

# Análise da eficiência de uma fundação de aterro tratada com injeção de argamassa e drenos verticais (técnica CPR)

Daniel de Andrade Faria  
UFJF, Juiz de Fora, Brasil, daniel.faria@engenharia.ufjf.br

Mario Vicente Riccio Filho  
UFJF, Juiz de Fora, Brasil, mvrf1000@gmail.com

Tatiana Tavares Rodriguez  
UFJF, Juiz de Fora, Brasil, tatiana.rodriguez@ufjf.edu.br

**RESUMO:** Devido à crescente escassez de terrenos com condições favoráveis à construção de obras, tem-se tornado cada vez mais comum a utilização de terrenos com presença de grandes espessuras de solo mole, os quais demandam o uso de técnicas de forma a prevenir problemas de estabilidade e de recalques. Outro fator importante é o prazo construtivo exigido pelos empreendimentos, que muitas vezes inviabiliza o uso de técnicas tradicionais de tratamento de solo mole como o uso de drenos verticais associados à sobrecarga e construção em estágios. Existem diversas técnicas de construção de aterros sobre solos moles que possibilitam solucionar tais problemas. O presente estudo tem por objetivo verificar o desempenho de um aterro sobre solos moles em que a técnica de Consolidação Profunda Radial (CPR) foi aplicada para o tratamento do solo mole. A técnica CPR se baseia na expansão de bulbos de compressão de *geogROUT* (mistura de cimento, areia e água) combinada com a instalação de drenos verticais no terreno. A avaliação foi efetuada em termos de eficiência quanto à redução da magnitude dos recalques e tempo de estabilização dos mesmos. Para isso, foi feita a análise comparativa entre o recalque medido e o recalque estimado para situações sem tratamento do solo mole e com o uso de drenos verticais. O recalque medido na obra foi o recalque obtido com o uso de CPR para tratamento do solo. A obra estudada se constitui de um aterro sobre solos moles como parte de um empreendimento imobiliário e foi executada no Recreio dos Bandeirantes, Rio de Janeiro - RJ. As medidas de recalque do aterro foram efetuadas por meio de placas de recalque e topografia. Uma investigação geotécnica detalhada foi programada e executada, permitindo a obtenção de parâmetros necessários aos cálculos. A campanha foi composta de ensaios de campo (piezocone, palheta elétrica e retirada de amostras indeformadas) e laboratório (caracterização completa e ensaios oedométricos). A curva de recalque medida abrangeu um período de 5 meses e esta foi extrapolada de forma a se obter o recalque final e o tempo relacionado ao mesmo. Dessa forma, foi possível a comparação entre o recalque medido e o previsto em longo prazo. Os resultados mostraram boa eficiência do método CPR, apresentando grande redução na magnitude total do recalque conduzindo a um valor de fator de melhoramento de recalque (*improvement factor*) da ordem de 10.

**PALAVRAS-CHAVE:** Consolidação Profunda Radial, Recalque, Solo Mole, Monitoramento.

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, devido à grande expansão dos centros urbanos e a consequente diminuição da

disponibilidade de terrenos, tem se tornado cada vez mais comum a utilização de áreas que apresentam condições desfavoráveis à construção devido à presença de solos moles,

com baixa capacidade de suporte.

A construção de obras de engenharia em terrenos com essas características pode vir a apresentar problemas de recalque e estabilidade, principalmente em locais onde o subsolo contém grandes espessuras de argila mole.

Várias são as técnicas disponíveis atualmente para contornar os problemas citados. Dentre essas técnicas, existe a chamada Consolidação Profunda Radial (CPR) que produz um aumento da rigidez/resistência do solo tratado através da expansão de bulbos de compressão de *geogROUT* no subsolo, acelerando a estabilização por meio da drenagem radial com a dissipação da poropressão por drenos.

O objetivo do presente estudo é analisar a eficiência do tratamento de solo com o uso da técnica CPR. Para tanto, foi escolhida uma obra de empreendimento localizado no Recreio dos Bandeirantes – RJ, onde a mesma foi aplicada e monitorada por meio de placas de recalque ao longo do tempo (150 dias).

Neste estudo são comparadas as curvas recalque versus tempo para as condições sem tratamento, de tratamento do terreno com uso de drenos verticais e condição em que o tratamento utilizado foi o CPR (tratamento utilizado na obra em questão). Valores medidos de recalque foram extrapolados utilizando-se a metodologia de Asaoka (1978).

