

**UTILIZAÇÃO DE GEOENRIJECIMENTO COM VISTA À ESTABILIZAÇÃO DO
PROCESSO DE RECALQUE EM PRÉDIO HISTÓRICO NA CIDADE DE
PORTO ALEGRE/RS BRASIL.**
**CPR GROUTING TECHNIQUE FOR SETTLEMENT STABILIZATION IN A
HISTORIC BUILDING IN THE CITY OF PORTO ALEGRE/RS BRAZIL**

Cirone, Alessandro, *Engegraut, Rio de Janeiro/RJ, Brasil,*

alessandro@engegraut.com.br

Correia Rodrigues, Joaquim, *Engegraut, Rio de Janeiro/RJ, Brasil,*

joaquim@engegraut.com.br

Lang Fraga, Marciano, *MLF Geotecnia, Porto Alegre/RS, Brasil,*

marciano@mlfgeotecnia.com.br

Sonaglio, Gonçalo de Lima, *MLF Geotecnia, Porto Alegre/RS, Brasil,*

goncalo@mlfgeotecnia.com.br

Pompermayer, Matheus, *MLF Geotecnia, Porto Alegre/RS, Brasil,*

matheus@mlfgeotecnia.com.br

RESUMO

Este trabalho apresenta a solução adotada para interromper antigo processo de recalque em um prédio histórico na cidade de Porto Alegre/RS, avaliando-se os fatores que contribuíram para o fenômeno. Deformações, associadas ao intenso e crônico processo de recalques, presente desde sua construção, no início do século passado, causaram acentuada inclinação do prédio. Com objetivo de se quantificar este comportamento deformativo, instalaram-se 22 pinos de recalque em diferentes locais. Realizou-se tomografia do solo, por imagem, (TSI), possibilitando a obtenção do módulo cisalhante inicial (G_0) do solo, associado com outros parâmetros geotécnicos. A solução para interromper o processo de recalque foi o Geoenrijecimento, técnica específica de melhoramento de argilas moles, que modifica suas características, tornando-a homogênea e com parâmetros geotécnicos pré-estabelecidos, sem necessitar de escavações ou intervenções invasivas.

ABSTRACT

The solution to interrupt the settlement in a historic building located in the city of Porto Alegre / RS is presented, including the evaluation of possible factors who caused the observed pathologies. Due to the settlement occurring throughout the years, uncontrolled deformations caused a inclination in the building structure. In order to monitor and to analyze the deformations, 22 pins were installed in different locations along the exterior of the building. Imaging soil tomography (IST) was performed to obtain the shear wave velocity (V_s) and the initial shear modulus (G_0) of the local soil. The CPR Grouting was the solution to prevent and to correct the settlement process, this technique is known for improving soft clays without the need of excavations or invasive interventions.

1. INTRODUÇÃO

O edifício principal da Fundação “O Pão dos Pobres de Santo Antônio” é um notável conjunto arquitetônico monumental, Figura 1, construído no início do século XX, que constitui patrimônio histórico e cultural da cidade de Porto Alegre/RS – Brasil, localizado no bairro Cidade Baixa. A construção possui formato de “U”, com corpo

central estreito e alongado. É composto por três pavimentos, além do térreo. Apresenta perceptível e crônico processo de recalque diferencial, induzindo importante inclinação tanto nos elementos verticais como nos horizontais.



Figura 1: Fachada frontal(oeste) do edifício

A estrutura é originalmente de pedra argamassada e vedações em alvenaria de tijolo. O conjunto de trincas e fissuras que apareceram, ao longo de quase 90 anos, em diversas partes do prédio, foram causadas pelo crônico processo de recalque diferencial. Após inspeção realizada, constatou-se que a fundação é do tipo direta, assentada à profundidade de 1,70 m em camada de areia da cor verde azulada; e que seu sistema de fundação é em sapata corrida de concreto, com 25 cm de altura e com cerca de 1,80 m de largura, sobre a qual ergueu-se um sistema escalonado de baldrame, constituído por materiais bastante heterogêneos (pedras, tijolos e argamassa). Esta alvenaria de fundação apresenta cerca de 1 m de largura e 1,15 m de altura.

