

# ESTUDO DE CASO DA PERFORMANCE DE MELHORAMENTO DE ATERROS SOBRE SOLOS MOLES

**Isabella Barbalho Santini Batista**

SoloSSantini, Recife, Brasil

**Andrew J. Whittle**

Massachusetts Institute of Technology,  
Cambridge, Estados Unidos da América

**Roberto Q. Coutinho**

Universidade Federal de Pernambuco,  
Recife, Brasil

Na construção da nova linha de trem de alta velocidade que liga as cidades de Amsterdã e Bruxelas foram requeridas novas técnicas de construção de aterros sobre solos moles. Alta velocidade dos trens, curto tempo de construção e requerimentos rígidos nos recalques residuais foram os fatores que mais importaram neste tipo de projeto de aterros sobre solos moles. Depois de priorizar estes fatores importantes, um grupo de pesquisadores iniciou um programa no ano de 1997 para avaliar diferentes técnicas de estabilização de aterros ferroviários construídos sobre argilas moles.

O programa, formalmente intitulado *New Options for Rapid and Easy Construction of Embankments on Soft Soils (No-Recess)*, teve parceria de empresas públicas e privadas como *the railroad project manager High-Speed Rail South*, *the Ministry of Transport, Public Works and Water Management*, *Road*

*and Hydraulic Engineering Division (RWS/DWW)* e *the European Community (EuroSoilStab lime-cement columns project)*.

O projeto *No-Recess* consiste em uma série de aterros experimentais construídos em uma região chamada *the Hoeksche Waard polder*, perto de *Gravendeel*, na Holanda. Cinco técnicas de melhoramento de solo foram selecionadas durante um encontro em *Delft* baseado no conhecimento de uma banca de especialistas internacionais. Foram feitas comparações diretas do desempenho dos aterros em campo para demonstrar a viabilidade dos métodos de construção para aterros ferroviários em linhas de alta velocidade.

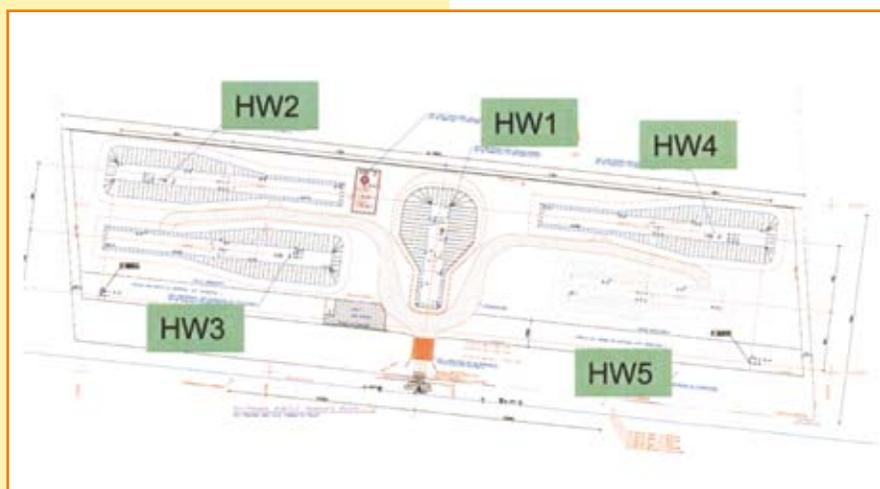
Por não existirem experiências anteriores destes métodos inovadores na Holanda, os aterros experimentais foram monitorados por dois anos após o término da construção.

Este artigo apresenta o sumário do projeto *No-Recess* em campo como também a utilização de um modelo de elementos finitos bidimensional modelando através do programa *Plaxis* para representar as condições *in-situ* e as propriedades locais do solo para o caso do aterro sem nenhuma técnica de melhoramento de solo e para dois casos das cinco técnicas de melhoramento de solo usados no projeto *No-Recess*: usando drenos convencionais pré-fabricados e o caso do reforço do solo mole com colunas de areias encamisadas com geotêxtil.

## CARACTERÍSTICAS DA OBRA

### *Perfil de Fundação*

A região de *The Hoeksche Waard*, onde estão localizados os aterros experimentais, consiste em uma área de 400x125 m, tendo o nível do terreno na cota - 0,75 m + NAP (datum). Cada aterro foi construído com uma parte alta, 5 m acima do nível do terreno, e uma parte baixa, 1 m acima do nível do terreno. A figura 1 mostra a planta da área dos cinco aterros experimentais.



**Figura 1 – A região dos aterros experimentais The Hoeksche Waard (HW) (Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure, 1999)**

