

**MONITORAMENTO DE RECALQUES POR FOTOGRAMETRIA
USANDO O PRINCÍPIO DOS VASOS COMUNICANTES**

MARTA FLEICHMAN PRELLWITZ

Laboratório de Engenharia Civil

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO – UENF

Campos dos Goytacazes, 10 de abril 2015

MONITORAMENTO DE RECALQUES POR FOTOGRAMETRIA

USANDO O PRINCÍPIO DOS VASOS COMUNICANTES

MARTA FLEICHMAN PRELLWITZ

Projeto de dissertação apresentado ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Paulo Cesar de Almeida Maia

Laboratório de Engenharia Civil

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO– UENF

Campos dos Goytacazes, 10 de abril 2015

MONITORAMENTO DE RECALQUES POR FOTOGRAMETRIA

USANDO O PRINCÍPIO DOS VASOS COMUNICANTES

MARTA FLEICHMAN PRELLWITZ

Projeto de dissertação apresentado ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovado em, 10 de abril 2015.

Comissão Examinadora:

Prof^a. Bernadete Ragoni Danziger (DSc, Geotecnia) – UERJ

Prof^a. Gustavo de Castro Xavier (DSc, Geotecnia) – UENF

Prof^a. Rodrigo Martins Reis (DSc, Geotecnia) – UENF

Prof^o. Paulo César de Almeida Maia (DSc, Geotecnia) – UENF (Orientador)

RESUMO

A interação solo-estrutura, ISE, define a capacidade de uma edificação em absorver e transferir as tensões geradas por recalques diferenciais nas fundações, buscando o reequilíbrio estrutural. Conseqüentemente, a ISE influencia na evolução dos recalques de uma fundação e é de grande importância para a previsão de comportamento estrutural. Apesar disso, os projetos de fundação desconsideram normalmente a ISE, desprezando a influência da rigidez da estrutura e do maciço de fundação durante e após a construção, devido às dificuldades na determinação dos parâmetros necessários e característicos que definem esse comportamento. Destaque especial merece o monitoramento de recalques como uma das técnicas para definição dos parâmetros da ISE que, apesar de prescrito em norma, é pouco frequente na engenharia civil, especialmente a brasileira. Isso se justifica, sobretudo, pelas dificuldades experimentais, interferência nas obras e custo. Neste sentido esse trabalho tem como principal objetivo implementar um sistema de monitoramento de recalques baseado no princípio dos vasos comunicantes, de baixo custo e que permite uma aquisição de dados contínua durante a construção. A metodologia de aquisição de dados utiliza a fotogrametria e é baseada em procedimento simples e de precisão e acurácia compatíveis com as prescrições de norma. É apresentado o detalhamento do sistema desenvolvido, o programa experimental para calibração e aferição, e os procedimentos necessários para a instalação. O sistema foi instalado em três casos de estudo para avaliação da funcionalidade, todos os casos possuem estacas profundas do tipo hélice contínua. São descritos os detalhes construtivos dos três edifícios e dos sistemas de monitoramento instalados, ressaltando as dificuldades e soluções adotadas na instalação. São apresentados e discutidos os resultados obtidos na forma de recalques totais, diferenciais e distorcionais. Os parâmetros de interação solo estrutura AR, DR e CV são determinados e analisados. Especialmente para CV, faz-se a comparação com outros resultados da literatura. Os resultados indicam que o monitoramento foi implementado em dois edifícios com sucesso, permitindo a obtenção dos parâmetros da ISE. No entanto, no terceiro, as interferências de obra impediram a coleta de dados em quantidade satisfatória.

Palavras-Chave: Monitoramento de recalque, vasos comunicantes, interação solo-estrutura, fotogrametria, recalque.

ABSTRACT

The soil-structure interaction (SSI) defines the capacity of a building to absorb and transfer the tensions generated by differential settlements in foundations, seeking structural rebalancing. Consequently, the SSI influences on a foundation's settlement evolution and is of great importance for prediction of structural behavior. Nevertheless, foundation projects usually disregard the SSI, despising the influence of the structure's stiffness and the solid foundation during and after the construction, due to the difficulties in the determination of the necessary and characteristic parameters that define this behavior. Special mention deserves the settlement monitoring as one of the techniques for definition of the SSI parameters that despite prescribed in rule, is uncommon in civil engineering, especially in Brazil. This is justified mainly by the experimental difficulties, interference in the work and cost. In this sense, this work aims to implement an inexpensive, settlement monitoring system based on the principle of communicating vessels and that allows a continuous data acquisition during the construction. The data acquisition methodology uses photogrammetry and is based on a simple procedure of precision and accuracy compatible with the standard prescriptions. The details of the developed system, the experimental program for calibration and gauging and the necessary procedures for installation are presented. The system was installed in three study cases for evaluation of functionality, all cases have deep Continuous Flight Auger. The construction details of the three buildings and the installed monitoring systems are described, highlighting the difficulties and the solutions adopted in the installation. The results obtained in the form of total settlements, differential and distortion are presented and discussed. The SSI parameters AR, DR and CV are determined and analyzed. Especially for CV, comparison with other literature results is made. The results indicate that the monitoring was successfully implemented in two buildings, allowing the obtaining of the SSI parameters. However, in the third work interference hindered data collection in satisfactory amounts.

Keywords: Monitoring, settlement, communicating vessels, soil-structure interaction, photogrammetry, settlement.

ÍNDICE

Resumo.....	iv
Abstract.....	v
Índice.....	vi
Lista de Figuras.....	viii
Lista de Tabela.....	xi
Lista de abreviaturas e símbolos.....	xii
1. Introdução.....	1
1.1. Considerações Iniciais	1
1.2. Objetivo	3
1.3. Escopo da Pesquisa.....	4
2. Revisão Bibliográfica	6
2.1. Verificação da competência de uma fundação.....	6
2.2. Recalque	9
2.2.1. Recalques diferenciais admissíveis e danos causados na estrutura	11
2.2.2. Monitoramento de recalque de fundações.....	12
2.2.3. Considerações sobre a interação solo-estrutura	13
2.3. Considerações sobre monitoramento de recalque de fundações	19
2.3.1. Aplicação do monitoramento de recalque de fundações	19
2.3.2. Metodologia para monitoramento de recalques de fundação	26
2.3.2.1. Definição dos pontos de medição	26
2.3.2.2. Tipos de instrumento de monitoramento de recalque	27
2.3.2.3. Escolha do tipo de instrumento de medição.....	32
2.3.2.4. Coleta de dados	33
3. Metodologia	35
3.1. Sistema de medição.....	35
3.2. Instrumento de medição.....	39
3.3. Tratamento de imagens	44
3.4. Calibração e funcionalidade do instrumento	48
3.4.1. Determinação do tempo de equalização da água	49
3.4.2. Determinação do tempo de equalização da boia.....	51
3.4.3. Aferição do instrumento – Acurácia e precisão	52
3.4.4. Calibração dos instrumentos de medição - Haste	57

3.5. Coleta de dados no campo	58
4. Casos de Estudo	60
4.1. Projeto do mapa de instrumentação.....	60
4.2. Projeto do Marco de referência	62
4.3. Descrição dos edifícios	63
4.3.1. Edifício 1	63
4.3.2. Edifício 2.....	69
4.3.3. Edifício 3.....	74
5. Resultados e Interpretações	78
5.1. Edifício 1	78
5.1.1. Recalque total	78
5.1.2. Distorção angular	81
5.1.3. Análise dos dados.....	81
5.2. Edifício 2	86
5.2.1. Recalque total	86
5.2.2. Distorção angular	88
5.2.3. Análise dos dados.....	89
5.3. Edifício 3	94
5.3.1. Recalque total	94
5.4. Comparação.....	95
6. Conclusões e sugestões.....	97
6.1. Conclusões	97
6.2. Sugestões	97
7. Referências Bibliográficas	99
ANEXO A – PROJETOS DOS PILARES MONITORADOS	105
ANEXO B – CURVAS DE CARGA vs RECALQUE.....	109

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 - Etapas do controle da qualidade em uma fundação (Adaptada de Alonso, 2011).	8
Figura 2. 2 - Deslocamentos de uma estrutura (I.S.E., 1989)	11
Figura 2. 3 - Distorções angulares e danos associados (Barros, 2005).	12
Figura 2. 4 - Efeito da Interação solo-estrutura nos recalques de apoio de edificações (Gusmão, 1990).	14
Figura 2. 5- Representação da parcela de contribuição de cada elemento da construção na carga total da edificação durante a construção do edifício.	15
Figura 2. 6 - Detalhamento do Nivel Terzaghi com aquisição de dados através de paquímetro digital desenvolvido por Barros (2005).	29
Figura 2. 7 - Princípio de funcionamento de sistemas baseados no princípio dos vasos comunicantes (Savaris, 2008).	30
Figura 2. 8 - Detalhamento do instrumento baseado no princípio dos vasos comunicantes com aquisição de dados através de fotogrametria desenvolvido por Savaris (2008).	30
Figura 2. 9 - Detalhe do pino de leitura de recalque (Alonso, 2011).	31
Figura 3. 1 - Fluxograma da metodologia aplicada ao monitoramento de recalques.	35
Figura 3. 2 - Materiais utilizados no sistema de monitoramento de recalque.	37
Figura 3. 3 - Caixa branca de PVC e tampa removível para proteger o instrumento de medição.	38
Figura 3. 4 - Reservatório, duto flexível e registro.	39
Figura 3. 5 - Placa de referência e boia acoplada a uma haste.	40
Figura 3. 6 - Sistema de monitoramento de recalque.	41
Figura 3. 7 - Esquema do funcionamento do sistema ao ocorrer um deslocamento do pilar.	42
Figura 3. 8 - Distâncias a serem medidas para determinação do recalque.	42
Figura 3. 9 - Determinação das alturas H da placa de referência pelo software Photomodeler.	44
Figura 3. 10 - Determinação das alturas H da placa de referência pelo software CorelDraw	45
Figura 3. 11 - Malha de calibração fornecida pelo software.	47
Figura 3. 12 - Sistema instalado no laboratório simulando situação na obra.	49
Figura 3. 13 - Manômetro digital para medir a pressão dentro do reservatório.	50
Figura 3. 14 - Variação da pressão com o tempo dentro do reservatório após o deslocamento.	51
Figura 3. 15 - Variação da diferença entre o deslocamento real e o medido com tempo.	52
Figura 3. 16 - Esquema da definição da acurácia e precisão.	53
Figura 3. 17 - Esquema das variáveis durante o processo de determinação do erro do instrumento de medição.	55

Figura 3. 18 - Determinação do erro associado ao processo de medição para diferentes variáveis.	55
Figura 3. 19 - Calibração do sistema no laboratório para determinação do erro de montagem.	57
Figura 3. 20 - Ilustração da determinação do erro de fabricação do sistema.	58
Figura 4. 1 - Locação dos pilares monitorados individualmente (Mota, 2009).	61
Figura 4. 2 - Locação dos pilares monitorados e subdivididos em linhas (Savaris, 2008).	61
Figura 4. 3 - Referência de nível profunda (Alonso, 2011).	62
Figura 4. 4 - Vista Externa do Edifício 1.	64
Figura 4. 5 - Evolução da construção durante o monitoramento de recalque.	66
Figura 4. 6 - Perfil estratigráfico do terreno do Edifício 1.	67
Figura 4. 7 - Projeto do mapa de instrumentação do Edifício 1.	68
Figura 4. 8 - Projeto do marco de referência do Edifício 1.	69
Figura 4. 9 - Vista Externa do Edifício 2.	70
Figura 4. 10 - Evolução da construção durante o monitoramento de recalque.	71
Figura 4. 11 - Perfil estatigráfico do terreno do Edifício 2.	72
Figura 4. 12 - Projeto do mapa de instrumentação do Edifício 2.	73
Figura 4. 13 - Projeto do marco de referência do Edifício 2.	73
Figura 4. 14 - Vista externa do Edifício 3.	74
Figura 4. 15 - Evolução da construção durante o monitoramento de recalque.	75
Figura 4. 16 - Perfil estratigráfico do terreno do Edifício 3.	76
Figura 4. 17 - Projeto do mapa de instrumentação do Edifício 3.	77
Figura 5. 1 - Variação do recalque médio com o tempo.	79
Figura 5. 2 - Curva de isorecalque da 8ª medição (valores em mm).	80
Figura 5. 3 - Curva de iso-recalque da 18ª medição (valores em mm).	80
Figura 5. 4 - Variação da distorção angular média com o tempo do Edifício 1.	81
Figura 5. 5 – Isocurvas com valores de AR para a 8ª medição.	82
Figura 5. 6 - Isocurvas com valores de DR para a 8ª medição.	83
Figura 5. 7 - Isocurvas com valores de AR para 18ª medição.	84
Figura 5. 8 - Isocurva com valores de DR para 18ª medição.	84
Figura 5. 9 - Coeficiente de variação com o tempo do Edifício 1 a partir de diferentes parâmetros de análise.	85
Figura 5. 10 - Variação do recalque médio com tempo do Edifício 2.	87
Figura 5. 11 - Curva de iso recalque da 5ª medição.	87
Figura 5. 12 - Curva de iso-recalque da 12ª medição.	88
Figura 5. 13 - Curva de iso-recalque da 31ª medição.	88
Figura 5. 14 - Variação da distorção média com o tempo do Edifício 2.	89
Figura 5. 15 - Isocurva com valores de AR para a 5ª medição.	90
Figura 5. 16 - Isocurvas com valores de DR para a 5ª medição.	90
Figura 5. 17 - isocurva com valores de AR para a 17ª medição.	91
Figura 5. 18 - Isocurva com valores de DR para a 17ª medição.	91
Figura 5. 19 - Isocurva com valores de AR para a 27ª medição.	91
Figura 5. 20 - Isocurva com valores de DR para a 27ª medição.	92

Figura 5. 21 - Isocurva com valores de AR para a 34ª medição.	92
Figura 5. 22 - Isocurva com valores de DR para a 34ª medição.	92
Figura 5. 23 - Coeficiente de variação com o tempo do Edifício 2 a partir de diferentes parâmetros de análise.	94
Figura 5. 24 - Variação do recalque médio com o tempo.	95
Figura 5. 25 - Comparação do coeficiente de variação do recalque absoluto deste trabalho com alguns da bibliografia.	96

LISTA DE TABELA

Tabela 2. 1 - Ensaio destinados a verificação da competência, qualidade e desempenho das fundações profundas.	7
Tabela 2. 2 - Relação de dissertações e teses recentes sobre monitoramento de edificações e ISE (Adaptada de Gusmão, 2006).....	20
Tabela 2. 3 - Relação de trabalhos recentes sobre monitoramento de edificações e ISE em periódicos e eventos (Adaptada de Gusmão, 2006).....	21
Tabela 2. 4 - Instrumentos de monitoramento de recalque classificados segundo o princípio de funcionamento.	28
Tabela 3. 1 - Características das câmeras utilizadas para aquisição de dados.	46
Tabela 3. 2 - Tempo de equalização da água dentro do reservatório para diferentes comprimentos de duto flexível.	51
Tabela 3. 3 - Variáveis durante o processo de determinação do erro do sistema.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

w	Recalque
w_i	Recalque imediato
w_t	Recalque no tempo
δ_w	Recalque diferencial
$\delta_{wmáx}$	Recalque diferencial máximo
ϕ	Rotação
ω	Desaprumo
β	Distorção angular
Δ	Deflexão relativa
AR	Parâmetro recalque absoluto
DR	Parâmetro recalque diferencial
CV	Coefficiente de variação
FQ	Coefficiente de redistribuição de carga
Q_i	Carga do pilar i estimado através da suposição de apoios indesejáveis
Q_{ssi}	Carga do pilar i estimada considerando os recalques medidos
UnB	Universidade de Brasília
UFPB/CG	Universidade Federal da Paraíba
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
USP/SC	Universidade São Paulo / São Carlos
USP/SP	Universidade São Paulo / São Paulo
UENF	Universidade do Norte Fluminense
UFF	Universidade Federal Fluminense
COPPE/UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
H	Diferença de altura dos pontos de marcação do instrumento do marco de referência
h	Diferença de altura dos pontos de marcação do instrumento do pilar
δ_{ij}	Deslocamento do pilar i na linha j
ρ_{ij}	Recalque do pilar i na linha j
Δ_{ij}	Erro de fabricação do instrumento i da linha j
SPT	Standard penetration test
PUC	Pavimento de uso comum
CV_ρ	Coefficiente de variação do recalque absoluto
$CV_{\Delta\rho}$	Coefficiente de variação do recalque diferencial
CV_β	Coefficiente de variação da distorção angular
$CV_{\Delta max}$	Coefficiente de variação da deflexão angular

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

O crescimento populacional somado com um acelerado desenvolvimento econômico nas zonas urbanas tem ocasionado uma tendência no mercado de verticalização das edificações. Junto disto o aperfeiçoamento dos equipamentos assim como o desenvolvimento e aplicação de novas metodologias construtivas e novos materiais resultaram em um enorme avanço na execução de obras no Brasil e no Mundo. Ao mesmo tempo as normas que regem a segurança e a qualidade destes projetos de engenharia também foram aperfeiçoadas, dando-se ênfase ao controle de qualidade e verificação do desempenho da obra.

Neste sentido, a prática da engenharia considera de especial interesse a qualidade do projeto e segurança da obra. Particularmente, para a engenharia de fundações, a norma brasileira de projetos e execução de fundações NBR6122 (ABNT, 2010), trata não somente do controle da obra em si mas também enfatiza o progresso das técnicas construtivas e da melhoria dos conhecimentos obtidos sob condições reais, a observação das obras mediante instrumentação adequada no que se refere ao comportamento de suas fundações, bem como à interação estrutura-solo. De fato, os avanços tecnológicos da engenharia de fundações vêm provocando significativas mudanças nas técnicas construtivas e, conseqüentemente, solicitando cada vez mais a necessidade de verificação de comportamento e desempenho das fundações.

A verificação de desempenho das fundações em particular pode ser feita através da avaliação da interação solo estrutura. A interação solo estrutura reflete a capacidade de redistribuição de tensões nos elementos estruturais provocada pelas deformações diferenciais das fundações. Este mecanismo de redistribuição de tensões durante a construção do edifício foi estudado por diversos autores, por exemplo, Meyerhof (1953), Chamecki (1954), Goshy (1978), Gusmão (1994 e 2006), Danziger et al. (2000a e 2000b), Gusmão e Calado Jr (2002) e Gonçalves (2004), entre outros. Vale ressaltar que a estrutura é dividida em superestrutura e infraestrutura. As superestruturas absorvem as ações geradas pelo peso próprio da estrutura, sobrecargas e cargas acidentais e as transferem para a infraestrutura que, por sua vez, as transferem para o maciço de fundação. O maciço de fundação deve

absorver as tensões garantindo uma condição adequada ou satisfatória de estado limite de serviço, sem permitir se atingir o estado limite último.

A interação solo-estrutura, apesar da sua importância, é comumente desprezada na maioria dos projetos. Normalmente, o dimensionamento da estrutura é feito considerando seus apoios, ou fundações, indeslocáveis. O projeto de fundação por sua vez é realizado levando em consideração apenas as cargas nos apoios, determinadas pelo projeto estrutural, e as propriedades do solo. Deste modo despreza-se a influência da rigidez da estrutura e do maciço de fundação durante e após a construção.

Uma dificuldade encontrada para a compreensão dos efeitos da interação solo estrutura em projetos de engenharia é a determinação dos parâmetros necessários e característicos que definem esse comportamento. De fato, as diversidades estruturais e geotécnicas envolvidas em um projeto dificultam consideravelmente a inclusão de parâmetros da interação solo estrutura de forma confiável. Deste modo, é comum o uso de parâmetros simplificados, baseados normalmente em apoios elásticos e caracterizados por parâmetros do tipo coeficientes de mola. No contexto atual da engenharia de fundações, com destaque para a brasileira, infelizmente ainda existem poucos resultados de instrumentação ou observação de edificações que permitam a definição desses parâmetros de forma correta.

Dentre os procedimentos normalmente observados para definição de parâmetros característicos da interação solo estrutura está o monitoramento de recalques. O monitoramento de recalques consiste no levantamento altimétrico dos pontos de fundações em relação a um marco fixo. Além de permitir o acompanhamento do desempenho da estrutura para avaliação da interação solo-estrutura, o monitoramento de recalques tem como objetivo também esclarecer anormalidades constatadas em obra; construir banco de dados de medidas de recalque; ampliar a experiência local quanto ao desempenho da fundação, permitir a comparação de valores medidos com os calculados; e aperfeiçoamento dos métodos de previsão de recalques.

Infelizmente, a prática do monitoramento de recalques é pouco difundida na engenharia nacional. O acompanhamento dos recalques com o tempo é realizado na maioria das vezes apenas a partir do momento onde são observadas patologias nas edificações. O uso de monitoramentos de recalques fundamentalmente nessas

situações prova um preconceito de que o monitoramento está associado a obras com problemas e, por isso, o uso do monitoramento como ferramenta de avaliação de desempenho sofre frequentemente reação dos construtores para sua implementação.

Para a realização do monitoramento de recalque há diversas metodologias que podem ser classificadas de acordo com processo de medição: níveis topográficos, medidores baseados no princípio de vasos comunicantes e por tratamento de imagens. Existem ainda diferentes métodos para aquisição de dados do sistema de monitoramento de recalque: medida do nível d'água, mira de invar, prisma, fotogrametria, e outros.

Conclui-se do exposto que para uma avaliação correta do desempenho estrutural de uma edificação é necessária a consideração do efeito da interação solo estrutura nos projetos, no entanto, o monitoramento de recalques, que permite as estimativas de parâmetros para isso é pouco difundida na engenharia nacional, especialmente pelo preconceito e pelos custos gerados.

1.2. Objetivo

Considerado o exposto, o presente trabalho tem como objetivo geral criar um mecanismo para permitir a avaliação da interação solo estrutura de edifícios residenciais de forma eficiente, sem interferências no processo construtivo da obra e com baixo custo. Para tanto esse trabalho faz a aplicação de uma nova concepção para o monitoramento de recalques onde são combinados o princípio de vasos comunicantes e a fotogrametria para a aquisição de dados.

São considerados três casos de estudo onde se busca particularmente avaliar a aplicabilidade da metodologia proposta frente as diversidades de campo. Destaca-se que os edifícios monitorados possuem fundações profundas do tipo hélice contínua monitorada e diferentes características estruturais o que permite ainda avaliar o efeito da rigidez da estrutura no comportamento desse tipo de fundação.

Como objetivo específico busca-se apresentar os procedimentos de aferição e a calibração dos instrumentos desenvolvidos a fim de se avaliar os erros associados e a acurácia do procedimento proposto.

Além disto este trabalho contribui para a construção de banco de dados e ajuda a ampliar a experiência local quanto ao desempenho das fundações tipo hélice contínua monitorada.

1.3. Escopo da Pesquisa

Fundamentalmente a dissertação irá discutir as metodologias atuais utilizadas no monitoramento de recalque de fundações profundas, análises críticas e prescrições de normas relativas ao monitoramento de recalque. Será proposta uma nova técnica de medidas de recalque através de fotogrametria e a partir da instrumentação proposta fazer a avaliação da evolução dos recalques e interação solo-estrutura em caso de obras.

A dissertação é composta por 6 capítulos, apresentando inicialmente, neste capítulo, a introdução ao tema e os objetivos da pesquisa desenvolvida.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica com considerações sobre competência, qualidade e desempenho das fundações profundas, métodos destinados a verificação. Considerações sobre a aplicação destes métodos no ramo nacional e internacional. E por fim uma abordagem geral sobre os recalques e os danos associados ao deslocamento da estrutura, abordagem geral sobre interação solo-estrutura e monitoramento de recalques de fundações.

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia desenvolvida para o monitoramento de recalque deste presente trabalho. Esta metodologia consiste no programa experimental do laboratório para desenvolver, aferir e calibrar os instrumentos utilizados no monitoramento de recalque.

O Capítulo 4 apresenta os três casos de obra utilizados para desenvolvimento desta dissertação.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados e discussões dos recalques obtidos com o monitoramento de recalque e da análise da interação solo-estrutura realizada para cada caso.

No Capítulo 6, dá-se o encerramento do trabalho com a apresentação das principais conclusões. São propostas também recomendações para futuras pesquisas de acordo com os principais resultados.

Ao final, se apresentam os anexos com projetos de pilares monitorados de cada caso de estudo e os resultados das variações do recalque com o tempo para cada obra.

CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo trata da revisão bibliográfica sobre a competência das fundações profundas onde se aborda os ensaios destinados a verificação da competência, qualidade e desempenho das fundações. Além dos métodos destinados a verificação da competência este capítulo apresentará as maneiras, segundo a bibliografia, de se ter um melhor controle da qualidade de uma fundação durante a fase de projeto e execução. Por fim, este capítulo apresentará uma abordagem geral sobre os recalques, expondo os danos associados ao deslocamento da estrutura, abordagem geral sobre interação solo-estrutura e monitoramento de recalques de fundações.

2.1. Verificação da competência de uma fundação

A fim de garantir a qualidade de serviços existem métodos de ensaios destinado a avaliar as fundações, especificamente profundas, tanto no ponto de vista da integridade do elemento estrutural de fundação como do comportamento do conjunto solo-fundação sob carregamento. Além dos ensaios destinados a avaliar a fundação, existem outras medidas que também devem ser tomadas para garantir a qualidade do serviço, como o controle dos materiais (através de ensaios de corpos de prova) e relatórios de execução (como diagrama de cravação, negas, registros de torque e de consumo de concreto, etc).

Segundo Milititsky et al (2008) o segundo maior motivo responsável pelos problemas de comportamento de fundações são devidas as falhas durante a execução. O sucesso na concepção e construção de uma fundação depende não somente de uma caracterização conveniente das condições do subsolo, de cálculos e de projetos adequados, mas também de especificação e detalhes de materiais e procedimentos, equipamento adequado, acompanhamento de supervisão e controle construtivo rigoroso.

Os métodos de ensaios destinados a verificação da competência, qualidade e desempenho das fundações profundas são apresentados na Tabela 1.

Tabela 2. 1 - Ensaios destinados a verificação da competência, qualidade e desempenho das fundações profundas.

Ensaio		Norma Referente
Capacidade de Carga	Prova de Carga Estática	Carregamento Rápido Carregamento Lento
		NBR 12131 ASTM D 1143
	Prova de Carga Dinâmica (PDA – Pile Driving Analyser)	NBR 13208 ASTM D 4945
Desempenho das fundações	Monitoramento de recalque	NBR6122
Verificação de Integridade	PIT (Pile Integrity Test)	ASTM D 5882
	Método de resposta transiente (Transient Response Method ou Impulse Response Method)	ASTM D 5882
	Cross-Hole	ASTM D 6760
	Obtenção de testemunhos por meio de sondagem (Core Drilling)	ASTM 2113
	Ensaio de grande deformação (High Strain Integrity Testing)	ASTM D 4945

É importante destacar que muitos ensaios destinados a verificação da integridade das fundações profundas não são normatizados no Brasil. Porém estes ensaios são bastante difundidos internacionalmente, sobretudo através de normas específicas. No Brasil estes tipos de ensaios são executados em conformidade com as normas americanas. A norma brasileira de projetos e execução de fundações NBR 6122 (ABNT, 2010) recomenda que todas as estacas devem ser rigorosamente inspecionadas após a escavação dos blocos, no intuito de serem avaliadas quanto a integridade estrutural. No entanto não existe uma norma brasileira que trate dos critérios gerais destes ensaios muito menos da execução dos mesmos.

Segundo Alonso (2011) o controle da qualidade de uma fundação deve ser exercido em três frentes distintas.

- O controle dos materiais que comporão os elementos estruturais da fundação, tanto no que diz respeito a sua seleção durante a fase de projeto, quanto a resistência, sua integridade estrutural e sua durabilidade durante a execução das fundações;

- O controle da capacidade de carga do conjunto solo-fundação durante a fase de instalação dos elementos estruturais. Onde são realizados os ensaios destinados a verificação da qualidade e desempenho das fundações citados anteriormente;
- Observação do comportamento da fundação, à medida que esta vai sendo carregada pela estrutura. Para isso deve-se estabelecer um período mínimo de observação e para este controle são necessárias medidas de recalques e de cargas reais atuantes na fundação.

Através da Figura 1 é possível perceber a interdependência das três frentes com o controle da qualidade de uma fundação.

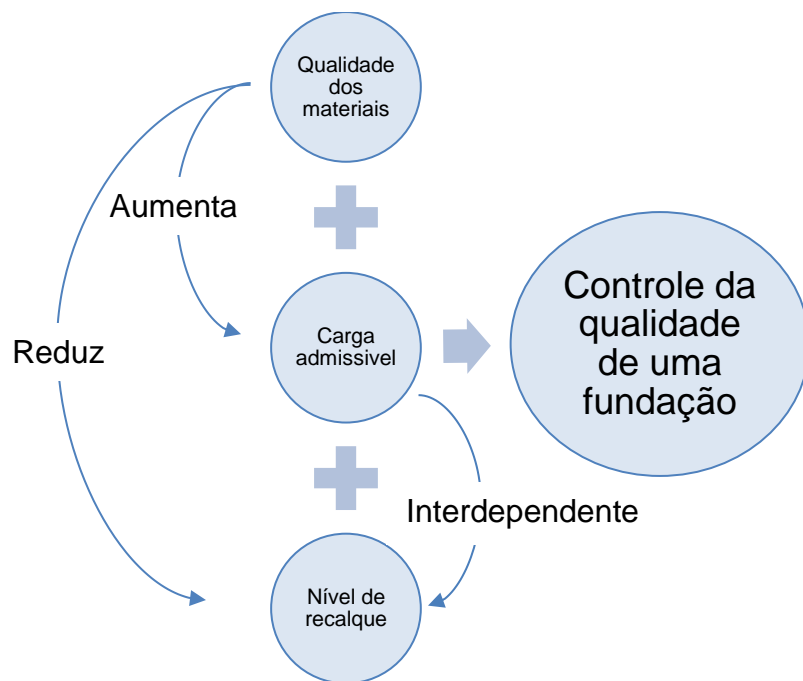


Figura 2. 1 - Etapas do controle da qualidade em uma fundação (Adaptada de Alonso, 2011).

O nível de recalque, descrito na Figura 1, é obtido através do monitoramento dos recalques que ocorrem nos edifícios durante a fase de construção. Este monitoramento, além de acompanhar o desempenho da fundação, tem como objetivo também esclarecer anormalidades constatadas em obra, construir banco de dados de medidas de recalque e ajudar a ampliar a experiência local quanto ao desempenho da fundação. Permite a comparação de valores medidos com os calculados, visando aperfeiçoamento dos métodos de previsão de recalques.

A carga admissível destacada na Figura 2.1 exemplifica uma variável relevante na verificação do desempenho e no controle de qualidade de uma fundação. A carga admissível da fundação é determinada como, por exemplo a partir da prova de carga. Este ensaio é considerado como um método de verificação do desempenho e da qualidade de uma fundação, porém ele não apresenta como resultado direto o recalque da fundação, e sim a variação dos recalques provocados pela aplicação de um carregamento específico. Uma prova de carga envolve a análise da resposta da estrutura, por intermédio de deformações e deslocamento, sob a influência das cargas e interpretação dos resultados. Com a prova de carga é possível determinar a curva carga recalque da fundação ensaiada, embora, como já foi dito anteriormente, o comportamento da prova de carga não representa diretamente o comportamento real da fundação. No entanto a partir dos resultados de uma prova de carga e do monitoramento de recalque é possível estimar o comportamento carga x recalque da edificação na condição real.

Alonso (2011) relata que apesar de uma fundação ter coeficiente de segurança contra a ruptura não pode-se garantir que também tenha um bom desempenho, pois há a necessidade de se verificar se os recalques, absolutos e diferenciais, também satisfazem as condições limites de serviço.

2.2. Recalque

O recalque de uma fundação é considerado como as deformações sofridas pelo maciço devido a um carregamento. Como todo material submetido a um novo estado de tensões apresenta deformações, uma estrutura ao receber o carregamento pode deformar-se, e se estas deformações forem significativas podem ocasionar certas patologias, como danos estéticos, funcionais ou até mesmo o colapso estrutural. Estas deformações ocorrem em maior ou menor grau dependendo primeiramente de sua rigidez, e segundo com a forma e a intensidade de como as forças são aplicadas.

Quando uma fundação é carregada pode-se observar que o recalque se processa em duas parcelas (Equação 2.1), uma parte imediatamente após o carregamento, conhecida como recalque instantâneo ou imediato (w_i), esta parcela acontece devido a deformação imediata e acomodação do solo, a outra parcela é

observada com o decorrer do tempo, consequência do adensamento e da fluência do solo, esta é conhecida como recalque no tempo (w_t).

$$W_{\text{Final}} = w_i + w_t \quad (\text{Equação 2.1})$$

Em obras de fundações, especificamente, podem acontecer deslocamentos verticais (mais conhecido como recalques), horizontais e rotacionais dependendo do tipo de solicitação a que é submetida. De maneira geral, existe uma maior preocupação com os deslocamentos verticais da estrutura, pois são os mais significativos, havendo assim uma preocupação maior na sua análise.

Os recalques podem ser absolutos ou diferenciais (Figura 2.2). O recalque absoluto designado por w , é definido pelo deslocamento vertical de um elemento de fundação para baixo. Quando o deslocamento é para cima é chamado de levantamento e designado por w_l . A diferença entre os recalques absolutos de dois quaisquer elementos da fundação denomina-se recalque diferencial, designado por δ_w . O recalque diferencial máximo é denotado por $\delta_{w\text{máx}}$.

A partir dos valores de recalque absoluto, recalque diferencial e do posicionamento espacial dos elementos de fundação é possível definir outros tipos de deslocamento de uma fundação (I.S.E., 1989), ilustrados na Figura 2.2.

- Rotação: designada por Φ , é usada para descrever a variação da inclinação da reta que une dois pontos de referência da fundação.
- Desaprumo: designado por ω , descreve a rotação de corpo rígido da superestrutura como um todo ou de uma parte dela bem definida.
- Distorção angular: designada por β , corresponde à rotação da reta que une dois pontos de referência tomados a partir de um ponto de desaprumo.
- Deflexão relativa: designada por Δ , representa o deslocamento máximo em relação à reta que une dois pontos de referência afastados de L .
- Relação de deflexão: consiste na relação entre a deflexão relativa e a distância entre dois pilares.

Outros tipos de deslocamentos podem ocorrer sendo que suas definições podem ser encontradas em I.S.E. (1989).

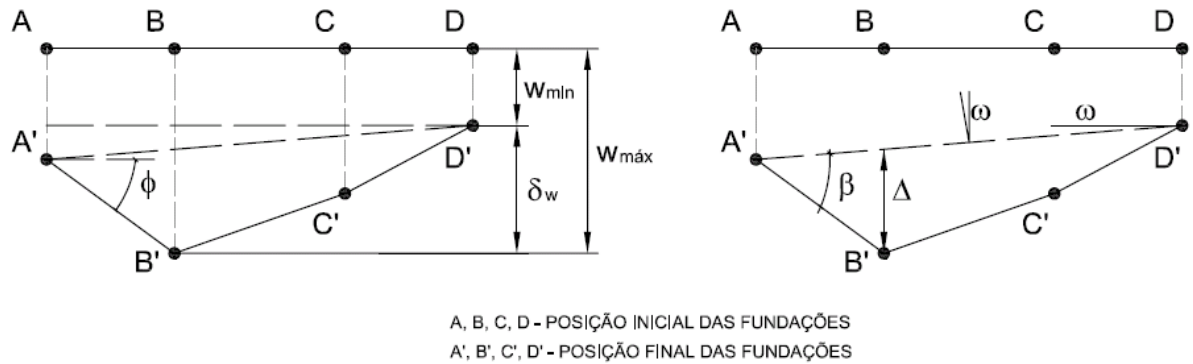


Figura 2. 2 - Deslocamentos de uma estrutura (I.S.E., 1989)

Além da mudança no estado de tensões do maciço de fundação, Barros (2005) ressalta que os recalques de fundações, especialmente os diferenciais, ocorrem devido ao fato do maciço de fundação ser constituído por materiais originados de processos naturais e que raramente apresentam propriedades físicas e mecânicas uniformes.

2.2.1. Recalques diferenciais admissíveis e danos causados na estrutura

A influência e os danos causados por um determinado valor de recalque diferencial é tanto maior quanto menor for a distância entre os pilares. Desta forma, é possível avaliar a magnitude de um recalque e se é prejudicial ou não ao comportamento da estrutura através da análise da distorção angular, definida pela razão entre o recalque diferencial e a distância entre dois pilares.

Por isso, a quantificação das deformações admissíveis é feita, em geral, em termos dos recalques diferenciais, conforme o tipo de estrutura. A bibliografia mostra que a partir do valor de distorções angulares (β) é possível estabelecer o comportamento da edificação e as patologias esperadas. A Figura 2.3 apresenta os valores da distorção angular β e os danos associados sugeridos por Bjerrum (1963) e complementados por Vargas e Silva (1973), Skempton e MacDonald (1956), Meyerhof (1956) e Polshin e Tokar (1957).

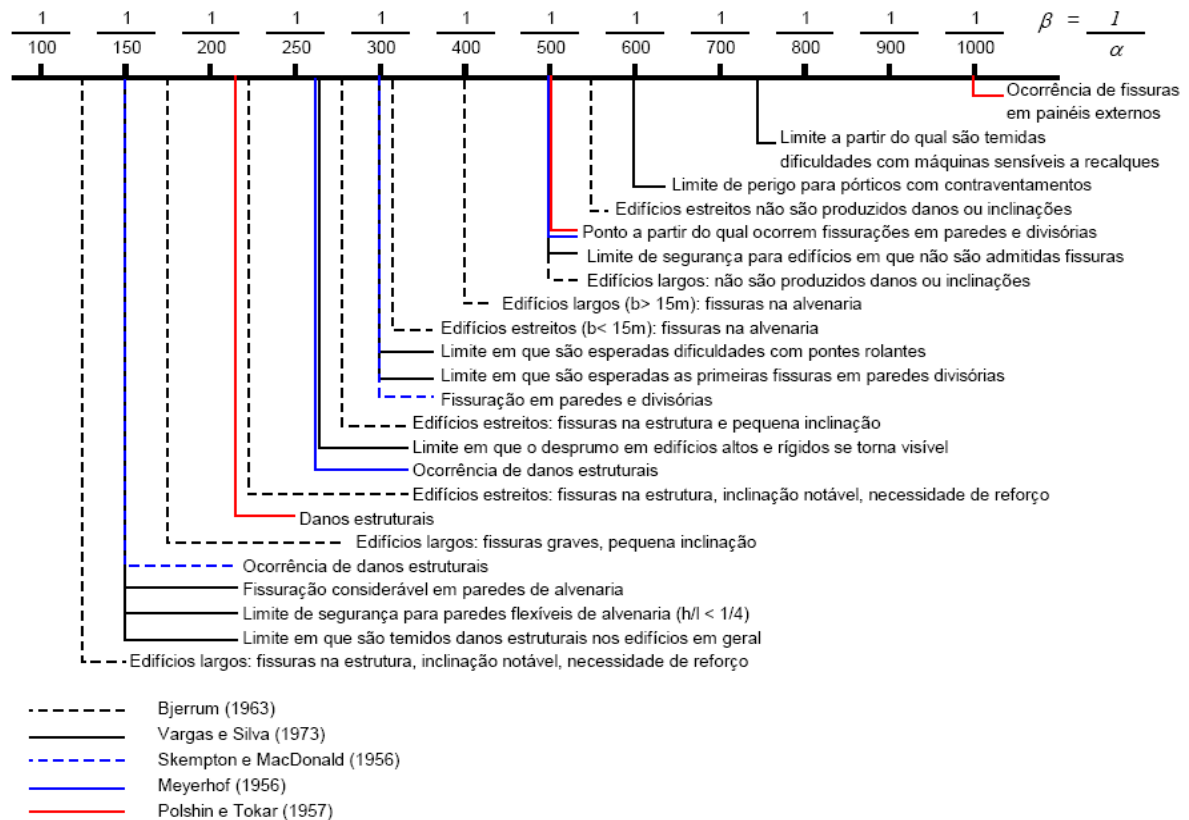


Figura 2. 3 - Distorções angulares e danos associados (Barros, 2005).

Segundo Alonso (2011), os valores admissíveis de β são fixados pelos especialistas envolvidos com projeto, execução e acompanhamento do desempenho da obra. O critério utilizado na definição desses valores é baseado normalmente na experiência local, sendo válidos para determinados tipos de estruturas e tipos de solos. Neste sentido, cuidados especiais devem ser tomados na extrapolação desses limites para condições específicas de obras.

2.2.2. Monitoramento de recalque de fundações

O monitoramento de recalques consiste em um levantamento altimétrico dos pontos de fundações em relação a um marco fixo e indeslocável, e possui uma importância significativa no controle do desempenho da estrutura. O desempenho da estrutura depende da capacidade que a estrutura tem em absorver e redistribuir os acréscimos e decréscimos de tensões. Essa absorção e redistribuição de tensões da estrutura é definida como interação solo-estrutura. A observação do comportamento da estrutura e a instrumentação de fundações possuem os seguintes objetivos:

- Acompanhar o desempenho da fundação, durante e após a execução da obra, para permitir tomar, em tempo, as providências eventualmente necessárias, a fim de garantir a utilização e a segurança da obra;
- Esclarecer anormalidades em obras já concluídas, inclusive no que diz respeito a construções existentes nas proximidades;
- Ampliar a experiência local quanto ao acompanhamento do solo sob determinados tipos de fundações e carregamentos;
- Permitir a comparação de valores medidos com valores calculados, visando o aperfeiçoamento dos métodos de previsão de recalques e de fixação das cargas admissíveis, de empuxo, entre outros.

2.2.3. Considerações sobre a interação solo-estrutura

Apesar da grande importância da interação solo-estrutura, ela é comumente desprezada na maioria dos projetos. Normalmente, o dimensionamento da estrutura é feito considerando seus apoios ou fundações indeslocáveis. O projeto de fundação por sua vez é realizado levando em consideração apenas as cargas nos apoios, determinadas pelo projeto estrutural, e as propriedades do solo. Sendo assim estes projetos acabam desprezando a influência da rigidez da estrutura, além disso consideram que os carregamentos são aplicados quando a estrutura está concluída, embora não aconteça exatamente assim na realidade, as cargas deveriam ser aplicadas gradativamente ao longo da construção do edifício (Figura 2.4).

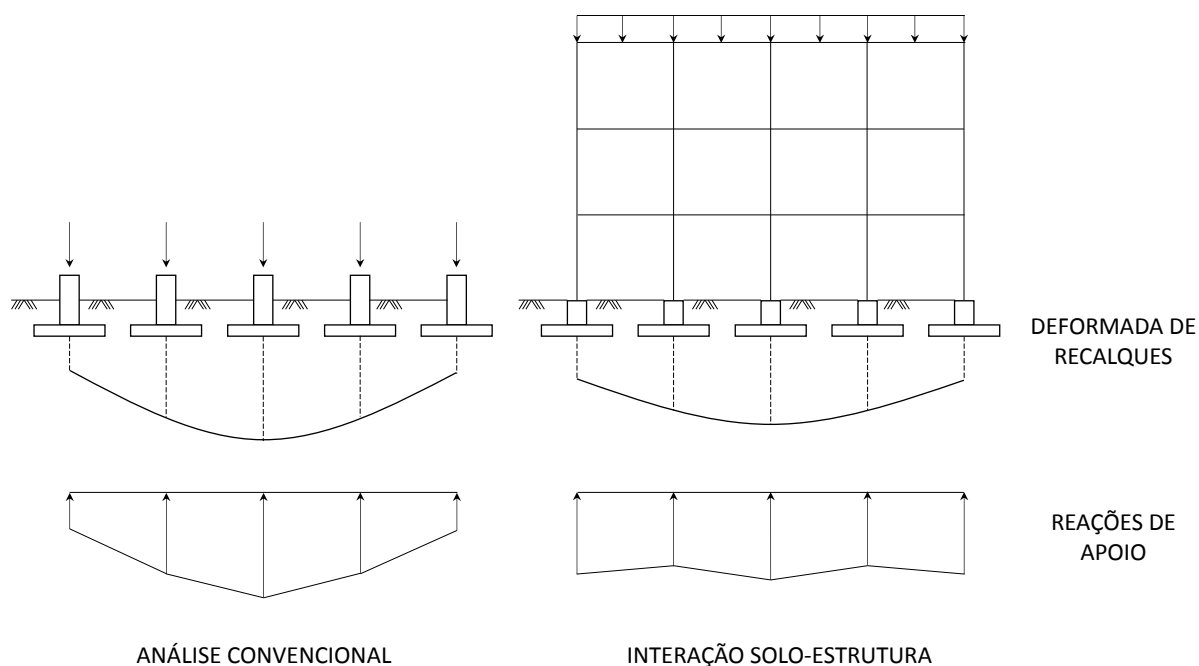


Figura 2. 4 - Efeito da Interação solo-estrutura nos recalques de apoio de edificações (Gusmão, 1990).

A determinação das cargas atuantes nos pilares dos edifícios ao longo da construção do edifício pode ser determinada por duas maneiras: a partir da medição da deformação dos pilares, empregando conceitos definidos na resistência dos materiais para determinação das cargas, ou através da estimativa ou medição de recalques, utilizando programas computacionais para análise de estruturas, nos quais os recalques medidos são aplicados como deslocamentos prescritos nos apoios.

Além das formas de determinação das cargas atuantes nos pilares ao longo da construção, Gusmão e Calado Jr. (2002) elaboraram a Tabela 2.2, onde apresentam as parcelas de contribuição de cada elemento da construção na carga total da edificação. As cargas devem ser estimadas proporcionalmente ao número de pavimentos completados, cujos quantitativos são levantados através de medições. Contudo, estas cargas não consideram o efeito da redistribuição de cargas devido aos recalques. Esta estimativa foi elaborada através de consultas junto aos principais escritórios de projeto estrutural da cidade de Recife-PE. A Figura 2.5 apresenta um esquema gráfico da parcela de contribuição de cada elemento da construção na carga total da edificação durante a construção do edifício.

Tabela 2. 2 - Estimativa de carga na estrutura (Gusmão e Calado Jr., 2002)

Elemento contribuinte	Carregamento Parcial (%)
Estrutura de concreto armado	40
Alvenarias	20
Revestimento externo	7,5
Revestimento interno	7,5
Pisos	10
Sobrecargas	15
TOTAL	100

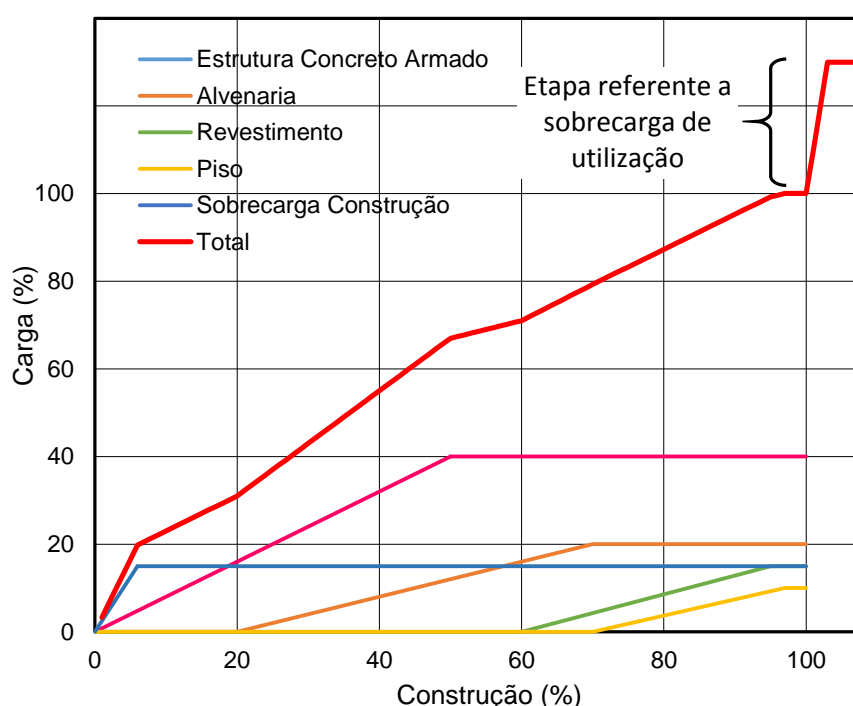


Figura 2. 5- Representação da parcela de contribuição de cada elemento da construção na carga total da edificação durante a construção do edifício.

