



Renivelamento e Reforço de Fundação de Edifício de 12 andares em Salto (SP)

João Armando Lopes de Oliveira
Diretor, Mega Reforça Engenharia, São Paulo, Brasil, joaoarmando@reforca.com.br

Sérgio Mello
Diretor, Appogeo Consultoria, São Paulo, Brasil, sergiomello@appogeo.com.br

Tiago de Jesus Souza
Diretor, Solotechnique, Jundiaí, São Paulo, tiago.souza@solotechnique.com.br

André Querelli
Diretor, Solotechnique, Jundiaí, São Paulo, andre.querelli@solotechnique.com.br

RESUMO: Este artigo descreve e analisa aspectos teóricos e práticos de uma obra de reforço de fundações e renivelamento de estrutura de um prédio residencial de 12 andares concluído localizado na cidade de Salto-SP. Após as etapas de levantamento das informações, problemas de recalque existentes e estudos preliminares para reforçar as fundações comprometidas foram utilizados basicamente dois tipos de solução: estacas do tipo MMI - Mega Metálica Injetada e MCI-Mega Concreto Injetada. Foi necessário um diálogo sinérgico e multidisciplinar entre as equipes de estruturas e Geotecnia da obra para a melhor compatibilização das novas deformações e das cargas decorrentes dos reforços. O caso alerta para a importância das equipes de projeto e execução interagirem durante a obra, adaptando processos, hipóteses de projeto em face de metodologia executiva adotada.

PALAVRAS-CHAVE: Reforço de Fundação, Estruturas, recalques, Estaca Mega

ABSTRACT: This paper describes and analyzes theoretical and practical aspects of a foundation reinforcement and structural realignment project for a 12-story residential building located in the city of Salto, São Paulo. After gathering information, identifying existing settlement issues, and conducting preliminary studies to strengthen compromised foundations, two main solutions were primarily employed: MMI-type (Mega Metallic Injected) piles and MCI-type (Mega Concrete Injected) piles. Achieving effective coordination between the structural and Geotechnical teams was crucial, requiring a synergistic and multidisciplinary dialogue. This collaboration ensured the optimal alignment of new deformations and the loads resulting from the reinforcements. This case underscores the importance of seamless interaction between design and construction teams throughout the project lifecycle. It necessitates adaptation of processes and design assumptions in response to the chosen execution methodology.

KEYWORDS: Foundation Reinforcement, structures, Settlements, Mega Pile (Jacked Pile)

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



1 Introdução

Vastos contextos geológicos do território do Estado de São Paulo, revelam em suas áreas a predominância de um perfil de solo que se distingue das demais regiões pela sua porosidade, acompanhada de uma baixa taxa de saturação. Esse substrato geológico, que é composto por depósitos cenozoicos provenientes de sedimentos não apenas está presente em variadas profundidades, mas também exhibe a propriedade intrínseca de ser propenso a colapsos geotécnicos. Esses colapsos, fenômenos nos quais ocorrem afundamentos ou rebaixamentos do terreno devido a processos internos do solo, têm sido objeto de investigação em função de sua relevância para o planejamento e a gestão das obras em condições de solo cujo comportamento é de baixa resistência.

O Índice de resistência a Penetração (SPT) nos estratos iniciais revela valores substancialmente reduzidos, manifestando-se com uma contagem inicial de 2 a 3 golpes, e posteriormente, exibindo um crescimento praticamente linear com a profundidade, atingindo sua estabilização por volta de 10 a 12 metros. No contexto da cidade de Salto, região interiorana de São Paulo, particularmente em prédios de altura considerável, a fundação profunda por meio de tubulões é predominante, enquanto edifícios de 4 a 8 pavimentos favorecem a utilização de estacas escavadas e cravadas. Cabe destacar que a implementação de fundações superficiais, como sapatas ou radier, encontra-se restrita a edificações de pequeno porte. A capacidade de suporte de fundações, independentemente de serem superficiais ou profundas, quando estabelecida sobre solos de tal natureza, pode sofrer um decréscimo substancial, o qual é expresso por uma acentuada diminuição da resistência do solo sob a influência de variações de umidade.

