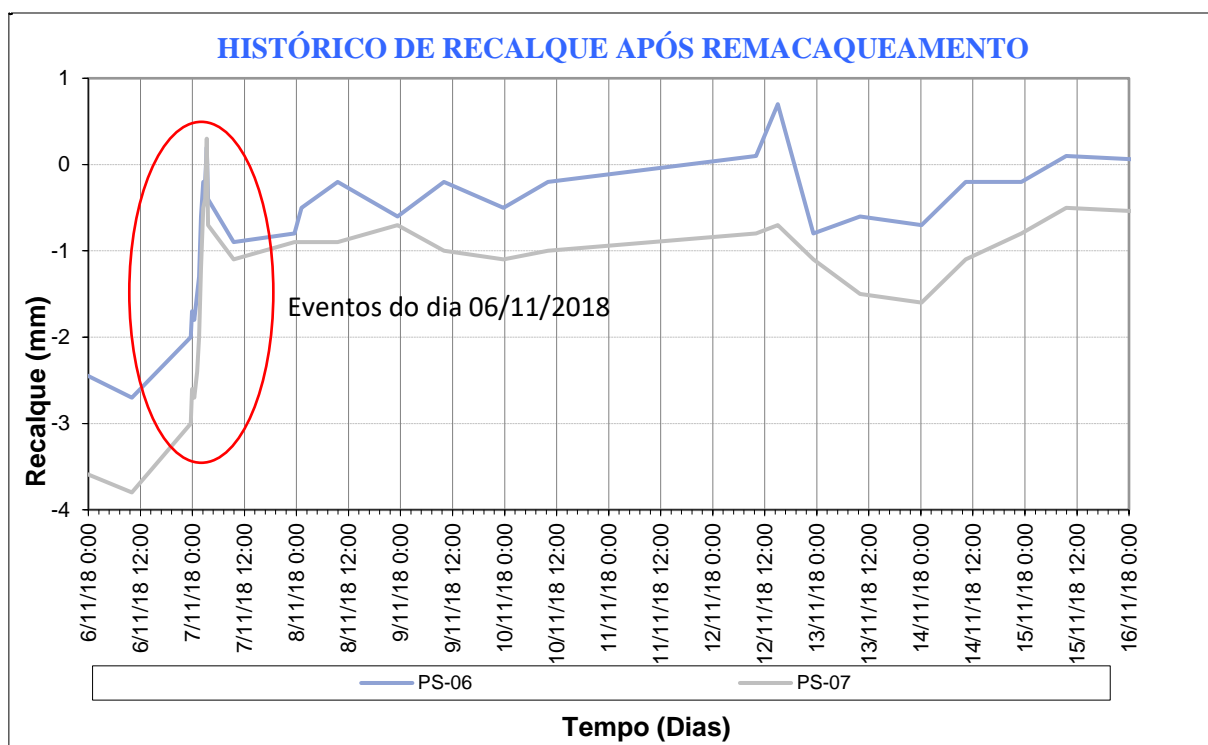


Gráfico 4 - Efeito do remaqueamento sobre a estrutura dos pilares PE6 e PE7 nos dias seguintes a operação.

## Os eventos de transferência de carga – Quinto evento 11/03/2019 – Descarga dos pilares PE6 e PE7

Durante os quatro meses após o remaqueamento e que antecederam a descarga dos pilares PE6 e PE7, todos os instrumentos foram monitorados observando-se estabilidade. As etapas seguintes de projeto para esses dois pilares requeriam a demolição do bloco de fundação original, escavação até o nível correto, nivelamento e preparação do terreno, para enfim realizar a execução de forma e armação do bloco definitivo (Figura 18 e 19):



Figura 18 - Pilares PN6 e PN7 finalmente concretados e pronto para serem descarregados.



Figura 19 - Armação do bloco definitivo dos pilares PN6 e PN7 para posterior concretagem.

Tabela 14 - Valores observado de recalque durante a etapa de descarga do pilar PE6.