A interação solo-estrutura provoca uma redistribuição de esforços nos elementos estruturais, e em especial nas cargas nos pilares. Diversos trabalhos mostraram este comportamento, Meyerhof (1953); Chamecki (1954); Poulos (1975); Goschy (1978); Aoki (1987 e 1997); Gusmão e Lopes (1990 e 1994); Gusmão e Gusmão Filho (1994a e 1994b); Gusmão Filho (1995); Moura (1995); Danziger *et al* (1997). Esta redistribuição depende, entre outras coisas, da rigidez relativa estrutura-solo e da deformada de recalques da edificação.

Uma uniformização dos deslocamentos da fundação é possível a partir da compatibilidade das deformações do sistema solo-estrutura, que depende,

fundamentalmente, da rigidez do conjunto solo-estrutura. Essa uniformização reduz as distorções angulares da edificação podendo evitar o aparecimento de danos na obra. Conseqüentemente, nos pilares menos carregados o recalque medido será maior que o estimado pelos métodos de previsão convencionais. Nos pilares mais carregados, ocorre o inverso, ou seja, alívio de carga e diminuição dos recalques previstos.

Segundo Gusmão (1994) dependendo do nível de deformação do terreno e da rigidez da estrutura, a interação solo-estrutura pode modificar significativamente o desempenho da edificação. Em alguns casos, sob determinadas condições, poderia viabilizar projetos que não seriam viáveis ou até mesmo torná-los mais econômicos. Segundo Madureira (2006) a abordagem da interação solo-estrutura reflete em aspectos associados tanto aos requisitos de economia quanto aos requisitos de segurança, preponderantemente norteadores da solução estrutural final.

Com uma análise integrada da estrutura e o solo é possível estimar com uma melhor eficiência os recalques diferenciais e as reações nos apoios, assim como a redistribuição dos esforços nos elementos estruturais com o comportamento mais real da interdependência dos esforços entre a estrutura e o solo, tornando assim o projeto mais eficiente e confiável (Iwamoto, 2000).

Através da interação solo-estrutura é possível observar o desenvolvimento dos elementos da edificação ao longo da sua construção e poder justificar o comportamento da estrutura. Porém, é importante ressaltar que a única forma de obter dados para a realização desta análise é através do monitoramento de recalque. Um monitoramento contínuo da obra apresentará resultados para uma análise mais detalhada do que um monitoramento com leituras esporádicas, que dará uma análise mais parcial do comportamento da estrutura. Sendo assim mostra-se de extrema importância a necessidade de um monitoramento do desenvolvimento da obra.

A análise da interação solo-estrutura atualmente pode ser feita por diferentes metodologias, sendo elas baseadas praticamente em dois princípios: analítica ou numérica. Uma das primeiras pesquisas sobre interação solo-estrutura em edificações foi desenvolvida por Meyerhof (1956). A forma analítica foi bastante apresentada por Gusmão (1990). Com a finalidade de analisar os efeitos da interação solo-estrutura, mais especificamente os efeitos da redistribuição de cargas

nos pilares e a tendência à uniformização dos recalques, Gusmão (1990) definiu três parâmetros.

Fator de Recalque Absoluto (AR)

O fator de recalque absoluto é definido pela relação entre o recalque absoluto w_i de um apoio i e o recalque absoluto médio de todos os apoios w_m . Definido pela Equação 2.2.

$$AR = \frac{w_i}{w_m} \quad \text{Equação 2.2}$$

Quando essa relação apresenta valor maior do que 1 ($AR > 1$) são observados alívios nos pilares que possuem recalques medidos maiores que a média. No caso contrário, quando a relação apresenta valor menor do que 1 ($AR < 1$), verifica-se um acréscimo de carga nos pilares.

Fator de Recalque Diferencial (DR)

O fator de recalque diferencial é definido pela relação entre a dispersão do recalque absoluto w_i do apoio i e o recalque absoluto médio de todos os pilares w_m pelo recalque absoluto médio de todos os pilares w_m . Definido pela Equação 2.3.

$$DR = \frac{w_i - w_m}{w_m} \quad \text{Equação 2.3}$$

Vale ressaltar que o valor obtido pelo fator de recalque diferencial é apresentado em porcentagem. O fator de recalque diferencial representa o desvio percentual do recalque do pilar i em relação a média dos recalques de todos os pilares. Nos casos onde se obtêm essa relação maior do que 1, ou seja $DR > 1$, constata-se um alívio de carga nos pilares, enquanto que se obtêm essa relação menor do que 1, $DR < 1$, gera-se uma sobrecarga nos pilares.

Coefficiente de variação dos recalques (CV)

O coeficiente de variação dos recalques é definido pela relação entre o desvio padrão dos recalques σ_n e o recalque médio absoluto w_m . Definido pela Equação 2.4.

$$CV = \frac{\sigma_m}{w_m} \quad \text{Equação 2.4}$$

Barros (2005) apresenta uma crítica em relação aos fatores de recalque absoluto (AR) e recalque diferencial (DR) propostos por Gusmão (1990). Ele ressalta que estes fatores são de extrema importância quando se deseja avaliar os efeitos da interação solo-estrutura tais como a redistribuição de cargas nos pilares e sua tendência a uniformização dos recalques. No entanto estes parâmetros fornecem informações estatísticas e baseadas em dados de recalque ora medidos, ora estimados. Barros acredita que existe uma carência de uma metodologia de análise da presença do mecanismo da interação solo-estrutura, que agregue parâmetros oriundos do acompanhamento de recalque consorciado com um coeficiente numérico indicativo dos efeitos destes mesmos recalques sobre a redistribuição de cargas nos pilares.

A análise definida por Gusmão (1990) é uma análise simplificada, baseada basicamente na média e no desvio padrão dos resultados obtidos com o monitoramento de recalque, e é feita uma comparação do recalque previsto com o medido. Barros (2005) define uma metodologia de previsão de interação onde através dos dados obtidos com o monitoramento será definido um coeficiente que avaliará a redistribuição de carga dos pilares (Equação 2.5 e 2.6). O coeficiente de redistribuição de carga é definido como:

$$FQ = \frac{Q_{ssi} - Q_i}{Q_i}, \text{ para situações em que } Q_i \geq Q_{ssi} \quad \text{Equação 2.5}$$

$$FQ = \frac{Q_{ssi} - Q_i}{Q_{ssi}}, \text{ para situações em que } Q_i \leq Q_{ssi} \quad \text{Equação 2.6}$$

onde Q_i é a carga do pilar i estimado através da suposição de apoios indeslocáveis da estrutura e Q_{ssi} é a carga do pilar i estimada considerando os recalques medidos durante a fase de construção. Para condições em que $FQ > 1$ ocorre

sobrecarregamento do pilar e $FQ < 1$ constata-se um alívio no esforço transmitido ao apoio. As situações onde FQ e DR são iguais a zero indicam a ausência da interação solo-estrutura (Barros, 2005).

O avanço da ciência tem motivado o desenvolvimento de métodos matemáticos para estudo do comportamento de sistemas físicos, propiciando modelagens realísticas. Atualmente encontram-se na literatura estudos da análise da interação solo-estrutura baseados na formulação e utilização de métodos numéricos, destacando-se entre eles o método dos elementos finitos e o método dos elementos de contorno. A partir deste método é possível simular a heterogeneidade do solo, considerando camadas estratificadas e a não linearidade física e geométrica da estrutura.

2.3. Considerações sobre monitoramento de recalque de fundações

O monitoramento de recalques no Brasil sempre esteve associado a obras com desempenho insatisfatório, com patologias e muitas vezes necessidade de reforço das fundações. No entanto, há que se considerar, como destacam Danziger et al. (2000a), que as medições de recalques durante longos períodos nas fundações de obras em Santos constituem importantes contribuições para a Engenharia Brasileira, revelando o comportamento real destas obras e norteando os projetos mais recentes de fundações (Machado, 1958).

2.3.1. Aplicação do monitoramento de recalque de fundações

Segundo Danziger et al (2000a), a prática brasileira de fundações realiza controle dos recalques com o tempo apenas a partir do momento onde são observados problemas nas edificações como trincas e rachaduras. Com este controle a velocidade do recalque é calculada a fim de obter elementos para uma tomada de decisões quanto a necessidade de reforço das fundações ou uma eventual medida de emergência em tempo hábil e com segurança. Como por exemplo a desocupação da edificação e com custos evidentemente menores do que se as medidas fossem tomadas em situações críticas.

Neste sentido há poucos resultados de monitoramento publicados na literatura. Para apresentar o panorama brasileiro sobre o tema relacionado ao monitoramento de edifícios e análises da interação solo-estrutura foi elaborada uma

tabela com os principais trabalhos apresentados pelas universidades através de dissertações e teses (Tabela 2.3). A Tabela 2.4 relata os trabalhos publicados nos principais eventos e revistas técnicas até a presente data. Ambas as tabelas foram adaptadas das tabelas apresentadas por Gusmão (2006). Foi feita uma atualização dos trabalhos considerando o tema proposto, monitoramento de edificações e interação solo-estrutura em edifícios.

Apesar dos poucos trabalhos são observadas conclusões importantes para o conhecimento do efeito da interação solo-estrutura e muitos se complementam, auxiliando em uma maior compreensão deste tema.

Tabela 2. 3 - Relação de dissertações e teses recentes sobre monitoramento de edificações e ISE (Adaptada de Gusmão, 2006).

Universidade	Referencia
UnB	Soares (2004)
UFPB/CG	Lucena (2003)
UFPE	Milfond (1999), Fonte (2000) Borges (2009)
UFRGS	Vitoreti (2003) Medeiros (2006)
USP/SC	Reis (2000), Iwamoto (2000), Mendonça (2000) Holanda Jr. (2002), Jordão (2003), Ribeiro (2005) Russo Neto (2005), Colares (2006), Mota (2009)
USP/SP	Cardozo (2002)
UENF	Crespo (2004), Barros (2005) Savaris (2008)
UFF	Costa (2003), Rosa (2005) Silva (2005)
COPPE/UFRJ	Gonçalves (2004) Gonçalves (2010)

Tabela 2. 4 - Relação de trabalhos recentes sobre monitoramento de edificações e ISE em periódicos e eventos (Adaptada de Gusmão, 2006).

Periódicos/Evento	N° de Trabalho
Revista Solos & Rochas (1978 a 2005)	04
Simpósio sobre ISE – São Carlos (2000)	07
Simpósio Sobre Edifícios da Orla de Santos – Santos (2003)	04
INFOGEO – Curitiba (2001)	01
INFOGEO – Belo Horizonte (2005)	03
SEFE – São Paulo (1996)	-
SEFE – São Paulo (2000)	07
SEFE – São Paulo (2004)	05
COBRAMSEG – Brasília (1998)	03
COBRAMSEG – São Paulo (2002)	05
COBRAMSEG – Curitiba (2006)	07
COBRAMSEG – Buzios (2008)	03
COBRAMSEG – Gramado (2010)	03
COBRAMSEG – Porto De Galinhas (2012)	04
PCSMGE – Foz do Iguaçu (1999)	02

Danziger et al (2000a) ainda citam que a necessidade do monitoramento de recalque foi questionada em certos momentos, porém após acidentes ocorridos e relatados amplamente na imprensa evidenciaram sua importância. Como foi o caso dos problemas sofridos pelos edifícios em Santos, que contribuíram para a Engenharia Brasileira, revelando o comportamento real destas obras e norteando os projetos mais recentes de fundações. Em Recife por sua vez, segundo Gusmão (2006), desde o início da Década de 90 do século passado foi feito um trabalho de conscientização da necessidade do monitoramento de recalques e hoje é o local onde mais se mede recalque de prédios no Brasil.

Segundo uma pesquisa feita por Gusmão (2006), apresentando um resumo com os principais trabalhos consultados, é interessante notar a quantidade de trabalhos que desenvolvem este tema sobre a Cidade de Recife, a maior parte de trabalhos apresentados sobre este tema é na região Nordeste, segundo ele, cerca de 40%.

Gusmão (2006) ainda mostrou que segundo o seu banco de dados, entre 1989 a 2005 foram monitorados 75 edifícios apenas em Recife, e que apenas 11 prédios o monitoramento foi motivado pelo aparecimento de patologias, as quais nem sempre eram decorrentes de problemas nas fundações. Atualmente o monitoramento de recalques já está inclusive incorporado aos sistemas de qualidade de muitas construtoras em Recife.

Segundo Danziger et al (2000), na Cidade do Rio de Janeiro diversas obras têm sido instrumentadas desde o início da construção a fim de contribuir para o controle de qualidade das fundações. Evidência disso é a ampla literatura de trabalhos brasileiros que incorporam esta técnica de monitoramento e, associado a isto, uma análise da influência da interação solo-estrutura nas edificações.

Vale ressaltar que no caso das fundações, que são componentes de uma estrutura e possuem uma altíssima responsabilidade e importância no comportamento de uma obra, o controle do seu desempenho não é feito de forma rotineira, embora sugerido pela norma brasileira de projetos e execução de fundações NBR6122 (ABNT, 2010). O controle de qualidade do concreto e do aço na construção civil por sua vez são feitos e aceitos de forma natural, sendo inclusive objeto de norma.

A NBR6122 (ABNT, 2010) especifica os casos onde é obrigatório o monitoramento, sendo que na versão anterior desta norma não era dado ênfase, muito menos citada a obrigatoriedade do monitoramento. Os casos onde o monitoramento é obrigatório são:

- a) *Estruturas nas quais a carga variável é significativa em relação à carga total, tais como silos e reservatórios;*
- b) *Estruturas com mais de 60 m de altura do térreo até a laje de cobertura do último piso habitável;* Vale ressaltar um edifício de 20 lajes possui 60 metros de altura, considerando o pé direito médio por

andar igual a 3 metros, o que representa um edifício comumente construído na construção civil atual brasileira.

c) *Relação altura/largura (menor dimensão) superior a quatro*; Esta relação também não é um caso difícil de se encontrar nas construções atuais, já que os prédios estão cada vez mais altos e em terrenos cada vez mais estreitos.

d) *Fundações ou estruturas não convencionais*.

A norma ainda relata que também é necessário o monitoramento de outras grandezas, tais como: deslocamentos horizontais, desaprumos, integridade ou tensões dependendo da condição da obra. O resultado das medições deve ser comparado com as previsões de projeto.

Um outro ponto bastante interessante em relação a esta edição desta norma, até então a mais recente, é o programa de monitoramento que é recomendado e que deve ser planejado na fase de projeto das fundações. Inclusive, a norma cita os itens importantes que devem ser considerados no programa de monitoramento, como: a especificação da referência de nível, as características do aparelho de medida, a frequência e período das leituras e outros.

Segundo Barros (2012), na análise habitual da segurança de fundações no Brasil, verifica-se se a fundação atende a valores de fatores de segurança normais e/ou parciais apresentados na norma brasileira de projetos e execução de fundações NBR6122 (ABNT, 2010). Ao contrário do que ocorre no Brasil, no cenário internacional o emprego das análises de confiabilidade e probabilidade de ruína em projetos de fundações é recomendado em normas desde o início da década de 90.

A norma europeia de projeto geotécnico EN 1997 Eurocódigo 7 (EN 1997-1:2004), afirma que, para garantir a segurança e a qualidade de uma obra, uma das medidas a ser tomada é o monitoramento do desempenho da estrutura durante e após a sua construção. Além disso, a supervisão do processo de construção, e qualquer acompanhamento do desempenho da estrutura durante e após a construção, deve ser especificado no *Geotechnical Design Report* (Relatório de Projeto Geotécnico). A norma deixa claro que as observações e medições do comportamento da estrutura devem ser feitas durante a construção, para identificar qualquer necessidade de medidas corretivas ou alterações na sequência de construção, e após a construção, para avaliar o desempenho a longo prazo. E,

quando as decisões de projetos são influenciadas pelo monitoramento, devem ser claramente identificadas. O projeto de monitoramento está sujeito a alterações quando ocorrerem eventos inesperados e sobretudo, o monitoramento deve apresentar resultados coerentes com o previsto nos projetos.

A norma europeia (EN 1997-1:2004) apresenta recomendações e comentários a respeito do projeto de monitoramento e de um controle de qualidade da construção. Este projeto deve especificar o tipo de instrumento que será utilizado na instrumentação, a qualidade e frequência da aquisição de dados e os limites aceitáveis para os resultados a serem obtidos pelo monitoramento. Estas especificações devem variar segundo grau de incerteza nas premissas do projeto, a complexidade das condições de solo e de carga, o risco potencial de falha durante a construção e a possibilidade de implementar modificações no projeto ou medidas corretivas durante construção.

O regulamento de engenheiro ER 1110-2-110 (1985), do Department of the Army - U.S. Army Corps of Engineers de Washington, "Engineering and Design Instrumentation for Safety Evaluations of Civil Works Projects", comenta que os projetos de obras civis deverão ter um nível adequado de instrumentação para permitir aos projetistas monitorar e avaliar a segurança da estrutura durante o período de construção e sob todas as condições operacionais. O regulamento ainda apresenta recomendações para o planejamento do monitoramento, como por exemplo, apresenta comentários sobre a instalação, manutenção da instrumentação, calibração do instrumento, frequência das leituras, e outros.

O código de conduta de Hong Kong (Choy, 2004) relata que a fundação causa efeito nos terrenos vizinhos, por isso sua estrutura e seus efeitos devem ser avaliados. Esta avaliação, segundo a norma, inclui diversos requisitos, dentre eles destacam-se as propostas de medidas preventivas e o sistema de controle e contingência. O código especifica que estes serviços devem ser instalados e monitorados antes e durante a construção. Ainda especifica que quando uma fundação afetar alguma outra construção, deve ser previsto um projeto de monitoramento. Este projeto deve conter os pontos de monitoramento necessários para um detalhado monitoramento de movimento e vibração em qualquer edifício, estrutura, rua ou serviços. As atividades de construção no local também devem ser devidamente registradas, para que possam ser correlacionadas com as leituras de monitoramento, se necessário.

Na Espanha, o documento básico de Segurança Estrutural especificamente de fundações (SE-C, 2008) comenta bastante sobre controle durante a execução das fundações, especificando diversos aspectos que devem ser controlados e verificados durante a execução, este controle deve ser feito segundo a norma “Ejecución de trabajos especiales de geotecnia – pilotes perforados” (UNE-EM 1536:2000). Esta norma possui os padrões europeus, que especificam os requisitos para diferentes elementos de fundações e seus componentes, como a implementação recomendada, controle de qualidade, os registros de execução e especificações dos ensaios in situ.

O documento básico de Segurança estrutural ainda cita alguns ensaios para controle das fundações, como por exemplo o ensaio de verificação de integridade estrutural e a prova de carga, mas nada se comenta sobre o monitoramento de recalque. Apenas diz que os ensaios citados podem ser realizados para estimar parâmetros de cálculo, estimar capacidade de carga e apresentar as características de resistência e deformação das fundações. Dentre os ensaios citados pelo documento, pode-se encontrar o ensaio de carga estática, ensaio de carga dinâmica, ensaio de integridade e ensaios de controle. Mas não se tem detalhes a respeito deste ensaio de controle, apenas comenta que este ensaio pode ser com perfuração do concreto para obtenção de testemunho ou com medidores de inclinação para verificar a verticalidade da fundação em caso de estacas pré-moldadas.

Um ponto bastante interessante a respeito deste documento é a presença de aspectos em relação a interação solo estrutura no dimensionamento das fundações e a existência de um anexo de referência para o dimensionamento de fundações levando em consideração o efeito da interação solo-estrutura com conceitos simplificados.

No regulamento para estudos geotécnicos em edificações da Republica Dominicana (2006), nada se comenta a respeito de controle da estrutura, quando se comenta sobre ensaios destinados à verificação da qualidade da fundação faz-se referência às normas americanas.

Na Norma E.50 de solos e fundações do Peru (2006) também quando se comenta sobre a verificação da capacidade de carga das fundações profundas faz-se referência às normas americanas, e apenas aos ensaios de verificação de integridade e capacidade de carga das fundações.

2.3.2. Metodologia para monitoramento de recalques de fundação

Os procedimentos para o monitoramento de recalque de fundações possui uma metodologia baseada normalmente nas prescrições de norma. Apresenta-se a seguir uma descrição dos tipos de instrumentos utilizados, procedimentos de escolha dos instrumentos mais apropriados para o caso de obra, os procedimentos para coleta e tratamento de dados.

Fundamentalmente o monitoramento de recalques consiste na determinação da cota de nível dos pilares em relação a um marco fixo durante e após a construção da obra.

O monitoramento de recalques deve possuir as seguintes etapas:

- Definição dos pontos de medição;
- Estimativa dos valores dos deslocamentos a serem medidos na obra. Essa estimativa visa dar subsídios para escolha e dimensionamento dos instrumentos de medição. É feita através de metodologias preconizadas pela bibliografia técnica e balizada pela experiência
- Escolha dos instrumentos mais apropriados, com precisão, acurácia, fundo de escala e funcionalidade compatíveis com a obra;
- Medição inicial, que servirá como referência para as demais medições;
- Medições periódicas como frequência que permita determinar os deslocamentos e tempo para viabilizar a análise dos dados e verificação do comportamento da obra;
- Relatório final conclusivo das medições realizadas;

2.3.2.1. Definição dos pontos de medição

Para definição dos pontos que serão monitorados em uma obra deve-se levar em consideração alguns critérios:

- A presença de pontos críticos na obra. Geralmente quando acontece algum problema durante a execução de alguma fundação, ou pontos da estrutura que tenham apresentados alguma anormalidade durante a construção. Estes pontos devem ser monitorados a fim de observar o seu comportamento.
- A quantidade de pontos monitorados irá depender da distribuição dos pilares na obra. Não há necessidade de se monitorar todos os pilares, desde que haja

possibilidade de se fazer uma extrapolação do recalque. Por exemplo quando se tem pilares de periferia alinhados na lateral do limite do edifício, pode-se intercalar os pilares a fim de reduzir os pontos.

- Os pontos de monitoramento devem ser escolhidos de forma que se garanta a continuidade das medições, evitando pontos que serão utilizados pela obra para determinados serviços. Além disto, o ideal é sempre monitorar o maior número possível de pilares pois, durante os serviços de acompanhamento de recalque, pode ocorrer dos instrumentos instalados no pilar serem danificados ou ficarem impedidos de acesso.

2.3.2.2. Tipos de instrumento de monitoramento de recalque

Durante a etapa de projeto do sistema precisa-se definir primeiramente o princípio de funcionalidade do sistema de monitoramento e a forma de aquisição dos dados do instrumento que será utilizado para a realização do monitoramento de recalques. As metodologias normalmente utilizadas para monitoramento de recalque de fundações podem ser classificadas de acordo com processo de medição: níveis topográficos, medidores baseados no princípio de vasos comunicantes e por tratamento de imagens. Existem ainda diferentes métodos para aquisição de dados do sistema de monitoramento de recalque: medida do nível d'água, mira de invar, prisma, fotogrametria, e outros.

A Tabela 2.5 apresenta os principais tipos de instrumento de monitoramento encontrados na literatura. Foram classificados segundo o seu processo de medição.

Princípio dos Vasos Comunicantes

Segundo o princípio dos vasos comunicantes a altura alcançada por um líquido em equilíbrio em diversos vasos comunicantes é a mesma, qualquer que seja a forma de seção do duto de ligação, desde que a pressão atuante nas superfícies livres do líquido seja a mesma. Através deste princípio pode-se então determinar a cota de nível de um pilar em relação ao marco de referência comparando-se o nível d'água nos extremos do duto.

Instrumentos tradicionais baseados no princípio dos vasos comunicantes são normalmente utilizados para levantamentos de menor precisão e grandes deslocamentos, da ordem de milímetros a centímetros. Nesses instrumentos a conexão entre os dois pontos é feita através de mangueira e a determinação da cota

de nível é feita diretamente pelo limite inferior do menisco, a olho nu. No entanto, considerando que o menisco possui geometria tridimensional, dependendo da posição adotada pelo observador para a tomada do nível d'água, pode-se obter resultados diferentes e uma significativa influência no recalque medido (efeito paralaxe).

Esses instrumentos merecem destaque especial pela simplicidade, não possuem limite de pontos de monitoramento, facilidade de leitura, os equipamentos não possuem partes caras e delicadas, são equipamentos simples e robustos, com baixo custo e possuem adaptabilidade à diversidade da obra.

Tabela 2. 5 - Instrumentos de monitoramento de recalque classificados segundo o princípio de funcionamento.

Princípio de funcionamento	Procedimento	Método de aquisição	Tipo de Aquisição	
Princípio dos Vasos Comunicantes	Tradicional	Observação do menisco	Analógico	
	Nível de Mangueira	Terzaghi	Observação do menisco com nível ótico	Analógico
		Fotogrametria	Fotografia Digital	Analógico
	Nível de Mangueira com Transdutor de pressão		Com transdutor de pressão	Digital
	Medidor de Nível por Transbordamento	Tradicional	Menisco	Analógico
		Com transdutor de pressão	Com transdutor de pressão	Digital
Nivelamento Topográfico	Mira de Invar	Observação na mira de Invar com nível ótico ou teodolito	Analógico	
	Nível ótico, teodolitos ou estação total	Escalímetro	Observação no escalímetro com nível ótico ou teodolito	Analógico
		Prisma	Observação do prisma com estação total	Digital
		Nível a laser	Observação da projeção do laser	Analógico
		Posicionamento Global	GPS	Digital
Tratamento de Imagem	Scanner laser	Imagem Digital 3D	Analógico	
	Fotogrametria	Fotografia Digital	Analógico	

Outros instrumentos, como o nível Terzaghi aprimoraram essa técnica acoplando um tubo de vidro na extremidade da mangueira e observando a posição do menisco através de nível ótico. Este procedimento reduz o erro na aquisição de dados e, conseqüentemente, no cálculo dos recalques.

Os níveis tradicional e Terzaghi são pouco utilizados para monitoramento pois apresentam pouca precisão principalmente quando ocorrem vibrações e variações de temperatura durante a aquisição de dados (Alonso, 2011). Segundo Barros (2005) que cita USACE (1987), o nível Terzaghi tradicional possui precisão de 0,005 polegadas (0,127mm), valor superior ao sugerido pela norma brasileira de projetos e execução de fundações NBR6122 (ABNT, 2010) para esse tipo de monitoramento (0,01mm).

Barros (2005) apresenta um instrumento onde a determinação da posição do menisco é feita através de paquímetro digital acoplado em suporte que permite a redução do efeito de paralaxe (Figura 2.6). O paquímetro locado na frente de cada tubo em cada ponto de medição mede a distância do menisco até um ponto fixo na base rígida definindo portanto a diferença de altura entre os pontos de medição e o marco de referência.

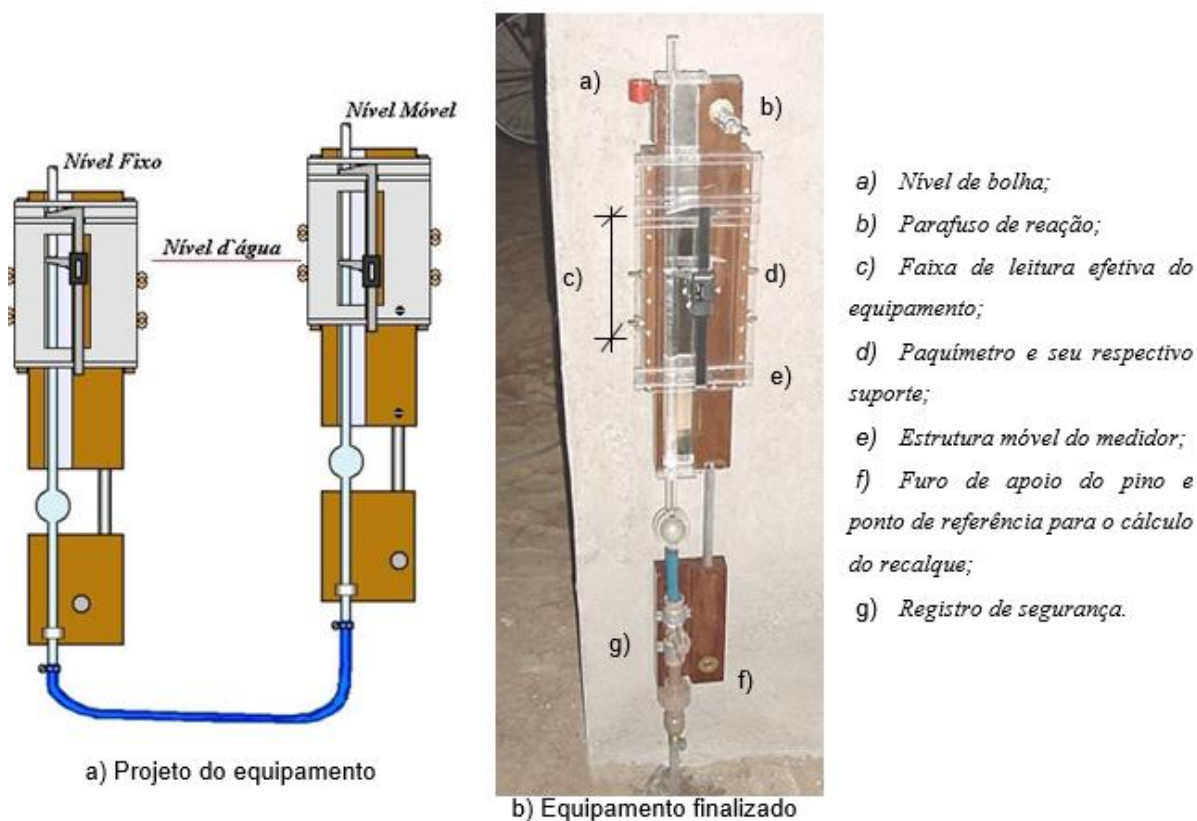
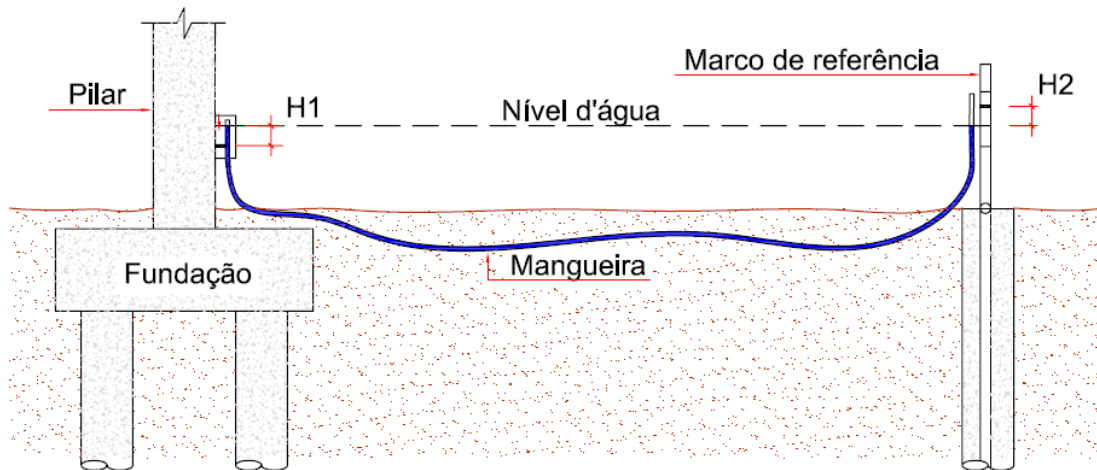


Figura 2. 6 - Detalhamento do Nível Terzaghi com aquisição de dados através de paquímetro digital desenvolvido por Barros (2005).

Procedimentos alternativos para a redução dos erros podem ser observados nos instrumentos que fazem a instalação permanente de dutos de interligação entre os pontos de medição e aquisição por fotogrametria. O sistema de monitoramento de recalque implementado por Savaris (2008) utiliza o processo digital como ferramenta de registro de imagem para determinação da posição do menisco. (Figura 2.7 e 2.8).

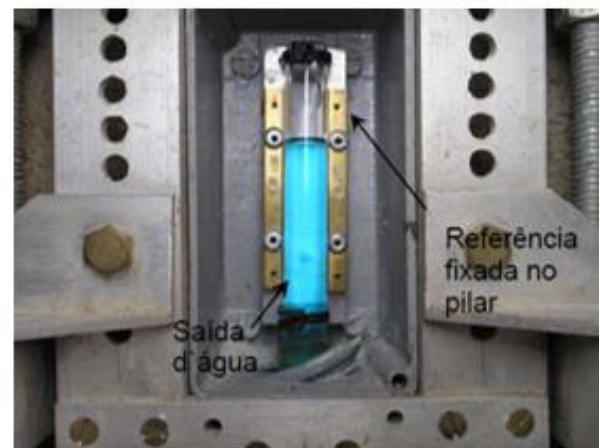


H1 - Leitura de nível no pino fixado no pilar
H2 - Leitura de nível no marco de referência

Figura 2. 7 - Princípio de funcionamento de sistemas baseados no princípio dos vasos comunicantes (Savaris, 2008).



a) Haste metálica e saída d'água no marco de referência.



b) Referência e saída de água nos pilares

Figura 2. 8 - Detalhamento do instrumento baseado no princípio dos vasos comunicantes com aquisição de dados através de fotogrametria desenvolvido por Savaris (2008).

A determinação da posição do nível d'água pode ser feita ainda utilizando-se transdutores de pressão acoplados nos extremos do duto de interligação entre os pontos de medição.

Instrumentos que medem o nível por transbordamento são normalmente utilizados para medida de deslocamentos no interior de maciços (caixa sueca), no entanto adaptações são possíveis e permitem a medida de deslocamentos pontuais em fundações.

Nivelamento Topográfico

O sistema baseado no nível ótico, envolve um nivelamento ótico de precisão de pontos de medição (geralmente nos pilares), em relação a um marco de referência. Na maioria das vezes estes pontos fixos são formados por pinos metálicos engastados nos pilares, constituídos por uma parte fixada na estrutura e uma parte móvel que pode ser rosqueada ou encaixada no momento da medição (Figura 2.9). Estes pinos servem de apoio à “mira”.

Entretanto este equipamento necessita de manutenção frequente, que são importantes para não afetar nos resultados, principalmente quando o que se pretende medir possui valores significativamente pequenos, como é o caso dos recalques. Assim, as leituras devem ser feitas por profissionais capacitados, o pino deve estar bem fixado na estrutura, deve-se tomar cuidado com a verticalidade da mira, etc.

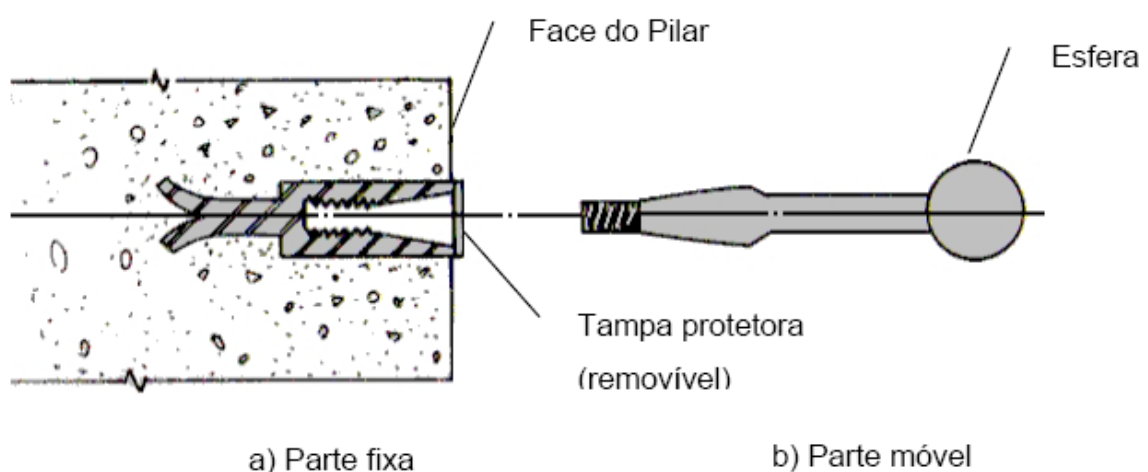


Figura 2. 9 - Detalhe do pino de leitura de recalque (Alonso, 2011).

Sistemas mais avançados, baseados no georeferenciamento global e transmissão de dados por via remota, permitem aquisição de dados em tempo real, avaliando o comportamento real de toda a estrutura. Este tipo de sistema é mais utilizado em estruturas grandes e complexas, permitindo o uso do GPS em combinação com sensores de inclinação (clinômetros) de precisão para proporcionar uma posição segura do edifício em tempo remoto. Ahmad Abdelrazaq (2013) utilizou um sistema constituído por três antenas GPS / receptores fixos, três prismas circulares inclináveis colocados em cada uma das antenas GPS e uma "Estação Total" (TPS) que foram fixados e visíveis para todas as estações de GPS para monitorar o comportamento de uma estrutura durante todo o período de construção.

Tratamento de Imagem

Este tipo de instrumento consiste em uma técnica mais avançada, onde um scanner gira em alta velocidade por toda a obra a ser monitorada disparando um feixe e então uma nuvem de pontos é formada descrevendo a superfície. A digitalização destes pontos proporciona a superfície de edifícios e estruturas com contornos altamente preciso, permitindo o monitoramento de estruturas.

2.3.2.3. Escolha do tipo de instrumento de medição

Inicialmente faz-se a previsão do que se pretender medir, especialmente no que se refere a ordem de grandeza do recalque. A previsão será determinada, através de uma análise preliminar dos recalques dos elementos das fundações, durante a fase de projeto. A determinação do recalque é feita a partir de previsões baseadas em métodos de cálculo consagrados e na experiência local. Deve-se considerar nessa previsão o tempo de construção e de utilização, o tipos de estrutura, os carregamentos específicos da obra e maciço de fundação característico do local.

É importante destacar que os recalques possuem valores com uma ordem de grandeza significativamente pequena, da ordem de milímetros, por isso os instrumentos devem ter boa precisão e acurácia.

Dentre os instrumentos que utilizam o nivelamento topográfico os medidores de nível ótico são os mais utilizados. Normalmente as leituras são realizadas com nível ótico que permite leituras diretas de 0,1 mm, como por exemplo, o nível WILD N3. Porém, geralmente estes equipamentos são delicados e de alto custo.

Os instrumentos mais utilizados para monitoramento de recalque são baseados no nível ótico com método de aquisição de dados utilizando a mira invar ou escalímetro (ou régua). Esta prática é descrita por diversos autores, como por exemplo Danziger et al (1997), Danziger e Crispel (2000a), Alonso (2011) e Correa (2012).

Com isso, atualmente existem estudos com diferentes equipamentos baseados no nível d'água visando minimizar os erros nas leituras, apresentando leituras constantes, de forma rápida, com precisão e confiabilidade compatível com a esperada.

Os instrumentos baseados no tratamento de imagens permitem leituras de milímetros, com uma tolerância de 0,5 mm. Portanto são instrumentos caros e que requerem profissional capacitado para manuseio do instrumento.

2.3.2.4. Coleta de dados

A aquisição de dados de um instrumento de monitoramento de recalque de uma fundação pode ser feita de forma analógica ou digital.

A aquisição de dados na forma analógica é feita por instrumentos que determinam a altura de pontos de medição através de um nível ótico, teodolitos, estação total ou nível a laser podendo ser baseado no princípio de vasos comunicantes, com a determinação da posição do menisco na mangueira ou tubo, ou ainda baseado no nivelamento trigonométrico, com auxílio da mira de invar, escalímetro ou régua. Este método de aquisição de dados exige portanto um profissional especializado, com competência e experiência no local para realizar a leitura.

A outra forma de aquisição de dados é a digital. Os instrumentos de monitoramento que são ligados diretamente a um computador permitem a aquisição dos dados do monitoramento, de forma remota e em tempo real. Existem ainda instrumentos, como a estação total por exemplo, que permite armazenar os dados no próprio instrumento durante a aquisição de dados no campo. Por fim os instrumentos que utilizam a fotogrametria como forma de obtenção de dados também permitem uma aquisição de dados digital.

A forma de aquisição de dados digital não necessita de um profissional capacitado para a coleta de dados, diferentemente da forma de aquisição de dados

de forma analógica. Além disto este tipo de aquisição de dados possui uma maior facilidade e agilidade na obtenção dos dados.

CAPÍTULO 3. METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada uma parte da metodologia utilizada para monitoramento de recalques de edifícios deste presente trabalho. Esta metodologia é composta pela elaboração do projeto do instrumento de medição, processo de medição do recalque e fabricação de um protótipo a fim de verificar sua funcionalidade através da aferição do instrumento de medição, determinando a sua acurácia e precisão. A Figura 3.1 apresenta o fluxograma completo desta metodologia.

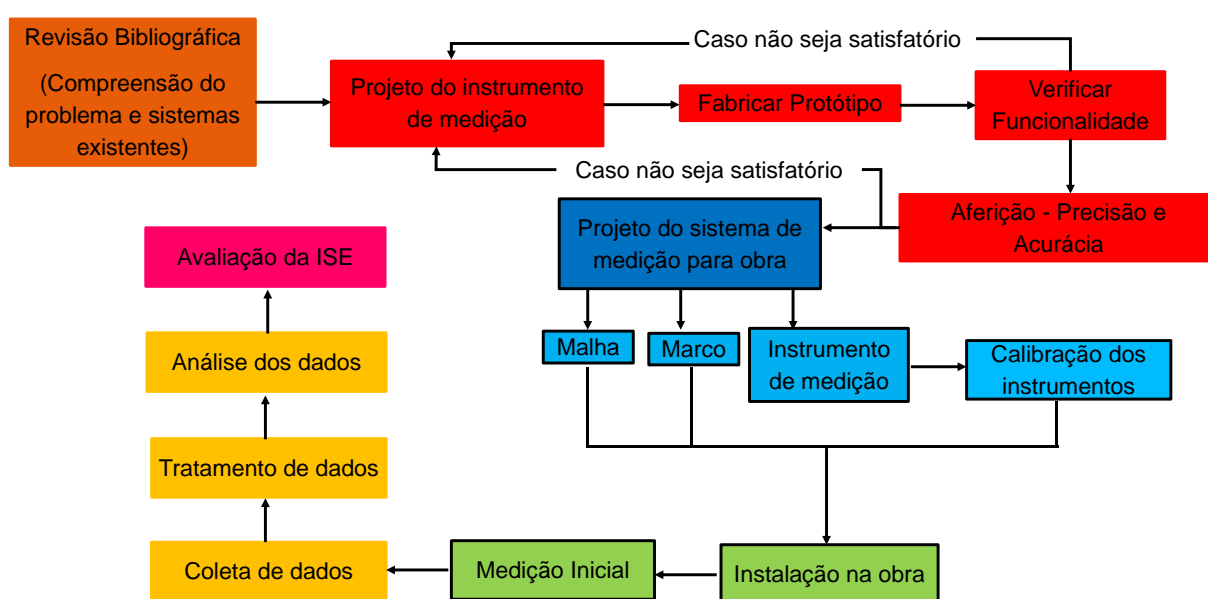


Figura 3. 1 - Fluxograma da metodologia aplicada ao monitoramento de recalques.

3.1. Sistema de medição

Buscou-se desenvolver um sistema econômico, de fácil manuseio mas ao mesmo tempo robusto para evitar danos durante o período de monitoramento na obra.

O sistema permite medir deslocamentos verticais de pontos da estrutura, em relação a um nível de referência. Os pontos da estrutura particularmente monitorados desse trabalho são os pilares.

Os principais requisitos da aquisição de dados de um sistema de monitoramento de recalque são: agilidade nas leituras no campo, precisão, acurácia e facilidade de tratamento de dados. Neste intuito, dentre as diversas possibilidades de formas de aquisição de dados de medição de deslocamento, este trabalho visa avaliar a utilização da fotogrametria para medição de deslocamentos de forma que atenda a estes requisitos.

Nesse sentido, foi desenvolvido um sistema baseado no princípio dos vasos comunicantes utilizando para determinação do nível d'água, que permite a determinação dos deslocamentos dos pilares e medidas sucessivas, instrumentos com aquisição de dados através da fotogrametria. O instrumento de monitoramento de recalque foi desenvolvido no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Basicamente, mede-se os recalques através da observação da variação do nível d'água em um sistema de dutos que interligam um marco de referência a outros pontos de medição, no caso os pilares da obra.

Particularmente, o projeto de interligação entre os pilares merece atenção especial e deve seguir os seguintes critérios:

- Na obra os instrumentos fixados nos pilares monitorados são interligados entre si por dutos flexíveis de poliuretano com diâmetro nominal igual a 8mm.
- O duto que faz a ligação entre os reservatórios é enterrado a aproximadamente 30cm abaixo do nível do terreno. Isso possibilita a realização dos trabalhos da obra sem interromper os procedimentos de coleta de dados de recalque e auxilia na equalização do nível d'água nos instrumentos de forma mais rápida;
- O número máximo de pilares a ser interconectado em uma mesma linha deve ser preferencialmente inferior a 10. Isso se justifica pelo considerável tempo necessário para equalização do nível d'água dentro dos reservatórios para linhas com número excessivo de pilares;
- O projeto de interligação e definição do número de linhas do sistema depende da distribuição dos pilares na obra e da posição do marco de referência, no entanto considera-se linhas com as menores distâncias entre pilares;
- A ligação dos instrumentos deve ser feita com conexões específicas vedando completamente o sistema de forma que não ocorra vazamentos. Estes materiais

agilizaram a montagem permitindo curvas acentuadas, desvios e impedindo vazamentos ao longo da tubulação (Figura 3.2).



a) Duto Flexível de Polipropileno de 5/16"

b) conexão instantânea em T de 5/16".

c) conexão instantânea em L de 5/16".

Figura 3. 2 - Materiais utilizados no sistema de monitoramento de recalque.

- O marco de referência de nível deve estar localizado em local que não sofre influência da própria obra ou de outras causas que possam comprometer sua indeslocabilidade;
- Cada linha é interliga ao marco de referência onde é fixado um instrumento de medição. É a partir da comparação do deslocamento do instrumento de medição posicionada na referência que é possível determinar o deslocamento de cada pilar de uma mesma linha;
- Devido às condições adversas de uma obra, todo o conjunto do instrumento é instalado dentro de caixas brancas de proteção confeccionadas de PVC denso e com tampa em acrílico transparente. Essas caixas evitam danos ao sistema devido a pequenos impactos, a entrada de poeira e queda de outros materiais dentro do instrumento. A Figura 3.3 apresenta a caixa de PVC e a tampa removível para proteger o instrumento.

