

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/271

# Análise do comportamento de solução de fundação com tubulão curto (Décourt, 2019) em prédio alto por meio de monitoramento de recalque com altimetria de precisão

Marcos Fábio Porto de Aguiar

Professor Associado, Instituto Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, marcosporto@ifce.edu.br

Luciano Décourt

Consultor, Luciano Décourt Engenheiros Consultores Ltda, São Paulo, Brasil, decourt@decourt.com.br

Fernando Feitosa Monteiro

Professor, Unichristus, Fortaleza, Brasil, fernando.monteiro@unichristus.edu.br

Marina Albuquerque Porto de Aguiar

Discente de engenharia civil, Instituto Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, marina.aportoa@gmail.com

**RESUMO:** O trabalho aborda a apresentação de método para monitoramento de recalque com altimetria de precisão e sua aplicação para acompanhamento de solução de fundação para torre de 38 lajes em tubulão curto ou tubulão Décourt. A referida edificação foi executada na zona litorânea da cidade de Fortaleza no nordeste do Brasil, com fundação assentada em solo da formação Barreiras. Os resultados, com cargas realistas, fornecidas pelo engenheiro de estruturas, e recalques, a partir do monitoramento durante as etapas da obra, para o caso, a cada três lajes concluídas, possibilitaram informações relevantes da transmissão de carga na fundação utilizando-se do método da rigidez. Verificou-se nas fundações em tubulão Décourt, através do referido método, a separação do domínio de ponta e o domínio do atrito lateral, através do ponto de transição no gráfico da rigidez, confirmando-se as indicações de projeto e a eficiência da solução. O monitoramento de recalques, associado ao método de interpretação de resultados adequado, representa ferramenta importante para a verificação de desempenho de fundações e contribui fortemente para a otimização dos projetos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Monitoramento de recalque, Tubulão, Fundações profundas.

**ABSTRACT:** The paper addresses the presentation of a method for settlement monitoring using precision altimetry and its application in monitoring the foundation solution for a 38-story tower using "tubulão Décourt" short caissons. The mentioned building was constructed in the coastal zone of Fortaleza city in northeastern Brazil, with a foundation based in soil of the Barreiras formation. The results, obtained from realistic loads provided by the structural engineer and settlement measurements during the construction stages, in this case, every three completed floors, provided relevant information on load transfer in the foundation using the Stiffness Method. It was observed, through the mentioned method, the separation of the tip and the side friction domain in the "Décourt" caissons, confirmed by the transition point in the stiffness graph, confirming the design indications and the efficiency of the solution. Settlement monitoring, combined with an appropriate interpretation method, represents an important tool for verifying foundation performance and greatly contributes to design optimization.

**KEYWORDS:** Settlement monitoring, Caisson foundation, Deep foundations.

## 1 INTRODUÇÃO

Os projetos de estruturas tradicionalmente têm seguido uma abordagem convencional, na qual se presume que os apoios no solo são indeslocáveis. Essa premissa resulta em uma série de cargas (reações verticais, horizontais e momentos de flexão) que são repassadas ao engenheiro de fundações. Com base nesses resultados, o engenheiro de fundações realiza o dimensionamento durante a elaboração do projeto de fundações (SAVARIS; HALLAK; MAIA, 2011).

No entanto, na realidade, o desempenho de um edifício é influenciado pela complexa interação entre a superestrutura e o solo na qual a infraestrutura é instalada. Essa interação é conhecida como interação solo-estrutura (ISE). Na prática comum dos projetos de edificações, frequentemente não se leva em consideração o efeito da interação solo-estrutura, apesar da evidência de sua importância em diversos estudos. Esses estudos destacam a redução dos recalques diferenciais, a redistribuição de esforços na estrutura e a maior influência dos primeiros pavimentos na variação dos recalques (LUCENA; BEZERRA; GUSMÃO, 2004). Essa dinâmica pode ser observada durante o monitoramento dos recalques das fundações ao longo da construção e durante toda a vida útil do edifício.

Além de fornecer uma certificação da qualidade dos projetos e da execução da construção, o monitoramento de recalque das edificações durante a fase de construção desempenha um papel essencial no avanço do conhecimento sobre o mecanismo de interação entre a estrutura e o solo. Ao avaliar o comportamento das fundações conforme são submetidas a cargas, novas informações valiosas podem ser obtidas, aprimorando a compreensão do fenômeno da interação solo-estrutura em edificações (SAVARIS; HALLAK; MAIA, 2011).

