

CONTROLE DE RECALQUE DE EDIFÍCIO NO CENTRO DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO¹

Mário Riberio da Cruz Moura² e Emil de Souza Sánchez Filho³

Resumo: Apresenta-se estudo de caso em que se avaliou o comportamento dos recalques apresentados em edifício comercial existente no Centro da Cidade do Rio de Janeiro, observados após o início da construção de empreendimento vizinho. Utilizou-se um conjunto composto de nível geodésico óptico-mecânico e mira de invar para a realização do controle de recalque, e foram analisadas as cinquenta campanhas realizadas a partir da instalação dos pinos de controle e início do monitoramento. Foram elaborados gráficos da evolução dos recalques, traçadas as curvas de iso-recalques e bacia de recalques, e verificou-se o comportamento das velocidades e aceleração dos recalques. Efetuou-se uma detalhada análise estatística das medidas obtidas, realizando-se a previsão dos recalques por meio das séries temporais.

Palavras-chave: monitoramento de estruturas; recalques.

TILT CONTROL OF A BUILDING LOCATED IN RIO DE JANEIRO

Abstract: It is showed a case study involved evaluating the performance of settlements observed in an existing commercial building in downtown Rio de Janeiro after construction of a neighboring building began. An assembly composed of a geodetic optical-mechanical level and an invar rod was used to carry out settlement control and analysis was made of the fifty field campaigns conducted following the installation of the control pins and the start of the monitoring. Settlement evolution charts, iso-contour lines and settlement basin graphs were prepared, observing the behavior in terms of speed and acceleration. The acquired measurements underwent a detailed statistical analysis, including the forecast of settlements in time series.

Keywords: monitoring structures; settlements.

INTRODUÇÃO

Em fins de 2005 teve início a implantação de empreendimento comercial no centro da Cidade do Rio de Janeiro em terreno com cerca de 8500 m² de área, situado na Avenida República do Chile, vizinho ao conjunto arquitetônico formado pelo Centro Empresarial Castello Branco (CECB) e pelo Conjunto Cultural Teatro Nelson Rodrigues. O conjunto arquitetônico existente data da década de 1970. Compõe-se de duas lâminas, norte e sul, com 31 e 29 andares respectivamente, e um núcleo central formando uma estrutura única (CECB), e ainda de centro cultural constituído por teatro e galerias que funcionam em prédio de três andares; o conjunto tem dois andares de subsolo (garagem) com acesso pela Avenida República do Chile e fundações diretas superficiais em sapatas. O projeto do novo empreendimento comercial prevê a construção de duas torres com 36 pavimentos, cinco subsolos e um edifício garagem com cinco andares; a obra foi iniciada pelas atividades de terraplanagem e execução das cortinas dos subsolos, para o que se realizou o rebaixamento do nível do lençol de água. Em meados de 2006 o conjunto arquitetônico vizinho à obra em curso apresentou patologias que levaram à necessidade de verificação e controle de possível movimentação da estrutura (recalques). Essas patologias manifestaram-se principalmente nos dois andares de garagem (subsolo), com maior incidência no piso inferior, tendo-se observado (Figura 1):

- desnivelamento entre placas de concreto do piso da garagem;

¹ Artículo recibido el 2 de abril de 2007 y en forma revisada el 10 de junio de 2007.

² Prof. Dr^a., Departamento de Engenharia Civil, UFF, Brasil. E-mail: mario.moura@terra.com.br

³ Prof. D.Sc., Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação, UFF, Brasil. E-mail: emilsanchez@uol.com.br

- descolamento de alvenarias;
- trincas no piso da garagem;
- trincas em alvenarias de vedação.



Figura 1: Trinca em alvenaria de vedação no 1º piso da garagem.

Foi elaborado um plano de observação para o monitoramento do comportamento da estrutura compreendendo o mapeamento das patologias, o acompanhamento da evolução das fissuras e o estudo da movimentação da mesma.

METODOLOGIA APLICADA

Para a verificação da existência de recalques e seu acompanhamento decidiu-se pelo processo topográfico de nivelamento geométrico de precisão, por propiciar melhores resultados no tocante a precisão e pela adequação às características geométricas do local: área com inúmeras interferências construtivas (alvenarias, pilares, etc.) e baixa luminosidade (Figura 2).



Figura 2: Características geométricas do 1º piso da garagem.

Face à urgência de realização de medições visando à confirmação da suspeita de recalques na estrutura e determinação da sua velocidade e magnitude, em junho de 2006 foram fixados à percussão, com pistola Walsywa, pinos de aço em 26 pilares (P1 a P26) da garagem do 2º subsolo, um pino auxiliar na entrada da garagem e ainda um pino na face de pilar de viaduto próximo ao CECB, externo à construção em estudo, de forma a servir como RN; posteriormente, antes da realização da 6ª campanha, foram materializados mais dois pinos, nos pilares P30 e P31, respectivamente. Para a realização das leituras foram idealizadas inicialmente campanhas semanais, espaçadas posteriormente de acordo com a sinalização apontada pela análise das medições. À medida que se realizavam as leituras das primeiras campanhas, procedeu-se à instalação de *Benchmark* e dos pinos definitivos; nas campanhas de números 08 e 09 foram efetuadas leituras para todos os pontos e homogeneizados os resultados pela média aritmética dos pares de recalques parciais apurados. A determinação da diferença de nível entre o RN (pino no pilar do viaduto) e o *Benchmark* foi continuada, de forma a permitir a verificação da estabilidade dos dois.

Neste trabalho são analisados os resultados decorrentes das campanhas compreendidas entre 19/06/2006 e 26/02/2008, em número total de cinquenta. O arranjo geral dos pilares da estrutura, *Benchmark* e pontos monitorados por intermédio do nivelamento geométrico é apresentado na Figura 3.

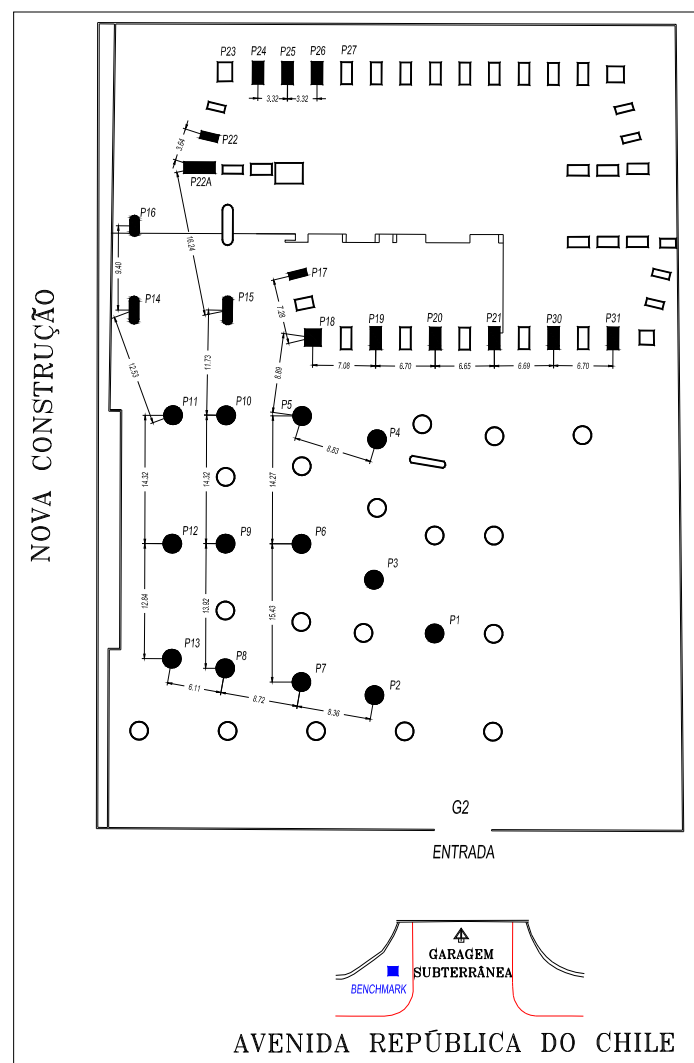


Figura 3: Arranjo geral dos pilares da estrutura e dos pontos nivelados.

EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Os equipamentos utilizados para a realização das medições foram:

- nível geodésico WILD N3 com placa plano-paralela embutida;
- mira de ínvar com graduação centimétrica e nível de cantoneira acoplado.

O nível Wild N3, classificado como pertencente à classe de níveis de precisão muito alta de acordo com o item 4.1.2 da NBR 13133:1994, tem as seguintes características técnicas:

- desvio padrão para 1 km de duplo nivelamento: 0,2 mm;
- aumento da luneta: 16 vezes para 1 m e 42 vezes para 100 m;
- distância de foco mínimo: 0,45 m;
- placa plano-paralela e micrômetro acoplado: leitura direta de 0,1 mm e estimativa de 0,01 mm.

TRATAMENTO DOS DADOS

Em cada campanha as leituras efetuadas foram anotadas em caderneta de campo apropriada e transcritas para planilhas Excel, para análise das séries de leituras de nivelamento e contranivelamento, e cálculo das diferenças de nível para cada pino. Para a análise dos dados de campo determinaram-se os seguintes parâmetros estatísticos relativos às diferenças de nível calculadas em cada campanha:

- média das diferenças de nível;
- desvio de cada diferenças de nível em relação à média;
- desvio médio;
- desvio padrão das diferenças de nível;
- cotas calculadas.

Foram rejeitados os valores de desvio superiores a 0,20 mm, critério estabelecido em função da precisão do equipamento utilizado, e determinadas novas médias para as diferenças de nível de cada trecho; os dados processados alimentaram uma planilha geral das campanhas realizadas para balizamento da análise da evolução do comportamento dos recalques observados, contendo os seguintes elementos:

- data da realização e número de cada campanha;
- dias entre campanhas consecutivas e acumulado;
- identificação e cotas dos pinos nivelados;
- recalques parcial e total;
- velocidade de recalque (μ /dia) parcial e total.

Foram elaborados gráficos no Excel contendo a evolução temporal dos recalques de cada ponto monitorado, como exemplificado nas Figuras 4 e 5; elaborou-se também gráfico com os recalques totais tomados na 50ª campanha (Figura 6).

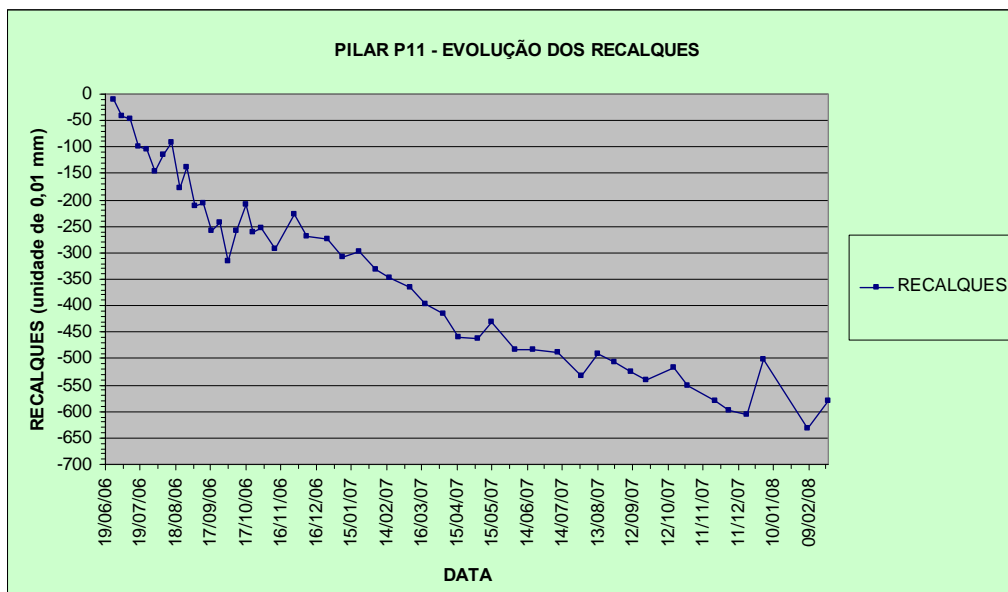


Figura 4: Evolução dos recalques observados no pilar P11.

