XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.5/94

Reforço de Fundação com Estacas Pressoancoradas: Solução para Recalques Diferenciais em Edifício com Parede de Concreto

Felipe Bowes Fernandes de Oliveira
Graduando em Engenharia Civil / Estagiário de Engenharia, Concreta Tecnologia em Engenharia Ltda, Salvador, Brasil, felipe.oliveira@concreta.com.br

Danilo Bastos Barbosa
Engenheiro Civil / Gestor de Obras II, Concreta Tecnologia em Engenharia Ltda, Salvador, Brasil, danilo.bastos@concreta.com.br

Minos Trocoli de Azevedo
Engenheiro Civil / Diretor, Concreta Tecnologia em Engenharia Ltda, Salvador, Brasil, minos.trocoli@concreta.com.br

RESUMO: O presente artigo apresenta o estudo e a execução de uma intervenção de reforço de fundação em um edifício com parede de concreto padrão Minha Casa, Minha Vida de cinco pavimentos que apresentava recalques diferenciais decorrentes da perda de capacidade de carga do solo de fundação. A estrutura originalmente apoiava-se em fundações rasas de concreto ciclópico, responsáveis por transferir as cargas da edificação ao solo. Ao longo dos anos, um vazamento contínuo de água contribuiu para o processo de degradação do solo, conforme constatado por ensaios de sondagem à percussão (NSPT), que indicaram a redução significativa da resistência do terreno adjacente ao edifício. Como solução, foi projetado e executado um sistema de reforço de fundação composto por estacas pressoancoradas, blocos de coroamento, vigas e lajes de concreto armado, de modo a redistribuir as cargas da superestrutura para camadas mais profundas e competentes do subsolo. Durante a execução, realizou-se o monitoramento contínuo das fissuras, permitindo acompanhar o comportamento do edifício em diferentes etapas executivas. Foi observada uma demanda de calda de cimento 80% superior à prevista no processo de injeção sob alta pressão, expandindo o diâmetro de influência para 74,4 cm, reduzindo o índice de vazios local de 0,90 para 0,65 na recomposição da rigidez da matriz solo-estaca. Ao final da intervenção, as evidências de campo atestaram que a transferência profunda das cargas promoveu um ganho de rigidez vertical de aproximadamente 20 vezes no sistema de suporte das fundações, resultando na parada imediata das deformações e na estabilização definitiva da edificação.

PALAVRAS-CHAVE: Reforço de fundação, Estacas pressoancoradas, Recalques diferenciais, Paredes de concreto.

ABSTRACT: This study details the foundation reinforcement of a five-story concrete wall building affected by differential settlements due to soil degradation from a continuous water leak. Standard Penetration Tests (SPT) confirmed a critical loss of bearing capacity. The intervention utilized press-anchored piles and a reinforced concrete structure to transfer loads to deeper competent layers. During high-pressure injection, grout consumption was 80% higher than predicted, expanding the influence diameter to 74.4 cm and reducing the local void ratio from 0.90 to 0.65. At the end of the intervention, field evidence confirmed that the deep load transfer provided an approximately 20-fold increase in the vertical stiffness of the foundation support system, resulting in the definitive stabilization of the building.

KEYWORDS: Foundation reinforcement, Micropiles, Differential settlement, Concrete walls.

1 INTRODUÇÃO

O Residencial Lagoa da Paixão II, em Salvador/BA, utiliza o sistema de paredes de concreto, cuja elevada rigidez demanda um suporte de solo extremamente uniforme. O Bloco 05, objeto deste estudo, enfrentou um processo de recalque diferencial severo causado pela lixiviação do solo arenoso sob as fundações originais. A incapacidade do terreno em sustentar as cargas aplicadas gerou movimentações que superaram a

capacidade de deformação da estrutura, resultando em um quadro patológico crítico que comprometeu a estabilidade global da edificação.

Dentre as manifestações observadas, destaca-se uma rachadura vertical que se estende do primeiro ao último pavimento, segmentando a estrutura em duas porções distintas. Esta patologia constitui a evidência visual mais contundente do fenômeno, expondo a rotação de um dos setores do edifício em relação ao seu eixo original de prumo. A gravidade dessa separação física e o avanço das trincas e rachaduras fundamentaram a evacuação imediata do edifício e a urgência de uma intervenção de reforço profundo para estabilizar o sistema, interromper o movimento rotacional e neutralizar o risco de colapso.