DANZIGER et al. (2005) descrevem que a medição dos recalques com mais frequência ocorre em situações em que são observados problemas em edificações, como trincas ou rachaduras. Nessas circunstâncias, a velocidade dos recalques fornece informações relevantes para possíveis intervenções, como reforços estruturais, ou medidas de emergência, como a desocupação do edifício. No entanto, DANZIGER et al. (2000) destacam que nessas situações não se tem conhecimento dos recalques anteriores à instalação dos pinos de medição, ou seja, não se sabe qual foi o desempenho das fundações até aquele momento.

Um outro aspecto relevante na avaliação do desempenho de fundações profundas está relacionado ao mecanismo de transferência de carga das estacas para o solo. Esse processo de transferência da carga aplicada no topo de uma fundação profunda para o solo ao redor é um fenômeno complexo e depende de diversos fatores. Esses fatores incluem o tipo de solo, seu estado de tensões, características de resistência e deformação, o método de instalação da estaca, a geometria e as propriedades do material da estaca, o tempo decorrido entre a instalação da estaca e a aplicação da carga, bem como a velocidade e o tipo de carregamento (tração ou compressão). Dentro desse contexto, DÉCOURT (1999) propôs uma metodologia que permite identificar o domínio do atrito e da ponta na curva de rigidez. Essa metodologia consiste em reconhecer a porção linear do diagrama de rigidez e ajustá-la a uma reta, permitindo assim a distinção da carga transferida pelo fuste e pela base da fundação. Embora tenham ocorrido avanços no uso de dados provenientes do monitoramento de recalques e no método de rigidez proposto por DÉCOURT (1996), ainda há uma carência significativa de conhecimento científico em relação à avaliação do desempenho e do mecanismo de transferência de carga das fundações de edifícios altos no Brasil.

O objetivo deste artigo consiste em evidenciar a relevância do uso de dados provenientes do monitoramento de recalques, aliados a cargas realistas fornecidas por engenheiros estruturais, juntamente com a aplicação do método de rigidez proposto por DÉCOURT (1996) para avaliação do desempenho e do mecanismo de transferência de carga das fundações de uma edificação executada na zona litorânea da cidade de Fortaleza no nordeste do Brasil.

## 2 TUBULÃO DÉCOURT

As fundações da obra foram concebidas em tubulões curtos a céu aberto, sem bases alargadas, com alturas,  $H$ , tipicamente entre 2,0 e 3,0m, aqui denominado tubulão Décourt em referência à solução adotada em DÉCOURT (2019). Para tirar se proveito máximo do atrito lateral concreto-solo, várias providências, não usuais, foram tomadas, a tais como:

Executar as paredes dos fustes ligeiramente inclinadas, de forma a que os diâmetros superiores dos mesmos viessem a ficar cerca de 0,3 a 0,4 m maiores do que os diâmetros inferiores (bases em contato com o solo), criando um efeito cunha, com o objetivo de produzir uma adesão muito maior. Os diâmetros mencionados no projeto e utilizados nos cálculos de dimensionamento das bases foram sempre os menores, isto é, aqueles correspondentes a face em contato com o solo (Figura 1). Para garantir a proteção dos trabalhadores, seguiu-se, na execução, NBR 9061 (ABNT, 1985) e foram adotadas algumas rotinas, sendo as paredes das escavações dos tubulões, protegidas por camisas de concreto projetado com fibras, moldadas in situ, com espessuras de cerca de 0,1 m. Esse tratamento somente foi aplicado após as paredes terem sido limpas com escovas de aço e as dimensões terem sido conferidas pela fiscalização. Essa proteção foi executada em

duas etapas, a primeira, do topo até meia altura e a segunda da meia altura até a base. Essas camisas, além de protegerem as vidas dos trabalhadores, evitaram alterações na resistência do solo, por relaxamento de tensões e assim garantiram a permanência dos elevados valores de adesão unitária ( $q_s$ ) determinados nas provas de carga.

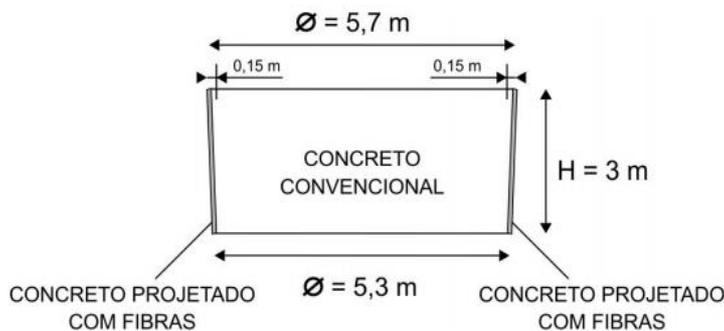


Figura 1. Detalhes da seção de um tubulão típico.