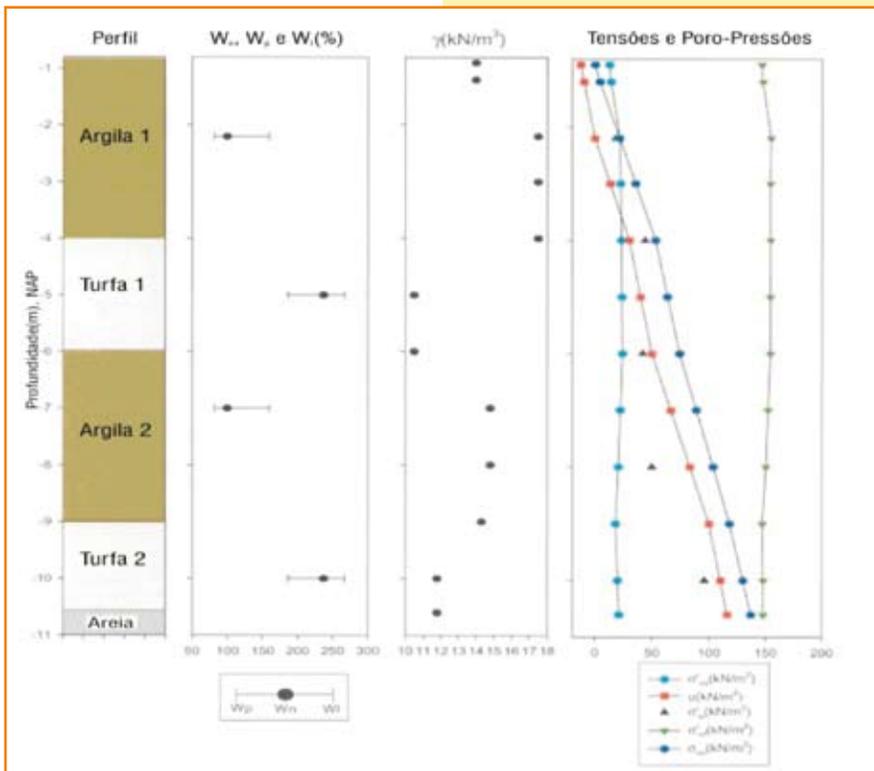


Figura 2 – O perfil do solo e as propriedades da região dos aterros experimentais

O solo dos aterros experimentais tem 9,7 m de espessura de solo mole seguido de uma camada de areia e se divide nas principais camadas, como ilustrado na figura 2. O nível do lençol freático está localizado na cota -2,2 m.

- Argila 1: Camada de espessura média de 3,1 m de argila siltosa cinza com lâminas de areia;
- Turfa 1: Camada de espessura média de 2,0 m de turfa pouco argilosa com fragmentos de madeira, marrom acinzentado (Hollandveen);
- Argila 2: Camada de espessura média de 3,0 m de argila acinzentada, extremamente siltosa, moderadamente orgânica, com traços de turfa e fragmentos de madeira;
- Turfa 2: Camada de espessura média de 1,6 m de turfa muito orgânica amarronzada com lâminas de areia (Basisveen);
- Camada de areia artesiana com carga piezométrica  $H = +1,25$  m.

#### As seções dos aterros experimentais

Os cinco aterros experimentais, identificados como HW1, HW2, HW3, HW4 e HW5, devido as iniciais do nome da

região, foram projetados para ter o formato longitudinal com uma parte alta e uma parte mais baixa com uma inclinação de 1:2 (v:h) e uma zona de transição de 10 m, localizada no final da parte alta.

Cada aterro experimental teve como requisito técnico a construção do mesmo dentro de um período de 18 meses (após a construção inicial de uma plataforma), seguido de um período de 6 meses necessário para iniciar a construção da superfície dos trilhos. Os recalques residuais esperados após 24 meses a partir do começo da construção devem ser menores que 30 mm num período de 30 anos.

### ESTUDO EFETUADO DE TÉCNICAS DE MELHORA-MENTO DE SOLO

#### As cinco técnicas usadas no projeto No-Recess

*Aterro com drenos pré fabricados (HW1)* – O aterro teste convencional com drenos pré-fabricados verticais foi feito para atender como referência de comparação com os outros exem-

plos de aterros experimentais usados no projeto. O aterro convencional foi construído em etapas dentro de um período de 6 meses. A sobrecarga do aterro baixo foi de 1,8 m de areia enquanto no aterro alto foi de 2,5 m de areia. Nos dois casos, tanto para o aterro baixo quanto para o alto, os drenos verticais foram instalados na profundidade de 1 m acima da camada de areia subjacente ao solo mole e foram projetados em uma malha triangular de 1 m.

*Estabilização de colunas de solo (HW2)* – O método de estabilização de colunas de solo usado no HW2 é um método Escandinavo que mistura cal/cimento e serve para estabilizar solos moles. Este aterro experimental foi construído no período de 1 mês. Para as partes alta e baixa do aterro, o pré-carregamento necessário para acelerar o processo de adensamento foi de 1,0 m e 1,5 m, respectivamente, por um período de 260 dias. As colunas de cal tiveram um diâmetro de 600 mm e foram feitas em uma malha quadrada de 1,6 m para a parte baixa do aterro, enquanto para a parte alta foi feita uma malha quadrada com intervalo de 1 m a 1,2 m. Para os dois casos, as colunas se estenderam até 0,5 m dentro da camada de areia.

*Paredes de solo estabilizada (HW3)* – A técnica usada no aterro experimental HW3 consiste em paredes de solo estabilizadas. O aterro experimental foi construído em duas semanas. As paredes estabilizadas, na qual a largura foi de 500 mm, foram instaladas em um intervalo de distância de 1 m a 2,5 m nos dois aterros.

*Colunas de areia encamisadas com geotêxtil (HW4)* – O sistema de colunas de areia encamisadas com geotêxtil é a técnica usada no HW4. Este sistema tem uma produção média por dia de 40 colunas. O aterro com a plataforma de transferência de geotêxtil no HW4 foi construído em 6 semanas.