Por meio de um caso real ocorrido no município de Salto este artigo delinea e examina aspectos de obra residencial de 12 pavimentos onde foi necessário a uma intervenção de reforço nas fundações e realinhamento estrutural. Após as etapas de visitas de campo, retroanálise dos problemas ocorridos e estudo das soluções mais viáveis tecnicamente, executivamente e financeiramente foram empregadas predominantemente duas alternativas: estacas do tipo MMI - Mega Metálica Injetada e MCI - Mega Concreto Injetada. No Brasil, a utilização de estacas mega remonta à década de 30 do século passado.

No entanto, a aplicação desse método é notavelmente limitada na região devido às características do solo predominante. Observa-se também uma escassez significativa de estudos científicos abordando tanto a aplicabilidade das estacas mega, como seu comportamento e, de forma crucial, uma metodologia apropriada para o dimensionamento das mesmas. Embora haja alguns trabalhos disponíveis que discutem o comportamento desse tipo de estaca em outras regiões, destaca-se o estudo de Junqueira (1994), que apresenta um histórico abrangente sobre as estacas prensadas. Nesse trabalho, o autor descreve 26 casos práticos de reforço de fundações ou construção de fundações, dos quais ele acompanhou cinco diretamente. Nestes casos, as medições manométricas de cargas eram comparadas ao Método Decourt & Quaresma (1978).

1.1 Solos Colapsíveis

Qualquer solo sujeito a uma carga específica passa por um processo de recalque. No contexto de fundações prediais, é crucial prever tais recalques de modo a manter sua magnitude dentro dos limites aceitáveis pela estrutura em questão.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



A distinção fundamental entre colapso e recalque reside na velocidade da redução de volume. No colapso, a diminuição volumétrica é rápida, ao passo que no recalque, essa redução tende a ser gradual, geralmente ocorrendo ao longo do tempo. Pesquisas indicam que o colapso não ocorre instantaneamente, podendo transcorrer ao longo de minutos até horas (LOLLO, 2008). Solos suscetíveis ao colapso são necessariamente não saturados, uma característica primordial desse tipo de solo. Essa propriedade é a mais significativa, pois mesmo na presença de água, alterações na umidade natural resultam em mudanças abruptas na resistência do solo, potencialmente causando danos às estruturas devido ao recalque conhecido como colapso. O termo técnico para essa propriedade é colapsibilidade, conforme cunhado por Cintra (1995).

Outro atributo dos solos propensos ao colapso é sua elevada razão de vazios, o que resulta em uma considerável porosidade, frequentemente excedendo 40%, com um teor de saturação normalmente abaixo de 60% (RODRIGUES E VILAR, 2012). Fatores preponderantes que podem proporcionar certa resistência temporária ao solo incluem as forças eletromagnéticas de superfície, a sucção e a presença de substâncias cimentantes, como óxidos de ferro e carbonatos (LOLLO, 2008). Essa categoria de solo é considerada metaestável, exibindo uma condição que está sempre sujeita a mudanças.

Conforme delineado por Cintra (1998), o colapso pode manifestar-se por meio de duas modalidades distintas: sob a influência do próprio peso da camada ou devido à imposição de uma carga externa, sendo esta última a mais recorrente em solos brasileiros de origem cenozoica. No contexto nacional, é comum que o colapso se materialize somente quando o solo atinge um patamar de carga limite, frequentemente referido como carga de colapso conforme a terminologia adotada pelo mencionado autor. Todavia, para que ocorra o colapso em tais solos, é necessário que ocorra uma variação na condição de saturação, somada à aplicação da carga de colapso.

O comportamento intrínseco dos solos, de maneira geral, é representado por uma relação contínua entre tensão e deformação. No entanto, essa relação se aplica apenas aos solos que conservam sua umidade natural. Nos casos de solos com características colapsíveis, essa associação é válida somente quando a umidade natural do solo é preservada. Quando um solo colapsível é submetido ao colapso por meio de um processo de inundação, ocorre uma descontinuidade perceptível na curva que relaciona tensão e deformação (conforme representado na Figura 1).