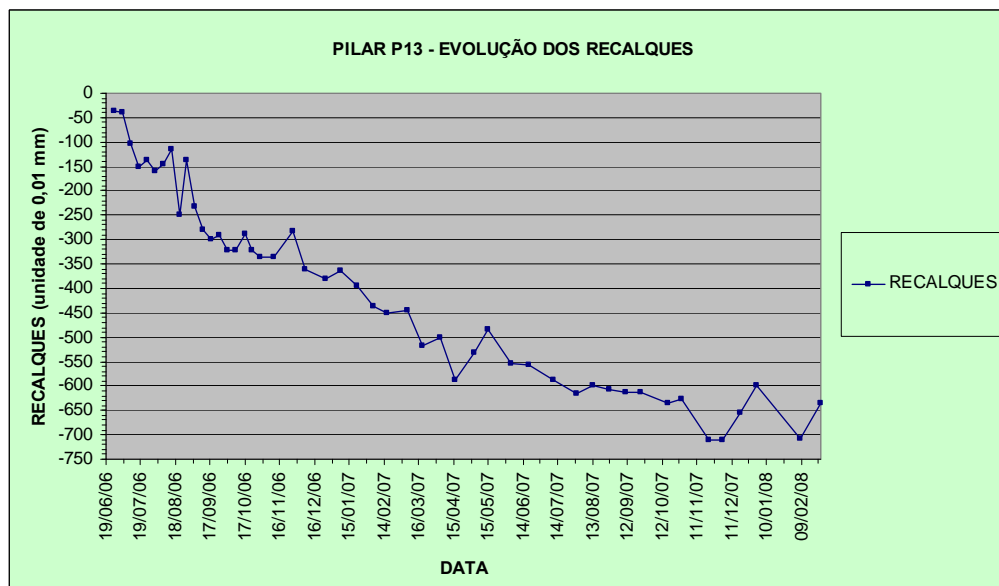
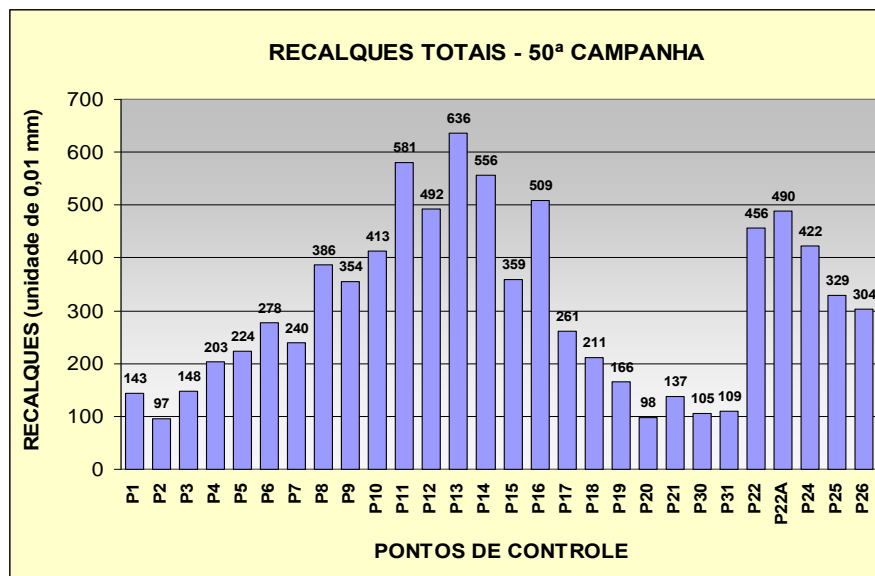


Figura 5: Evolução dos recalques observados no pilar P13.



ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para a interpretação dos resultados procedeu-se ao traçado das curvas de iso-recalques, ao desenho das bacias de recalques e à confecção de gráfico do comportamento da velocidade dos recalques. Para tal utilizaram-se os resultados totais de recalques (mm) e de velocidades (μ /dia) das campanhas de números 10, 20, 30, 40 e 50 (Figuras 7 a 17). Observa-se que a linha de pilares situada paralelamente à divisa com a construção em andamento, e mais próxima a essa apresenta os maiores recalques absolutos. A velocidade dos recalques apresenta um perfil continuamente decrescente, com valores totais na 50ª campanha, na maioria, inferiores a 10 μ /dia; entre as campanhas 10 (63º dia) e 50 (617º dia), em termos gerais médios, ocorreu uma aceleração média negativa (desaceleração) de 0,03 μ /dia², comportamento indicativo de tendência à estabilização da aceleração dos recalques após 617 dias.

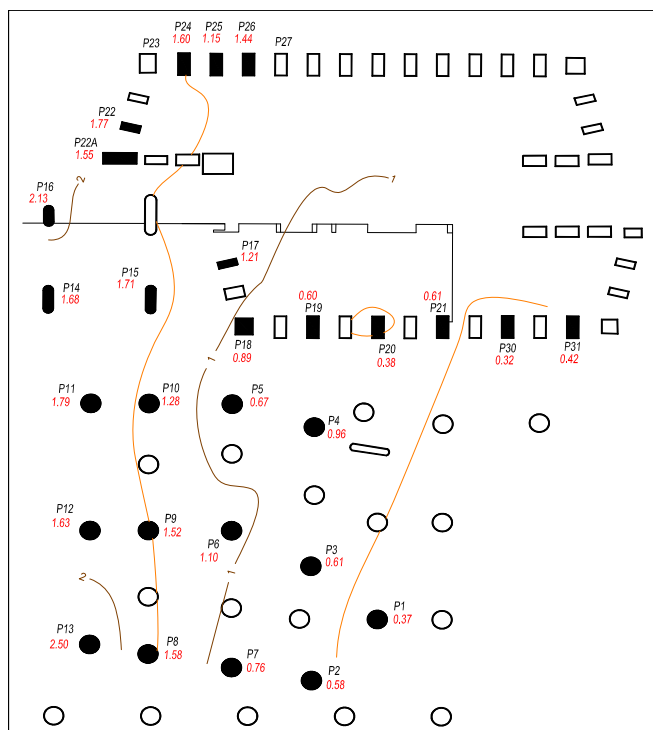


Figura 7: Curvas de iso-recalques da 10ª campanha.

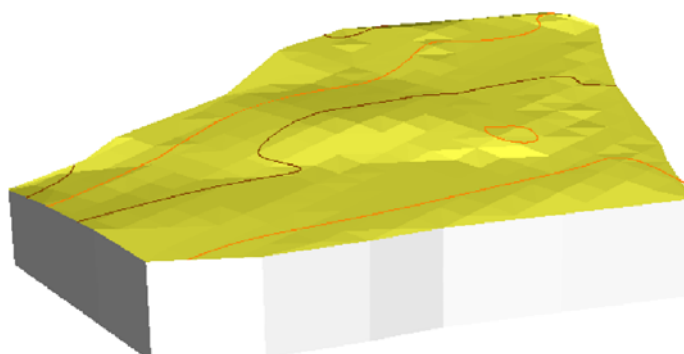


Figura 8: Bacia de recalques da 10ª campanha.

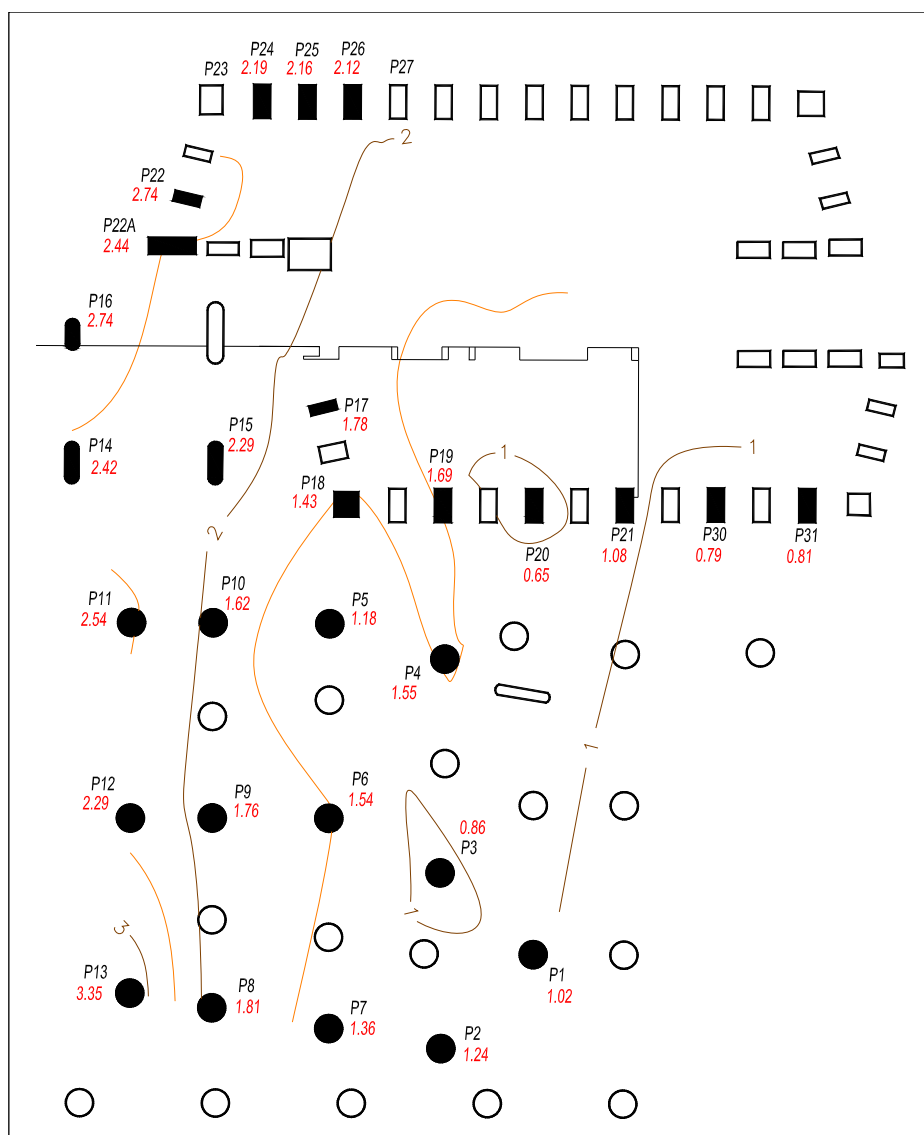


Figura 9: Curvas de iso-recalques da 20ª campanha.

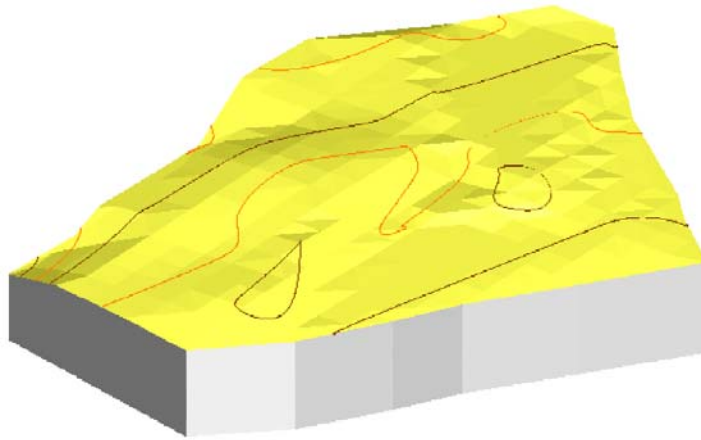


Figura 10: Bacia de recalques da 20ª campanha.