## 2 A TÉCNICA CPR

Segundo Almeida e Riccio (2012), a técnica CPR é uma evolução do método *Compaction Grouting* que utiliza o princípio da expansão de cavidade formulado por Vésic (1972). A técnica *Compaction Grouting* começou a ser aplicada no início dos anos 50 em areias e solos siltsos, conforme relatam Graf (1969) e Brown e Warner (1973). Estes autores relatam dentre as aplicações do *Compaction Grouting* o uso como técnica de *underpinning*.

A diferença básica entre as técnicas CPR e *Compaction Grouting* é que no CPR, anteriormente à injeção de argamassa no solo, é executada uma malha de drenos verticais pré-fabricados de forma a auxiliar a dissipação do excesso de poro-pressão gerado quando ocorre

o fenômeno de expansão de cavidade. O CPR consiste basicamente em se instalar uma malha de drenos verticais e injetar argamassa ao longo da profundidade nas camadas de solo a serem tratadas.

As malhas de drenos verticais utilizadas são tipicamente quadradas, bem como a malha de pontos de injeção. As malhas de drenos verticais e pontos de injeção possuem lados com diferentes comprimentos, conforme projeto. Para as malhas de drenos verticais os valores típicos dos lados variam entre 1,5m e 2,0m. Para as injeções os lados da malha variam entre 3,0m e 4,0m, tipicamente.

A argamassa injetada consiste basicamente de uma mistura de areia, silte e cimento em proporções típicas de 80%, 15% e 5%, respectivamente, além de água.

As injeções ocorrem em estágios, de baixo para cima, até se chegar à cota final pretendida. Segundo Almeida e Riccio (2012) o controle de injeção é efetuado com base no volume injetado e na pressão de injeção. Um valor usual para o volume é 1000 litros de argamassa e para a pressão de injeção típica 100 kPa a 1000 kPa. Dessa forma cada estágio é completo quando se atinge um dos critérios de paralisação, volume ou pressão. A Figura 1 ilustra o conceito básico da técnica.

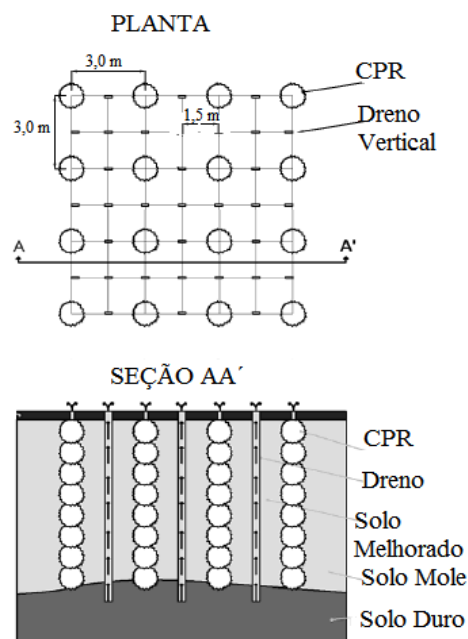


Figura 1 – Conceito básico e idealizado da técnica de CPR (Almeida e Riccio, 2012).

Conforme apresenta a Figura 1, as sucessivas injeções controladas de argamassa tendem a formar uma estrutura em forma de coluna. Entretanto, devido às diferentes propriedades dos solos, especialmente as argilas moles, ao longo da profundidade podem ocorrer variações no formato apresentado. Essas variações nas propriedades da argila mole ao longo da profundidade podem se dar por exemplo nos valores de  $S_u$  (resistência não drenada do solo), índice de rigidez da argila  $I_r (=G/S_u$ , onde  $G$  é o módulo cisalhante da argila) e  $(\gamma_n)$  peso específico do material. Em solos arenosos e areno siltosos as diferenças estão relacionadas à compactidade do material.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

De forma a subsidiar as análises foi efetuado um programa experimental, consistindo de ensaios de campo e ensaios de laboratório. O programa experimental consistiu duas ilhas de investigação: a ilha de investigação 1 (referente à sondagem 4N) e a ilha de investigação 2 (referente à sondagem 13N), sendo que para o presente estudo foram utilizados os dados da ilha 1 por esta estar localizada mais próximo das placas de recalque utilizadas para monitoramento. Além disso, a ilha 1 contou com a extração de amostras indeformadas tipo *Shelby*, o que não ocorreu na ilha 2. O conceito de ilha de investigação geotécnica foi utilizado resultando na configuração apresentada na Figura 2.