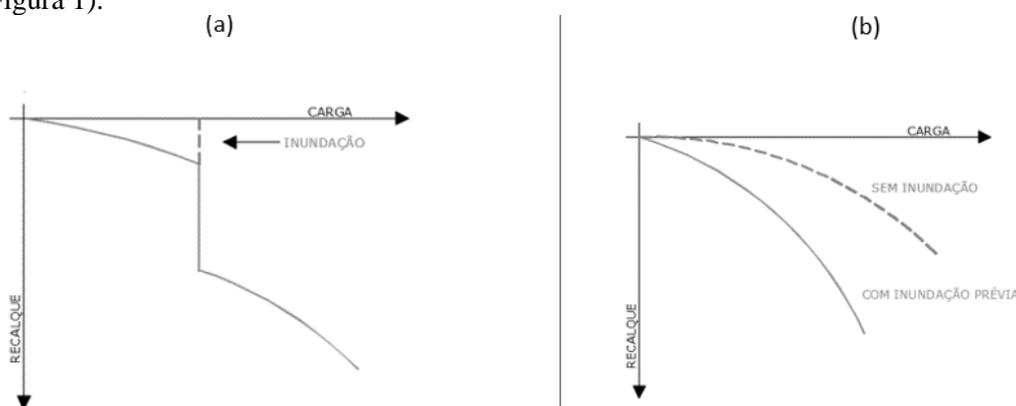


Figura 1. (a) Ocorrência de colapso em prova de carga realizada com inundação do solo durante o ensaio. (b). Prova de carga em solos colapsível previamente inundado (Cintra, 1995 e 1998)

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



1.2 Cronologia de Eventos

Ao longo do mês de Janeiro de 2022, intensificaram-se os relatos verbais, entre os funcionários que operam na obra descrita no artigo em epígrafe, acerca das ocorrências de patologia: testemunhos de patologia na fundação abertura da junta de dilatação por recalques diferenciais na fundação da torre nomeada de “B”. Além disso percepção de barulhos despertou uma atenção redobrada dos funcionários.

Foram documentados indícios de patologia na fundação, incluindo a manifestação de recalques diferenciais que resultaram na abertura da junta de dilatação na base da torre B. Adicionalmente, a detecção de emissões sonoras não usuais despertou um nível aumentado de vigilância e atenção por parte dos trabalhadores envolvidos.

O projeto referente às fundações da estrutura foi concebido e elaborado por uma outra empresa, tendo sido adotada a tipologia de fundações em sapatas, conforme ilustrado na Figura 2a. É pertinente ressaltar que, para compreender plenamente a complexidade subjacente à resolução dos problemas enfrentados durante a fase de execução da obra, é importante mencionar que a torre em questão já se encontrava completamente construída na época em análise, como exemplificado na Figura 2b.

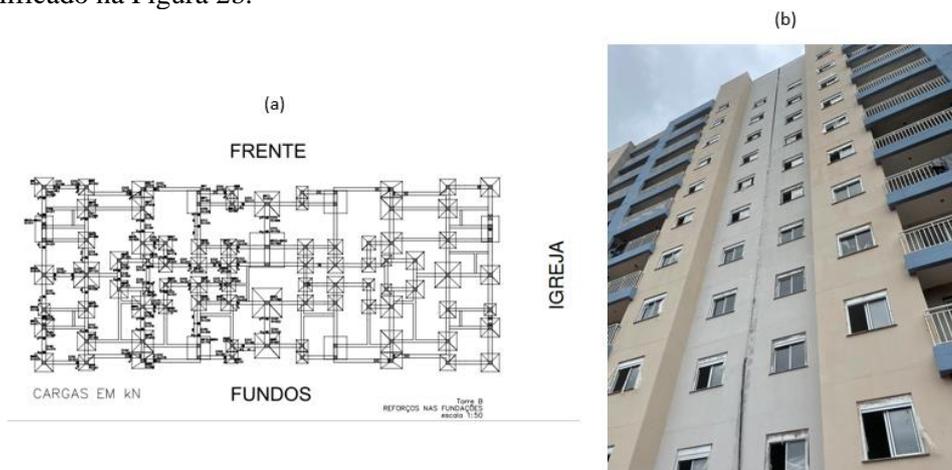


Figura 2. Projeto de Fundações em sapata (a). Vista parcial do empreendimento executado (b)