Constatou-se, também, que à medida que o prédio recalcava, ao longo de décadas, corrigia-se o nível da calçada periférica ao prédio, com novos lançamentos de aterro e pisos. O antigo sistema de drenagem foi encontrado na profundidade de 40 cm, totalmente obstruído por raízes. A Figura 2, ilustra a geometria da fundação original.

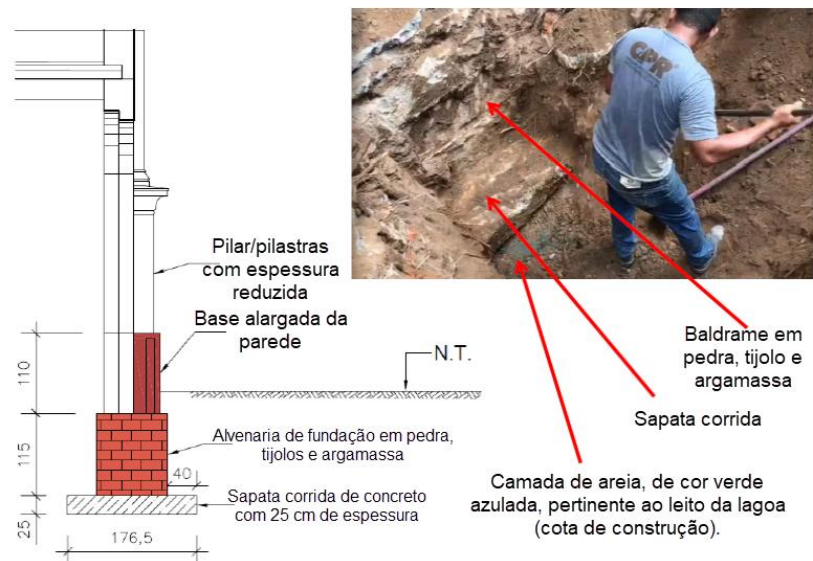


Figura 2: Geometria da fundação e a prospecção.

2. CARACTERÍSTICAS DO SOLO DE FUNDAÇÃO

Para identificação e caracterização do solo de fundação, presente na área deste projeto, executou-se 6 perfurações de sondagem de reconhecimento do solo SPT. De acordo com as sondagens, o solo é predominante constituído por camada superficial de aterro, com cerca de 2 m, seguida de extrato de areia fina e média, com pouca argila, variando de pouco a muito compacta, com 2 m de espessura. Abaixo, encontra-se camada de argila siltosa mole, que se estende até profundidades de 8 a 10 m. Após, segue-se camada de areia fina e média, com pouca argila, variando de medianamente compacta a muito compacta até o limite do impenetrável encontrado entre -14,05 a -18,80 m.

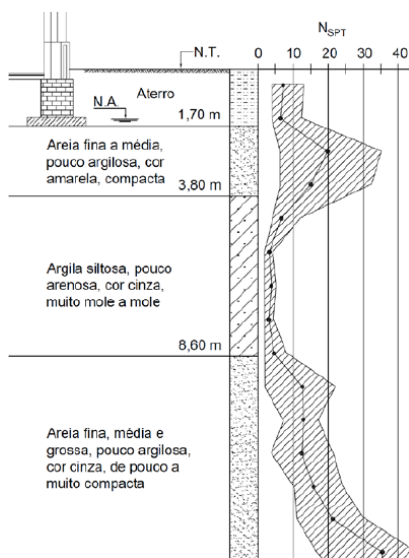


Figura 3: Modelo geotécnico. Intervalo de valores SPT e média de todos os ensaios

O nível d'água após 24 horas foi encontrado entre -1,20 e -1,70 m de profundidade, conforme apresentado na Figura 3. A locação das sondagens é indicada na Figura 4.

