

Avaliação do Comportamento das Velocidades de Recalque Durante a Fase de Construção de Prédios Altos em Fortaleza-CE

Marina Albuquerque Porto de Aguiar
Graduanda, IFCE, Fortaleza, Brasil, marina.porto07@aluno.ifce.edu.br

Marcos Fábio Porto de Aguiar
Professor Associado, IFCE, Fortaleza, Brasil, marcosporto@ifce.edu.br

Luiz Kauã Grangeiro Barata
Graduando, IFCE, Fortaleza, Brasil, luiz.kaua09@aluno.ifce.edu.br

Graziele Alves da Silva
Graduanda, IFCE, Fortaleza, Brasil, graziele.alves10@aluno.ifce.edu.br

RESUMO: O aumento da demanda por espaços urbanos e a especulação imobiliária em grandes cidades têm impulsionado a construção de edifícios mais robustos com soluções de fundações mais complexas, capazes de transmitir para o solo cargas cada vez maiores. Nesse sentido, torna-se necessária a utilização de técnicas de monitoramento capazes de permitir a identificação de recalques excessivos, viabilizando a possibilidade de tomada de ações preventivas ou corretivas para evitar danos significativos e garantir o desempenho adequado das edificações. Este trabalho visa a análise do comportamento dos valores médios e das velocidades de recalque durante a fase de construção de quatro prédios altos localizados na cidade de Fortaleza, no estado do Ceará, Brasil. Para tanto, foi utilizado o método de altimetria de precisão para o monitoramento dos deslocamentos verticais, com construção de uma referência de nível profunda (*benchmark*) e instrumentação dos pilares das obras com pinos de recalque. Com isso, obteve-se dados de deslocamentos verticais suficientemente acurados, possibilitando a formação de um cadastro de dados associado à cada solução de fundação, assim como foi possível comprovar desempenhos considerados como satisfatórios pela literatura para os casos das obras estudadas durante a etapa de construção.

PALAVRAS-CHAVE: Prédios altos; Fundações profundas; Velocidades de recalque; Monitoramento.

ABSTRACT: The increase in the demand for urban spaces and real estate speculation in large cities has driven the construction of more robust buildings with more complex foundation solutions, capable of transmitting increasingly higher loads to the soil. In this sense, the use of monitoring techniques becomes necessary to allow the identification of excessive settlements, enabling the possibility of adopting preventive or corrective actions to avoid significant damage and to ensure the adequate performance of the buildings. This study aims to analyze the behavior of the average settlement values and settlement velocities during the construction phase of four high-rise buildings located in the city of Fortaleza, in the state of Ceará, Brazil. For this purpose, the precision altimetry method was used for monitoring vertical displacements, with the construction of a deep reference level (*benchmark*) and the instrumentation of the building columns with settlement pins. Thus, sufficiently accurate vertical displacement data were obtained, enabling the formation of a database associated with each foundation solution, as well as making it possible to verify performances considered satisfactory by the literature for the studied buildings during the construction stage.

KEYWORDS: Tall buildings; Deep foundations; Settlements velocities; Monitoring.

1. INTRODUÇÃO

Denomina-se recalque o deslocamento vertical que ocorre no solo quando este é submetido a carregamentos, ou seja, os recalques implicam movimentação no elemento de fundação, o que pode acarretar danos graves para a superestrutura; como fissuras, trincas, rupturas e deslocamentos excessivos; a depender

da sua intensidade (Rebello, 2008).

Com o avanço da tecnologia, têm surgido diversas técnicas de instrumentação que permitem o acompanhamento em tempo real dos recalques e outras deformações, o que permite a adoção de ações preventivas ou corretivas a fim de evitar danos significativos e garantir a estabilidade da edificação.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Recalques de Fundações

O recalque em fundações ocorre quando uma estrutura apoiada sobre uma base rígida é submetida a ações verticais, resultando em deslocamentos verticais decorrentes da deformação axial dos elementos estruturais. Trata-se do efeito mais diretamente associado à interação solo–estrutura na análise de edifícios, pois implica na movimentação das fundações e, dependendo de sua magnitude, pode comprometer a estabilidade e o desempenho da superestrutura.

Comumente as fundações apresentam deslocamentos verticais da ordem de milímetros. Embora muitas vezes imperceptíveis a olho nu, esses movimentos existem e devem ser considerados na análise estrutural, pois podem comprometer o desempenho e a estabilidade da construção (Cintra, 2011).

