

6.

Medição de recalques

6.1

Localização dos pinos

Em aterros de grandes dimensões como o do presente estudo, uma das primeiras dificuldades que surge para que se possa fazer acompanhamento de recalques é a escolha de um ponto que possa servir como referência de nível. Para que as medições tenham precisão aceitável, as referências devem estar localizadas nas proximidades dos pontos cujo desnível se deseja determinar, sendo essa distância recomendada pela NBR 13133 como sendo de, no máximo, 60 metros. Como não é normal que sejam encontrados pontos já existentes capazes de servir como benchmarks em distâncias dessa ordem, há necessidade de serem implantadas referências profundas de nível através de procedimento específico, conforme descrito em detalhes por Dunnicliff (1993).

Felizmente, no caso em estudo ocorreu um didático efeito de punção do asfalto pelos blocos de coroamento das estacas que servem de fundação às torres de iluminação, criando uma superfície de corte vertical no pavimento asfáltico e deixando expostas as laterais dos blocos. De acordo com a documentação da obra, as estacas foram cravadas à nega, e, por isso, passou-se a assumir inicialmente que esses blocos (ou caixas) pudessem servir como benchmarks, pois ainda que estivessem recalando, nitidamente estavam recalando menos do que o aterro em si.

O pátio contava com cinco dessas estruturas estaqueadas, e decidiu-se usar quatro delas para a instalação dos pinos metálicos que serviriam de referência. Três eram os blocos já citados e a outra era uma caixa com as mesmas dimensões dos blocos, mas cuja finalidade original se desconhece.

Próximo a cada pino instalado nos blocos foi instalado outro pino metálico a uma distância aproximada de quatro metros, de modo a se fugir da zona de levantamento da capa asfáltica criada com a punção.

Além dos quatro pinos metálicos assim instalados, foi instalado um quinto pino à meia distância entre o bloco de uma das torres e a caixa, que distam de 26,4 metros. Isso se deveu ao fato de naquele local terem ocorrido, visualmente, os maiores recalques de todo o pátio.

Assim, os pinos se distribuíram dentro dos três locais indicados na imagem de satélite da figura 6.1.

Conforme a figura, o acompanhamento de recalques se concentrou em 3 locais do terreno, sendo um principal (Local 1), que é onde foram executados ensaios in situ e coletadas amostras Shelby para ensaio em laboratório, e dois secundários (Locais 3 e 4), onde foi realizado tão somente o acompanhamento descrito neste capítulo.

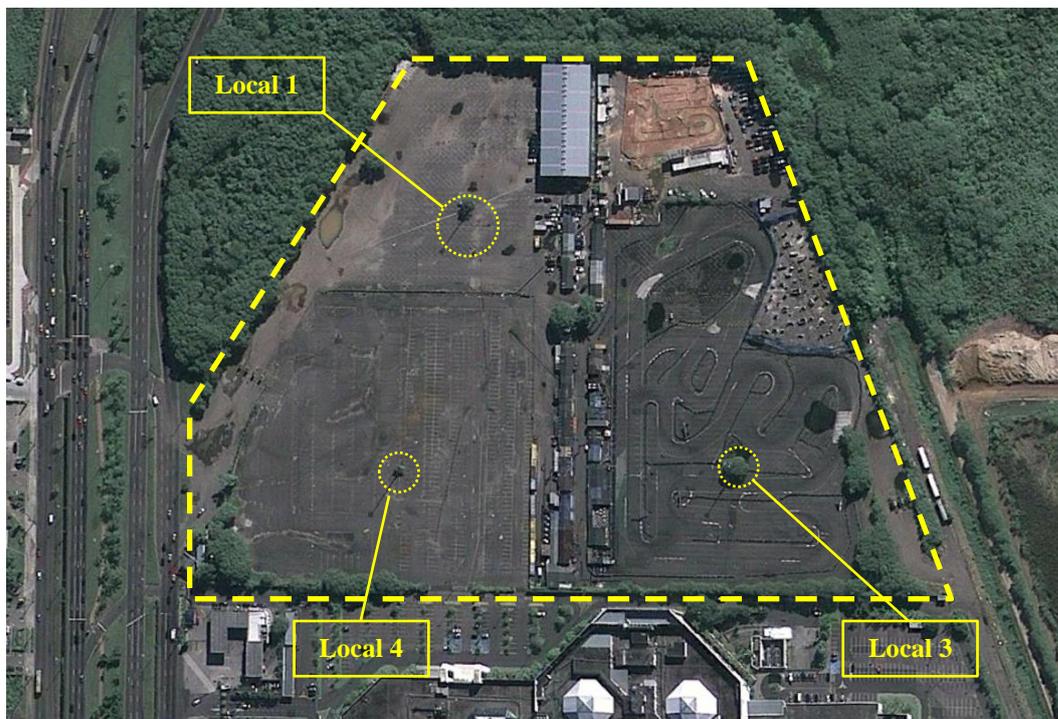


Figura 6.1 – Locais de instalação dos pinos para acompanhamento de recalque

No Local 1 dispunha-se de 2 benchmarks e 3 marcos superficiais, sendo 1 próximo a cada benchmark e 1 à meia distância entre eles. Dessa forma, o acompanhamento de recalques foi feito nivelando os marcos externos com o benchmark mais próximo (M1/B1 e M2/B2) e nivelando o marco intermediário com os dois benchmarks (M0/B1 e M0/B2).

A seguir, apresenta-se um croqui em planta com a distribuição dos pinos (figura 6.2) e uma foto do local com setas indicando suas posições (figura 6.3).

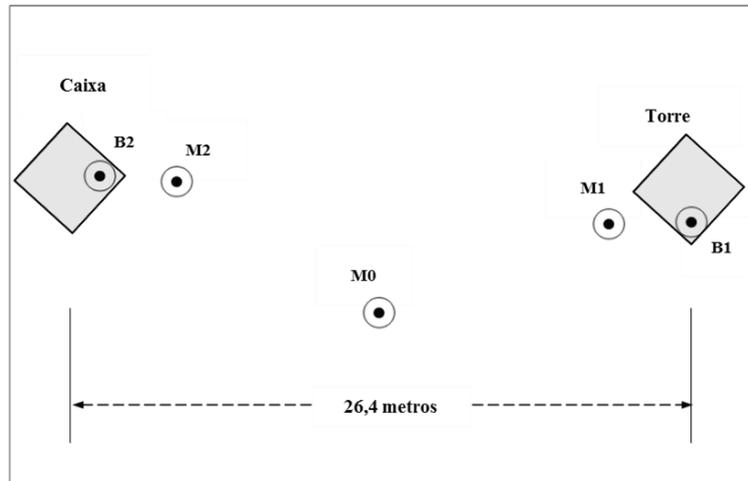


Figura 6.2 – Croqui com posição dos marcos e benchmarks no Local 1

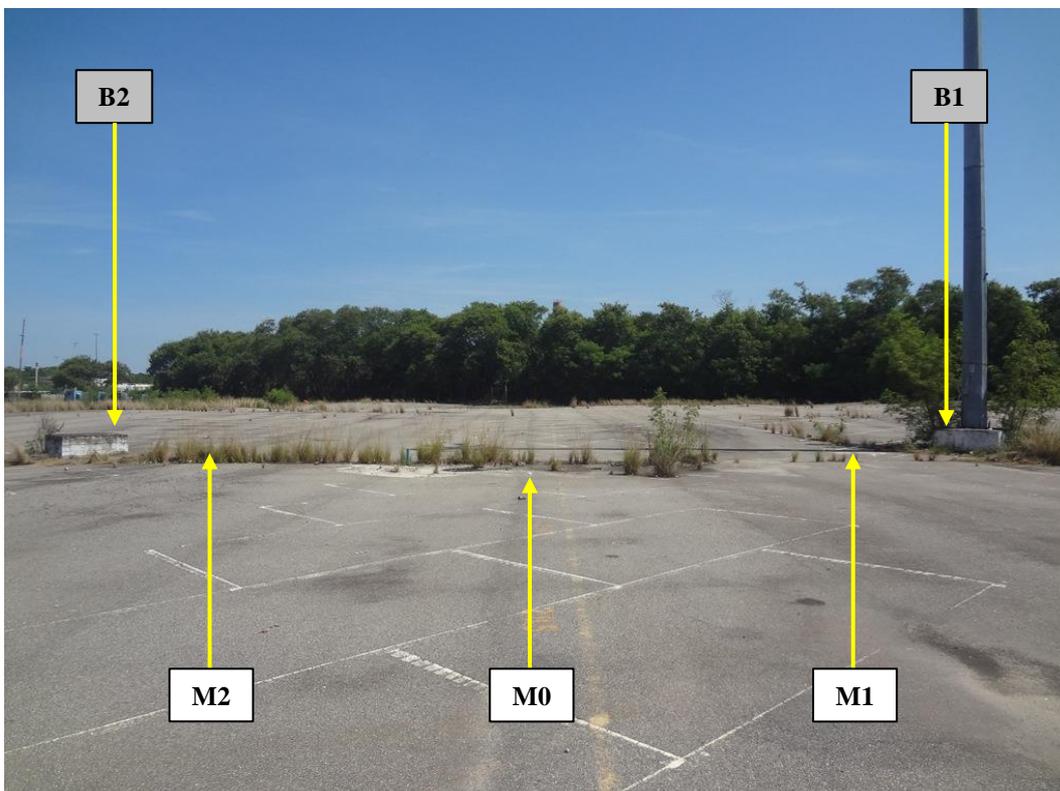


Figura 6.3 – Vista do Local 1 com identificação dos pinos instalados

6.2

Meios empregados

6.2.1

Pinos metálicos

Os pinos metálicos utilizados foram fabricados em latão, com a ponta superior em formato esférico, de modo a proporcionar um único ponto de contato entre o pino e a base da mira empregada e evitar, assim, posicionamento diferente a cada medição realizada. Os pinos usados como benchmarks eram mais robustos e constituídos somente por latão, enquanto os pinos do aterro (aqui chamados de marcos) eram pontas de latão soldadas em hastes de aço com 30 cm de comprimento.