3. O PROCESSO DEFORMATIVO IMPOSTO DESDE SUA CONSTRUÇÃO

Não há informações sobre o início do processo de recalques na edificação, e, 3 meses antes do início da intervenção, realizou-se campanha de monitoramento de recalques, com um plano de instrumentação com base em 22 pinos instalados em diferentes “pilastras” do edifício (Figura 4). Monitorando-se os recalques dos pilares, constatou-se processo de deformação crescente, com velocidades na faixa de 10 a 20 $\mu\text{m}/\text{dia}$.

Experiências nacionais – como no Palácio do Catete, no Rio de Janeiro – evidenciam que deformações na faixa de 5 a 30 mm causam abertura de fissuras e desaprumo em paredes. Por outro lado, velocidades de recalques bem pequenas, de apenas 5 $\mu\text{m}/\text{dia}$, em um processo de décadas, acabam por comprometer a construção. O edifício desenvolveu severo processo de recalque diferencial, em direção às fachadas leste e sul, inclinando-se em duas direções. Conseqüentemente, surgiram trincas, que danificaram o prédio, ameaçando seu desmembramento no lado sul, razão pela qual executou, anos atrás, duas juntas de dilatação, simétricas, que orientaram o processo deformativo, Figura 4.

Considerando-se a condição do solo de fundação, a modificação sistemática da ocupação interna e o desenvolvimento urbano ao redor da edificação, que foi substancial, pode-se afirmar o seguinte:

- A convergência de duas avenidas, junto à edificação, associa considerável nível de carga adicional e vibrações no pavimento, com atuação nas camadas de solo mais superficiais e, conseqüentemente, no sistema de fundação direta.
- A camada de argila mole, embora pré-adensada pelo carregamento centenário, amplifica a intensidade das vibrações, por ressonância.
- Devido ao processo contínuo de vibrações, a camada arenosa, sob o aterro, com cerca de 3 metros de espessura, sofre processo de acomodação, impondo recalques diferenciais motivados por cargas diferenciais da edificação.
- Ao longo de quase 100 anos, certamente, houve variação das cargas acidentais atuantes na edificação e/ou modificação no uso da edificação, impondo um histórico de carregamento diferenciado.
- A dinâmica do nível freático, em função de sua flutuação e, também, motivado por novas obras vizinhas, afeta o aterro e a camada arenosa. A própria ação de precipitações e a grande permeabilidade do aterro e da camada de areia impõe gradientes diferenciais e prejudiciais ao sistema de fundação existente.

5. SONDAJENS TOMOGRÁFICAS DO SOLO COM IMAGEM

A tomografia do solo por imagem (TSI) é uma sondagem não invasiva e não destrutiva, com capacidade de avaliar grandes volumes de solo de maneira rápida e segura (Kearey et al., 2009). Baseia-se em ondas superficiais, que se propagam no solo por meio de diferentes frequências. Cada camada é identificada com base no comportamento elástico do solo às pequenas deformações, relacionando a velocidade de fase, característico deste tipo de sondagem, com o seu módulo cisalhante (G_0) (ABGE, 2018).

Realizaram-se duas tomografias, sendo a locação apresentada na Figura 4. A primeira (TSI – I) foi realizada junto à fachada oeste (frontal) do prédio e a segunda (TSI – II), na fachada sul. As análises contaram com o auxílio da Tabela 1, com base na experiência da empresa executora, que faz relação da Velocidade de onda cisalhante (V_s), com parâmetros geotécnicos. A região frontal (oeste) do edifício, apresenta camada de solo mole entre 4 e 9 m de profundidade, com resistência não drenada de 12,5 a 25 kPa, abaixo de material arenoso compacto. Identificou-se bolsão de solo muito mole, com resistência extremamente baixa (<12,5 kPa). Este bolsão encontra-se localizado na região lateral do prédio, onde o processo de recalque encontrava-se mais intenso. O solo firme está disponível a partir dos 9 m de profundidade.

Na TSI – I (Figura 5), identificou-se solo extremamente mole próximo à região leste do empreendimento, com resistência menor que 12,5kPa, sinalizando praticamente ausência de capacidade de carga, o que justifica o processo, com recalques da ordem de 60 cm. Detectou-se, também, aterro superficial (até 2 m de profundidade).