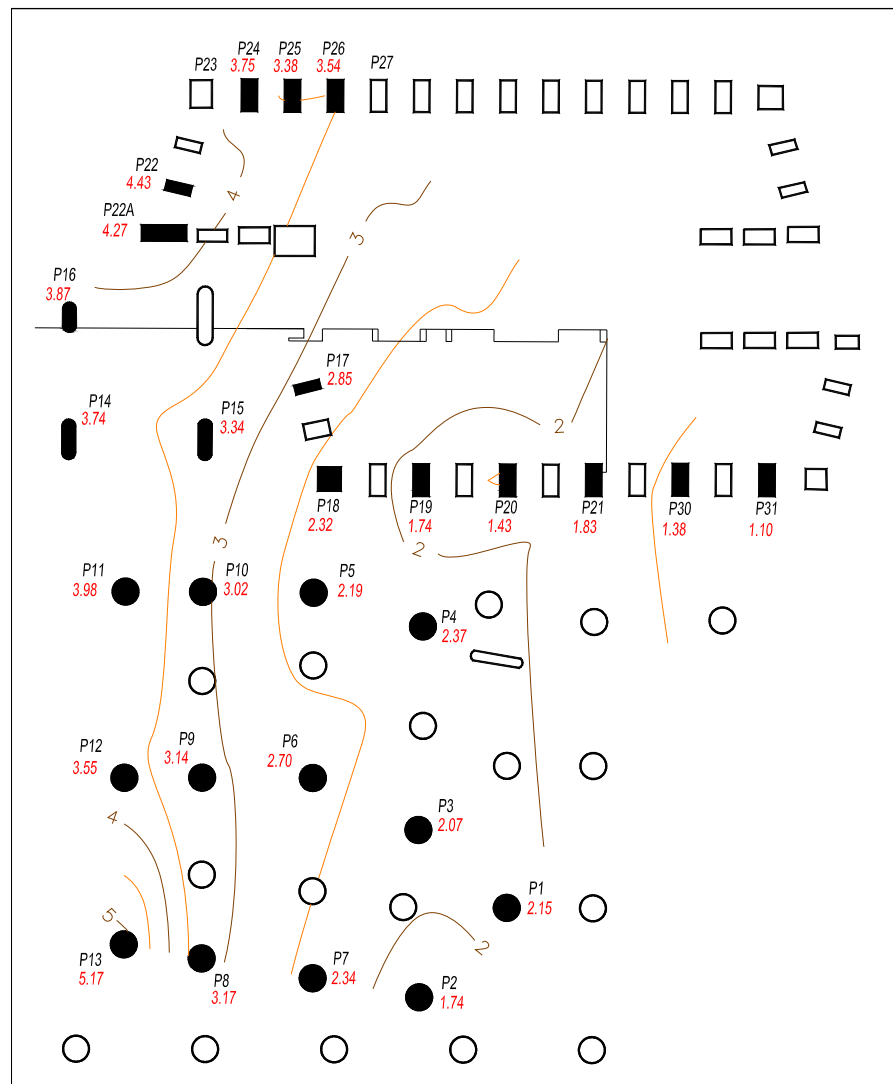


Figura 11: Curvas de iso-recalques da 30ª campanha.

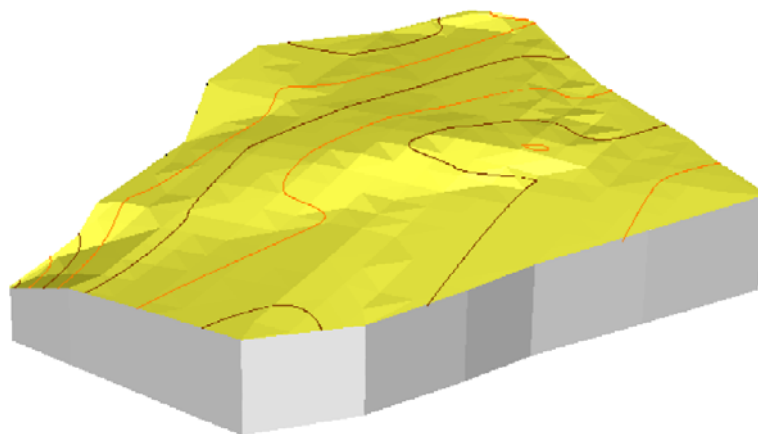


Figura 12: Bacia de recalques da 30ª campanha.

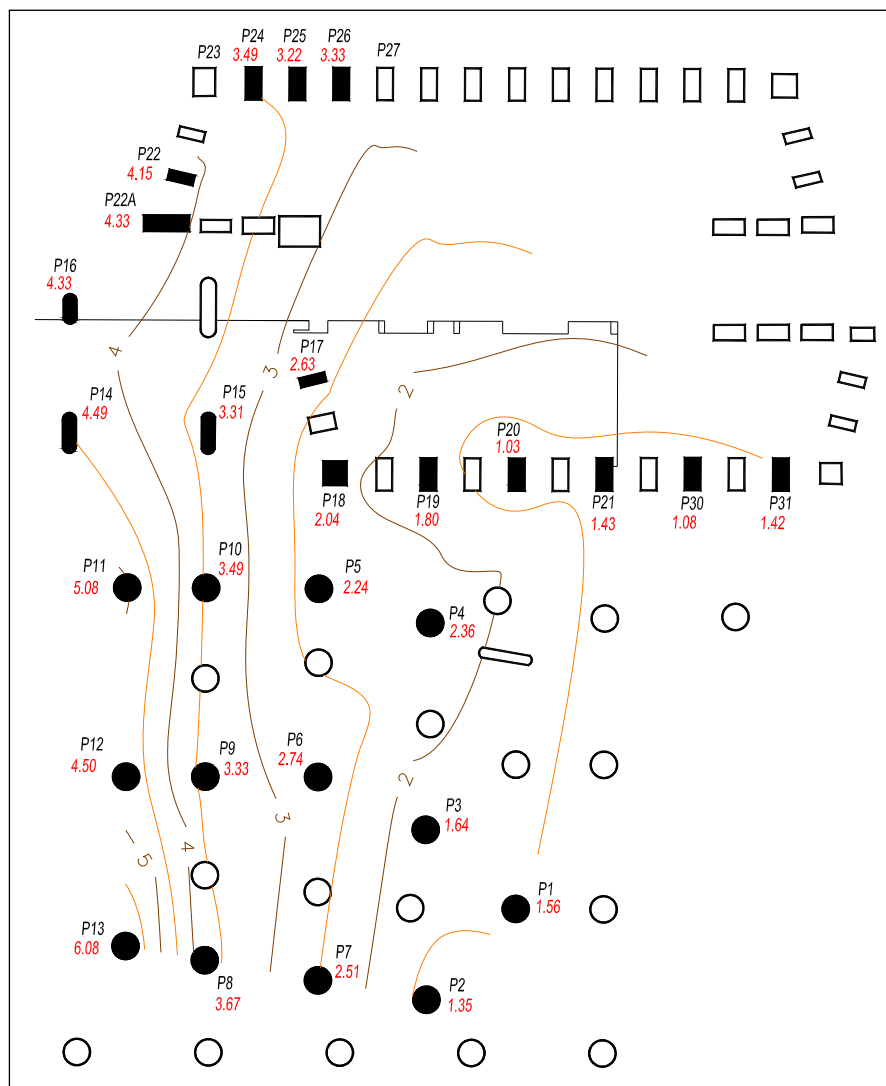


Figura 13: Curvas de iso-recalques da 40ª campanha.

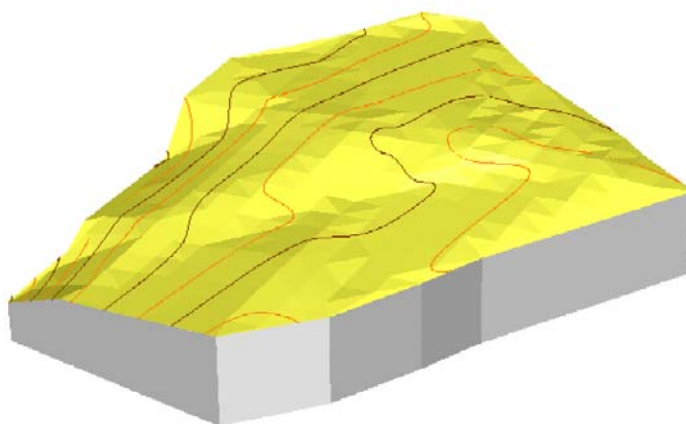


Figura 14: Bacia de recalques da 40ª campanha.

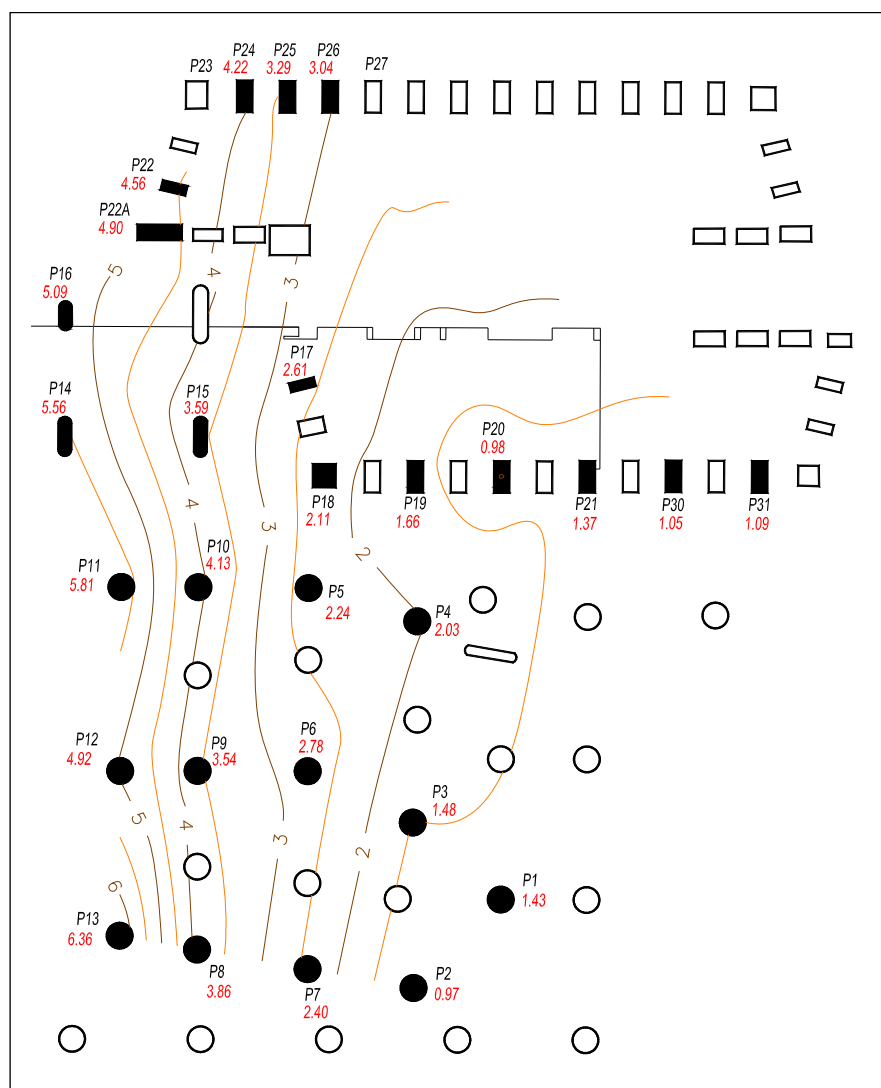


Figura 15: Curvas de iso-recalques da 50ª campanha.

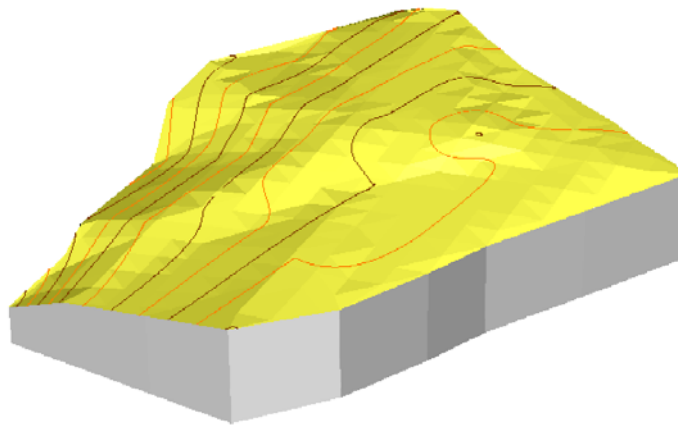


Figura 16: Bacia de recalques da 50ª campanha.

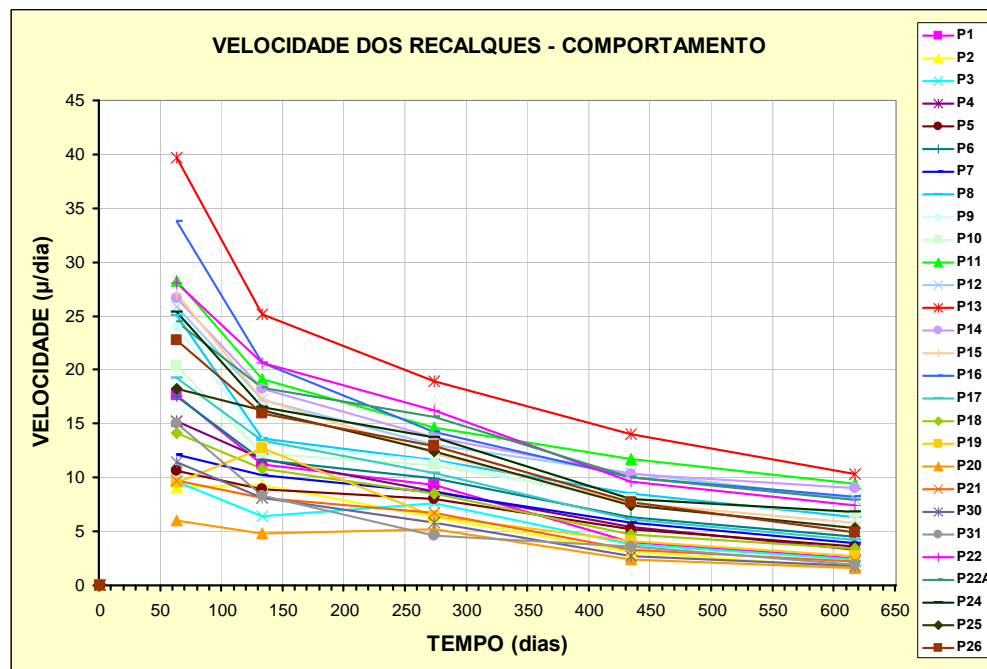


Figura 17: Velocidade dos recalques: comportamento.