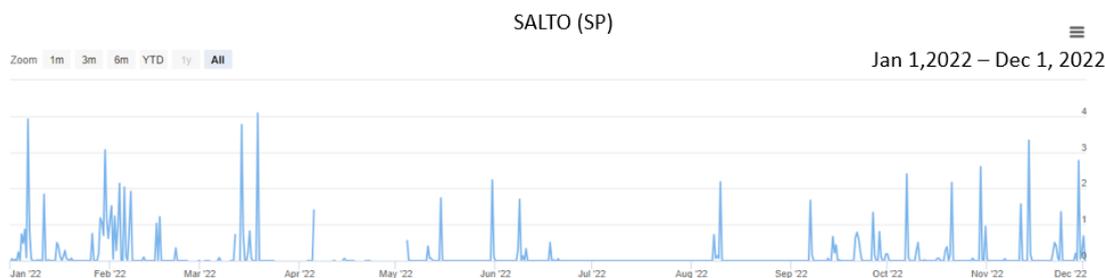


Figura 3. Registro pluviométrico de Salto (SP) segundo o INMET

Decorridos alguns dias, uma precipitação intensa ocorreu, agravando significativamente o fenômeno de recalque diferencial que afetou a torre. As chuvas recorrentes no período de Janeiro foram intensas, como mostra o registro pluviométrico de Salto (Figura 3). Justamente as semanas

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



mais críticas das chuvas. Em todo estado de São Paulo foram de 15/01/2022 a 20/02/2022 – época em que as patologias se desenvolveram.

Como resultado direto desse evento, puderam ser identificadas várias manifestações patológicas, notadamente em relação a componentes de vedação, aspectos arquitetônicos e sistemas de instalações, com particular ênfase nas áreas próximas às juntas de dilatação. No entanto, é importante registrar que a alvenaria estrutural e outros elementos essenciais da estrutura permaneceram intactos e resilientes perante esse quadro.

Uma análise holística da situação projetual e das condições em campo foi conduzida, resultando na identificação das causas prováveis dos extensos recalques observados, nomeadamente:

- I - subdimensionamento das fundações diretas devido à supervalorização da capacidade de carga do solo
- II - suspeita de um comportamento colapsível nas camadas superficiais do solo. Face a esse diagnóstico, foi elaborada uma estratégia de reforço baseada na implementação de estacas de grande capacidade, visando abordar esses desafios.

2 Materiais e Métodos

2.1 Considerações Gerais

Em caráter preliminar foi realizado um trabalho de campo, juntamente com registros fotográficos e compilação dos dados a fim de verificar a melhor forma de reforçar a fundação da torre B. Os autores do presente artigo têm uma extensa trajetória de desenvolvimento de numerosos trabalhos e empreendimentos geotécnicos nas proximidades do local deste estudo, o que possibilitou uma avaliação aprofundada da geologia da região.

A Figura 4 retrata o registro interno de projetos nos quais participamos como projetistas ou fornecendo consultoria especializada em Geotecnia. O destaque em vermelho delinea a localização específica da obra. Além disso, os triângulos em azul representam as nove obras realizadas anteriores dos autores em áreas adjacentes.



Figura 4. Locais próximos a obra Villa Piemonte com atuação dos autores

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



2.2 Caracterização Geológico-Geotécnica

Para construção do empreendimento em questão foram realizadas duas campanhas de investigação geotécnica: a primeira campanha no mês de dezembro de 2017 e a segunda entre 01 e 10 de outubro de 2018. No total foram realizadas 20 sondagens de simples reconhecimento (SPT) com locação identificada na Figura 5.



Figura 5 – Locação das sondagens realizadas no empreendimento.

Na primeira campanha realizou-se sete sondagens SPT com distintas profundidades de investigação. A sondagem SP-01 investigou os 6,80m de solo superficiais revelando uma camada superficial bastante estratificada: i) camada inicial (até 1,50m) composta por Areia fina argilosa (fofa); ii) segunda camada (1,70m) de argila muito arenosa (pouco siltosa) de consistência média; iii) terceira camada composta por 1,30m de silte muito arenoso (pouco argiloso; fofo); e iv) uma quarta camada, com 1,80m de espessura, composta por areia siltosa (de fina a grossa) compacta. Destaca-se que não foi identificada a profundidade do nível d'água.

A sondagem SP-02 identificou uma cama superficial impenetrável a percussão. Segundo relatório de sondagem, buscou-se realizar outros quatro furos de sondagens (SP-02A a SP-02D) adjacentes ao furo principal (SP-02) que também reportaram um solo impenetrável a percussão.