#	Evento	Recalque medido (mm)	MD-6A (Pilar) $\mu\epsilon$ (m/m <sup>-6</sup> )	MD-6B (Pilar) $\mu\epsilon$ (m/m <sup>-6</sup> )
17	Escavação e Escoramento	-2,3	-	430
18	Reavaliação Estrutural	-	-	-
19	Pilar Concretado (220 %PP; macacos travados)	-2,5	-	432
19.A	Pilar Concretado (Macacos em carga hidráulica)	-2,9	-	438
20	Descarga de 50% da carga total	-2,3	-	427
21	Descarga de 75% da carga total	-2,5	-	448
22	Transferência Total (Descarga total dos macacos)	-2,5	-	502
22.A	Leitura da Instrumentação 15 min após a total descarga dos macacos	-2,7	-	502

Tabela 15 - Valores observado de recalque durante a etapa de descarga do pilar PE7.

#	Evento	Recalque medido (mm)	MD-7A (Pilar) $\mu\epsilon$ (m/m <sup>-6</sup> )	MD-7B (Pilar) $\mu\epsilon$ (m/m <sup>-6</sup> )
17	Pilar Concretado (200 %PP; macacos travados)	-3,9	-1898	Retirado
18	Reavaliação Estrutural	-4,2	-	Retirado
19	Pilar Concretado (Macacos em carga hidráulica)	-4,4	-1899	Retirado
20	Descarga de 50% da carga total	-4,2	-1909	Retirado
21	Descarga de 75% da carga total	-4,4	-1911	Retirado
22	Transferência Total (Descarga total dos macacos)	-4,4	-1929	Retirado
22.A	Leitura da Instrumentação 15 min após a total descarga dos macacos	-	-	Retirado
22.B	Leitura da Instrumentação 30 min após a total descarga dos macacos	-	-	Retirado
22.C	Leitura da Instrumentação 1 h após a total descarga dos macacos	-	-	Retirado

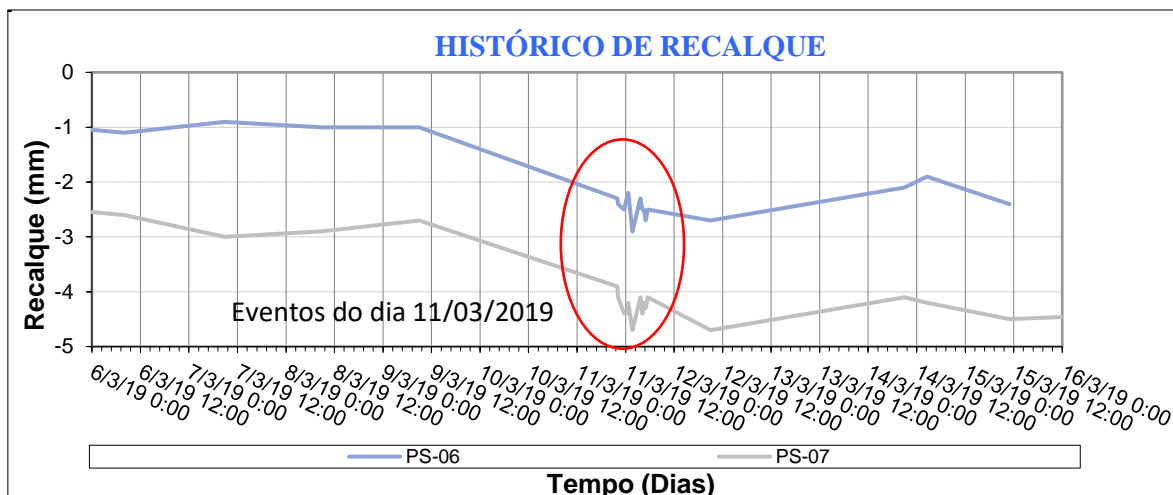


Gráfico 5 - Histórico de recalques observado durante os serviços de descarga dos pilares PE6 e PE7.

A descarga dos pilares PE6 e PE7 (Gráfico 5) ocorreu sem percalços e não diferente da descarga realizada anteriormente, após o evento (Tabela 14 e Tabela 15) os recalques ficaram estáveis o que evidencia que a operação foi um sucesso.