Nota-se, também, que a camada de solo mole encontra-se presente, de forma constante, entre as profundidades de 4 a 7 m. O solo rijo está localizado a partir de 9 m de profundidade.

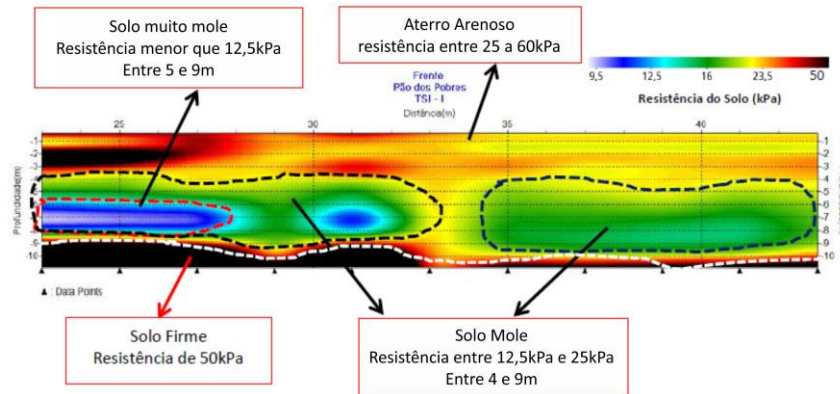


Figura 5: TSI – I

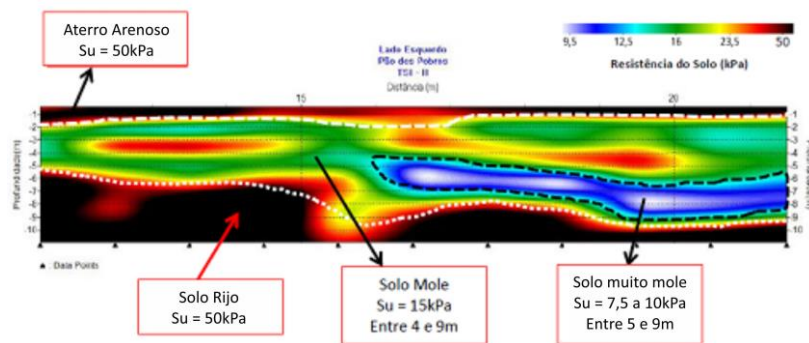


Figura 6: TSI – II

Tabela 1: Parâmetros do solo original (fonte: Engegraut, 2019)

Consistência	Descrição	V_s (m/s)	SPT	G_0 (MPa)	s_u (kPa)	σ_0 (kPa)
Rija	Depósitos profundos, pré-adensados ou de antiga sedimentação. Solo coluvionar.	190-250	11 a 25	8 - 15	60 - 170	140 - 200
Média	Depósitos argilosos profundos intercalados com camadas ou lentes arenosas.	130-190	5 - 10	3 - 8	25 - 60	80 - 140
Mole	Solos sedimentares argilosos quaternários subconsolidados. Argilas plásticas.	80 - 130	1 - 5	1,0 - 3,0	12,5 - 25	40 - 80
Muito mole	Depósitos argilosos moles com elevado índice de plasticidade ($IP > 40$), alto teor de umidade e presença de matéria orgânica (turfas).	< 80	< 1	1,0	< 12,5	< 40

Nota : V_s = velocidade da onda cisalhante; SPT = índice de resistência à penetração; G_0 = módulo de cisalhamento a pequenas deformações; s_u = resistência não drenada; σ_0 = tensão admissível de referência;

No solo de fundação, pertinente à fachada dos fundos, executou-se a TSI-II (Figura 6), verificando-se presença de camada argilosa muito mole, entre 2 e 6m de profundidade. Ou seja, está presente em toda a extensão da área estudada, onde a

estrutura sofreu maior processo de recalque. Identificou-se que o aterro apresenta resistência cisalhante relativamente baixa, possivelmente pelo grau de compactação do solo insuficiente.