Para instalar os pinos que serviriam como benchmarks, foi removida a capa asfáltica que cobria a estrutura estaqueada e uma pequena espessura do concreto da própria caixa, de modo a propiciar uma melhor aderência entre o concreto novo que preencheria o furo e o já existente.

Já pinos do aterro foram instalados ao centro de furos com 20 cm de diâmetro e 50 cm de profundidade, abertos no pavimento asfáltico através de trado manual e preenchidos com concreto magro.

Nas duas situações, após a cura do concreto o pino ficava estável, impedido de qualquer movimento lateral ou vertical.

6.2.2

Instrumentos ópticos

Antes de serem descritos os aparelhos empregados no acompanhamento realizado, cabem algumas considerações sobre o processo de nivelamento.

6.2.2.1

Nivelamento

Nivelamento é o procedimento que permite determinar a cota de dois ou mais pontos com o objetivo de se obter o desnível entre eles. A depender do equipamento e do método empregado, a precisão pode variar desde alguns centímetros até décimos ou centésimos de milímetro. A NBR 13133 especifica três tipos de nivelamento: geométrico, taqueométrico e trigonométrico.

Nivelamento geométrico (ou nivelamento direto) é aquele que realiza a medida da diferença de nível entre pontos do terreno por intermédio de leituras correspondentes a visadas horizontais, obtidas com um nível, em miras colocadas verticalmente nos referidos pontos (NBR 13133).

A NBR 13133 estabelece, ainda, quatro classes de nivelamento de acordo com a finalidade, abrangendo métodos de medição, aparelhagem, desenvolvimentos e tolerâncias de fechamento.

Tabela 6.1 – Tipo e finalidades do nivelamento

Classe	Tipo de nivelamento	Finalidade
I N	Geométrico	implantação de referências de nível (RN) de apoio altimétrico
II N	Geométrico	determinação de altitudes ou cotas em pontos de segurança e vértices de poligonais para levantamentos topográficos destinados a projetos básicos e executivos
III N	Trigonométrico	determinação de altitudes ou cotas em poligonais de levantamento, levantamento de perfis para estudos preliminares e/ou viabilidade de projetos
IV N	Taqueométrico	destinado a levantamento de perfis para estudos expeditos

Em linhas gerais, a determinação da cota de um ponto consiste em:

- (i) Estacionar o aparelho, calando seu nível de bolha esférico
- (ii) Apontar a luneta do aparelho para a mira e ajustar o foco
- (iii) Realizar a horizontalização fina do nível
- (iv) Fazer a linha de visada, coincidindo o fio médio do retículo com um valor inteiro na escala da mira
- (v) Anotar o valor lido

6.2.2.2

Níveis ópticos

O nível é um equipamento capaz de definir com precisão planos horizontais, ou seja, planos perpendiculares ao vetor gravidade que passam pelo centro óptico do aparelho. De acordo com a NBR 13133, os níveis são classificados segundo o desvio-padrão para 1 km de duplo nivelamento, conforme a tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Classes de nível

Classes de nível	Desvio-padrão
1 - precisão baixa	$> \pm 10$ mm/km
2 - precisão média	$\leq \pm 10$ mm/km
3 - precisão alta	$\leq \pm 3$ mm/km
4 - precisão muito alta	$\leq \pm 1$ mm/km

Quanto ao funcionamento, os níveis ópticos podem ser mecânicos ou automáticos, e a diferença entre os dois modelos reside na maneira como a horizontalização fina é realizada: nos níveis mecânicos isso é feito pela calagem de um nível de bolha tubular (sistema de bolha bipartida); nos níveis automáticos, por um compensador mecânico óptico (sistema de pêndulo).

Outro aspecto a considerar sobre o funcionamento do modelo mecânico, é que, dada a grande sensibilidade dos componentes internos desse aparelho, ele torna-se bastante suscetível às condições climáticas do ambiente, como temperatura e incidência de vento. Isso faz com que haja certa dificuldade na

calagem da bolha bipartida e aumente o tempo necessário para a obtenção da visada, trazendo maior incerteza sobre a exatidão da leitura realizada. Com isso, vem o aumento do tempo de permanência no campo e o consequente desconforto térmico e cansaço visual a que o operador fica sujeito em algumas ocasiões. Todos esses fatores contribuem para redução no rendimento do serviço e, ainda, uma maior probabilidade de um erro grosseiro ser cometido.

Obviamente, quanto maior a experiência do operador, menores as janelas para erros, porém mesmo profissionais tarimbados continuam sujeitos às imponderáveis condições climáticas.

Nos níveis ópticos automáticos, a etapa de horizontalização fina é feita instantaneamente, ao simples pressionar de um botão. Além disso, os componentes internos desse modelo são menos sensíveis do que os do modelo mecânico, fazendo com que ele seja menos susceptível à incidência de raios solares e vento. Juntando esses aspectos, o rendimento do serviço é consideravelmente maior e sem perda de precisão nas leituras.

Mais detalhes sobre o funcionamento dos instrumentos ópticos citados podem ser encontrados em Trutmann (1980).

6.2.2.3

Aparelhos utilizados

No presente caso, as fotografias já apresentadas (Figura 3.5) deixam clara a magnitude dos recalques ocorridos, que chegam a passar de 70 cm em alguns pontos. Porém, a presente medição passou a ser feita com o objetivo de acompanhar a evolução do desnível entre as estruturas estaqueadas e o aterro, já que não se sabia *a priori* se ainda haveria recalque em andamento. O que se esperava era que, caso o aterro ainda se encontrasse em processo de compressão, as velocidades seriam extremamente baixas, da ordem de poucos milímetros por ano. Com isso, grande atenção foi dada à escolha dos instrumentos ópticos a serem usados na campanha, já que os mesmos deveriam ser capazes de captar essa evolução submilimétrica, já que as medições seriam feitas com frequência semanal ou mensal.

Dessa forma, conclui-se que o levantamento deveria ser da Classe IN, realizado com equipamento de precisão muito alta (desvio-padrão inferior a ± 1 mm/km), tendo sido escolhido, inicialmente, um nível óptico mecânico, da marca WILD modelo N3, passando-se em seguida a empregar um nível óptico automático WILD modelo NA2 com micrômetro de placa plano-paralela acoplado. Em ambos os modelos, cada leitura fornece 6 algarismos significativos, correspondentes ao metro, decímetro, centímetro, milímetro, décimo de milímetro e centésimo de milímetro, sendo este último valor estimado pelo operador. Um resumo das especificações de cada aparelho é apresentado a seguir.

Tabela 6.3 – Características dos equipamentos

Modelo	Sistema de horizontalização	Precisão	Resolução	Resolução estimada
N3	mecânico	$\pm 0,2$ mm/km	0,1 mm	0,01 mm
NA2 c/ placa	automático	$\pm 0,3$ mm/km	0,1 mm	0,01 mm

Pode-se observar que o modelo N3 (mecânico) apresenta precisão um pouco maior do que o modelo NA2 (automático) com placa, porém essa pequena diferença é plenamente aceitável para a ordem de grandeza dos recalques medidos, como será visto mais adiante.

6.2.3

Mira

A NBR 13133 recomenda que nivelamentos para transporte de cotas sejam feitos com mira de invar, sendo esta uma liga metálica de aço e níquel que possui coeficiente de dilatação térmica muito pequeno e constante. Entretanto, infelizmente não foi possível empregar uma mira com essas características, tendo em vista que as disponíveis possuíam 3 metros de comprimento e não eram dobráveis, e isso inviabilizava seu transporte em veículo de passeio comum, como o que foi usado durante a campanha.

Em vista disso, foi empregada uma mira convencional de alumínio modelo GSS 111 da marca LEICA GEOSYSTEMS AG. Todos os cuidados para que fossem eliminadas folgas na articulação foram tomados, bem como o cuidado de que todas as leituras fossem realizadas antes das 10 horas da manhã, com temperatura tão amena quanto possível.

Em duas ocasiões procurou-se quantificar o erro devido à dilatação térmica. Na primeira, em uma das visitas ao campo foi possível dispor de uma mira de invar para que as leituras pudessem ser feitas nela imediatamente após as leituras terem sido feitas em mira de alumínio. Em outra ocasião, foram feitas duas medições com a mesma mira de alumínio em diferentes horas do dia, enquanto a temperatura ambiente era monitorada. Em ambos os casos foi observado que a ordem de grandeza do erro não desabona o acompanhamento realizado, situação que é corroborada pela análise da incerteza apresentada mais adiante.