Para os dois aterros a profundidade das colunas foi de 9 m abaixo do nível do terreno, ficando pouco acima da camada de areia, em uma malha triangular com intervalo entre as colunas de 2,4 a 3,4 m para a parte baixa do aterro e de 2,0 a 2,4 m para a parte alta. Para a parte baixa do aterro foi usada uma sobrecarga de 1 m de areia e a parte alta não necessitou do uso de sobrecarga.

*Aterro experimental estabilizado com estacas (HW5)* – A técnica de fundação por estacas usada no aterro experimental HW5 utilizou estacas de madeira. A areia usada no aterro foi recolocada de origem de um solo estabilizado de outro local. O aterro foi construído em 6 semanas, com uma produção diária de 200 estacas.

A profundidade das estacas tanto para a parte baixa como para a parte alta do aterro foi de 12 m abaixo do nível do terreno, ou seja, dentro da camada de areia. No caso da parte baixa do aterro, foi usada uma malha quadrada de 1 m, enquanto para a parte alta, o intervalo da malha quadrada foi de 0,8 m. Para o aterro baixo, 1 m de solo estabilizado foi usado, enquanto na parte alta foi preciso 5 m de solo.

#### *Metodologia das técnicas utilizadas no estudo efetuado*

O presente estudo consistiu em comparar resultados da simulação por elementos finitos usando o programa *Plaxis*, analisando o desempenho medido e previsto para dois aterros construídos no local do projeto *No-Recess (Hoeksche Waard)*: (1) o projeto convencional com drenos pré-fabricados (HW1), e (2) as colunas de areia encamisadas com geotêxtil (HW4). Também foi abordada a modelagem em *Plaxis* de um aterro hipotético criado sem técnica de melhoramento de solo para servir de comparação às duas técnicas de melhoramento de solo usadas do projeto.

*O aterro sem técnica de melhoramento de solo* – Esta parte analisa o comportamento hipotético do aterro sem nenhuma técnica de melhoramento de solo provido com as mesmas características locais, parâmetros do solo e tensões de campo existentes no projeto *No-Recess*, em ordem de prover fundamentos para avaliar o comportamento do aterro com as soluções de melhoramento de solo.

Em ordem de prover cálculos bidimensionais, é necessário ter como ferramenta o uso do programa de elementos finitos, então, as análises bidimensionais do aterro foram feitas utilizando a modelagem com o programa *Plaxis*. A modelagem também pode levar em conta o adensamento real ocorrido durante as fases de construção do aterro. Durante o processo de dissipação do excesso de poro-pressão, o solo obtém a resistência necessária para continuar o processo de construção.

A camada de areia artesiana abaixo do solo mole não está inclusa no modelo, mas é tratada como uma base rígida com carga piezométrica prescrita,  $H = +1,25$  m. O modelo de cálculo contempla que a linha freática coincide com o nível do terreno original, e os cálculos da carga total foram baseados no resultado do piezômetro que está localizado no topo da camada de areia. Este modelo assume o fluxo no sentido para cima pela camada mole de argila e turfa. A construção do aterro foi simulada em etapas baseando-se na sequência do relatório usado como referência do aterro experimental (HW1).

*Drenos verticais pré-fabricados* – O adensamento primário de solos moles compressíveis pode ocorrer por um longo tempo, dependendo do caminho da drenagem. No local da obra do *Hoeksche Waard*, encontrou-se a altura de drenagem  $H_d = 5,55$  m, portanto, 90 % do adensamento levará oito anos e oito meses para atingir o fim do adensamento primário.

O propósito da instalação dos drenos verticais foi acelerar o adensamento primário. Quando o solo tem características de um solo estratificado, tendo uma permeabilidade maior na direção horizontal que na vertical, os drenos verticais são mais eficientes. Na obra do HW, os drenos pré-fabricados não puderam ser instalados na camada de areia subjacente devido a pressão artesiana que existe nesta camada.

*Colunas de areia encamisadas com geotêxtil* – A técnica das colunas de areia encamisadas por geotêxtil consiste em colunas verticais de areia com largo diâmetro e pequeno espaçamento instaladas na camada compressível. Esta técnica foi usada no aterro (HW4) no projeto *No-Recess* no sentido de estabilizar o solo mole compressível e minimizar recalques em longo prazo. O geotêxtil confina a areia e atua como um filtro para prevenir a mistura com a argila adjacente. O geotêxtil também fornece um efeito rijo para garantir a integridade das estacas de areia. Estas características permitem que as colunas ajam como estacas, diminuindo consideravelmente o recalque e as deformações devido a cargas dinâmicas. Outra vantagem da técnica das colunas de areia é o seu tempo rápido de construção.

Muitos benefícios foram encontrados com o uso das colunas de areia em solos moles, como o aumento da capacidade de carga para estruturas de revestimento ou aterros, acelerando o processo de adensamento da camada ao redor das colunas granulares e, conseqüentemente, melhorando as características de carga-recalque das fundações. A inclusão das colunas reduz o comprimento do caminho da drenagem do solo e aumenta a taxa de dissipação da pressão neutra excessiva. A instalação das colunas de areia por técnica de deslocamento pode minimizar a permeabilidade do solo devido à formação da zona de amolgamento ao longo da fronteira