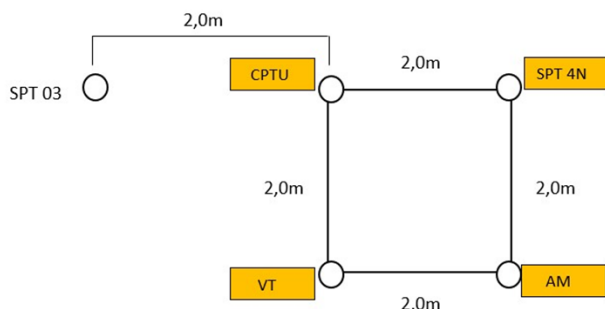


Figura 2 – Ilha de investigação 1 e sondagem 4N, utilizadas no presente estudo.

Na Figura 2 são observados os ensaios de campo efetuados na ilha 1, que foram os

seguintes: piezocone com dissipação de poro-pressão (CPTU), ensaio de palheta elétrica com medida na base (VT, “Vane Test”), ensaio de SPT (SPT 4N) ao lado da sondagem existente SPT 03 e amostragem tipo *Shelby* (AM) em quatro profundidades distintas.

A sondagem SPT 4N corroborou a espessura de solo mole na área em questão, já anteriormente detectada pela sondagem SPT 03. Essa espessura é de cerca de 8,0m.

A partir das amostras *Shelby* obtidas foram efetuados ensaios de laboratório de caracterização completa e oedométricos. Os ensaios de laboratório permitiram a obtenção de propriedades índice da argila mole e os parâmetros de compressibilidade dessa para efeito de cálculo da curva recalque versus tempo teórica para o caso da análise de tratamento de solo com uso de drenos verticais utilizando metodologia de Barron (1948).

Também fez parte do programa experimental o monitoramento dos recalques do aterro, cuja fundação foi tratada com CPR, por meio de placas de recalque. O monitoramento foi efetuado por um período de 150 dias. Para efeito de comparação do desempenho do CPR (curva de campo) com o desempenho do tratamento com drenos verticais a longo prazo foi efetuada a extrapolação da curva de campo por meio da metodologia de Asaoka (1978) modificada por Magnan e Deroy (1980) para a condição de drenagem radial.

### 4 PERFIL GEOTÉCNICO E PROPRIEDADES DA ARGILA MOLE

A sondagem SPT 4N revelou o perfil geotécnico apresentado na Figura 3, onde se pode observar a espessa camada de argila mole. A camada de solo mole apresenta-se aflorante e o nível d’água (NA) se encontra no topo da camada de argila mole.

A partir da Figura 3 se observa que a camada de argila descrita como argila muito mole cinza escura compreende o intervalo do topo até aproximadamente 8,0 m de profundidade. A argila possui consistência muito mole, visto o número de golpes para cravação do amostrador se apresentar nulo em toda a camada. Seguindo

a camada de argila mole o perfil geotécnico apresenta uma camada de 3,0m de areia fina compacta a fofa. Esta camada constitui uma camada drenante, sendo, portanto, consideradas duas camadas drenantes nos cálculos, uma no topo e uma na base.

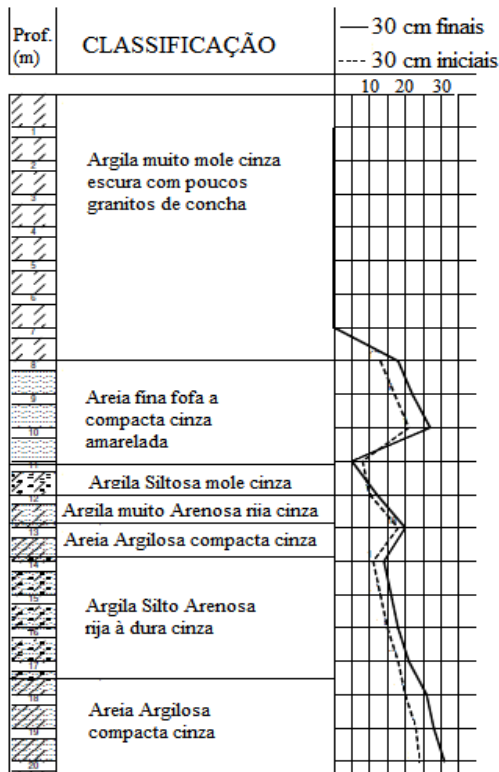


Figura 3 – Perfil geotécnico apresentado pela sondagem SPT 4N.