6. ANÁLISE DE POSSÍVEIS SOLUÇÕES PARA INTERROMPER O CRÔNICO PROCESSO DE RECALQUE

Fundações de edifícios históricos, frequentemente, apresentam baixa resistência à compressão ou à flexão, devido a uma argamassa pobre aglomerante empregada e/ou a falta de armaduras. Para a solução do problema apresentado, inicialmente avaliou-se o critério econômico, com orçamentos realizados à época (2018) apresentados na Tabela 2. Com exceção das colunas de Jet Grouting com 200cm de diâmetro, as demais soluções apresentaram um custo com mesma ordem de grandeza.

Tabela 2: Orçamento das soluções para interrupção dos recalques.

Método	Valor (Milhões de Reais - R\$)
Reforço com estacas metálicas	1,0 a 1,4
Jet Grouting - 80cm	1,1 a 1,9
Jet Grouting - 200cm	2,2 a 2,4
Estacas Mega	1,0 a 1,5
Geoenrijecimento	1,5

Desta forma, idealizou-se a solução por meio de elementos verticais, com estacas ou colunas, apoiadas no solo firme e o topo do elemento incorporado na sapata corrida, que levaria uma cinta em concreto armado, de modo a incorporar todo o novo sistema, evitando recalques diferenciais. O reforço das fundações, utilizando a solução de Estacas Mega (Hachich et al., 2016 e ABEF, 2016) ou microestacas, seria realizado instalando as estacas inclinadas ou verticalmente ao lado dos elementos de fundação ou, ainda, perfurando-os. O conceito é o da transferência das cargas da edificação para camada de solo resistente. Ou seja, modificava-se completamente o sistema de fundação da centenária edificação.

A execução de Jet Grouting (Burke e Yoshida, 2013 e ABEF, 2016), ocasionaria recalques denominados “tecnológicos”, inerentes à sua execução, pois o jato de alta pressão deslocaria violentamente o solo, provocando deformações irreversíveis, danificando ainda mais a estrutura, fragilizando-a. Em resumo, abandonou-se a solução com elementos verticais ou com fundação profunda pois, além de modificar o patrimônio histórico, a intervenção seria extremamente traumática e perigosa. A solução escolhida foi a baseada no melhoramento e readequação do solo existente à antiga fundação, ou seja, o geoenrijecimento, que modifica o comportamento mecânico do material, interrompendo o processo de recalque, sem necessitar de escavações ou intervenções invasivas, agindo diretamente na raiz do problema, ou seja, nas camadas de solo mole (Rodrigues, 2018).

Este tipo de intervenção pode caracterizar-se como “não invasiva” considerando-se que o acesso ao solo de fundação, e o posterior melhoramento do solo, é feito com furos de aproximadamente 8cm de diâmetro, sem nenhum prejuízo ao antigo sistema de fundação. A técnica cria, inicialmente, um ambiente drenante artificial, no solo argiloso, com geodrenos para a seguir, comprimi-lo, consolidá-lo e confiná-lo, via expansão de cavidades, com o bombeamento de bulbos de geogROUT. O resultado é o

adensamento do solo, impondo resistência em sua totalidade, além do processo de confinamento, que estabelece níveis calculados de rigidez.

O processo caracteriza-se por atuar com tensões radiais, de compressão, no solo mole ao longo de toda profundidade trabalhada, tendo resposta imediata com o retrocesso do processo de recalque. É importante que seja realizado monitoramento geotécnico do início ao fim da execução.

A técnica promove a formação de campos de tensões sob a antiga estrutura, o que exige intenso monitoramento ótico e nivelamento à laser, de modo a preservá-la. A modificação gradual do solo mole para rijo, é verificada através de imagens tomográficas. O processo executivo é ilustrado na Figura 7.