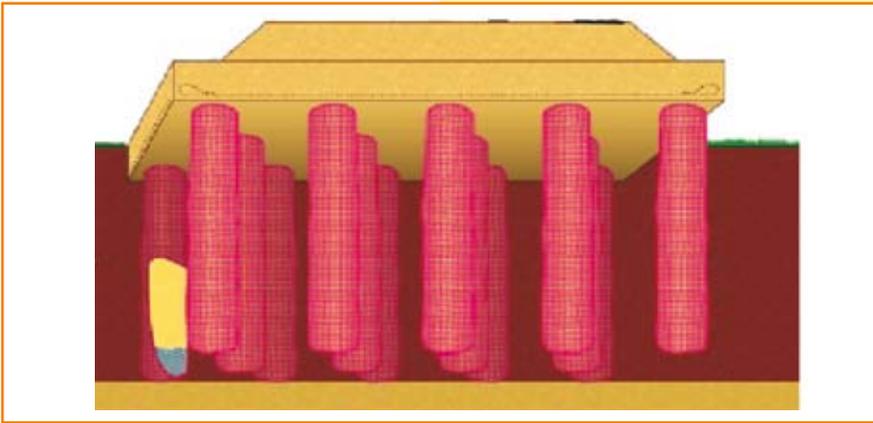


Figura 3 – Colunas de areia encamadas com geotêxtil

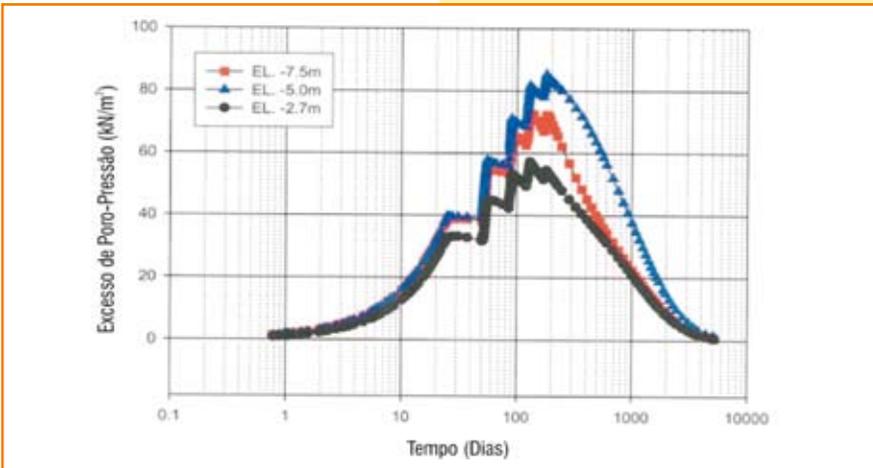


Figura 4 – Excesso de poro-pressão nas três cotas

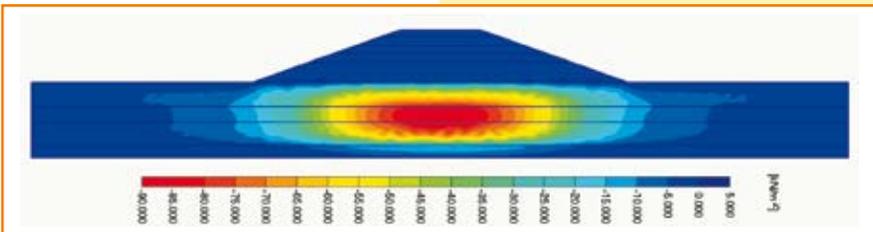


Figura 5 – Excesso de poro-pressão no fim da construção = 87kN/m²

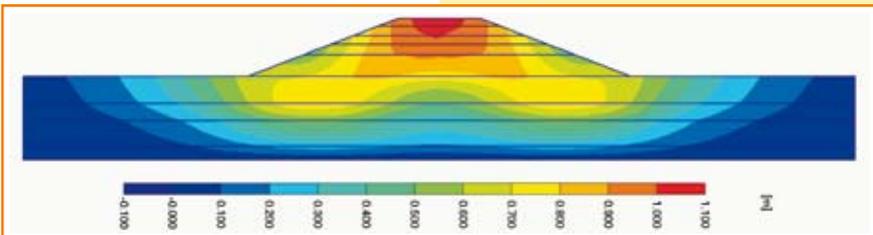


Figura 6 – Recalque total após a construção = 1,04 m

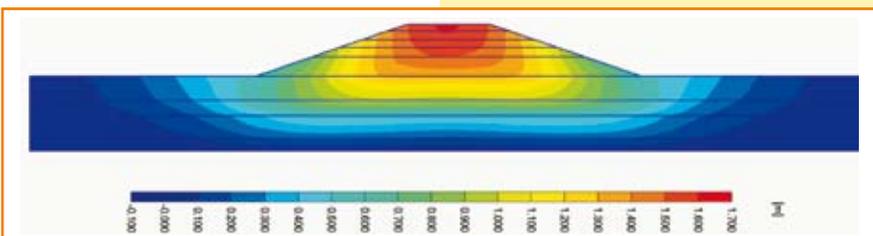


Figura 7 – Recalque total após a fase de adensamento = 1,62 m

da coluna e, mesmo que as colunas sejam pouco espaçadas, a dissipação da poro-pressão ainda pode ocorrer rapidamente (Bredenberg, 1999). Um dos maiores fatores para ser considerado quando o melhoramento de solo é previamente projetado é a rigidez da coluna de areia em relação a rigidez do solo onde ela está instalada.

Na simulação do *Plaxis* para o caso das colunas de areia encamadas com geotêxtil (veja figura 3), as propriedades usadas para as colunas de areia foram as mesmas usadas para o material do aterro. Desde que o último metro da coluna de areia foi preenchido com material mole, as colunas de areia no modelo de elementos finitos *Plaxis* foram dimensionadas 1 m acima da camada de areia, deixando o último metro com o solo original (turfa).