Figura 1. Manifestações Patológicas no Bloco 05.

2 INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA E DIAGNÓSTICO

Visando diagnosticar a instabilidade do Bloco 05, realizou-se uma nova campanha de investigação via sondagens SPT (ABNT NBR 6484:2020), cujos resultados revelaram anomalias críticas nas camadas superficiais. Observou-se resistência residual nula ($N_{SPT} = 0$, penetração por peso próprio das hastes) e índices de apenas 3 a 4 golpes para penetrações de até 49 cm, o que caracteriza um solo em estado de colapso. Esta ausência de compacidade evidencia a formação de vazios subsuperficiais por lixiviação severa, tornando o terreno incompatível com o suporte de fundações diretas.

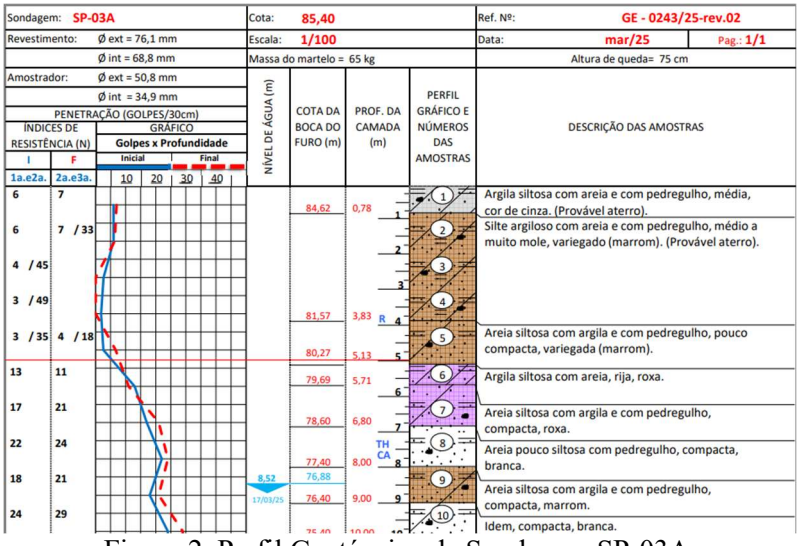


Figura 2. Perfil Geotécnico da Sondagem SP-03A.

A discrepância técnica torna-se evidente ao confrontar os dados atuais com as investigações geotécnicas realizadas na fase de implantação da obra. Originalmente, os relatórios de sondagem apresentavam perfis de rigidez progressiva, caracterizados pelo aumento gradual e consistente dos índices de resistência conforme a profundidade.

Adicionalmente, as investigações geotécnicas localizaram o nível freático (NA) a uma profundidade média de 8,50 m. No que concerne à constituição do terreno, o perfil apresenta um horizonte superficial de argila siltosa de espessura reduzida, sobreposto a uma extensa camada de areia siltosa que predomina em quase toda a profundidade amostrada.

3 PROJETO DE REFORÇO E ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

O projeto de reforço, pautado nas diretrizes da ABNT NBR 6122:2022, fundamentou-se na premissa de transferência integral das cargas da superestrutura para horizontes profundos e mecanicamente competentes, contornando a zona de instabilidade superficial. A solução adotada consistiu na implantação de um sistema de 36 estacas pressoancoradas (microestacas) com diâmetro nominal de 150 mm. O comprimento efetivo de 8,0 metros foi definido para assegurar o embutimento do trecho de ancoragem em solo estável, transpondo as camadas suscetíveis à erosão e considerando as restrições impostas pela cota do nível freático.

Estruturalmente, o sistema foi concebido para criar uma cadeia de transmissão de esforços que garanta a solidariedade entre a nova fundação e a estrutura existente. O fluxo de cargas proveniente da superestrutura do edifício é transmitido a partir das paredes de concreto, que descarregam sobre lajes de apoio dimensionadas para esta interface. Estas lajes transmitem os esforços para as vigas de reforço, as quais repassam as cargas aos blocos de coroamento. Por fim, a carga é transferida às microestacas, que dissipam as tensões no maciço solo por meio do atrito lateral.