Para o cálculo dos recalques diferenciais e distorções angulares foram analisadas nove linhas de pilares (seções), sendo quatro longitudinais e cinco transversais (Figura 18); tomando-se como base a 50ª campanha foram elaborados os desenhos das nove seções em escala deformada $V=10H$, com o intuito de realçar as variações dos recalques (Figuras 19 a 27). Em cada seção, a distorção angular máxima foi determinada pela maior razão calculada entre os recalques diferenciais e as correspondentes distâncias entre dois pontos consecutivos de referência na estrutura (pinos de controle); a inclinação de cada linha analisada, expressa em termos percentuais, corresponde à tangente do ângulo de inclinação obtido considerando-se a diferença de nível e a distância entre os pontos extremos, multiplicada por cem. Apresenta-se na Tabela 1 um resumo dos parâmetros determinados nas seções.

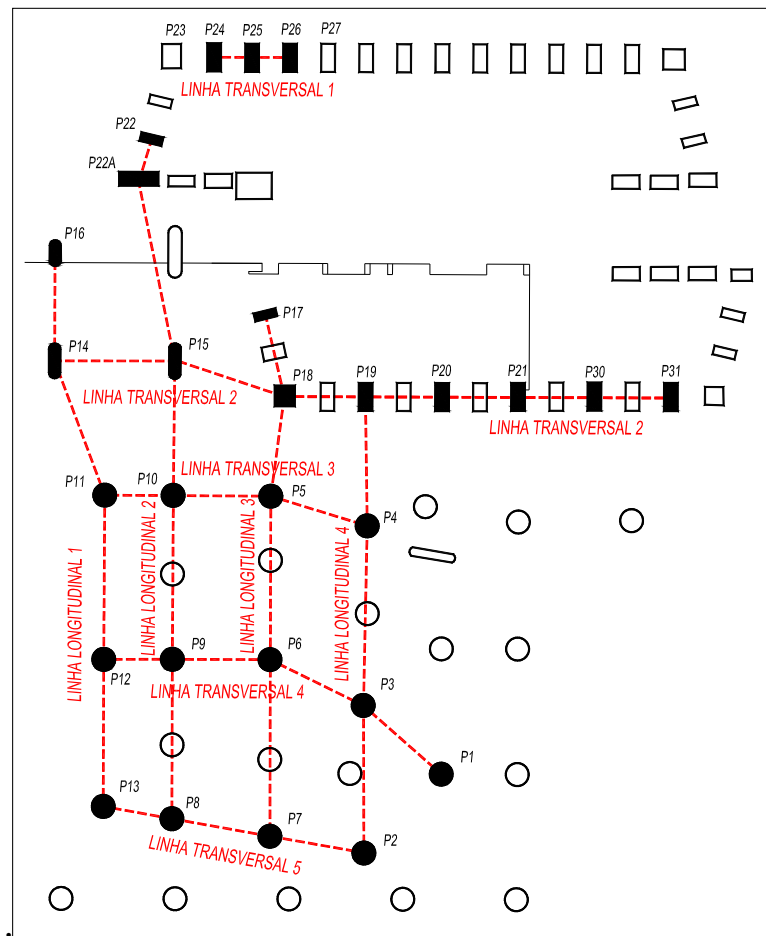


Figura 18: Esquema das linhas de pilares para análise dos recalques diferenciais.

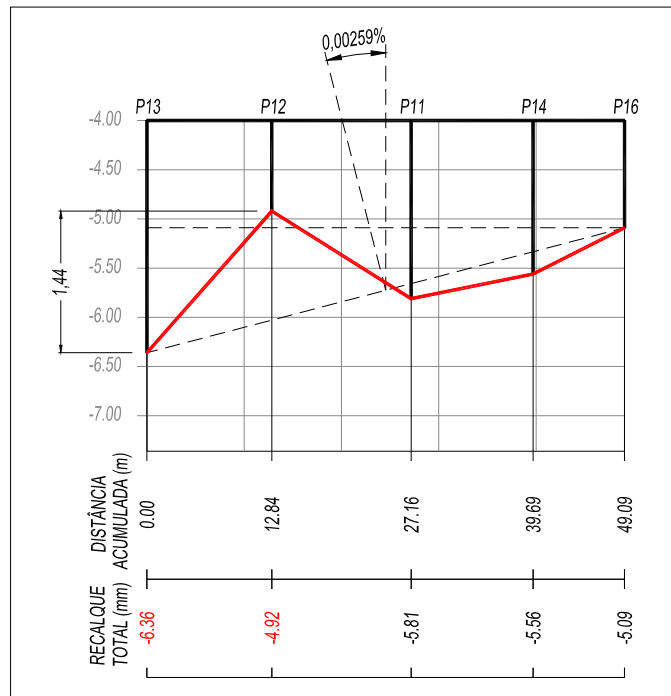


Figura 19: Seção longitudinal 1.

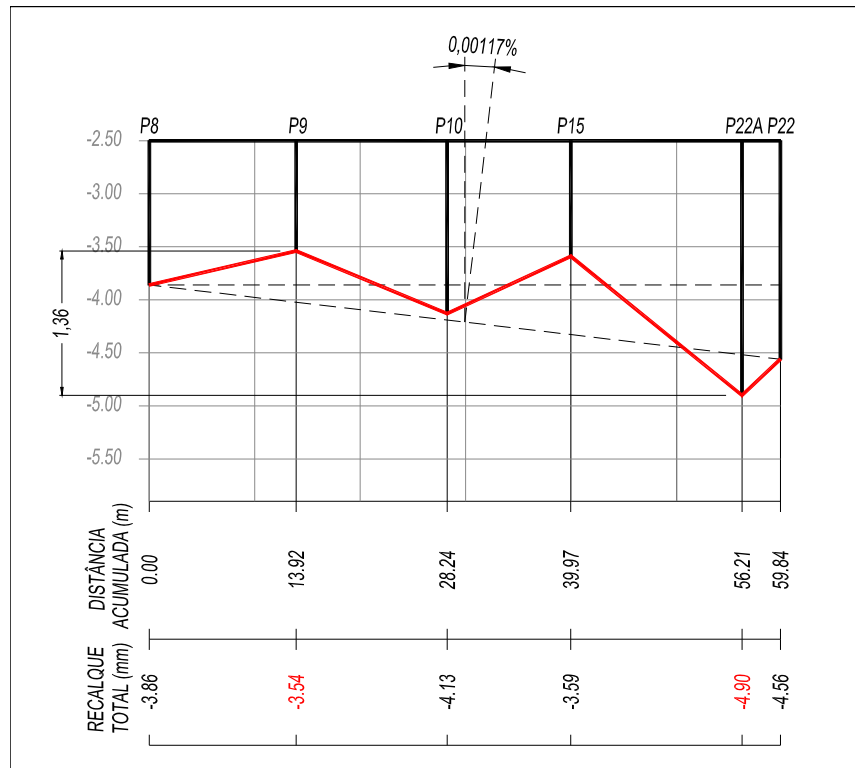


Figura 20: Seção longitudinal 2.

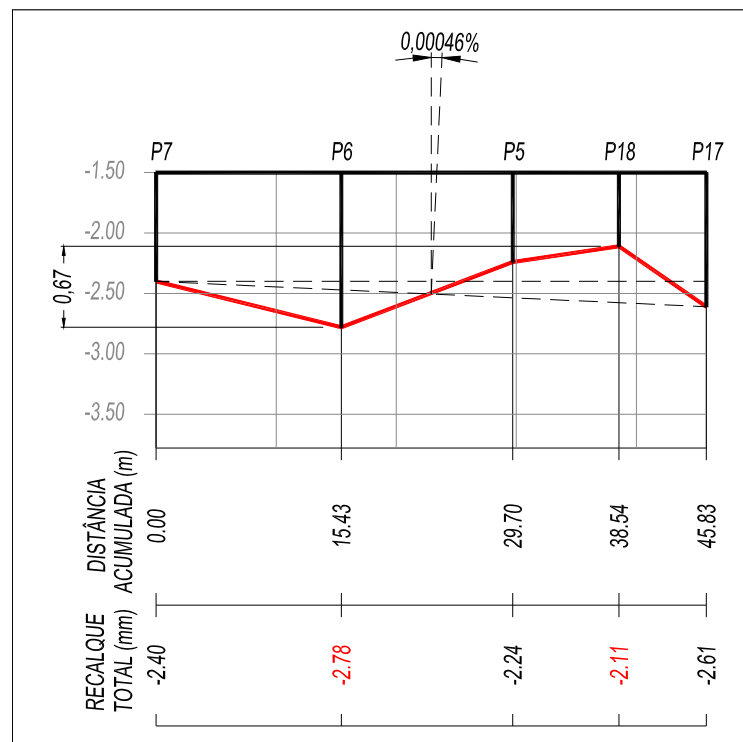


Figura 21: Seção longitudinal 3.

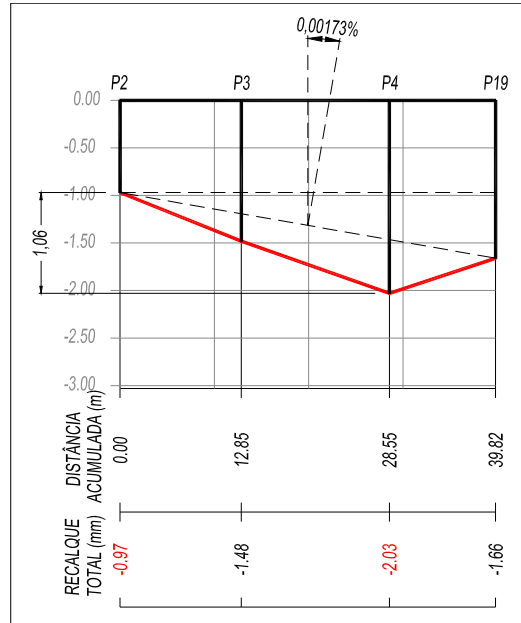


Figura 22: Seção longitudinal 4.

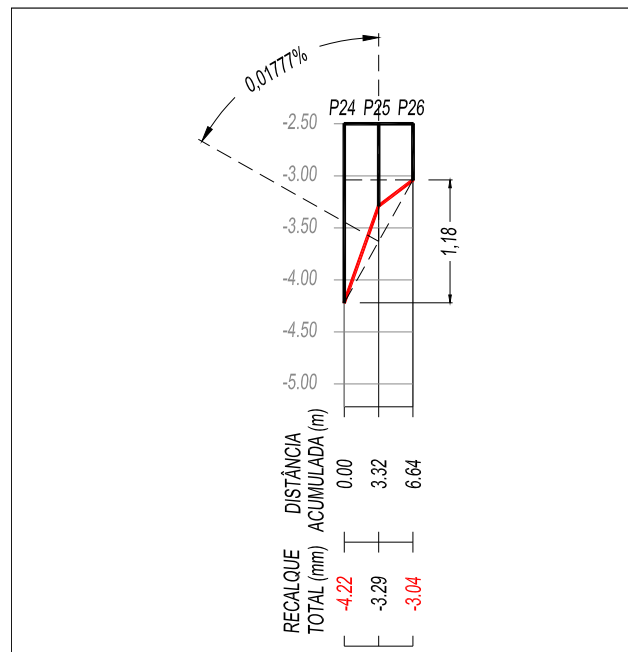


Figura 23: Seção transversal 1.