## RESULTADOS E ANÁLISES DOS ATERROS ESTUDADOS

### *O aterro sem técnica de melhoramento de solo*

A figura 4 mostra o excesso de poro-pressão nas três cotas onde os piezômetros foram instalados, cotas -7,5 m, -5,0 m e -2,7 m. A figura 5 ilustra o excesso de poro-pressão remanescente no final da construção como também após a fase de adensamento.

Para o caso do aterro sem técnica de melhoramento de solo, os cálculos bi-dimensionais sugerem um recalque total de 1,04 m após a construção e 1,62 m após a fase de adensamento. As figuras 6 e 7 mostram nitidamente pelo resultado do *Plaxis* que os recalques da superfície original e do aterro aumentam significativamente durante a última fase devido à dissipação de todo o excesso de poro-pressão, causando assim adensamento do solo. Pode ser concluído que, embora ainda ocorra o adensamento devido ao intervalo de tempo necessário para a construção do aterro, ainda existe uma grande parcela de recalque ocorrendo na fase de adensamento.

A figura 8 ilustra a sequência de carga usada para a análise do método de elementos finitos e o comportamento do recalque versus tempo previsto na linha de centro. A figura 9 mostra o deslocamento horizontal previsto no pé do aterro.

A figura 10 ilustra a relação entre o deslocamento horizontal máximo e o recalque máximo para o caso do aterro sem nenhuma técnica de melhoria de solo.

### O aterro com drenos verticais

No caso do aterro experimental (HW1), a pressão neutra foi medida em três cotas (-2,7 m, -5,0 m e -7,5 m). A figura 11 ilustra a dissipação do excesso de poro-pressão nestas mesmas cotas. Neste caso, a maior dissipação da poro-pressão ocorreu na cota -7,5.

O deslocamento vertical total calculado para a parte do aterro alto com drenos verticais pelo modelo de elementos finitos foi de 2,15 m. O recalque previsto pelo *Plaxis* na figura 12 mostra a concordância com o medido em campo. Este grande recalque nos primeiros quatro meses foi devido aos drenos de areia que ajudaram a acelerar a dissipação da poro-pressão, consequentemente acelerando a taxa de recalque.

O crescimento do deslocamento horizontal está ilustrado na figura 13. O deslocamento horizontal previsto pelo modelo de elementos finitos não está exatamente de acordo nos mesmos dias que os resultados medidos em campo, mas pode ser visto que nos resultados previstos obtém-se uma pequena distorção dos resultados medidos em campo.

O maior deslocamento horizontal ocorre por volta da cota -4 m, acontecendo o mesmo comportamento com o medido em campo. A figura 14 mostra as correlações existentes entre o deslocamento horizontal máximo e o recalque vertical máximo que provam uma útil introspecção com relação a importância das deformações não drenadas versus drenadas nas fundações de aterros (Ladd, 1991).

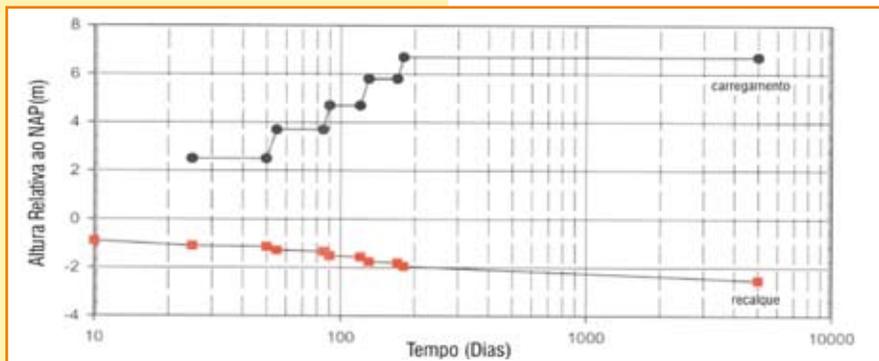


Figura 8 – Recalque e sobrecarga versus Tempo para o aterro sem melhoria de solo

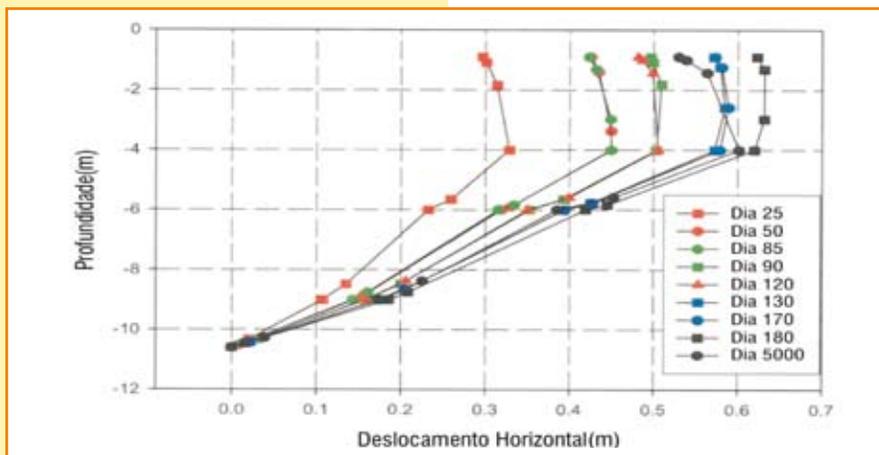


Figura 9 – Deslocamento horizontal na lateral do aterro para o aterro sem melhoria de solo