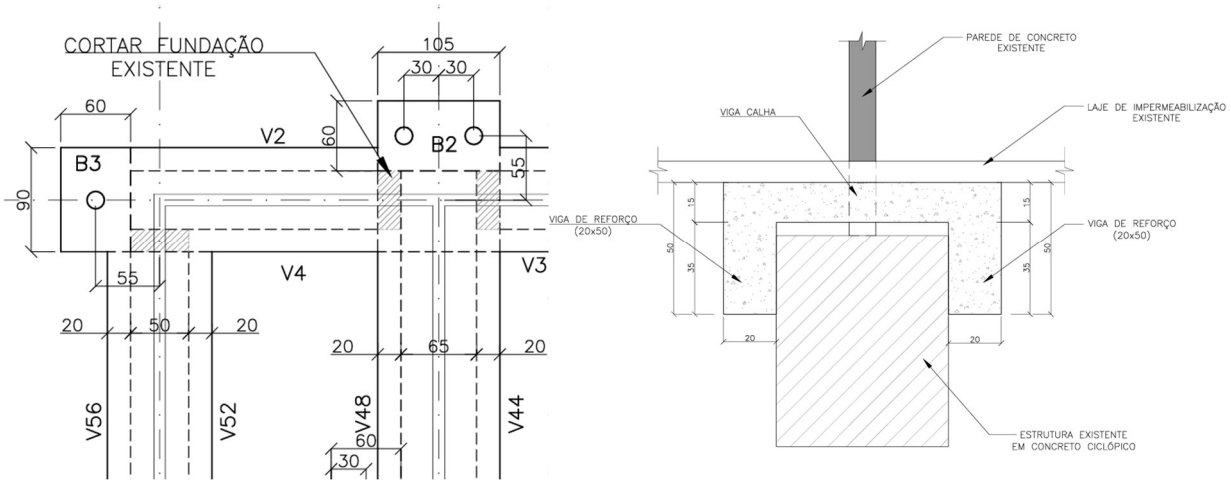


Figura 3. Detalhes da Mesoestrutura.

As especificações técnicas dos elementos e materiais foram determinadas para atender aos requisitos de durabilidade e desempenho estrutural:

- **Geometria e Capacidade:** Estacas com diâmetro de 150 mm e profundidade de 8,0 m, dimensionadas para cargas de trabalho de 20 tf e 25 tf, conforme a distribuição de cargas nos eixos do edifício.
- **Mesoestrutura**: Composta por vigas de reforço com seção transversal de 20x50 cm e blocos de coroamento executados em concreto classe C30. A especificação atende à Classe de Agressividade Ambiental III, garantindo a proteção das armaduras frente às condições do subsolo e à umidade local, conforme a ABNT NBR 6118:2023
- **Elementos de Ancoragem e Tirantes:** O núcleo estrutural das microestacas é constituído por barras de aço de alta resistência, do tipo THB-32 mm, posicionadas centralmente ao fuste. A interface de transferência de carga no bloco de coroamento é composta por um conjunto de placas de aço e porcas sextavadas. Este sistema é o responsável por garantir a continuidade estrutural entre a fundação profunda e a mesoestrutura.

- **Trecho de Ancoragem e Injeção:** Do comprimento total da estaca, foi definido um trecho ancorado de 5,00 metros. Este segmento é dotado de tubos de manchete para a injeção multiestágio de calda de cimento sob pressão, visando a formação do bulbo de ancoragem e a maximização do atrito lateral no horizonte de solo competente.
- **Armadura de Fretagem:** Devido à elevada concentração de tensões na região da placa de ancoragem, foi dimensionada uma armadura de fretagem (espirais ou estribos helicoidais) no interior dos blocos de coroamento. Esta armadura tem a função de resistir aos esforços de fendilhamento (tração transversal), impedindo a ruptura do concreto por expansão lateral e garantindo a integridade do nó estrutural sob as cargas de serviço da edificação.