2.2 Monitoramento de Recalques em Edifícios

A avaliação do desempenho das fundações constitui etapa indispensável para assegurar a estabilidade e a durabilidade das edificações. Nesse contexto, o monitoramento dos recalques, entendido como o acompanhamento sistemático dos deslocamentos verticais das fundações e da estrutura ao longo do tempo, representa requisito mínimo para o atendimento às condições de projeto e às exigências padronizadas em normas para prédios altos. Conforme estabelece a norma NBR 6122 (ABNT, 2022), é fundamental comparar os valores medidos em campo com aqueles estimados em projeto, de modo a verificar a adequação do comportamento estrutural e identificar parâmetros complementares, como a integridade dos elementos e possíveis deslocamentos horizontais

2.2.1 Técnicas de Monitoramento de Recalques

De acordo com a norma vigente, os projetos de fundações devem contemplar um plano de monitoramento, incluindo informações detalhadas sobre métodos, periodicidade e precisão das medições. Para atender a esses requisitos, empregam-se técnicas específicas que possibilitam o controle sistemático dos recalques, entre as quais destacam-se:

- Nivelamento trigonométrico: método indireto de determinação da diferença de nível entre pontos, baseado na medição do ângulo vertical e da distância horizontal entre eles. O procedimento fundamenta-se em relações trigonométricas, considerando a altura do centro do limbo vertical do teodolito em relação ao solo e a elevação do alvo visado.
- Nivelamento geométrico: método direto de determinação da diferença de nível entre pontos, realizado por meio de visadas horizontais com equipamento denominado nível, sobre miras posicionadas verticalmente nos pontos de interesse. Para garantir a precisão das observações, adota-se um ponto fixo como referência de nível em todas as medições.

2.3 Recalques e Velocidades de Recalque Admissíveis

Os recalques admissíveis constituem um parâmetro fundamental na fase de análise e projeto de fundações, pois orientam a avaliação da compatibilidade entre os recalques estimados e o desempenho esperado da estrutura. Nessa etapa, a estimativa dos recalques permite verificar se os deslocamentos verticais previstos estão dentro de limites aceitáveis, de modo a não comprometer a segurança estrutural, a funcionalidade da edificação ou o conforto dos usuários. As Tabelas 1 e 2 apresentam aos valores tolerantes de recalque propostos por Skempton e MacDonald (1956) e Terzaghi e Peck (1967), respectivamente.

Tabela 1. Tolerância a recalques (Skempton e MacDonald, 1956).

Tipo de solo	Recalque totais limites	
Areia	Sapatas isoladas	50 mm
	Radier	50 a 75 mm
Argila	Sapatas isoladas	75 mm
	Radier	75 a 125 mm

Tabela 2. Tolerância a recalques (Terzaghi e Peck, 1967).

Tipo de solo	Recalque total	
Areia	Sapatas	25 mm
	Radier	50 mm

A velocidade de recalque é um parâmetro amplamente utilizado no monitoramento do desempenho de fundações, permitindo avaliar a evolução dos deslocamentos ao longo do tempo. Mesmo para valores de recalque compatíveis com os limites admissíveis, velocidades elevadas podem indicar a necessidade de atenção quanto ao comportamento do solo ou da fundação. Alonso (1991) propõe valores de referência para velocidades aceitáveis, conforme o tipo de edificação, como mostrado na Tabela 3.

Tabela 3. Classificação da edificação.

Condição da edificação		Velocidade	Características
Mais de 5 anos, se estabilizados		< 20 $\mu\text{m}/\text{dia}$	Normal
		De 20 a 40 $\mu\text{m}/\text{dia}$	Moderadas a altas
		> 40 $\mu\text{m}/\text{dia}$	Muito alta
Entre 1 e 5 anos		Até 30 $\mu\text{m}/\text{dia}$	Aceitáveis
Prédios em construção	Apoiados em fundações rasas	Até 200 $\mu\text{m}/\text{dia}$	Normal
	Apoiados em fundações profundas	Até 100 $\mu\text{m}/\text{dia}$	Normal

2.4 Danos Associados aos Recalques

O projeto de fundação deve ser orientado, segundo Gusmão (1990), por dois critérios, o primeiro é assegurar a segurança da fundação, tanto do ponto de vista do solo quanto do elemento estrutural; e o segundo é assegurar desempenho satisfatório para a edificação, ou seja, as deformações do terreno de fundação não devem provocar danos à obra. Ainda segundo o autor citado, define-se três tipos de danos em edifícios relacionados aos recalques, que são categorizados em estéticos, funcionais e estruturais.