## Gráficos Gerais

Todo o processo, em termos de monitoramento, é aqui resumido nas etapas principais, que indicamos nos gráficos a seguir:

- ① - Transferência de carga do PE4 e PE5 para a estrutura provisória em 8, 9 e 10/10/18;
- ② - Transferência de carga da estrutura provisória para PN5 e PN8 definitivos<sup>3</sup> em 29/10/18;
- ③ - Transferência de carga do PE6 e PE7 para a estrutura provisória em 29, 30, 31/10 e 06, 07, 08/11/18 (remaqueamento);
- ④ - Transferência de carga da estrutura provisória para PN5 e PN8 definitivos<sup>4</sup> em 11/03/19;

<sup>3</sup> E descarga da estrutura provisória

<sup>4</sup> E descarga da estrutura provisória



Após o evento ④, o processo de transferência de carga só foi considerado concluído após o recolhimento dos macacos hidráulicos, a desvinculação e retirada de todos os calços dos apoios auxiliares das estruturas metálicas e, mediante autorização de desmobilização dos macacos e estruturas da transferência do P6 e P7, após análise do ATO, o que se deu no período entre 11 e 15/03/19.

Os Gráficos a seguir apresentam a sequência histórica e observações relevantes gerais.

- **PS's (Pinos Recalque Pilar - Superiores):** Verifica-se recalque máximo de 4,5 mm, considerando 2,0 mm na fase de escavação, demolição parcial de estruturas existentes e execução de novas estruturas e 2,5 mm devido ao período da transferência de carga propriamente dito.

Dentre as flutuações rotineiras, observa-se recalque proporcionalmente significativo em 11/03/19 (após ④), levando à hipótese de efeitos de saturação do maciço dadas as fortes chuvas ocorridas em 10/03/19, (1/3 do volume do mês para 12 horas).

Para efeito do monitoramento, concluímos que os PS's são mais relevantes para referência de controle das condições imediatas durante o curto período de dias (horas) da efetiva operação de macaqueamento, na confirmação da efetiva aplicação da carga de transferência pela deformação (recalque negativo) das estruturas envolvidas (topo pilar/laje). Passado este momento, as variações devido a temperatura, carga acidental (frenagem/aceleração) e os efeitos das inter-relações entre as diversas estruturas, indicam um comportamento bastante variável para os recalques dos PS's, no horizonte da faixa de 0 a -4,5 mm, embora foi possível utilizar os PS's como uma informação importante para acompanhar a estabilidade geral em conjunto com demais instrumentos.