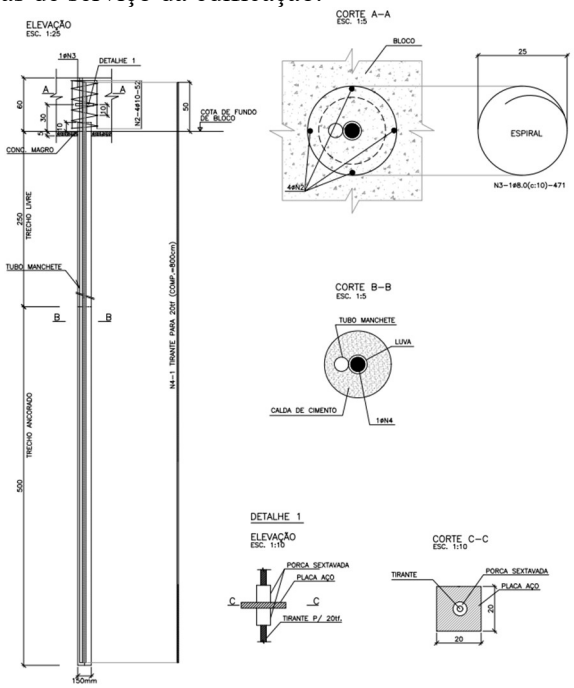


Figura 4. Detalhes da Microestaca.

4 PROCEDIMENTOS EXECUTIVOS

A execução do reforço seguiu um rito rigoroso para garantir a segurança da estrutura já comprometida, conforme as especificações de projeto e as diretrizes normativas.

4.1 Escoramento da Edificação

Previamente a qualquer intervenção no solo ou na fundação original, foi realizado o escoramento preventivo da edificação. Esta etapa foi crítica para mitigar os riscos de agravamento das patologias existentes durante as etapas de vibração (perfuração) e escavação. Foram utilizadas torres metálicas e escoras devidamente dimensionadas para aliviar as tensões nas paredes de concreto, garantindo um ambiente de trabalho seguro e a estabilidade global do bloco durante a reorganização dos esforços.

4.2 Locação e Perfuração dos pontos das Estacas

A locação dos 36 pontos de estacas seguiu rigorosamente o projeto. A perfuração foi executada com diâmetro nominal de 150mm, utilizando perfuratriz hidráulica (Sonda 920) adaptada para operar em locais com restrição de pé-direito. Conforme nota de projeto, as estacas foram aprofundadas até a cota de 8,0m, utilizando fluido estabilizante para garantir a integridade do fuste nas camadas de areia siltosa identificadas no diagnóstico.



Figura 5. Execução de Furo das Estacas.

4.3 Instalação do Tirante e Selagem da Bainha

Nesta etapa, procedeu-se à descida do tirante central (aço THB-32). O sistema de injeção foi estruturado com a utilização de tubos de manchete em PVC, que funcionam como dispositivos de injeção setorizada. Estes tubos possuem furos protegidos por válvulas de borracha (manchetes) e anéis de vedação, dispostos a cada 50cm ao longo do trecho de ancoragem. Após a instalação, foi executado o preenchimento da bainha com calda de cimento por gravidade (fluxo ascendente), visando a proteção do tirante e a preparação para os estágios de injeção sob pressão.

4.4 Injeção de Calda de Cimento

A injeção foi realizada em múltiplos estágios por meio de uma bomba de injeção de calda de cimento (BIC) através das manchetes, com pressão de encerramento de 20bar (20kgf/cm²), conforme prescrito em projeto. Durante este processo, verificou-se um consumo de calda cerca de 80% superior ao estimado inicialmente (954 sacos consumidos de 520 previstos).



Figura 6. Injeção de Calda de Cimento.

O volume total injetado foi de 38,99 m³. Excluindo-se o volume nominal teórico das 36 microestacas ($D_{nom} = 0{,}15$ m e $L = 8$ m), $V_{furos} \approx 5{,}09$ m^3, o volume excedente no maciço foi de $V_{exc} \approx 33{,}90$ m^3 (0,94 m³/estaca). Assumindo porosidade média pós-lixiviação $n \approx 0{,}45$ e trecho de ancoragem $L_{anc} = 5$ m, o raio de melhoria (R_m) gerado por permeação e compactação radial (expansão de cavidade) é:

$$R_m = \sqrt{r_0^2 + \frac{V_{exc}}{\pi \cdot L_{anc} \cdot n \cdot 36}} \approx 0{,}372 \text{ m} \quad (1)$$

Este processo expandiu o diâmetro de influência para 74,4 cm, reduzindo o índice de vazios local de 0,90 (estado fofo lixiviado) para 0,65 (estado compacto), valores típicos para horizontes arenosos-siltosos descritos na literatura clássica (Velloso e Lopes, 2010), recompondo a rigidez da matriz solo-estaca.