### 3 ESTUDO DE CASO

#### 3.1 Características da edificação e do subsolo

A edificação consiste numa estrutura composta de subsolo inferior, subsolo superior, pavimento térreo, mezanino, 30 pavimentos tipo, cobertura, casa de máquina, platô e heliponto, sendo localizado no município de Fortaleza no Estado do Ceará. O edifício tem estrutura em concreto protendido e fundações em tubulões Décourt, assentes em cotas variadas. A Figura 2 apresenta a localização dos pilares em planta.

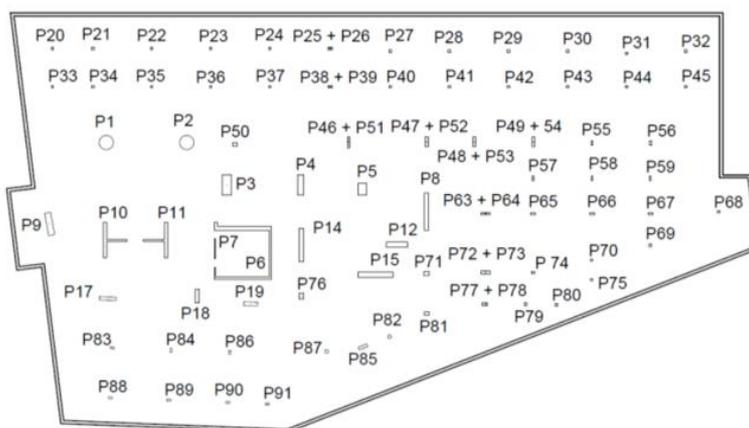


Figura 2. Localização dos pilares da obra.

O subsolo no terreno do prédio apresentou, de acordo com 15 sondagens à percussão tipo SPT (*Standard Penetration Test*) realizadas de 15 a 23 de dezembro de 2016, estrato superficial de areia fina, fofa a medianamente compacta, cinza (sedimentos), passando para camada de areia fina a grossa, compacta, amarela (sedimentos) com valores médios de  $N_{SPT}$  variando entre 12 e 16. Seguido por estrato de solo constituído de argila arenosa, dura, cinza, amarela e vermelha com concreções de óxido de ferro (laterita) variando lateralmente para uma argila arenosa, dura, cinza clara com valores médios de  $N_{SPT}$  superiores a 9. A última camada comprovou sedimentos da unidade geológica grupo Barreiras de idade terciária com valores médios de  $N_{SPT}$  superiores a 15. O nível d'água foi identificado entre 2,8 e 3,5 m de profundidade em relação à superfície natural do terreno, com possíveis variações em função da maré. A profundidade impenetrável ao amostrador da sondagem à percussão, segundo a NBR 6484 (ABNT, 2001) em relação ao nível do terreno natural variou entre 6,2 e 15,2 m (SOLOTRAT, 2017).

Além sondagens à percussão tipo SPT, foram realizados ensaios de prova de carga bidirecional, Cross-Hole e Down-Hole no local do Pilar P-1, bem como em localizações adjacentes a este pilar. A partir destes ensaios, foram observadas três regiões distintas, entre 0 e 5 m, ocorrem areias aluviais, com valor médio de  $V_s$

de 165,5 m/s. Entre 5 e 7 m de profundidade, onde já ocorrem solos da formação Barreiras, argilas lateríticas, o valor médio de  $V_s$  foi de 510,5 m/s. Abaixo de 7 m, o solo, também da formação Barreiras, é razoavelmente homogêneo, com um valor médio de  $V_s$  de 667,82 m/s. Observe-se que, especificamente, entre as profundidades de 10 e 15 m, que são as de maior interesse para o projeto de fundações, os valores  $V_s$  apresentaram variações pequenas, podendo-se admitir que sejam praticamente independentes da profundidade. No local do pilar P-1, entre as profundidades de 10 e 15 m, o valor médio de  $V_s$  foi de 772,58 m/s. O ensaio Down-Hole, para profundidades entre 10,5 e 15,5 m indicou um valor médio de  $V_s$  de 824,17 m/s (DÉCOURT, 2022).

