

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/508

# Avaliação dos Deslocamentos Horizontais em Solos Moles com Variação na Espessura

Renan Cardoso Alano

Engenheiro Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, renan.c.alano@outlook.com

Sidnei Helder Cardoso Teixeira

Docente do Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, s.teixeira@ufpr.br

**RESUMO:** Os solos moles são conhecidos pela baixa resistência, alta deformabilidade e grandes recalques. No entanto, há poucos estudos sobre deslocamentos horizontais sob carregamentos uniformemente distribuídos, que podem levar à ruptura por excesso de deformação e tensão horizontal. Este trabalho investiga a correlação entre o deslocamento horizontal do maciço e diferentes geometrias do subsolo, quando sujeitos a cargas de um aterro na superfície. Utilizando calibração do módulo de compressão ( $\lambda$ ), a partir do deslocamento vertical do solo, com modelo numérico e dados reais, foram obtidos resultados coerentes, mas inferiores aos deslocamentos horizontais de campo, com resultados inferiores a 5% do aferido no local. A calibração resultou em módulo de compressão de 0,1226 e índice de compressão ( $C_c$ ) de 0,282. Variações na espessura do solo compressível mostraram aumentos significativos nos deslocamentos horizontais. Além disso, as simulações com variação na espessura do solo compressível demonstraram um aumento de 38,43% e correlação média de 0,984 nos deslocamentos horizontais, destacando a sensibilidade desses movimentos a essa variável. Embora os modelos não tenham reproduzido os movimentos horizontais de campo, destacou-se a necessidade de considerar tais variações na previsão de deslocamentos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Deslocamentos horizontais, Solos moles, Variações geométricas, Modelagem numérica, Instrumentação geotécnica, Investigação geotécnica.

**ABSTRACT:** Soft soils are known for their low resistance, high deformability and large settlements. However, there are few studies on horizontal displacements under uniformly distributed loads, which can lead to failure due to excessive deformation and horizontal stress. This work investigates the correlation between the horizontal displacement of the mass and different subsoil geometries, when subjected to loads from a landfill on the surface. Using calibration of the compression modulus ( $\lambda$ ), based on the vertical displacement of the soil, with a numerical model and real data, coherent results were obtained, but lower than the horizontal displacements in the field, with results less than 5% of those measured on site. The calibration resulted in a compression modulus of 0.1226 and a compression index ( $C_c$ ) of 0.282. Variations in the thickness of the compressible soil showed significant increases in horizontal displacements. Furthermore, simulations with variation in the thickness of the compressible soil demonstrated an increase of 38.43% and an average correlation of 0.984 in horizontal displacements, highlighting the sensitivity of these movements to this variable. Although the models did not reproduce horizontal field movements, the need to consider such variations when predicting displacements was highlighted.

**KEYWORDS:** Horizontal displacements. Soft soils. Geometric variations. Numerical modeling. Geotechnical instrumentation. Geotechnical research.

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil apresenta diversas regiões com solos moles de baixa resistência e alta deformabilidade, resultado de sua topografia, extensa faixa litorânea de cerca de 8000 km e amplas bacias hidrográficas (IBGE, 2011). Essas características propiciam a formação de solos aluvionares (transportados pela água) e coluvionares (carregados pela gravidade), as quais resultam em uma variedade de solos que nem sempre são ideais para a construção civil (ALMEIDA e MARQUES, 2010).

Este estudo de caso, foca em uma obra de ampliação de ferrovia e área de armazenamento em um depósito de solo mole, localizado no Maranhão. Para consolidar o terreno, a empresa contratada empregou o método de aceleração de recalques com geocompostos drenantes verticais e aterro temporário como sobrecarga.

Existem diversos métodos eficazes para calcular o recalque em solos compressíveis, como por exemplo, a teoria de Terzaghi (1936) que aborda a deformação unidimensional devido à expulsão de fluidos nos vazios do solo por fluxos verticais, influenciada pela permeabilidade vertical, tensão efetiva, índice de vazios, módulo de compressibilidade e coeficiente de variação volumétrica. Por outro lado, Baron (1948) propôs a teoria do adensamento radial, que explica a expulsão de fluidos por fluxos horizontais e verticais na presença de drenos verticais, essa expulsão de fluidos, resulta em deslocamentos verticais (recalque) no solo, especialmente na parte superior da camada, e podem ser segmentados em free strain e equal strain.