- Danos estéticos: não afetam a utilização e a estabilidade da estrutura, pois estão relacionados com a aparência da edificação, as fissuras em paredes de alvenaria de vedação e o desaprumo do edifício são alguns dos exemplos de danos estéticos;
- Danos funcionais: influenciam na utilização do edifício, a dificuldade em abrir esquadrias, como portas e janelas, problemas de drenagem, desnivelamento de tubulações e desaprumo expressivo são exemplos deste tipo de dano;
- Danos estruturais: a depender da sua intensidade, podem levar uma edificação a colapso, pois afetam os elementos da superestrutura. Trincas em pilares, vigas, lajes e alvenarias estruturais são os indícios de ocorrência desse dano.

A deformação do terreno de fundação pode conduzir a 03 (três) situações: recalques uniformes, que

pode estar associado com os danos arquitetônicos e danos às ligações com o exterior; recalques desuniformes sem distorção, que podem estar associados aos danos arquitetônicos; e recalques desuniformes com distorção, que podem estar associados aos danos arquitetônicos e aos danos estruturais.

3. ESTUDO DE CASO

O estudo foi desenvolvido a partir da análise de quatro obras de edifícios altos localizadas no município de Fortaleza-CE. As obras 01 e 03 situam-se no bairro Meireles, a obra 02 no bairro Mucuripe e a obra 04 no bairro de Fátima de acordo com as figuras 1 (a) e 1 (b). As edificações apresentam diferentes alturas e configurações estruturais, permitindo a avaliação do comportamento dos recalques durante a fase construtiva em distintos contextos urbanos.

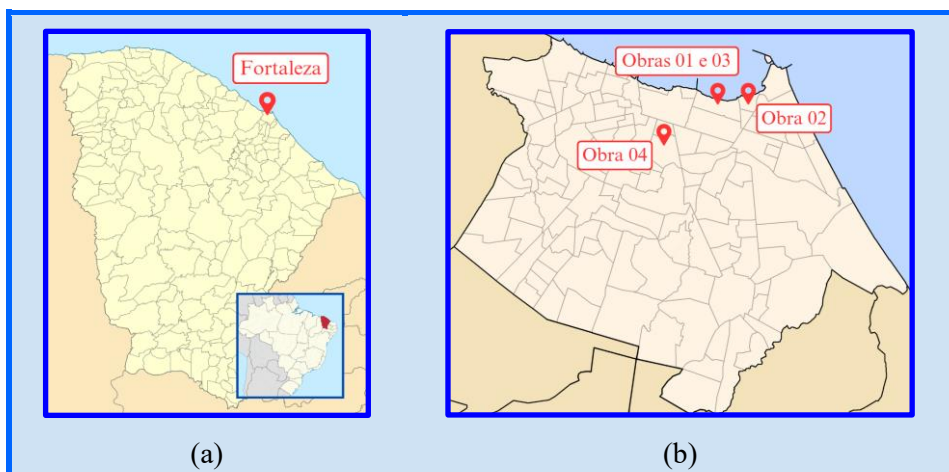


Figura 1. Localização das obras:

(a) Localização do Ceará no Brasil; (b) Localização de Fortaleza no estado do Ceará.

Em todas as obras, o monitoramento de recalques foi realizado por meio de altimetria de alta precisão, utilizando pinos de recalque instalados nos pilares e uma referência de nível profundo (benchmark), adotada com cota arbitrária de 100,00 m. Inicialmente, foram determinadas as cotas de referência dos pinos no estágio inicial da obra, definidas como nivelamento zero (N-00). As medições foram executadas diretamente a partir do benchmark, sem o uso de pontos auxiliares de visada.

Os deslocamentos verticais das fundações foram obtidos a partir da diferença entre as cotas medidas em campanhas de nivelamento subsequentes e as cotas de referência (N-00), possibilitando o acompanhamento da evolução dos recalques ao longo das diferentes etapas construtivas e do progressivo carregamento da estrutura.