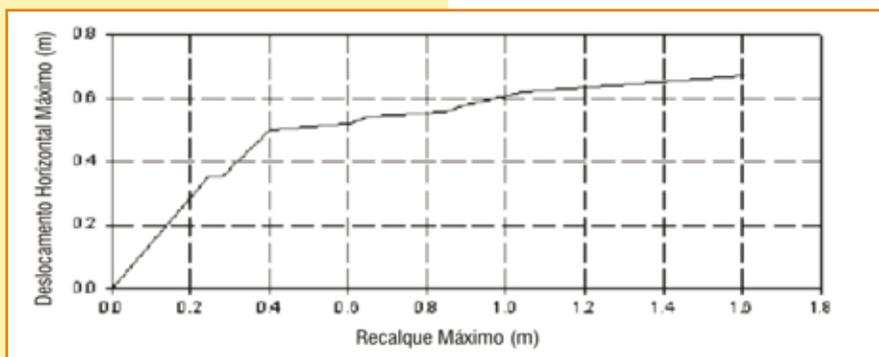


Figura 10 – Relação entre o deslocamento máximo horizontal e o recalque máximo

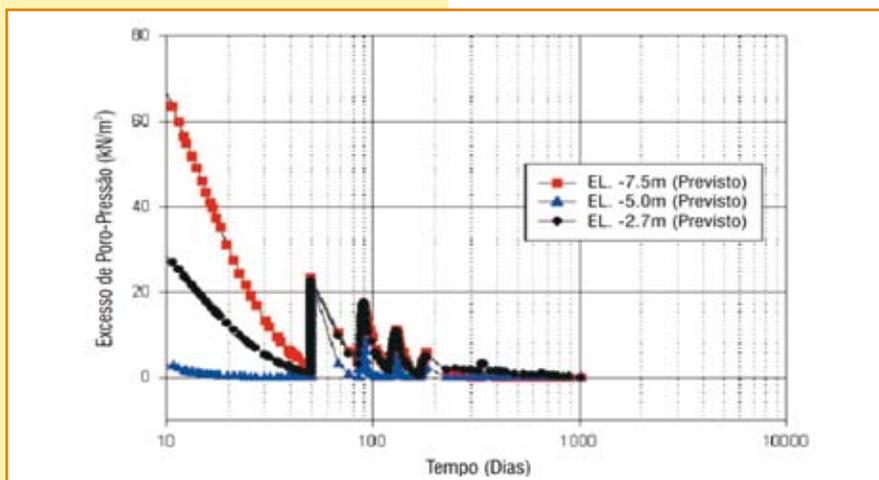


Figura 11 – Dissipação do excesso poro-pressão em três cotas no HW1

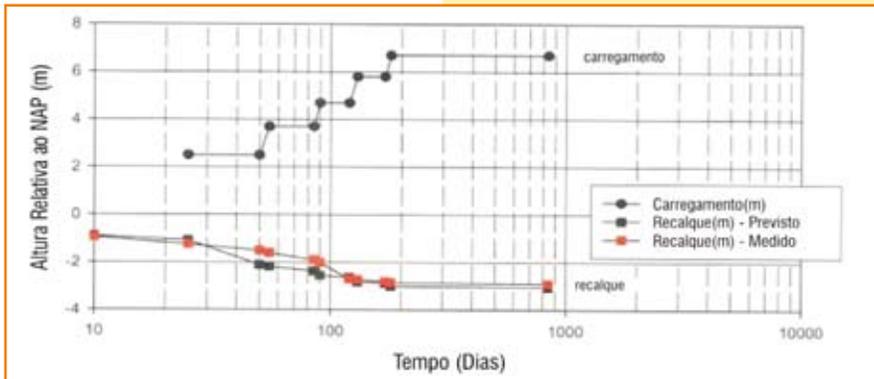


Figura 12 – Sobrecarga versus Tempo e comparações entre recalque medido e previsto do aterro HW1

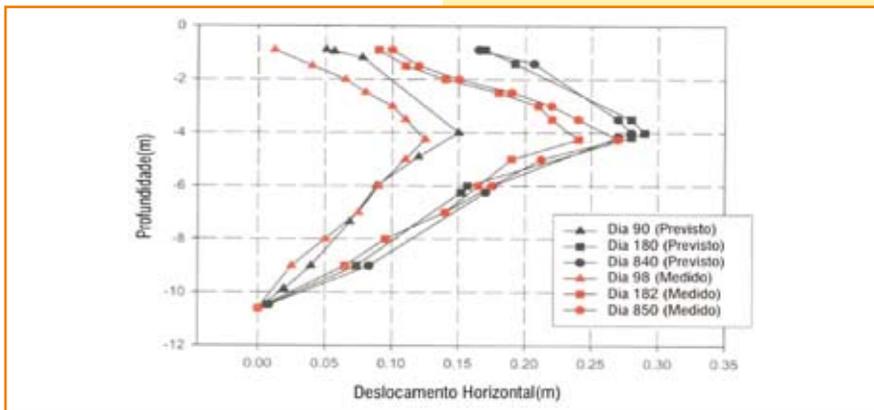


Figura 13 – Comparações entre o deslocamento horizontal previsto e o medido em campo para o aterro experimental HW1