A Formação Barreiras consiste em uma cobertura sedimentar com camadas intercaladas de argilitos, siltitos, arenitos, com diferentes teores de siltes, ocorrendo com frequência a presença de camadas enrijecidas com cimentação ferruginosa. A Formação Barreiras apresenta em seu território formações geológicas decorrentes do comportamento de umidade sazonal do seu clima e ação erosiva dos elementos, os chamados solos tropicais, ou lateríticos (SOUSA, 2018). Os solos lateríticos têm suas características de rigidez muitíssimo sub avaliadas pelas sondagens SPT (DÉCOURT, 2022).

### 3.2 Monitoramento dos recalques

O monitoramento dos recalques foi realizado a partir do método topográfico de nivelamento geométrico, que é um procedimento direto de determinação de desnível, onde é realizada a medida da diferença de cota entre pontos do terreno considerando leituras com visadas horizontais, obtidas com um nível, em miras posicionadas verticalmente nos referidos pontos, segundo a NBR 13133 (ABNT, 1994). Para o nivelamento com a precisão recomendada para o monitoramento de recalques em fundações, foram utilizados os equipamentos do tipo Nível Wild NA-2 com micrômetro de foco mínimo 1,6 m e precisão de 0,7 mm/km (sem micrômetro) e 0,3 mm/km (com micrômetro), bem como a Mira Invar Wild com 2 m de comprimento.

No caso, foram considerados, para controle dos recalques, uma referência de nível profunda (RNP) ou "benchmark" (BM) executada a partir do subsolo inferior (PETROBRAS, 2005) seguindo as seções apresentadas nas Figuras 3a e 3b. Os pinos para medição de recalque (PR) (PETROBRAS, 2011), instalados em 17 pilares da torre, seguem os detalhes apresentados nas Figuras 4a e 4b, que mostram, respectivamente, as dimensões do pino e caixa de proteção e posicionamento da mira para nivelamento. Para execução da referência de nível profunda (RNP), de acordo com SONDA (2019), foram seguidas as diretrizes preconizadas pela PETROBRAS (2005). A escolha do local a ser instalada a referência de nível profunda (RNP) da obra foi realizada em função da movimentação na obra, efeitos das fundações no subsolo e pilares a serem monitorados, de forma a possibilitar medições sem pontos auxiliares.

A perfuração com equipamento rotativo, foi realizada com sonda MACH 850 MAQUESAUSDA usando revestimento NW a partir do subsolo inferior. Após inserção do revestimento NW, iniciou-se a perfuração com barrilete NW. A perfuração atingiu a profundidade limite de 13 m, sendo assim 2 m em rocha (arenito). Depois de perfurada a rocha, foi introduzido um revestimento de PVC (tubo PVC DN1 PN80) de 2", este revestimento, foi inserido até o contato solo e rocha. O revestimento NW inicial foi retirado, introduzindo-se, no furo, a haste de aço com diâmetro de 1" (semelhante à haste de utilizada em sondagens à percussão) em cuja ponta apresentava um trépano de lavagem até penetrar na camada rochosa. A haste foi inserida até a profundidade limite do furo, 13 m. Então, a calda de cimento foi injetada pelo topo do revestimento, até chegar a base do furo e conseqüentemente a ponta inferior da haste dentro da camada rochosa. A ponta inferior da haste foi, então, chumbada com calda de cimento. O revestimento foi elevado 3 m. Após a haste estar fixada e o revestimento perdido também já no local, o espaço anular, entre a parede externa da haste e a parede interna do revestimento perdido, foi preenchido com graxa grafitada. O topo da haste, após conclusão, já com a ponta em semiesfera de aço inoxidável, ficou 15 cm abaixo da face inferior da tampa da caixa de proteção, sendo a referida ponta rosqueada para acabamento da referência de nível profunda ("benchmark"). A caixa em alvenaria foi construída com uma tampa removível para proteção da referência de nível.

Para verificação dos deslocamentos verticais nas fundações dos pilares foram projetados pinos em aço AISI 304 (Figura 5a). Os pinos para medição de recalque foram instalados em 17 pilares, sendo estes: P-01, P-02, P-03, P-04, P-05, P-06, P-07, P-08, P-09, P-10, P-11, P-12, P-14, P-15, P-17, P-18 e P-19. Os pinos foram identificados como PR, seguindo a numeração dos respectivos pilares, como segue: PR-01, PR-02, PR-03, PR-04, PR-05, PR-06, PR-07, PR-08, PR-09, PR-10, PR-11, PR-12, PR-14, PR-15, PR-17, PR-18 e PR-19 (Figura 5b).