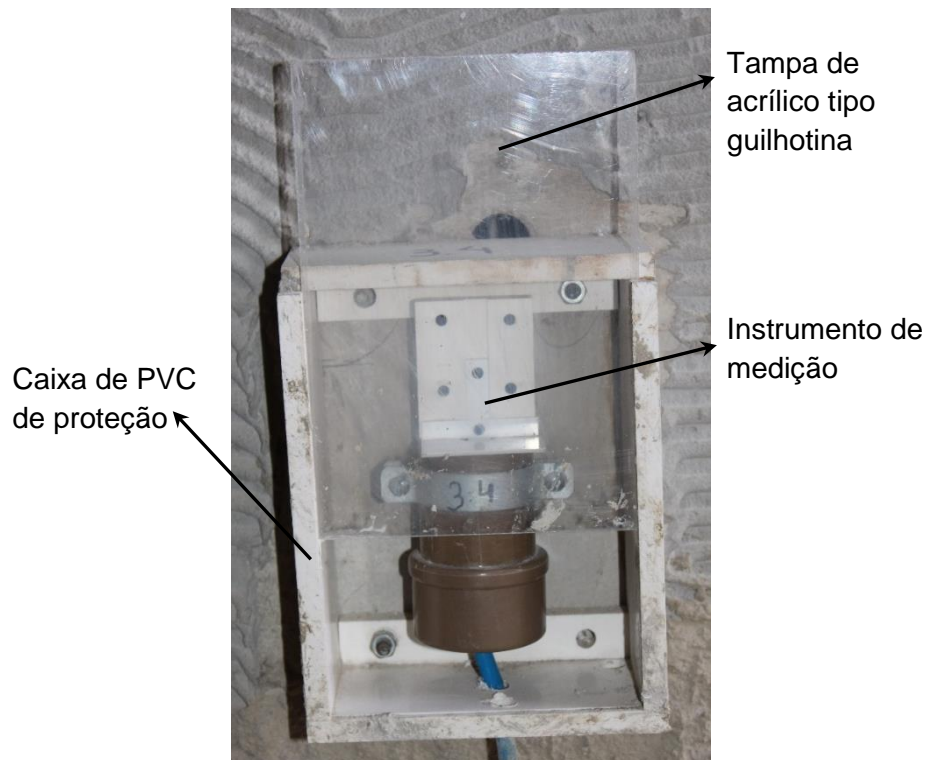


Figura 3. 3 - Caixa branca de PVC e tampa removível para proteger o instrumento de medição.

- As caixas de proteção devem ser instaladas aproximadamente no mesmo nível para se garantir uma leitura inicial dos instrumentos em condição de nível d'água similares entre si;
- Em cada ramificação das linhas de dutos existe um registro para controle da entrada de água em cada instrumento. Esses registros auxiliam no processo de saturação do sistema;
- No marco de referência é instalada uma bombona de 20L de onde são derivadas alimentações para cada uma das linhas de dutos para permitir a saturação inicial ou o reenchimento do sistema. Na Figura 3.4 pode ser visto o reservatório, o duto flexível e o registro que permite a entrada de água no sistema;

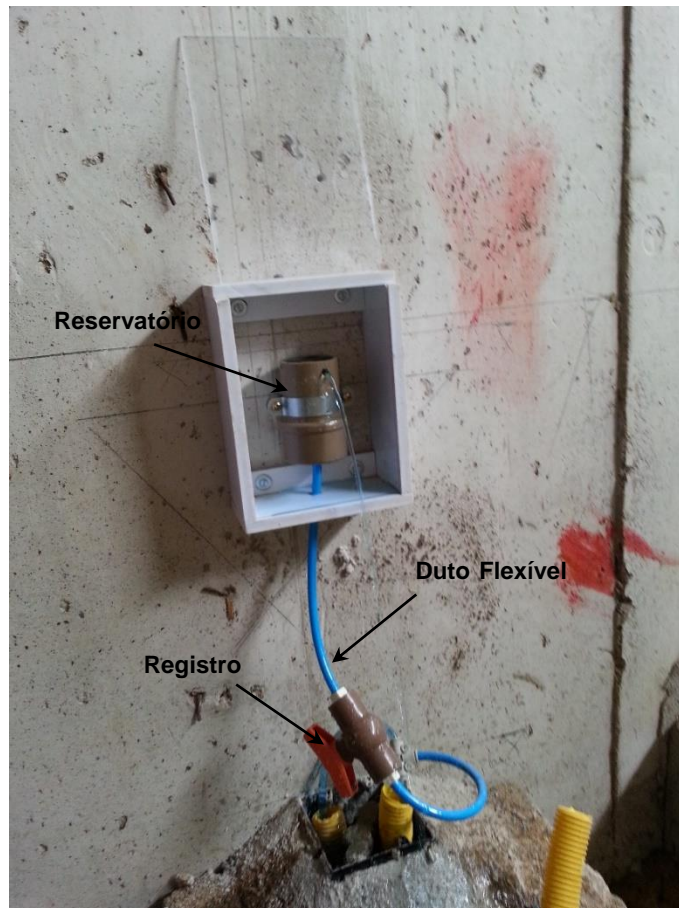
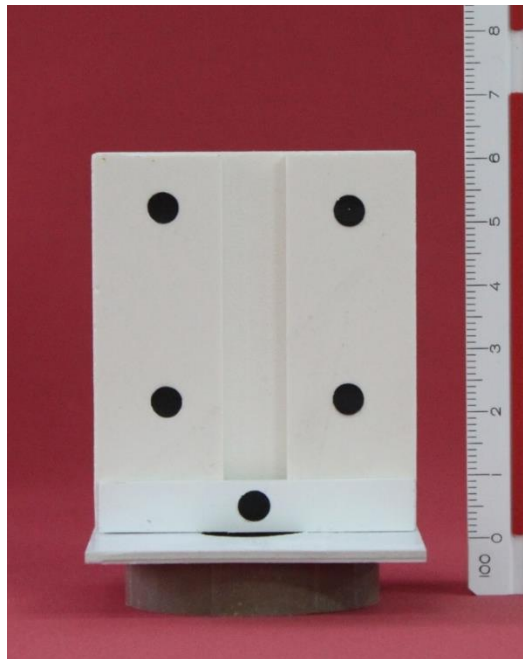


Figura 3. 4 - Reservatório, duto flexível e registro.

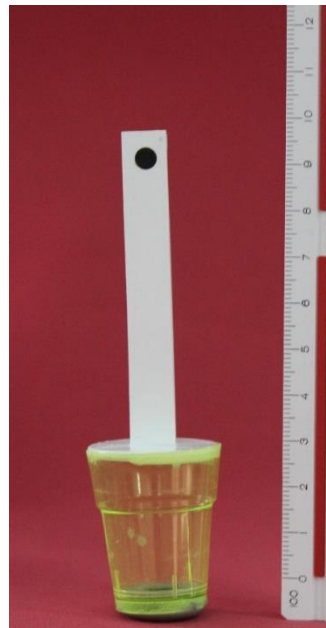
3.2. Instrumento de medição

A determinação do nível d'água é feita através de um instrumento constituído de um reservatório, fixado ao pilar, onde uma boia, com uma haste de referência acoplada e na ponta desta haste uma marcação, flutua livremente. A haste de referência pode se deslocar na vertical ao longo de um guia entalhado em uma placa de referência. A Figura 3.5 apresenta os itens de medição (boia acoplada a uma haste e placa de referência), citados anteriormente, pertencentes ao instrumento de monitoramento de recalque. Na placa de referência existem quatro pontos a partir dos quais pode-se determinar a diferença da posição da placa de referência do pilar em relação à placa de referência do marco. Esta placa possui um formato plano e essa geometria foi confeccionada a fim de reduzir erros de medições durante a determinação das distâncias do instrumento, como é obtido com os instrumentos que utilizam o menisco como forma de obtenção de dados, como por exemplo o

instrumento utilizado por Savaris (2005). A Figura 3.6 apresenta o instrumento de medição desenvolvido nesta dissertação e o seu detalhamento.



a) Placa com marcações

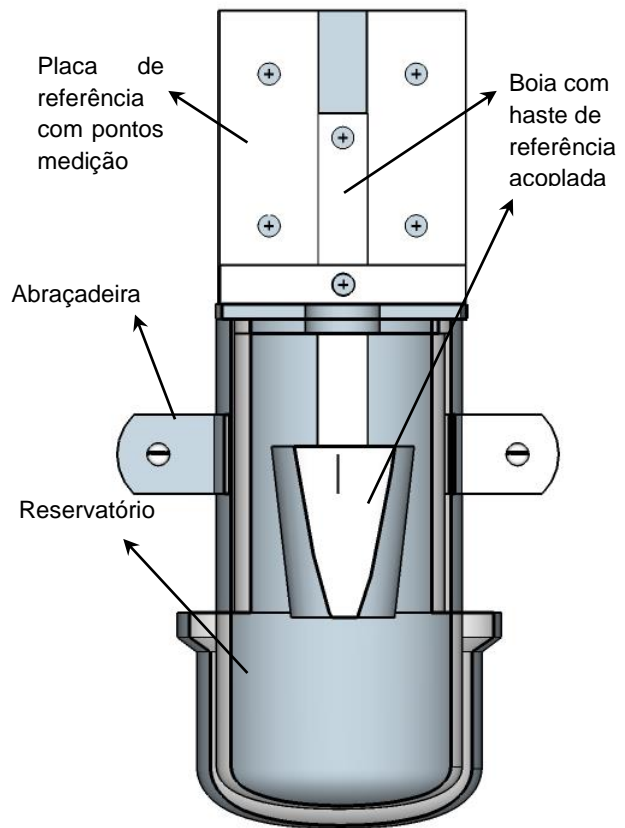


b) Haste com a boia fixada.

Figura 3. 5 - Placa de referência e boia acoplada a uma haste.



a) Projeto de sistema desenvolvido para monitoramento de recalque.



b) Detalhamento do sistema de monitoramento de recalque.

Figura 3. 6 - Sistema de monitoramento de recalque.

Na Figura 3.7 é apresentado um esquema exemplificando o deslocamento de um pilar e como o sistema se comportará. A boia fixada na haste, quando calibrada, é capaz de representar o nível de água dentro do reservatório. Caso ocorra o deslocamento de um pilar, todo o conjunto do instrumento deslocará junto com o pilar. Porém, após alguns instantes o nível d'água dos reservatórios irão se equalizar. A boia e a haste se movimentarão junto com o nível d'água. A partir da diferença dos pontos da placa de referência do pilar e da placa de referência do marco de referência em leituras consecutivas, obtêm-se o recalque sofrido pelo pilar (Figura 3.8).

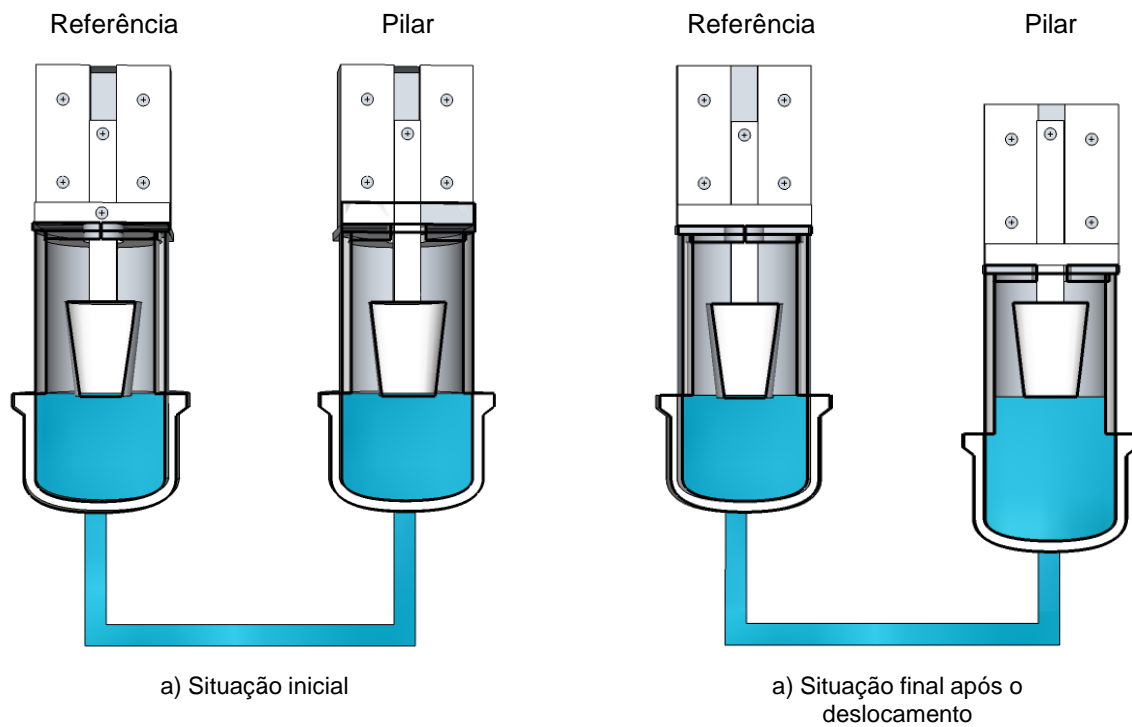


Figura 3. 7 - Esquema do funcionamento do sistema ao ocorrer um deslocamento do pilar.

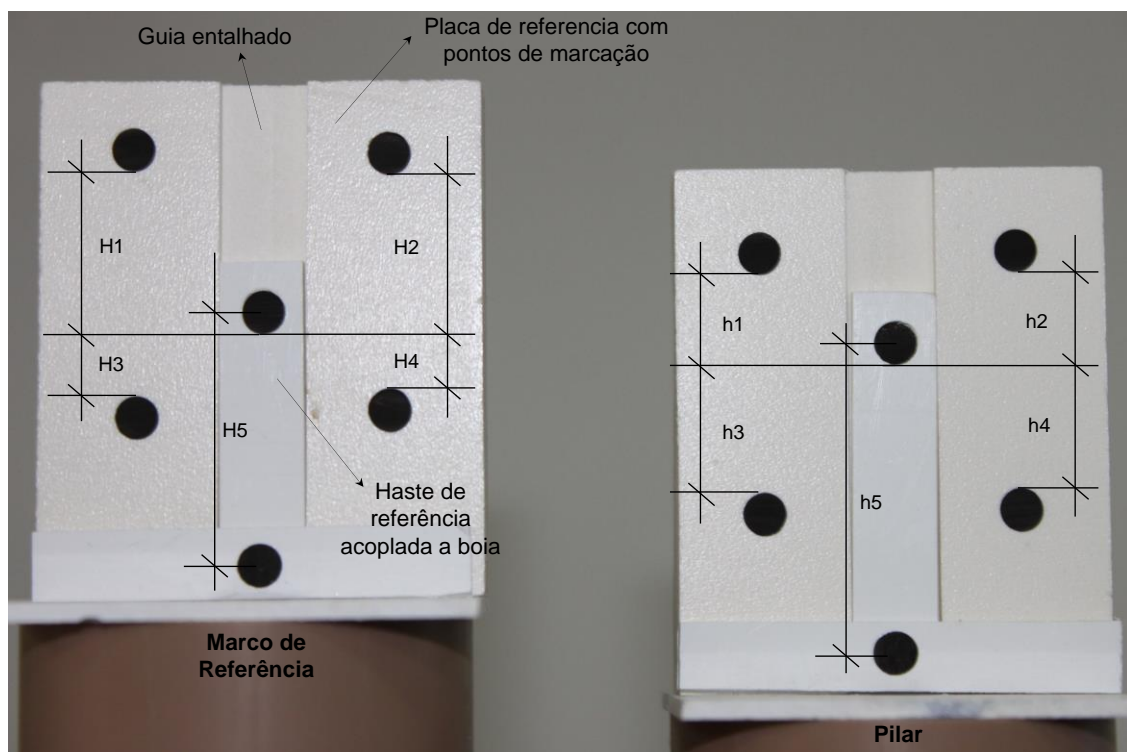


Figura 3. 8 - Distâncias a serem medidas para determinação do recalque.

O deslocamento sofrido pelo pilar é determinado pela diferença de altura H dos quatro pontos de marcação da placa de referência ao ponto de marcação da

haste entre o instrumento instalado no marco de referência e o instrumento instalado no pilar, como representado pela Figura 3.8. As equações 3.1 e 3.2 descrevem a determinação do deslocamento pelo software CorelDraw e pelo software Photomodeler respectivamente. As cotas de cada pilar são determinadas utilizando-se a planilha de cálculo, com os resultados interpretados em cada medição.

Através da interpretação das fotografias digitais, obtidas em cada medição, utilizando os programas computacionais para tratamento das imagens, foram determinadas as diferenças de nível de cada pilar em relação ao marco de referência em leituras consecutivas. Estes níveis foram transformados em recalques e foi considerada a cota inicial dos pilares igual a zero, além disto foi adotado deslocamento no sentido da gravidade com valores positivos.

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^4 H_i - h_i}{4} \quad \text{Equação 3.1}$$

$$\delta = H_5 - h_5 \quad \text{Equação 3.2}$$

O recalque é determinado através da Equação 3.3, onde apresenta a diferença entre o deslocamento sofrido na obra e o erro devido ao processo de fabricação das peças que é corrigido com uma calibração. Esta calibração será demonstrada adiante.

O deslocamento sofrido na obra é determinado pela diferença entre o instrumento de medição instalado no pilar do edifício e instrumento de medição instalado no marco de referência, conforme mencionado anteriormente e ilustrado pela Figura 3.8. A nomenclatura adotada para a definição do recalque será ρ_{ij} , onde i corresponde ao número do pilar que está sendo analisado e j ao número da linha que está sendo analisada. Por exemplo, ρ_{12} é o deslocamento sofrido pelo pilar 1, em relação ao marco de referência, da linha 2.

$$\rho_{12} = \delta_{12} - \Delta_{12} \quad \text{Equação 3.3}$$

onde, ρ_{12} corresponde ao recalque do pilar 1 que está localizado na linha 2. δ_{12} corresponde ao deslocamento sofrido pelo pilar 1 em relação ao marco de referência e Δ_{12} corresponde ao erro devido ao processo de fabricação do instrumento instalado no pilar 1 e no instrumento instalado no marco de referência da linha 2.

3.3. Tratamento de imagens

Como foi comentando anteriormente os softwares utilizados para o tratamento das imagens obtidas durante o monitoramento de recalque são o Photomodeler e o CorelDraw. A seguir são apresentadas as formas de tratamento das imagens pelos dois programas. O programa Photomodeler utiliza três imagens, de uma mesma cena porém em três direções diferentes, para fornecer as coordenadas de pontos em 3D com exatidão. Na cena fotografada existe uma placa com uma malha de pontos conhecidos, essa placa é obtida durante a calibração da câmera. Essa malha de pontos é utilizada como referência para obtenção das distâncias entre os pontos da placa do instrumento de medição. A Figura 3.9 exemplifica como é obtido as distâncias entre pontos da placa do instrumento de medição e apresenta a placa que é utilizada como escala para definição destas medidas.

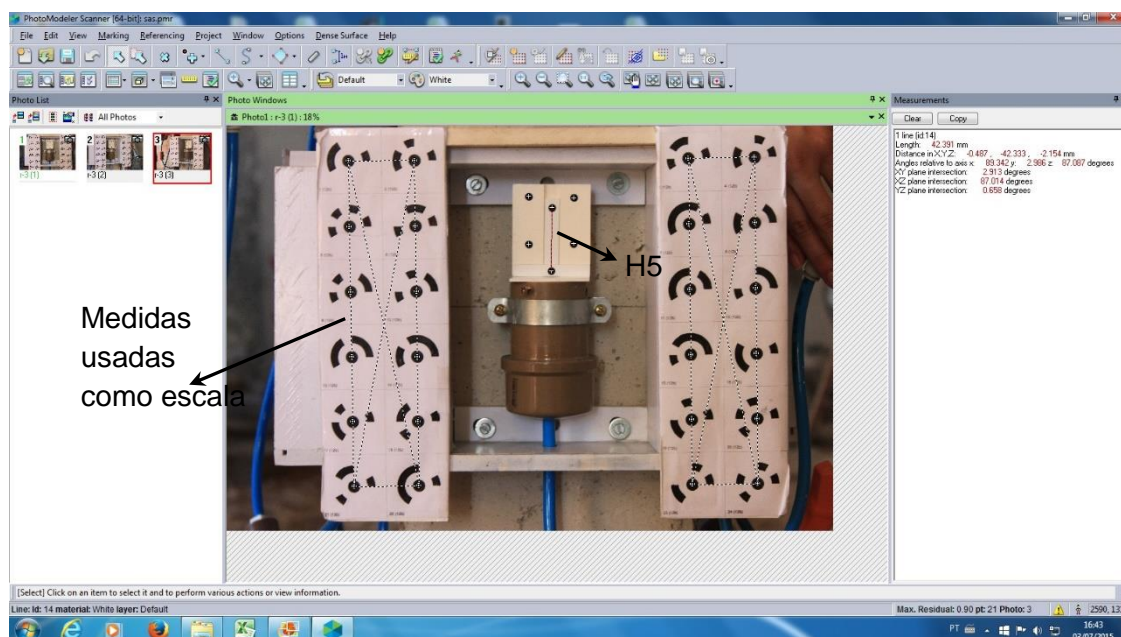


Figura 3. 9 - Determinação das alturas H da placa de referência pelo software Photomodeler.

No CorelDraw as alturas H1, H2, H3 e H4 são determinadas com o auxílio de ferramentas de desenho, através da diferença das alturas indicadas na placa do pilar e na placa do marco de referência é possível determinar o deslocamento sofrido

pelo pilar, conforme demonstrado pelas Equações 3.1 e 3.2. A Figura 3.10 apresenta a forma de determinação das alturas H pelo software Coreldraw.

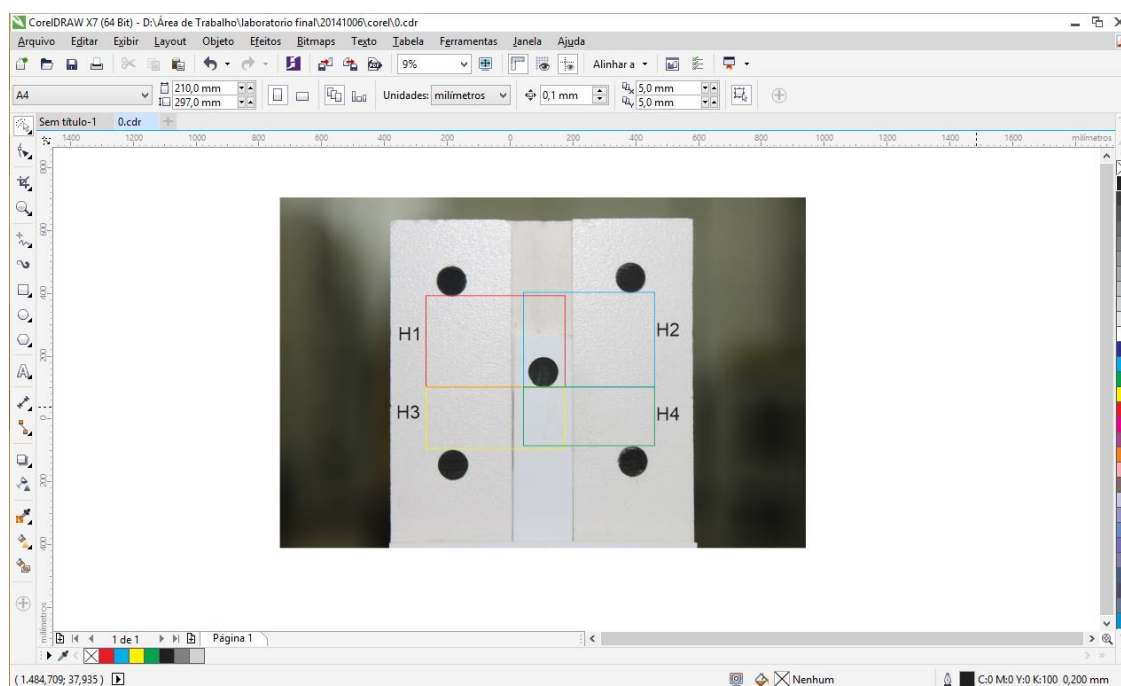


Figura 3. 10 - Determinação das alturas H da placa de referência pelo software CorelDraw

Foi realizado no laboratório um experimento a fim de comparar os resultados obtidos com os dois softwares, comparando a distância real da placa de referência à haste, medida com paquímetro e auxílio do autocad, em relação à distância obtida com o tratamento das imagens pelos dois softwares.

Foram realizadas 10 fotografias sendo que a câmera estava localizada na menor distância possível (necessária para cada software), focada no centro da placa de referência e paralela ao instrumento de medição. Para o Photomodeler esta distância é um pouco maior pois a câmera precisa focar o instrumento de medição e a placa de escala.

Após o tratamento das imagens pelos dois softwares e a determinação das distâncias real pode-se observar que o Photomodeler apresentou um erro igual a 0,12 mm e uma dispersão dos resultados igual a 0,03mm. O erro em porcentagem considerando a ordem de grandeza dos valores medidos é igual a 0,42%. Enquanto que o software CorelDraw apresentou um erro igual 0,03mm e uma dispersão dos resultados igual a 0,01 mm. O percentual considerando a ordem de grandeza dos valores medidos obtido com o CorelDraw foi igual a 0,06%.

O fundo de escala obtido para o software Phtomodeler foi milésimo de milímetros, enquanto que para o software CorelDraw o fundo de escala obtido foi de 0,04 milésimo de milímetro.

A obtenção dos dados do monitoramento de recalque deste projeto é feita através de câmeras fotográficas. Os equipamentos fotográficos utilizados são a câmera Canon EOS Rebel T1i e a câmera Sony Cyber-Shot DSC –W610. A Tabela 3.1 apresenta as características de cada uma das câmeras.

Tabela 3. 1 - Características das câmeras utilizadas para aquisição de dados.

	Câmera Canon	Câmera Sony
Megapixel	18.0	14.0
Autofoco	9 pontos	-
Zoom	-	Zoom Ótico 4x Zoom Digital 8x
Lente	Lente Canon EF-S 18-55mm	Lente Sony
Velocidade Obturador	1/4000-30seg	1/1500

Neste trabalho utilizou-se as duas câmeras para aquisição dos dados com o intuito de verificar a influência das câmeras nos resultados. A câmera Canon é uma câmera profissional, com diversos recursos de imagem e completa funcionalidade, enquanto que a câmera Sony é uma câmera prática, de menor custo e mais acessível para este tipo de monitoramento que visa procedimentos simples e de baixo custo por serem mais atrativos.

Para a utilização do software Photomodeler especificamente, que é um software que permite medições entre dois pontos, linhas e pontos, pontos e superfícies, as câmeras precisaram ser calibradas com o objetivo principal de determinar os parâmetros ópticos e geométricos que serão utilizados para fotografar o sistema. Estes parâmetros são: distância focal, tamanho do formato, ponto principal e distorção da lente. Na calibração é possível determinar os parâmetros internos, os quais permitirão corrigir as fotografias deformadas pela lente curva que possui.

No procedimento de calibração utilizou-se a função “Camera Calibration”, que oferece duas opções de modalidade de calibração, “Single Sheet” e “Multi Sheet”,

ambas são baseadas em uma malha de pontos fornecida pelo próprio software. A diferença entre as duas modalidades de calibração está no tamanho do objeto. A modalidade de calibração para objetos que se pretende medir distâncias muito pequenas, que é o caso deste trabalho, é a “Single Sheet”. Ao final da calibração uma malha de pontos é fornecida. Esta malha possui pontos com distâncias conhecidas pelo operador e pelo programa, que são utilizadas como escala para obtenção dos dados. Na Figura 3.11 apresenta-se a malha fornecida pelo programa e a placa adaptada com a malha que é utilizada nas obras.

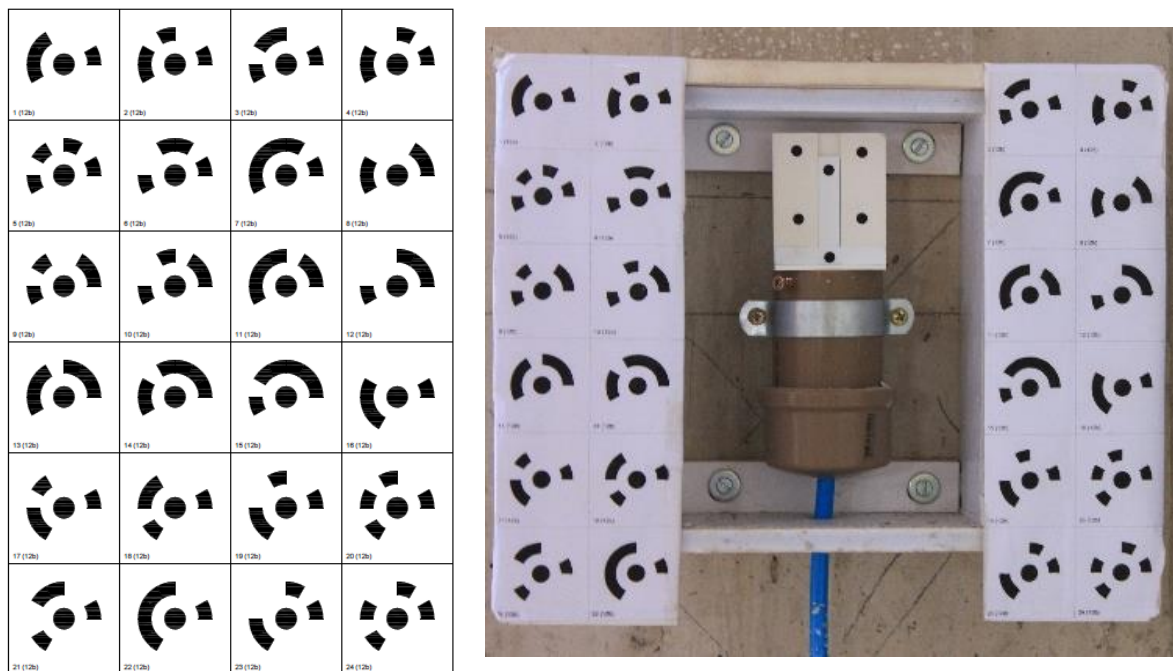


Figura 3. 11 - Malha de calibração fornecida pelo software.

O processo de calibração das câmeras consiste em: com a câmera fixada em um tripé, foram capturadas 12 fotografias da malha. Estas fotografias foram tiradas com a câmera na posição frontal e com variações angulares para a direita e para a esquerda. Não há uma posição fixa e muito menos um rigor na quantidade de fotografias que deve ser tirada na esquerda, na direita e de frente, desde que a quantidade de fotografias sejam 12 conforme dito anteriormente. O processo de calibração é por tentativa e erro, até que se obtenha o melhor conjunto de fotos com o melhor resultado da calibração.

O resultado da calibração é fornecido através de um relatório gerado pelo próprio software, que além das informações desejadas (parâmetros ópticos e

geométricos), apresenta a porcentagem de área, que deve atingir valor superior a 80%, e apresenta também a porcentagem de erro sendo recomendado inferior a um.

Na calibração da Canon EOS Rebel T1i obteve-se uma porcentagem de 82% referente a uma média de cobertura fotográfica das 12 fotos. A porcentagem de erro foi de 0,809. Os valores obtidos na calibração estão dentro da faixa determinada satisfatória pelo programa.

A porcentagem de média de cobertura da câmera Sony foi de 76%, e do erro foi de 1,1. Os valores obtidos durante a calibração da câmera Sony estão próximos aos valores da faixa determinada satisfatória pelo programa.

Além do software Photomodeler utilizou-se o software Corel Draw, que é um software de design gráfico vetorial que a partir de tratamento das imagens e ferramentas de desenho simples apresenta resultados com mais rapidez, porém para este software não é necessário a calibração das câmeras. O efeito escala da fotografia deve ser corrigido e isto é feito através de fatores de correção determinados pela relação entre um objeto de dimensão conhecida (geralmente utiliza-se uma régua graduada ou um escalímetro) e a dimensão do mesmo objeto na fotografia.

3.4. Calibração e funcionalidade do instrumento

Para verificação da funcionalidade do instrumento de medição foi necessário verificar a sua acurácia, precisão e funcionalidade. Para isso montou-se no laboratório um experimento simulando o que aconteceria nas obras, porém com condições controladas. Este experimento foi representado por dois reservatórios, conectados por duto flexível como instalado na obra, porém neste caso o deslocamento real foi induzido manualmente e controlado com o auxílio de relógios comparadores e de tripés (Figura 3.12). Um reservatório foi mantido fixo, representando a referência enquanto que o outro era deslocado alterando o nível d'água dentro dos reservatórios.

Este experimento no laboratório tem como finalidade demonstrar o tempo de resposta do instrumento de medição aos deslocamentos. Uma outra finalidade deste estudo é poder definir o erro associado ao processo de medição através da definição da precisão e acurácia dos dados obtidos. O emprego de equipamento de instrumentação de campo, como ferramenta de avaliação de desempenho, implica

na realização de uma medida e cada medida envolve um erro ou incerteza. Os termos associados a essa incerteza são: a conformação, acuraria e precisão.

Em relação ao tempo de resposta do sistema ao deslocamento provocado durante os ensaios realizados no laboratório pode-se perceber que a boia apresentava um tempo de equalização diferente do tempo de equalização da água do instrumento. Sendo assim foi preciso definir o tempo de equalização de cada um separadamente.



Figura 3. 12 - Sistema instalado no laboratório simulando situação na obra.

3.4.1. Determinação do tempo de equalização da água

Para este experimento utilizou-se apenas o reservatório do instrumento de medição, uma vez que quer se observar apenas o comportamento da água. Com o auxílio de um manômetro digital (Extech HD755), que registra a pressão dentro do reservatório do instrumento, foi possível determinar o tempo de equalização da água após o deslocamento. O reservatório estava conectado a um outro por meio de um duto flexível. A Figura 3.13 apresenta o manômetro digital conectado no reservatório e a aquisição de dados feita diretamente por computador. Vale destacar que para

este ensaio foi utilizado uma mangueira de 6 metros de comprimento entre os reservatórios, representando a média das distâncias entre os pilares.

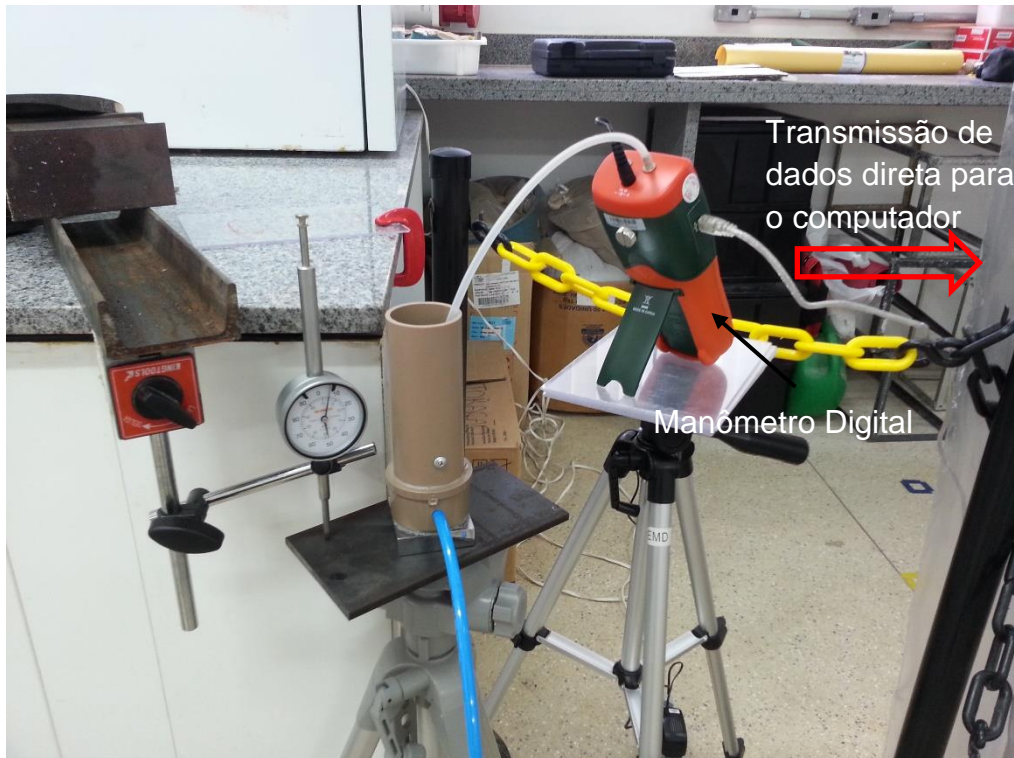


Figura 3. 13 - Manômetro digital para medir a pressão dentro do reservatório.

A Figura 3.14 apresenta a variação da pressão com o tempo. Com o auxílio do manômetro digital foi possível perceber que após aproximadamente 1 minuto do deslocamento a pressão no reservatório tende a estabilização. Pode-se observar também que no momento do deslocamento há uma variação brusca de pressão o que indica a sensibilidade do instrumento.

O tempo de resposta pode variar de acordo com o comprimento do duto flexível. Sendo assim verificou-se o tempo de resposta para diferentes comprimentos de duto flexível. Todos apresentaram o mesmo comportamento e os respectivos tempos estão apresentados na Tabela 3.2.

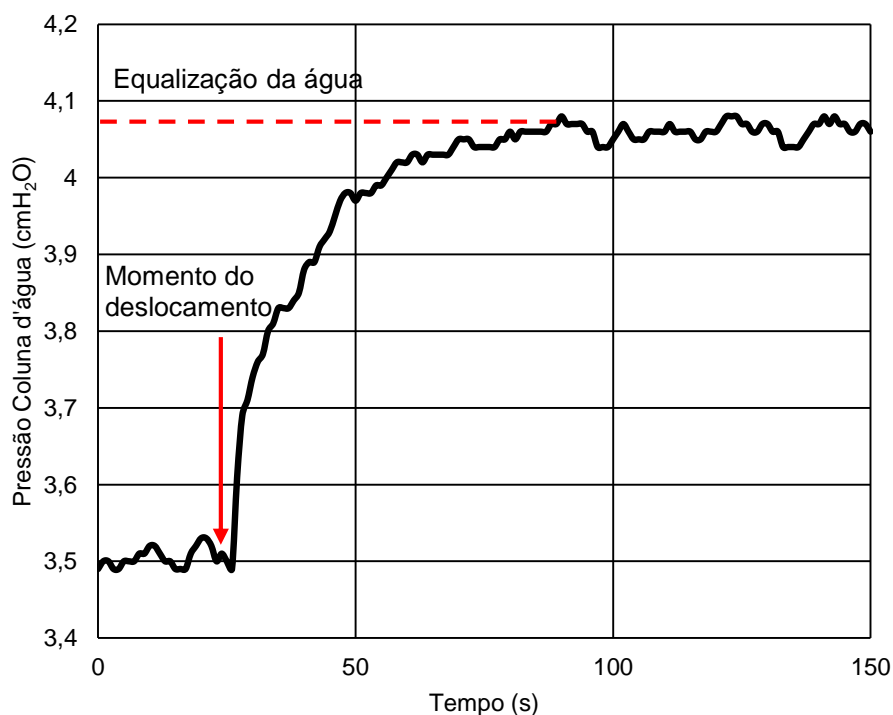


Figura 3. 14 - Variação da pressão com o tempo dentro do reservatório após o deslocamento.

Tabela 3. 2 - Tempo de equalização da água dentro do reservatório para diferentes comprimentos de duto flexível.

Comprimento duto (m)	Tempo de resposta (min)
1	0,15
2	0,2
3	0,3
4	0,5
5	0,8
6	1

3.4.2. Determinação do tempo de equalização da boia

O tempo de equalização da boia por sua vez é percebido através do tratamento das fotos realizadas durante o ensaio, segundo observação do deslocamento da marcação da haste em relação às marcações nas placas, da referência e do instrumento deslocado. Quando o deslocamento medido apresenta valores próximos ao deslocamento real induzido determina-se o tempo de equalização. As leituras são feitas em intervalos de 15 minutos.

A Figura 3.15 apresenta a variação da diferença entre o deslocamento real e o medido com o tempo. Para o tratamento das fotos deste ensaio utilizou-se um programa de design gráfico tendo em vista a maior facilidade para a obtenção dos dados.

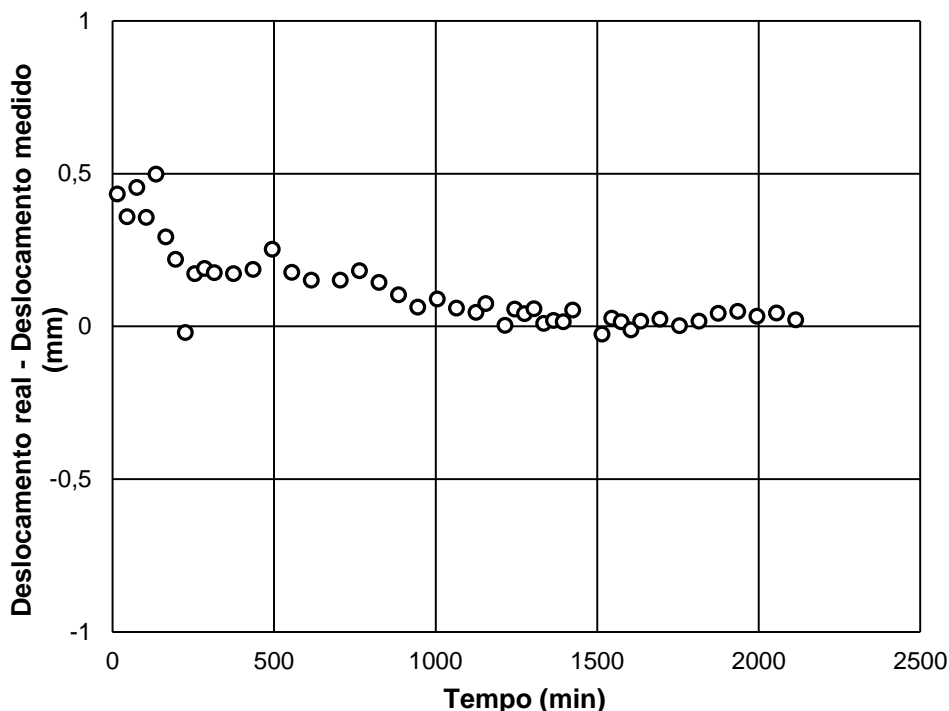


Figura 3. 15 - Variação da diferença entre o deslocamento real e o medido com tempo.

É possível perceber a estabilização dos resultados ocorre aproximadamente em 1500min (25h). Os valores do deslocamento da haste obtidos durante este ensaio apresentam o erro experimental inerente ao instrumento.

3.4.3. Aferição do instrumento – Acurácia e precisão

Além de determinar a funcionalidade do instrumento, um dos principais objetivos de realizar o estudo no laboratório é medir a acurácia e precisão do instrumento, uma vez que no laboratório é possível ter controle das condições de contorno e conhecimento dos fatores que influenciam o resultado. A acurácia pode ser definida como a proximidade da medida obtida ao verdadeiro valor da variável. E precisão pode ser definida como a proximidade entre os valores obtidos pela repetição do processo de mensuração (Figura 3.16).

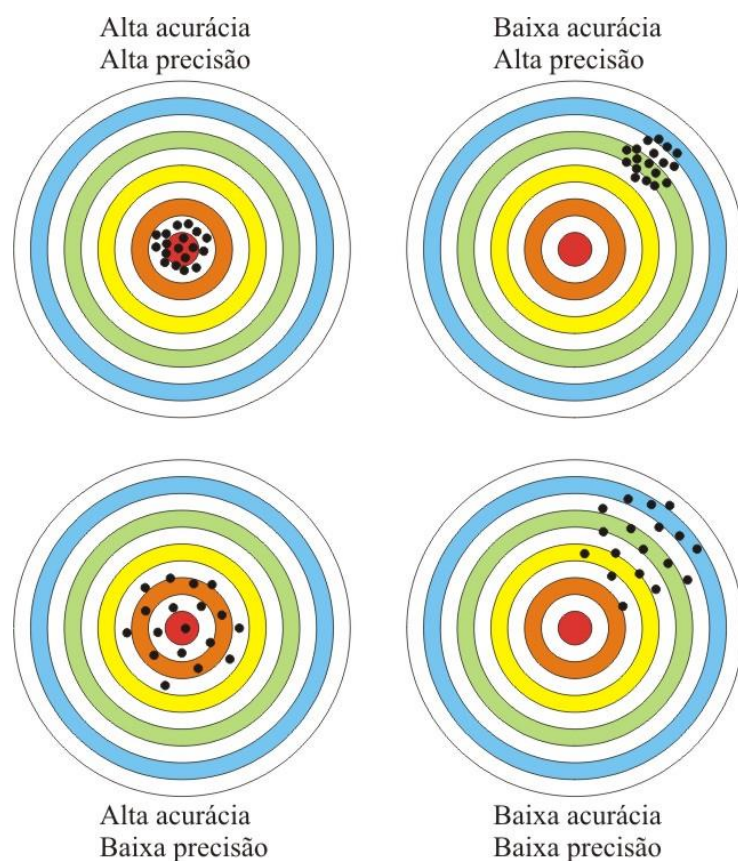


Figura 3. 16 - Esquema da definição da acurácia e precisão.

Para isso foi variada a distância, a altura e os ângulos horizontal e vertical da câmera durante o processo de aquisição das imagens digitais. A Tabela 3.3 apresenta as variáveis e as repetições que foram realizadas para as aquisições de dados. Estas repetições foram definidas de acordo com a possibilidade de movimentação da máquina fotográfica.

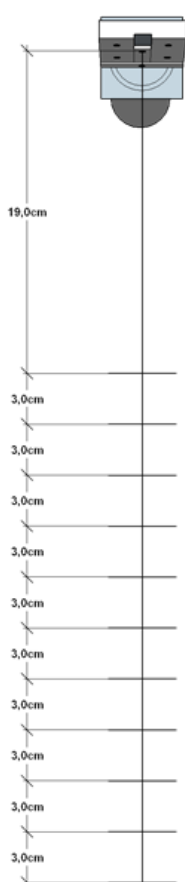
Para a determinação da acurácia e precisão foram realizadas fotografias e posteriormente estas imagens foram tratadas no software de forma a obter as distâncias dos pontos da placa de referência até o ponto de referência da haste. Em seguida estes valores são comparados com o valor real, obtido através de medidas diretas com o paquímetro e tratadas no programa Autocad.

As variações de posição cobrem a gama de valores que se espera ter durante os procedimentos de medição com o instrumento.

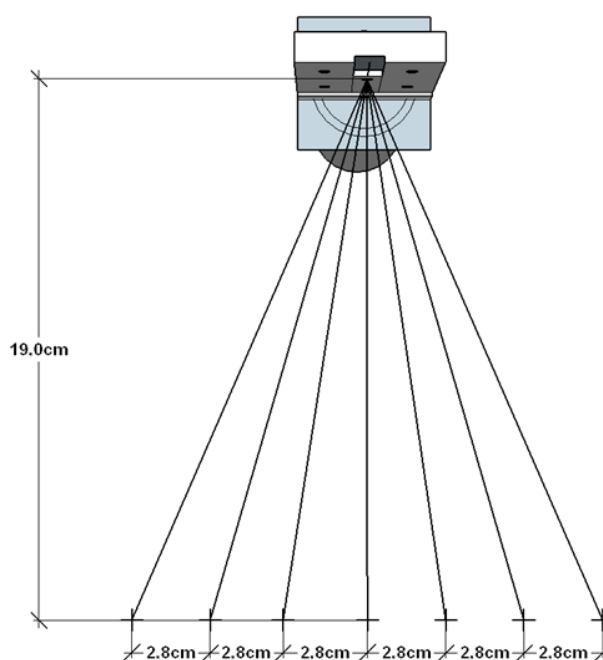
Tabela 3. 3 - Variáveis durante o processo de determinação do erro do sistema.