6.2.4

Sistema tripé-mira

Um aspecto que é fonte comum de erros em nivelamentos com esse grau de precisão é a imperfeita verticalização da mira quando de seu posicionamento sobre os pinos metálicos de referência. Para mitigar esse erro, em determinado momento decidiu-se substituir o funcionário auxiliar que executava essa operação e passou-se a fazer a sustentação da mira através de um tripé, que mantinha a peça estável com o uso de resistentes ligas de borracha. A verticalidade era conseguida com um nível esférico fixado na parte posterior da mira, e o conjunto era colocado em posição agindo-se nas hastes do tripé. Como as distâncias envolvidas eram pequenas, o próprio operador ajustava o tripé na posição correta e retornava para realizar as leituras, operação que levava poucos minutos. Tal esquema pode ser visto na figura 6.4.



Figura 6.4 – Sistema tripé-mira

6.3

Procedimento de medição

6.3.1

Primeiro momento

Em abril de 2013 foi feita a primeira leitura de desníveis entre os benchmarks e marcos instalados no aterro, 10 dias após a instalação dos pinos, de modo que já houvesse ocorrido a cura do concreto.

Para essa leitura foi usado um nível WILD N3 (mecânico), e contou-se com um funcionário auxiliar para verticalizar a mira sobre os pinos metálicos (com base em um nível de cantoneira).

Essa leitura inicial foi chamada de leitura zero, já que serviria de referência para todas as demais. Tendo em vista sua importância, o desnível nesse dia foi medido na parte da manhã e na parte da tarde, por operadores distintos. Os valores obtidos foram bastante próximos, como pode ser observado na tabela 6.4, tendo sido adotada a média aritmética dos desníveis como valor de referência.

Tabela 6.4 – Obtenção da leitura zero

Ponto	Desnível obtido (cm)			Diferença (mm)
	Autor	Topógrafo	Média	
M0-B1	76,670	76,635	76,652	0,35
M0-B2	67,752	67,796	67,774	-0,43
B2-B1	8,917	8,839	8,878	0,79
M1-B1	73,385	73,380	73,383	0,05
M2-B2	60,960	60,935	60,947	0,25
M3-B3	29,635	29,630	29,633	0,05
M4-B4	44,529	44,490	44,510	0,39

Para se calcular o desnível entre cada benchmark e seu respectivo marco, o nível era estacionado e determinavam-se as cota do benchmark e do marco. Em seguida, o auxiliar posicionava a mira novamente sobre o benchmark e uma nova leitura era realizada. Pela diferença entre a média das cotas do benchmark e a cota do marco obtinha-se o desnível entre os pontos. As figura 6.5 e 6.6 ilustram o procedimento.

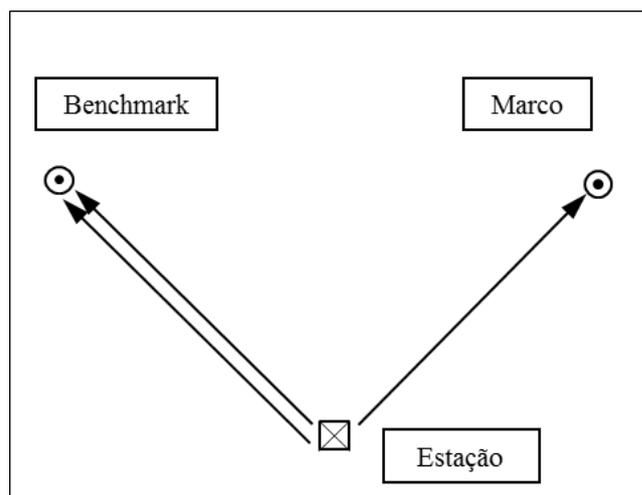


Figura 6.5 – Procedimento inicial de leituras



Figura 6.6 – Medição de desnível no Local 3

Esse procedimento foi utilizado para calcular o desnível entre os benchmarks B1, B2, B3 e B4 e seus respectivos marcos (M1, M2, M3 e M4).

O procedimento descrito foi aplicado em quatro ocasiões, entre 18 de abril e 27 de junho, e cada novo desnível calculado era subtraído do desnível de referência (leitura zero), de modo que valores positivos indicariam que o desnível estaria aumentando, ou seja, o aterro ainda estaria em processo de compressão. Plotando o desnível diferencial em função da data das leituras, obtém-se a figura 6.7

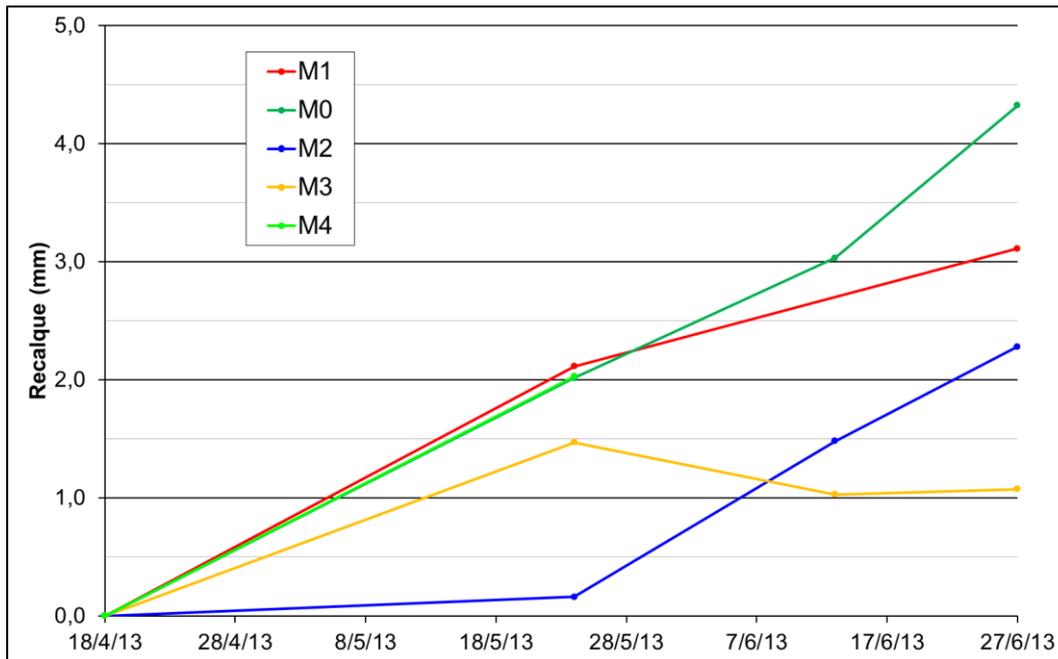


Figura 6.7 – Evolução dos desníveis entre abril e junho de 2013

Como se observa, pelas medições realizadas em pouco mais de 2 meses, fica claro que ainda há recalques ocorrendo, que chegam a 4 mm em alguns pontos. Entretanto, a magnitude da diferença observada entre leituras consecutivas em alguns casos, indicava que o aterro poderia estar recalcando em determinada semana e expandindo na seguinte. Tal situação, na prática, seria bastante incomum, senão impossível. Por conta disso, achou-se mais prudente questionar a validade do procedimento de medição e, assim, passar a adotar medidas que pudessem refinar a técnica de modo a fornecer maior confiabilidade às leituras.

6.3.2

Segundo momento

Para a nova etapa de medições, o nível óptico WILD N3 foi substituído por um modelo WILD NA2 com micrômetro de placa plano-paralela acoplada. Antes do início das leituras com o novo equipamento, o mesmo foi enviado para calibração e retificação em empresa especializada em manutenção de instrumentos ópticos.

O funcionário auxiliar que verticalizava a mira sobre os pinos metálicos foi substituído pelo sistema tripé-mira já descrito, e com isso a mira permanecia imóvel na posição vertical.

Com o uso do nível óptico automático, ganhou-se maior produtividade nas medições. Percebeu-se, assim, que uma quantidade maior de leituras poderia ser feita no mesmo intervalo de tempo que era gasto anteriormente. Assim, de modo a se buscar aumentar a exatidão das leituras, cada cota passou a ser determinada a partir da média de duas leituras, a exemplo do que vinha sendo feito para os benchmarks.

O procedimento de leitura com o equipamento automático empregado consistia em:

- 1) Estacionar o nível óptico, calando seu nível de bolha esférico;
- 2) Verticalizar o sistema tripé-mira sobre o pino metálico;
- 3) Pela luneta do nível, efetuar a visada na mira, ajustando o foco;
- 4) Fazer coincidir o fio médio do retículo com um valor inteiro na escala da mira, agindo no parafuso do micrômetro;
- 5) Anotar o valor lido na caderneta de campo (6 algarismos significativos).

Após o passo 1), o sistema tripé-mira era verticalizado sobre o benchmark (passo 2) e executavam-se os passos 3), 4) e 5). Após isso, com a mira ainda sobre o benchmark, a linha de visada era desfeita e o foco desajustado, repetindo-se os passos 3), 4) e 5). Com isso, dois valores de cota eram obtidos, que invariavelmente diferiam de, no máximo, 0,05 mm (no 6º algarismo significativo). Adotava-se como cota daquele ponto a média aritmética das duas leituras.

Em seguida, o sistema tripé-mira era posicionado sobre o marco no aterro e sequência idêntica era repetida, obtendo-se dois valores para a cota do marco e adotando, também, a média desses valores.

O desnível entre benchmark e marco era calculado pela diferença entre os valores médios de cota obtidos.