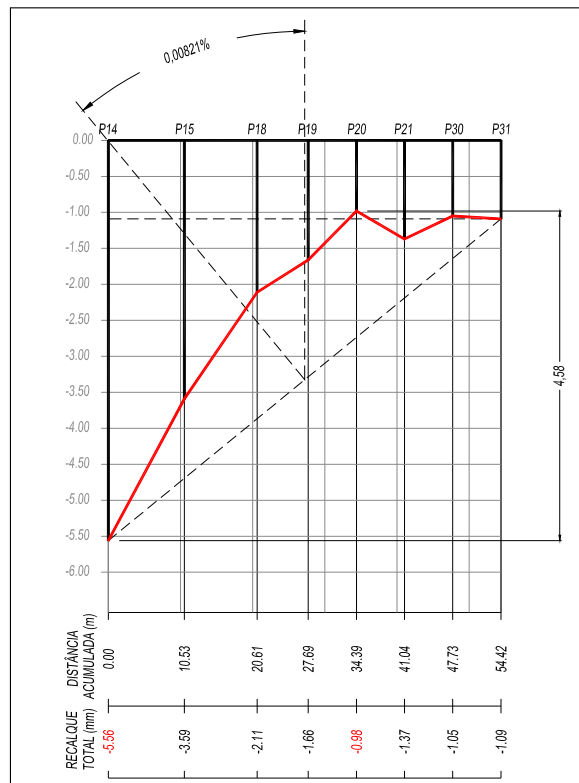


Figura 24: Seção transversal 2.

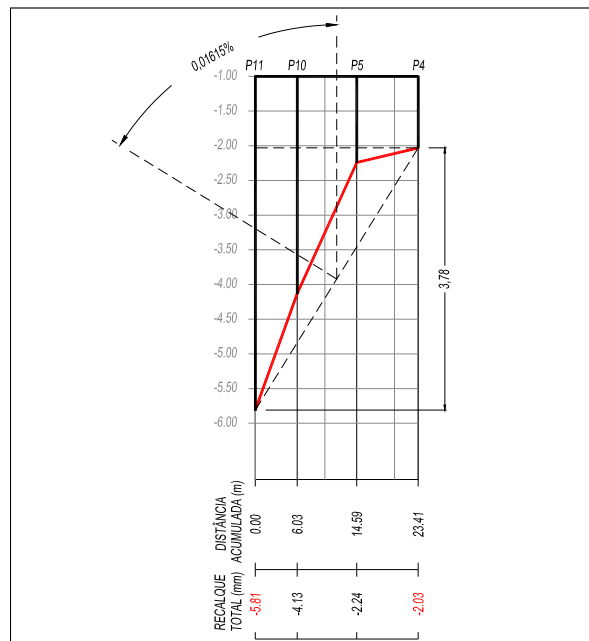


Figura 25: Seção transversal 3.

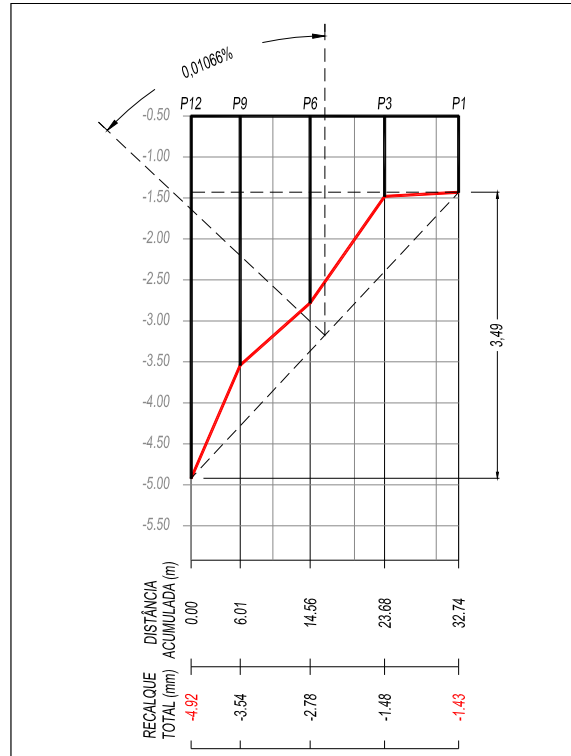


Figura 26: Seção transversal 4.

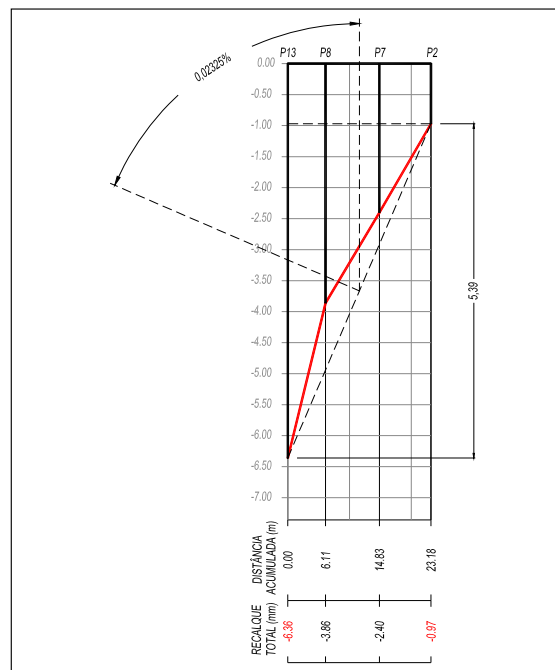


Figura 27: Seção transversal 5.

Tabela 1: Parâmetros determinados nas seções estudadas.

SEÇÃO	RECALQUE UNIFORME (mm)	RECALQUE DIFERENCIAL MÁXIMO (mm)	DISTORÇÃO ANGULAR MÁXIMA	INCLINAÇÃO (%)
LONGIT. 1	4,92	1,44	1:8.917	0,00259
LONGIT. 2	3,54	1,36	1:10.676	0,00117
LONGIT. 3	2,11	0,67	1:14.580	0,00046
LONGIT. 4	0,97	1,06	1:25.196	0,00173
TRANSV. 1	3,04	1,18	1:3.570	0,01777
TRANSV. 2	0,98	4,58	1:5.345	0,00821
TRANSV. 3	2,03	3,78	1:3.589	0,01615
TRANSV. 4	1,43	3,49	1:4.355	0,01066
TRANSV. 5	0,97	5,39	1:2.444	0,02325

A análise das seções e dos parâmetros determinados permitiu as seguintes observações:

- a) quanto à magnitude dos recalques absolutos podem-se considerar três faixas de ocorrência ao final do período estudado:
 - uma faixa inferior formada por quatorze pinos de controle (50%) e com recalques absolutos menores do que 300.10^{-2} mm;
 - uma faixa intermediária formada por dez pinos de controle (36%) e com recalques absolutos entre 300.10^{-2} mm e 500.10^{-2} mm;
 - uma faixa superior formada por quatro pinos de controle (14%) e com recalques absolutos maiores do que 500.10^{-2} mm;
- b) a seção longitudinal 1 apresenta o maior recalque uniforme dentre todas as seções, ocorrência justificada pelo fato de ser composta pelos cinco pontos de controle que apresentaram os maiores recalques absolutos no período estudado;
- c) na avaliação dos recalques uniformes, à seção longitudinal 1 seguem-se as seções longitudinais 2 e 3, intermediadas pela seção transversal 1, sendo esta última composta por três pinos de controle bem próximos, pertencentes à faixa intermediária e apresentando comportamento similar;
- d) as seções transversais 2 a 5 apresentam os quatro maiores recalques diferenciais, ocorrência explicada pela simples observação das curvas de iso-recalques e bacia de recalques da campanha 50, que mostram o comportamento global dos recalques na direção transversal;
- e) a ocorrência dos dois maiores recalques diferenciais observados, com o valor de 5,39 mm e 4,58 mm, apresentados nas seções transversais 5 e 2, respectivamente, deve-se ao fato de essas duas seções terem, cada uma nas suas extremidades, pontos com recalques absolutos cujos valores estão enquadrados na faixa superior e inferior;
- f) o comportamento dos recalques na direção transversal, segundo a qual se observam os maiores recalques diferenciais, explica a ocorrência das maiores distorções angulares e inclinações nas linhas transversais;
- g) ainda com relação às distorções angulares e inclinações são destaque os valores apresentados na seção transversal 5, 1:2.444 e 0,02325%, respectivamente, sendo que esta seção apresenta nas suas extremidades o maior (6,36 mm) e o menor (0,97 mm) recalques absolutos observados.

Um aspecto de interesse a considerar na análise dos resultados é a questão da previsão dos recalques. A leitura dos gráficos elaborados fornece indicação de tendência de crescimento até a campanha 50, aspecto evidenciado principalmente nos gráficos de evolução temporal dos recalques dos pontos que acusaram os maiores recalques

absolutos (seção longitudinal 1). Com o intuito de melhor compreender o comportamento apresentado pela estrutura procurou-se estudá-lo globalmente, para o que se adotou o uso dos recalques médios até a campanha 50. Analisou-se a série temporal composta pelos recalques médios (RECMED) de três formas:

- estudo de regressão linear e análise de variância (ANOVA) da série RECMED (Figura 28), usando-se o **Excel**;
- estudo de regressão polinomial e análise de variância (ANOVA) da série RECMED (Figura 29), usando-se o software estatístico **Minitab 15**;
- estudo de médias móveis de três e cinco termos da série RECMED.

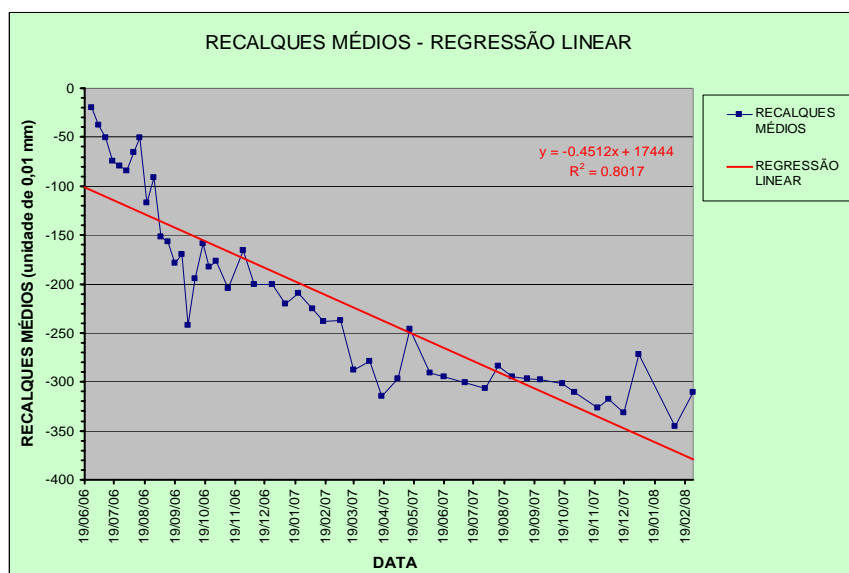


Figura 28: Recalques médios: regressão linear.

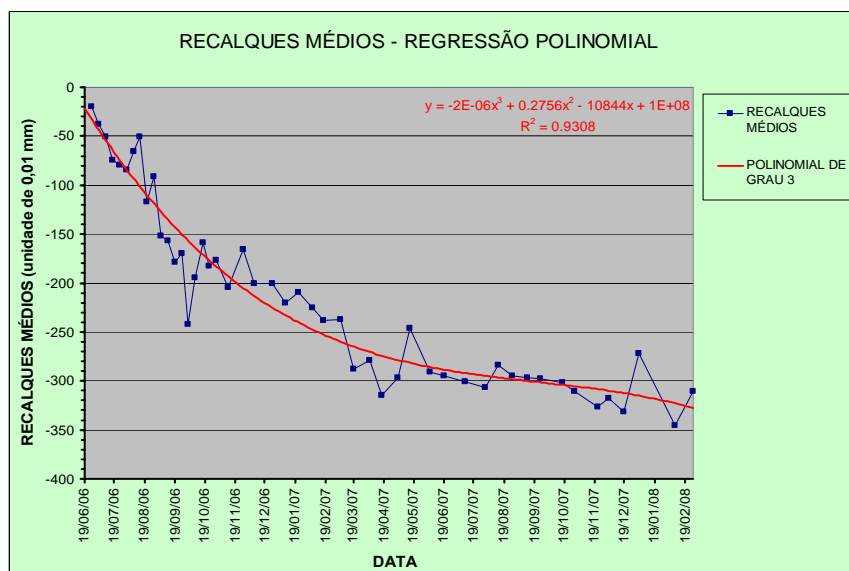


Figura 29: Recalques médios: regressão polinomial.