4.5 Execução dos Blocos e Vigas de Tranferência

Durante a fase de escavação e exposição das bases existentes, constatou-se que as dimensões da fundação em concreto ciclópico apresentavam variações significativas em relação ao previsto em projeto, que considerava larguras entre 50 e 65 cm. Essa divergência técnica decorreu do esbojamento do concreto na época da construção original (ausência de fôrmas ou sobrelargura de escavação), resultando em elementos de fundação mais largos e irregulares do que o nominalmente projetado.

Diante dessa realidade de campo, as dimensões dos blocos de coroamento e das vigas de reforço sofreram ajustes geométricos pontuais para garantir o adequado encunhamento e a continuidade do fluxo de cargas. Tais alterações foram acompanhadas de uma reavaliação técnica concomitante à execução, assegurando que o dimensionamento final respeitasse os critérios de rigidez e segurança previstos

O concreto utilizado seguiu rigorosamente o estudo de traço formulado com cimento CP II F 32 e aditivo superplastificante. Para minimizar o tempo de exposição da estrutura e permitir que a nova fundação assumisse as cargas o mais rápido possível, o traço foi desenhado para atingir 100% da resistência especificada (fck = 30MPa) em apenas 7 dias. Essa estratégia acelerou o cronograma e garantiu que a transferência de carga ocorresse com o concreto já em maturidade estrutural, minimizando danos por deformações excessivas.

4.6 Execução das Lajes de Apoio das Paredes

A execução foi realizada de forma segmentada, adotando-se o método sequencial alternado. Esta técnica consistiu na abertura de trechos intercalados de, no máximo, 1,50 m de extensão, garantindo que a superestrutura mantivesse pontos de apoio na fundação original enquanto os novos elementos de reforço eram processados. Tal precaução foi essencial para viabilizar a transferência gradual de cargas e evitar a concentração de tensões que pudessem exacerbar as manifestações patológicas existentes.

5 ANÁLISE DE DESEMPENHO E MONITORAMENTO ESTRUTURAL

Para validar a eficácia da intervenção, analisou-se o comportamento mecânico do sistema solo-fundação-estrutura sob a ótica da Interação Solo-Estrutura (ISE). A elevada rigidez das paredes de concreto agiu como viga-parede, redistribuindo cargas via efeito arco para os apoios íntegros periféricos durante o recalque da região central colapsada. Esse fenômeno gerou tensões de tração oblíquas na superestrutura, desencadeando o quadro de fissuração progressiva. Com a implantação do sistema de reforço profundo, a interface solo-estrutura foi modificada pela transferência de esforços para camadas competentes. A eficácia deste processo foi avaliada de forma combinada por meio do monitoramento das deformações na superestrutura e do ensaio de Prova de Carga Estática (PCE) em campo.

5.1 Monitoramento de Fissuras

O monitoramento da taxa de abertura das fissuras e rachaduras no Bloco 05 teve como objetivo principal identificar o nível de atividade estrutural frente aos recalques diferenciais e às vibrações inerentes ao processo executivo. A metodologia consistiu na fixação de pinos testemunhos metálicos posicionados perpendicularmente às descontinuidades, servindo como pontos de referência estáveis.

As leituras foram realizadas com um paquímetro digital de precisão (resolução de 0,01 mm), estabelecendo-se uma medida inicial de referência para cada ponto. Foram monitorados doze pontos de controle distribuídos estrategicamente nos cinco pavimentos. Dentre os cinco pontos de maior movimentação, o ponto 11 (último pavimento) destacou-se como o mais sensível e representativo, capturando as maiores amplitudes de movimentação devido à rigidez do sistema de paredes de concreto.

O monitoramento contínuo das descontinuidades por paquímetro digital de precisão registrou graficamente a estabilização do movimento rotacional de corpo rígido sofrido pela edificação, conforme as curvas apresentadas na Figura 7.