Após as 4 leituras realizadas conforme explicado, o aparelho era deslocado e estacionado em posição diametralmente oposta (a alguns metros de distância) e todo o processo repetido, com a realização de mais 4 leituras (2 no benchmark e 2 no marco). Um novo valor de desnível era obtido. O procedimento é mostrado esquematicamente na figura 6.8.

O desnível representativo adotado para aquela data era a média aritmética dos desníveis calculados a partir de cada uma das estações.

Comparando as figuras 6.5 e 6.8, pode-se observar que, enquanto com o nível WILD N3 (mecânico) eram realizadas 3 leituras para a determinação do desnível, o uso do nível WILD NA2 possibilitou que fossem realizadas 8 leituras em um intervalo de tempo quase igual.

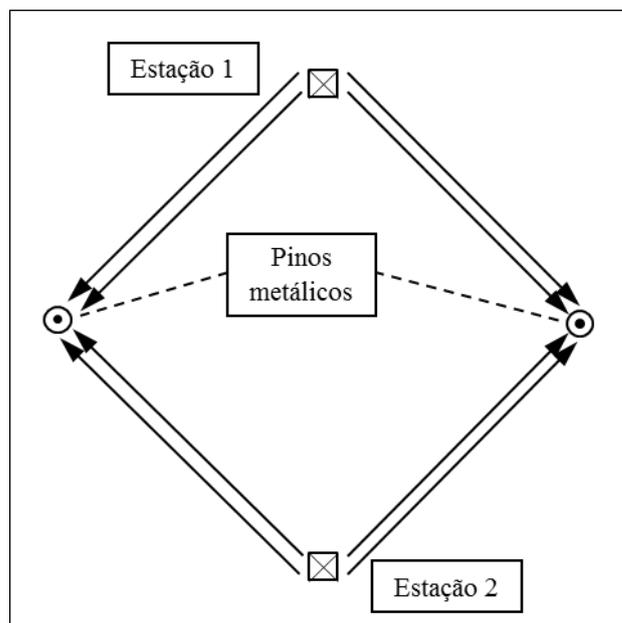


Figura 6.8 – Novo procedimento para leituras

Para o cálculo do desnível no marco 0 (situado a meia distância entre a Torre 1 e a Caixa), o nível era estacionado em posição aproximadamente intermediária entre os 3 pontos (B1, B2 e M0) e com isso o desnível entre M0 era calculado tanto com relação a B1 quanto com relação a B2. Calculava-se, ainda, o desnível entre os benchmarks B1 e B2, com o intuito de se acompanhar se estaria ocorrendo algum deslocamento relativo entre os pontos admitidos como referências fixas. A figura 6.9 ilustra o procedimento adotado.

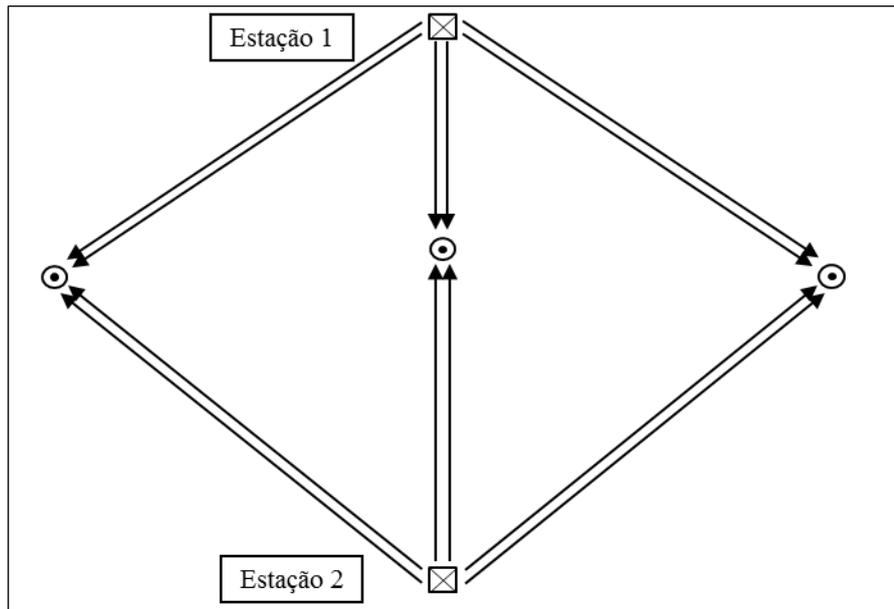


Figura 6.9 – Novo procedimento para leituras no marco central

Logo, pela repetição de leituras procurou-se aumentar a probabilidade de se aproximar o desnível calculado de seu valor real. Os resultados desse procedimento são apresentados no próximo item.

6.4

Resultados das medições

Todos os desníveis calculados no Local 1 foram obtidos pela média entre nivelamento e contranivelamento (duas estações). Já os desníveis nos Locais 2 e 3 foram calculados com base em apenas uma estação, não contando com o contranivelamento.

6.4.1

Local 1

O Local 1 foi o mais profundamente estudado, não só pelo fato de dispor de dois benchmarks próximos, como também por ser o local mais próximo das placas de recalque onde se deu o acompanhamento quando do lançamento do aterro, no ano de 1996. Os resultados obtidos são apresentados na figura 6.10.

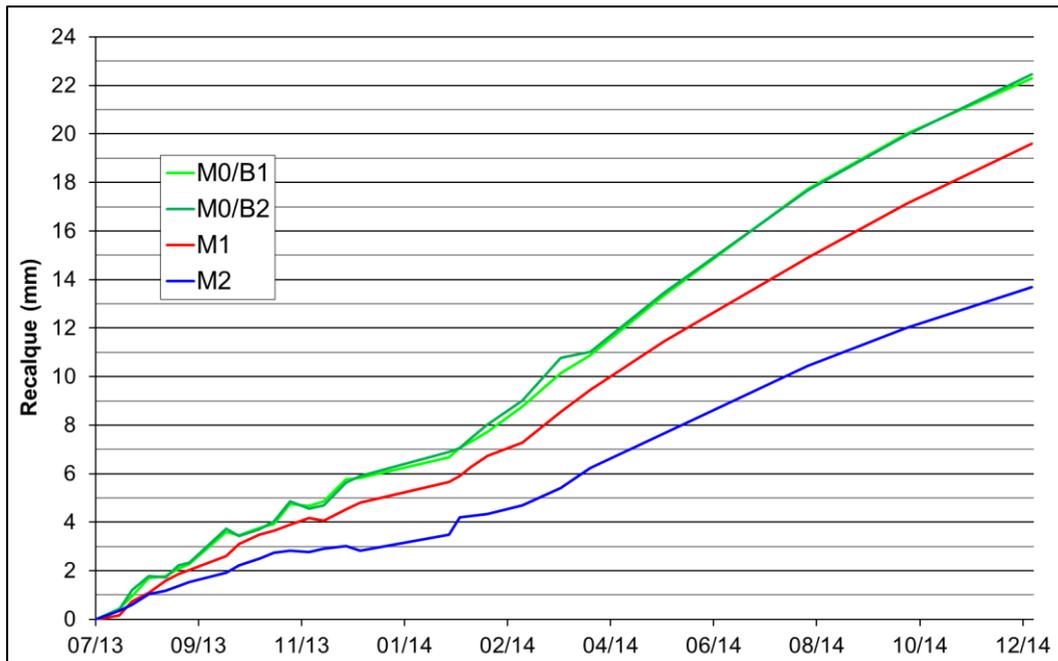


Figura 6.10 – Evolução dos recalques no Local 1

Uma questão surge quanto a real estabilidade dos benchmarks adotados. Duniclif (1993) apontou: “*suspeita-se que muitos benchmarks usados em obras não sejam tão estáveis quanto o usuário pensa*”. Por conta disso, decidiu-se acompanhar o desnível existente entre os benchmarks da Torre (B1) e da Caixa (B2), que se encontram a 26,4 metros de distância um do outro, para verificar se, de fato, eles podem ser considerados estáveis. O resultado é apresentado na figura 6.11.

Como se observa, não há tendência de aumento no desnível existente entre os referidos benchmarks, tendo o mesmo se mantido oscilando entre $\pm 0,3$ mm. Esse valor é próximo à incerteza da própria medição, conforme será mostrado no item 6.6. Na figura 6.11, a linha tracejada oscilando em torno do eixo horizontal representa o desnível entre os benchmarks, mostrando, mais uma vez, que a magnitude dessa incerteza é pouco significativa quando comparada com a magnitude dos recalques em andamento.

Isso permite assumir, com razoável segurança, que os benchmarks podem ser considerados estáveis.

Outra hipótese para essa oscilação com valores próximos a zero é que os dois benchmarks estivessem recalando à exatamente a mesma velocidade, o que parece ser altamente improvável.