Variável que se deseja determinar	Variações	Repetições
Distância entre a lente da câmera e o instrumento de medição	Distância Focal	10
Rotação da câmera na horizontal em relação ao instrumento de medição	Ângulo β	6
Altura do posicionamento da câmera em relação do instrumento de medição	Ângulo α	5
Operador no tratamento da imagem	Operador	3

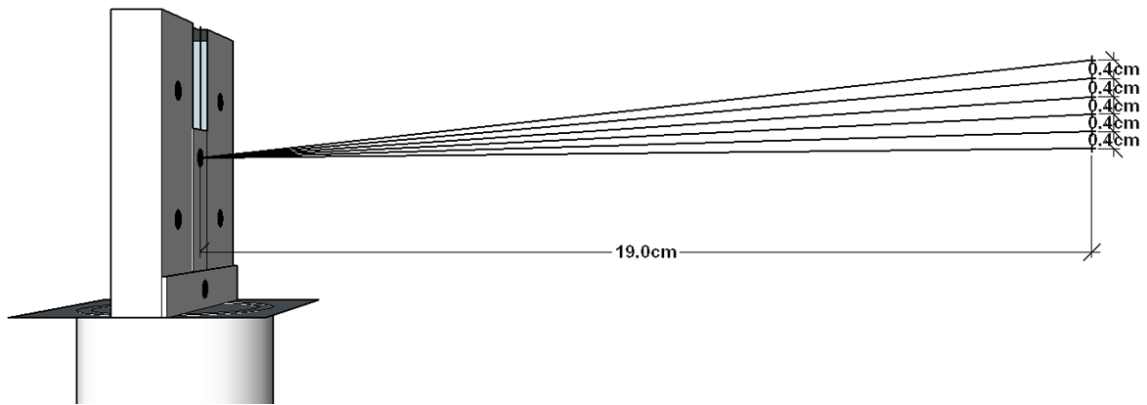
A Figura 3.17 apresenta um esquema gráfico destas variações e a Figura 3.18 apresenta as variações obtidas com os erros para cada situação.



a) Distância entre a lente da câmera e o instrumento de medição.

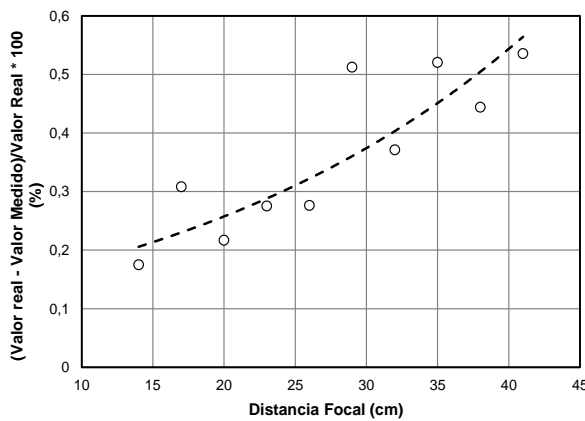


b) Rotação da máquina na horizontal em relação ao sistema.

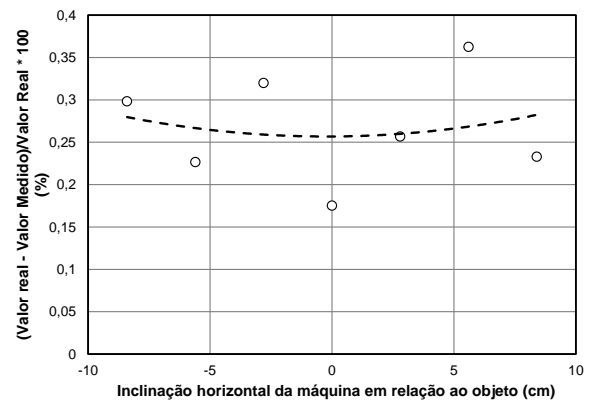


c) Altura do posicionamento da câmera.

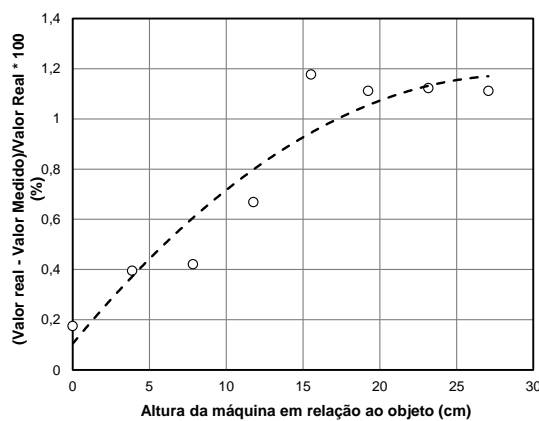
Figura 3. 17 - Esquema das variáveis durante o processo de determinação do erro do instrumento de medição.



a) Variação da distância entre a lente da câmera e o instrumento de medição.



b) Variação da rotação horizontal da câmera em relação ao instrumento de medição.



c) Variação da altura da câmera em relação ao instrumento de medição.

Figura 3. 18 - Determinação do erro associado ao processo de medição para diferentes variáveis.

A Figura 3.17a apresenta a variação do erro com a distância entre a lente da câmera e o instrumento de medição. A primeira distância corresponde a distância

ideal, onde a lente da câmera está posicionada paralelamente ao instrumento e com a menor distância focal possível de forma que capture todos os pontos da placa de referência. Através da Figura 3.18a é possível perceber que o erro médio aumenta à medida que se aumenta a distância da câmera em relação ao instrumento de medição. Para distância maiores que 20 cm os valores obtidos apresentam uma maior dispersão.

Para a avaliação do efeito da rotação horizontal manteve-se a distância ideal constante e variou-se o ângulo entre o eixo da câmera e a normal à placa de referência (Figura 3.17b), destacando que o foco da câmera foi sempre posicionado no centro do instrumento. A Figura 3.18b apresenta a variação do erro com a inclinação horizontal da câmera em relação à placa de referência. Pode-se perceber que o erro médio aumenta à medida que se rotaciona a câmera em relação ao instrumento nos dois sentidos. Como era de se esperar, o menor erro é obtido com a distância ideal e ângulo zero, ou seja, menor distância que se pode focar o objeto e com a câmera na direção ortogonal à placa de referência.

Para avaliação do efeito da altura fez-se o deslocamento vertical da câmera em relação ao centro do objeto (Figura 3.17c). Destaca-se que o foco da câmera foi sempre mantido no centro da placa de referência. A Figura 3.18c apresenta a variação do erro com a altura da câmera. Pode-se também perceber neste caso que o erro médio aumenta à medida que se aumenta a altura da câmera em relação ao instrumento de medição. Observa-se também que o menor erro é obtido com a câmera posicionada na distância ideal.

O processo de análise fotogramétrica através de softwares de tratamento de imagens está sujeito à sensibilidade do operador tendo em vista que as distâncias determinadas no programa dependem da capacidade de se observar o ponto certo de medida. Como cada pessoa possui diferentes níveis de sensibilidade, espera-se que haja uma importante influência na variação dos resultados. Para avaliação desse efeito, foi utilizada a imagem da placa de referência registrada com a câmera na posição ideal (distância focal de 14 cm, lente da câmera paralela e centralizada com o objeto) e diferentes operadores fazendo obtenção dos dados segundo o mesmo procedimento. O desvio padrão do erro obtido para cada operador foi aproximadamente 0,002 mm, apresentando uma influência significativamente pequena no tratamento das imagens.

3.4.4. Calibração dos instrumentos de medição - Haste

Por ser um equipamento montado no laboratório e não fabricado, as peças utilizadas na sua montagem possuem diferenças que influenciam na determinação do recalque real. Alguns dos defeitos de fabricação são devido a imperfeições nos cortes das peças e alinhamentos. Para correção das leituras devido a essas imperfeições fez-se a calibração em laboratório das medidas relativas entre a referência e cada instrumento da respectiva linha.

O procedimento de calibração é feito através da montagem no laboratório de cada linha que será instalada na obra. Os instrumentos são posicionados em uma superfície plana e nivelada. Faz-se então a determinação da diferença de nível entre os pontos das hastes de cada instrumento através de imagem digital. Na montagem de laboratório deve-se utilizar os mesmos instrumentos que serão instalados na obra pois o erro de fabricação é relativo e específico ao instrumento de referência e ao instrumento que é instalado no pilar (Figura 3.19).



Figura 3. 19 - Calibração do sistema no laboratório para determinação do erro de montagem.

Nesse procedimento, a diferença entre as placas e as hastes é apenas devido ao erro de fabricação e montagem. Esta diferença é considerada nos valores obtidos

da aquisição de dados no campo. A Figura 3.20 e a Equação 3.4 exemplificam como é determinado o erro de fabricação a ser considerado no cálculo do recalque de cada pilar.

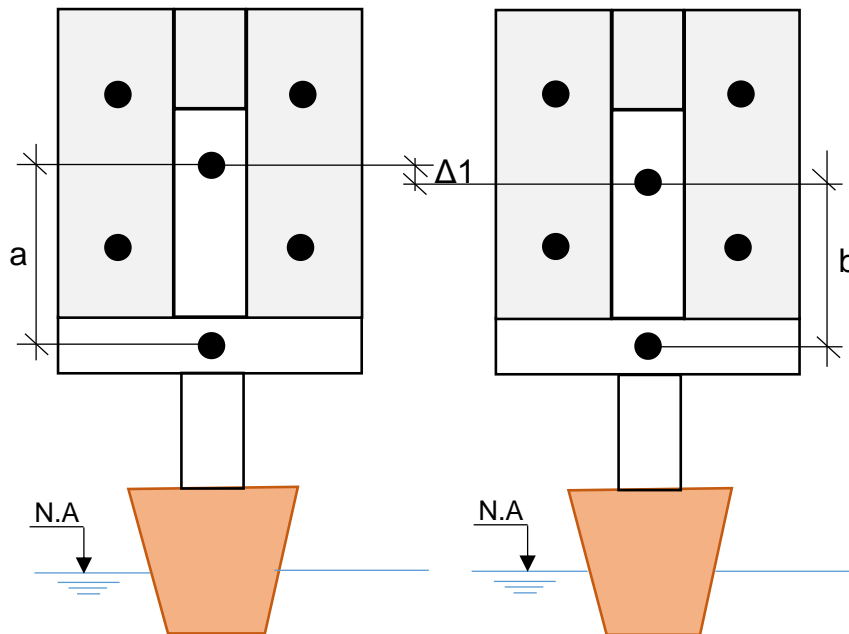


Figura 3. 20 - Ilustração da determinação do erro de fabricação do sistema.

$$\Delta_1 = a - b$$

Equação 3.4

Onde Δ_1 corresponde ao erro da montagem do sistema.

3.5. Coleta de dados no campo

Os procedimento de coleta de dados no campo foi realizado com frequência semanal. A coleta de informações é feita por equipe técnica na obra onde são registrada as imagens de cada instrumento. Posteriormente os dados são analisados em escritório através dos programas de tratamento de imagens. Caso haja dúvidas dos resultados da tomada de dados uma nova medição é feita imediatamente.

Alguns cuidados são necessários para a tomada de dados na obra:

- Verificação do nível das hastes. Caso o nível esteja baixo, faz se o renivelamento, introduzindo água no reservatório (bombona). Caso esteja seco, deve-se identificar possíveis vazamentos, corrigir e saturar novamente a linha.

Após a saturação ou renivelamento deve-se esperar a equalização antes de uma nova leitura. Eventualmente, se forem necessárias intervenções mais importantes, como a retirada de instrumentos ou a troca de dutos, é preciso fazer uma nova leitura de referência;

- Durante uma tomada de dados é importante identificar linhas que eventualmente estejam com problemas, tais como obstrução dos instrumentos, presença de detritos (argamassa, entulho, pedaços de madeira ou ferro e outros), indícios de impacto, danos aparentes, componentes do instrumento desconectados e outros. Nesses casos, as linhas danificadas não são consideradas no banco de dados até que seja feito o reparo;
- As medições são realizadas por equipe constituída por alunos de iniciação científica treinados que percorreram as obras sistematicamente, inclusive entre os dias de tomada de dados, para assegurar a integridade dos instrumentos;
- Grandes interferências que eventualmente impossibilitam a tomada de dados provocam normalmente grandes modificações do sistema na obra. Exemplo é a falta de zelo por parte dos operários que afeta significativamente a integridade dos instrumentos;

CAPÍTULO 4. CASOS DE ESTUDO

Neste Capítulo são apresentados detalhes a respeito dos projetos do sistema de medição para cada obra, onde serão descritos a malha de dutos, o marco de referência e os instrumentos de medição específicos para cada caso de estudo juntamente com as principais particularidades de cada caso. Por fim é apresentada a forma de calibração dos instrumentos, para determinação do erro de fabricação e a calibração das câmeras, para utilizar os programas de tratamento das imagens. É apresentado também o procedimento de realização da coleta dos dados e os programas utilizados para tratamento das imagens.

4.1. Projeto do mapa de instrumentação

O mapa de instrumentação é constituído pela indicação dos pilares que serão monitorados, podendo muitas vezes não ser todos os pilares da obra. A quantidade de pilares monitorados depende da área e da importância da obra. O ideal é sempre monitorar o maior número possível pois, durante os serviços de acompanhamento de recalque, os instrumentos instalados no pilar costumam ser danificados ou ficar impedidos de acesso. Existem sistemas que exigem uma subdivisão dos pilares em linhas. Estas linhas são definidas com base na planta de locação dos pilares, de forma a distinguir os pilares centrais dos periféricos.

O mapa de instrumentação varia de acordo com o princípio de funcionamento do sistema. Para os instrumentos que utilizam o nível ótico não é necessária uma ligação entre os pilares, pode-se analisar cada pilar individualmente. Enquanto que para alguns instrumentos baseados no princípio de vasos comunicantes geralmente é necessária uma subdivisão dos pilares em linhas ou ramais para permitir um melhor controle do sistema. Existem instrumentos baseados no princípio de vasos comunicantes, como o de Terzaghi por exemplo, que não necessita de ligação fixa entre os pilares, a aquisição de dados é feita com uma mangueira móvel.

A disposição do instrumento de medição utilizado, em planta, deve constar de um desenho, onde se numeram os pilares, subdividindo em linhas. A Figura 4.1 apresenta um mapa de instrumentação (Mota, 2009), onde o instrumento utilizado neste caso foi o nível ótico, os pilares foram monitorados individualmente não havendo a necessidade de subdividir em linhas. Na figura 4.2 todos os pilares

também foram monitorados e todos os pilares estão ligados a três linhas principais (Savaris, 2008).

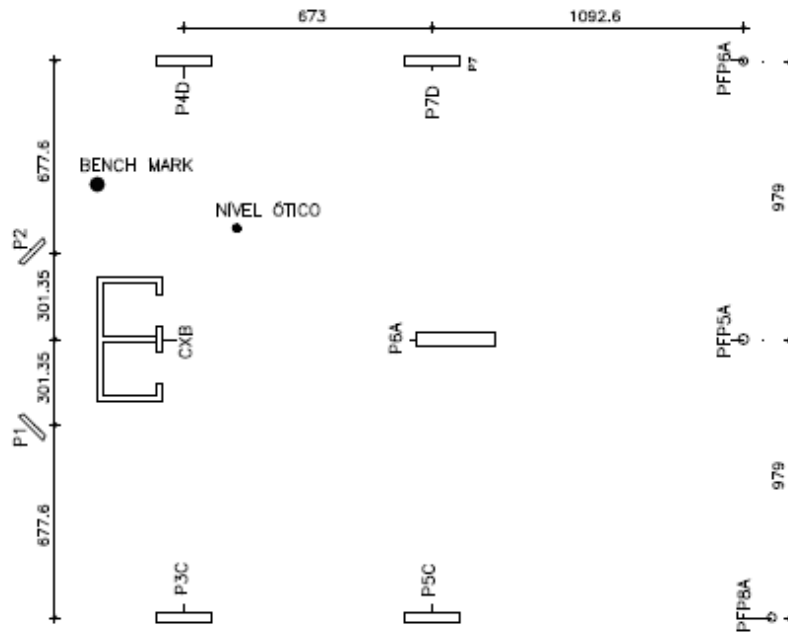


Figura 4. 1 - Locação dos pilares monitorados individualmente (Mota, 2009).

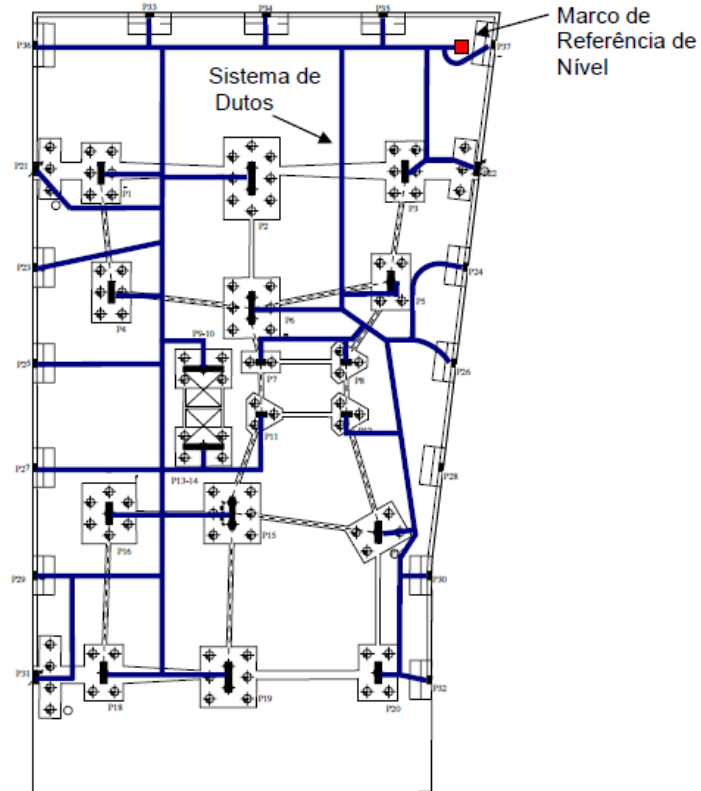


Figura 4. 2 - Locação dos pilares monitorados e subdivididos em linhas (Savaris, 2008).

4.2. Projeto do Marco de referência

O projeto do marco de referência deve conter especificações necessárias para a sua execução, como por exemplo, profundidade, resistência dos materiais, ferragem, detalhes, etc.

Normalmente é utilizada uma referência de nível indeslocável, do tipo “*benchmark*”. Geralmente este tipo de nível de referência é engastado em camadas profundas, através da injeção de nata de cimento, onde se possa admitir o insdelocavel. Esta referência é constituída de um tubo com uma polegada de diâmetro, instalado em um furo de sondagem à percussão, e protegida por outro tubo externo, com duas polegadas de diâmetro. Para evitar a influência do tubo externo sobre o interno injeta-se graxa grafitada e anticorrosiva entre eles. O benchmark geralmente é instalado em local pouco movimentado, e sua extremidade superior é protegida por uma caixa com tampa removível. A Figura 4.3 apresenta um esquema deste tipo de referência.

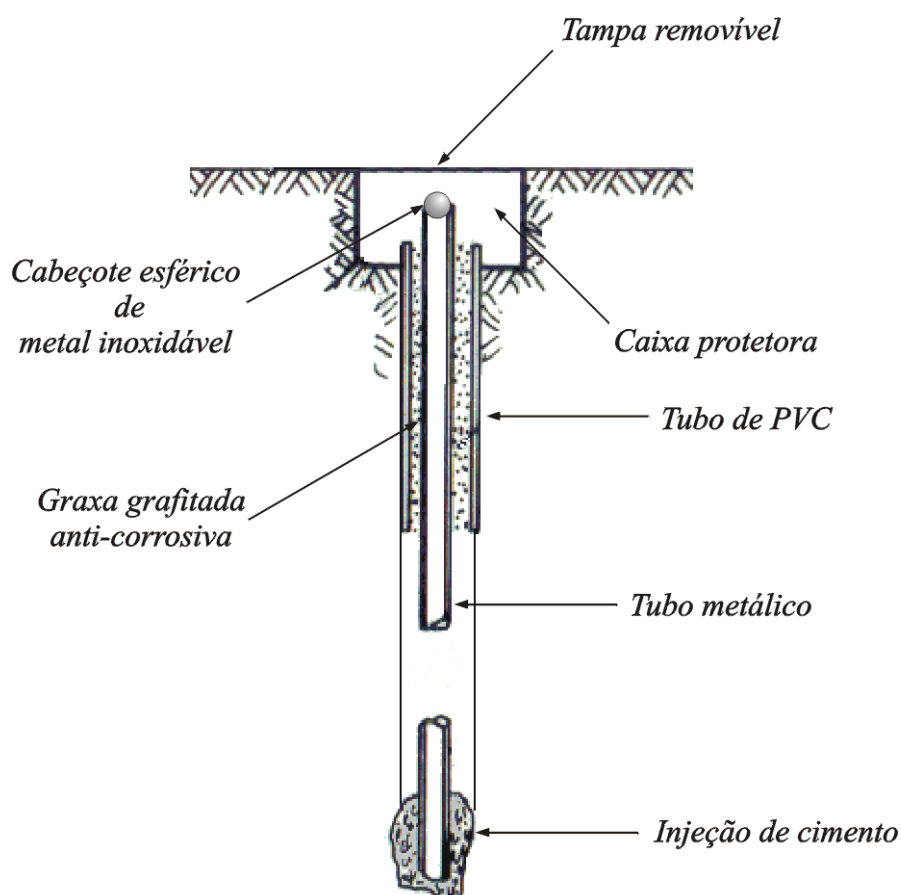


Figura 4. 3 - Referência de nível profunda (Alonso, 2011).

Tendo em vista as características do sistema desenvolvido, o marco de referência tradicional não é adequado pois não é possível fazer a fixação dos instrumentos de referência de cada linha no próprio marco sem interferir na aquisição de dados. Neste sentido, o marco de referência para o sistema descrito anteriormente, deve possuir uma fundação exclusiva e isolada da estrutura do edifício.

As deformações sofridas pelo maciço no entorno das fundações, devido ao carregamento da estrutura, são significativamente pequenas, podendo ser desprezíveis. Sendo assim, como a fundação do marco de referência está localizado em um ponto estratégico na obra e a uma distância considerável das fundações da estrutura, não é capaz de sofrer influência das deformações das fundações, ou no mínimo podem desprezíveis.

Sobre esta fundação é necessária a execução de um pilar provisório onde serão fixados os instrumentos de referência de cada linha. Cada caso de obra adotou uma estrutura que se julgou mais conveniente e será descrita a seguir.

4.3. Descrição dos edifícios

Este sistema de instrumentação foi instalado em três diferentes obras como forma de verificação da sua precisão e funcionamento. Os dados utilizados no presente trabalho serão provenientes destes estudos de caso. As três edificações estão localizadas na cidade de Campos dos Goytacazes, RJ. As fundações que sustentam os pilares do corpo do edifício são estacas hélice contínua, cada obra com estacas assentes em profundidade e com diâmetro diferente.

As obras monitoradas são edificações residenciais, em concreto armado convencional. Nos fechamentos e divisórias internas foram utilizados alvenaria formada de tijolos cerâmicos e para o fechamento da escada e do poço de elevador foram utilizados blocos de concreto.

É importante mencionar que a fim de preservar a identidade dos construtores, das empresas e dos proprietários não serão identificados os edifícios que apoiaram essa pesquisa, permitindo a instalação e monitoramento do desempenho da obra.

4.3.1. Edifício 1

Este edifício é composto por 15 pavimentos. No térreo encontra-se a entrada social mais garagem, sendo esta estendida também aos dois pavimentos seguintes. Logo acima encontra-se o pavimento de uso comum (PUC) e na sequência 11 pavimentos tipo. Na última laje encontra-se a caixa d'água e a casa de máquina. A Figura 4.4 apresenta a vista externa da obra em processo de construção adiantado. Na Figura 4.5 são apresentadas os registros fotográficos do estágio da construção apenas para algumas datas a fim de apresentar a evolução do carregamento.



Figura 4. 4 - Vista Externa do Edifício 1.



a) 306º dia de construção – 1ª medição



b) 339º dia de construção – 3ª medição



c) 361º dia de construção – 7ª medição



d) 389º dia de construção - 9ª medição



e) 411º dia de construção – 11ª medição



f) 424º dia de construção - 12ª medição



g) 445º dia de construção – 13ª medição



h) 482º dia de construção – 15ª medição



i) 529º dia de construção – 18ª medição



j) 545º dia de construção - 19ª medição



k) 578º dia de construção - 22ª medição



l) 633º dia de construção - 26ª medição

Figura 4. 5 - Evolução da construção durante o monitoramento de recalque.

O edifício possui 45 pilares partindo das fundações. As fundações são em estacas hélices contínuas com diâmetro igual a 400mm, comprimento igual a 30 metros e armada nos 4 primeiros metros.

O maciço de fundação do edifício foi caracterizado através de furos de sondagem à percussão (SPT). A partir do laudo do SPT e do perfil estratigráfico (Figura 4.6) pode-se notar que as estacas estão assentes em camada de areia média a fina pouco siltosa e a partir desta profundidade o laudo apresenta elevados valores de SPT.

É importante destacar que o sistema de monitoramento de recalque foi instalado neste edifício pois ele está situado em uma região que possui um maciço complexo e portanto por recomendações da norma decidiu-se realizar o monitoramento da estrutura como um critério de verificação geotécnico.

Como parte da metodologia de monitoramento de recalque o projeto do mapa de instrumentação e do marco de referência foram elaborados e são apresentados nas Figuras 4.7 e 4.8. O projeto do mapa de instrumentação foi realizado segundo a planta de pilares e são apresentados os pilares monitorados neste trabalho. O projeto do marco de referência desta obra foi realizado aproveitando uma estaca profunda, que foi executada para reação de uma prova de carga estática. O marco de referência é constituído por um bloco (30x30x30cm) e um pilar de lados iguais a 20x20 com 150cm de altura acima do piso acabado.

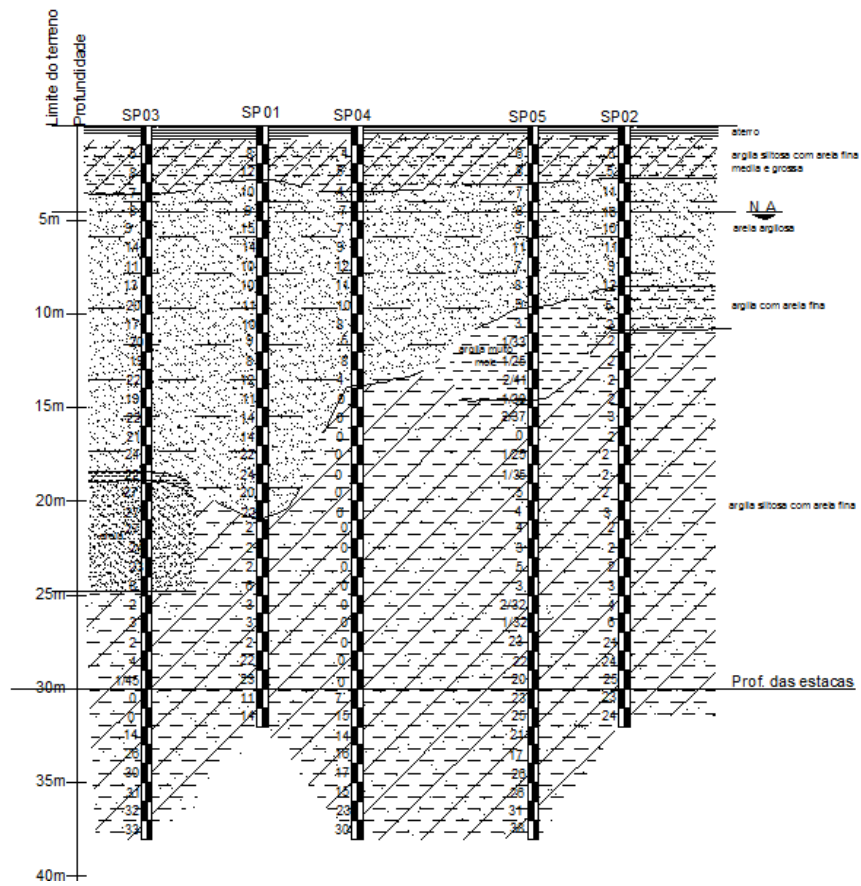


Figura 4. 6 - Perfil estratigráfico do terreno do Edifício 1.

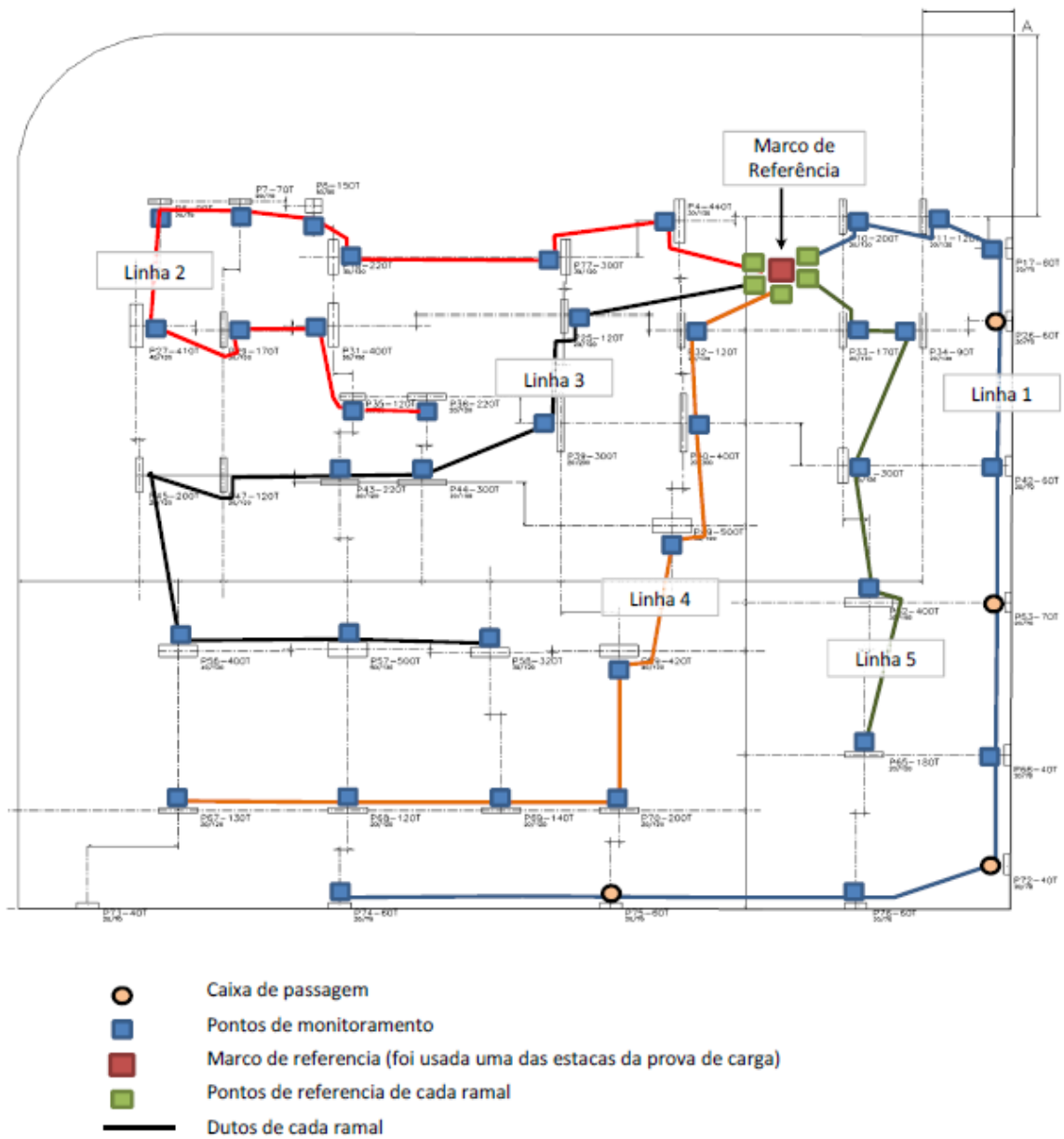


Figura 4. 7 - Projeto do mapa de instrumentação do Edifício 1.

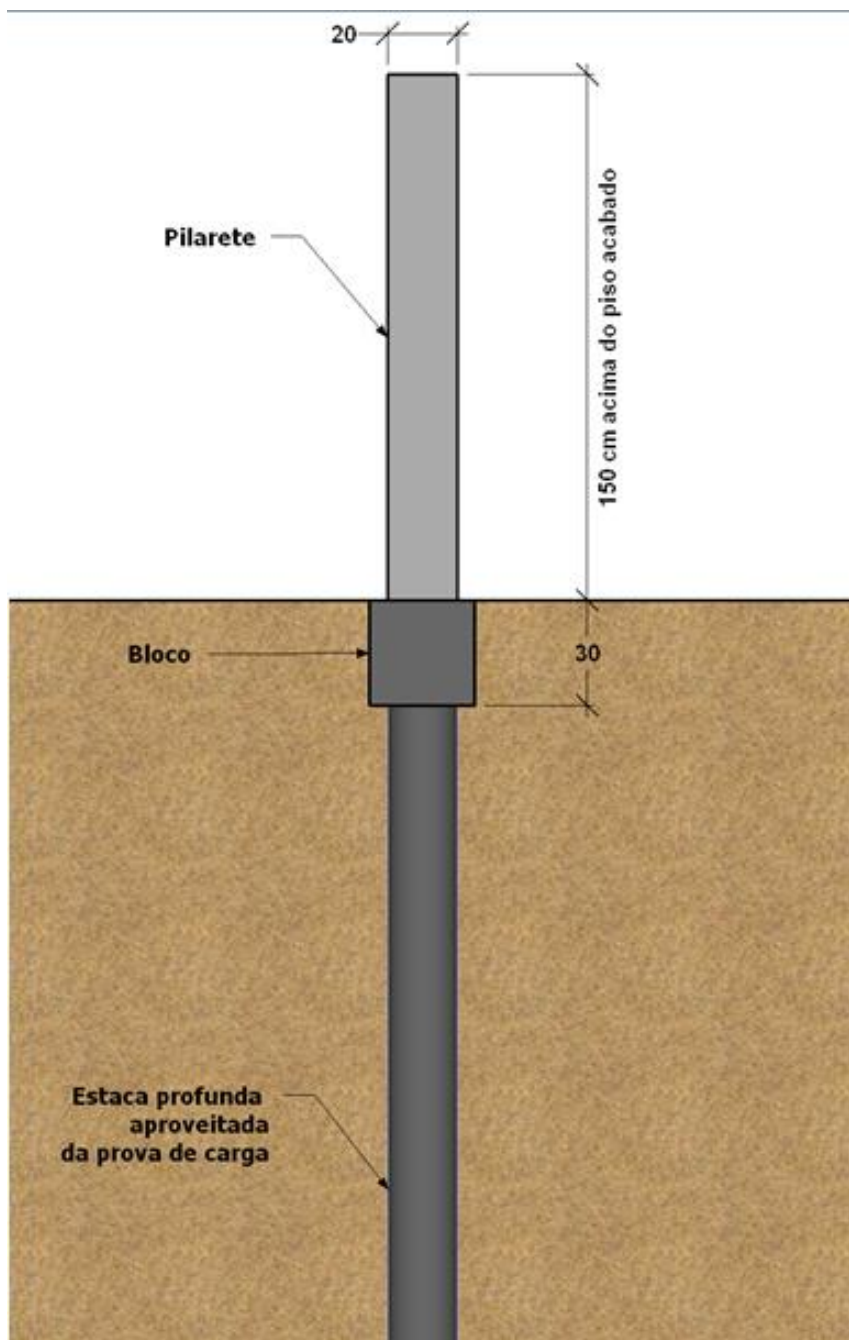


Figura 4. 8 - Projeto do marco de referência do Edifício 1.

4.3.2. Edifício 2

O Edifício 2 é composto por 15 pavimentos. No térreo encontra-se a entrada social mais garagem. No pavimento logo acima encontra-se mais um piso de garagem. O pavimento seguinte é dividido entre garagem e o pavimento de uso comum (PUC). Na sequência encontram-se 12 pavimentos tipo. Na última laje encontram-se a caixa d'água e a casa de máquina. A Figura 4.9 apresenta a vista externa da obra, em processo de construção adiantado. Na Figura 4.10 são

apresentadas os registros fotográficos do estágio da construção apenas para algumas datas a fim de apresentar a evolução do carregamento.



Figura 4. 9 - Vista Externa do Edifício 2.



**a) 600º dias de construção –
2ª medição**



**b) 621º dias de construção –
4ª medição**



**c) 657º dias de construção –
8ª medição**



d) 691º dias de construção – 13ª medição



e) 727º dias de construção – 15ª medição



f) 755º dias de construção – 19ª medição



g) 789º dias de construção – 24ª medição



h) 831º dias de construção – 27ª medição



i) 919º dias de construção – 34ª medição

Figura 4. 10 - Evolução da construção durante o monitoramento de recalque

As fundações são em estaca hélice contínua, com diâmetro igual a 500mm e profundidade de 20 metros, armada em algumas estacas nos 4 primeiros metros e em outras nos 3 primeiros metros. O edifício possui 44 pilares no primeiro pavimento.

Foram realizados para reconhecimento e caracterização do perfil do terreno três furos de sondagem a percussão (SPT). Através do laudo do SPT e do perfil estratigráfico (Figura 4.11), pode-se notar que as estacas estão assentes em camadas com elevados valores de SPT, associado à presença de camada de solo arenoso compacto a partir de 13m de profundidade.

O critério utilizado para a realização do monitoramento de recalque neste edifício foi o critério da norma brasileira de projetos e execução de fundações NBR6122 (ABNT, 2010) relacionado a esbelteza do edifício, que pode ser

considerado um critério estrutural. Neste critério quando a relação altura/largura (menor dimensão) é superior a quatro o monitoramento de recalque é recomendado.

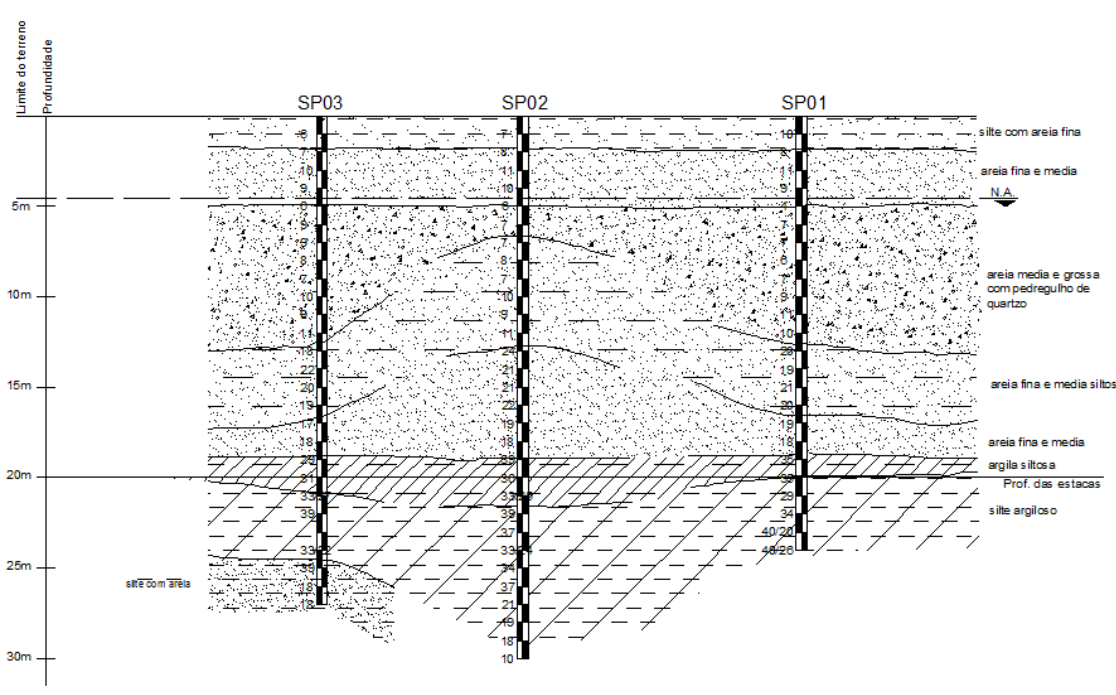


Figura 4. 11 - Perfil estatigráfico do terreno do Edifício 2.

Na Figura 4.12 é possível observar o projeto do mapa de instrumentação que foi realizado segundo a planta de locação dos pilares. Nele são apresentados os pilares que serão monitorados nesta obra. O projeto do marco de referência é apresentado na Figura 4.13, que é constituído por um bloco (30x30x30cm); uma estaca broca de diâmetro igual a 20cm e 350cm de profundidade abaixo do bloco e um pilar de lados iguais a 20x20 com 150cm de altura acima do nível do terreno.

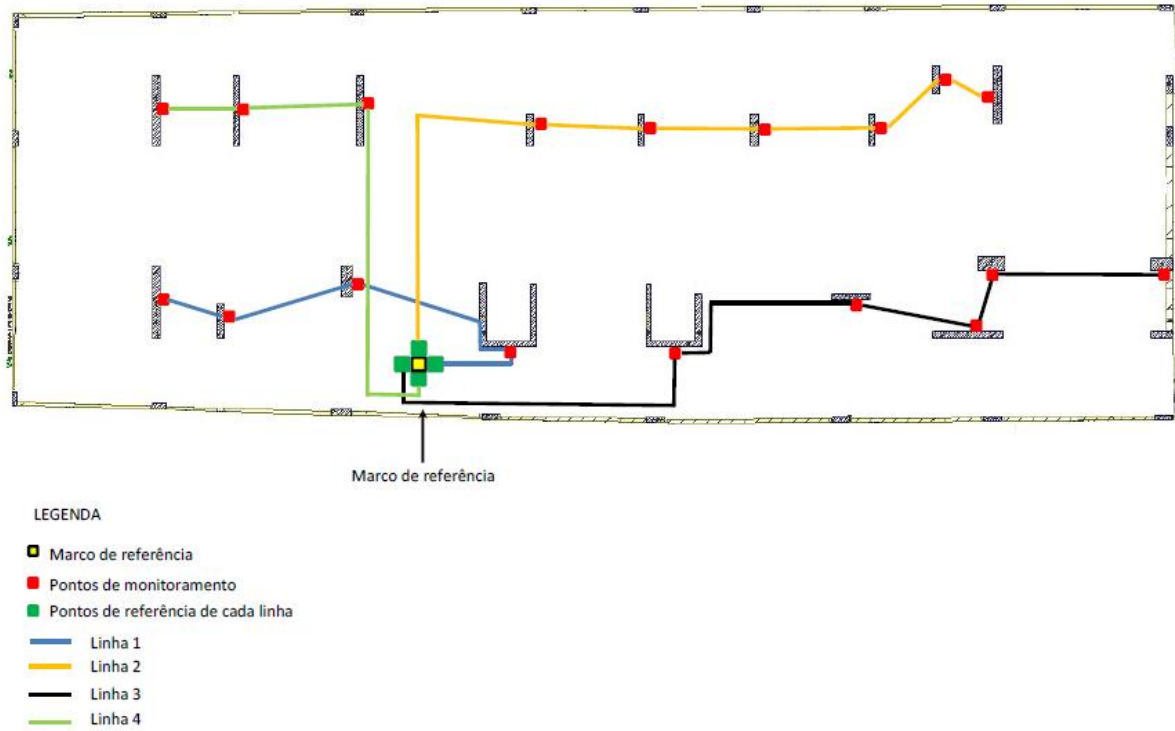


Figura 4. 12 - Projeto do mapa de instrumentação do Edifício 2.

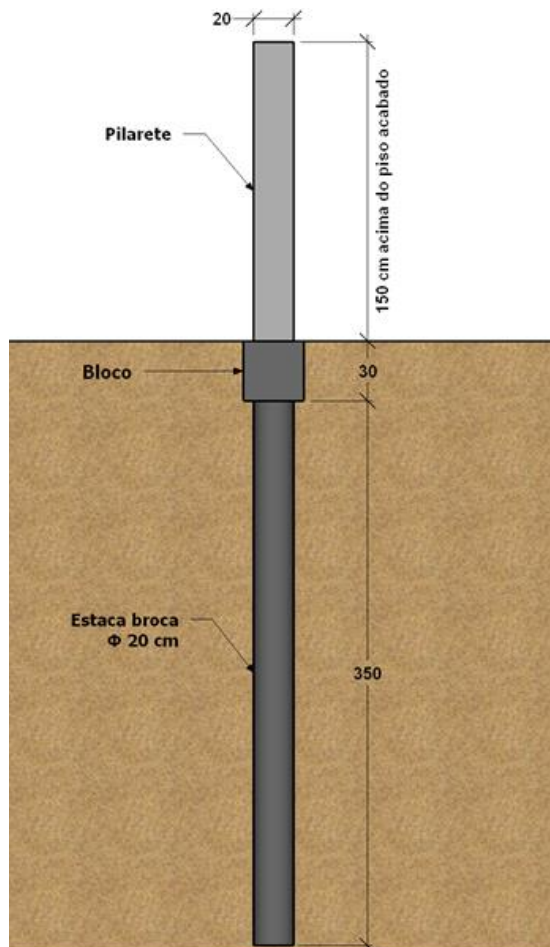


Figura 4. 13 - Projeto do marco de referência do Edifício 2.

4.3.3. Edifício 3

Este edifício é composto por 22 pavimentos, sendo 18 pavimentos tipo. No térreo encontra-se a entrada social, os próximos dois andares são de garagem e o seguinte o pavimento de uso comum (PUC). Na última laje encontra-se a caixa d'água e a casa de máquina. A Figura 4.14 apresenta a vista externa da obra, em processo adiantado de construção. Na Figura 4.15 são apresentadas os registros fotográficos do estágio da construção apenas para algumas datas a fim de apresentar a evolução do carregamento.



Figura 4. 14 - Vista externa do Edifício 3

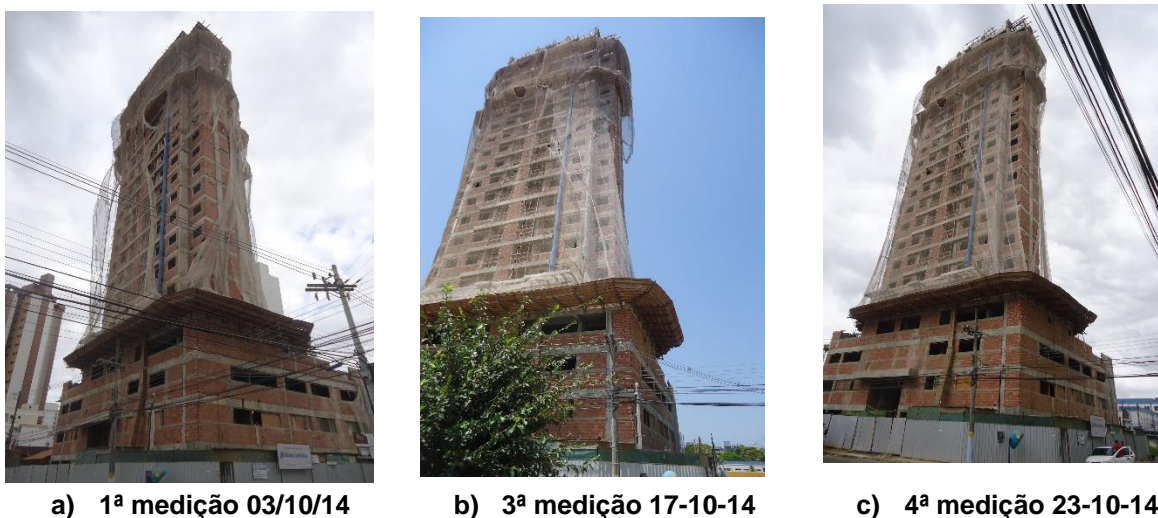


Figura 4. 15 - Evolução da construção durante o monitoramento de recalque

As fundações deste edifício são em hélice contínua, com diâmetros iguais a 500 e 400 mm, com profundidade igual a 21 metros e armada nos três primeiros metros.