A sondagem SP-03 conseguiu investigar o solo até a profundidade de 15,45m. A camada superficial (2m) é composta por argila muito arenosa seguida por um veio (0,7m) de areia argilosa. Estas duas camadas iniciais apresentaram valores de resistência a penetração (NSPT) inferiores a 5 golpes. A terceira camada apresenta 4,3m de espessura e é composta por um silte argiloso de consistência média a mole. Por fim, o relatório identifica uma camada final de 7,45 m de espessura de um solo areno-siltoso, com valores de NSPT que aumentam com a profundidade. Esta sondagem identificou o nível d'água a 10,4m de profundidade.

Já a segunda campanha de investigação realizou 13 sondagens SPT. As sondagens SP-05, 05A, 05-B, 07 e 12 reportaram uma camada de argila silto-arenosa impenetrável a percussão abaixo de 2,5m de profundidade. As demais sondagens identificam perfis de solo bastante similares, somente alterando a espessura das camadas. Inicialmente, há entre 2 e 4m de argila

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



silto-arenosa (de consistência mole) seguida de uma outra camada (entre 2 e 5m de espessura) de silte argilo-arenoso com consistência de mole a rija. Por fim as sondagens identificam uma espessa camada (até o final das prospecções; variando de 1 a 9m de espessura) de silte arenoso-argiloso com valores de NSPT que aumentam com a profundidade. Quanto ao nível d'água, somente as sondagens SP-10 e SP12-A identificaram sua profundidade. A Figura 2 apresenta a evolução dos valores de NSPT em relação a cota do terreno reportada no relatório de sondagem da segunda campanha de investigação. Assim como na Figura 2, o nível d'água mostrado na Figura 3 consiste no nível d'água médio das sondagens que o reportaram.

A Figura 6 apresenta a evolução dos valores de NSPT ao longo da profundidade considerando as cotas de sondagens identificadas no relatório. O nível d'água indicado refere-se ao encontrado na sondagem SP-03 – única que o identificou.

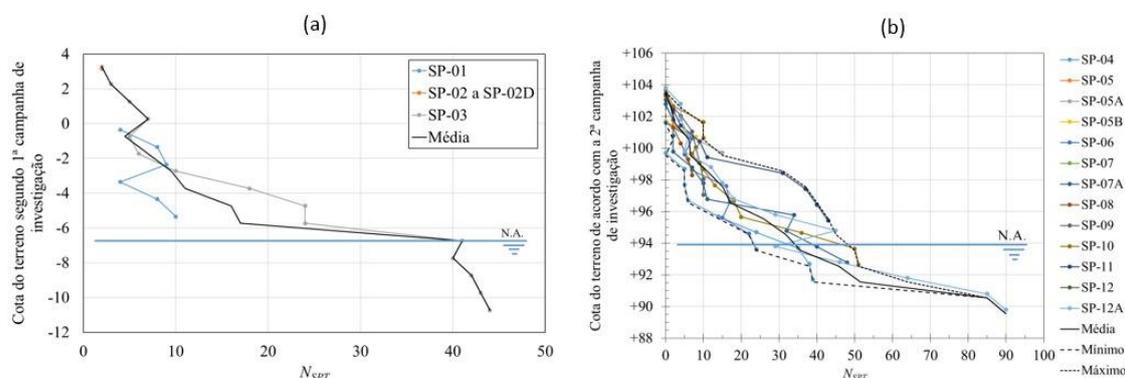


Figura 6. Evolução dos valores de NSPT ao longo da cota do terreno – (a) reportada na primeira campanha de investigação realizada e (b) reportada na segunda campanha

A construtora informou que, em razão do prazo estabelecido e das condições de execução, não seria possível realizar os ensaios de laboratório destinados a avaliar o possível comportamento colapsível do solo. Esses ensaios haviam sido requisitados visando aprimorar a precisão nos processos de avaliação do problema e escolha da solução de reforços.

3 Solução Adotada

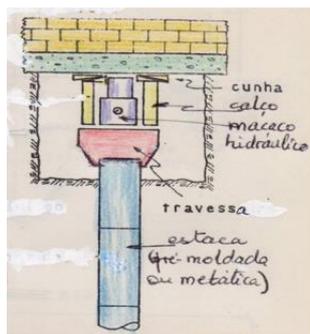
Com base no conhecimento dos mecanismos deflagradores da patologia e das características estruturais dos prédios concluídos, foi ponderado que a solução para o reforço das fundações deveria permitir aos prédios um comportamento similar ao de fundações em estacas, nas quais as cargas da estrutura seriam dissipadas ao longo de sua profundidade e ainda, com baixa deformação. Tanto a solução em Jet Grouting quanto em raiz foram avaliadas, porém foram desconsideradas em função dos custos.