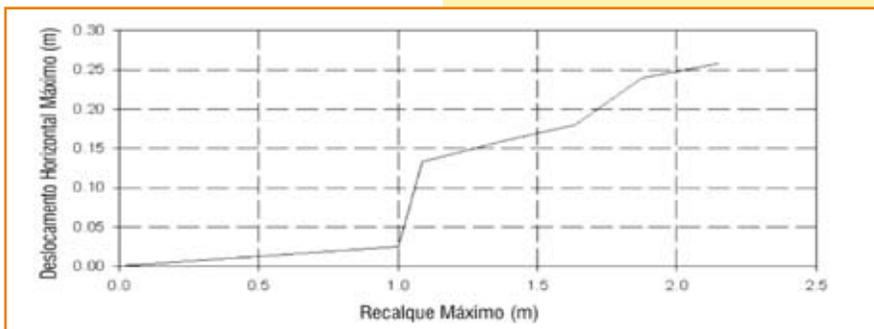


Figura 14 – Relação entre o deslocamento horizontal máximo e o recalque máximo para o aterro HW1

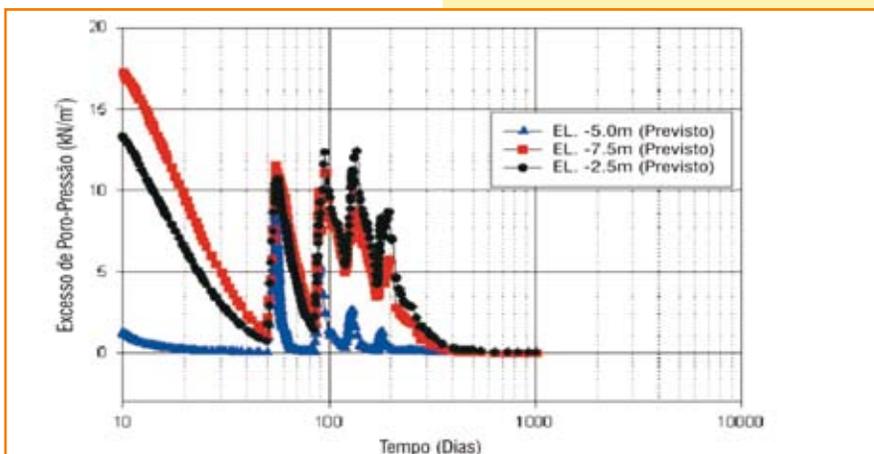


Figura 15 – Excesso de poro-pressão prevista em três localizações abaixo da seção alta do aterro (HW4)

### O aterro com colunas de areia encamisadas com geotêxtil

A figura 15 mostra a dissipação do excesso de poro-pressão prevista. A maior dissipação da poro-pressão no caso das colunas de areia também ocorreu na cota -7,5, mas não é tão grande devido a rigidez das colunas de areia.

Usando as colunas de areia encamisadas com geotêxtil foi possível conseguir uma redução de recalque de 1,05 m abaixo da secção alta do aterro, em relação a do aterro com drenos pré-fabricados previsto pelo Plaxis. A figura 16 apresenta a sequência de sobrecarga imposta e a comparação entre o recalque previsto e o recalque medido em campo. Os resultados atingidos pelo *Plaxis* foram parecidos com os medidos em campo. No caso das colunas de areia, não foi usada sobrecarga na parte do aterro alto, apenas o peso do material do aterro.

A figura 17 mostra os resultados dos deslocamentos horizontais previstos e os obtidos em campo. Os resultados foram comparados em dias diferentes, mas perto o suficiente para mostrar a pequena discordância entre eles. O deslocamento horizontal previsto é maior que o medido em campo. Esta diferença pode ser devido a rigidez do solo provida pelas colunas de areia encamisadas com geotêxtil.

A figura 18 apresenta a relação entre o deslocamento horizontal máximo e o recalque máximo na secção alta do aterro experimental (HW4).

## CONCLUSÕES

Este trabalho analisa um aterro experimental sem nenhuma técnica de melhoramento de solo e duas das cinco tentativas dos aterros experimentais do projeto *No-Recess* em ordem de prover bases para avaliação do desempenho de soluções de melhoramento de solo. A análise de cálculos e o julgamento de engenhei-

ros foram empregados para desenvolver parâmetros próprios para se entender as condições da região de *Hoeksche Waard*, na Holanda. Torna-se bem evidente pelos cálculos unidimensionais que os aterros teriam expansão lateral, portanto, o programa Plaxis foi uma ferramenta necessária para os cálculos das análises bidimensionais.

Os resultados da dissipação da poro-pressão, deslocamentos verticais e horizontais foram as análises de comparação entre os três aterros calculados pelo modelo de elementos finitos *Plaxis*, sendo os dois aterros experimentais selecionados na região *Hoeksche Waard*. Os resultados providos pelo modelo *Plaxis* se encaixam bem com a maioria das medições feitas em campo. A dissipação do excesso de poro-pressão no HW4 não é tão alta devido a rigidez das colunas de areia, que não permite que a camada mole se comprima, evitando assim a saída de água com facilidade.

O recalque alcançado mais rapidamente no aterro com drenos verticais de areia é devido aos mesmos que aceleram a dissipação do excesso de poro-pressão. Portanto, a quantidade de recalque foi atingida mais rapidamente que nas outras opções de melhoramento de solo. No caso das colunas de areia encamisadas com geotêxtil, os recalques atingidos foram menores que os recalques do aterro com drenos. O geotêxtil limita o movimento da areia, deixando-a mais rija que o solo ao redor, pela qual permite a transferência de carga para a camada resistente.