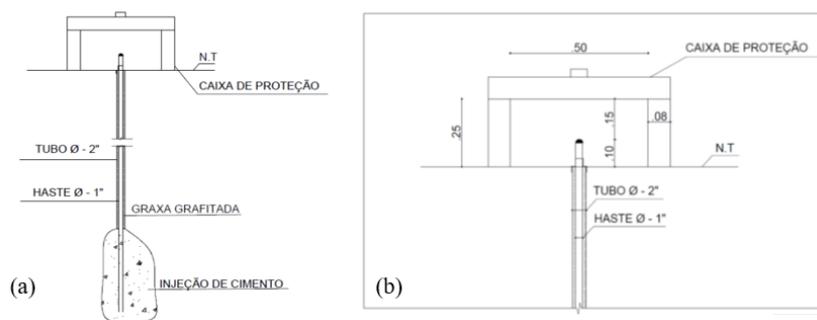


Figura 3. (a) - Seção da referência de nível profunda (RNP), (b) - Detalhe da extremidade superior e caixa de proteção da referência de nível profunda (RNP).

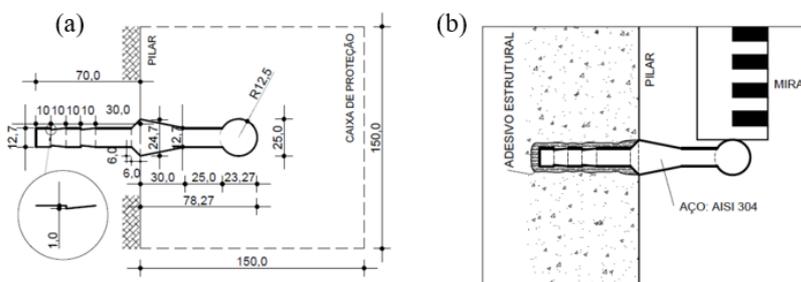


Figura 4. (a) - Dimensões do pino para medição de recalque e caixa de proteção, (b) - Pino para medição de recalque com posicionamento da mira da extremidade superior e caixa de proteção da referência de nível profunda (RNP).

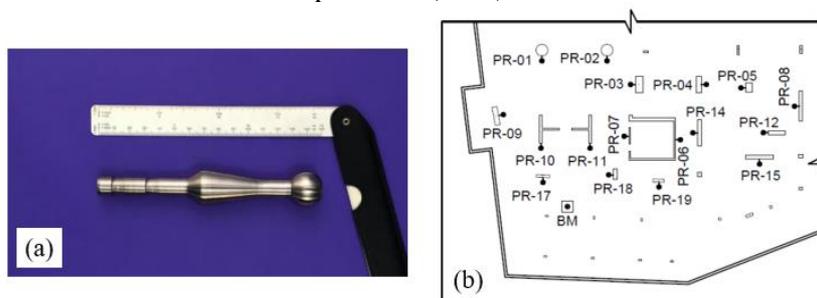


Figura 5. (a) - Pino para medição de recalque em aço AISI 304, (b) - Planta de posicionamento dos Pino para medição de recalque.

O acompanhamento dos recalques foi iniciado com a verificação das cotas de referência ou nivelamento zero dos pinos de recalque, no dia 18 de julho de 2019. A situação de carga segue o estágio da obra na data do nivelamento. Partindo de cota arbitrária para a referência de nível ("benchmark"), foram determinadas, utilizando-se três pontos de visada sem pontos auxiliares, as diferenças de nível dos pinos em relação à referência de nível ("benchmark") com consequente determinação das cotas iniciais (de referência) dos pinos para posterior medição de recalque na fundação de cada pilar. Então, em cada campanha de nivelamento, durante a execução da obra, foram utilizadas posições de visada sem pontos auxiliares, com nivelamento e contranivelamento em cada pino de recalque. A cota admitida foi a média aritmética dos valores obtidos no nivelamento e no contranivelamento. Nas diversas etapas do monitoramento dos recalques (a cada três lajes concluídas), as cargas realistas fornecidas pelo engenheiro estrutural foram utilizadas para análise do comportamento carga-deslocamento do conjunto fundação-solo, permitindo assim, a transformação dessas medidas em "provas de carga" em escala real.