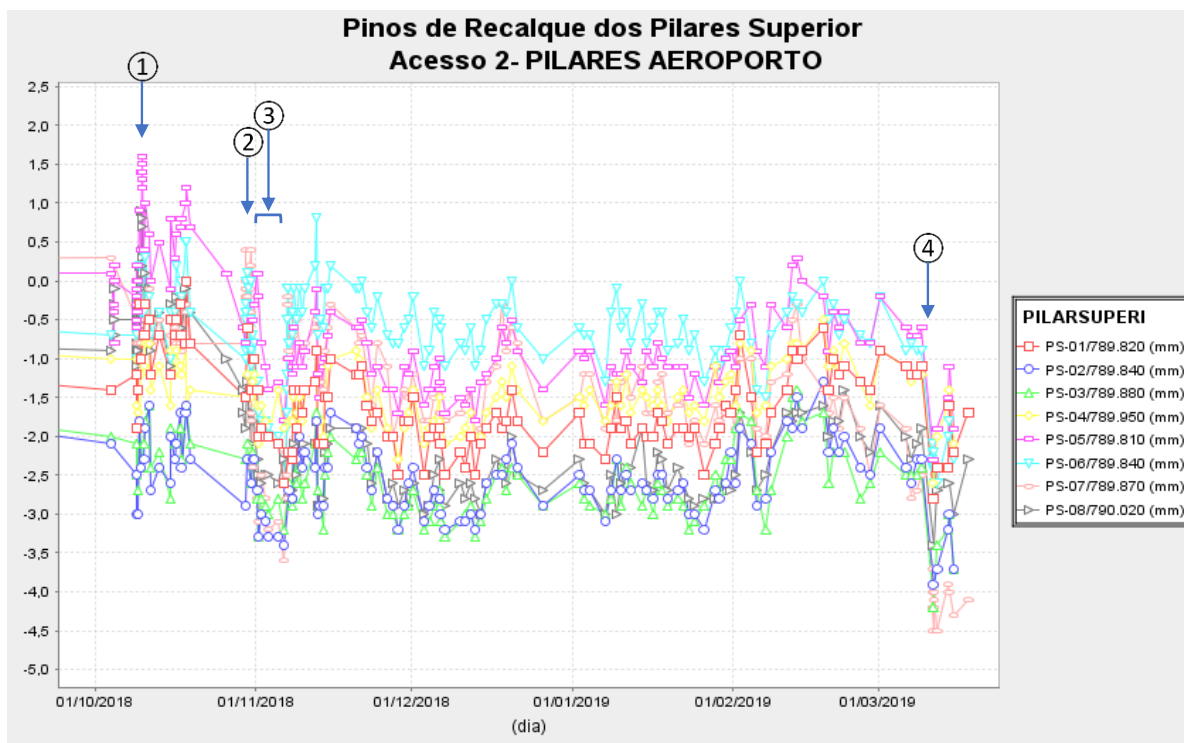


Gráfico 6 - Histórico de recalques Geral

Com relação aos pinos de recalque dos pilares (PR's e PCR's) e do bloco de fundação do PN 6 e PN 7, observou-se a estabilização de leituras no período de 2 meses subsequentes, com seguidas reduções de frequência das leituras, até a conclusão do monitoramento em 28/06/19.

- **Pinos das vigas de coroamento (apoio das estruturas metálicas) – PV's**, não se observam recalques significativos nos PV's, máximo de 6,4mm - PV 7.3, e distorções entre 1:1.100 e 1:790.
- **Os Clinômetros (CL's)** mantêm tendência histórica de variações dentro de um comportamento estável, típico no caso do exemplo do Gráfico 6:

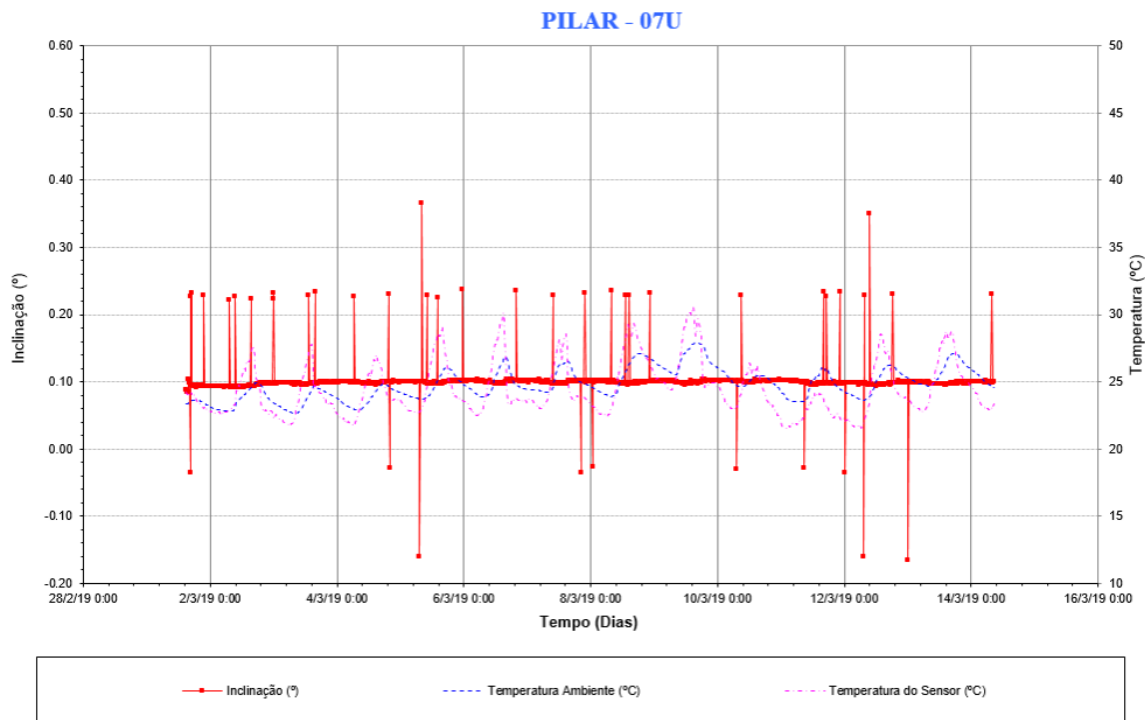


Gráfico 7 - Gráfico típico de Clinômetro 07U

Os picos do gráfico se referem a efeitos de picos de vibração não tendo valor de interpretação. Os Clinômetros foram importantes para aferir ou substituir medidas de convergência que perdem efetividade, por exemplo, nas fases após corte dos pilares.

- **Para os pinos de Convergência (CV's)**, o Gráfico 8 apresenta a sequência histórica. Verifica-se no geral, convergência máxima de - 8,0 mm (Corda 5-6), e divergência máxima de + 3,8 mm (corda 6-7) considerando respectivamente - 1,0 mm e + 3,0 mm na fase de escavação, demolição parcial de estruturas existentes e execução de novas estruturas e - 7,0 mm e + 0,8 mm devido ao período da transferência de carga propriamente dito. Os picos de velocidade ocorrem em especial para os PN6 e PN7, com as acomodações devido a entrada do peso próprio desses pilares com altura de 7,0 m (1)