Para o conhecimento e caracterização do perfil do terreno foram executados quatro furos de sondagem a percussão (SPT). A partir do laudo do SPT e do perfil estratigráfico do terreno (Figura 4.16) pode-se notar que as estacas estão assentes em camada de areia fina, média e grossa medianamente compactada a compactada. A partir desta profundidade o laudo apresenta elevados valores de SPT.

Nesta obra optou-se pelo monitoramento de recalque como um instrumento de controle de qualidade.

Neste caso de obra em particular primeiramente tentou-se instalar os instrumentos de medição no pavimento térreo, conforme os dois casos anteriores. Porém o canteiro de obra estava localizado no térreo e apresentava uma situação desfavorável para manutenção dos instrumentos nesse pavimento. Após diversas interferências optou-se por levar o sistema para o segundo pavimento, instalando os instrumentos no alto dos pilares, para garantir a integridade. O marco continuou no pavimento térreo ligado a apenas um pilar, pilar de referência. Os demais pilares foram interconectados em linhas no segundo pavimento utilizando o mesmo pilar de referência. Conhecido o recalque do pilar de referência pode-se calcular deste modo o recalque dos outros pilares.

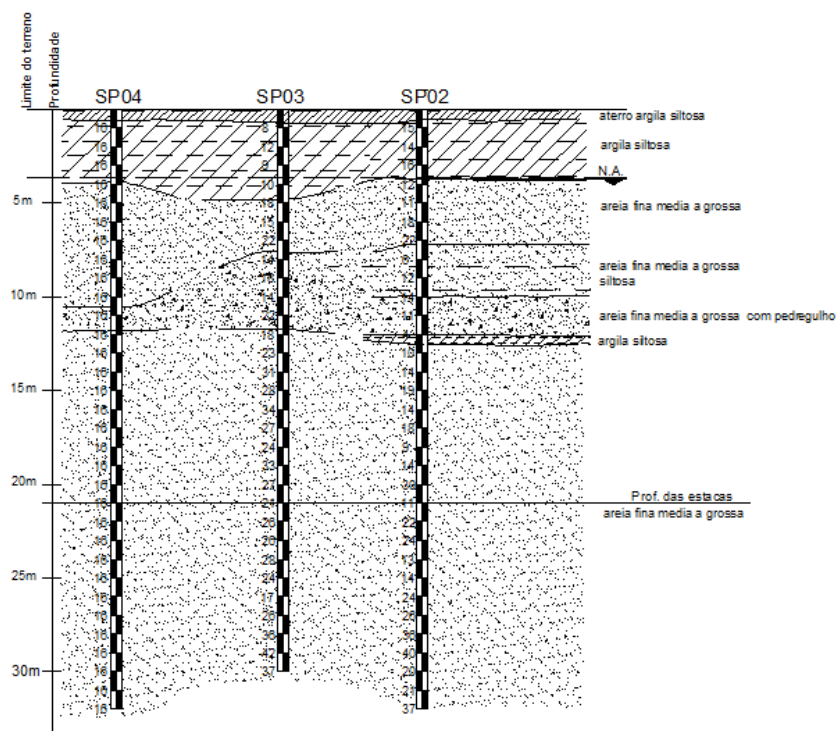


Figura 4. 16 - Perfil estratigráfico do terreno do Edifício 3.

Na Figura 4.17 é possível ver o projeto do mapa de instrumentação que foi utilizado segundo a planta de locação dos pilares. Nele são apresentados os pilares que serão monitorados neste trabalho. A linha 1 corresponde ao sistema instalado no pavimento térreo e as linhas restantes estão instaladas no segundo pavimento no topo dos pilares.

O caso de obra ilustra que o funcionamento do sistema é possível somente quando há garantia que o instrumento não sofre interferências dos trabalhos de obras.

O projeto do marco de referência desta obra é igual ao do projeto do Edifício 1 (Figura 4.8) uma estaca profunda. Mas nesse caso, a estaca foi executada especificamente para esse fim. O marco de referência é constituído por um bloco (30x30x30cm) e um pilar de lados iguais a 20x20cm com 150cm de altura acima do piso acabado.

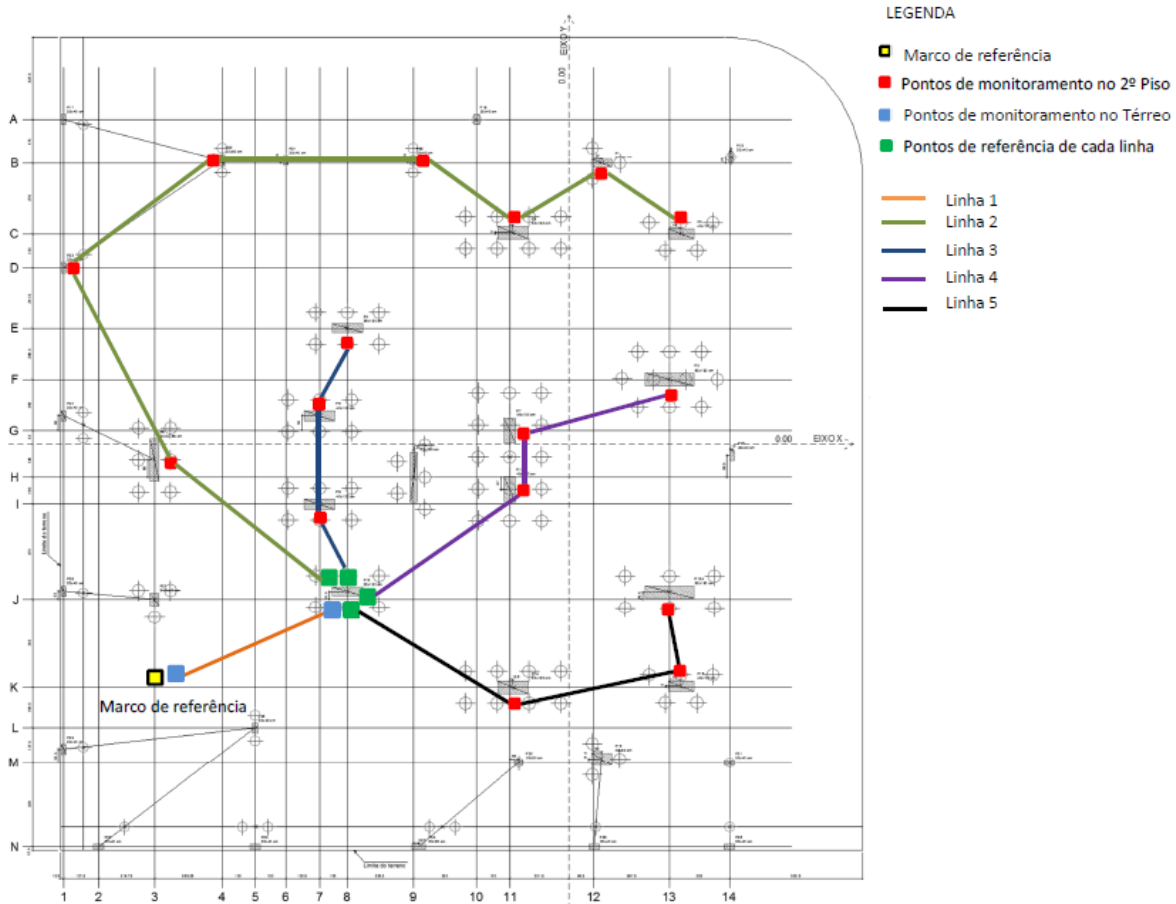


Figura 4. 17 - Projeto do mapa de instrumentação do Edifício 3.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS E INTERPRETAÇÕES

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos monitoramentos para os três casos de estudo. São avaliados valores absolutos e os parâmetros AR e DR do recalque total. As variações dos recalques diferenciais máximos, das rotações máximas e das deflexões relativas máximas ao longo dos edifícios observados durante o monitoramento também são observadas.

Para avaliação da interação solo estrutura faz-se a apresentação e discussão dos coeficientes de variação relativos ao recalque, CV_{ρ} , recalque diferencial máximo, $CV_{\Delta\rho}$, distorção angular, CV_{β} , e deflexão máxima, $CV_{\Delta max}$.

5.1. Edifício 1

5.1.1. Recalque total

A variação dos recalques ao longo do tempo de cada pilar do Edifício 1 foi traçada a partir dos resultados experimentais obtidos no campo e está apresentada nas Figuras B.1 a B.37 do Anexo B.

A Figura 5.1 apresenta a evolução dos recalques totais médios ao longo do tempo de monitoramento. Pode-se observar que há uma fase do gráfico referente ao ajuste do instrumento, neste período a construção encontrava-se em estágio inicial com aproximadamente 19% da carga estrutural, conforme citado na bibliografia a parcela de contribuição de estruturas de concreto armado na carga total da edificação é de 40%, resultando portanto quase que 50% da contribuição da carga estrutural.

Pode-se observar também na Figura 5.1 que ainda não houve a estabilização dos recalques. É importante destacar que este edifício ainda continua com o monitoramento de recalques tendo em vista que a obra ainda se encontra em execução.

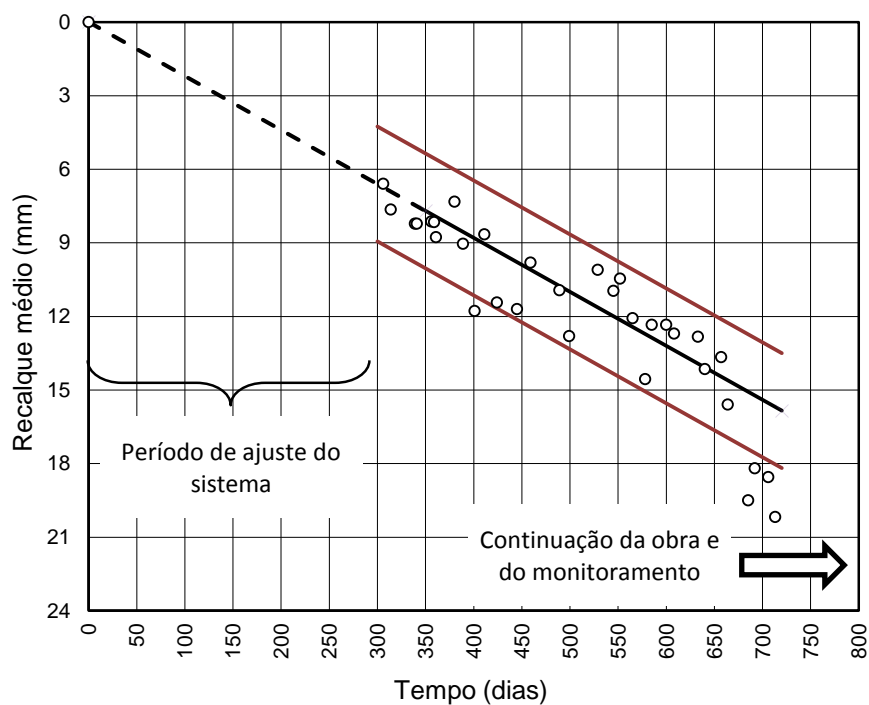


Figura 5. 1 - Variação do recalque médio com o tempo.

A partir dos valores medidos de recalque foram geradas as curvas de iso-recalque para cada medição. Na Figura 5.2 são apresentadas as curvas de iso-recalque correspondentes à execução da 9ª laje (87ª medição), onde se observa a concentração das bacias de recalque, onde há a concentração de recalques de maior magnitude. Essas bacias ocorrem em pontos dispersos, que correspondem às regiões da rampa (P23 a P25/P28 a P32), da escada (P17) e periferia direita.

Através da Figura 5.3, referente às isocurvas da 18ª medição, é possível observar a continuidade da concentração dispersa das bacias de recalque para estágios mais avançados da construção. Esse comportamento se repete até as últimas medições de campo.

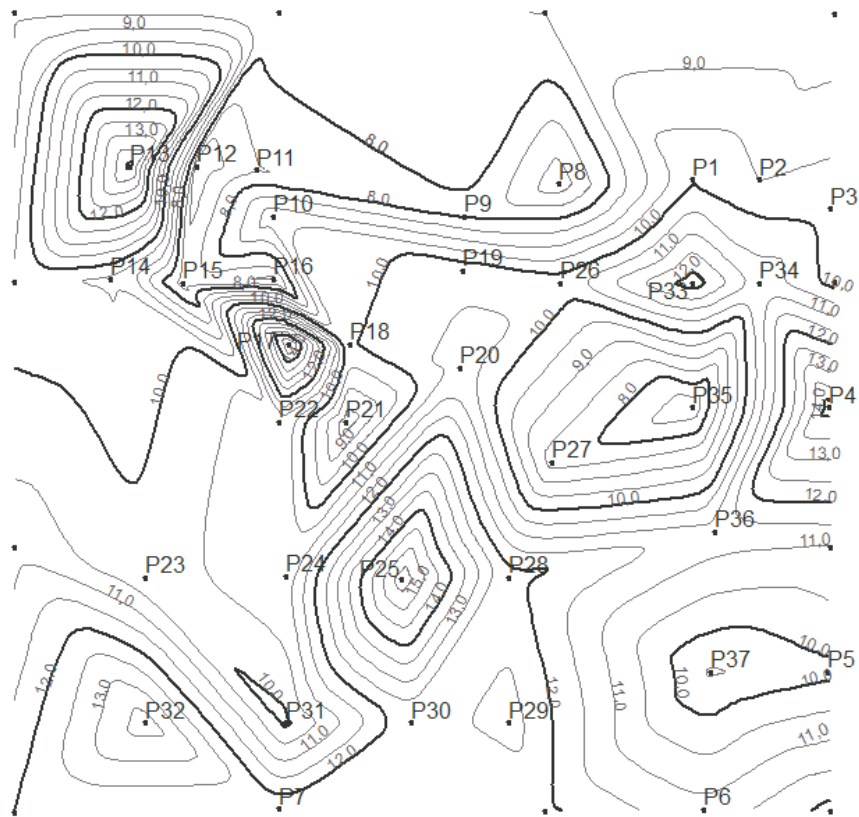


Figura 5. 2 - Curva de isorecalque da 8ª medição (valores em mm).

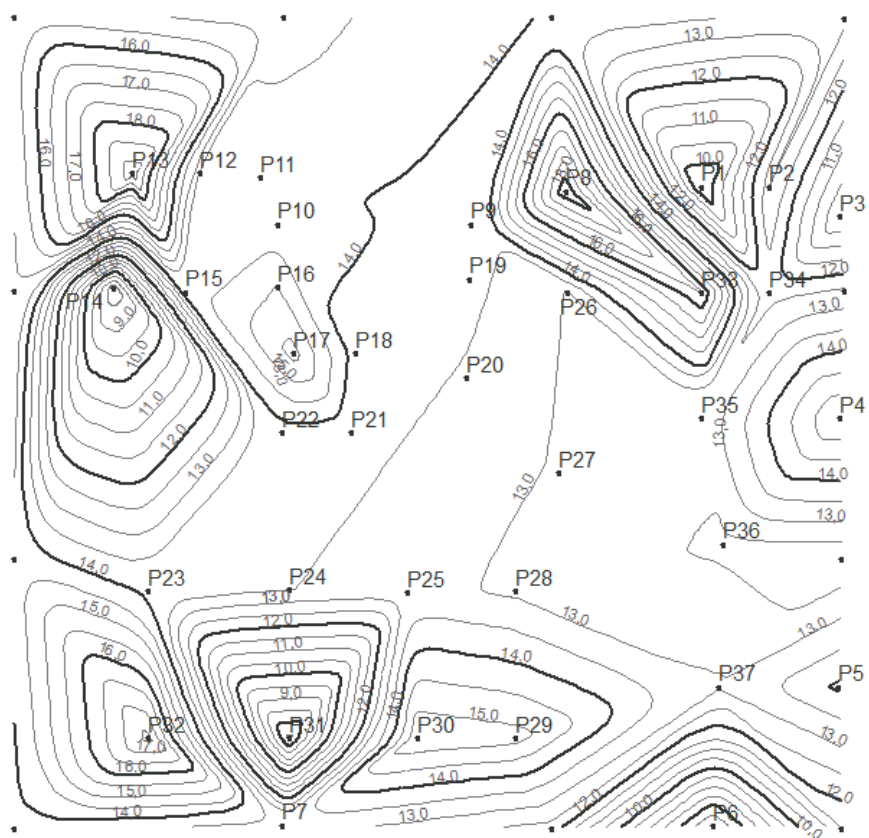


Figura 5. 3 - Curva de iso-recalque da 18ª medição (valores em mm).

A partir das Figuras 5.2 e 5.3 pode-se observar a mudança de padrão de recalque do início, com recalques maiores no centro (P25), para o avanço da obra, com recalques maiores na periferia, uma indicação de redistribuição das cargas.

5.1.2. Distorção angular

Na Figura 5.4 é apresentado a variação da distorção angular média com o tempo de monitoramento. O valor mais crítico observado é da ordem de $1/500$. Valores de distorção angular desta magnitude em edifícios largos, não são indicadores de danos ou inclinações, segundo os valores limites relatados na literatura (Figura 2.3). Pode-se observar que os valores aumentam ao longo da construção e tendem a uma estabilização. Este aumento dos valores da distorção angular está diretamente relacionado aos maiores recalques ocorridos nas fundações centrais, conforme observado pelas Figuras 5.2 e 5.3. A distorção angular tende a estabilizar, evidenciando o aumento da rigidez à flexão da estrutura.

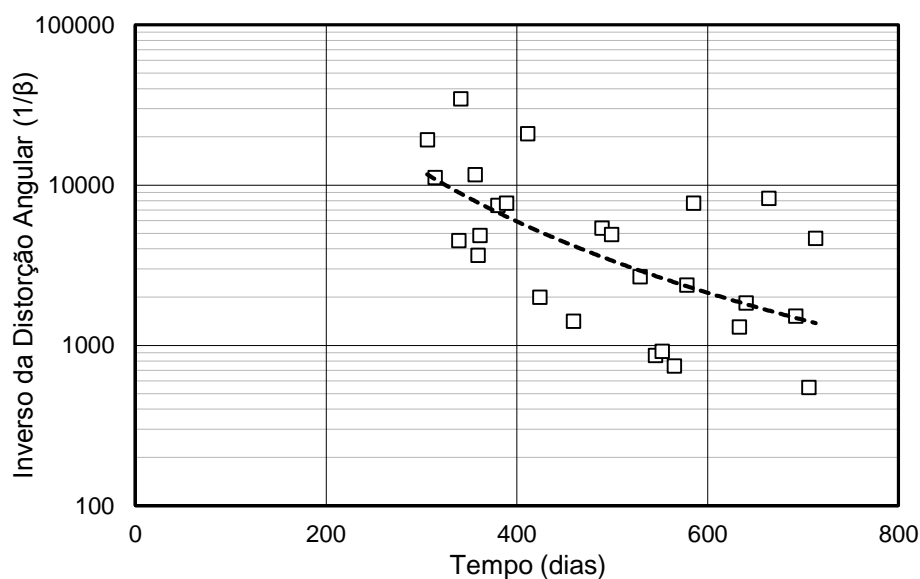


Figura 5. 4 - Variação da distorção angular média com o tempo do Edifício 1.

5.1.3. Análise dos dados

AR e DR

Os fatores de recalque absoluto (AR) e recalque diferencial (DR) proposto por Gusmão (1990) são de extrema importância para se avaliar os efeitos da interação solo-estrutura tais como a redistribuição de cargas nos pilares e sua tendência a

uniformização dos recalques. Sendo assim, buscou-se representar graficamente o comportamento da estrutura, através das isocurvas de AR e DR, durante o monitoramento.

As Figuras 5.5 e 5.6 apresentam as isocurvas com a variação do AR e DR, respectivamente, para o 55º dia de monitoramento de recalque (8ª medição). Pode-se observar valores de $AR > 1$, alívio nos pilares, para os pilares da divisa (P4 e P5) e nos pilares da rampa de acesso a garagem (P23 a P25 e P29 a P32). Pode-se observar que o AR e o DR possuem o mesmo comportamento, apresentando valores de $DR > 1$ (também significado de alívio nos pilares) para os mesmos pilares.

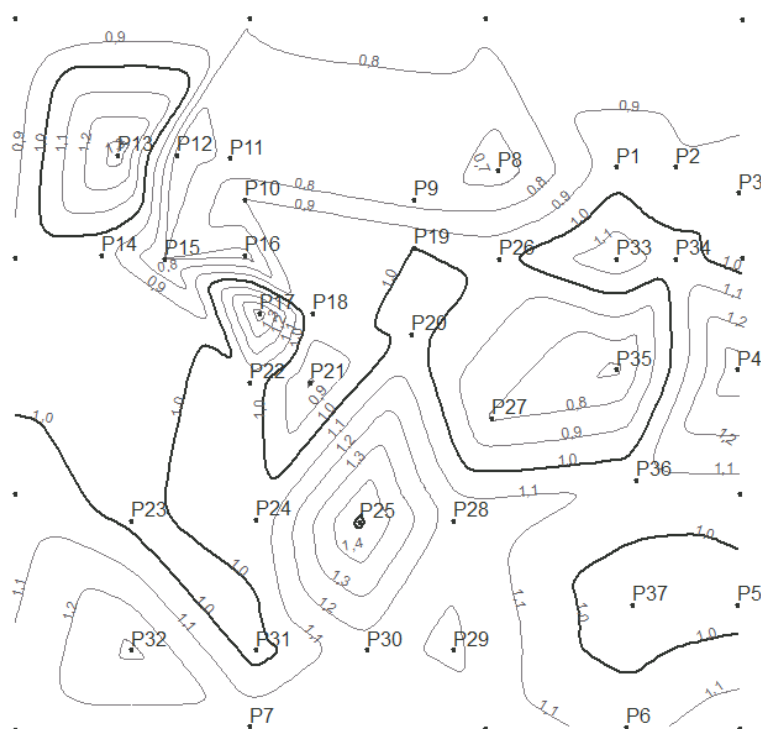


Figura 5. 5 – Isocurvas com valores de AR para a 8ª medição.

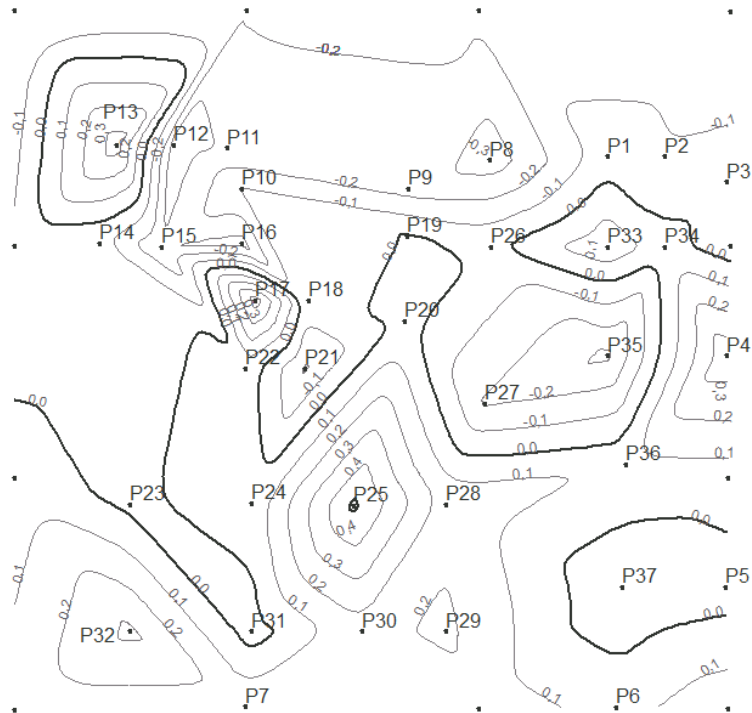


Figura 5. 6 - Isocurvas com valores de DR para a 8ª medição.

Nas medições seguintes, como ilustrado nas figuras 5.7 e 5.8, os valores de AR e DR alternam-se entre os pilares ao longo da construção, indicando que o comportamento da estrutura é significativamente influenciado pela interação solo-estrutura. Neste caso a alternância acontece devido ao processo de transferência de carga, gerando alívio em alguns pilares e sobrecarga em outros de modo a uniformizar os recalques.

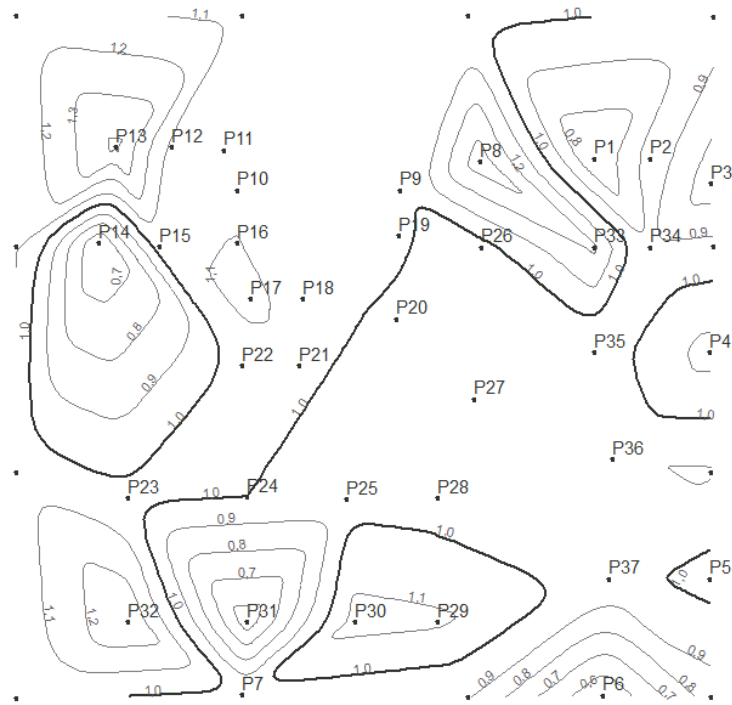


Figura 5. 7 - Isocurvas com valores de AR para 18ª medição.

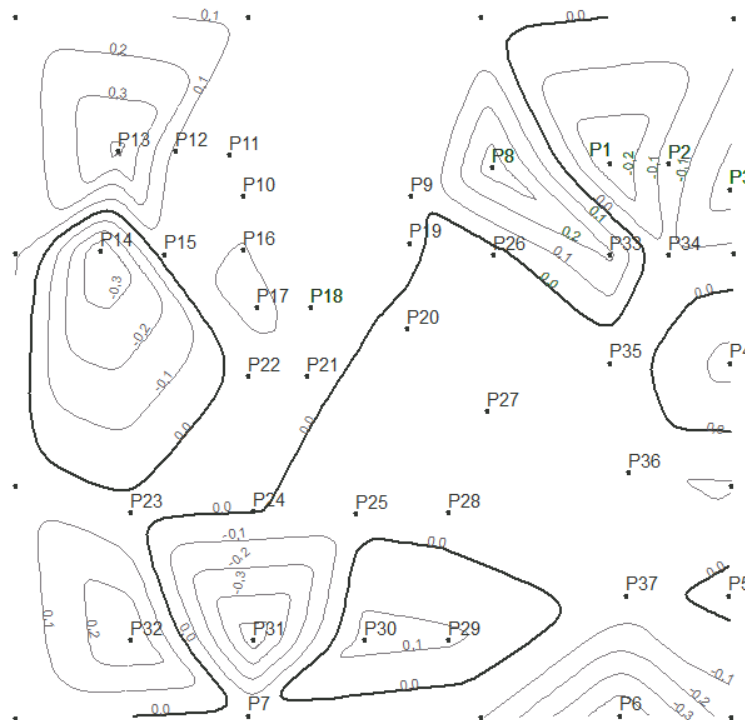


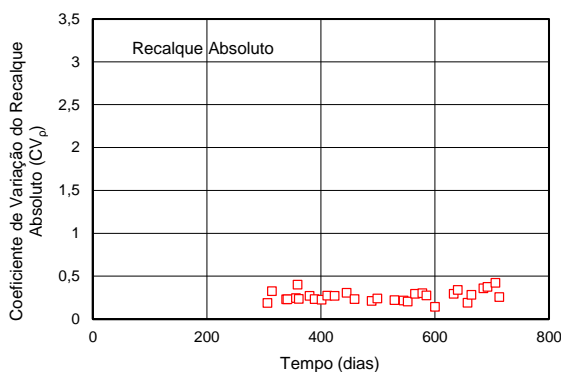
Figura 5. 8 - Isocurva com valores de DR para 18ª medição.

Nos estágios finais de monitoramento, é possível observar que há uma tendência dos recalques máximos se aproximarem da média, ocasionando um AR tendendo a unidade. Assim como também é possível observar um DR tendendo a zero, já que os recalques de cada pilar se aproximam da média. Esse

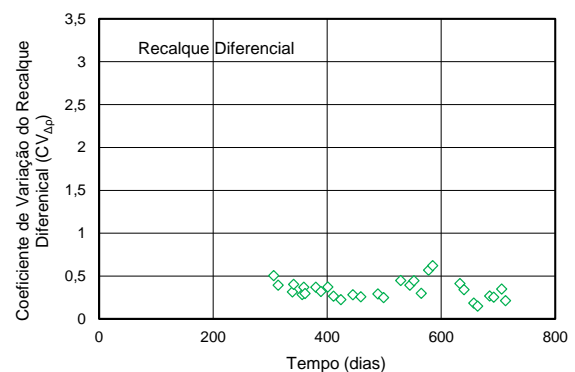
comportamento está associado provavelmente ao ganho de rigidez da edificação que uniformiza os recalques.

CV

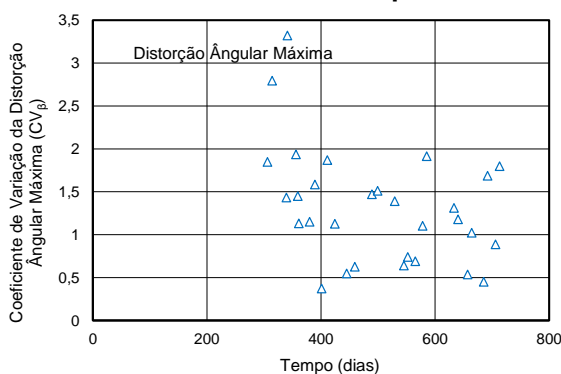
A homogeneização dos recalques a medida que a obra evolui pode ser verificada através do coeficiente de variação dos recalques total da obra (CV) definido pela Equação 2.4. A Figura 5.9a apresenta a evolução do CV_{ρ} do recalque absoluto durante o monitoramento. A medida que a estrutura ganha rigidez, ocorre a redução do desvio padrão dos recalques e o aumento do recalque médio, provocando valores de CV normalmente abaixo da unidade. No caso em estudo nota-se que o valor de CV_{ρ} permanece abaixo da unidade durante todo o monitoramento e com uma tendência linear, o que indica que ocorre uma tendência a homogeneização dos recalques.



a) Coeficiente de variação do recalque absoluto com o tempo

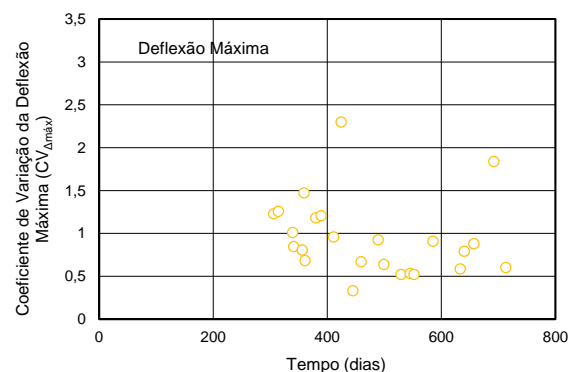


b) Coeficiente de variação do recalque diferencial máximo com o tempo.



c) Coeficiente de variação da distorção angular com o tempo.

5



d) Coeficiente de variação da deflexão máxima com o tempo.

Figura 5.9 - Coeficiente de variação com o tempo do Edifício 1 a partir de diferentes parâmetros de análise.

O coeficiente de variação do recalque diferencial máximo $CV_{\Delta p}$ (Figura 5.9b), durante o monitoramento apresenta um comportamento bem similar ao do coeficiente de variação do recalque absoluto. Sugere também a mesma tendência de comportamento interação solo-estrutura, ou seja, valores abaixo da unidade para estágios mais avançados da construção. Esse comportamento evidencia a uniformização dos recalques nos estágios mais avançados.

O coeficiente de variação da distorção angular CV_{β} e da deflexão máxima $CV_{\Delta_{max}}$ (Figura 5.9c e 5.9d) apresenta uma dispersão maior nos resultados, mas também valores abaixo da unidade para estágios mais avançados da construção.

Importante destacar os valores de CV elevados nos estágios iniciais, com exceção do coeficiente de variação do recalque diferencial, que permanece com valores abaixo da unidade durante todo o monitoramento. Os elevados valores de CV nos estágios iniciais evidenciam a flexibilidade da estrutura no início da construção, onde ocorre deslocamentos localizados sem redistribuição para o restante da estrutura.

5.2. Edifício 2

5.2.1. Recalque total

A partir dos resultados experimentais de cada pilar foram traçadas curvas de tendência de recalque ao longo do tempo e estão apresentadas nas Figuras B.38 a B.55 do Anexo B, analogamente ao Edifício 1.

Na Figura 5.10 é apresentado a evolução dos recalques totais médios ao longo do tempo de monitoramento do Edifício 2, considerando todos os pilares monitorados. Pode-se observar que o edifício apresentou uma evolução dos recalques com pequena variação de recalque entre as medições. No início da instalação dos instrumentos de medição na obra foram necessários ajustes que levaram tempo, com isso foi possível começar a gerar dados a partir da construção da 8ª laje o que representa aproximadamente 35% da carga estrutural.

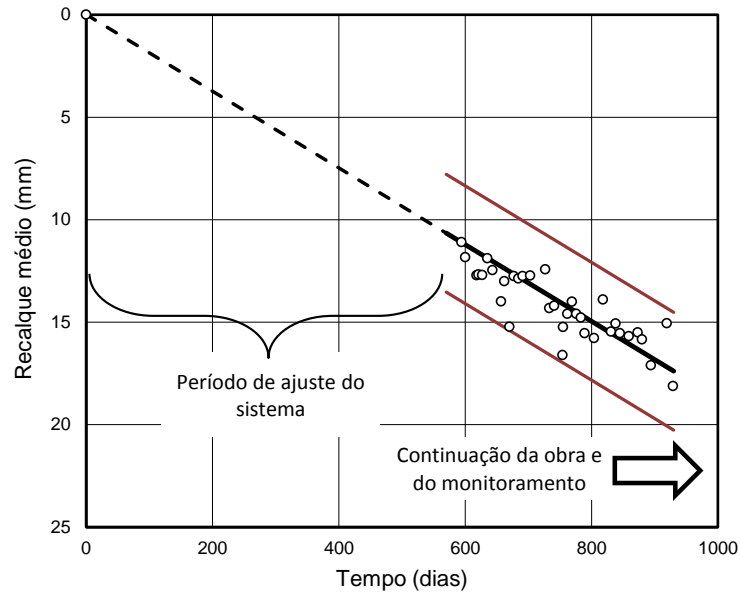


Figura 5. 10 - Variação do recalque médio com tempo do Edifício 2.

Utilizando os valores medidos de recalque foram geradas as curvas de iso-recalque para cada medição. Na Figura 5.11 são apresentadas as isocurvas dos recalques absoluto calculados para a 5ª medição referente ao 33º dia de monitoramento. Observa-se que os maiores recalques se concentram nos pilares P7 a P8, canto superior direito do edifício e no pilar P16 a P18, canto superior esquerdo.

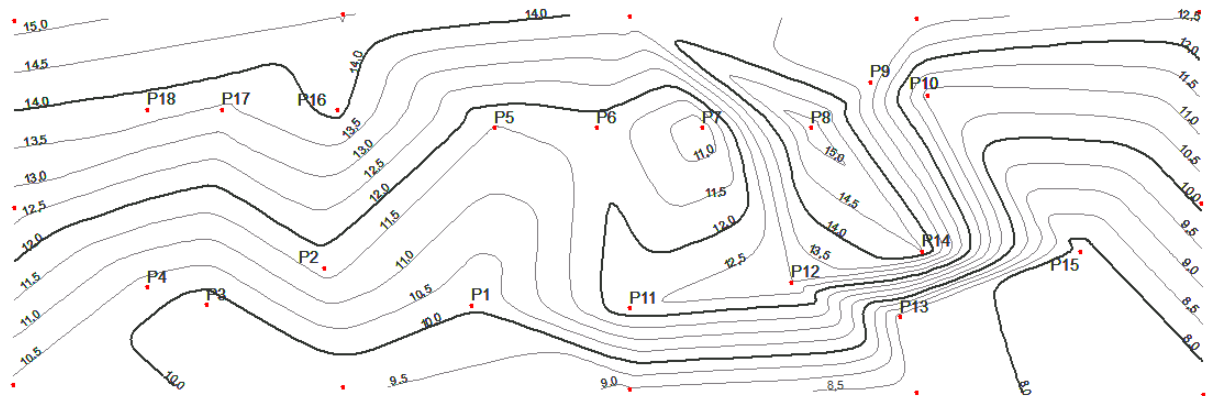


Figura 5. 11 - Curva de iso recalque da 5ª medição.

A partir da 12ª medição (Figura 5.12), a bacia de recalque dos pilares P5 a P7 e P16 e P17 (pilares centrais da parte superior do edifício) aumenta gradativamente. Isso se prevalece até a 31ª medição (Figura 5.13), após aproximadamente 250º dias de monitoramento de recalque, onde a partir desta medição os maiores recalques passam a se concentrar no P6 (pilar central da parte superior do edifício). Nos

pilares P12 a P15 e P16 a P18 ainda se observa recalques significativamente maior em relação aos demais, porém não superior ao pilar P6.

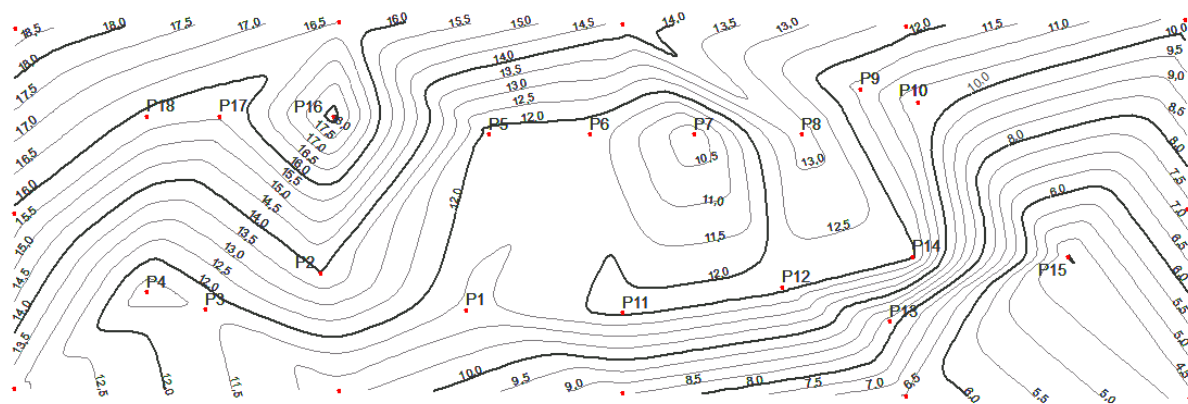


Figura 5. 12 - Curva de iso-recalque da 12ª medição.

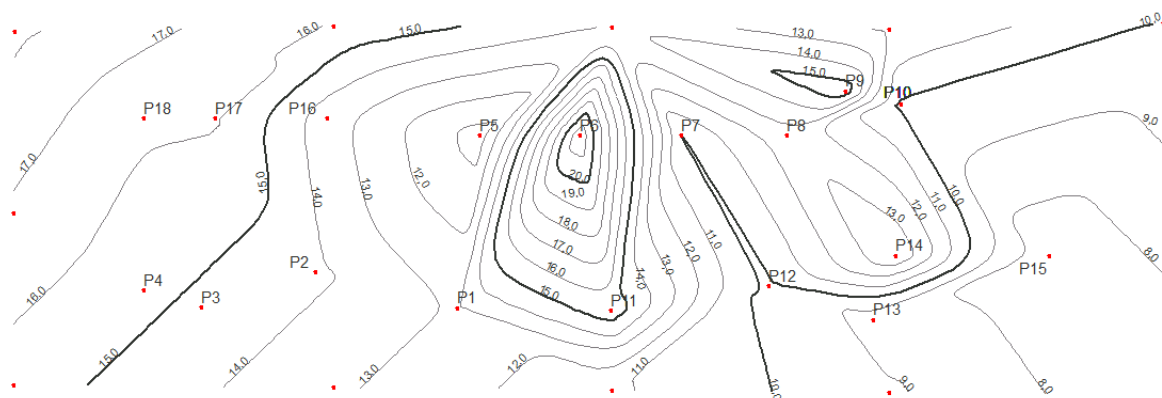


Figura 5. 13 - Curva de iso-recalque da 31ª medição.

5.2.2. Distorção angular

A partir dos resultados de distorção angular calculado para este edifício, pode-se perceber que o menor valor apresentado (situação crítica) foi de 1/500. Assim como para o Edifício 1, valores de distorção angular desta magnitude não são indicadores de danos ou inclinações, segundo os valores limites relatados na literatura (Figura 2.3).

Na Figura 5.14 é apresentado a variação do inverso da distorção angular β média com o tempo de monitoramento. Podemos observar que os valores diminuem ao longo da construção. O aumento da rigidez durante a construção do edifício reflete nesta aumento do valor da distorção angular.

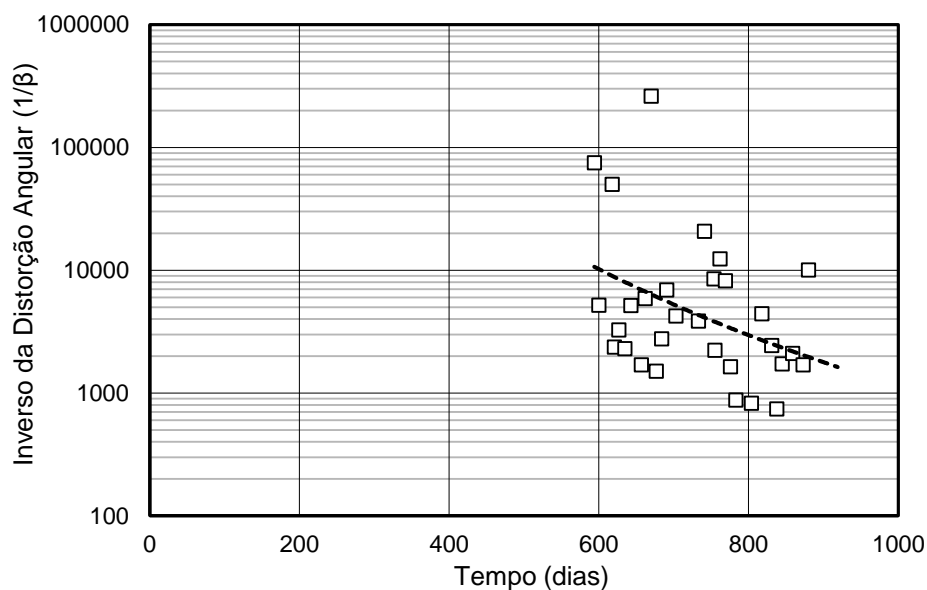


Figura 5. 14 - Variação da distorção média com o tempo do Edifício 2.

5.2.3. Análise dos dados

AR e DR

Segundo o desenvolvimento dos recalques absolutos nas Figuras 5.11 a 5.13, foi observado que não ocorreu uma distribuição monotônica dos recalques e a presença de recalques máximos no centro do edifício. Com as isocurvas dos valores de AR calculados, Figura 5.15, observou-se uma distribuição irregular. Isto está associado aos pequenos valores de recalque obtidos e a dispersão dos resultados.

As Figuras 5.15 e 5.16 apresentam as isocurvas com a variação do AR e DR, respectivamente, para a 5ª medição, 33º de monitoramento de recalque. Pode-se observar valores de $AR > 1$, alívio nos pilares, para os pilares do canto direito. Pode-se observar que o AR e o DR possuem o mesmo comportamento, apresentando valores de $DR > 1$ (também significado de alívio nos pilares) para os mesmos pilares.

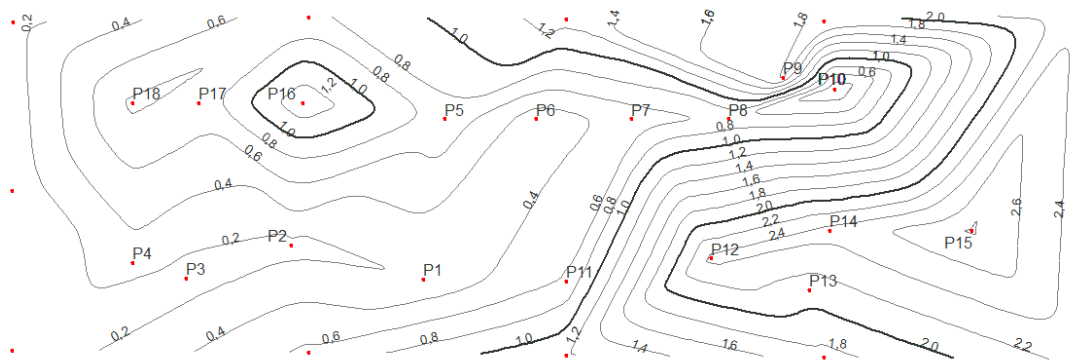


Figura 5. 15 - Isocurva com valores de AR para a 5ª medição.

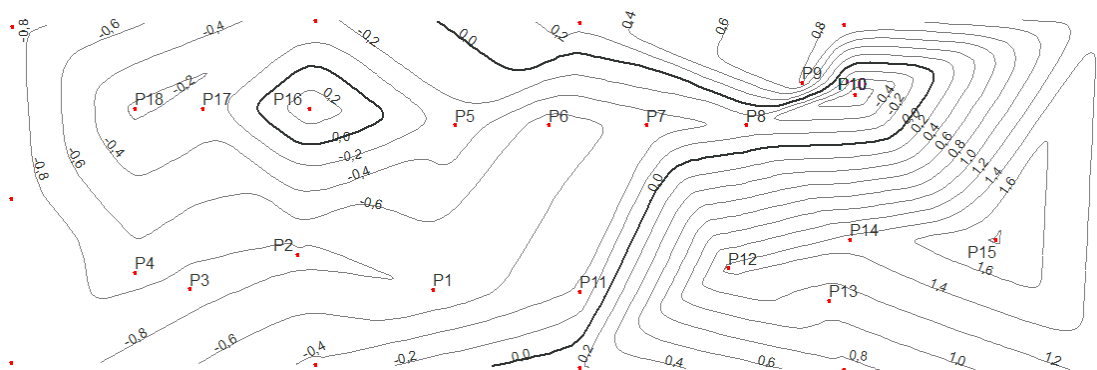


Figura 5. 16 - Isocurvas com valores de DR para a 5ª medição.

Nas medições seguintes, como ilustrado nas figuras 5.17 a 5.22, os valores de AR e DR alternam-se entre os pilares ao longo da construção, indicando que o comportamento da estrutura é significativamente influenciado pela interação solo-estrutura, assim como ocorreu para o Edifício 1. No entanto, nesse caso devido a geometria da locação dos pontos de fundação, que é mais alongada em uma das direções, a alternância ocorre entre os extremos e o centro na direção mais alongada.