No estudo (a) foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 2; os testes estatísticos aplicados foram:

- a.1) teste F (Fisher-Snedecor): em regressão linear simples F é em geral uma variável com distribuição F (1, n-2) graus de liberdade; a significância da regressão é indicada por valores grandes da estatística;
- a.2) teste t (Student): deve apresentar valores em módulo maiores do que dois, sinalizando que os coeficientes são diferentes de zero; a significância é dada pelos intervalos de confiança para o nível especificado (95%), que não podem conter zeros;
- a.3) valor-P: deve apresentar valor inferior a 0,05, indicando a significância dos parâmetros determinados.

Tabela 2: Regressão linear e ANOVA: recalques médios.

REGRESSÃO LINEAR E ANOVA – SÉRIE ORIGINAL RECMED – RESUMO DOS RESULTADOS						
Estatística de regressão						
R	0,895375	COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO				
R²	80,2%	COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO				
R² ajustado	79,7%	COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO AJUSTADO				
Erro padrão	41,606660					
Observações	49					
ANOVA – Análise de Variância						
FONTE VARIAÇÃO	GRAUS LIBERDADE	SOMA QUADRADOS	QUAD. MÉDIO	TESTE F		
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F significância</i>	
Regressão	1	328930,2862	328930,2862	190,0107	0,00000	
Resíduo	47	81362,36707	1731,114193			
Total	48	410292,6533				
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Estatística t</i>	<i>valor-P</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Interseção	-17443,67707	1281,004144	-13,61719019	0,00000	-20020,72497	-14866,62918
DATA	0,451166879	0,032730161	13,78443827	0,00000	0,38532229	0,51701

A regressão apresentou coeficiente de correlação de 0,90 e todos os testes estatísticos apresentaram resultados indicativos de boa ajustagem linear.

No estudo (b) foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 3. Os testes F e valor-P são indicativos de significância da regressão. O valor do coeficiente de correlação é indicativo de boa ajustagem polinomial de terceiro grau. Os gráficos com os intervalos de predição PI e confiança da predição CI, com nível de confiança de 95%, e de impressão dos resíduos são apresentados nas Figuras 30 e 31. Verifica-se a existência de observação claramente discrepante, como assinalado nessas figuras, pelo que foi expurgada e nova regressão efetuada. Os resultados da série RECMDC expurgada da observação discrepante são apresentados na Tabela 4. O valor do coeficiente de correlação é indicativo da boa ajustagem polinomial e os indicadores ANOVA, teste F e valor-P, são indicativos de significância da regressão e melhores do que a efetuada na série original. Os gráficos com os intervalos de predição PI e confiança da predição CI, com nível de confiança de 95%, e de impressão dos resíduos são apresentados nas Figuras 32 e 33.

Tabela 3: Regressão polinomial e ANOVA: recalques médios.

REGRESSÃO POLINOMIAL E ANOVA – SÉRIE ORIGINAL RECMED – RESUMO DOS RESULTADOS					
<i>Estatística de regressão</i>		COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO AJUSTADO			
R	0,964801				
R²	93,1%				
R² ajustado	92,6%				
Erro padrão	25,1109				
Observações	49				
ANOVA – Análise de Variância					
FONTE VARIAÇÃO	GRAUS LIBERDADE	SOMA QUADRADOS	QUAD. MÉDIO	TESTE F	
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
Regressão	3	381918	127306	201,89	0,00000
Resíduo	45	28375	631		
Total	48	410293			

Tabela 4: Regressão polinomial e ANOVA: série RECMDC.

REGRESSÃO POLINOMIAL E ANOVA – SÉRIE RECMDC – RESUMO DOS RESULTADOS					
Estatística de regressão		COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO AJUSTADO			
R	0,974267				
R²	94,9%				
R² ajustado	94,6%				
Erro padrão	21,7445				
Observações	48				
ANOVA – Análise de Variância					
FONTE VARIAÇÃO	GRAUS LIBERDADE	SOMA QUADRADOS	QUAD. MÉDIO	TESTE F	
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
Regressão	3	388694	129565	274,02	0,00000
Resíduo	44	20804	473		
Total	47	409499			

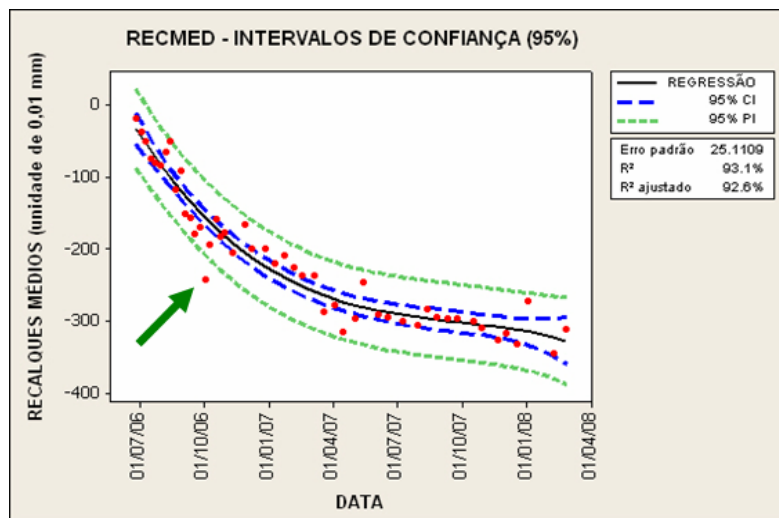


Figura 30: Regressão polinomial: intervalos de confiança.

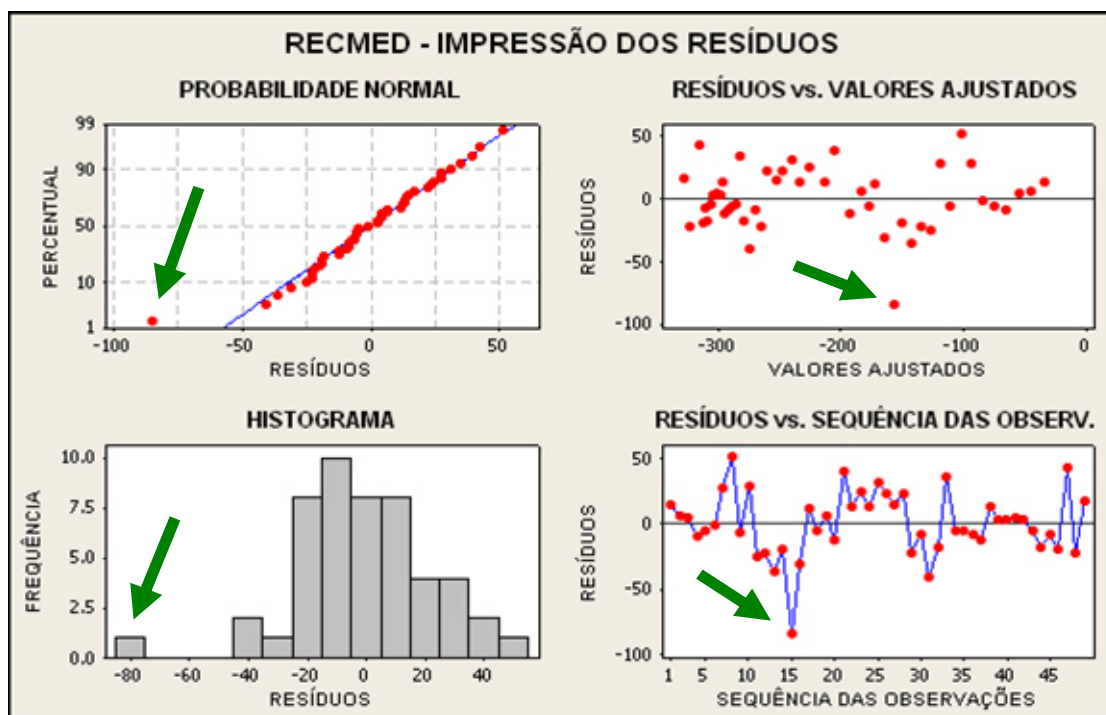


Figura 31: Regressão polinomial: impressão de resíduos.

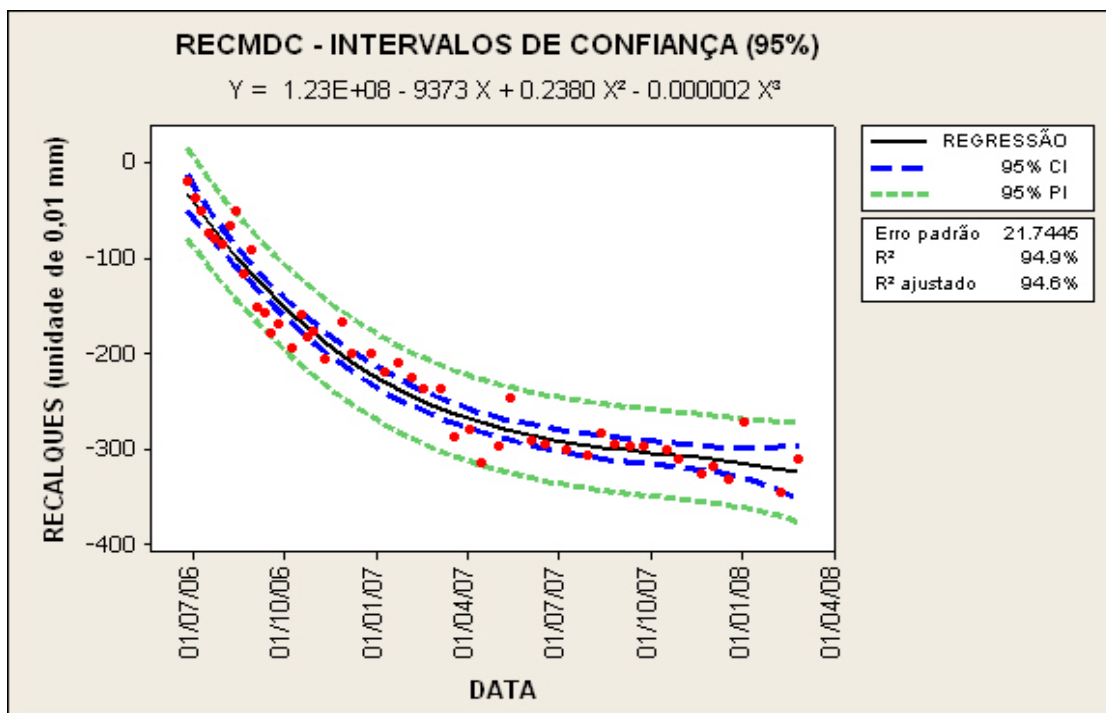


Figura 32: Regressão polinomial da série RECMDC: intervalos de confiança.

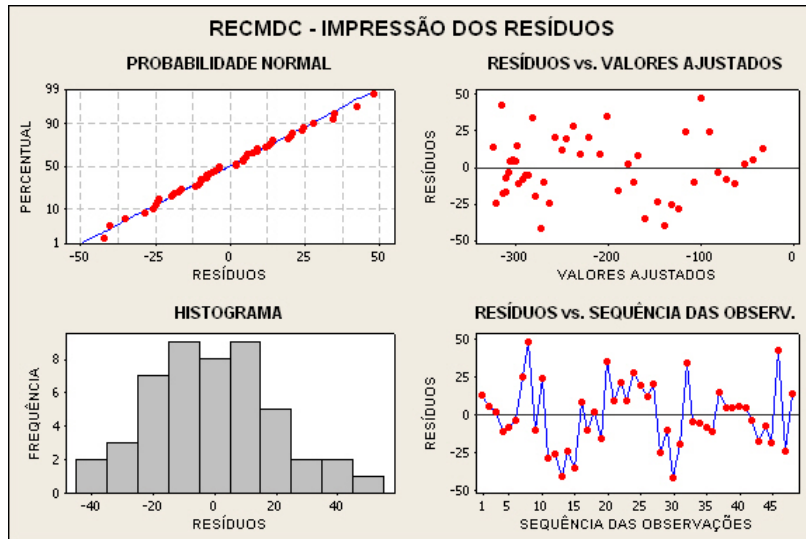


Figura 33: Regressão polinomial da série RECMDC: impressão dos resíduos.

No estudo (c) adotou-se o método de médias móveis duplas, mais indicado para previsão de séries com tendência linear. Adotando-se a suavização da série original RECMED pelo método das médias móveis duplas, com três e cinco termos, obteve-se os resultados apresentados nas Tabelas 5 e 6.

Para efeito de avaliação das previsões obtidas foram calculados os seguintes indicadores de precisão:

- erro – diferença entre o valor observado e a previsão, em cada instante;
- EQM – erro quadrático médio;
- APE – erro absoluto percentual, em cada instante;
- MAPE – erro absoluto médio percentual.