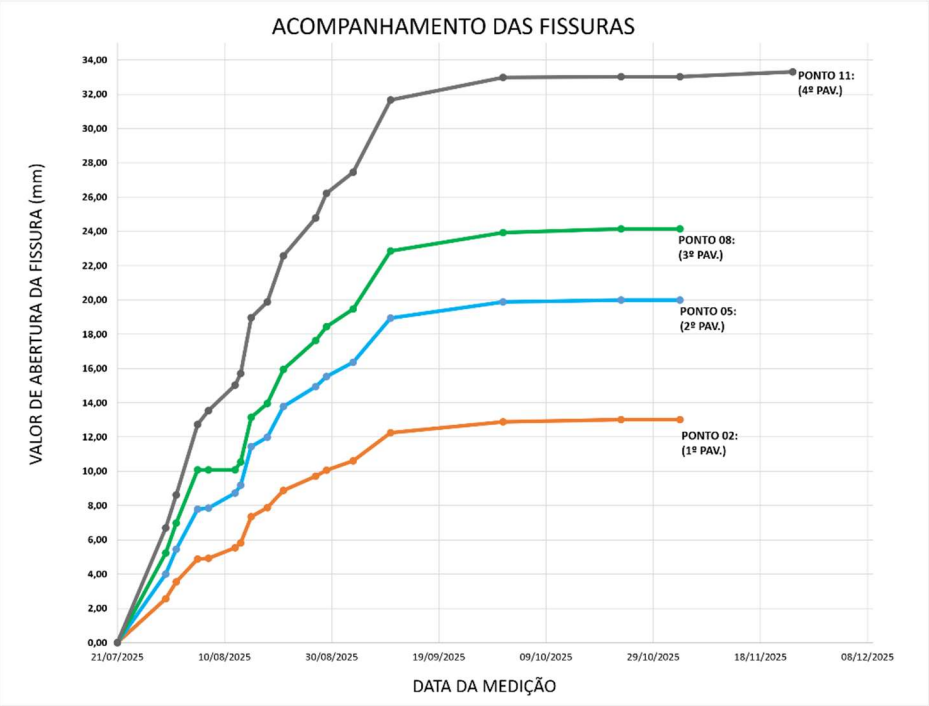


Figura 7. Monitoramento Estrutural.

A análise temporal indica que a velocidade de abertura das fissuras ($\Delta s/\Delta t$), altamente ativa durante as fases de perfuração e injeção inicial (julho a setembro de 2025), sofreu forte desaceleração a partir de outubro de 2025, coincidindo com a consolidação da mesoestrutura de transferência. Com a cura completa do concreto e a transferência total das cargas estruturais para as microestacas em novembro de 2025, as curvas horizontalizaram-se completamente ($\Delta s \approx 0$), consolidando as leituras de estabilização em valores acumulados de 1,3 cm (Ponto 02 – 1º pavimento) até 3,3 cm (Ponto 11 – 4º pavimento).

O gradiente de deslocamentos crescente com a altura da edificação comprova fisicamente a cinemática de rotação sofrida pelo Bloco 05, que foi definitivamente estabilizada pelas novas fundações profundas.

5.2 Prova de Carga Estática (PCE)

A validação da capacidade de carga das microestacas foi realizada através de um ensaio de prova de carga à tração. A escolha por este método, em detrimento da compressão, justifica-se pela restrição de espaço operacional dentro do condomínio e pela necessidade de validar especificamente o atrito lateral e a eficiência da injeção sob pressão, que são os mecanismos de suporte deste sistema.

O sistema de reação foi concebido com vigas metálicas ancoradas ao solo por meio de duas estacas de reação (cargueiras), sendo o esforço transmitido à estaca de ensaio através de um macaco hidráulico central. Para a medição dos deslocamentos (recalques), foram instalados quatro deflectômetros com precisão de 0,01 mm, dispostos em dois eixos ortogonais sobre a cabeça da estaca e fixados em vigas de referência independentes, livres de interferências externas.