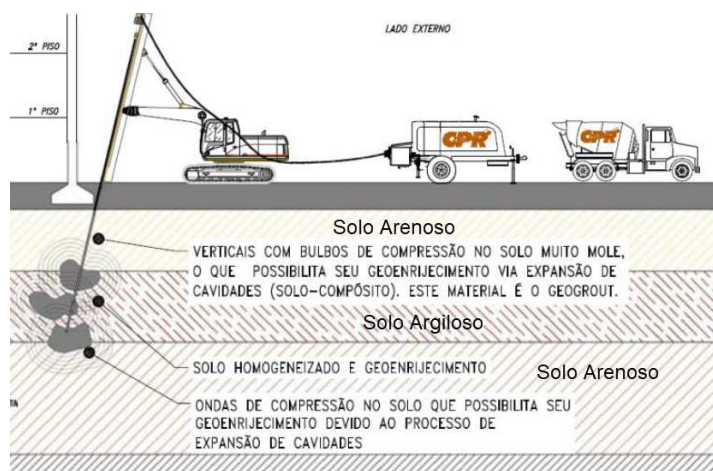


Figura 7: Técnica de Geoenrijecimento

7. A EXECUÇÃO DO GEOENRIJECIMENTO DO SOLO

Sob cada "pilastra" da edificação (Figura 4), foram feitos pré-furos, com auxílio de ar comprimido, atravessando-se o aterro e a primeira camada arenosa, alcançando-se o solo mole. Estes furos, verticais e inclinados, foram executados à distância de 1 m das "pilastras", de modo a não atingir a aba das sapatas de fundação.

Com o equipamento de geoenrijecimento em posição, interligado com bomba específica, iniciou-se a formação dos bulbos de geogROUT (argamassa com consistência seca) a aproximadamente 9m de profundidade, com objetivo de comprimir radialmente o solo mole, a partir desta cota, de modo a não criar tensões localizadas nos elementos de fundação acima, chegando-se até cerca de 1m da antiga fundação.

O processo de expansão de cavidades é desenvolvido, então, promovendo-se a compressão do solo mole, em direção às camadas arenosas. Com este processo, melhoramento do solo de fundação, os pinos instalados no local subiram alguns milímetros, indicando que o prédio respondeu ao processo de modificação do solo de fundação.

Durante a aplicação da técnica são geradas poropressões nas camadas de solo mole, que se dissipam e geram elevadas deformações em um curto período, mas de forma controlada. Como existe a uniformização das características mecânicas do solo,

devido à técnica utilizada, as deformações que ocorriam de maneira diferenciada ao longo da edificação agora passaram a ocorrer de maneira uniforme, não gerando distorções. O recalque medido tende a cessar após poucos meses do fim da aplicação da técnica, conforme pode ser visualizado na Figura 8. Conforme já mencionado, se as medidas não tivessem sido aplicadas, os maiores recalques estimados seriam na ordem de 150 mm, ao invés dos 50mm apresentados.

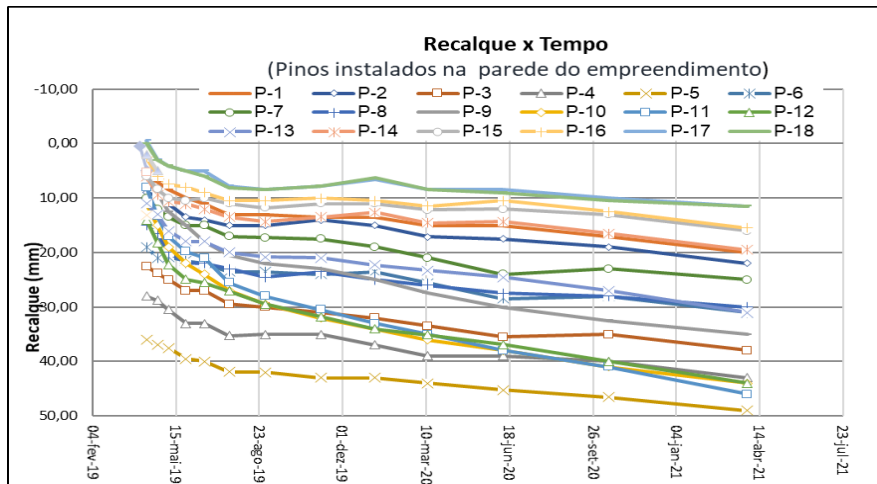


Figura 8: Evolução do recalque no tempo após o Geoenrijecimento.