### 3.3 Projeto de fundações

O projeto de fundações, baseado em considerações de recalque, foi efetuado admitindo-se que ao final da construção, as cargas dos pilares fossem 85% das cargas verticais máximas. Para cargas de 20000 kN ou

mais, foram consideradas alturas (H) de 2 e 3 m, ao passo que para cargas inferiores a 20000 kN, foram consideradas alturas (H) de 1 e 2 m (DÉCOURT, 2022). Para a determinação das cargas que irão, efetivamente, chegar às bases, a carga aplicada foi reduzida pelo valor da carga correspondente ao atrito lateral, considerando uma adesão unitária de 200 kPa. Esse valor de adesão unitária ( $q_s$ ) é razoavelmente conservador, visto que as provas de carga bidirecionais realizadas em estacas teste do tipo hélice contínua nesta obra indicaram que, entre as profundidades de 13 e 15 m, a adesão média era de 753 kPa. Para os cálculos de recalque foi considerada uma tensão de referência ( $q_r$ ) de 500 kPa e um coeficiente de compressibilidade intrínseca do solo,  $C = 0,35$ . Deve-se enfatizar que, todos esses valores,  $q_s$ ,  $q_r$  e  $C$ , por prudência, foram conservadores, pois não se poderia saber se iriam ou não ocorrer problemas executivos durante a construção. As tensões máximas aplicadas às bases foram calculadas de forma que, os recalques, ao final da construção do edifício, fossem iguais ou inferiores a 20 mm. De grande importância para os cálculos foram os valores de  $B_{eq}$ , ou seja, as larguras de bases quadradas, com as mesmas áreas de base calculadas, quaisquer que fossem suas formas. Em função da geometria dos pilares e dos procedimentos construtivos recomendáveis, ouvindo ainda o projetista estrutural, o formato das fundações foi determinado, sendo que, em sua maioria, foram círculos ou falsas elipses (DÉCOURT, 2022).

Na maioria dos casos, as fundações foram em tubulões a céu aberto ou no formato de falsas elipses (Tubulões Décourt), com grandes diâmetros e alturas (H) entre 2 e 3 m (cargas superiores a 20000 kN) e entre 1 e 2 m (cargas inferiores a 20000 kN). Esses elementos de fundação iriam transmitir as cargas estruturais para o solo, como quaisquer tubulões ou estacas, isto é, por atrito lateral, ao longo de sua superfície lateral, fuste e por ponta. Para o atrito lateral unitário ( $q_s$ ) foi adotado um valor razoavelmente conservador, ou seja, 200 kPa. As três provas de carga executadas em estacas com comportamento normal indicaram valor médio de 753 kPa, ou seja, quase 3,8 vezes superior ao adotado em projeto (DÉCOURT, 2022).

Concluiu-se, pois, que a solução em tubulões curtos seria muito superior à solução em sapatas, visto que a contribuição do atrito lateral, ao longo do fuste, seria significativa. Além disso, essa alternativa seria de execução mais fácil, além de apresentar benefícios adicionais, tais como capacidade muito maior do que as sapatas em absorver esforços horizontais e momentos. Com relação às tensões nas bases dos tubulões, adotou-se no projeto como tensão de referência, ( $q_r$ ), o valor de 500 kPa. As provas de carga, como previsto, não indicaram ruptura, sendo que a tensão de referência ( $q_r$ ) foi, em média, de 6920 kPa. O dimensionamento das fundações seguiu o conceito do projetista, admitindo tensões diferentes, para valores de carga diferentes e que garante recalques diferenciais mínimos, quase zero, entre os pilares (DÉCOURT, 2022).

O acompanhamento dos recalques foi iniciado com a verificação das cotas de referência ou nivelamento zero dos pinos de recalque, no dia 18 de julho de 2019. A situação de carga segue o estágio da obra na data do nivelamento. Partindo de cota arbitrária para a referência de nível ("benchmark"), foram determinadas, utilizando-se três pontos de visada sem pontos auxiliares, as diferenças de nível dos pinos em relação à referência de nível ("benchmark") com conseqüente determinação das cotas iniciais (de referência) dos pinos para posterior medição de recalque na fundação de cada pilar. Então, em cada campanha de nivelamento, durante a execução da obra, foram utilizadas posições de visada sem pontos auxiliares, com nivelamento e contranivelamento em cada pino de recalque. A cota admitida foi a média aritmética dos valores obtidos no nivelamento e no contranivelamento. Nas diversas etapas do monitoramento dos recalques (a cada três lajes concluídas), as cargas realistas fornecidas pelo engenheiro estrutural foram utilizadas para análise do comportamento carga-deslocamento do conjunto fundação-solo, permitindo assim, a transformação dessas medidas em "provas de carga" em escala real.