Esta alternância acontece devido ao processo de transferência de carga, gerando alívio em alguns pilares e sobrecarga em outros de modo a uniformizar os recalques.

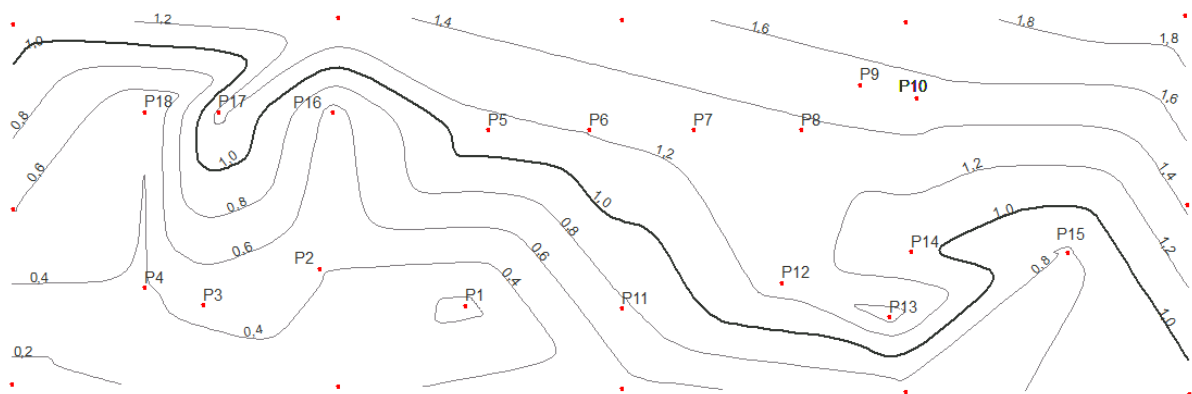


Figura 5. 17 - isocurva com valores de AR para a 17ª medição.

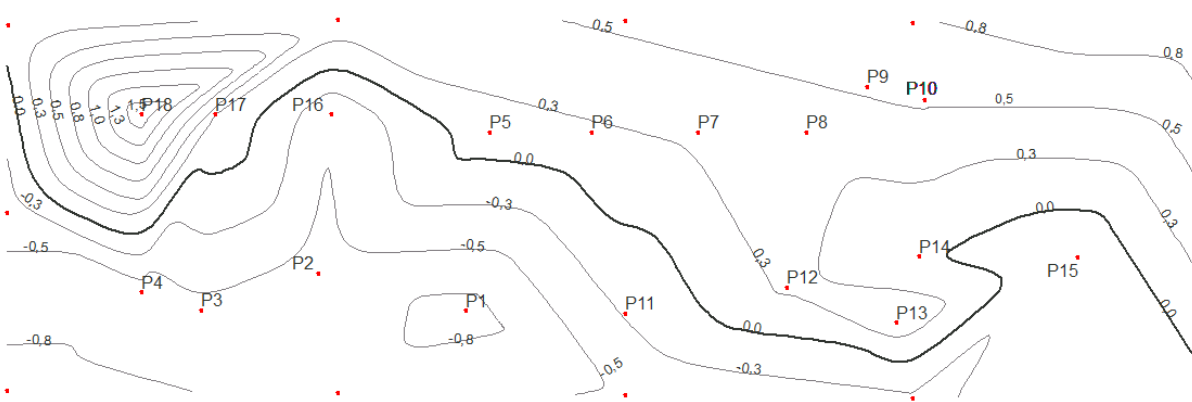


Figura 5. 18 - Isocurva com valores de DR para a 17ª medição.

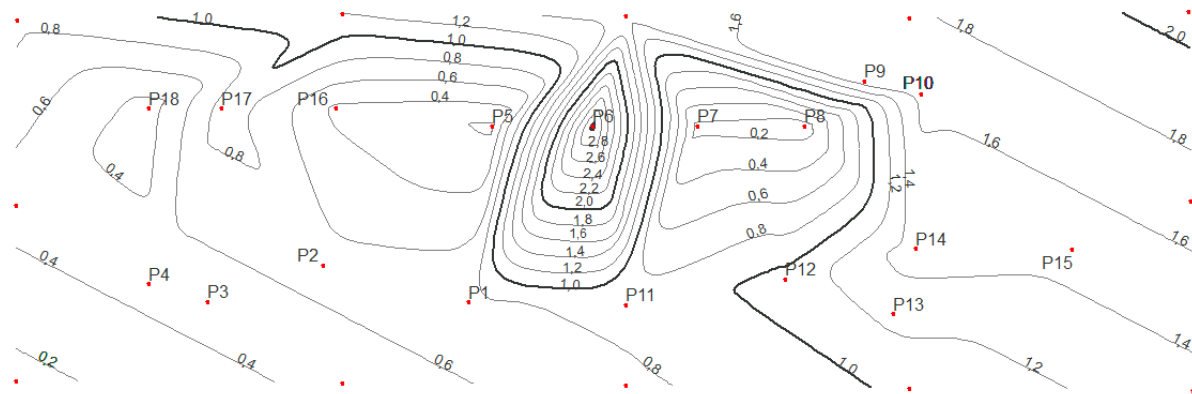


Figura 5. 19 - Isocurva com valores de AR para a 27ª medição.

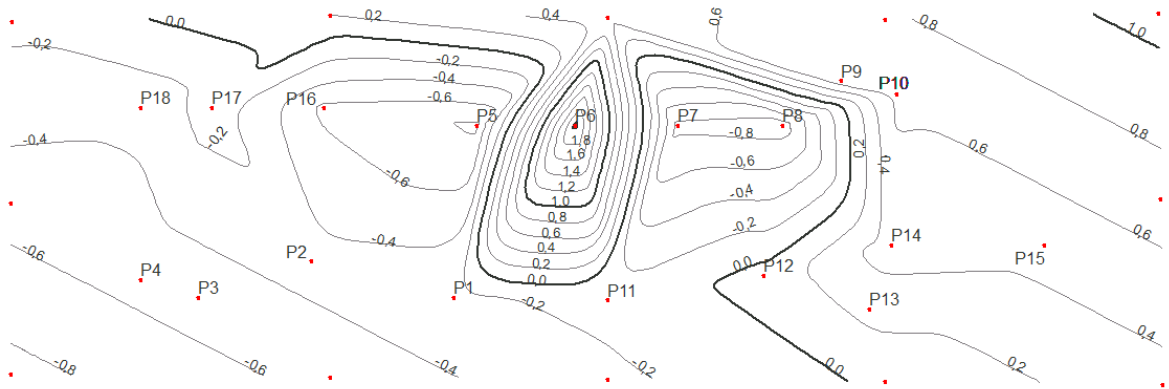


Figura 5. 20 - Isocurva com valores de DR para a 27ª medição.

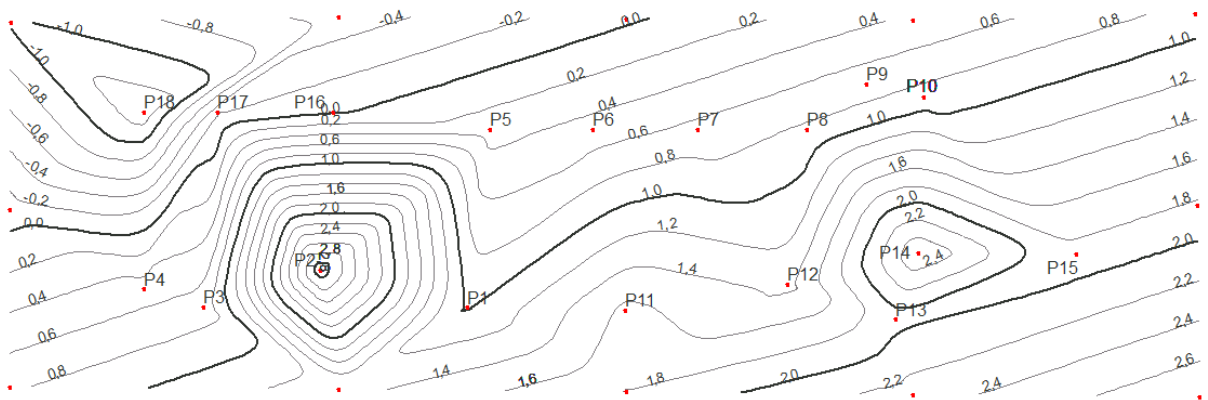


Figura 5. 21 - Isocurva com valores de AR para a 34ª medição.

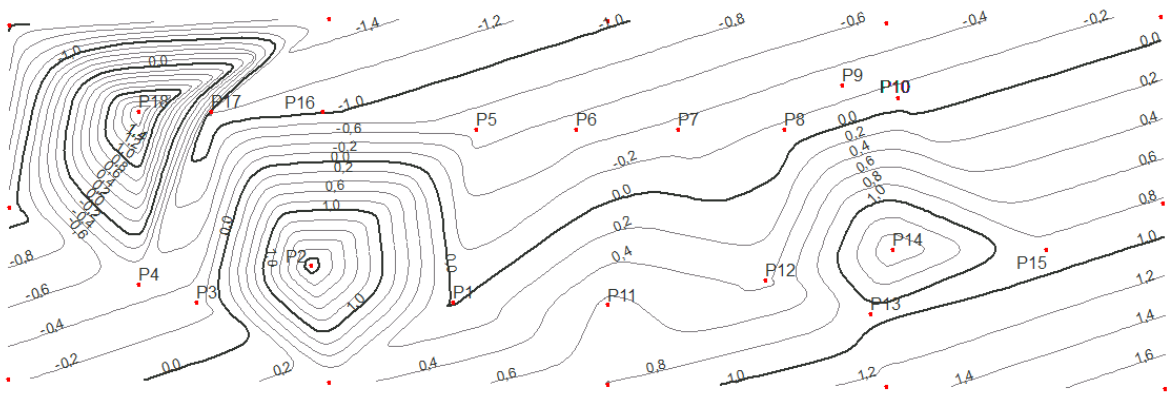


Figura 5. 22 - Isocurva com valores de DR para a 34ª medição.

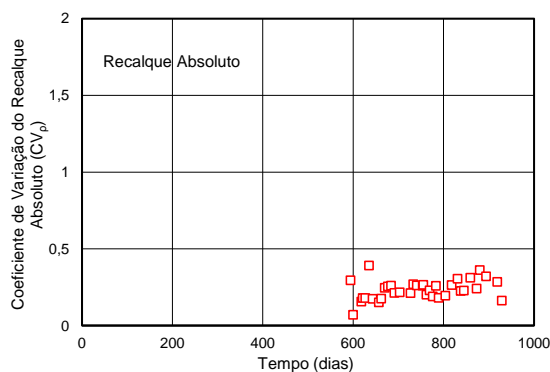
Assim como acontece para o Edifício 1, nos estágios finais de monitoramento, é possível observar que há uma tendência dos valores de AR se aproximarem da unidade. Assim como também é possível observar um DR tendendo a zero. Esse comportamento está associado provavelmente ao ganho de rigidez da edificação que uniformiza os recalques.

CV

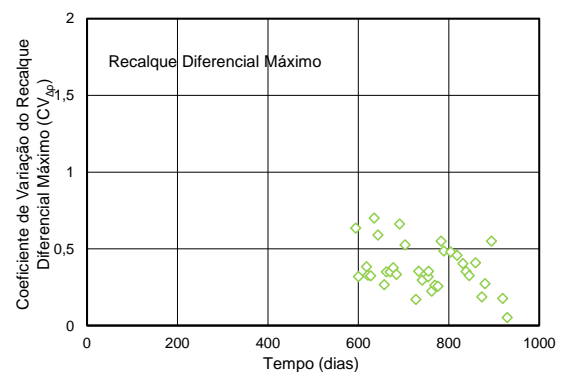
A variação do CV apresenta apenas uma visualização global do desempenho da estrutura. Na Figura 5.23a, assim como observado para o Edifício 1 pode-se observar que a variação do CV_{ρ} do recalque absoluto tende a uma uniformização, com uma tendência linear com valores abaixo da unidade. Isto ocorre devido ao aumento da rigidez do edifício, ocasionado pela continuação do processo executivo, agindo preponderantemente na minimização das dispersões dos recalques.

Na Figura 5.23b apresenta-se o coeficiente de variação do recalque diferencial máximo $CV_{\Delta\rho}$ com um comportamento bem similar ao do coeficiente de variação do recalque absoluto, apresentando valores abaixo da unidade para estágios mais avançados da construção, o que sugere também a mesma tendência de comportamento interação solo-estrutura (como para o Edifício 1). A tendência dos resultados de recalque diferencial é basicamente constante, evidenciando o comportamento monolítico do edifício, apresentado pelo recalque médio constante durante o período de monitoramento.

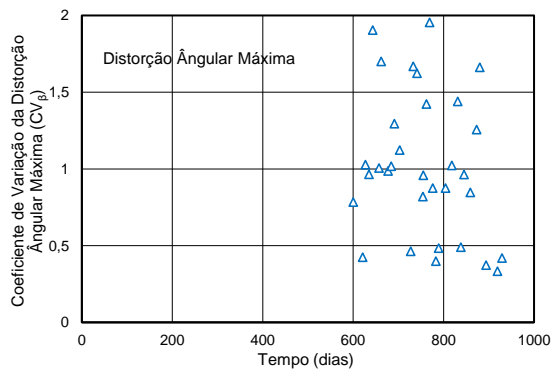
O coeficiente de variação da distorção angular CV_{β} e da deflexão máxima $CV_{\Delta max}$ (Figura 5.23c e 5.23d) apresentam comportamentos similares, uma dispersão maior nos resultados, mas também valores abaixo da unidade para estágios mais avançados da construção.



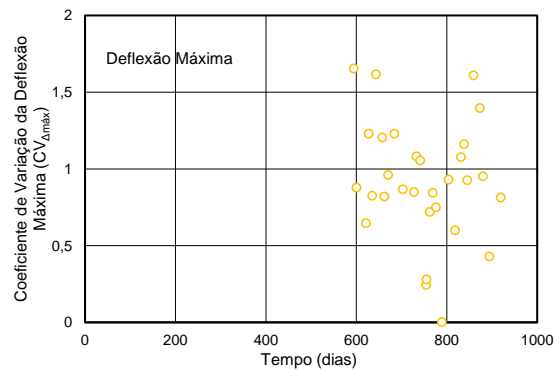
a) Coeficiente de variação do recalque absoluto com o tempo



b) Coeficiente de variação do recalque diferencial máximo com o tempo.



c) Coeficiente de variação da distorção angular com o tempo.



d) Coeficiente de variação da deflexão máxima com o tempo.

Figura 5. 23 - Coeficiente de variação com o tempo do Edifício 2 a partir de diferentes parâmetros de análise.

5.3. Edifício 3

5.3.1. Recalque total

Para este edifício também foram traçadas as tendências de recalque ao longo do tempo a partir dos resultados experimentais de cada pilar e estão apresentadas nas Figuras B.56 a B.68 do Anexo B.

Apesar de se poder obter os recalques em pontos experimentais, não se considera possível uma interpretação conclusiva sobre a evolução dos processos de interação solo estrutura nesse edifício. Os resultados evidenciam a necessidade de um monitoramento de recalque contínuo para que se possa fazer uma análise do desempenho do edifício.

Na Figura 5.24 é apresentada a evolução dos recalques totais médios ao longo do tempo do Edifício 3, considerando todos os pilares monitorados.

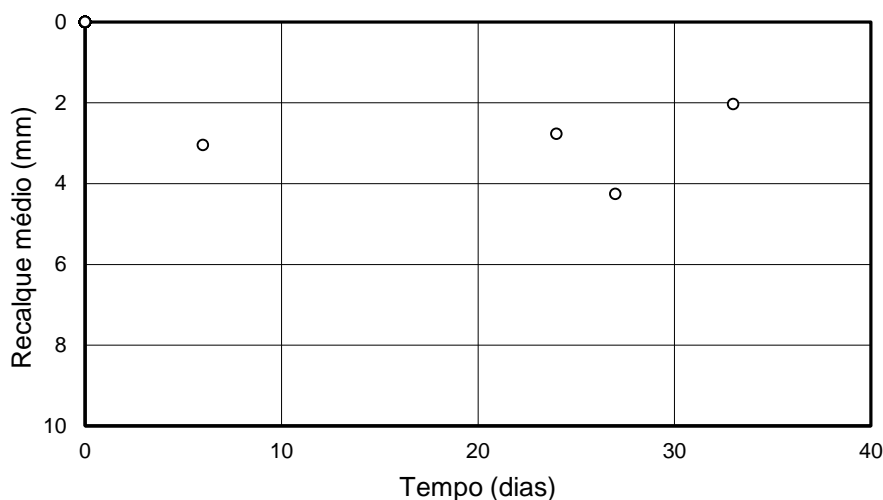


Figura 5. 24 - Variação do recalque médio com o tempo.

5.4. Comparação

Pouco estudo tem-se feito a respeito destes parâmetros de avaliação da interação solo-estrutura, portanto pouco se conhece a respeito de limites aceitáveis de variação de recalques de edificações. Na Figura 5.25 apresenta-se o CV de alguns casos da bibliografia, Danziger et al (2000a), Gusmão (2003), Barros (2005), Savaris (2008), Mota (2009) comparando com os dois casos do presente trabalho. Os dados de monitoramento de recalque deste presente trabalho foram obtidos em uma fase de obra mais adiantada, por isso foi necessário fazer uma extrapolação dos resultados encontrados na bibliografia. Pode-se observar os resultados do Edifício 1 e 2 se encontram dentro da faixa de banco de dados extrapolada. O coeficiente de variação do recalque absoluto tende a uma uniformização. E como foi visto anteriormente isto ocorre devido ao aumento da rigidez do edifício, ocasionado pela continuação do processo executivo, agindo preponderantemente na minimização das dispersões dos recalques.

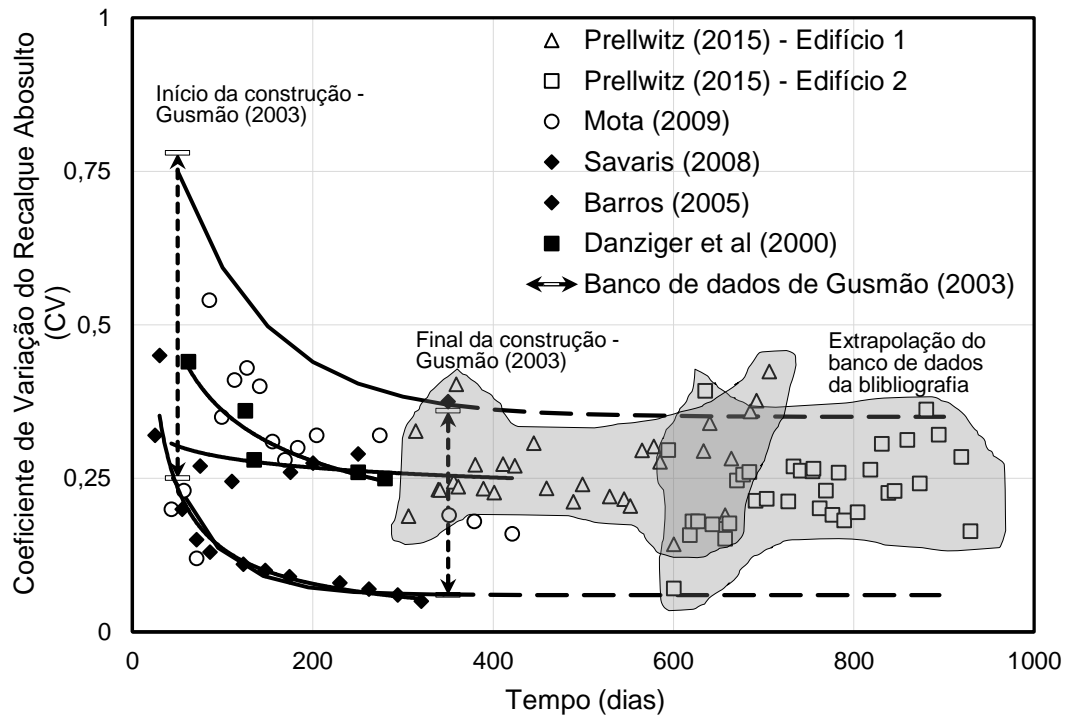


Figura 5. 25 - Comparação do coeficiente de variação do recalque absoluto deste trabalho com alguns da bibliografia.

CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1. Conclusões

Dos resultados obtidos nesse trabalho conclui-se que foi possível o desenvolvimento uma nova concepção para o monitoramento de recalques de edifícios onde são combinados o princípio de vasos comunicantes e a fotogrametria para a aquisição de dados. O instrumento de medição foi implantado com sucesso e permite a avaliação dos recalques com precisão e acurácia compatíveis com as prescrições de norma, sem interferências no processo construtivo da obra e com baixo custo.

A aplicação da fotogrametria para aquisição de dados apresentou resultados favoráveis, auxiliando na agilidade e facilidade de obtenção dos dados através de programas de tratamentos de imagens mais diretos e simples.

O instrumento permitiu obter dados para analisar o desempenho de três casos de estudo. Sendo que foi constatado que o funcionamento do sistema é possível somente quando há garantia que não sofrerá interferências dos trabalhos no decorrer das obras.

A partir dos resultados obtidos neste trabalho pode-se comprovar a importância de analisar o coeficiente de variação de recalque como fonte de indicação do comportamento da estrutura.

Apesar de não ser considerada nos projetos convencionais, a interação solo-estrutura é quem comanda o desempenho da fundação e da própria estrutura de uma edificação. O trabalho mostrou que a interação entre o solo e as fundações promove uma tendência à uniformização dos recalques e uma redistribuição de esforços nos elementos estruturais.

Além disto este trabalho contribui para a construção de banco de dados e ajuda a ampliar a experiência local quanto ao desempenho das fundações tipo hélice contínua monitorada.

6.2. Sugestões

Apesar do sucesso de implantação do instrumento baseado no princípio dos vasos comunicantes e com aplicação da fotogrametria para a aquisição de dados, a

continuidade do aperfeiçoamento do equipamento de monitoramento trará benefícios para esta nova concepção de monitoramento de recalques de edifícios. Tendo em vista o tempo de equalização da boia de aproximadamente 1 dia, deve-se adaptar o instrumento para que se obtenha um tempo de equalização menor.

Considerando a importância da formação de um banco de dados sobre o comportamento estrutural de edificações frente aos deslocamentos das fundações, sugere-se o procedimento de monitoramento e análises semelhantes em outras edificações. Pesquisas devem ser realizadas de forma a padronizar os valores limites dos coeficientes de variação dos recalques, tendo em vista aos poucos trabalhos que abordam esta análise.

Como sugestão final, cita-se a necessidade de continuação dos estudos sobre a interação solo-estrutura através da monitoração de recalques em edifícios, com diferentes configurações estruturais.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006). Estacas - Prova de Carga Estática - Método de Ensaio. NBR 12131.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007). Estacas - Ensaio de Carregamento Dinâmico. NBR 13208.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010). Projeto e Execução de Fundações. NBR 6122.
- ASTM - American Soc. for Testing and Materials (2013). Standard Test Method for Low Strain Integrity Testing of Deep Foundations. ASTM D 5882.
- ASTM - American Soc. for Testing and Materials (2014). Standard Test Method for Integrity Testing of Concrete Deep Foundations by Ultrasonic Crosshole Testing. ASTM D 6760.
- ASTM - American Soc. for Testing and Materials (2008). Standard Practice for Rock Core Drilling and Sampling of Rock for Site Investigation. ASTM D 2113.
- ASTM - American Soc. for Testing and Materials (2012). Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Deep Foundations. ASTM D 4945.
- ASTM - American Soc. for Testing and Materials (2013). Standard Test Method for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load. ASTM D 1143.
- Alonso, U.R. (2011) Previsão e controle das fundações: Uma Introdução ao Controle da Qualidade em Fundações. Editora Edgard Blucher, 2ª Edição, 146 p., São Paulo, Brasil.
- Aoki, N. (1987). Modelo simples de transferência de carga de estaca vertical sujeita a carga axial de compressão. III Ciclo de palestras sobre Engenharia de Fundações, ABMS/NR Nordeste, Recife.
- Aoki, N. (1997). Aspectos geotécnicos da interação estrutura – maciço de solos. In: XXVIII Jornadas Sul – Americanas de Engenharia Estrutural, Vol. 1. São Carlos.

- Barros, R. A. (2005) Previsão e Controle de Recalques Durante a Construção de Edifícios. Dissertação de mestrado, Laboratório de Engenharia Civil – UENF, 118 p., Campos dos Goytacazes, Brasil.
- Barros, N.B.F (2012) Previsão de Recalque e Análise de Confiabilidade de Fundações em Estaca Hélice Contínua. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia. 252p., São Carlos, Brasil.
- Bjerrum, L. (1963). Interaction between structure and soil. Proceedings European CSMFE, Wiesbaden, Vol. 2, pp. 135-137. Apud VELLOSO e LOPES (1997).
- Borges, A.C.L. (2009) Metodologia para avaliação do comportamento estrutural de edifícios altos em concreto armado com consideração da interação solo-estrutura. Doutorado. UFPE, Recife.
- Cardozo, D. L. S. (2002) Análise dos Recalques de Alguns Edifícios da Orla Marítima de Santos. Mestrado, Poli/USP, São Paulo.
- Chamecki, S. (1954), Consideração da rigidez da estrutura no cálculo dos recalques da fundação. Anais I, COBRAMSEF, Vol. I, pp. 35-80, Porto Alegre.
- Correa, C.P. (2012) Metodologia para controle de recalques em estruturas de concreto armado por meio de nivelamento geométrico de precisão. Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria , Rio Grande do Sul.
- Crespo, V. A. S. (2004) Estudo da Sensibilidade de Edificações em Relação ao Solo. Mestrado, UENF, Campos dos Goytacazes.
- Danziger, F.A.B.; Barata, F.E.; Santa Maria, P.E.; Danziger, B.R.; Crispel, F.A. (1997). Measurement of Settlements and Strain on Buildings from the Beginning of Construction. Vol.II, Proc., XIV International Conference on Soils Mechanics and Foundation Engineering, Hanburgo, pp 787-788.
- Danziger, F. A. B.; Danziger B. R.; Crispel, F. A. (2000a). A medida dos recalques desde o início da construção como um controle de qualidade das fundações. Proc. SEFE IV, pp. 191-202, Curitiba, Brasil.

- Danziger, B. R.; Carvalho, E.M.L.; Costa, R.V.; Danziger F. A. B.; (2000b). Análise da Interação Solo-Estrutura de uma edificação com Fundações Diretas em Areia. Proc. XIII COBRAMSEG, pp. 943-948, São Paulo, Brasil.
- EN ISO - European Standard (2004a). Eurocode — Basis of structural design. British, England. EN ISO 1990:2002
- EN ISO - European Standard (2004b). Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules. Brussels, Belgium. EN ISO 1997-1
- ER 1110-2-110 Engineer Regulation (1985). Engineering and Design Instrumentation for Safety Evaluations of Civil Works Projects. Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers. Washington, DC.
- Fonte, F. L. F. (2000). Análise de Interação Solo- Estrutura em Edifícios. Mestrado, UFPE, Recife.
- Gonçalves, J. C. (2004). Avaliação da Influência dos Recalques das Fundações na Variação de Cargas dos Pilares de um Edifício. Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Gonçalves, J. C. (2010). A influência dos recalques das fundações no comportamento de edificações ao longo do tempo. Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro
- Goschy, B. (1978). Soil-foundation-structure interaction. Journal Structural Division ASCE, Vol. 104, St-5, pp. 749-761; Apud IWAMOTO (2000).
- Gusmão, A.D., Lopes, F.R. (1990) Um método simplificado para consideração da interação solo-estrutura em edificações. 6º CBGE/ IX COBRAMSEF. pp 447-454
- Gusmão, A.D. (1994) Aspectos relevantes da interação solo-estrutura em edificações. Revista Solos e Rochas, São Paulo, v.17, p47-55.
- Gusmão Filho. J.A. (1995), Contribuição à prática de fundações: a experiência do Recife. Tese de Concurso de Professor Titular, Departamento de Tecnologia e Geotecnia, Escola de Engenharia da UFPE.

- Gusmão, A.D.; Gusmão Filho, J.A. (1994a). Avaliação da Influência da interação solo-estrutura. In: X COBRANSEF, Foz do Iguaçu, PR, ABMS, Anais, Vol.1, p. 68-74.
- Gusmão, A.D.; Gusmão Filho, J.A. (1994b), Construction sequence effect on settlements of buildings. Proceedings XIII ICOSOMEFE, New Delhi, Vol. 2, pp. 1803-1806.
- Gusmão, A. D.; Gusmão Filho, J. A. e Calado Jr., I. H. (2003), Settlement Monitoring of Buildings – The Experience of Recife, Brazil, XII PCSMFE, Cambridge/USA, Vol. 2, pp.2727-2732.
- Gusmão, A.D. (2006). Desempenho de Fundações de Edifícios. In: Palestra XIII COBRAMSEG, Curitiba, pp 215-240.
- Hollanda Jr., O. G.(2002), Influência de Recalques em Edifícios de Alvenaria Estrutural. Doutorado, EESC/USP, São Carlos.
- I.S.E – Institution of Structural Engineers (1989). Structure-soil interaction: The real behavior of structures, London. Apud VELLOSO e LOPES (1997).
- Iwamoto, R. K. (2000). Alguns Aspectos dos Efeitos da Interação Solo-Estrutura em Edifícios de Múltiplos andares com Fundação Profunda. Mestrado, EESC/USP, São Carlos.
- Jordão, D. R. (2003), Estabilidade Global de Edifícios sobre Fundações Profundas Considerando a Interação Solo-Estrutura. Mestrado, EESC/USP, São Carlos.
- Lucena, A. E. F. L. (2003). Monitoramento de Recalques de Edifícios e Avaliação da Interação Solo-Estrutura. Mestrado, UFPB/CG, Campina Grande.
- Machado, J. (1958), Estudo comparativo de recalques calculados e observados em fundações diretas em Santos. Anais, II COBRAMSEF, Recife e Campina Grande, Vol. 1, pp. 21-36.
- Maia, P.C.A.; Barros, R.A.; Saboya. F.A. (2004). Acompanhamento de Recalques de Fundação em Estacas Hélice na Região de Campos dos Goytacazes. Proc. SEFE V, pp.441-449, São Paulo, Brasil.

- Medeiros, D.D. (2006) Análise tridimensional da interação solo-estrutura em fundações de concreto armado pelo método dos elementos finitos. Mestrado. UFRGS, Porto Alegre.
- Mendonça, J. C. (2000), Um Modelo Computacional de Análise da Interação Estrutura-Macço de Solos em Edifícios. Mestrado, EESC/USP, São Carlos.
- Meyerhof, G.G. (1953). Some recent foundation research and its application to design. *Structural Engineering*. V. 13, pp. 151-167. Londres.
- Meyerhof, G.G. (1956) Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils. *J.S.M.F.D., A.S.C.E.*, Vol. 82, nº SM1, pp866-1. Apud Velloso e Lopes (1997)
- Milfont, M. L. B. (1999), Interação Solo-Estrutura de Fundações em Grelha sobre Base Elástica. Mestrado, Departamento de Engenharia Civil/UFPE, Recife.
- Milititsky, J.; Consoli, N.C.; Schnaid, F. (2008). *Patologia das Fundações*. Oficina dos Textos, 2ª Edição, 207p.; São Paulo, Brasil.
- Mota, M.M.C. (2009). Interação Solo-Estrutura em Edifícios com Fundação Profunda: Método Numérico e Resultados Observados no Campo. Doutorado, EESC/USP, São Carlos.
- Moura, A. R. L. U. (1995). Interação solo – estrutura em edifícios. Recife. Dissertação (Mestrado). Centro de Tecnologia e Geociências / Universidade Federal de Pernambuco.
- Polshin, D.E. e Tokar, R.A. (1957). Maximum allowable non-uniform settlement of structures, *Proceedings 4th. ICSMFE*, London, Vol. 1, pp. 402-405. Apud VELLOSO e LOPES (1997).
- Poulos, H. G. (1975). Soil – structure interaction. In: *X ICSMFE*, Estocolmo, ISSMFE. *Proceedings*. v. IV, p. 307-334; apud IWAMOTO (2003).
- Reis, J. H. C. (2000), Interação Solo-Estrutura de Grupo de Edifícios com Fundações Superficiais em Argila Mole. Mestrado, EESC/USP, São Carlos.
- Ribeiro, D.B. (2005). Análise da Interação Solo-Estrutura via Acoplamento MEC-MEF. Mestrado, EESC/USP, São Carlos.

- Rosa, L. M. P. (2005), Interação Solo-Estrutura – Análise de um Caso de Obra Envolvendo Danos Estruturais. Mestrado, UFF, Niterói.
- Russo Neto, L. (2005), Interpretação de Deformação e Recalque na Fase de Montagem de Estrutura de Concreto com Fundação em Estaca Cravada. Doutorado, EESC/USP, São Carlos.
- Savaris, G. (2008), Monitoração de Recalques de um Edifício e Avaliação da Interação Solo-Estrutura. Mestrado, Laboratório de Engenharia Civil – UENF, Campos dos Goytacazes, Brasil.
- Skempton A.W.; Macdonald D.H. (1956), Allowable settlements of buildings. Proceedings Institution of Civil Engineers, London, Part 3, Vol. 5, pp. 727-768. Apud VELLOSO e LOPES (1997).
- Silva, M. K. (2005), Interação Solo-Estrutura – Uma Contribuição à Interpretação dos Registros Experimentais. Mestrado, UFF, Niterói.
- Soares, J. M. (2004), Estudo Numérico-Experimental da Interação Solo-Estrutura em Dois Edifícios do Distrito Federal. Doutorado, UnB, Brasília.
- USACE – UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1987. Engineering and Design – Instrumentation for Concrete Structures. Washington, DC 20314-1000, Department of the Army.
- Vargas, M. E. Silva, F.R. (1973). O problema das fundações de edifícios altos: experiência em São Paulo, Anais, Conferência Regional Sul-Americana Sobre Edifícios Altos, Porto Alegre. Apud VELLOSO e LOPES (1997).
- Vitoreti, M.M. (2003), Análise da Interação Solo-Estrutura em Fundações de Concreto Armado pelo Método dos Elementos Finitos. Mestrado, UFRGS, Porto Alegre.

ANEXO A – PROJETOS DOS PILARES MONITORADOS

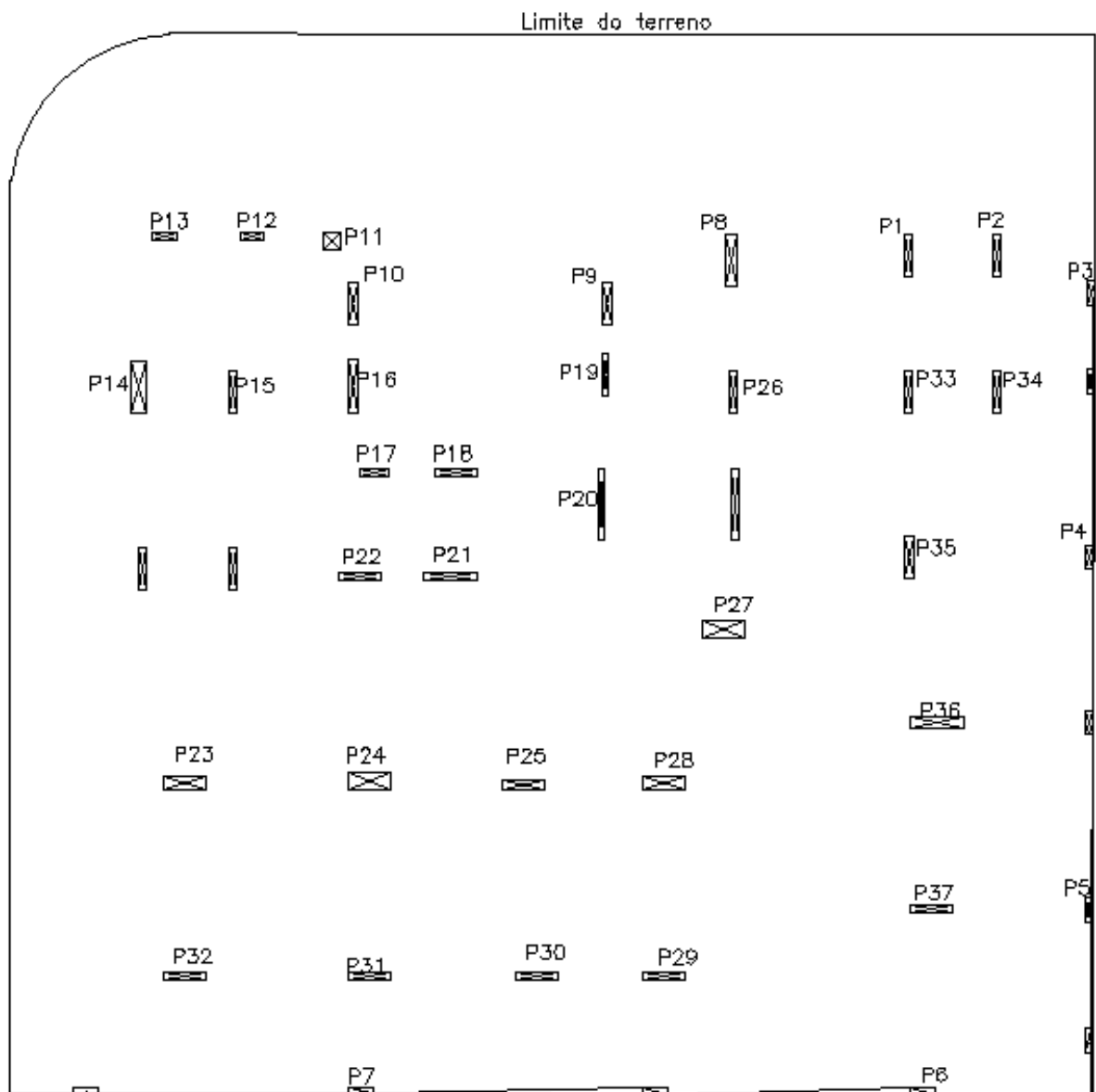


Figura A. 1 - Projeto dos pilares monitorados do Edifício 1.

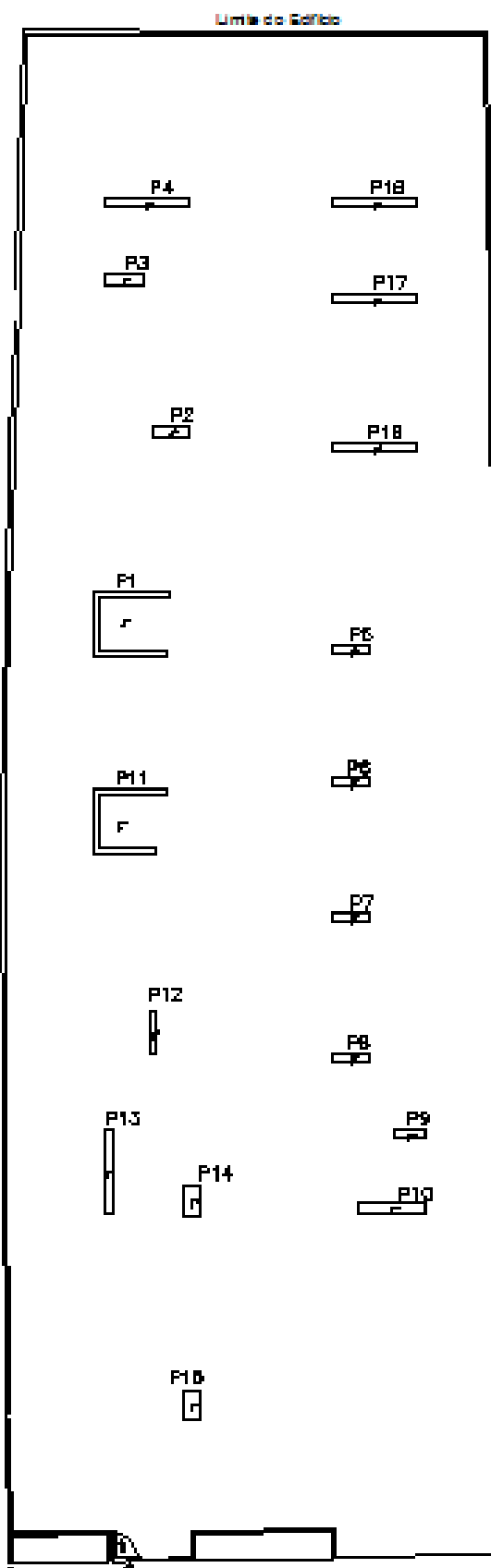


Figura A. 2 - Projeto dos pilares monitorados do Edifício 2.

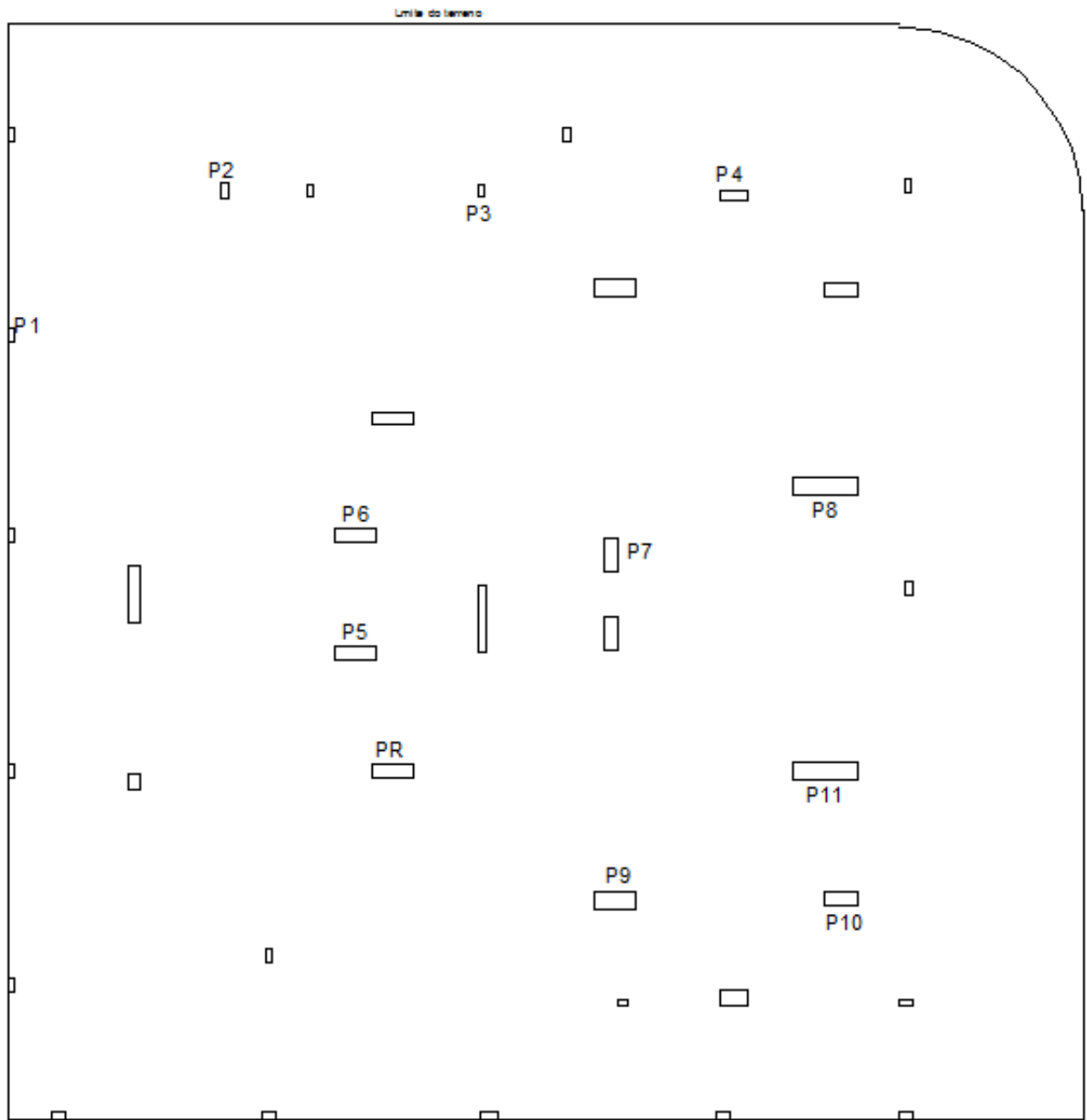


Figura A. 3 – Projeto dos pilares monitorados do Edifício 3.

ANEXO B – CURVAS DE CARGA vs RECALQUE

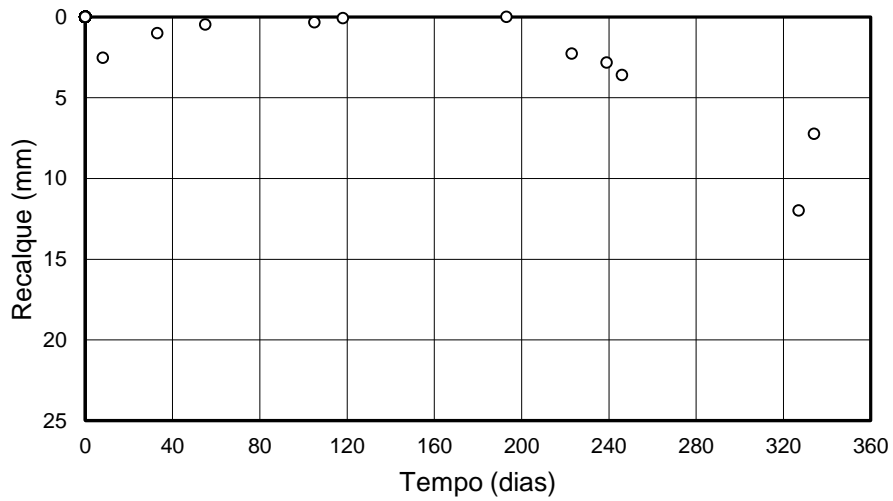


Figura B. 1 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 1 do Edifício 1.

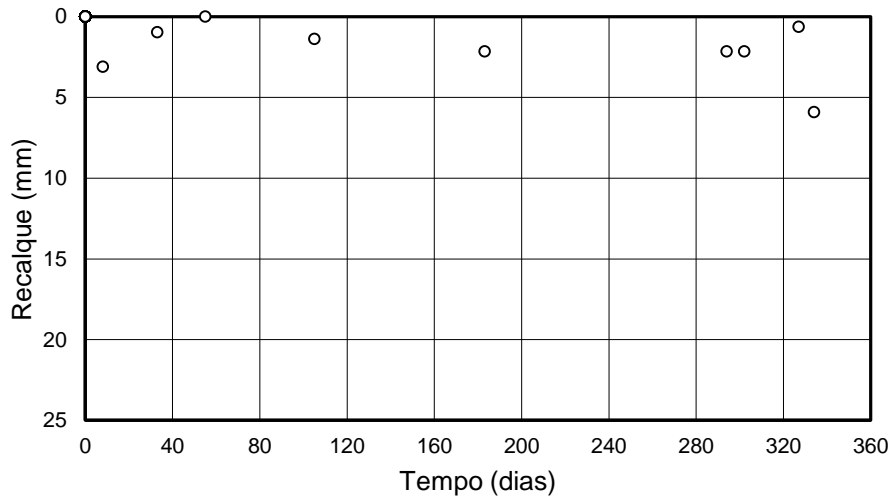


Figura B. 2 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 2 do Edifício 1.