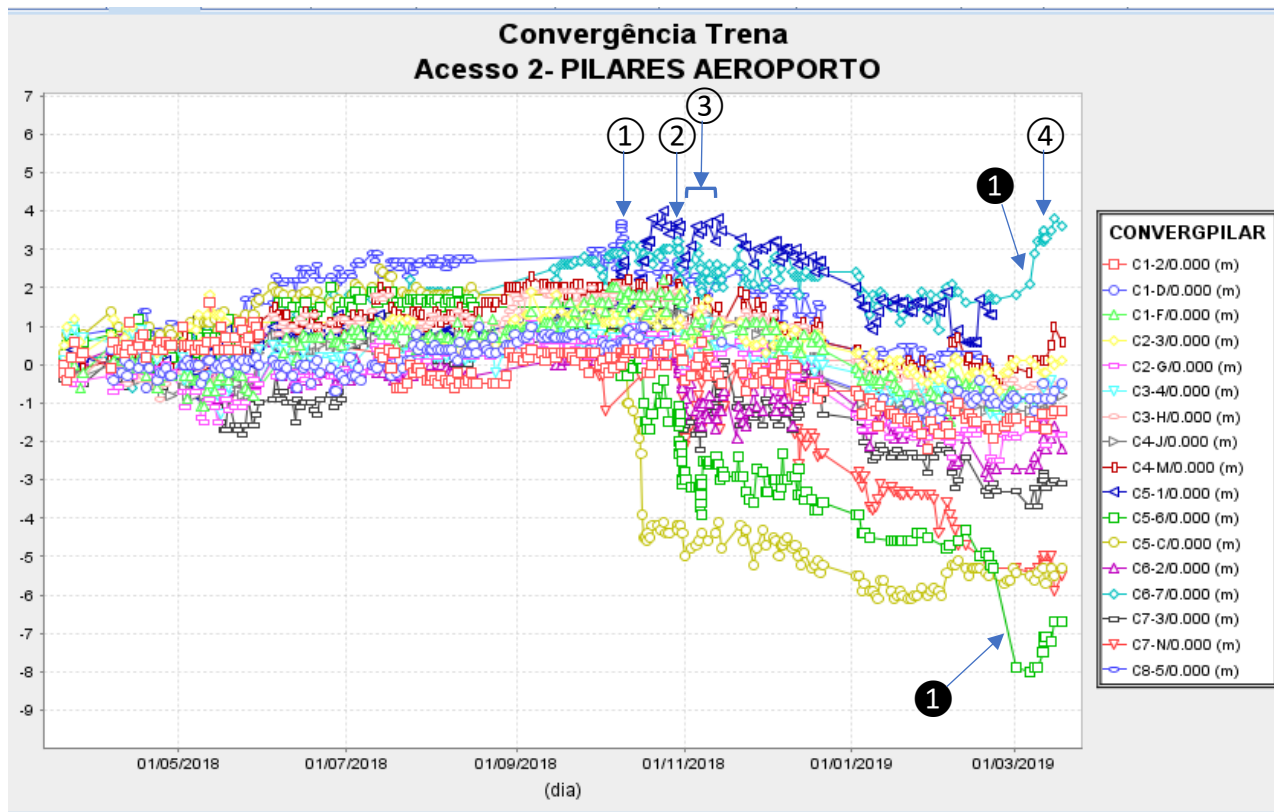


Gráfico 8 - Convergências - Geral

Reforçando, sobre os períodos em que os pilares ficaram na condição descontínua, com as leituras não sendo consideradas confiáveis, situação em que o monitoramento mais efetivo foi realizado com os Clinômetros e pelo recalque diferencial dos PV's. Ainda assim, considerando a altura de 8,0 m do pilar e bloco, para a convergência máxima de 8,0 mm, temos distorção de 1:1.000, bastante confortável.

- **Medidores de abertura de juntas (MD's) das Vigas e Pilares** – verificaram-se variações em todos os medidores sempre compatíveis com os efeitos de mudança de temperatura, em geral cerca de 3 vezes maiores que as variações do processo de transferência de carga ①:

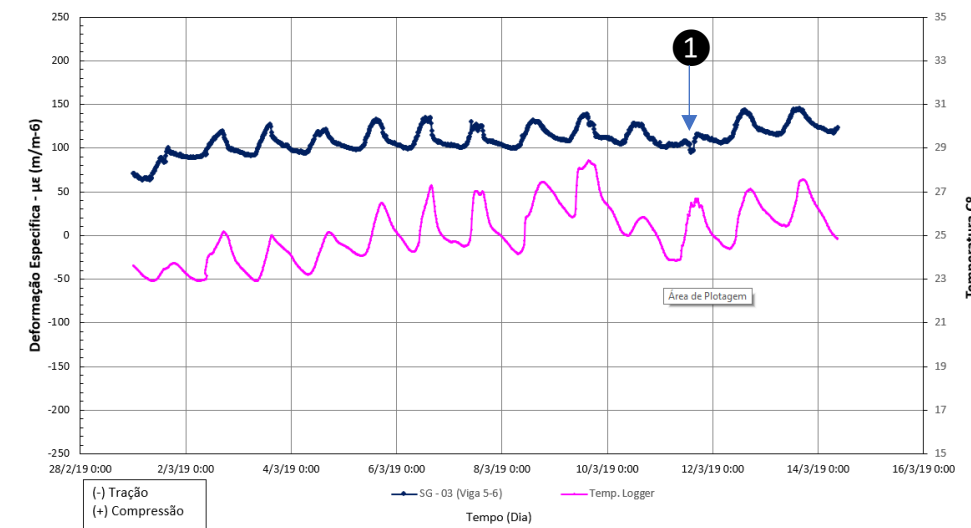


Gráfico 9 – Medidores de abertura de junta

## Conclusões

A transferência de carga foi uma atividade necessária a implantação deste empreendimento pela Companhia do Metropolitano de São Paulo, não obstante a este fato, é uma operação que demanda bastante zelo durante todo o processo. Ainda que os procedimentos foram precedidos por prospecções e análises com softwares de modelagem, o comportamento das estruturas em alguns momentos se mostrou diverso ao esperado. Levando-se em conta que, as discrepâncias e alguma falta de informação quanto às estruturas do aeroporto determinaram a utilização de estimativas das cargas atuantes e capacidade dos materiais componentes, são aceitáveis as variações observadas nos valores entre os parâmetros esperados e medidos. Por outro lado, as análises *pari passu*, para continuidade e até o momento de considerar o processo concluído, não podem prescindir da compreensão da dinâmica dos fenômenos envolvidos, fundamentada com base em monitoramento adequado e consistente. Do início das operações, onde as etapas demandam, naturalmente, maior atenção e acuidade na análise e interpretação dos dados, segue-se a gradual percepção da sensibilidade da instrumentação ante a influência das cargas e deformações impostas, das

solicitações dinâmicas, das intercorrências e fenômenos envolvidos (em especial quanto a temperatura). Por fim, passa-se ao domínio do comportamento das grandezas instrumentadas ante às premissas, observando-se as “assinaturas” dos comportamentos típicos nos gráficos resultantes ou as variações atípicas. Nesse estágio já são aceitáveis simplificações ponderadas, tanto com relação à frequência e hierarquia de importância de cada instrumento, como também em relação ao tempo de espera e passagem para as etapas seguintes da operação, podendo-se ainda, aceitar de maneira assertiva as discrepâncias em relação aos parâmetros esperados.