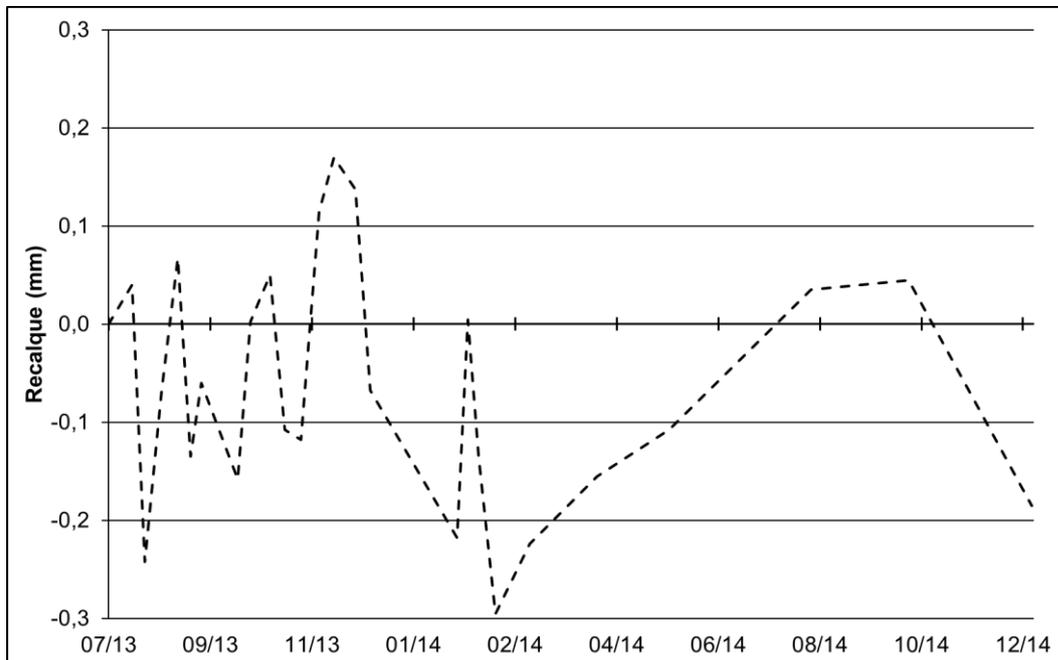


Figura 6.11 – Desnível entre os dois benchmarks do Local 1

6.4.2

Local 3

Neste local o acompanhamento foi feito de maneira mais simples, tendo sido instalados apenas um benchmark e um marco superficial (figura 6.12).



Figura 6.12 – Vista do Local 3

Pela figura 6.13 observa-se que a magnitude dos recalques é menor do que a do local principal, e o acompanhamento de recalques obtido foi o seguinte:

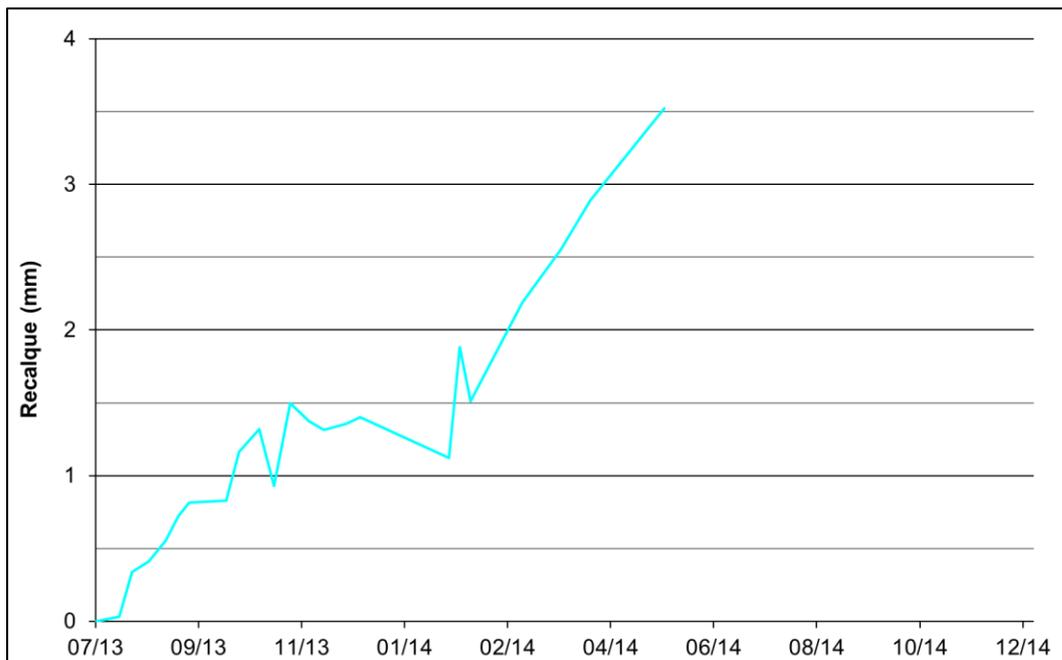


Figura 6.13 – Evolução dos recalques no Local 4

6.4.3

Local 4

Analogamente, esse local também recebeu apenas um benchmark e marco superficial, conforme a foto do local (figura 6.14).



Figura 6.14 – Vista do Local 4

Este local foi o que sofreu os menores recalques de todo o terreno em estudo, conforme se observa na figura 6.15. Os recalques medidos são apresentados a seguir.

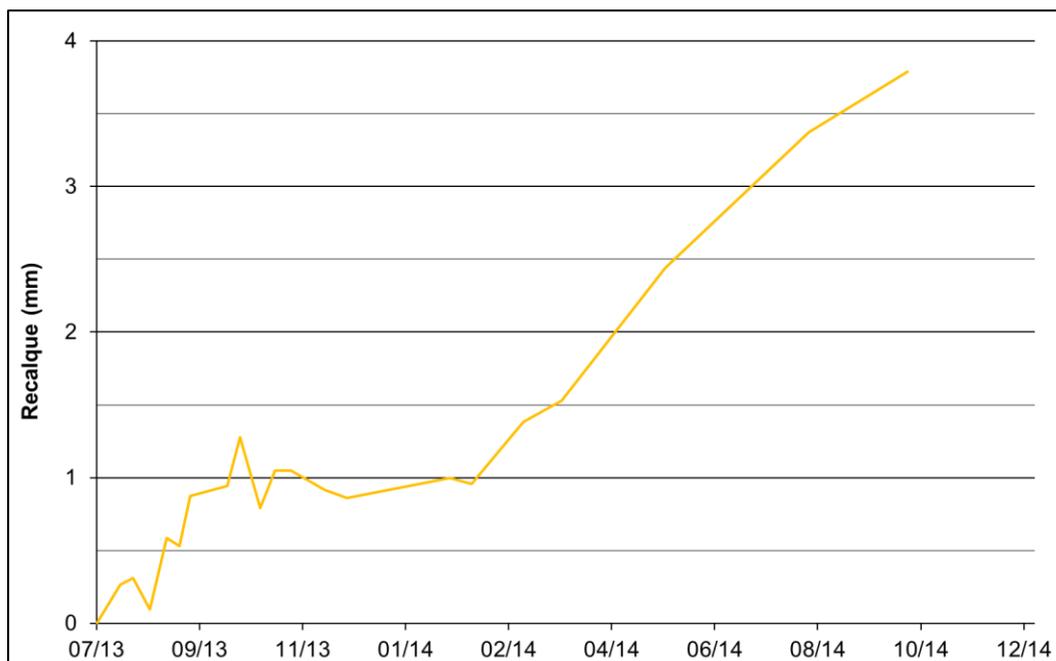


Figura 6.15 – Evolução dos recalques no Local 3

6.4.4

Coerência dos resultados

Tendo sido apresentados todos os acompanhamentos de recalques obtidos, cabe ser feita uma observação com relação à coerência dos resultados.

Embora exista notável diferença nas velocidades de deformação (dada pela tangente de cada sequência de leituras), há coerência entre estas e as magnitudes de recalque ocorrido desde o lançamento do pavimento asfáltico. Ou seja, os locais que mais recalcam nos últimos 12 meses foram os que mais recalcam nos últimos 18 anos, conforme apresentado na tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Comparação entre desníveis recentes e totais

Ponto	Após o asfaltamento (mm)	Últimos 21 meses (mm)
M0-B1	792	25,7
M1-B1	756	22,0
M2-B2	625	15,6
M3-B3	302	5,3
M4-B4	452	6,5

Não se trata de uma conclusão, já que esse resultado era esperado, mas a constatação desse fato traz credibilidade ao procedimento empregado para o acompanhamento de recalques.

6.5

Erros

Há vários tipos de erros inerentes ao processo de nivelamento geométrico que interferem nos valores medidos, fazendo com que os mesmos se dispersem em torno do valor real. Embora alguns deles sejam desprezíveis em muitas situações práticas, para a precisão buscada na presente campanha seus efeitos devem ser considerados.

As seguintes definições são apresentadas pelo BIPM (2008):

Em geral, uma medição tem imperfeições que dão origem a um erro no resultado da medição. Tradicionalmente, um erro é visto como tendo dois componentes, a saber, um componente **aleatório** e um componente **sistemático**. (BIPM, 2008, p. 5, grifo do autor).

O erro aleatório presumivelmente se origina de variações temporais ou espaciais, estocásticas ou imprevisíveis, de grandezas de influência. Os efeitos de tais variações [...] são a causa de variações em observações repetidas do mensurando. Embora não seja possível compensar o erro aleatório de um resultado de medição, ele pode geralmente ser reduzido aumentando-se o número de observações; sua esperança ou valor esperado é zero. (BIPM, 2008, p. 5).

O erro sistemático, assim como o erro aleatório, não pode ser eliminado, porém ele também, frequentemente, pode ser reduzido. Se um erro sistemático se origina de um efeito reconhecido de uma grandeza de influência em um resultado de medição [...] o efeito pode ser quantificado e, se for significativo com relação à exatidão requerida da medição, uma correção ou fator de correção pode ser aplicado para compensar o efeito. Supõe-se que, após esta correção, a esperança ou valor esperado do erro provocado por um erro sistemático seja zero. (BIPM, 2008, p. 5).