A Estaca Mega foi a escolhida por se tratar da solução mais viável tecnicamente, executivamente e financeiramente. Uma opção adotada no passado em outras obras foi de aumentar a área da base das sapatas. Essa solução foi descartada pois o solo superficial é de baixa resistência e devido a dificuldades de execução já que o prédio estava concluído.

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



A estaca Mega é uma estaca de concreto ou de aço, executada em pequenos segmentos que são cravados no terreno reagindo contra a própria estrutura, conforme se mostranna Figura 7a. Se a parede contra a qual reagirá o macaco hidráulico não tiver baldrame de concreto armado, deve-se instalar uma viga pré-moldada, conforme Figura 7b.



(a)



(b)

Figura 7. Vista geral da execução da Estaca Mega (Alonso, 2021)

Com o objetivo de validar o projeto de reforço e alinhar sua execução viável, foram conduzidas diversas análises, resultando na elaboração e emissão do projeto geotécnico datado de 04/02/22. Como medidas contingenciais, procedeu-se à interdição da estrutura torre B e emitiu-se um procedimento para a realização de monitoramento contínuo dos recalques. Durante a inspeção efetuada em 07/02/22, foi sugerido redirecionamento do escoamento das águas pluviais para setores distintos do empreendimento, devido à identificação preliminar de saturação do substrato, fator que suscitava recalques ou potencializava os mesmos.

4 Execução do Reforço

Através de um processo iterativo e com base nos feedbacks obtidos durante a execução das estacas mega de reforço, destinadas à estabilização da fundação, ocorreu uma evolução substancial tanto no projeto quanto na compreensão dos parâmetros relevantes. Ficou estabelecido que a porção esquerda da torre, que não havia manifestado recalques significativos, poderia sustentar parte das cargas por meio da fundação direta, após um procedimento de reforço através da injeção de uma suspensão aquosa para incrementar a rigidez do solo de base. O objetivo desse processo foi a consolidação do maciço, visando alcançar uma tensão mínima de $2,5 \text{ kg/cm}^2$ e contrapor o potencial comportamento colapsível do solo.

Além disso, no decorrer do procedimento de estacamento com estacas mega de concreto e metálicas, constatou-se que as deformações ocorridas na torre geravam um grau de desconforto e, conseqüentemente, demandavam retificações antes da finalização do projeto. Nesse sentido, foi instaurada uma avaliação estrutural que culminou na elaboração do projeto definitivo de estacamento, oficializado em 23/05/22. No dia 06/06/22, foi finalizada a elaboração do projeto que engloba diretrizes precisas e um plano de injeção destinado à seção da Torre B que não apresentou quaisquer recalques.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.





A abertura de vala foi de aproximadamente 1 m x 1 m (Figura 7a), espaço suficiente para posicionar o cilindro hidráulico e os segmentos de estacas a serem cravados. Nessa etapa, as fundações existentes ficam aparentes, podendo ser verificadas quanto à integridade superficial. Posteriormente realizou-se a cravação dos segmentos pelo cilindro, que reage contra a estrutura da edificação, cravando os elementos no solo até chegar à profundidade em que a estaca ofereça resistência suficiente para suportar o peso exercido pela construção (Figura 8b). Nessa etapa, quando a fundação começa a exercer sobre a construção o mesmo esforço que a construção aplica no solo (através do seu peso), empurrando-a para cima, a cravação de novos elementos é cessada e faz-se a consolidação do ponto de cravação. Para isso, a capacidade de carga do macaco hidráulico deve ser sempre maior do que a carga estimada da obra, nos pontos onde as estacas serão executadas. As figuras 8c e 8d mostram os sistema pronto.



Figura 8. Execução das estacas mega na obra

Em 16 de junho de 2022, procedeu-se à implementação de um sistema de monitoramento da integridade da estrutura por meio de instrumentação com 8 pinos de recalque sob a supervisão de uma empresa especializada no campo. Este sistema de monitoramento continuou em operação mesmo após a realização do processo de reajuste da torre B, desempenhando o papel crucial de orientar o procedimento e verificar a consecução da estabilização da estrutura.