A Obra 01, localizada no bairro Meireles, é composta por dois subsolos, pavimento térreo, mezanino, 30 pavimentos tipo, cobertura, casa de máquinas, platô e heliponto.

A Obra 02, situada no bairro Mucuripe, apresenta subsolo, pavimento térreo, dois sobressolos, pavimento de lazer, mezanino, 46 pavimentos tipo, cobertura, platô e topo da edificação.

A Obra 03, também localizada no bairro Meireles, é constituída por dois subsolos, pavimento térreo, três sobressolos, pavimento de lazer, 40 pavimentos tipo, pavimento rooftop, casa de máquinas e reservatórios superiores.

Por fim, a Obra 04, situada no bairro de Fátima, é composta por dois subsolos, pavimento térreo, garagem, pilotis, 22 pavimentos tipo, cobertura, casa de máquinas e caixa d'água.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Obra 01

Os resultados de monitoramento da Obra 01 indicam aumento progressivo dos recalques com o avanço do carregamento da estrutura. O recalque máximo observado foi de 9,91 mm, enquanto as velocidades

máximas atingiram 34,36 $\mu\text{m}/\text{dia}$, valores compatíveis com o comportamento esperado para edificações em fundação profunda durante a fase construtiva, segundo os critérios de Alonso (1991). As velocidades médias apresentaram tendência de redução ao longo do tempo, indicando estabilização gradual do sistema solo-estrutura. As figuras 2 (a), 2 (b), 2 (c) e 2 (d) apresentam os resultados dos recalques medidos em cada pilar e recalque médio da estrutura com tempo.

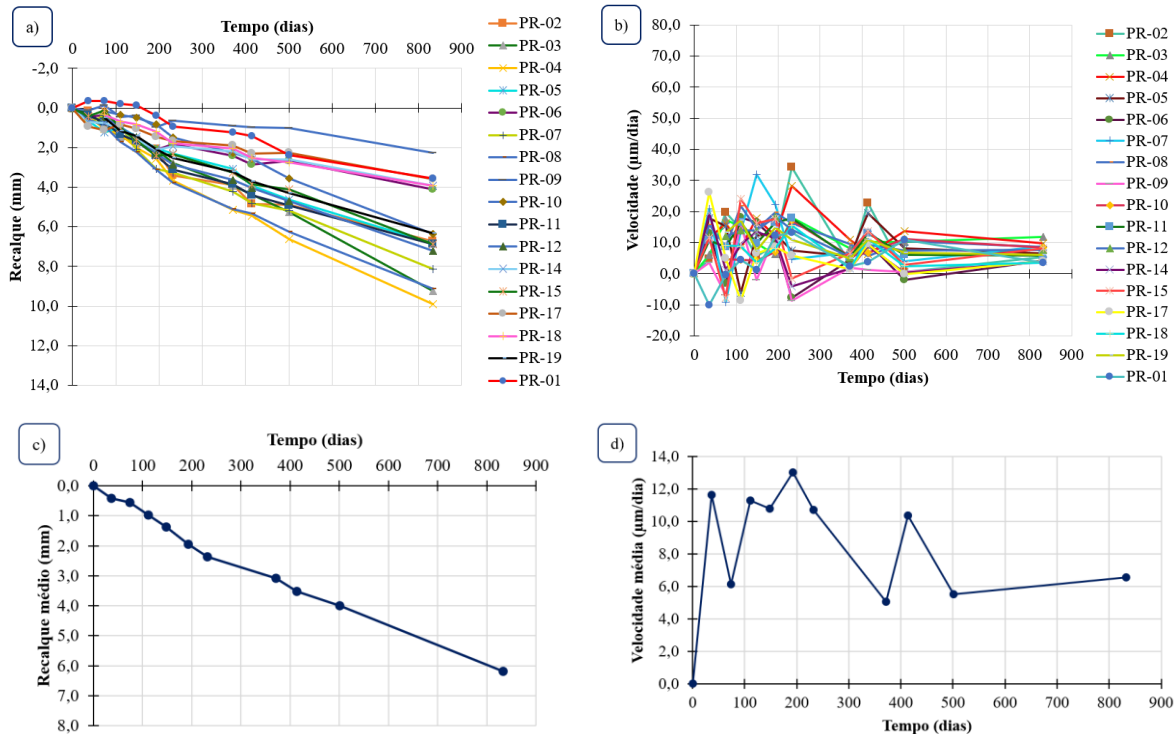
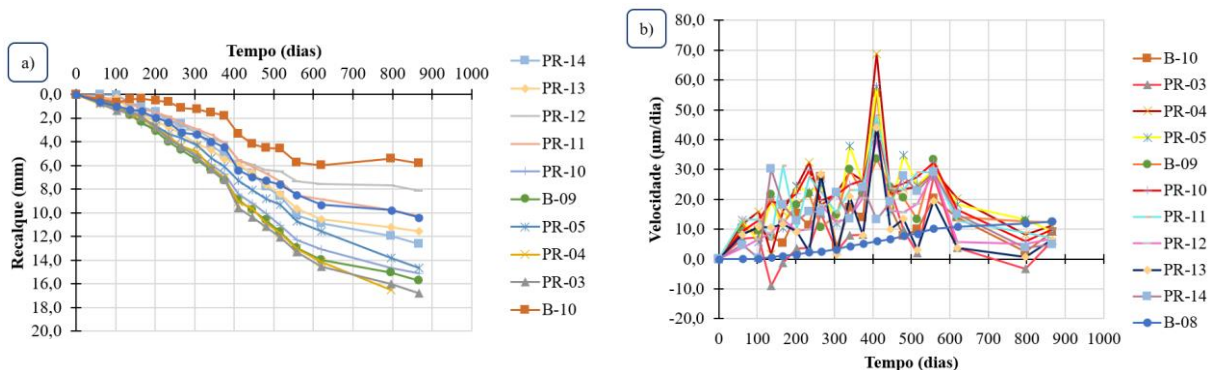