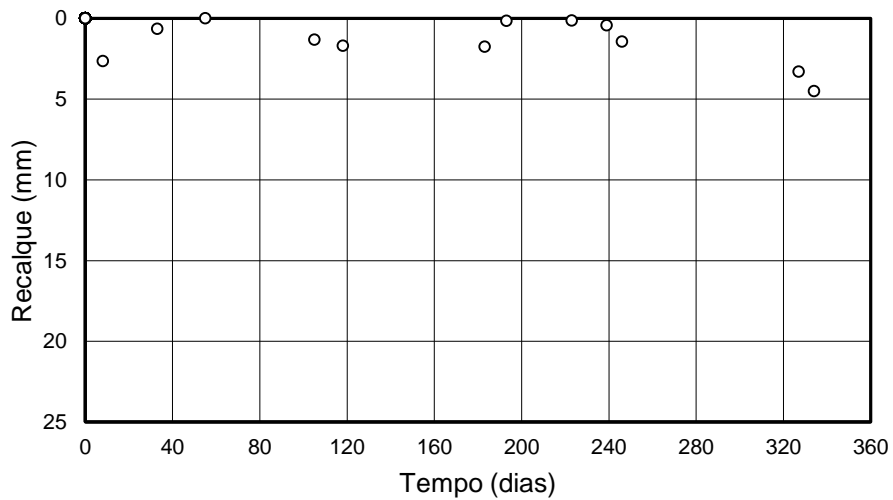


Figura B. 3 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 3 do Edifício 1.

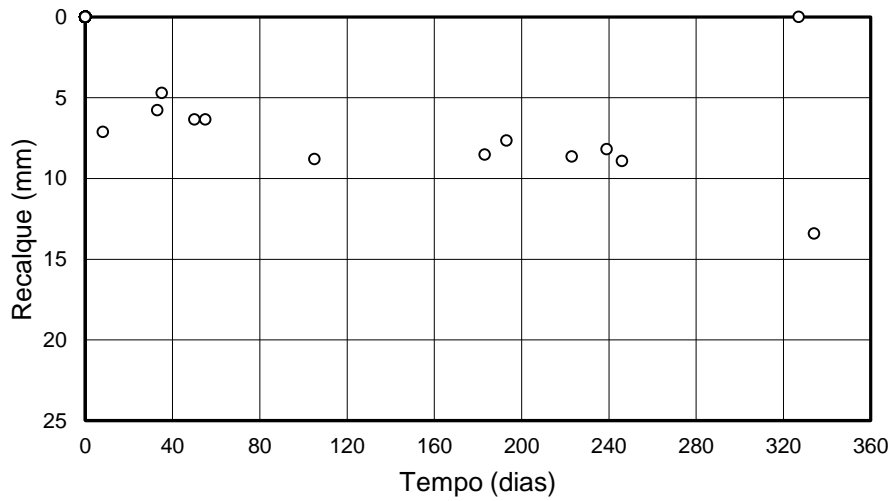


Figura B. 4 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 4 do Edifício 1.

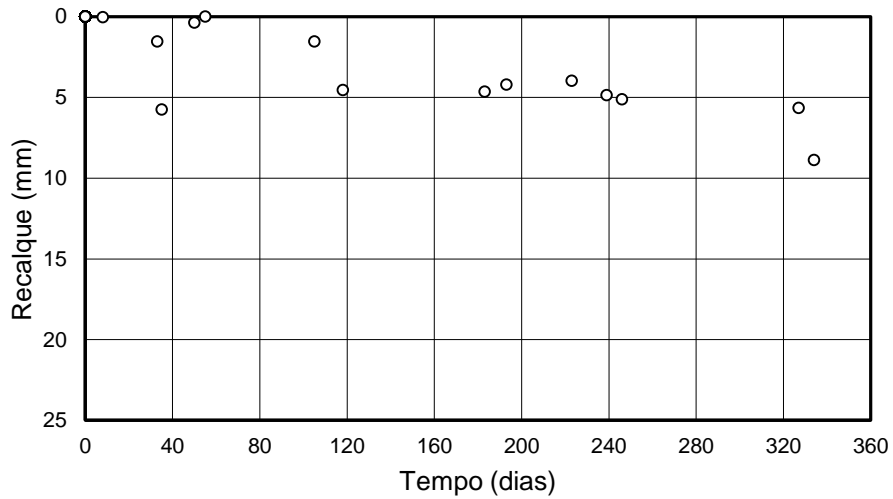


Figura B. 5 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 5 do Edifício 1.

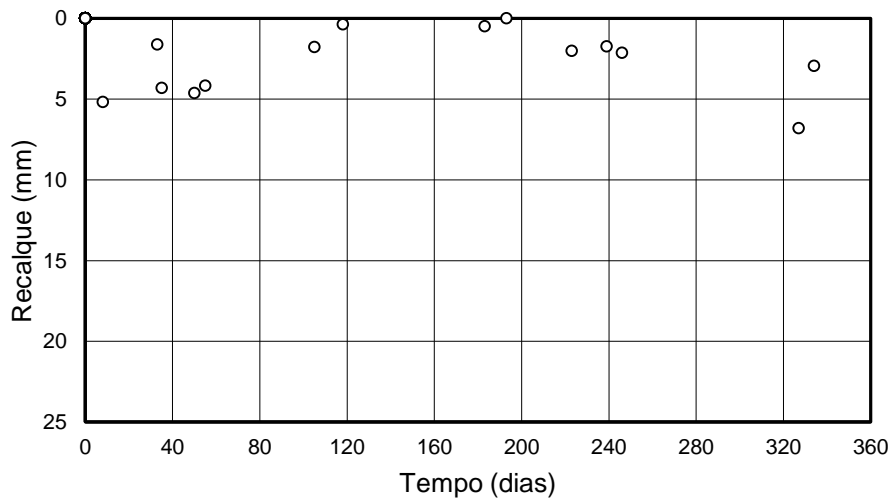


Figura B. 6 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 6 do Edifício 1.

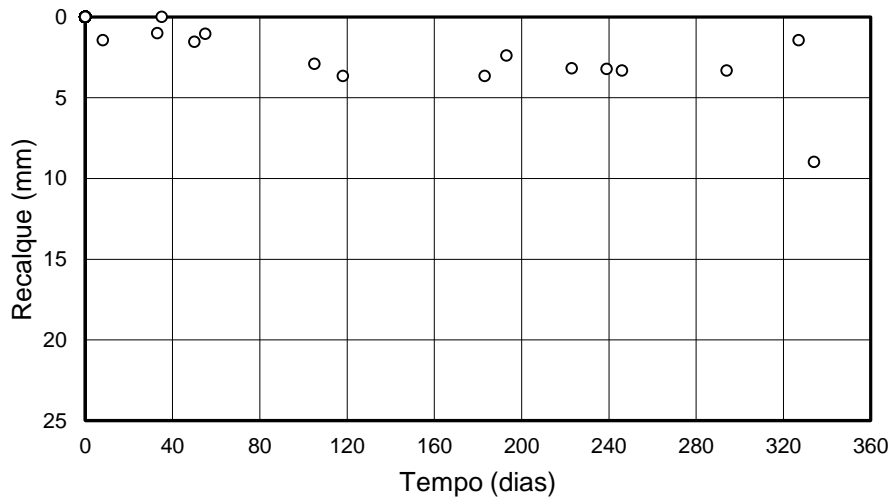


Figura B. 7 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 7 do Edifício 1.

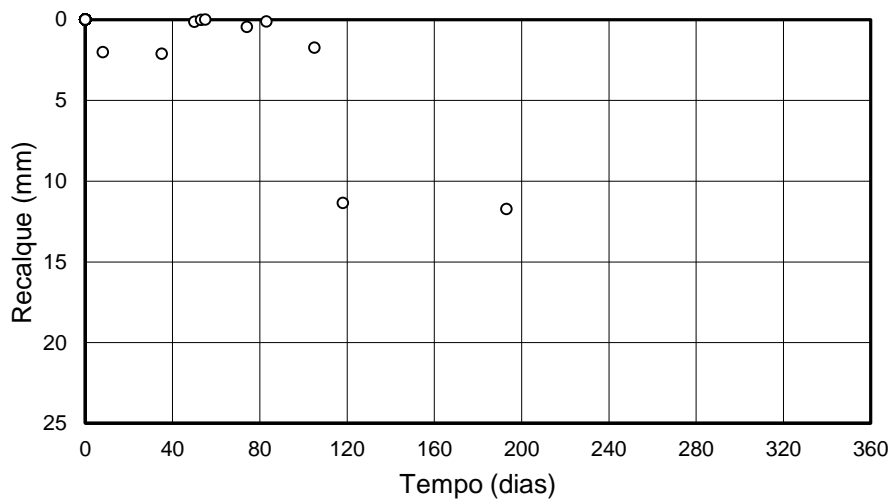


Figura B. 8 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 8 do Edifício 1.

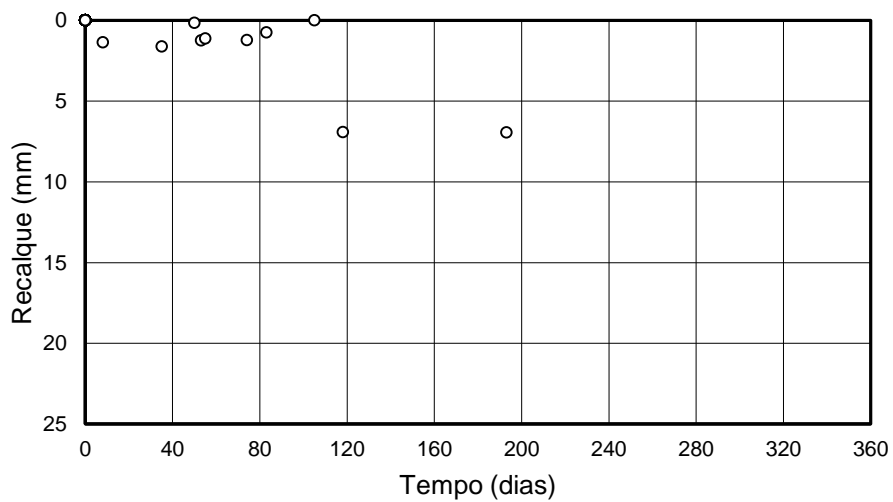


Figura B. 9 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 9 do Edifício 1.

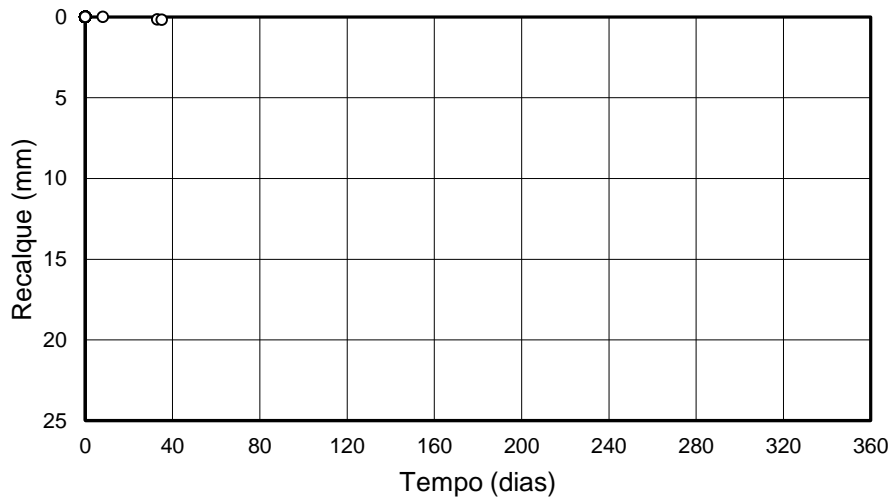


Figura B. 10 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 10 do Edifício 1.

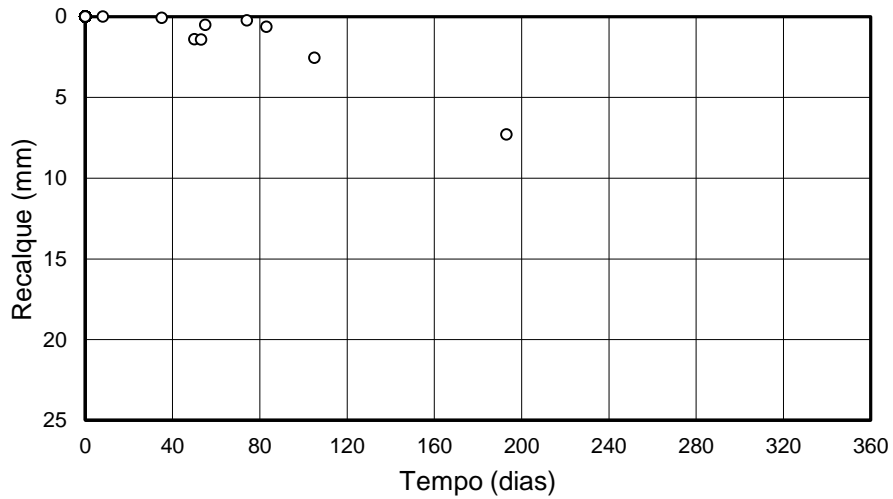


Figura B. 11 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 11 do Edifício 1.

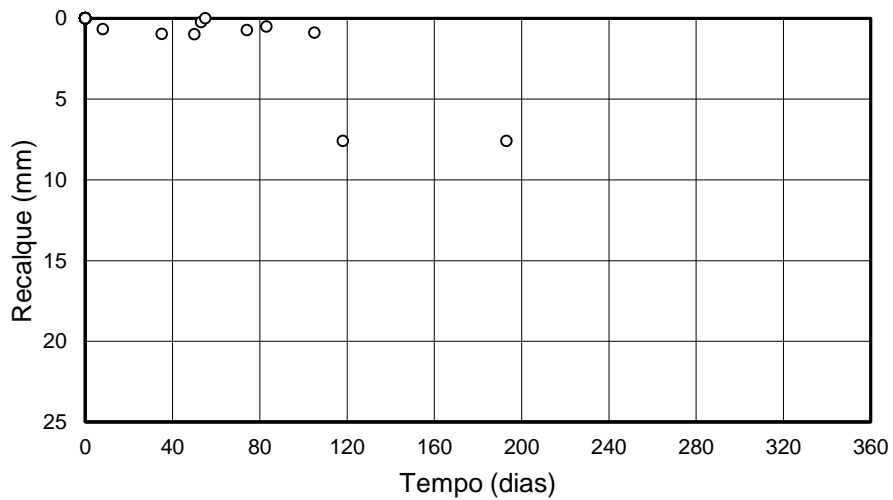


Figura B. 12 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 12 do Edifício 1.

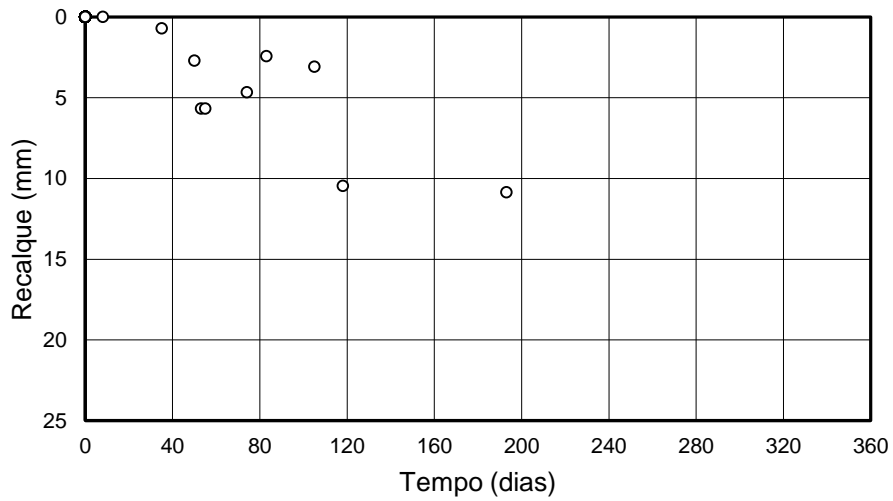


Figura B. 13 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 13 do Edifício 1.

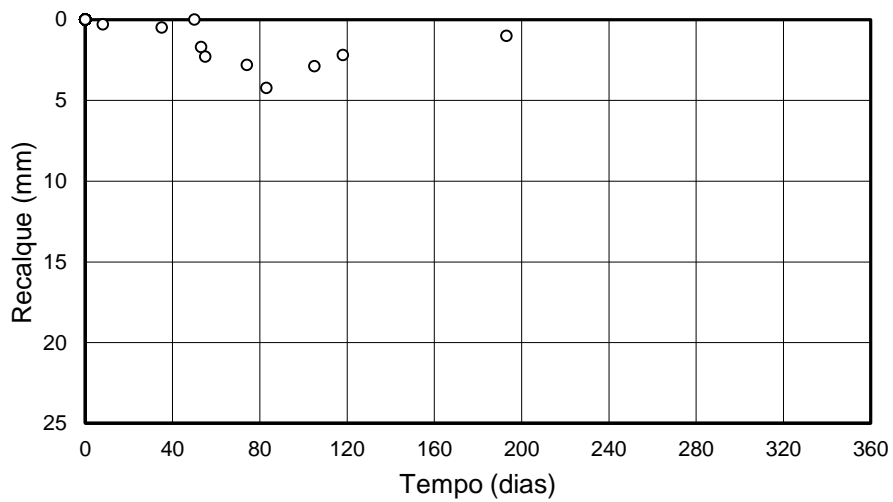


Figura B. 14 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 14 do Edifício 1.

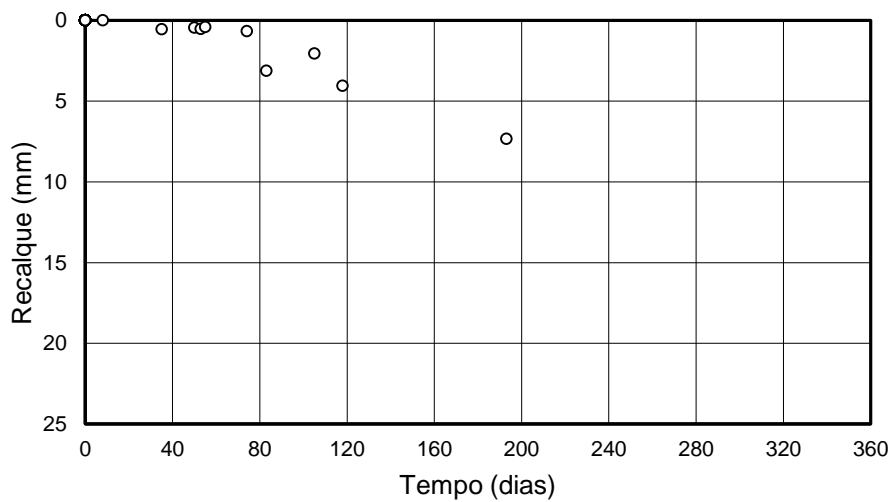


Figura B. 15 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 15 do Edifício 1.

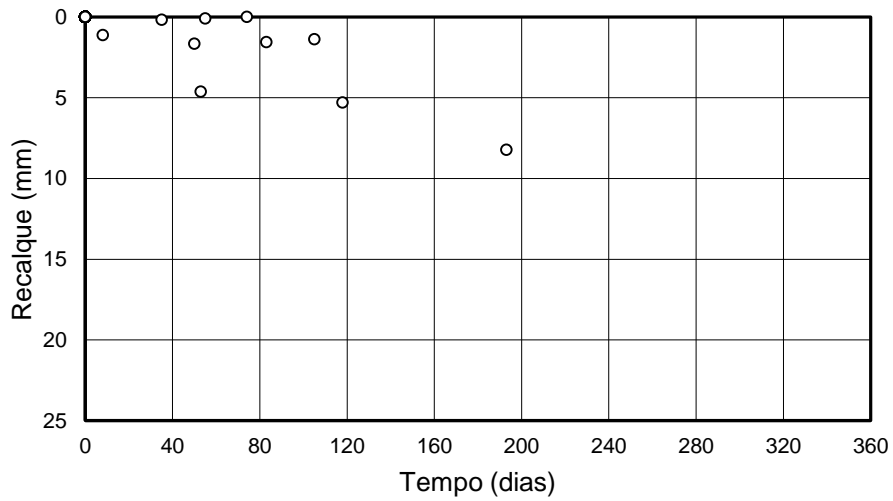


Figura B. 16 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 16 do Edifício 1.

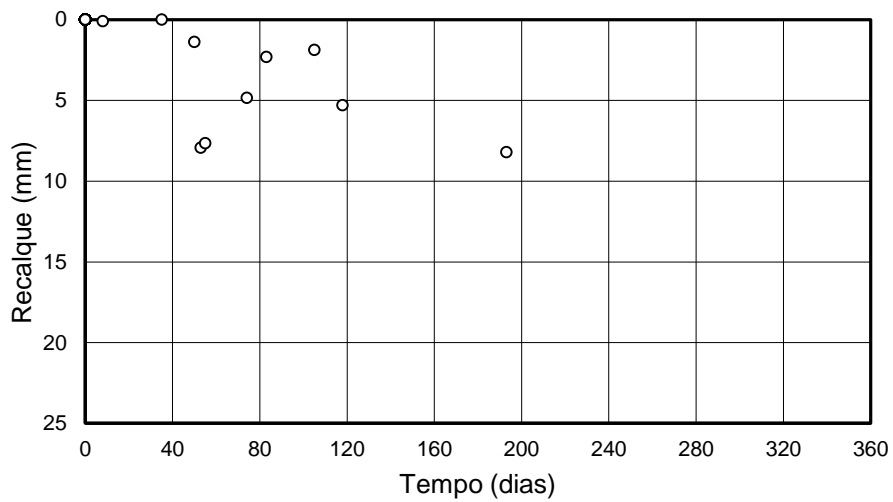


Figura B. 17 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 17 do Edifício 1.

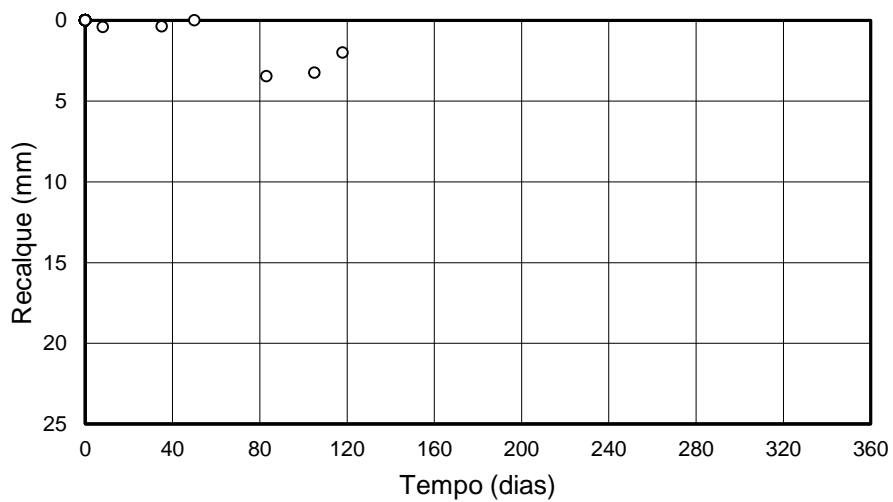


Figura B. 18 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 18 do Edifício 1.

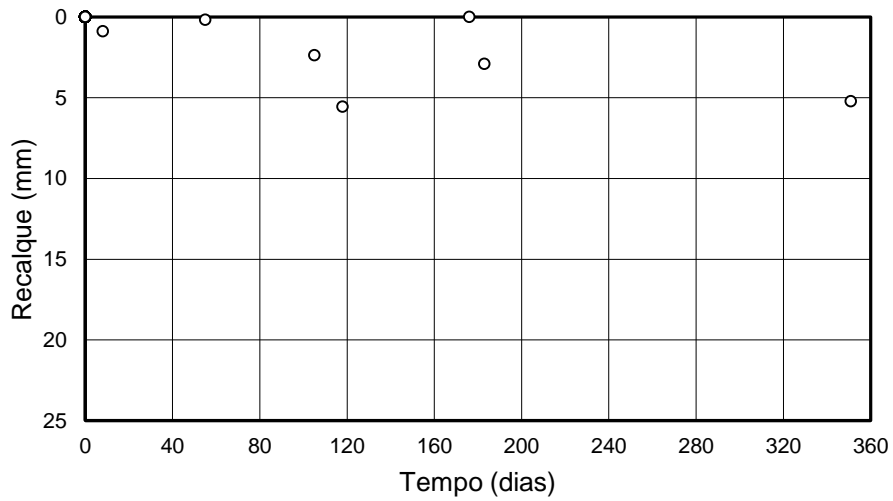


Figura B. 19 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 19 do Edifício 1.

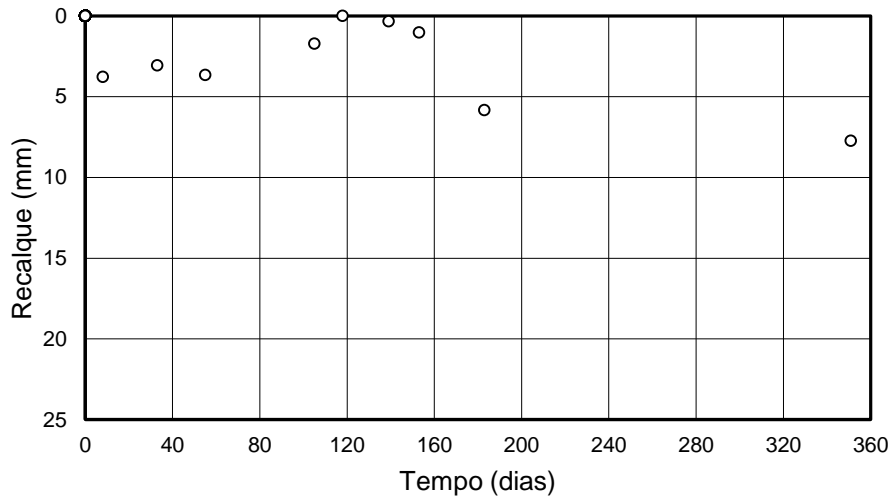


Figura B. 20 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 20 do Edifício 1.

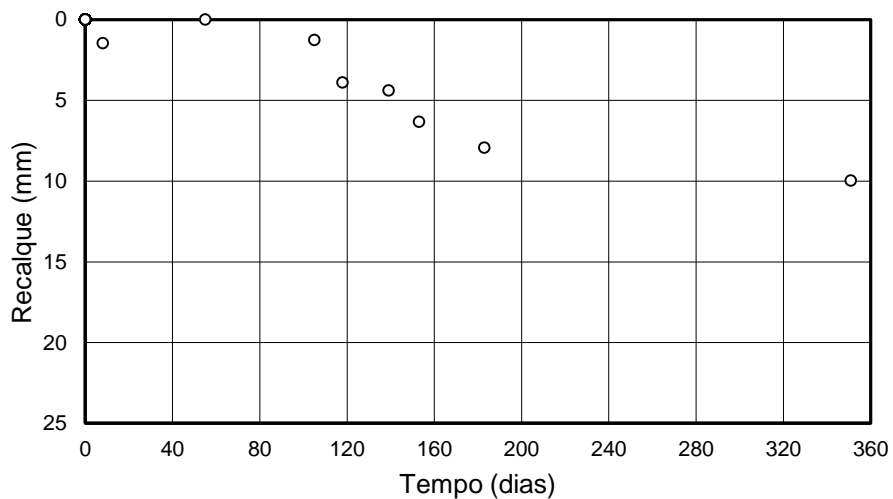


Figura B. 21 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 21 do Edifício 1.

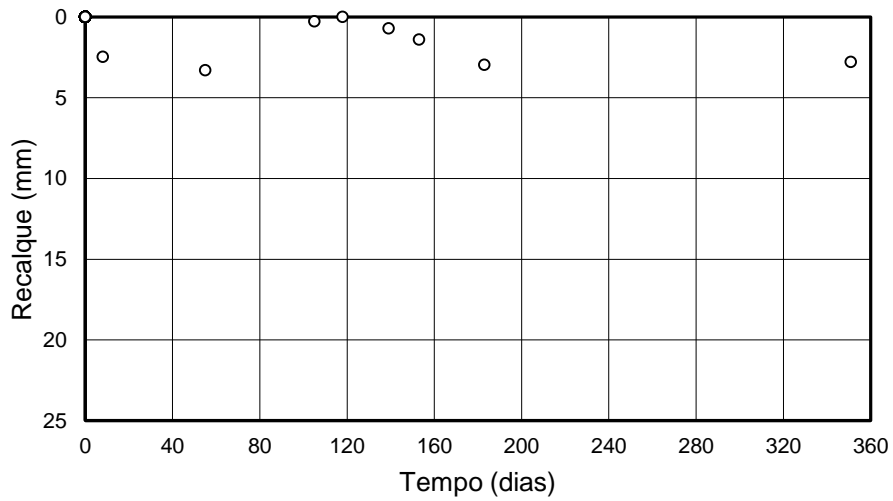


Figura B. 22 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 22 do Edifício 1.

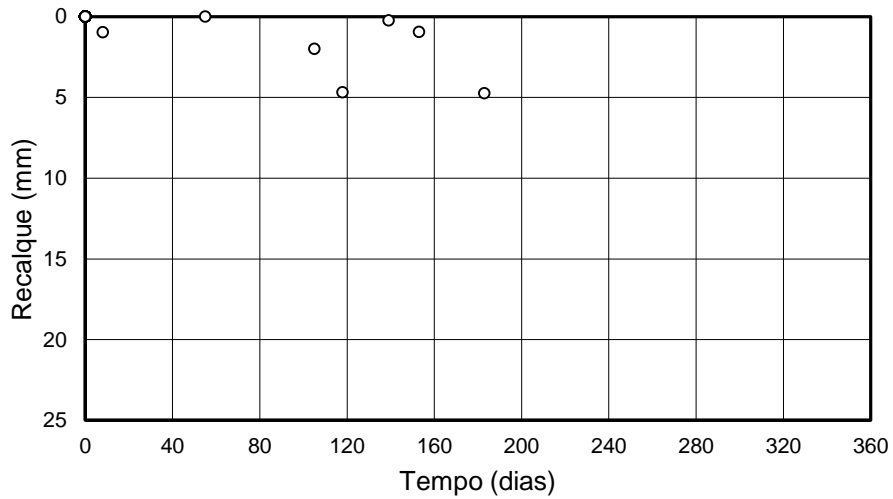


Figura B. 23 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 23 do Edifício 1.

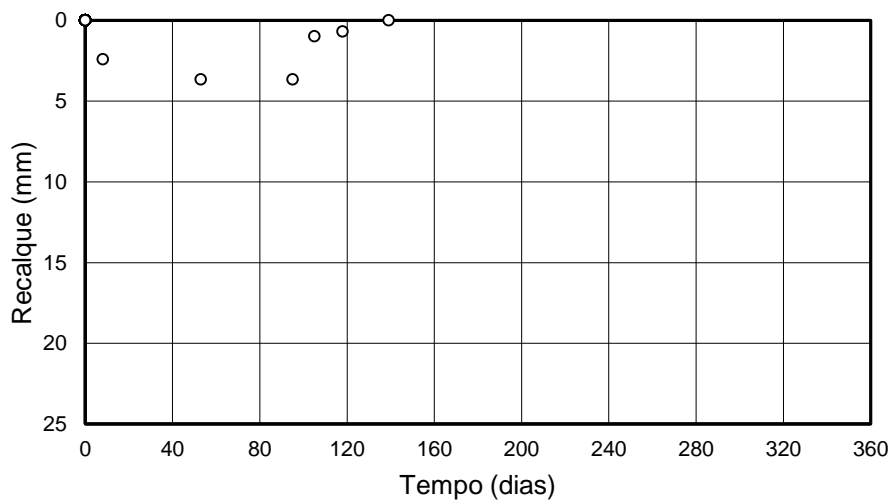


Figura B. 24 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 24 do Edifício 1.

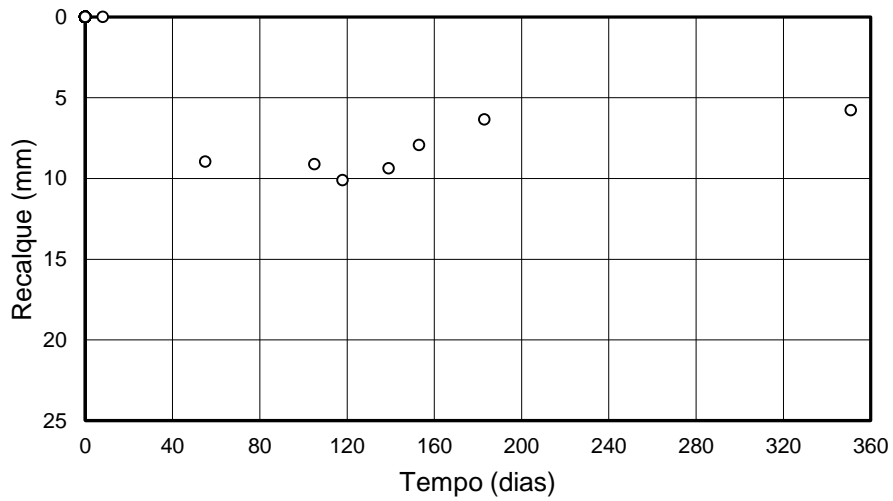


Figura B. 25 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 25 do Edifício 1.

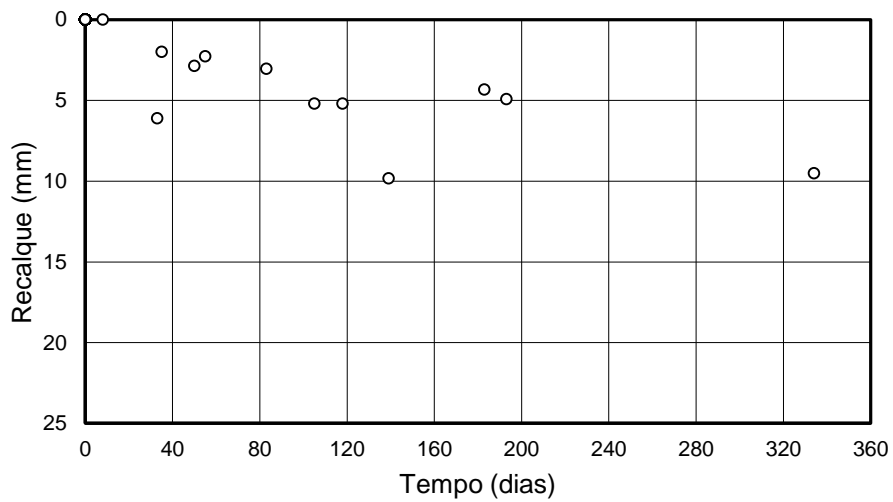


Figura B. 26 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 26 do Edifício 1.

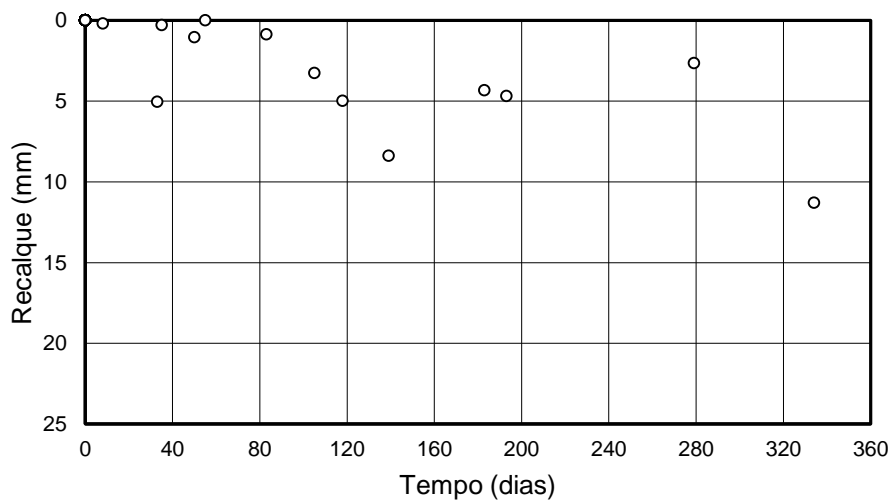


Figura B. 27 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 27 do Edifício 1.

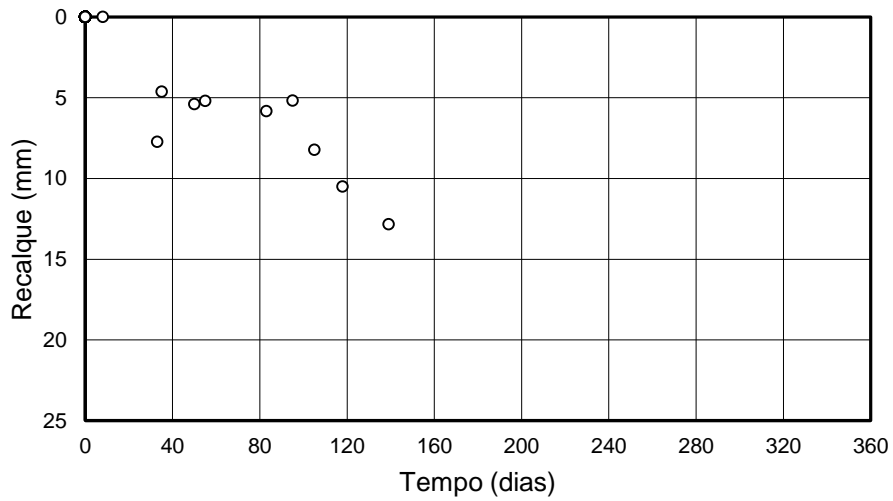


Figura B. 28 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 28 do Edifício 1.

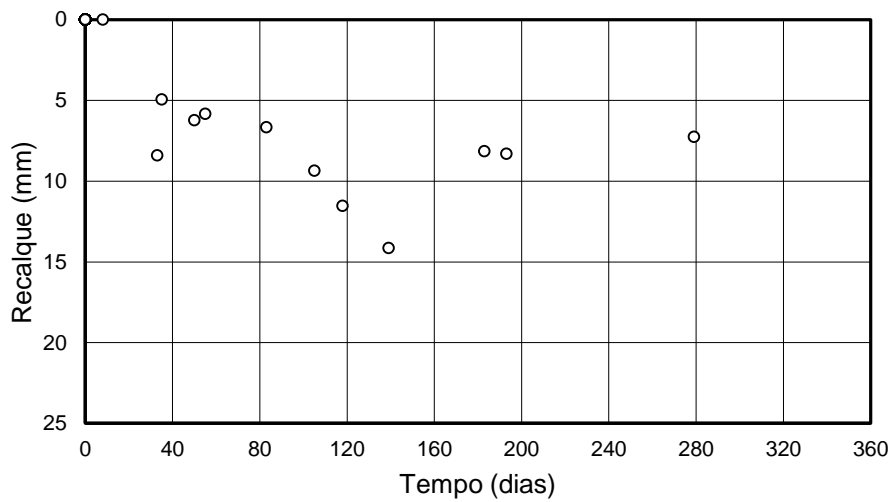


Figura B. 29 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 29 do Edifício 1.

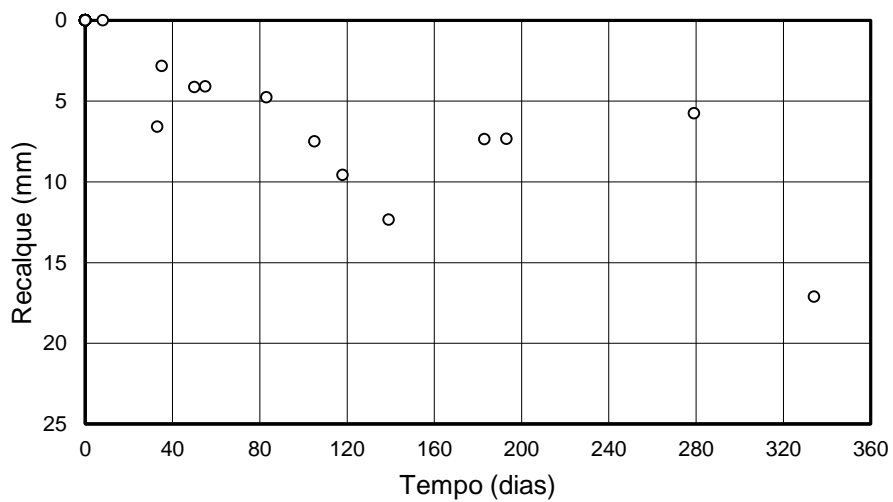


Figura B. 30 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 30 do Edifício 1.

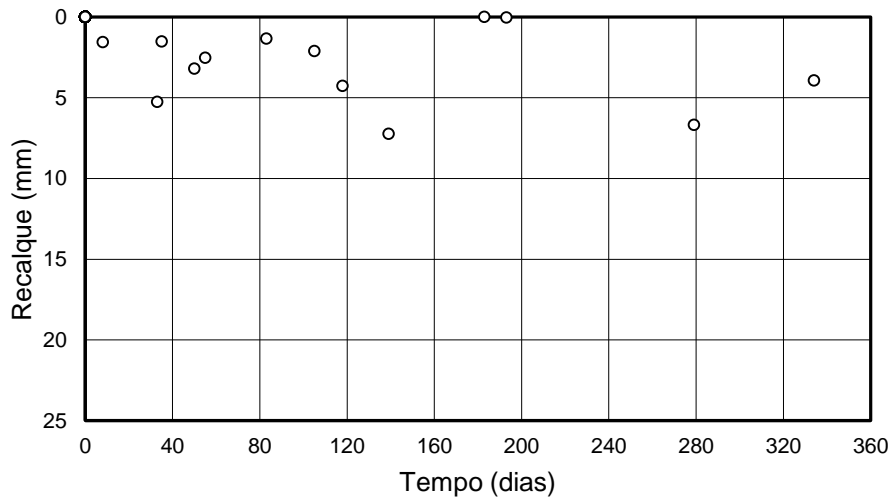


Figura B. 31 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 31 do Edifício 1.

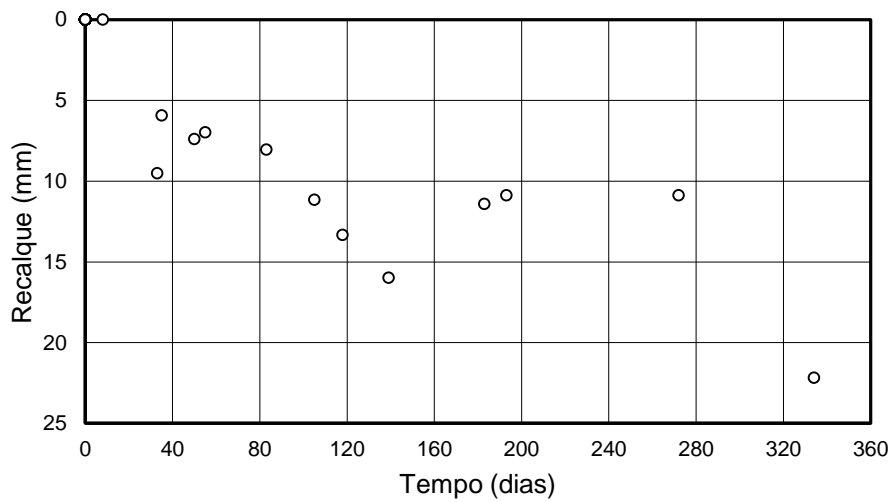


Figura B. 32 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 32 do Edifício 1.

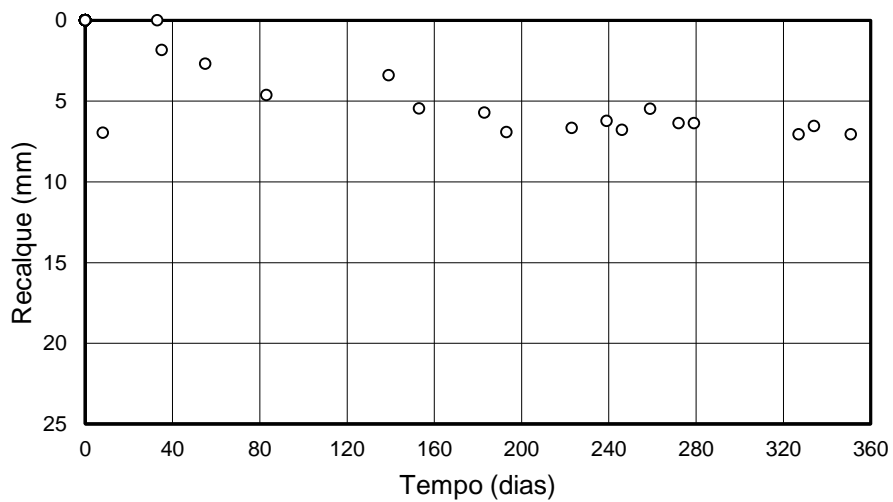


Figura B. 33 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 33 do Edifício 1.

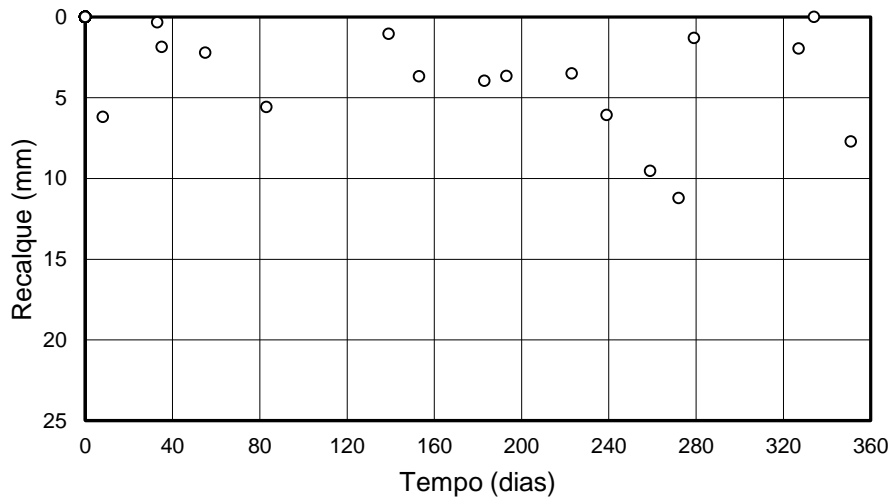


Figura B. 34 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 34 do Edifício 1.

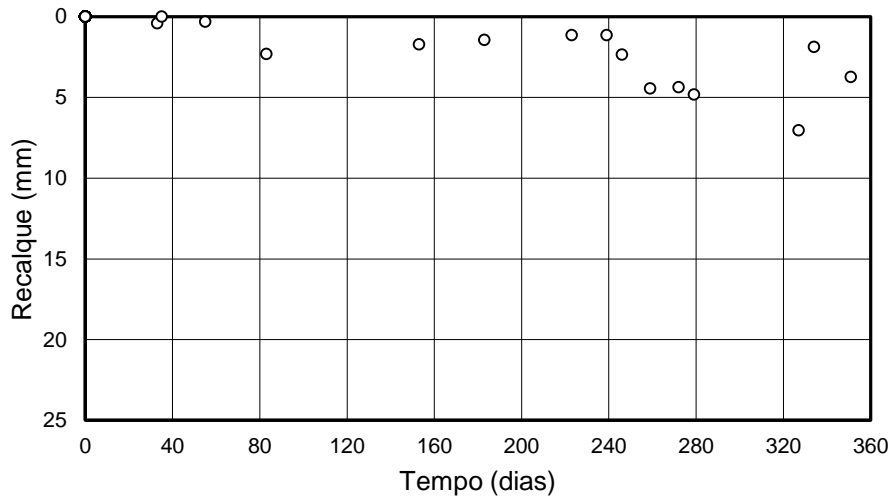


Figura B. 35 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 35 do Edifício 1.