Suavizada a série original pelos dois processos determinou-se a regressão e análise de variância da média móvel dupla que apresentou os menores valores de EQM e MAPE (Figura 34); os resultados obtidos constam da Tabela 7.

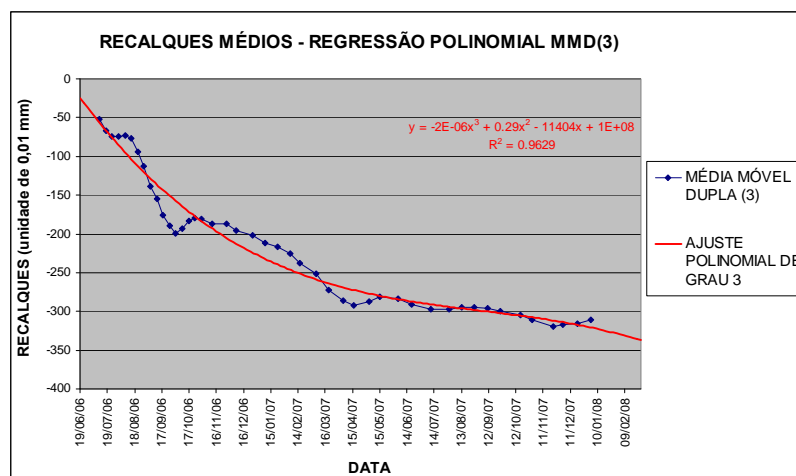


Figura 34: Média móvel dupla de ordem 3: regressão polinomial.

Tabela 5: Médias móveis de três termos: série RECMED.

OBSERVAÇÕES		INSTANTE	SÉRIE	M. MÓVEL	PREVISÃO	ERRO	APE	MM. DUPLA	PREVISÃO	ERRO	APE
CAMP.	DATA	t	RECMED	MMS (3)	PMMS (3)	PMMS (3)	PMMS (3)	MMD (3)	PMMD (3)	PMMD (3)	PMMD (3)
1	19/06/06										
2	26/06/06	1	-19,4								
3	03/07/06	2	-37,4	-35,7							
4	10/07/06	3	-50,4	-53,9	-35,7	-14,7	29,1%	-52,6			
5	17/07/06	4	-74,0	-68,1	-53,9	-20,1	27,1%	-67,1	-56,6	-17,4	23,5%
6	24/07/06	5	-79,9	-79,5	-68,1	-11,8	14,8%	-74,7	-69,9	-10,0	12,5%
7	31/07/06	6	-84,6	-76,6	-79,5	-5,1	6,1%	-74,3	-89,0	4,4	5,2%
8	07/08/06	7	-65,2	-66,8	-76,6	11,4	17,4%	-73,7	-81,2	15,9	24,4%
9	14/08/06	8	-50,5	-77,6	-66,8	16,3	32,2%	-76,9	-53,1	2,5	5,0%
10	21/08/06	9	-117,1	-86,2	-77,6	-39,5	33,7%	-94,6	-79,1	-38,0	32,5%
11	28/08/06	10	-91,1	-120,0	-86,2	-4,9	5,3%	-113,2	-69,5	-21,6	23,7%
12	04/09/06	11	-151,9	-133,2	-120,0	-31,9	21,0%	-138,6	-133,7	-18,2	12,0%
13	11/09/06	12	-156,7	-162,5	-133,2	-23,5	15,0%	-154,7	-122,5	-34,2	21,8%
14	18/09/06	13	-178,9	-168,5	-162,5	-16,4	9,2%	-175,9	-178,0	-0,9	0,5%
15	25/09/06	14	-169,8	-196,9	-168,5	-1,3	0,8%	-189,1	-153,5	-16,3	9,6%
16	02/10/06	15	-241,9	-202,1	-196,9	-45,1	18,6%	-199,2	-212,3	-29,6	12,2%
17	09/10/06	16	-194,6	-198,6	-202,1	7,5	3,8%	-193,1	-208,0	13,3	6,9%
18	17/10/06	17	-159,2	-178,7	-198,6	39,4	24,8%	-183,3	-209,5	50,3	31,6%
19	23/10/06	18	-182,3	-172,6	-178,7	-3,6	2,0%	-179,7	-169,5	-12,8	7,0%
20	30/10/06	19	-176,5	-187,9	-172,6	-3,8	2,2%	-181,0	-158,5	-18,0	10,2%
21	11/11/06	20	-204,8	-182,4	-187,9	-17,0	8,3%	-186,9	-201,6	-3,2	1,6%
22	27/11/06	21	-166,0	-190,3	-182,4	16,4	9,9%	-187,2	-173,6	7,6	4,6%
23	08/12/06	22	-200,0	-188,8	-190,3	-9,7	4,9%	-195,3	-196,5	-3,5	1,8%
24	26/12/06	23	-200,4	-206,8	-188,8	-11,6	5,8%	-201,8	-175,8	-24,5	12,2%
25	08/01/07	24	-219,9	-209,8	-206,8	-13,1	6,0%	-211,5	-216,7	-3,2	1,4%
26	22/01/07	25	-209,1	-218,1	-209,8	0,7	0,3%	-217,3	-206,3	-2,8	1,3%
27	05/02/07	26	-225,2	-224,0	-218,1	-7,1	3,2%	-225,1	-219,6	-5,6	2,5%
28	16/02/07	27	-237,8	-233,4	-224,0	-13,8	5,8%	-237,2	-221,7	-16,0	6,7%
29	06/03/07	28	-237,1	-254,2	-233,4	-3,8	1,6%	-251,8	-225,7	-11,4	4,8%
30	19/03/07	29	-287,6	-267,9	-254,2	-33,4	11,6%	-271,9	-258,9	-28,7	10,0%
31	04/04/07	30	-278,9	-293,8	-267,9	-11,0	4,0%	-286,2	-259,7	-19,2	6,9%
32	16/04/07	31	-314,8	-297,0	-293,8	-21,1	6,7%	-292,3	-308,9	-5,9	1,9%
33	03/05/07	32	-297,2	-286,2	-297,0	-0,2	0,1%	-287,1	-306,3	9,1	3,1%
34	15/05/07	33	-246,6	-278,2	-286,2	39,6	16,1%	-280,6	-284,4	37,8	15,3%
35	04/06/07	34	-290,7	-277,3	-278,2	-12,5	4,3%	-283,6	-273,4	-17,3	6,0%
36	19/06/07	35	-294,6	-295,3	-277,3	-17,3	5,9%	-291,1	-264,7	-29,9	10,2%
37	10/07/07	36	-300,7	-300,7	-295,3	-5,3	1,8%	-297,7	-303,8	3,1	1,0%
38	30/07/07	37	-306,8	-296,9	-300,7	-6,1	2,0%	-297,6	-306,7	0,0	0,0%
39	13/08/07	38	-283,4	-295,1	-296,9	13,5	4,8%	-294,6	-295,7	12,3	4,3%
40	27/08/07	39	-295,0	-291,8	-295,1	0,1	0,0%	-294,4	-296,0	1,0	0,3%
41	11/09/07	40	-297,0	-296,5	-291,8	-5,2	1,8%	-295,6	-286,5	-10,5	3,5%
42	24/09/07	41	-297,4	-298,6	-296,5	-0,9	0,3%	-299,3	-298,2	0,8	0,3%
43	17/10/07	42	-301,3	-303,0	-298,6	-2,7	0,9%	-304,8	-297,0	-4,3	1,4%
44	29/10/07	43	-310,3	-312,9	-303,0	-7,3	2,4%	-311,4	-299,4	-10,9	3,5%
45	22/11/07	44	-326,9	-318,4	-312,9	-14,1	4,3%	-318,9	-315,7	-11,2	3,4%
46	03/12/07	45	-318,0	-325,4	-318,4	0,4	0,1%	-317,0	-317,5	-0,5	0,2%
47	18/12/07	46	-331,3	-307,2	-325,4	-5,9	1,8%	-316,3	-342,2	10,9	3,3%
48	02/01/08	47	-272,4	-316,4	-307,2	34,8	12,8%	-311,0	-289,1	16,6	6,1%
49	08/02/08	48	-345,3	-309,5	-316,4	-29,0	8,4%		-327,0	-18,4	5,3%
50	26/02/08	49	-310,8		-309,5	-1,3	0,4%				
INDICADORES DE PRECISÃO				EQM	336,476	MAPE	8,5%	EQM	327,911	MAPE	8,0%

Tabela 6: Médias móveis de cinco termos: série RECMED.

OBSERVAÇÕES		INSTANTE	SÉRIE	M. MÓVEL	PREVISÃO	ERRO	APE	MM. DUPLA	PREVISÃO	ERRO	APE
CAMP.	DATA	t	RECMED	MMS (5)	PMMS (5)	PMMS (5)	PMMS (5)	MMD (5)	PMMD (5)	PMMD (5)	PMMD (5)
1	19/06/06										
2	26/06/06	1	-19,4								
3	03/07/06	2	-37,4								
4	10/07/06	3	-50,4	-52,2							
5	17/07/06	4	-74,0	-65,2							
6	24/07/06	5	-79,9	-70,8	-52,2	-27,7	34,7%	-67,7			
7	31/07/06	6	-84,6	-70,8	-65,2	-19,4	22,9%	-73,6	-75,5	-9,2	10,8%
8	07/08/06	7	-65,2	-79,5	-70,8	5,6	8,6%	-79,6	-66,7	1,5	2,3%
9	14/08/06	8	-50,5	-81,7	-70,8	20,3	40,2%	-88,1	-79,3	28,7	56,8%
10	21/08/06	9	-117,1	-95,2	-79,5	-37,6	32,1%	-101,8	-72,1	-45,0	38,4%
11	28/08/06	10	-91,1	-113,5	-81,7	-9,4	10,3%	-115,8	-85,2	-5,9	6,4%
12	04/09/06	11	-151,9	-139,1	-95,2	-56,7	37,3%	-135,4	-109,9	-42,0	27,6%
13	11/09/06	12	-156,7	-149,7	-113,5	-43,2	27,6%	-154,1	-144,6	-12,1	7,7%
14	18/09/06	13	-178,9	-179,8	-139,1	-39,8	22,2%	-169,2	-143,0	-35,9	20,1%
15	25/09/06	14	-169,8	-188,4	-149,7	-20,1	11,8%	-179,3	-195,8	26,1	15,3%
16	02/10/06	15	-241,9	-188,9	-179,8	-62,1	25,7%	-187,5	-202,1	-39,9	16,5%
17	09/10/06	16	-194,6	-189,6	-188,4	-6,2	3,2%	-188,2	-190,9	-3,7	1,9%
18	17/10/06	17	-159,2	-190,9	-188,9	29,7	18,7%	-186,1	-191,5	32,4	20,3%
19	23/10/06	18	-182,3	-183,5	-189,6	7,3	4,0%	-185,5	-198,1	15,8	8,7%
20	30/10/06	19	-176,5	-177,8	-190,9	14,4	8,2%	-185,5	-180,4	3,9	2,2%
21	11/11/06	20	-204,8	-185,9	-183,5	-21,4	10,4%	-187,0	-166,1	-38,7	18,9%
22	27/11/06	21	-166,0	-189,5	-177,8	11,7	7,1%	-190,1	-184,3	18,3	11,0%
23	08/12/06	22	-200,0	-198,2	-185,9	-14,1	7,0%	-196,7	-188,7	-11,3	5,7%
24	26/12/06	23	-200,4	-199,1	-189,5	-10,8	5,4%	-203,2	-200,5	0,1	0,0%
25	08/01/07	24	-219,9	-210,9	-198,2	-21,7	9,9%	-210,5	-192,8	-27,1	12,3%
26	22/01/07	25	-209,1	-218,5	-199,1	-10,0	4,8%	-218,7	-211,5	2,4	1,2%
27	05/02/07	26	-225,2	-225,8	-210,9	-14,3	6,3%	-229,6	-218,1	-7,1	3,1%
28	16/02/07	27	-237,8	-239,3	-218,5	-19,3	8,1%	-241,6	-220,2	-17,6	7,4%
29	06/03/07	28	-237,1	-253,3	-225,8	-11,3	4,8%	-254,6	-235,9	-1,2	0,5%
30	19/03/07	29	-287,6	-271,2	-239,3	-48,2	16,8%	-266,4	-251,4	-36,2	12,6%
31	04/04/07	30	-278,9	-283,1	-253,3	-25,6	9,2%	-275,7	-278,5	-0,4	0,1%
32	16/04/07	31	-314,8	-285,0	-271,2	-43,6	13,8%	-282,8	-294,3	-20,5	6,5%
33	03/05/07	32	-297,2	-285,7	-283,1	-14,1	4,7%	-285,7	-288,4	-8,8	3,0%
34	15/05/07	33	-246,6	-288,8	-285,0	38,4	15,6%	-286,7	-285,6	39,0	15,8%
35	04/06/07	34	-290,7	-286,0	-285,7	-5,0	1,7%	-288,7	-292,0	1,3	0,4%
36	19/06/07	35	-294,6	-287,9	-288,8	-5,8	2,0%	-290,8	-281,8	-12,8	4,3%
37	10/07/07	36	-300,7	-295,2	-286,0	-14,7	4,9%	-292,3	-283,5	-17,2	5,7%
38	30/07/07	37	-306,8	-296,1	-287,9	-18,9	6,2%	-294,3	-299,6	-7,2	2,3%
39	13/08/07	38	-283,4	-296,6	-295,2	11,8	4,2%	-295,7	-298,7	15,3	5,4%
40	27/08/07	39	-295,0	-295,9	-296,1	1,1	0,4%	-296,7	-297,8	2,9	1,0%
41	11/09/07	40	-297,0	-294,8	-296,6	-0,4	0,2%	-298,8	-294,7	-2,3	0,8%
42	24/09/07	41	-297,4	-300,2	-295,9	-1,5	0,5%	-301,7	-288,8	-8,6	2,9%
43	17/10/07	42	-301,3	-306,6	-294,8	-6,5	2,2%	-306,0	-298,0	-3,3	1,1%
44	29/10/07	43	-310,3	-310,8	-300,2	-10,1	3,3%	-309,4	-307,5	-2,8	0,9%
45	22/11/07	44	-326,9	-317,6	-306,6	-20,4	6,2%	-313,1	-312,9	-14,1	4,3%
46	03/12/07	45	-318,0	-311,8	-310,8	-7,2	2,3%	-314,9	-324,3	6,3	2,0%
47	18/12/07	46	-331,3	-318,8	-317,6	-13,7	4,1%		-307,1	-24,2	7,3%
48	02/01/08	47	-272,4	-315,6	-311,8	39,4	14,5%				
49	08/02/08	48	-345,3		-318,8	-26,5	7,7%				
50	26/02/08	49	-310,8		-315,6	4,7	1,5%				
INDICADORES DE PRECISÃO				EQM	617,772	MAPE	11,0%	EQM	434,663	MAPE	9,1%