Figura 2. Resultados dos monitoramentos realizados ao longo do tempo durante a fase de construção da Obra 01: a) Tempo x Recalque; b) Tempo x Velocidade de Recalque; c) Tempo x Recalque Médio; d) Tempo x Velocidade Média de Recalque.

4.2. Obra 02

A Obra 02 apresentou os maiores valores de recalque e velocidade entre os casos analisados, com recalque máximo de 17,15 mm e velocidade máxima de 68,86 $\mu\text{m}/\text{dia}$. Esses resultados estão associados às características específicas de carregamento, meio físico e solução de fundação. As velocidades medidas apresentaram valores dentro da faixa considerada normal para fundações profundas em fase de construção, conforme Alonso (1991). As figuras 3 (a), 3 (b), 3 (c) e 3 (d) apresentam os resultados dos recalques medidos em cada pilar e recalque médio da estrutura com tempo.



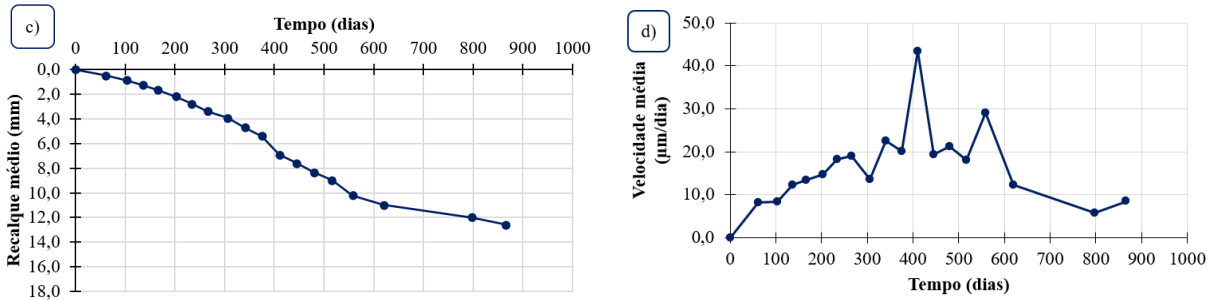


Figura 3. Resultados dos monitoramentos realizados ao longo do tempo durante a fase de construção da Obra 02: a) Tempo x Recalque; b) Tempo x Velocidade de Recalque; c) Tempo x Recalque Médio; d) Tempo x Velocidade Média de Recalque.