Veiga, Zanetti e Faggion (2012), apresentam definições semelhantes para os erros sistemáticos e aleatórios, e introduzem outra categoria de erro:

Erros sistemáticos [...] são aqueles erros cuja magnitude e sinal algébrico podem ser determinados, seguindo leis matemáticas ou físicas. Pelo fato de serem produzidos por causas conhecidas podem ser evitados através de técnicas particulares de observação ou mesmo eliminados mediante a aplicação de fórmulas específicas. São erros que se acumulam ao longo do trabalho. (VEIGA ET AL, 2012, p.18, grifo nosso).

Erros aleatórios [...] são aqueles que permanecem após os erros anteriores terem sido eliminados. Não seguem nenhum tipo de lei e ora ocorrem num sentido ora noutro, tendendo a se neutralizar quando o número de observações é grande. (VEIGA ET AL, 2012, p.19, grifo nosso).

Erros grosseiros [...] são causados por engano na medição, leitura errada nos instrumentos, identificação de alvo etc., normalmente relacionados com a desatenção do observador ou uma falha no equipamento. Cabe ao observador cercar-se de cuidados para evitar a sua ocorrência ou detectar a sua presença. A repetição de leituras é uma forma de evitar erros grosseiros. (VEIGA ET AL, 2012, p.18, grifo nosso).

Passa-se a descrever agora os erros identificados que influenciam de alguma maneira o valor real (e desconhecido) que se pretende medir, bem como qual a solução adotada para que os mesmos fossem eliminados ou, ao menos, mitigados.

6.5.1

Erro de colimação vertical

O erro de colimação é provocado pela falta de paralelismo entre a linha de visada (eixo de colimação) e o eixo do nível tubular, nos níveis mecânicos. Nos níveis automáticos, é a falta de paralelismo entre a linha de visada e o plano formado pelo sistema de pêndulo (Faggion, 2011). A figura 6.16 ilustra a ocorrência do erro.

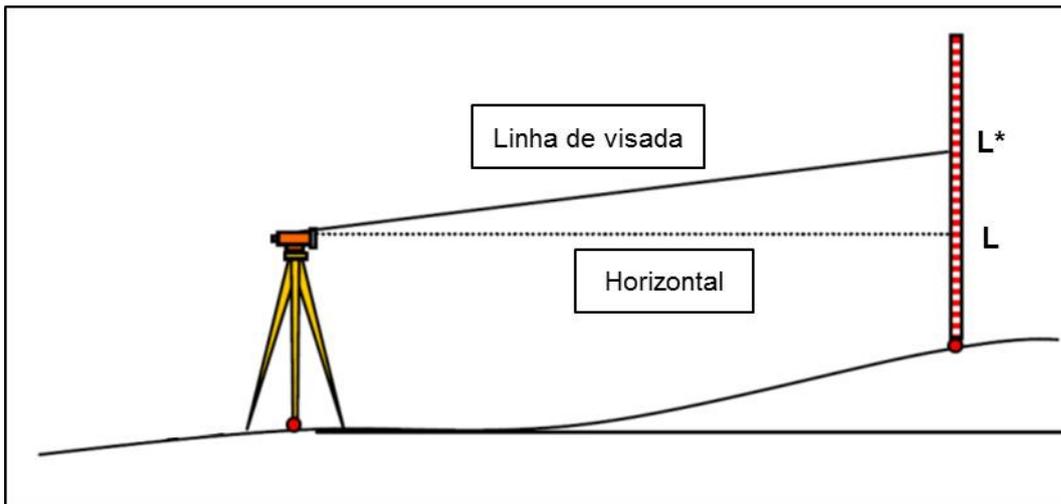


Figura 6.16 – Incidência do erro de colimação vertical

6.5.2

Erro de curvatura terrestre

Mesmo que a linha de visada esteja perfeitamente alinhada com um plano horizontal, haverá diferença entre a altura do ponto efetivamente visado na mira (linha reta entre o olho do operador e a mira) e o desnível entre o aparelho e o pino metálico (distância vertical entre a superfície equipotencial curvilínea que passa pelo pino e a que passa pelo centro óptico do aparelho). A diferença entre essas duas leituras representa o erro de curvatura, que é aumentado com a distância entre o aparelho e a mira. A figura 6.17 esclarece a incidência do erro.

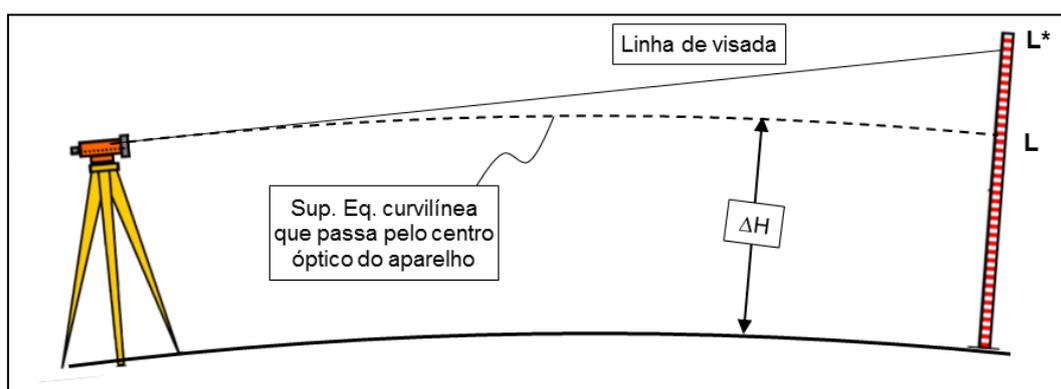


Figura 6.17 – Incidência do erro devido à curvatura terrestre

6.5.3

Erro de refração atmosférica e reverberação

O erro de refração ocorre pois as variações de temperatura alteram a densidade do ar, fazendo com que a linha de visada se encurve na direção do ar mais denso. Esse efeito acarreta um erro de leitura, que é maior quanto maiores forem as diferenças de temperatura e as distâncias envolvidas. Por esse motivo, é recomendado que as leituras sejam feitas com céu encoberto e temperaturas amenas (em torno de 20 °C).

Para evitar o fenômeno de reverberação, a NBR 13133 recomenda que as visadas sejam feitas acima de 50 cm do solo.

Demonstra-se que os erros sistemáticos de colimação, curvatura terrestre e refração podem ser minimizados ao se estacionar o aparelho à mesma distância dos pontos cujo desnível se pretende determinar (Veiga et al., 2012). Esse procedimento é chamado de Método das Visadas Iguais, e foi empregado em todas as leituras do presente trabalho.

6.5.4

Erro de verticalidade do eixo principal

Quando o eixo principal do instrumento (vertical que passa pelo seu centro óptico) não está paralelo ao vetor gravidade no momento da leitura, ocorre um erro conforme mostrado na figura 6.18, que é tão maior quanto maior for a distância entre o aparelho e a mira.

A verticalidade do eixo principal depende da correta horizontalização do eixo do nível tubular (bolha bipartida), nos níveis mecânicos. Nos níveis automáticos essa horizontalização é dada quando cessa o livre balanço do compensador mecânico (pêndulo), que é posto em movimento ao ser acionado o botão específico para esse fim. Em ambos os casos, o procedimento depende do operador.

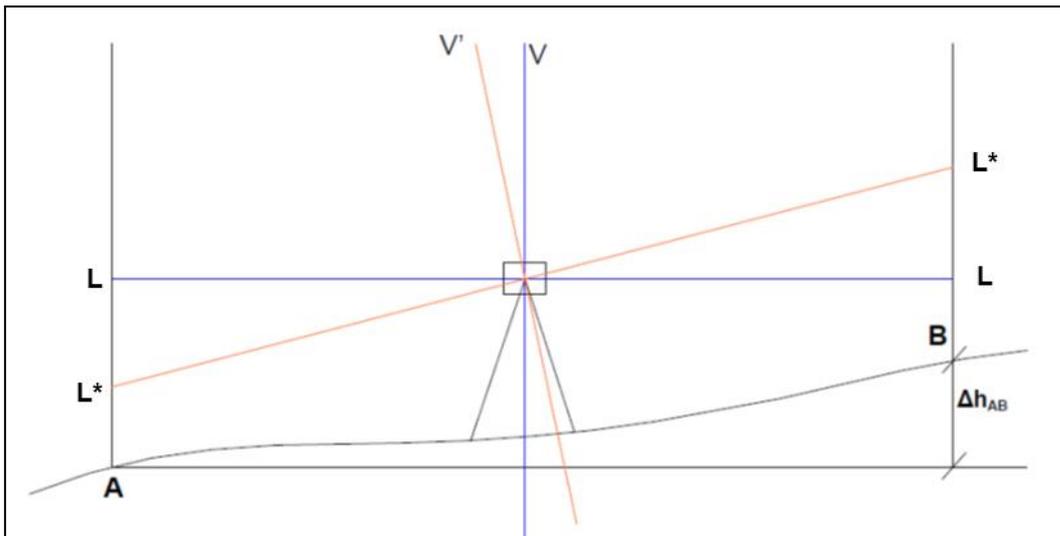


Figura 6.18 – Incidência do erro devido à falta de verticalidade do eixo principal

Ainda, para que essa verticalidade ocorra é necessário que haja perfeita perpendicularidade entre os eixos citados, sendo essa condição satisfeita com a retificação do instrumento por profissional especializado.