A Tabela 1 apresenta propriedades da camada de argila mole obtidas a partir de ensaios de caracterização, realizados com material extraído das amostras “Shelby” em quatro profundidades diferentes.

Tabela 1 – Limites de Atterberg e granulometria.

Prof (m)	Limites		Granulometria (%)		
	LP	LL	Argila	Silte	Areia
1,00 a 1,50	-	-	-	-	-
3,00 a 3,50	59,7	31,3	44,9	23,8	31,4
5,00 a 5,55	57,9	30,2	46,5	24,7	28,8
7,00 a 7,50	57,8	31,8	34,3	20,5	45,2

A Tabela 2 apresenta as condições iniciais dos corpos de prova submetidos aos ensaios de adensamento oedométrico.

Tabela 2 – Características da argila mole ao longo da profundidade.

Prof. (m)	$h_0$ (%)	$\gamma_n$ (kN/m <sup>3</sup> )	$e_0$	$S_0$ (%)	$G_s$
1,00 a 1,50	826,5	9,81	15,611	93	1,759
3,00 a 3,50	148,4	12,81	3,713	97	2,431
5,00 a 5,55	134,5	13,09	3,255	98	2,376
7,00 a 7,50	111,9	12,71	2,756	93	2,211

A Tabela 3 relaciona os parâmetros dos solos obtidos por meio dos ensaios de adensamento oedométrico.

Tabela 3 – Parâmetros da argila mole ao longo da profundidade – ensaios de adensamento oedométrico.

Prof (m)	$C_c$	$C_s$	$c_v$ (m <sup>2</sup> /s)	CR	OCR
1,00 a 1,50	6,865	0,609	$1,10 \cdot 10^{-7}$	0,41	6,00
3,00 a 3,50	1,578	0,125	$1,23 \cdot 10^{-8}$	0,33	1,57
5,00 a 5,55	1,454 *	0,125 *	$2,22 \cdot 10^{-8}$ *	0,34	1,36
7,00 a 7,50	1,329	0,125	$3,20 \cdot 10^{-8}$	0,36	1,15

\*Nota: Valores adotados a partir da média entre os valores da 2ª e 4ª profundidades devido à 3ª amostra ter apresentado má qualidade.

A partir da Tabela 2 pode-se verificar que o solo, em sua porção superior se constitui de uma argila turfosa, com um teor de umidade natural de 826,5%, peso específico aparente natural de 9,81 kN/m<sup>3</sup> e um índice de vazios de 15,611. Abaixo desta camada se observa argila mole apresentando características distintas da camada de topo, ou seja, umidade natural variando de 111,9 a 148,4%, peso específico aparente natural variando de 12,71 a 13,09

kN/m<sup>3</sup> e índice de vazios variando de 2,756 a 3,713.

A Tabela 3 relaciona parâmetros de compressibilidade ao longo da profundidade investigada. Pode-se observar que a argila mole turfosa e a argila mole apresentam valores de CR (coeficiente de compressibilidade) que indicam estas serem argilas de alta compressibilidade. Ainda com base na Tabela 3 se observa que os valores de OCR abaixo da camada turfosa variam entre 1,15 e 1,57.

Com base nas características das argilas obtidas nos ensaios de laboratório, recalques significativos na fundação do aterro proposto a ser construído eram esperados, conforme confirmado nos cálculos.

## 5 CURVAS RECALQUE VERSUS TEMPO

Neste item são apresentados os resultados de curvas recalque tempo estimadas para um aterro com 2,50m de altura construído sobre a fundação de argila mole com características apresentadas nas Tabelas 1, 2 e 3.

Dessa forma foram efetuados cálculos para determinação das curvas recalque versus tempo. Estas curvas foram calculadas para as condições de recalque sem tratamento nenhum (sem drenos verticais) e tratamento com uso de drenos verticais. Ambas as curvas foram comparadas com os resultados de campo de recalque ao longo do tempo, obtidos por meio do monitoramento com placas de recalque. O monitoramento de campo se refere a fundação tratada com o uso da técnica CPR. As curvas teóricas (com e sem tratamento por drenos verticais) foram comparadas com a curva extrapolada por Asaoka de forma a se verificar o desempenho da fundação.