Por outro lado, foi possível através desse domínio do monitoramento, diagnosticar e ponderar incompatibilidades, como no caso de acomodações excessivas devido falha da interface de contato do quadro metálico com o capitel, inclusive decidindo-se por abortar etapa de avanço mediante o travamento dos macacos para definir e implantar as devidas soluções de contorno que permitiram a continuidade do processo (injeção de contato – Figura 17). Nesse caso, verifica-se pelos dados, que a carga final aplicada para garantia e confirmação da transferência de carga, superou em mais de 80% o previsto, em especial para os PE6 e PE7 - etapa ③ (cujo parâmetro principal é o deslocamento da laje imediatamente acima dos pilares –  $PS's = 1,0$  mm de elevação).

Para atingir-se o domínio do processo, foi fundamental a preparação prévia dos procedimentos com a interação das equipes de Projeto e Fiscalização do Metrô, da Contratada Executora (Consórcio Tiisa – DP Barros - TIDP), da empresa de monitoramento (TÜV SÜD - Bureau) e dos responsáveis pelo acompanhamento técnico – ATO, considerando todas as premissas, restrições e intercorrências ao longo de todo processo.

Também foi importante a realização de simulação prévia com leituras, aquisição, lançamento de dados e interpretação para cada instrumento, permitindo a avaliação dos tempos previstos de operacionalização do monitoramento e garantindo que eficácia do processo no atendimento das restrições e parâmetros de projeto, como também, do limite de tempo disponível, dada a necessária liberação da restrição ao tráfego de acesso ao Aeroporto, exigência incondicional da Cia. de Enga. de Tráfego - CET.

Mais uma vez registra-se a capacitação técnica do Metrô e dos envolvidos para assegurar sustentabilidade e melhoria tecnológica contínua, atendendo requisitos técnicos, legais, de segurança e meio ambiente na implantação das obras para mobilidade dos cidadãos e usuários.

## Referências bibliográficas

SILVA, Eduardo. **Acompanhamento de obras da Linha 17-Ouro**. Mobilidade Sampa. Fev/2015.

Disponível em: <<https://mobilidadesampa.com.br/2015/02/acompanhamento-de-obras-da-linha-17-ouro-2/>> Acesso em 27/06/2019.

SISGEO (Itália). **Vibrating wire strain gauges**: Strain gauges and Thermometers. 2018.

Disponível em: <[https://www.sisgeo.com/uploads/schede/schede/VK40\\_EN\\_03\\_Vibrating\\_Wire\\_Strain\\_Gauges.pdf](https://www.sisgeo.com/uploads/schede/schede/VK40_EN_03_Vibrating_Wire_Strain_Gauges.pdf)>. Acesso em: 04 jul. 2019

NATIONAL INSTRUMENTS (EUA). **Medições de deformação com Strain Gages**. 2019.

Disponível em: <<https://www.ni.com/pt-br/innovations/white-papers/07/measuring-strain-with-strain-gages.html>>. Acesso em: 04 jul. 2019

## Agradecimentos

Neste trabalho não poderia deixar de mencionar a dedicação e profissionalismo dos Engenheiros Roberto Silva, consultor da empresa TIDP, com a organização dos procedimentos iniciais, Eloy Viegas, Evaristo Rebello e Francisco Ribeiro Neto do Metrô que auxiliaram no processo de elaboração e revisão das instruções complementares de serviço, Eng. Ramon Garcia da TIDP com os levantamentos e investigações, Eng. Juliano Apollo como ATO e da equipe da Bureau por todo trabalho com o monitoramento das instrumentações. Ao mestre Nelson Xavier que foi a força condutora para fazer acontecer muitos dos serviços diretos e indiretos relacionados a transferência de carga.