Conclui-se que os resultados atingidos podem ajudar a validar os métodos usados no projeto. As opções usadas no projeto *No-Recess* foram oferecidas para um melhor desenvolvimento das técnicas de melhoramento de solo mole, onde os fatores como tempo de construção e recalque residual foram de grande importância neste projeto.

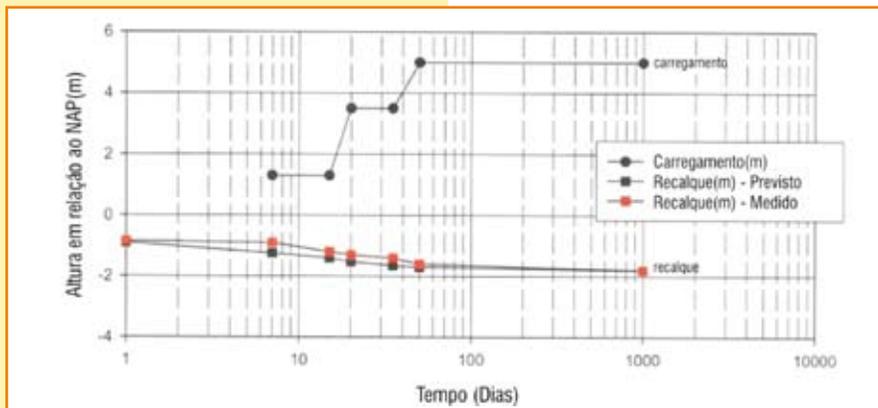


Figura 16 – Sequência de sobrecarga e comparações entre o recalque previsto por Plaxis e o medido em campo

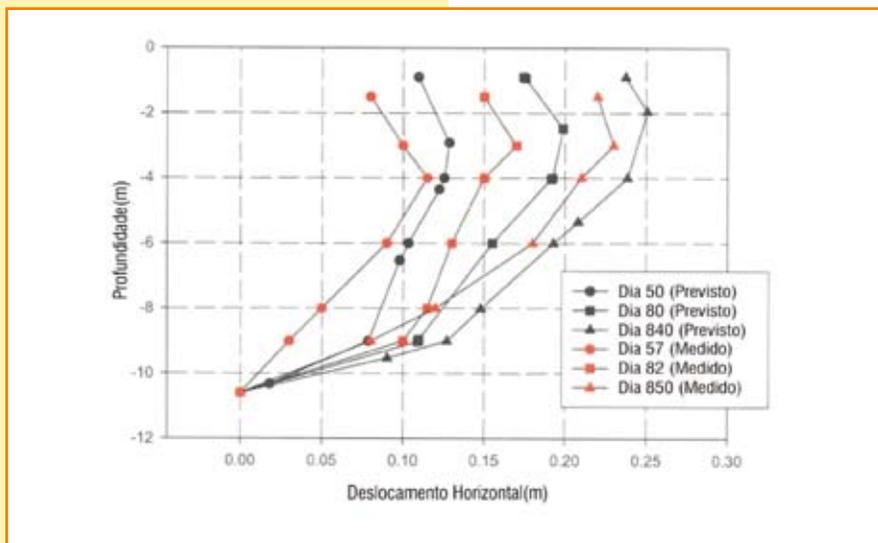


Figura 17 – Deslocamento horizontal previsto por Plaxis

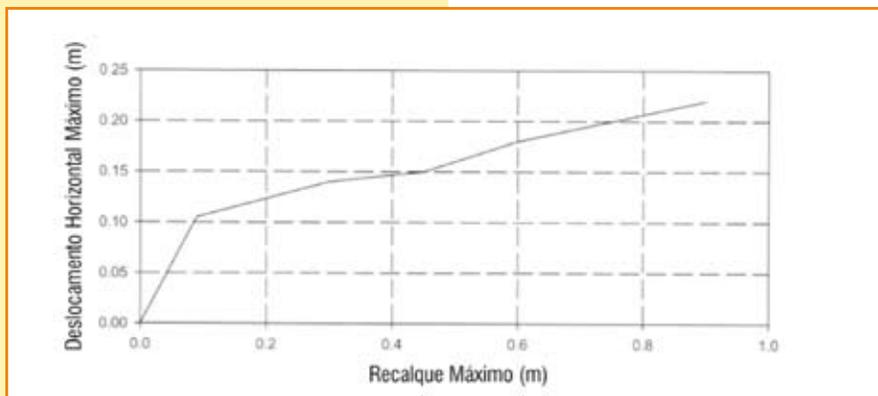


Figura 18 – Relação entre o deslocamento horizontal máximo e o recalque máximo no aterro experimental HW4

## LEITURAS COMPLEMENTARES

Batista, Isabella Santini (2003). A case study on the performance of embankments on treated soft ground. MIT, Cambridge, MA.

Bredenberg, Hakan et al. (1999). "The performance of stabilized soil columns in two Dutch test sites." *Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization*, A. A. Balkema, 239-244.

CUR (2001). *Evaluatie No-Recess – testbanen Hoeksche Waard*, Data CD.

Ladd, Charles (1991). *The Twenty-Second Terzaghi Lecture*, American Society of Civil Engineers.

Terzaghi, K. e Peck, R. B. (1987). *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd ed., McGraw Hill, New York, NY, USA, 685 p.