As curvas recalque versus tempo para a condição sem tratamento foram obtidas com base na teoria de adensamento unidimensional de Terzaghi. Para o cálculo da evolução dos recalques com drenos verticais foi considerada uma malha triangular de drenos, com espaçamento de 1,50 m e drenos com dimensões 10 cm e 0,50 cm de comprimento e espessura, respectivamente. Foi adotado um

valor de  $c_h = 1,25 \cdot c_v$ , sendo o valor de  $c_v$  o valor médio ao longo da profundidade, conforme Tabela 3. Os cálculos foram efetuados por meio da teoria de Baron (1948).

A Figura 4 ilustra as medições efetuadas pelas placas de recalque designadas por PR-02, PR-03 e PR-04. A placa PR-03 é a placa mais próxima da ilha de investigação 1 e portanto foi a placa utilizada nas análises.

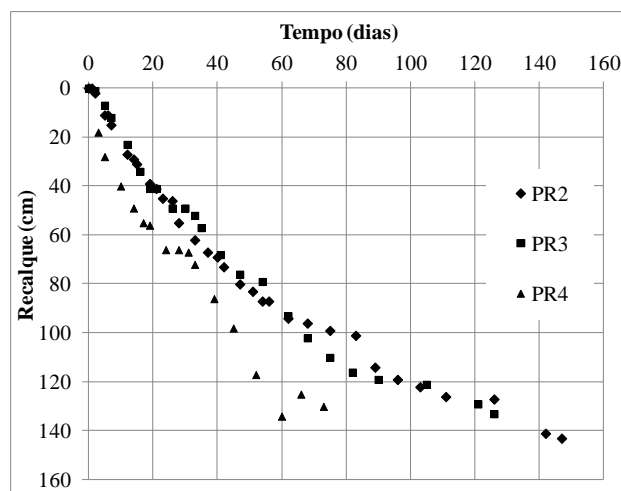


Figura 4 - Medições de campo efetuadas pelas placas de recalque PR-02, PR-03 e PR-04.

A partir dos dados gerados pela placa de recalque PR-03 (curva de campo – tratamento com CPR), foi efetuada a extrapolação desta curva por meio do método de Asaoka (1978) modificado por Magnan e Deroy (1980). Através deste método foi obtido o valor de  $c_h$  para o material compósito. O valor de  $c_v$  foi considerado igual ao valor de  $c_h$  para fins de extrapolação da curva recalque versus tempo de forma a considerar um tempo maior que o tempo em que a placa PR-03 foi medida. O tempo de medição da PR-03 foi de 120 dias, inferior ao tempo de interesse para análise.

A Figura 5 ilustra a aproximação efetuada por meio do método de Asaoka, observado que a melhor aproximação foi obtida considerando um intervalo de tempo  $\Delta t = 20$  dias. Normalmente as melhores aproximações são aquelas em que  $\Delta t$  varia entre 30 e 40 dias. Uma explicação para este fato pode estar no fato da argila tratada com CPR se constituir de um material composto equivalente.

A partir da Figura 5 pode-se observar que a aplicação da metodologia de Asaoka, mesmo

para um solo tratado, resultou em uma aproximação entre a curva medida e extrapolada bastante satisfatória. Esta curva extrapolada é a curva utilizada na comparação, visando verificar a eficiência da técnica CPR, da curva de campo (CPR) com a curva teórica recalque versus tempo para a condição de tratamento com drenos verticais pré-fabricados.

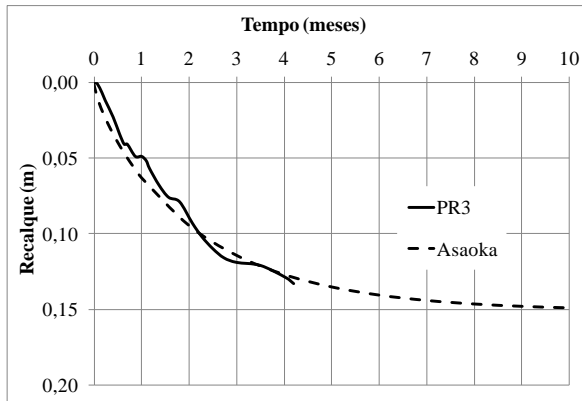


Figura 5 – Extrapolação da curva de recalque medido em 120 dias pelo método de Asaoka, modificado por Magnan e Deroy (1980).