### 3.4 Avaliação do desempenho da solução de fundação

Os dados obtidos a partir do monitoramento de recalque em conjunto com as cargas realistas fornecidas a partir do projeto estrutural nas distintas etapas de construção da edificação, permitem avaliar a rigidez do conjunto fundação-solo, bem como o comportamento carga-deslocamento de uma prova de carga em "escala real" da fundação analisada. A Tabela 1 exibe os valores de deslocamento obtidos a partir do monitoramento de recalque e das cargas realistas fornecidas a partir do projeto estrutural nas distintas etapas de construção da edificação para o tubulão Décourt referente ao pilar P-01, cuja geometria é apresentada na Figura 1.

Tabela 1. Valores de carga, deslocamento e rigidez do tubulão Décourt do Pilar P-01.

Q (MN)	Deslocamento (mm)	Rigidez (MN/mm)
11,208	0,92	12,182
14,449	1,46	9,896
17,946	1,60	11,216
21,697	2,08	10,431
25,700	3,42	7,514
29,930	3,87	7,714
34,430	4,90	7,020
39,190	4,89	7,998
42,254	6,73	6,278
43,630	8,30	5,256

A Figura 6 apresenta a interpretação dos dados obtidos a partir do monitoramento de recalque, em conjunto com as cargas realistas fornecidas pelo projeto estrutural, utilizando o método da Rigidez (DÉCOURT, 1996). Essa interpretação é realizada em diferentes etapas de construção da edificação (a cada três lajes concluídas). A partir da curva de rigidez, observa-se que a adesão unitária ( $q_s$ ) para a carga aplicada de 43,632 MN é da ordem 842 kPa, ou seja, quase 4,2 vezes superior ao adotado em projeto. Além disso, os valores de deslocamento registrados ao longo do monitoramento de recalque do tubulão associado ao pilar P-01 foi razoavelmente inferior ao limite máximo de projeto (20 mm), indicando assim uma diferença da ordem de 58%.

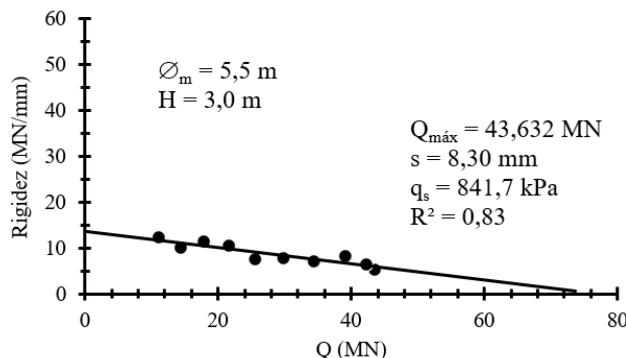


Figura 6. Curva de rigidez do tubulão Décourt do Pilar P-01.

#### 4 CONCLUSÕES

Este trabalho enfatizou resultados obtidos a partir do monitoramento de recalque associados aos carregamentos disponibilizados pelo projeto estrutural da obra, realizado numa edificação executada na zona litorânea da cidade de Fortaleza no nordeste do Brasil. Os tubulões Décourt foram carregados ao longo do período construtivo da obra e os deslocamentos dos pilares associados as fundações foram medidos a partir do monitoramento de recalque da edificação avaliada, produzindo curvas cargas versus deslocamento, que foram interpretadas a partir do método da rigidez proposto por DÉCOURT (1996), de modo a analisar o mecanismo de transferência de carga do tubulão Décourt.

Os dados relativos à concepção do projeto (DÉCOURT, 2022) foram comparados com as interpretações realizadas para o tubulão Décourt associado ao pilar P-01, sendo essas interpretações apresentadas e discutidas. Embora os resultados sejam baseados em um conjunto limitado de dados e restritos às condições das análises, eles permitem fazer algumas generalizações preliminares sobre o comportamento geral. Nesse sentido, esta pesquisa proporcionou uma compreensão aprimorada da relevância do uso de dados provenientes do monitoramento de recalques, aliados a cargas realistas fornecidas por engenheiros estruturais, e da aplicação do método de rigidez proposto por Décourt (1996) para a avaliação do desempenho e do mecanismo de transferência de carga das fundações. Portanto, com base nas tendências observadas nos dados e nas análises, é possível tirar algumas conclusões:

- O monitoramento de recalque a partir do método topográfico de nivelamento geométrico com utilização de referência de nível profunda (RNP) apresenta resultados satisfatórios;
- A utilização de uma fundação inovadora como o tubulão Décourt pode ser empregada para edifícios altos com fundações em solos lateríticos atendendo as exigências de segurança, economia e agilidade executiva;
- As sondagens SPT tendem a subavaliar significativamente as características de rigidez dos solos lateríticos. Para determinar com precisão as propriedades de engenharia desses solos, é necessário realizar outros ensaios, sendo um deles a medição das velocidades de propagação das ondas de cisalhamento por meio dos ensaios Cross-Hole e Down-Hole. Com base nessas velocidades e nos pesos específicos naturais dos solos, é possível calcular os módulos de cisalhamento em baixas deformações, conhecidos como  $G_0$ . O conhecimento de  $G_0$  permite avaliar as características de rigidez de qualquer tipo de solo e possibilita o desenvolvimento de projetos de fundações realistas e confiáveis.