6.5.5

Erro de verticalidade da mira

Se a mira estiver inclinada em qualquer direção, o comprimento efetivamente lido pelo operador será maior do que o equivalente à menor distância entre as superfícies equipotenciais que passam pelo pino metálico e pelo centro óptico do instrumento. Esse erro pode ser facilmente observado na figura 6.19.

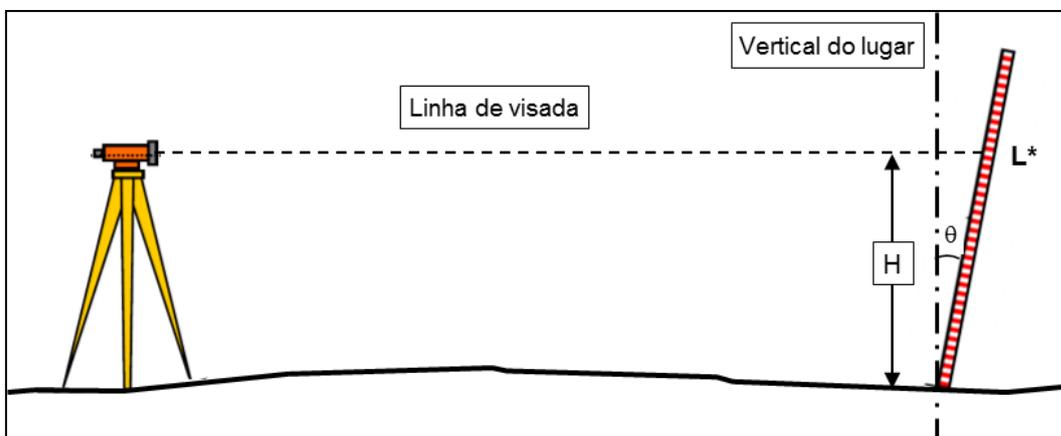


Figura 6.19 – Incidência do erro devido à falta de verticalidade da mira

Assume-se para fins práticos, que um funcionário auxiliar experiente consiga verticalizar a mira com nível esférico acoplado com um erro da ordem de 1°, ou seja, com ângulo com a horizontal oscilando entre 89° e 91°.

A partir da figura 6.19, pode-se obter por relações geométricas a magnitude do erro em função da altura da mira (H) e de sua inclinação (θ):

$$erro = H \cdot \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \quad (6.1)$$

Nas medições da presente campanha, as alturas de visada variaram entre 80 cm e 200 cm. Aplicando a fórmula acima com estes valores e θ variando entre 1° e 2°, tem-se a tabela 6.6:

Tabela 6.6 – erro devido à falta de verticalidade da mira

	Altura da visada	
	80 cm	200 cm
erro 1°	0,122 mm	0,305 mm
erro 2°	0,488 mm	1,219 mm

Por conta da magnitude do erro máximo possível, decidiu-se substituir o funcionário auxiliar pelo sistema tripé-mira já descrito, que após ser verticalizado se mantém imóvel.

Como a figura 6.19 deixa claro, esse erro independe da distância entre o instrumento e a mira.

6.5.6

Erro de pontaria

É causado pela dificuldade em se repetir a visada rigorosamente no mesmo ponto onde foi feita uma visada anterior, devido não só à limitação do olho humano como também às imperfeições do instrumento. Esse talvez seja o mais

aleatório de todos os erros e sobre o qual se tem menos controle, sendo, possivelmente, o maior responsável pela dispersão dos valores lidos. A experiência do operador é fundamental – porém não bastante – para que se tenha maior constância nas leituras.

O máximo que se pode fazer para controlar esse erro é procurar realizar as leituras à distâncias curtas, já que essa ação facilita a visualização do exato ponto sobre o qual o retículo deve ser posicionado.

Outra ação tomada para mitigar esse erro, foi aumentar a quantidade de leituras em cada ponto e tomar o valor médio como representativo, conforme descrito no item 6.3.2.

6.5.7

Erro de índice e de graduação da mira

O erro de índice é a diferença de altura entre a base da mira que se apoia no pino metálico e o zero da escala graduada da mira, sendo este valor constante para cada mira. Para elimina-lo, foi usada sempre a mesma mira em todas as leituras, já que as curtas distâncias envolvidas permitiam esse procedimento.

O erro de graduação é devido a eventuais imprecisões no processo de gravação da escala no metal da mira, ou em alguma repintura que a mesma tenha sofrido. Na presente campanha, empregou-se de uma mira com pouco tempo de uso, com pintura original. Além disso, como o acompanhamento objetivou a evolução do desnível em relação à leitura zero, eventuais imprecisões na gravação da escala teriam impacto somente no desnível diferencial medido, que é da ordem de poucos milímetros. Logo, esse erro pode ser considerado desprezível para a ordem de grandeza dos recalques envolvidos.

6.5.8

Erro devido à variação de temperatura

A variação de temperatura afeta as leituras pois o material de que é feita a mira utilizada (madeira, fibra de vidro, alumínio etc.) dilata ou expande conforme a temperatura seja maior ou menor do que aquela na qual a escala foi gravada na fábrica. Logo, se a temperatura em campo for maior do que a temperatura de gravação, a peça irá dilatar e a leitura será menor do que a real. E esse erro será proporcional à altura da mira onde é feita a visada.

Porém, como o desnível é calculado pela diferença entre as leituras no benchmark e no marco, se a mira estiver dilatada a altura visada será menor nos dois casos, e uma parte desse erro irá se anular quando da subtração das duas cotas. Logo, o erro de leitura devido à variação de temperatura incidirá apenas sobre o desnível propriamente dito.

Para minimizar o erro devido à variação de temperatura, em medições de precisão é recomendado o uso de miras com escala em invar, liga metálica com coeficiente de dilatação térmica de $1,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

Conforme mencionado, na presente campanha não foi possível utilizar uma mira com essas características, tendo sido empregada uma mira de alumínio, cujo coeficiente de dilatação térmica é de $24 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

Apesar desse fato, procurou-se realizar todas as leituras com temperatura amena, antes das 10:00 horas da manhã. A temperatura foi monitorada em algumas dessas ocasiões e sempre se situou entre 20 e 30 °C. Repetindo os cálculos para essa diferença de temperatura, o erro devido à dilatação térmica para um desnível de 70 cm é de:

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T = (0,7 \cdot 1000) \cdot 24 \cdot 10^{-6} \cdot (30 - 20) \quad (6.2)$$

$$\Delta L = 0,168\text{mm}$$

Logo, como será visto no próximo item, esse valor está dentro da incerteza associada ao processo de nivelamento. Por esse motivo não se esperam erros significativos devido à variação de temperatura.

6.6

Incerteza da medição

Pela definição proposta em BIPM (2008), a incerteza do resultado de uma medição reflete a falta de conhecimento exato do valor do mensurando. O resultado de uma medição, após correção dos efeitos sistemáticos reconhecidos, é ainda e tão somente uma estimativa do valor do mensurando oriunda da incerteza proveniente dos efeitos aleatórios e da correção imperfeita do resultado para efeitos sistemáticos.

Ainda de acordo com BIPM (2008), incerteza é um parâmetro associado ao resultado de uma medição que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos a um mensurando.

Partindo das definições apresentadas, buscou-se uma maneira de avaliar a incerteza associada globalmente aos erros descritos no item anterior. De acordo com o explicado no item 6.3, o recalque em cada local era calculado pela média dos desníveis medidos a partir de dois pontos de estacionamento distintos (nivelamento e contranivelamento). Caso não houvesse quaisquer imprecisões ou erros na determinação de cada desnível, esses valores seriam exatamente os mesmos em cada uma das duas estações – já que o intervalo de tempo entre as leituras a partir de cada estação é de poucos minutos e isso elimina o erro oriundo de uma variação significativa de temperatura. Porém, os desníveis obtidos não são rigorosamente iguais, o que nos leva a concluir que essa diferença seja devida a uma composição dos erros que, embora mitigados, não podem ser eliminados. E os únicos erros conhecidos que se encontram nessa situação são o de pontaria, verticalidade do eixo vertical e verticalidade da mira.

Foram então utilizadas as diferenças obtidas entre nivelamento e contranivelamento dos pinos instalados no Local 1, a saber:

M1 em relação a B1

M2 em relação a B2

M0 em relação a B1

M0 em relação a B2

B2 em relação a B1

Ao longo da campanha, foram realizadas 31 visitas ao terreno para realização das medições, e em cada uma eram obtidas essas 5 diferenças entre nivelamento e contranivelamento. Plotando essa amostra de 155 elementos em função da data, obtém-se o gráfico da figura 6.20.