A Figura 6 ilustra a comparação entre a curva recalque versus tempo extrapolada por Asaoka, que mostra o comportamento da fundação tratada com CPR, e as curvas para as condições sem drenos verticais e com tratamento em drenos verticais. Em ambas as curvas foi considerado o efeito de submersão do aterro.

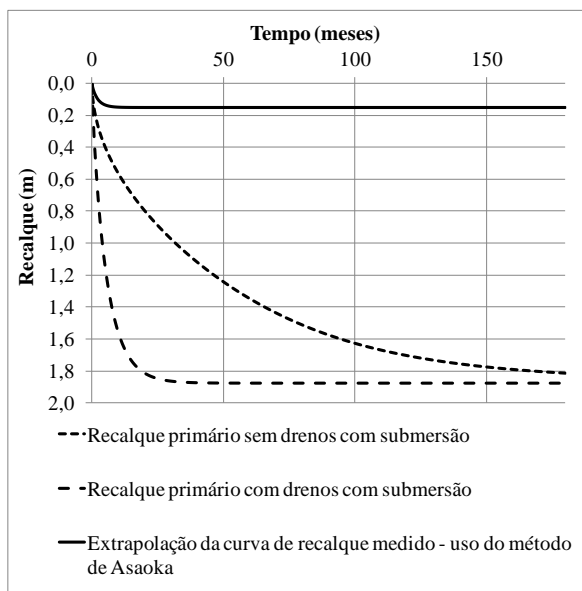


Figura 6 – Curvas recalque versus tempo para situação sem drenos verticais, com drenos verticais e tratamento com CPR (medida de campo extrapolada por Asaoka).

A partir da Figura 6 fica clara a maior eficiência do tratamento da fundação com uso de CPR quando comparado ao uso de drenos verticais. Há uma redução tanto no tempo para se atingir a estabilização quanto no valor do recalque final. A diferença de comportamento se mostra maior quando se compara a magnitude dos recalques finais estimados (cálculo com uso de drenos verticais) e medidos (medição por meio de placa de recalque com extrapolação por meio do método de Asaoka). A partir da Figura 6 se observa que para se atingir 90% de adensamento na solução sem tratamento o tempo necessário é de cerca de 10 anos, para a solução com drenos verticais cerca de 12 meses e para a solução com CPR o tempo necessário a se atingir  $t_{90}$  é de cerca de 5 meses.

Na Figura 6 é possível observar que o recalque final, extrapolado por meio do método de Asaoka para a técnica de CPR, é da ordem de 0,15 m e o recalque final esperado teórico com base no uso de tratamento com drenos verticais é da ordem de 1,85 m. Uma grande diferença é observada entre as duas técnicas.

## 6 $\beta$ - FATOR DE MELHORAMENTO DE RECALQUE

A eficiência do tratamento utilizando o método de tratamento CPR pode ser quantificada por meio do parâmetro  $\beta$ , fator de melhoramento de recalques (*improvement factor*). O fator  $\beta$  é definido conforme equação a seguir:

$$\beta = \frac{\Delta h_{\text{sem tratamento}}}{\Delta h_{\text{com tratamento}}} \quad (1)$$

onde:

$\Delta h_{\text{sem tratamento}}$  = recalque sem qualquer tratamento da fundação;

$\Delta h_{\text{com tratamento}}$  = recalque com determinado tratamento de fundação.

Dessa forma, na Figura 7 se pode observar a evolução de  $\beta$  com o tempo para o tratamento da fundação com a técnica CPR. O valor de  $\Delta h_{\text{sem tratamento}}$  se refere à curva recalque versus tempo para a situação em que não se utiliza nenhuma técnica de tratamento de solo mole,

calculada com base na teoria de Terzaghi.

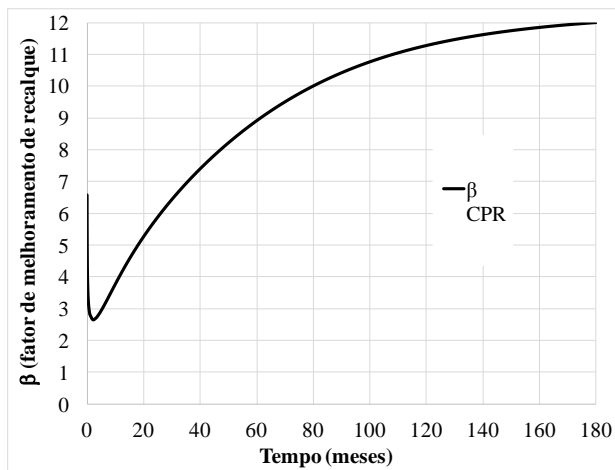


Figura 7 – Fator  $\beta$  em função do tempo para a situação de tratamento com CPR frente a condição sem tratamento.