Conduziu-se ensaio de PCE à tração lenta (ABNT NBR 16903:2020) na estaca E22 até a carga máxima de 50 tf, equivalente ao dobro da carga de trabalho de projeto de 25 tf, atendendo ao fator de segurança ($F.S. \geq 2{,}0$) da ABNT NBR 6122:2022. Sob o estágio de serviço de 25 tf (250 kN), o deslocamento elástico medido na cabeça da estaca registrou-se em 4,30 mm, enquanto no pico de carregamento de 50 tf (500 kN), o deslocamento máximo alcançou 12,77 mm, sem qualquer sinal de ruptura por arrancamento. Após o descarregamento completo do sistema, o deslocamento plástico residual acumulado estabilizou-se em 7,59 mm. Isso demonstra um retorno elástico de 5,18 mm (representando aproximadamente 40% de recuperação do deslocamento máximo), atestando o comportamento elasto-plástico e a rigidez do bulbo de ancoragem formado a 20 bar.

O deslocamento linear de 4,30 mm registrado no estágio de serviço (250 kN) permite determinar a rigidez elástica de uma microestaca individual (K_{estaca}) por:

$$K_{estaca} = \frac{250\text{kN}}{4{,}30\text{mm}} \approx 58 kN/mm \quad (2)$$

No sistema de 36 microestacas, desprezando efeitos de grupo pelo espaçamento adotado, a rigidez global pós-reforço $\sum K_{estaca} \approx 2.088\, kN/mm$. Para fins comparativos, a rigidez vertical original do sistema assentado sobre o solo colapsado foi estimada com base no coeficiente de reação vertical de Terzagui (1955) para sapatas em solos siltosos e arenosos (resultando em $K_{inicial} \approx 106\,\text{kN/mm}$). A relação elástica atesta que a intervenção profunda promoveu um ganho de rigidez vertical de aproximadamente 20 vezes no sistema de suporte das fundações. Esse acréscimo justifica fisicamente a parada imediata das deformações e a estabilização definitiva da edificação.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A intervenção de reforço realizada no Bloco 05 do Residencial Lagoa da Paixão II permitiu concluir que a reabilitação de estruturas sensíveis, como as de paredes de concreto, exige um diagnóstico preciso e uma execução adaptativa. A partir das análises analíticas e dos dados quantitativos de campo, conclui-se que:

- **Eficácia do Sistema:** A utilização de estacas pressoancoradas mostrou-se a solução ideal para o cenário de instabilidade por erosão hídrica. A técnica não apenas restabeleceu o suporte profundo em horizontes de rigidez progressiva, mas também atuou como um método de melhoria de solo.
- **Tratamento de Vazios:** O consumo real de calda de cimento 80% superior ao estimado inicialmente foi um dado empírico crucial que confirmou a existência de descontinuidades internas no solo e validou a injeção sob alta pressão (20 bar). Esse processo expandiu o diâmetro de influência para 74,4 cm, reduzindo o índice de vazios local de 0,90 para 0,65 e recompondo a rigidez da matriz solo-estaca.
- **Validação Técnica**: A Prova de Carga Estática executada na estaca E22 comprovou a alta capacidade do reforço ao registrar um deslocamento de apenas 4,30 mm sob a carga de serviço de 25 tf, mantendo um comportamento seguro mesmo sob a carga máxima de ensaio de 50 tf (12,77 mm de deslocamento máximo e 7,59 mm residual). Esse desempenho prático atesta que a intervenção profunda promoveu um ganho de rigidez vertical imediato de aproximadamente 20 vezes no sistema de suporte das fundações. Acréscimo que converge com o monitoramento de fissuras da Figura 7, apresentando uma perfeita inflexão horizontal ($\Delta s \approx 0$) e estabilização completa de todos os pontos a partir da transferência total das cargas estruturais para as microestacas em novembro de 2025.

Em suma, o estudo de caso reforça a viabilidade técnica das estacas pressoancoradas em situações emergenciais de perda de suporte do solo. A experiência documentada serve como referência para intervenções em conjuntos habitacionais de alta rigidez, onde a interação solo-estrutura exige soluções que combinem capacidade de carga elevada com mínima perturbação da estrutura existente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 6484. *Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio.* Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16903. *Solo - Prova de carga estática em fundação profunda.* Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 6122. *Projeto e execução de fundações.* Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2023). NBR 6118. *Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.* Rio de Janeiro.

Terzaghi, K. (1955) *Evaluation of coefficients of subgrade reaction*. Géotechnique, 5 (4), p. 297-326.

Velloso, D. A., Lopes, F. R. (2010) *Fundações*. Oficina de Textos, São Paulo, v. 2.