Tabela 7 – Regressão polinomial e ANOVA: média móvel dupla de ordem 3.

REGRESSÃO POLINOMIAL E ANOVA – MMD (3) – RESUMO DOS RESULTADOS					
Estatística de regressão		COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO AJUSTADO			
R	0,981253				
R²	96,3%				
R² ajustado	96,0%				
Erro padrão	16,5826				
Observações	45				
ANOVA – Análise de Variância					
FONTE VARIAÇÃO	GRAUS LIBERDADE	SOMA QUADRADOS	QUAD. MÉDIO	TESTE F	
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
Regressão	3	292261	97420,5	354,28	0,00000
Resíduo	41	11274	275,0		
Total	44	303536			

O valor do coeficiente de correlação é indicativo da boa ajustagem polinomial e os indicadores ANOVA, teste F e valor-P, são indicativos de significância da regressão e também melhores do que a efetuada na série original. Os gráficos com os intervalos de predição PI e confiança da predição CI, com nível de confiança de 95%, e de impressão dos resíduos são apresentados nas Figuras 35 e 36.

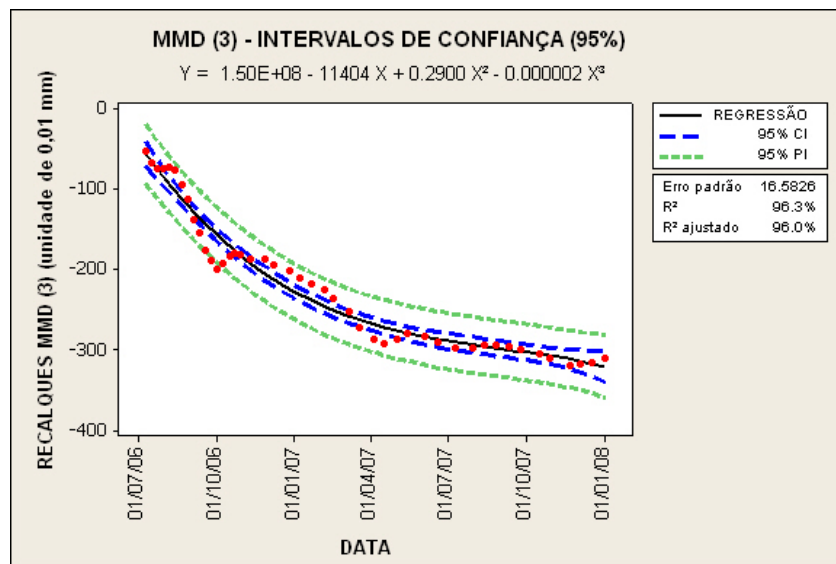


Figura 35: Regressão polinomial MMD (3): intervalos de confiança.

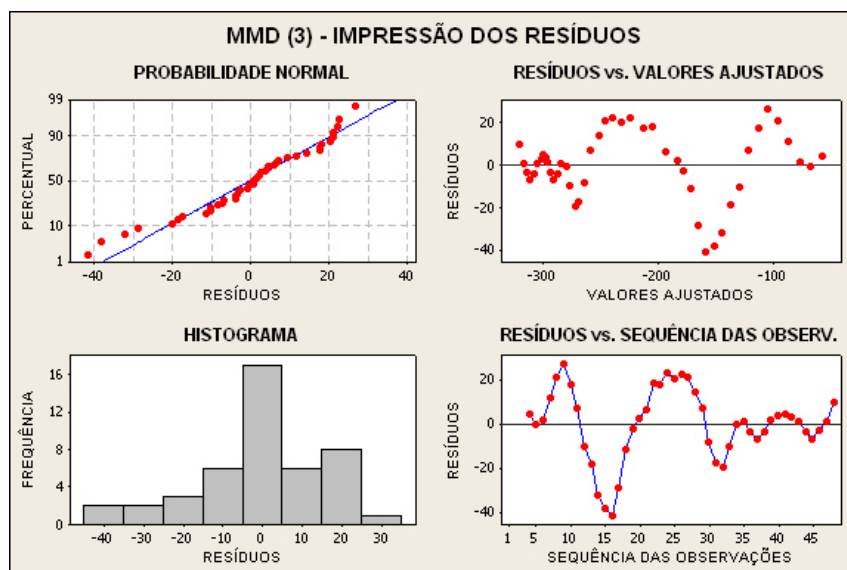


Figura 36: Regressão polinomial MMD (3): impressão dos resíduos.

De acordo com os modelos de previsão obtidos nos estudos efetuados e estando disponíveis à época do término desses mesmos estudos os dados referentes às campanhas de controle de recalque de números 51 a 57, obtiveram-se os resultados comparativos constantes da Tabela 8; verifica-se que o modelo de previsão que apresenta o menor MAPE é o modelo de regressão polinomial realizado no estudo (b), indicando ser o modelo de previsão mais adequado.

Tabela 8 – Modelos de previsão versus recalques médios observados.

CAMP.	DATA	RECALQUES MÉDIOS	MODELO DE PREVISÃO								
			ESTUDO (a)			ESTUDO (b)			ESTUDO (c)		
		VALORES OBSERVADOS	REGRESSÃO LINEAR	ERRO	APE	REGRESSÃO POLINOMIAL RECMDC	ERRO	APE	REGRESSÃO POLINOMIAL MMD (3)	ERRO	APE
51	28/03/08	-363,8	-393,2	29,4	8%	-332,2	-31,6	9%	-350,2	-13,6	4%
52	30/04/08	-334,7	-408,1	73,4	22%	-342,2	7,5	2%	-367,0	32,3	10%
53	30/05/08	-345,6	-421,6	76,0	22%	-353,6	8,0	2%	-385,6	40,0	12%
54	01/07/08	-329,6	-436,1	106,5	32%	-368,4	38,8	12%	-409,4	79,8	24%
55	05/08/08	-382,6	-451,9	69,3	18%	-388,3	5,7	1%	-440,6	58,0	15%
56	29/08/08	-376,6	-462,7	86,1	23%	-404,3	27,7	7%	-465,5	88,9	24%
57	26/09/08	-409,4	-475,3	65,9	16%	-425,9	16,5	4%	-498,5	89,1	22%
INDICADOR DE PRECISÃO			MAPE	20%		MAPE	5%		MAPE	16%	

OBSERVAÇÕES FINAIS

Na análise decorrente das campanhas de controle de recalque efetuadas verifica-se que os valores determinados tanto para recalques totais, quanto para recalques diferenciais, são muito inferiores aos valores limite geralmente encontrados na literatura para o caso de fundações diretas em sapatas, de que trata este estudo de caso. Skempton e Macdonald (1956) apud Cintra et al. (2003) propõem as seguintes recomendações de valores limite para os recalques diferenciais e totais máximos para estruturas usuais de aço ou concreto:

a) em areias:

- recalque diferencial = 25 mm;
- recalque total em sapatas isoladas = 40 mm;

- recalque total em radiers = 40 a 65 mm;

b) em argilas:

- recalque diferencial = 40 mm;
- recalque total em sapatas isoladas = 65 mm;
- recalque total em radiers = 65 a 100 mm.

No que concerne às distorções angulares, os valores apurados neste estudo são também inferiores aos valores limite apontados comumente na literatura. Burland et al. (1977) apud Cintra et al. (2003) destacam, de forma resumida, os seguintes valores limite:

- 1:300 – trincas em paredes de edifícios;
- 1:150 – danos estruturais em vigas e colunas de edifícios correntes.

A observação dos gráficos de evolução dos recalques e de comportamento das velocidades de recalque, bem como os estudos de previsão efetuados, mostram a tendência à continuidade dos mesmos, com velocidades decrescentes e acelerações médias negativas, porém, ainda sem estabilização. Ao término das cinquenta campanhas analisadas a obra vizinha em execução encontrava-se com a estrutura da 1ª torre concluída e em estágio de construção dos subsolos da 2ª torre. À data atual o monitoramento do conjunto arquitetônico existente prossegue, agora espaçado trimestralmente; a 1ª torre está concluída e a obra da 2ª torre está em curso.

Nesse estudo de caso foram analisados os dados resultantes das campanhas de controle de recalque realizadas ao longo de um ano e oito meses, tendo-se efetuado estudos de previsão com resultados considerados satisfatórios. Os resultados obtidos mostraram a consistência dos dados, propiciando a determinação de valores de predição de recalques segundo os três modelos construídos e a comparação com os recalques já efetivamente observados, tendo-se obtido pelo 2º modelo o erro absoluto médio percentual (MAPE) de 5%. Os dois outros modelos apresentaram MAPE na faixa situada entre 10% e 20%.

REFERÊNCIAS

- Alosnso, U. R., (1991). “Previsão e Controle das Fundações”, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 6122 (1996). “Projeto e Execução de Fundações”, Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 13133 (1994) “Execução de Levantamento Topográfico”, Rio de Janeiro.
- Casaca, J. M., Matos, J. L. e Dias, J. M. B. (2007). *Topografia Geral*, 4ª Edição Atualizada e Aumentada, Editora LTC, Rio de Janeiro.
- Cintra, J. C. A., Aoki, N. e Albeiro, J. H. (2003). “Tensão Admissível em Fundações Diretas”, Editora Rima, São Carlos.
- Cruz, V. N. R. (2007). “Modelo Matemático para Ajustamento de Rede Altimétrica de Alta Precisão”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 172 pp.
- Granemann, D. C. (2005). “Estabelecimento de uma Rede Geodésica para o Monitoramento de Estruturas: Estudo de Caso na Usina Hidrelétrica Salto Caxias”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 108 pp.
- IBGE. (1983). “Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos em Território Nacional. Resolução PR”, No 22, 36 pp.
- Moura, M. R. C. (2008). “Medição de Recalques em Estruturas de Pontes e Edifícios: Estudo de Casos”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 261 pp.
- Sêco e Pinto, P. S. (2006). “Algumas Reflexões sobre a Instrumentação de Estruturas Geotécnicas”, In: Documentos de Workshop en Ingenieria de Fundaciones (Touring Lecture), Sociedad Chilena de Geotecnia, Santiago, Chile, 19 pp.

- Silveira, J. F. A. (2006). "Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento", Oficina de Textos, São Paulo.
- Zeiske, K. (2000). "Surveying Made Easy", Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Switzerland.