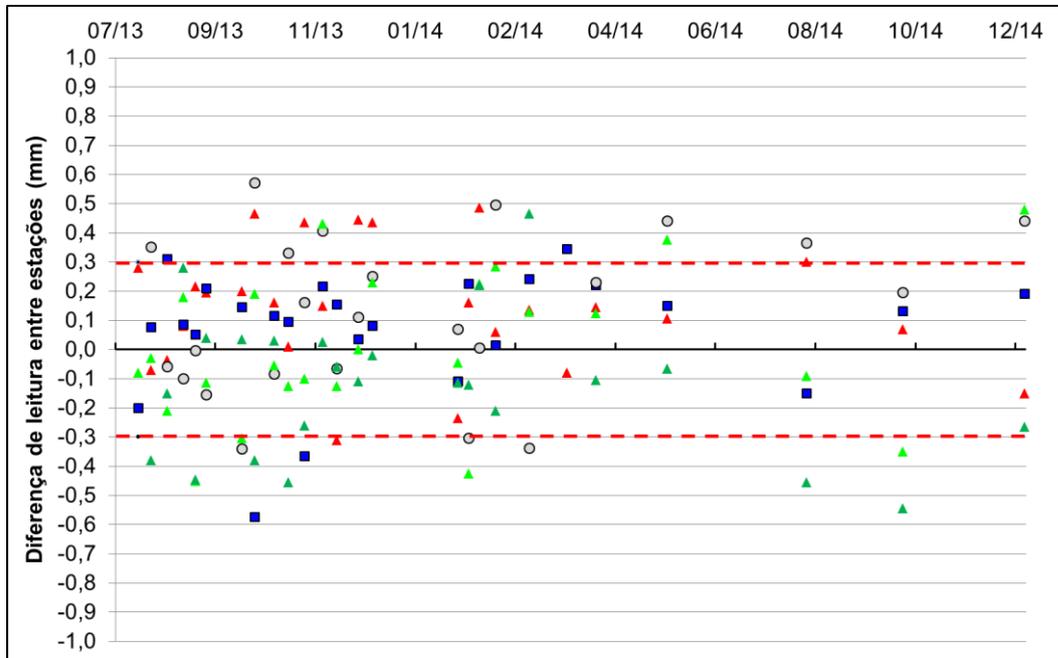


Figura 6.20 – Diferenças de leitura entre estações (ao ler o mesmo desnível)

Pode-se observar uma faixa de valores que oscila entre $\pm 0,6$ mm. Adotar essa faixa extrema como sendo representativa da incerteza da medição seria bastante conservador e, do ponto de vista estatístico, até mesmo incorreto. Por isso, julgou-se mais apropriado adotar a incerteza como sendo $\pm | \mu + \sigma |$, onde μ , é a média e σ , o desvio-padrão da amostra. Esses valores podem ser facilmente calculados a partir do banco de dados que gerou o gráfico acima, e valem:

$$\mu = 0,046 \text{ mm} \quad ; \quad \sigma = 0,253 \text{ mm}$$

Demonstra-se (BIPM, 2008), que quando amostra possui distribuição normal, representar a incerteza como $\pm | \mu + \sigma |$ abrange 68,3 % dos elementos da amostra. Logo, a incerteza a adotar para cada desnível calculado será de $\pm 0,299$ mm.

Entretanto, essa incerteza é relativa ao desnível instantâneo obtido. No presente estudo buscou-se verificar se ainda havia recalques em desenvolvimento

e qual seria sua magnitude e velocidade. Logo, o interesse era na comparação do desnível medido com o desnível inicial, a chamada leitura zero. A evolução do recalque era observada pela diferença entre cada desnível e a leitura zero.

Como a incerteza está presente em cada desnível medido, a diferença entre desníveis irá acumular as incertezas, ou seja:

$$\Delta H = (H_{t+\Delta t} \pm \iota) - (H_t \pm \iota) = (H_{t+\Delta t} - H_t) \pm 2\iota \quad (6.3)$$

onde ΔH é o recalque ocorrido entre medições consecutivas, H_i o desnível na data “i” e ι a incerteza da medição.

Assim, nos gráficos recalque x tempo apresentados, os valores devem ser vistos como uma faixa de valores com amplitude 4ι oscilando em torno do valor médio, conforme mostrado abaixo:

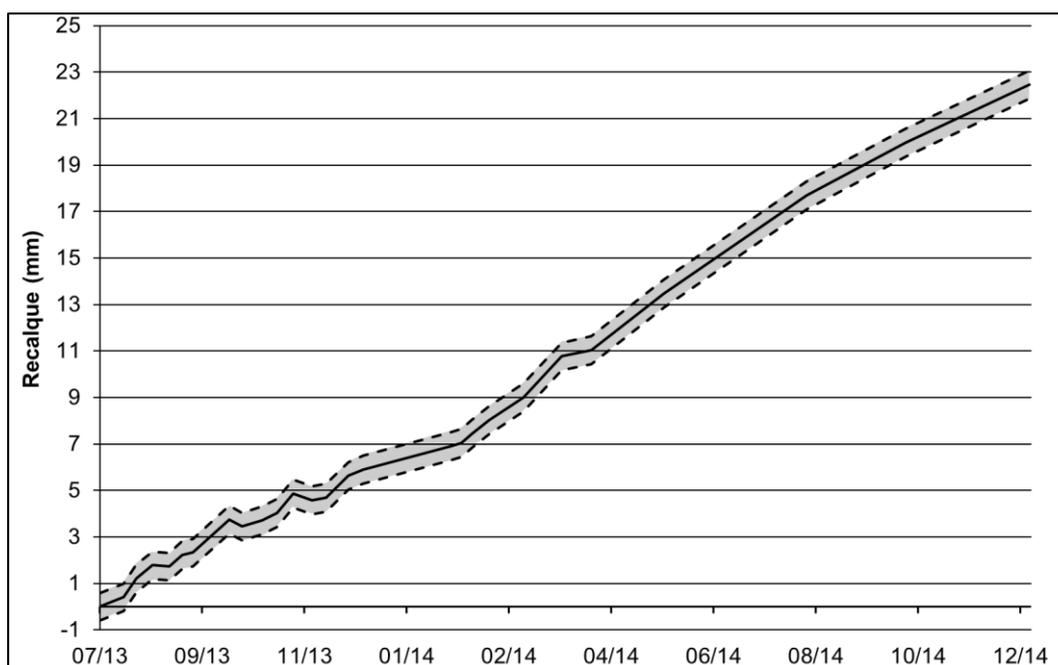


Figura 6.21 – Desnível com faixa de incerteza devido à composição dos erros

Apesar da faixa de incerteza em torno dos valores médios medidos, permanece inquestionável que, segundo o procedimento de medição conduzido no presente trabalho, o aterro continua em franco processo de adensamento 18 anos após seu lançamento.

6.7

Resumo das leituras

A seguir, na figura 6.22, são apresentadas todas as leituras realizadas desde o mês de abril de 2013. Chama-se a atenção para a magnitude do erro das leituras em comparação com a magnitude dos recalques medidos. Outro aspecto digno de nota é que após abril de 2014 a oscilação das leituras diminuiu sobremaneira. Isso ocorreu pois o intervalo de tempo entre as leituras, que na fase inicial era semanal, passou a ser mensal. Com isso conseguiu-se escapar da faixa de incerteza, já que o recalque de uma semana para a outra estava dentro daquela faixa. Logo, como era de se esperar, quanto menores forem as velocidades de deformação maior deve ser o intervalo de tempo entre cada monitoramento, de modo a diminuir a dispersão das leituras.

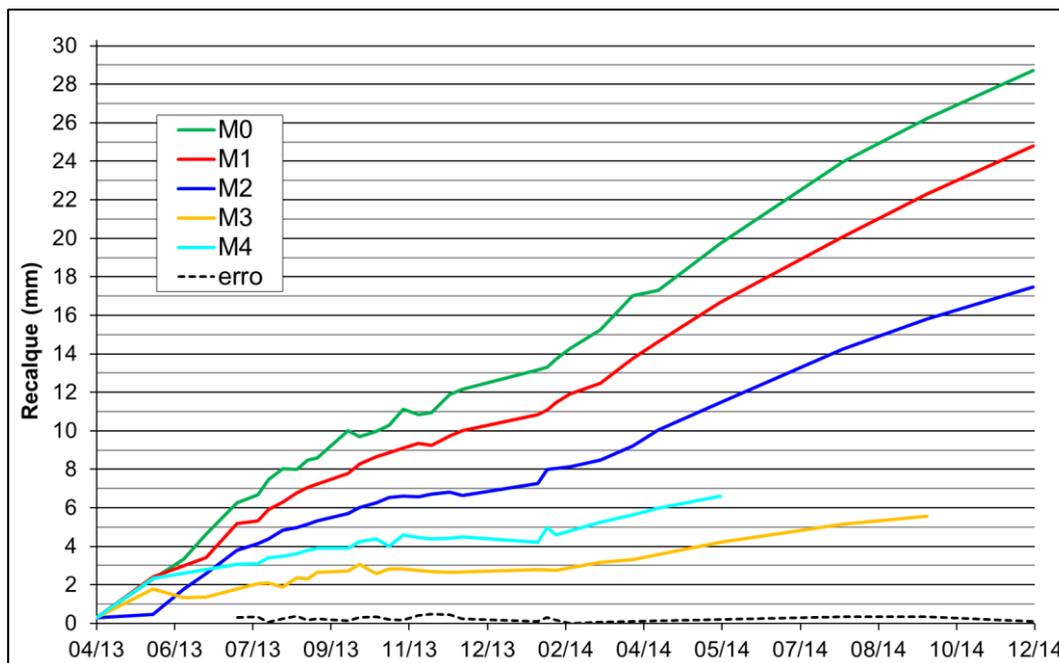


Figura 6.22 – Todas as leituras realizadas entre Abr/13 e Dez/14