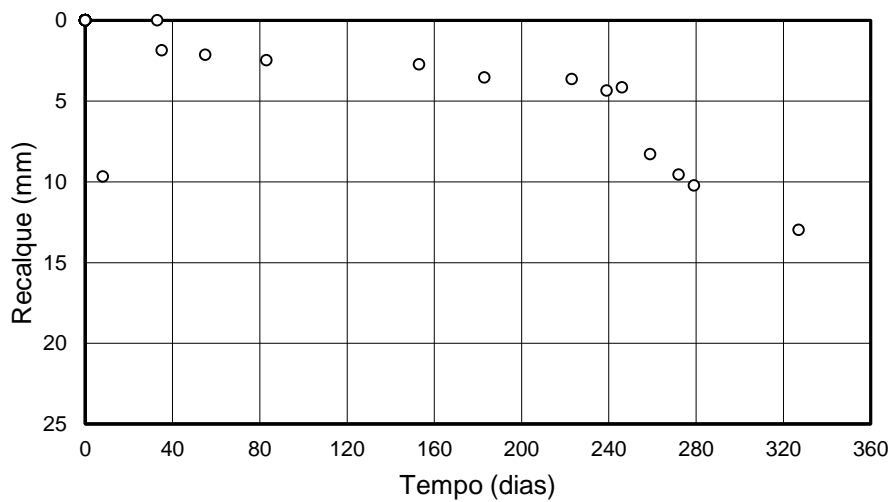


Figura B. 36 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 36 do Edifício 1.

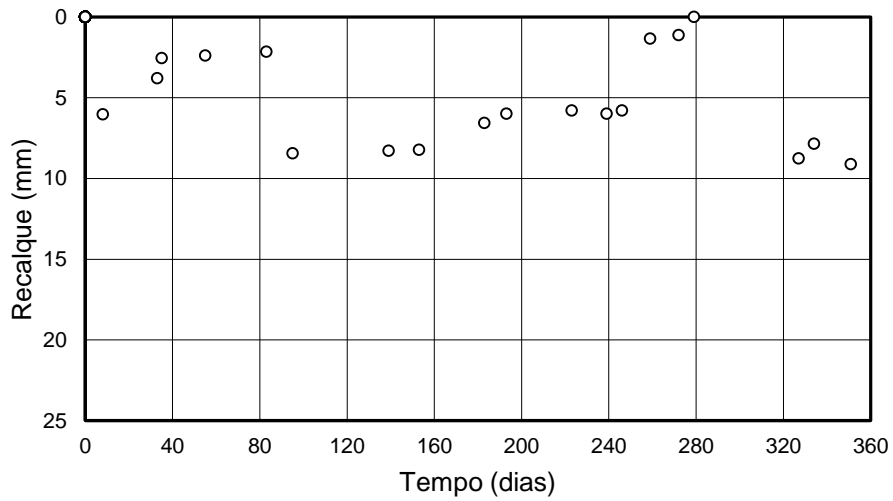


Figura B. 37 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 37 do Edifício 1.

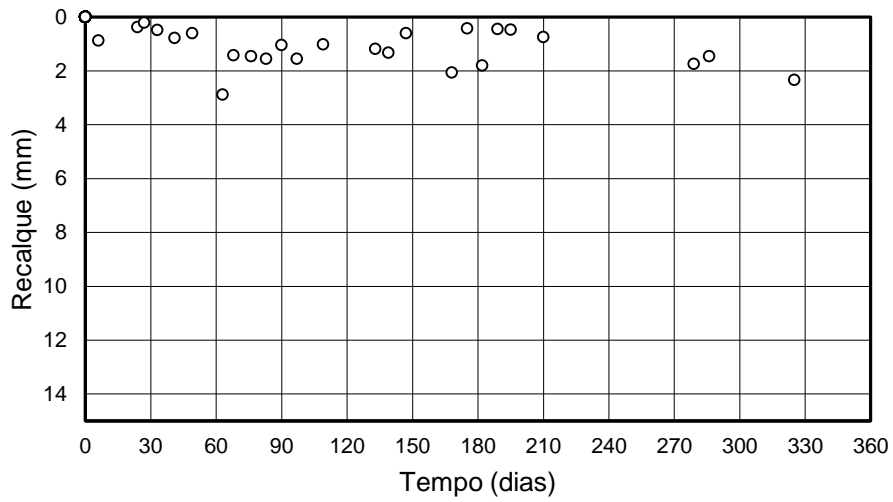


Figura B. 38 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 1 do Edifício 2.

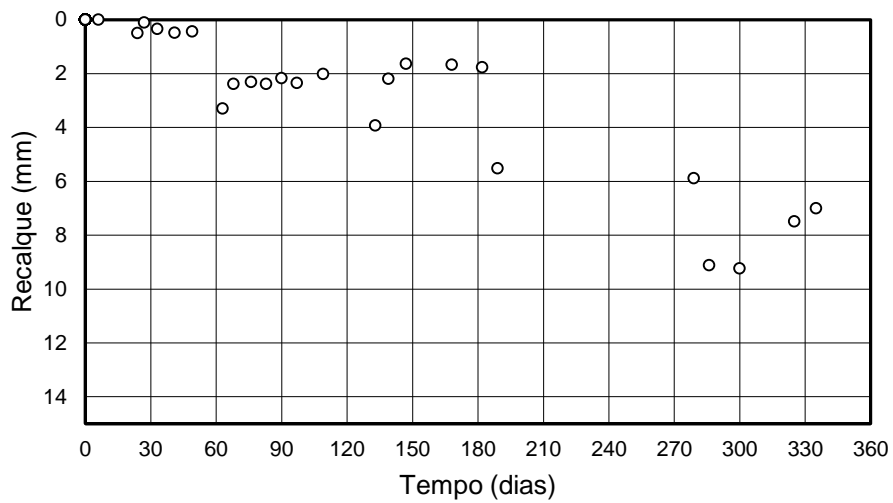


Figura B. 39 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 2 do Edifício 2.

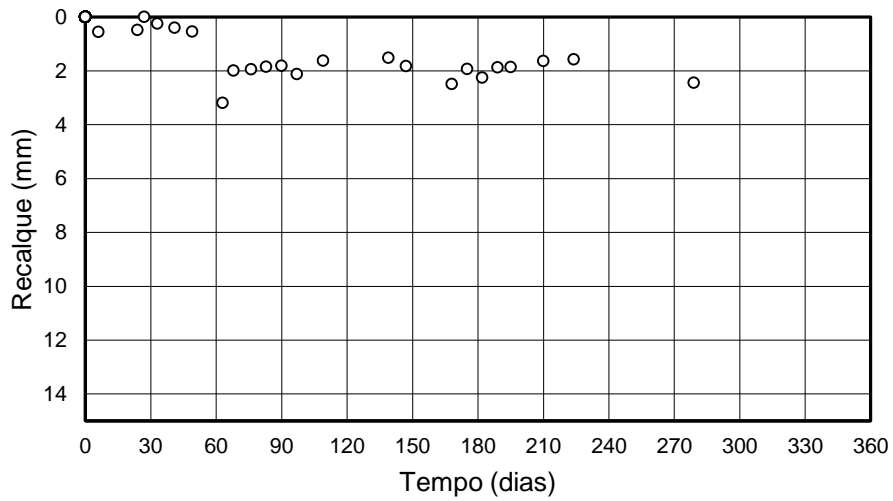


Figura B. 40 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 3 do Edifício 2.

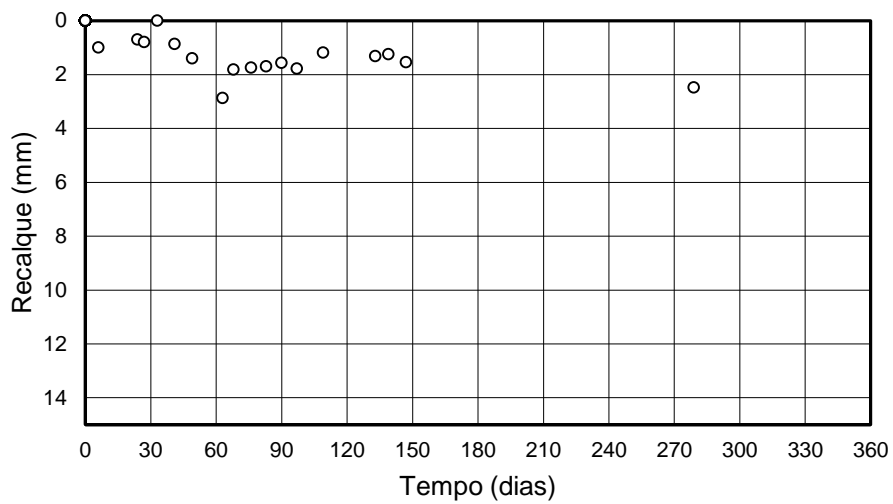


Figura B. 41 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 4 do Edifício 2.

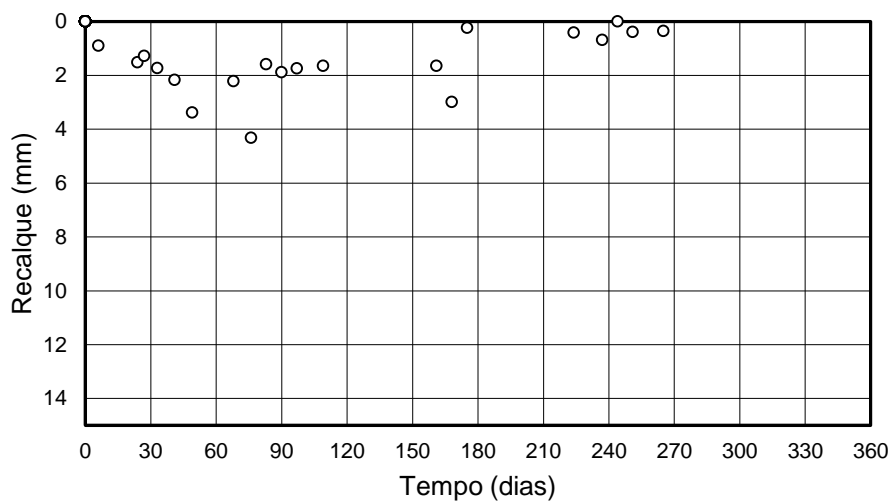


Figura B. 42 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 5 do Edifício 2.

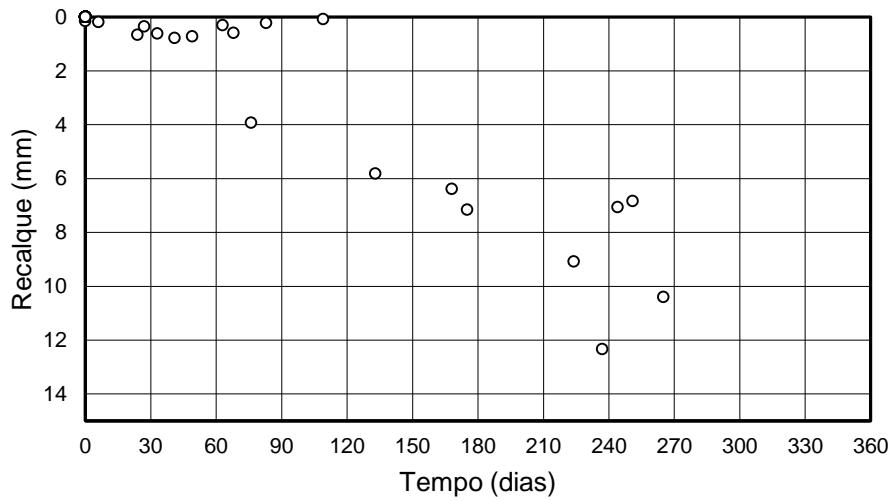


Figura B. 43 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 6 do Edifício 2.

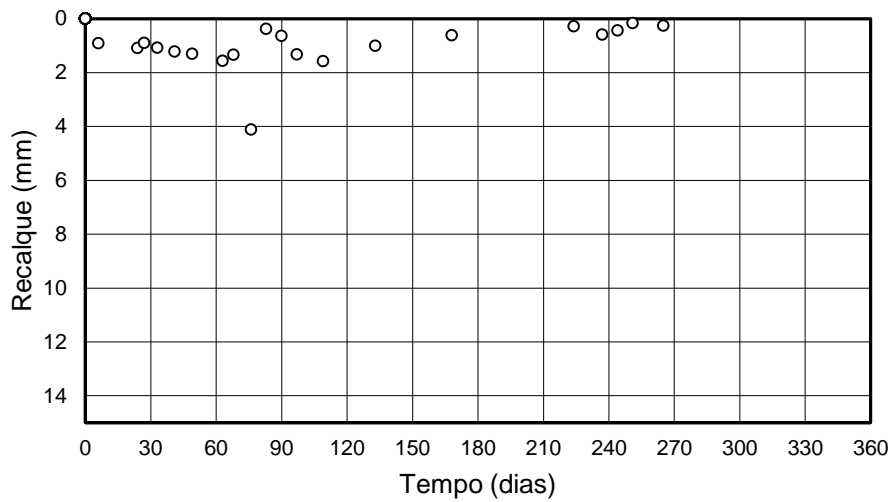


Figura B. 44 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 7 do Edifício 2.

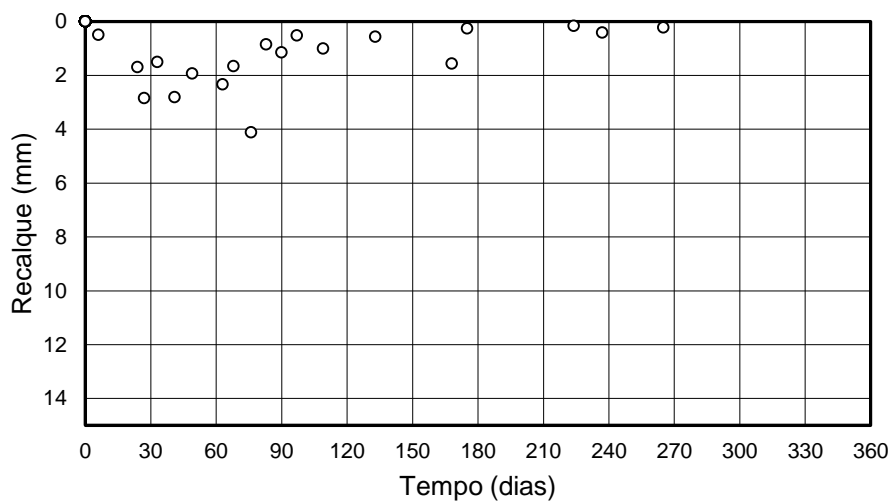


Figura B. 45 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 8 do Edifício 2.

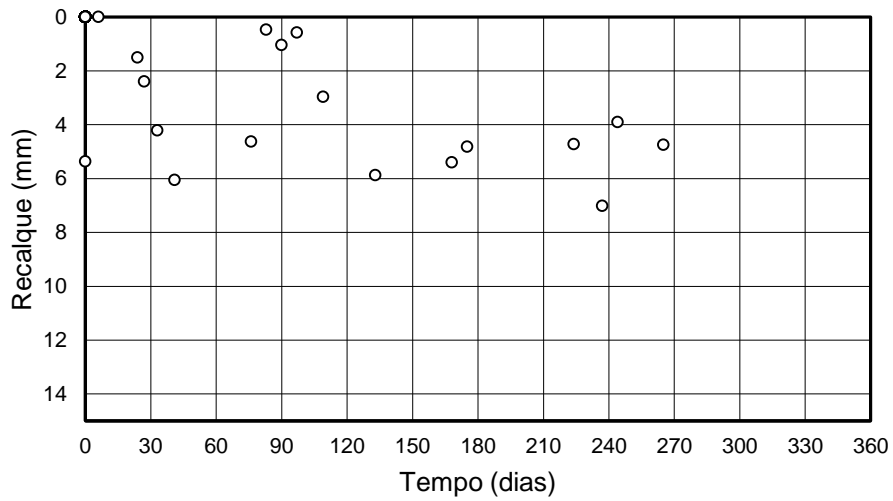


Figura B. 46 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 9 do Edifício 2.

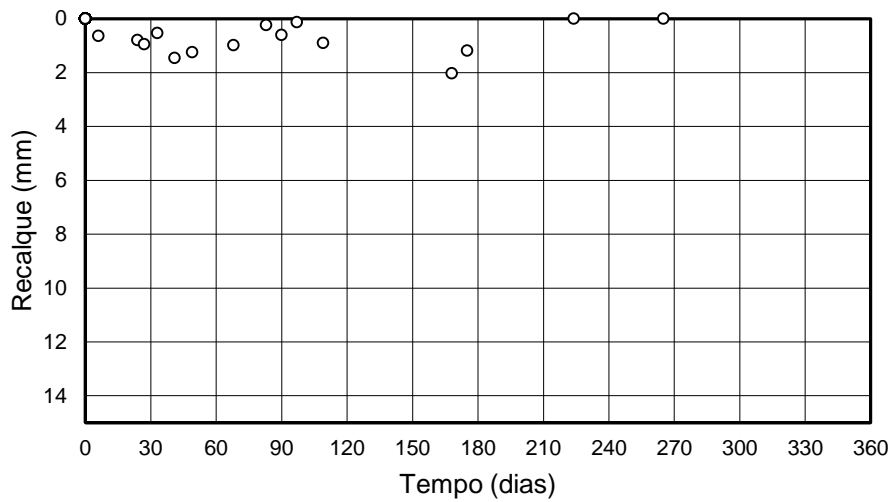


Figura B. 47 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 10 do Edifício 2.

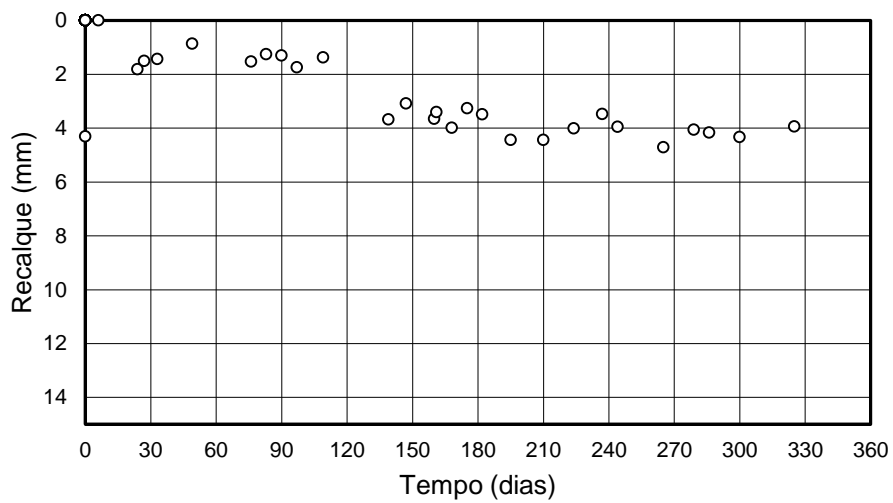


Figura B. 48 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 11 do Edifício 2.

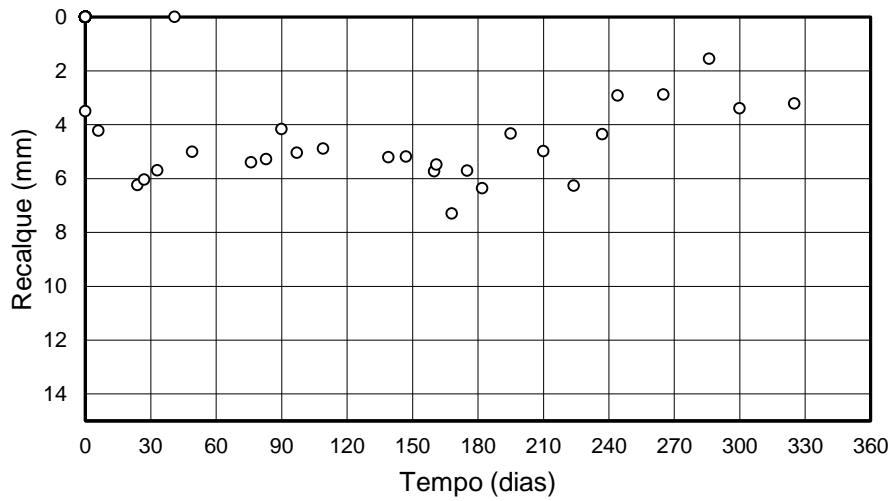


Figura B. 49 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 12 do Edifício 2.

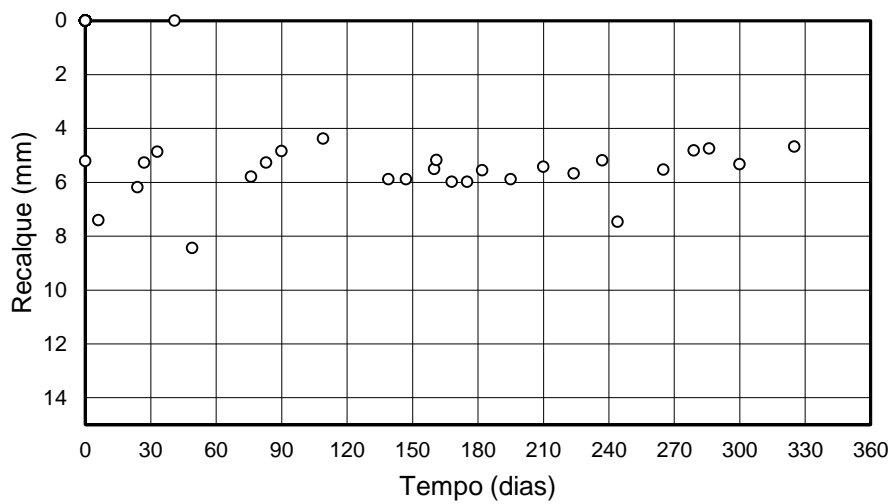


Figura B. 50 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 13 do Edifício 2.

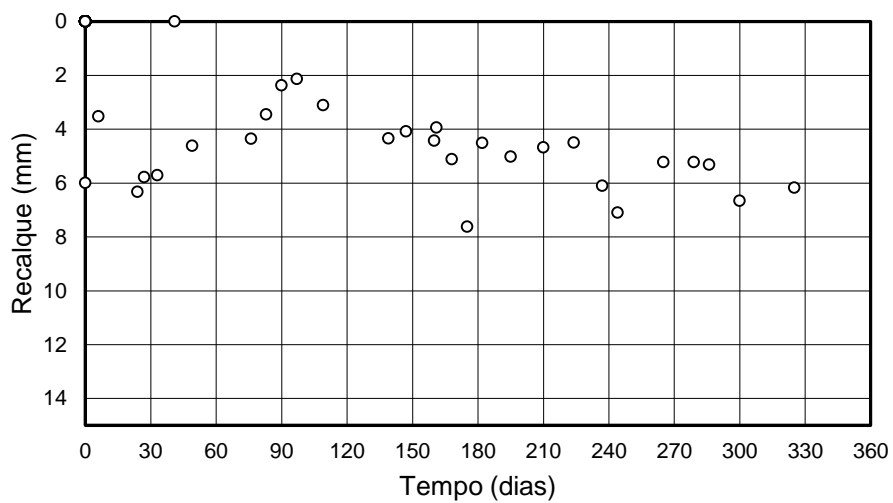


Figura B. 51 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 14 do Edifício 2.

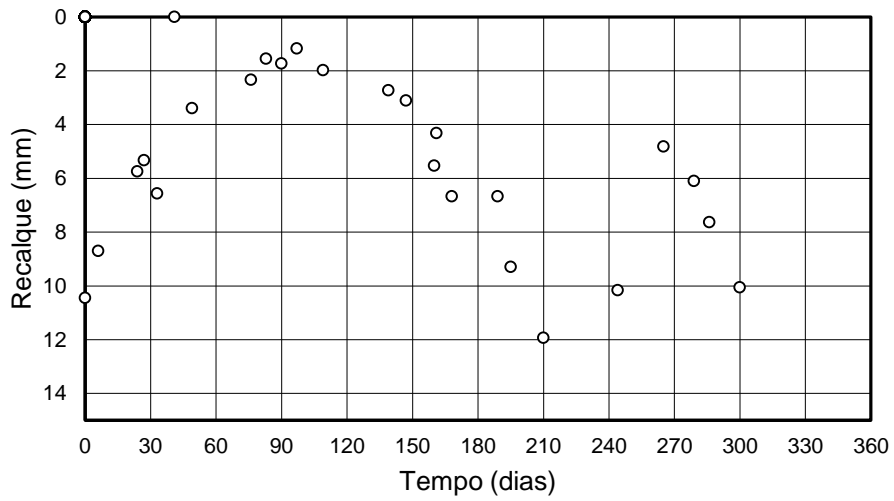


Figura B. 52 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 15 do Edifício 2.

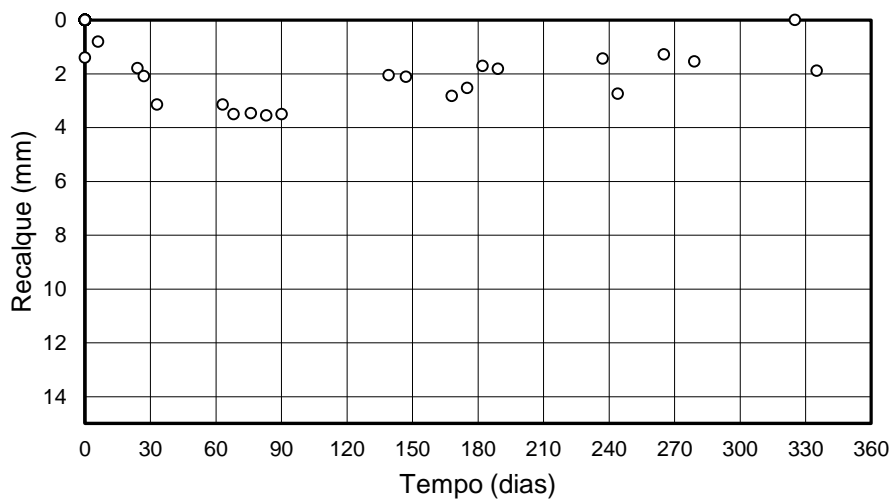


Figura B. 53 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 16 do Edifício 2.

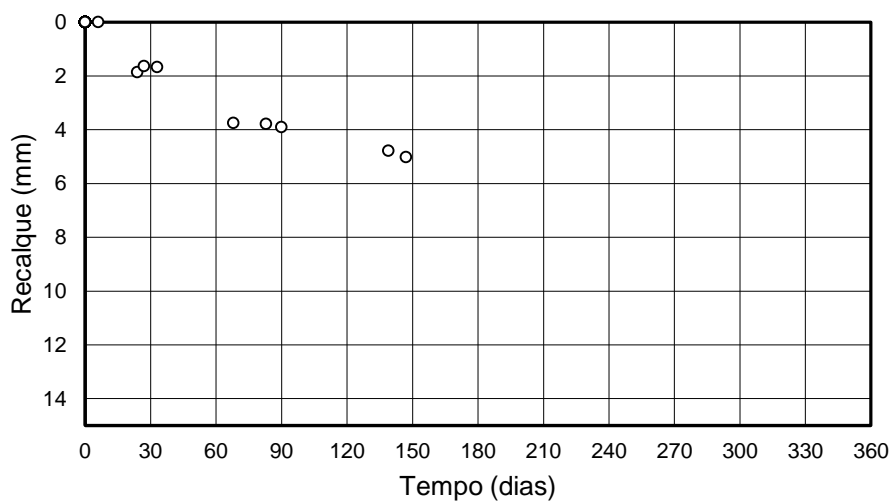


Figura B. 54 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 17 do Edifício 2.

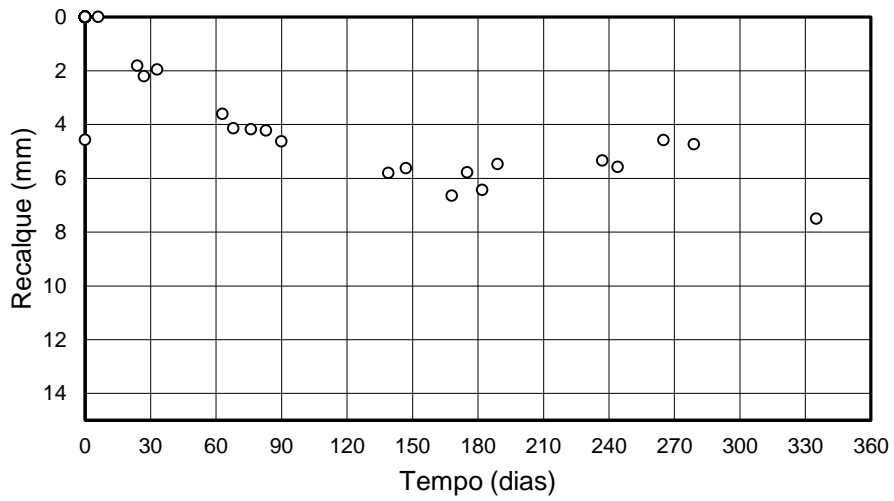


Figura B. 55 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 18 do Edifício 2.

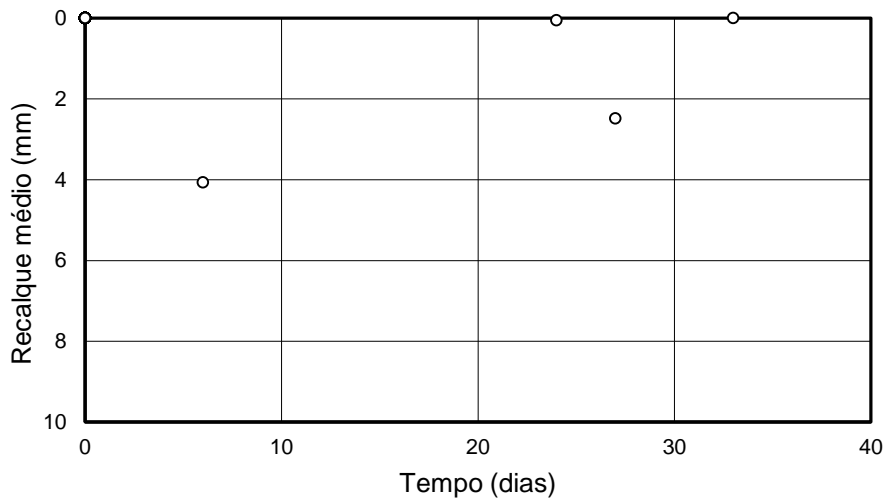


Figura B. 56 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar de referência do Edifício 3.

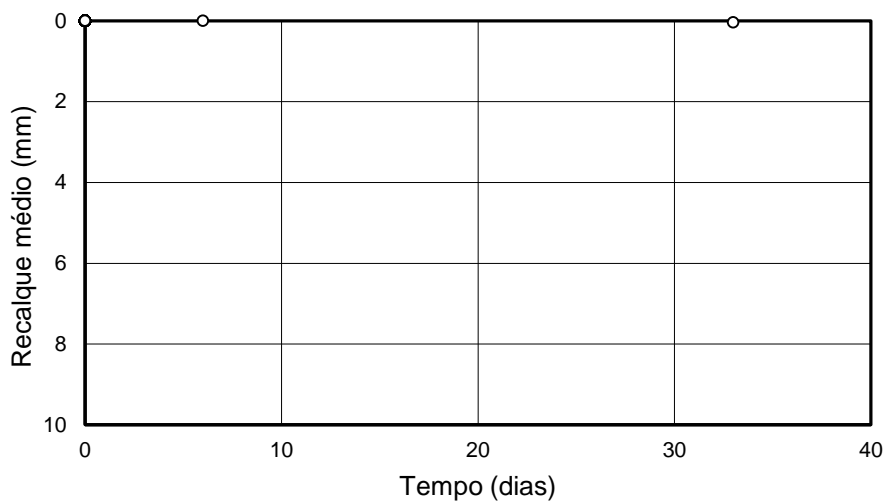


Figura B. 57 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 1 do Edifício 3.

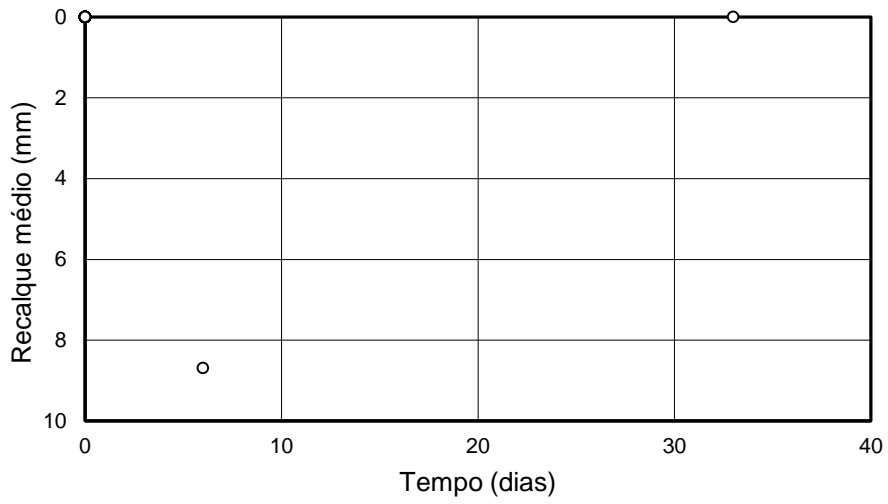


Figura B. 58 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 2 do Edifício 3.

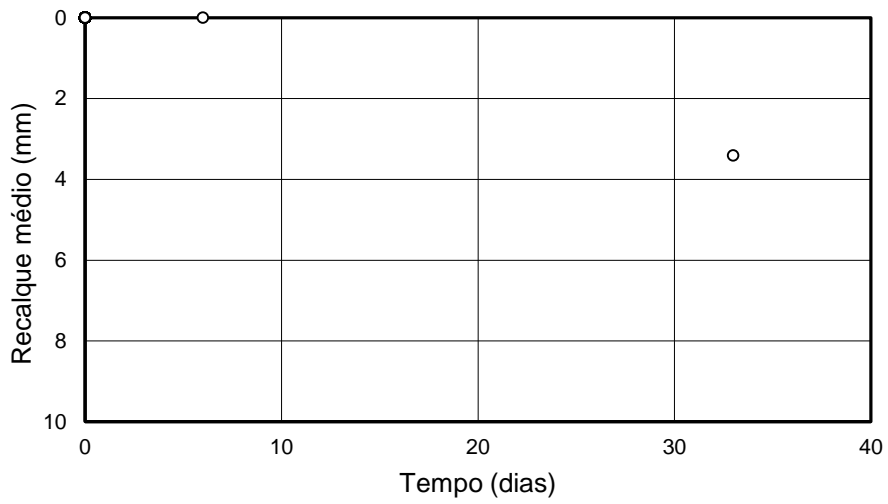


Figura B. 59 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 3 do Edifício 3.

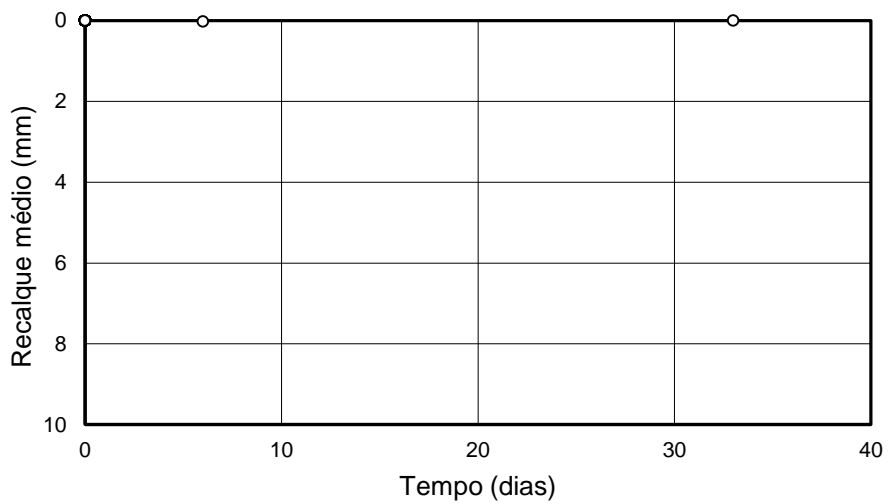


Figura B. 60 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 4 do Edifício 3.

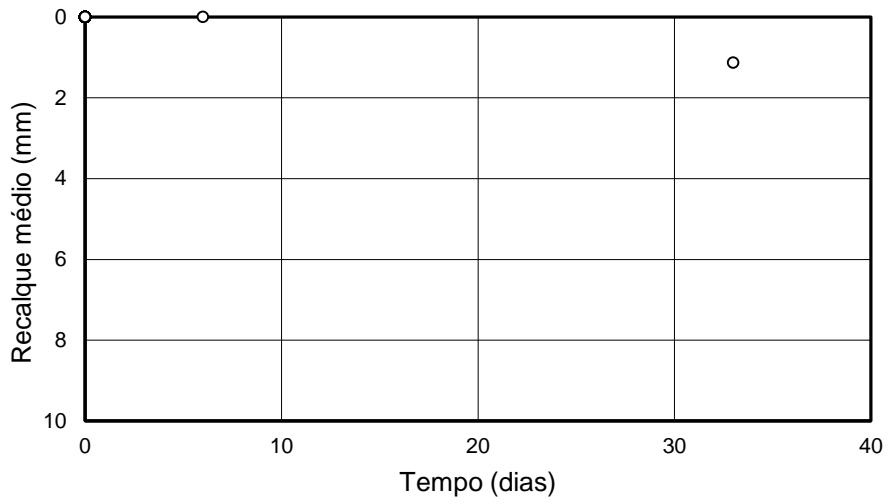


Figura B. 61 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 5 do Edifício 3.

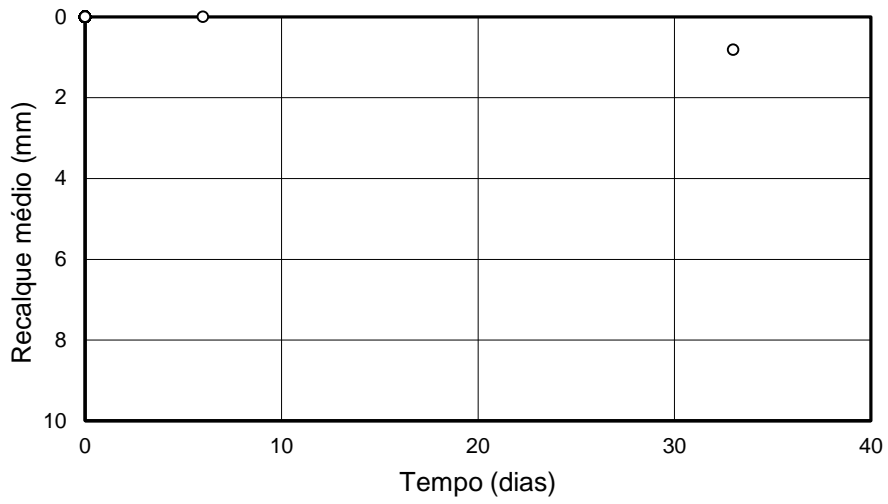


Figura B. 62 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 6 do Edifício 3.

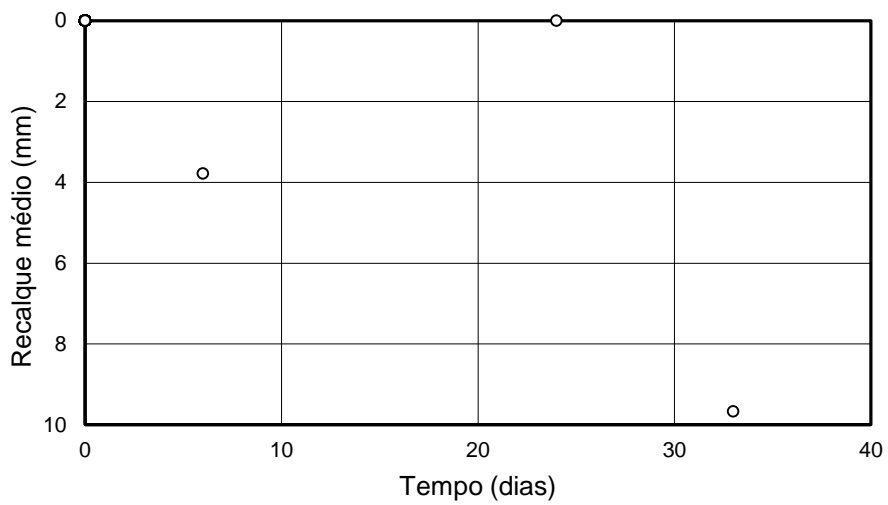


Figura B. 63 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 7 do Edifício 3.

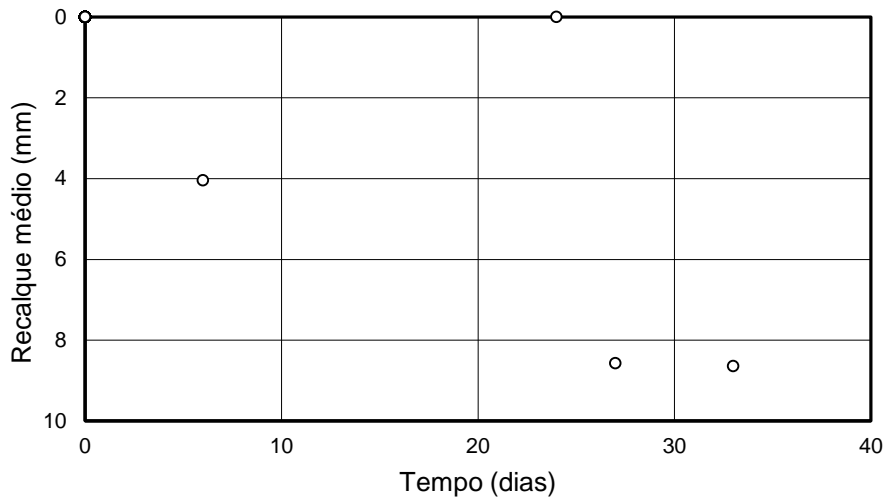


Figura B. 64 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 8 do Edifício 3.

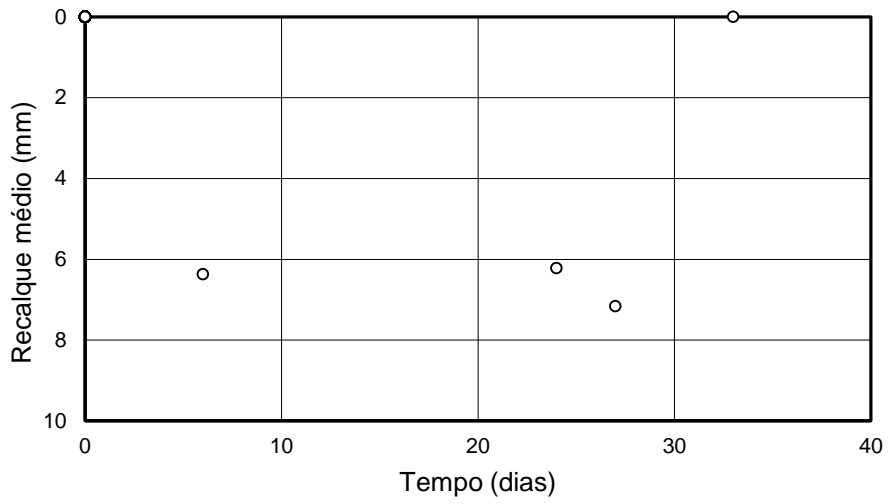


Figura B. 65 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 9 do Edifício 3.

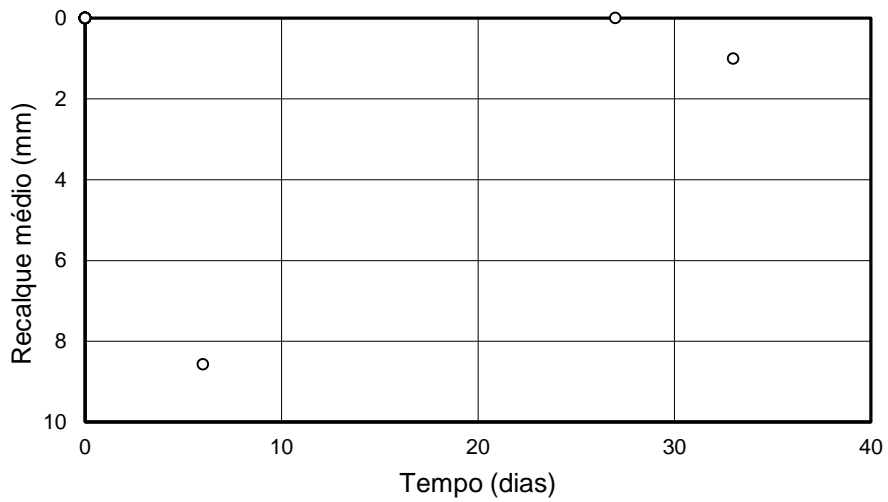


Figura B. 66 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 10 do Edifício 3.

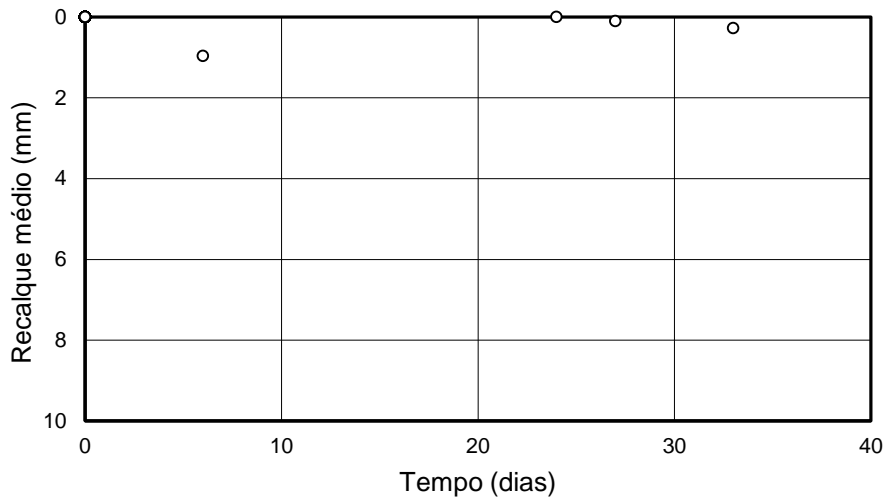


Figura B. 67 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 11 do Edifício 3.

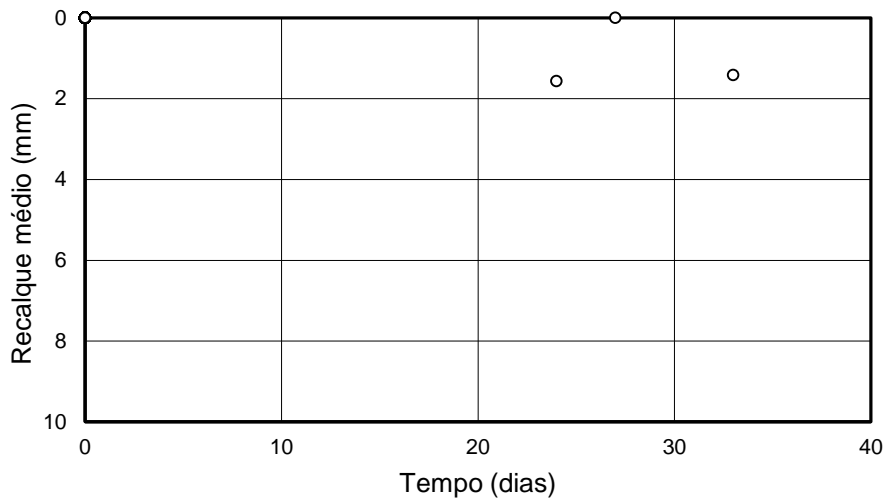


Figura B. 68 - Curva de recalque ao longo do tempo do pilar 12 do Edifício 3.