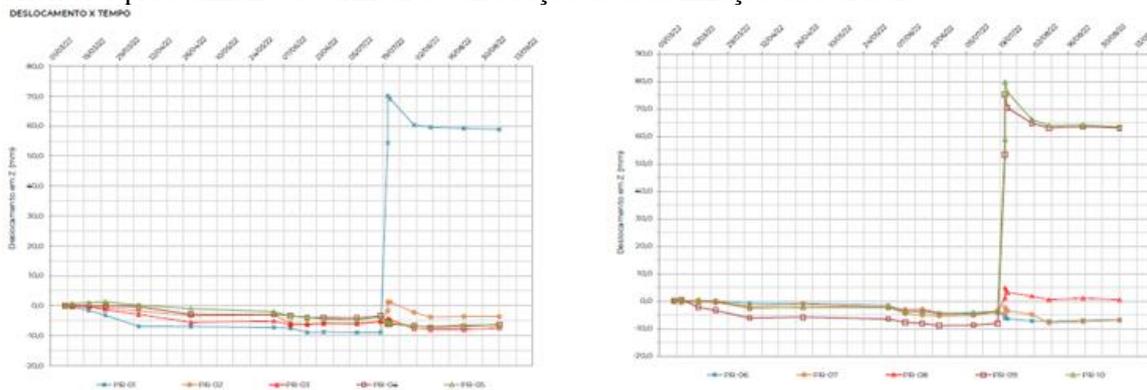


Figura 9. Monitoramento da Estrutura

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.





Por meio do monitoramento, foi possível constatar que em 21 de julho de 2022 foi realizado o procedimento de macaqueamento visando ao reestabelecimento do nível da Torre B. Posteriormente à execução do ajuste de prumo da torre, não foram observadas quaisquer patologias estruturais de relevância.

Com a conclusão do processo de injeções, o tratamento das fundações da Torre B foi oficialmente encerrado, respaldado pelo monitoramento que atestou a total cessação dos recalques.

5 Conclusões

O presente estudo engendrou uma solução voltada à renivelamento de uma torre residencial, mediante a implementação reforço de fundação por meio de estacas mega como medida instrumental para evitar evolução dos recalques e novas manifestações patológicas.

O trabalho delinea, de maneira sistemática, um procedimento para a seleção da escolha do reforço de fundação, fundamentando-se em critérios de ordem técnica, executiva e financeira.

Ao abordar os desafios confrontados bem como os traços distintivos do projeto, destaca-se a celeridade inerente à concepção, notadamente pelo fato de que a solução de reforço foi elaborada no espaço temporal exíguo de 90 dias. A inclusão de um sistema de instrumentação geotécnica no contexto da obra se erigiu como uma prática encorajada e, de fato, abraçada pela empreiteira executora. Espera-se que o aprendizado desta obra contribua para a aplicabilidade dessas estacas em obras com peculiaridades similares na prática da engenharia de fundações brasileira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALONSO, U.R. (2021). *Aspectos Teóricos e Práticos no reforço de Fundações. Geotecnia Brasil*. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=jFNZDD9FKNA>. Acesso em 13 de Agosto de 2023;
- CINTRA, J. C. A. (1995). *Fundações em solos colapáveis*. São Carlos. Tese- Livre- Docência- EESC-USP.
- CINTRA, J.C.A (1998). *Fundações em Solos Colapsíveis*. São Carlos, EESC/USP.
- DÉCOURT, L & QUARESMA, A. R.. *Capacidade de carga de estacas a partir de valores do SPT*. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações – COBRAMSEF, 6 Rio de Janeiro, 1978.
- JUNQUEIRA, S. : *Aspectos Práticos Sobre a Instalação e Utilização de Estacas Prensadas*, 1994. 209 p. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, 1994.
- LOLLO, J.A. (2008). *Solos colapsíveis: identificação, comportamento, impactos, riscos e soluções tecnológicas*. Cultura Acadêmica: Universidade Estadual Paulista, Pró - reitoria de Graduação, São Paulo: 2008.
- RODRIGUES, R. A., VILAR, O. *Análise do comportamento colapsível de um solo usando ensaios de compressão triaxial e edométricos*. In: Cobramseg, 16., 2012, Porto de galinhas. Anais. Porto de Galinhas, 2012.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.