Na Figura 9 é apresentada tomografia mostrando a condição do solo após a realização do melhoramento 7 dias e 15 dias após a execução, respectivamente, em comparação com a condição inicial da Figura 5 e Figura 6. Percebe-se a imposição de novos parâmetros de resistência e rigidez, adequados à condição atual da edificação.

O volume de cada bulbo de compressão radial do solo variou de acordo com a posição e a resposta da edificação. As pressões de compressão no solo mole situaram-se na faixa de 3 kgf/cm² e, nas camadas mais moles, foram executados bulbos de compressão com diâmetro superior a 1,5m.

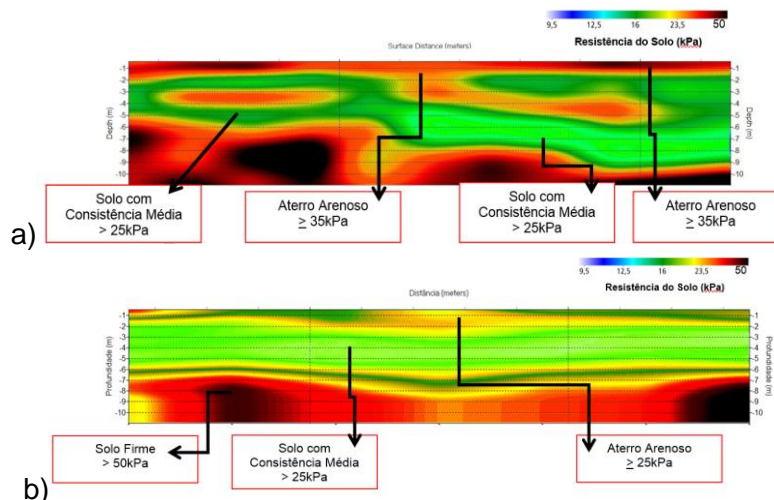


Figura 9: (a) TSI – I; (b) TSI – II após o melhoramento do solo.

8. CONCLUSÃO

O prédio, centenário, sofria de processo de recalque crônico e contínuo que, caso continuasse, haveria a possibilidade de entrar em colapso. A causa geotécnica do processo de recalque era a existência de camada de solos moles poucos metros abaixo da sua fundação.

A técnica de melhoramento de solos, neste caso o geoenrijecimento, mostrou-se adequada e eficiente às argilas moles do local, readequando a rigidez do solo, fazendo com que o crônico e contínuo processo de recalque descontinuasse, preservando a condição do antigo sistema de fundação e a própria estrutura.

Após a conclusão dos serviços, foi identificado um levantamento de estrutura, e com os dados da última leitura realizada, atesta-se uma condição julgada como sequência do pós-melhoramento do solo, ou seja, com níveis de deformação extremamente baixos, decrescentes e, praticamente, imperceptíveis

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Fundação “O Pão dos Pobres” e à empresa STUDIO1 Arquitetura.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Empresas de Engenharia de Fundações e Geotecnia (ABEF). (2016). Manual de Execução de Fundações: Práticas Recomendadas. São Paulo: ABEF.
- Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (ABGE). (2018). Geologia de Engenharia e Ambiental, volume 2: métodos e técnicas. ABGE.
- Burke, G.; Yoshida, H. (2013). Jet grouting. Ground Improvement, 3rd ed.: CRC Press: Taylor & Francis Group, p. 207-258.
- Engegraut. (2019). Melhoramento do solo de fundação do prédio da instituição “O Pão dos Pobres de Santo Antônio” em Porto Alegre-RS. Relatório técnico. Rio de Janeiro
- Kearey, P.; Brooks, M.; Hill, I. (2009) Geofísica de exploração. Oficina de textos.
- Rodrigues, J. (2018). Melhoramento do Solo Mole e o Geoenrijecimento. Oficina de textos.
- Hachich, W.; Falconi, F. F.; Saes, J. S.; Frota, R. G. Q.; Niyama, S. (2016). Reforço de fundações. In: Fundações: teoria e prática. 3ª ed. São Paulo: PINI.