A partir da Figura 7 se observa que no caso do tratamento da fundação com CPR há uma variação no valor de  $\beta$  ao longo do tempo.  $\beta$  parte de 6,5, cai a um valor mínimo de 2,8 e para a condição final (recalque final esperado e recalque final esperado extrapolado por Asaoka) tem um valor de 12. De fato o recalque final esperado e extrapolado possui um valor de 0,15 m ao passo que o recalque estimado sem tratamento foi da ordem de 1,85 m. A eficiência do tratamento com CPR na redução de recalque fica clara a partir da Figura 7.

O valor do fator  $\beta$  para a condição de tratamento de solo mole com CPR tem uma ordem de grandeza parecida com a obtida com o uso desta técnica no Parque dos Atletas (antigo Rock in Rio) no Rio de Janeiro. Riccio et al. (2013) reportam um valor de  $\beta$  da ordem de 10 para o aterro monitorado da referida obra.

Com relação à estabilidade de taludes sobre fundação de solo mole cabe aqui ressaltar que não foram observadas roturas na fundação e que a técnica permitiu que o aterro fosse construído em uma única etapa.

## 7 CONCLUSÕES

Foi apresentado um caso de obra monitorada no Recreio dos Bandeirantes, cidade do Rio de Janeiro - RJ. A obra foi monitorada por meio de placas de recalque, tendo sido efetuada campanha de ensaios geotécnicos para definição

de parâmetros da camada de argila mole existente.

Com base nos resultados de medições de campo dos recalques ocorridos quando do uso da técnica de CPR e recalques estimados com base em previsões teóricas se conclui que:

- A técnica CPR foi eficiente em reduzir os recalques totais estimados e também reduzir o tempo para que o recalque total fosse atingido;
- A ordem de grandeza do fator  $\beta$  (fator de redução de recalques) foi a mesma obtida no caso do aterro do Parque dos Atletas, em que a técnica CPR também foi utilizada;
- O uso do método de Asaoka para extrapolação da curva recalque versus tempo fornecida pelas placas de recalque mostrou-se eficiente no caso de aplicação ao um solo composto (solo mole e argamassa) produzido pela aplicação da técnica CPR;
- Não foram verificadas roturas no solo de fundação, mostrando que a técnica permite a construção do aterro em uma etapa única.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Empresa Engegraut Engenharia pela cessão dos dados e à FAPEMIG.

## REFERÊNCIAS

- Almeida, M.S.S. e Riccio, M.V.F. (2012). Ground Improvement of extremely soft soils in Rio de Janeiro, *Proceedings of the International Conference on Ground Improvement and Ground Control, RPS, GIGC*, 27 de julho de 2012, Austrália, pp. 1-14. Editores: Buddhima Indraratna, Cholachat Rujikiatkamjorn e Jayan S. Vinod.
- Asaoka, A. (1978). Observational procedure of settlement prediction, *Soil and Foundation*, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 18, n° 4, December, pp. 87-101.
- Barron, R. A. (1948). Consolidation of fine-grained soils by drain wells, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Transactions*, paper 2346, vol 113, pp. 718-754.
- Brown, D. R. e Warner, J. (1973). Compaction Grouting, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 99, No. SM8, August, pp. 589-601.

- Graf, E. D. (1969). Compaction Grouting Technique and Observations, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, proceedings of the ASCE, Vol. 95, No. SM5, September, pp. 1151–1158.
- Magnan, J.P. e Deroy, J.M. (1980). Analyse graphique des tassements observés sous les ouvrages, *Bull. Liaison Laboratoire des Ponts e Chaussés*, Paris, 109, September-October, pp. 9-21.
- Riccio, M.V.F., Baroni, M. e Almeida, M.S.S. (2013). Ground Improvement in Soft Soils in Rio de Janeiro: the case of Athletics Park, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Special Issue, Vol. 166, pp. 36-43.
- Vesic, A. S. (1972). Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 98, No. SM3, Proc. Paper 8790, March, pp. 265–290.