4.3. Obra 03

Na Obra 03, os recalques totais foram significativamente menores, com valor máximo de 1,97 mm, evidenciando comportamento mais rígido da fundação. As velocidades de recalque também foram reduzidas, com valor máximo de 15,10 µm/dia, mantendo-se dentro dos limites aceitáveis. Os recalques observados são compatíveis com os valores admissíveis propostos por Skempton e MacDonald (1956) e Terzaghi e Peck (1967). A figuras 4 (a), 4 (b), 4 (c) e 4 (d) apresentam os resultados dos recalques medidos em cada pilar e recalque médio da estrutura com tempo.

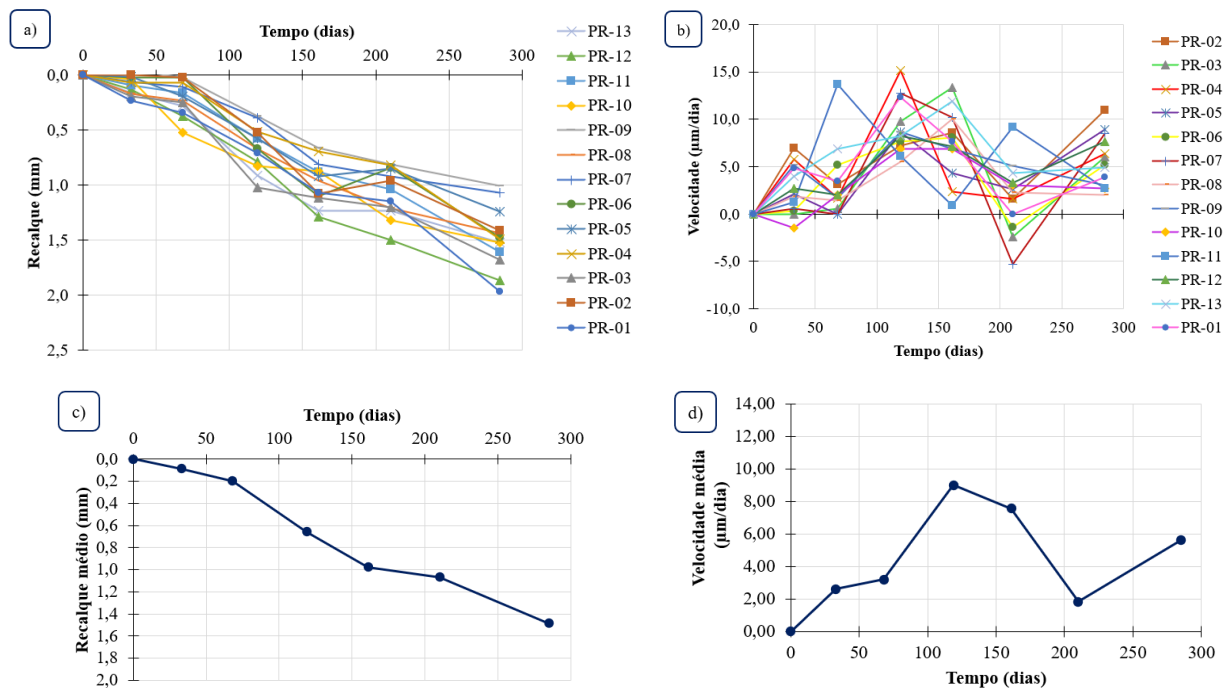


Figura 4. Resultados dos monitoramentos realizados ao longo do tempo durante a fase de construção da Obra 03: a) Tempo x Recalque; b) Tempo x Velocidade de Recalque; c) Tempo x Recalque Médio; d) Tempo x Velocidade Média de Recalque.

4.4. Obra 04

A Obra 04 apresentou recalques e velocidades de pequena magnitude, com recalque máximo de 2,95 mm e velocidade máxima de 42,90 µm/dia, concentrados nos estágios iniciais da construção. Observou-se

rápida redução das velocidades ao longo do tempo, indicando comportamento estável da fundação à medida que a estrutura se aproximava das fases finais de execução. A figuras 5 (a), 5 (b), 5 (c) e 5 (d) apresentam os resultados dos recalques medidos em cada pilar e recalque médio da estrutura com tempo.