O acompanhamento dos recalques foi iniciado com a verificação das cotas de referência ou nivelamento zero dos pinos de recalque, no dia 18 de julho de 2019. A situação de carga segue o estágio da obra na data do nivelamento. Partindo de cota arbitrária para a referência de nível ("benchmark"), foram determinadas, utilizando-se três pontos de visada sem pontos auxiliares, as diferenças de nível dos pinos em relação à referência de nível ("benchmark") com consequente determinação das cotas iniciais (de referência) dos pinos para posterior medição de recalque na fundação de cada pilar. Então, em cada campanha de nivelamento, durante a execução da obra, foram utilizadas posições de visada sem pontos auxiliares, com nivelamento e contranivelamento em cada pino de recalque. A cota admitida foi a média aritmética dos valores obtidos no nivelamento e no contranivelamento. Nas diversas etapas do monitoramento dos recalques (a cada três lajes concluídas), as cargas realistas fornecidas pelo engenheiro estrutural foram utilizadas para análise do comportamento carga-deslocamento do conjunto fundação-solo, permitindo assim, a transformação dessas medidas em "provas de carga" em escala real.

## AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos a toda equipe da NORMATEL INCORPORAÇÕES, FORTALEZA, na pessoa do engenheiro Fernando Meirelles Cabral, diretor, pelo seu desempenho e pela permissão concedida de divulgar os dados dessa obra.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1985). NBR 9061. *Segurança de Escavação a Céu Aberto*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1994). NBR 13133. *Execução de Levantamento Topográfico*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001). NBR 6484. *Execução de Sondagens de Simples Reconhecimento de Solos*. Rio de Janeiro.
- Danziger, F. A. B., Danziger, B. R.; Crispel, F.A. (2000) A medida dos recalques desde o início da construção como um controle de qualidade das fundações. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA - SEFE, 4, 2000, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABMS. v. 1, p. 191-202.
- Danziger, B. R., Carvalho, E. M. L., Costa, R. V., Danziger, F. A. B (2005) Estudo de Caso de Obra com Análise da Interação Solo Estrutura. *UM*, 23(1), p.43-54.
- Décourt, L. (1996) A ruptura de fundações avaliada com base no conceito de rigidez. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA - SEFE, 3, 1996, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABMS. v. 1, p. 215-224.

- Décourt, L. (1999) Behavior of Foundations under Working Load Conditions. In: PAN-AMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING, 11, 1999, Foz do Iguaçu. *Anais...* São Paulo: ABMS. v. 4, p. 453-488.
- Décourt, L. (2019) Projeto de Fundações do São Carlos Condomínio. Fortaleza.
- Décourt, L. (2022) Fundações em solos lateríticos – 30 anos de pesquisa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 20, 2022, Campinas. *Palestra...* Campinas: ABMS.
- Lucena, A.E.F.L., Bezerra, R.L., Gusmão, A. D. (2004) Monitoramento de Recalques de Edifícios sobre Fundações Diretas desde o Início da Construção e Avaliação da Interação Solo-Estrutura. *Solos e Rochas*, 27 (2), p.215-229.
- Petrobras (2005). N-1811. *Instalação de Referência de Nível Profunda (RNP)*. Rio de Janeiro.
- Petrobras (2011). N-1807. *Medição de Recalque de Fundações no Teste Hidrostático de Equipamentos*. Rio de Janeiro.
- Savaris, G., Hallak, P.H., Maia, P. C. A. (2011) Understanding the Mechanism of Static Soil-Structure Interaction - A Case Study. *Soils and Rocks*, 34 (3), p.195-206.
- Solotrat (2017). *Sondagem a Percussão no Terreno do Condomínio São Carlos*. Fortaleza.
- Sonda (2019). *Sondagem à Percussão e Rotativa, Teste de Absorção, Topografia e Ensaio de solo, Relatório de Descrição da Elaboração e do Material Utilizado para a Construção da Benchmark*. Fortaleza.
- Sousa, R. A. (2018) *Resistência e compressibilidade de solos da formação barreiras da região de Natal/RN*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte / UFRN, 102 p.