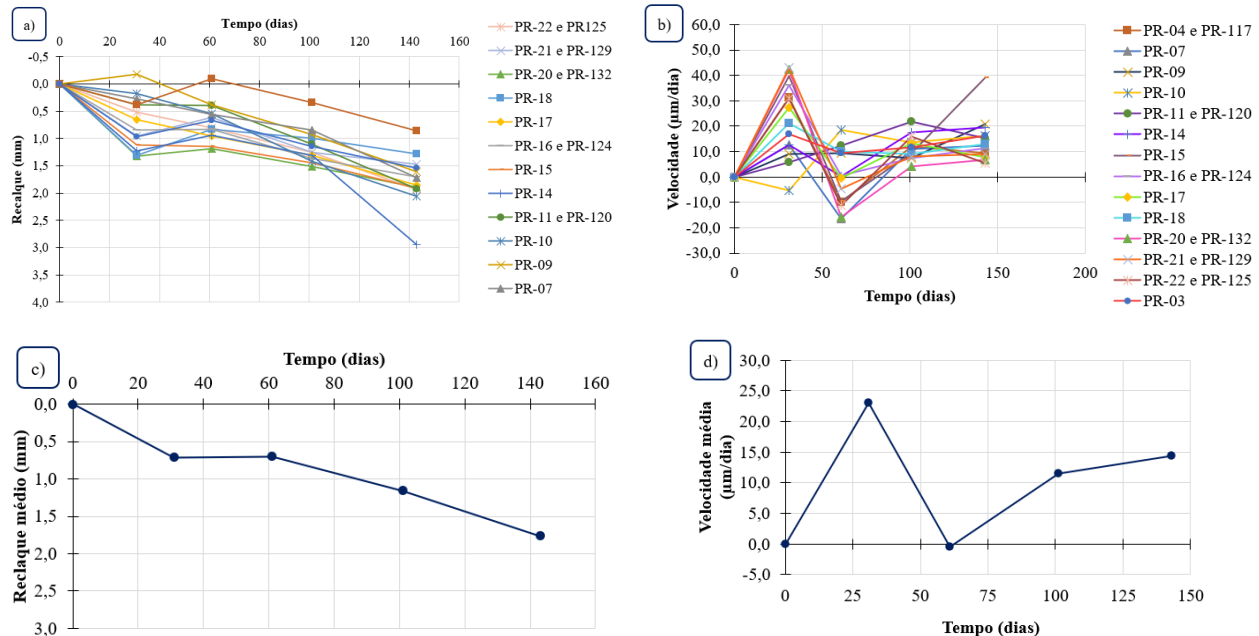


Figura 5. Resultados dos monitoramentos realizados ao longo do tempo durante a fase de construção da Obra 04: a) Tempo x Recalque; b) Tempo x Velocidade de Recalque; c) Tempo x Recalque Médio; d) Tempo x Velocidade Média de Recalque.

5. CONCLUSÕES

As velocidades máximas de recalque das obras encontram-se abaixo do limite proposto por Alonso (1991), ou seja, inferiores a 100 μm/dias para prédios em construção em fundações profundas. Identificou-se, ainda, que as velocidades apresentaram tendência que indicam a estabilização dos valores nos períodos analisados.

Devido aos baixos valores observados dos recalques totais entende-se que os recalques diferenciais foram satisfatórios, considerando os limites de tolerância. Conclui-se, então, que os valores de recalques totais nos casos analisados atendem aos limites propostos por Skempton e MacDonald (1956); Terzaghi e Peck (1967, apud Cintra et al, 2011).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio e suporte financeiro por meio da concessão de bolsas de iniciação científica, ao Laboratório de Modelagem Geotécnica (LMG) e ao Grupo de Pesquisa em Geotecnia e Infraestrutura de Transportes (GPGE) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) – *Campus* Fortaleza, pelo suporte técnico e institucional prestado ao desenvolvimento deste trabalho

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, U. R. (1991) *Previsão e Controle das Fundações*. Editora Blucher. São Paulo.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 6122: *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.
- Cintra, J. C. A. et al. (2011). *Fundações diretas: projeto geotécnico*. São Paulo: Oficina de Textos.

- Gusmão, A. D. (1990). *Estudo da interação solo-estrutura e sua influência em recalques de edificações*. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.
- Rebello, Y. C. P. (2008). *Fundações: guia prático de projeto, execução e dimensionamento*. 4. ed. São Paulo: Zigurate.
- Skempton, A. W.; MacDonald, D. H. (1956). *The Allowable Settlements of Buildings*. San Francisco: Structural and building division meeting.
- Terzaghi, K.; Peck, R. B (1967). *Soil mechanics in engineering practice*. 2. ed. New York: John Wiley & Sons.