No entanto, a instrumentação revelou um deslocamento horizontal não previsto, um tipo de movimento que não é considerado pelas teorias tradicionais de adensamento de solos moles. Esse fenômeno pode resultar em rupturas e danos em estruturas consolidadas, o que pode acarretar em prejuízos sociais, ambientais e econômicos significativos.

O objetivo geral deste trabalho foi estudar os deslocamentos horizontais em solos moles de espessura variável, quando submetidos a carregamentos uniformemente distribuídos na superfície, com o auxílio de dados de instrumentação e modelagem numérica. Para tal, foram utilizados os dados de uma obra, localizada no estado do Maranhão, de aterro sobre solos moles instrumentada. Com base nos dados de campo foi realizada a calibração do modelo computacional, que simulou condições para explicar os deslocamentos observados em campo.

Devido à escassez de estudos sobre deslocamentos horizontais a pesquisa investigou se a geometria do subsolo foi o principal responsável por esse tipo de movimento em solos compressíveis. Para isso, utilizou-se um software computacional (Geostudio) que faz uso de métodos numéricos para validar essa correlação e compreender melhor esse fenômeno.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa consiste em um estudo de caso de uma obra de aterro em solo mole no Maranhão, para ampliar uma linha férrea. A instrumentação prevista no projeto, com o auxílio da topografia, mediu deformações verticais, pressão da água e deslocamentos totais. Foi observado deslocamento horizontal no solo, não previsto nas teorias de adensamento. O objetivo foi explicar as possíveis causas desse deslocamento, utilizando o software Geostudio para avaliar as deformações do solo e suas consequências em obras próximas.

A obra em questão possui placas de recalque que não apresentaram deslocamento horizontal, o que é comum em placas localizadas no centro do aterro. Para selecionar equipamentos relevantes à pesquisa, foi necessário analisar os deslocamentos horizontais e verticais das placas de recalque e determinar um perfil geotécnico com maior proximidade à placa selecionada para modelagem no software computacional. Após essa etapa, todas as regiões e instrumentos foram avaliados para compreender o comportamento global do solo durante o aterramento. Em seguida, sondagens e ensaios laboratoriais foram realizados para estimar parâmetros geotécnicos inseridos no modelo computacional.

Diante do exposto, dentre as diversas metodologias existentes, foi necessário empregar um método que avaliasse dados de cenários que já ocorreram e permitisse correlacionar com os dados coletados pelos ensaios e sondagem. Neste contexto, o autor Gil (2002) define a pesquisa ex-posto facto como o estudo de eventos passados para estabelecer relações entre variáveis, sem controle da variável independente, o que impede a garantia de resultados causais. Por sua vez, Robson (2003) caracteriza essa pesquisa como relacional, focada em encontrar correlações entre variáveis. As estratégias desse tipo de pesquisa são pré-definidas com base em estudos anteriores, permitindo a formulação de perguntas de pesquisa e a interpretação dos dados por meio de métodos estatísticos.

As estratégias abordadas se enquadram na presente pesquisa, uma vez que os dados de estudo já ocorreram e pretende-se estabelecer relação entre as variáveis da geologia/geotecnia local com os fenômenos constatados em campo. As hipóteses foram desenvolvidas por analogia de teorias que possuem características similares ao contexto da pesquisa. Para tal, foram realizadas simulações, com o auxílio de métodos numéricos, para verificar a existência de conexão entre os elementos, e com definição de causa-efeito.

## 2.1 Coleta e Análise de Dados

Para o estudo foram utilizados dados cedidos da investigação geotécnica, instrumentação em várias etapas construtivas e o projeto da obra. Estas informações permitiram alimentar o modelo numérico e realizar retroanálise para calibração dos parâmetros, com base nos deslocamentos medidos em campo (módulo de compressão e índice de compressão). Na sequência, foi alterada a geometria (espessura das camadas) do modelo computacional, para explicar alguns fatores que impulsionaram o processo de deslocamento horizontal.

No decorrer da pesquisa, foi utilizado o software Geostudio para analisar os movimentos presentes no solo, visando determinar se o processo gera deslocamentos horizontais. Conforme mencionado por Andriotti (2003), a correlação entre duas séries de dados é validada quando as leituras ocorrem simultaneamente. Ao observar a correspondência de seus valores, presume-se a existência de uma relação linear entre os dados, permitindo a determinação de um coeficiente que expressa essa relação.

Para calcular essa relação, empregou-se o coeficiente de correlação linear, conhecido como Momento-Produto de Pearson. Essa constante quantifica o grau de relação linear entre duas variáveis, permitindo a mensuração da intensidade entre os dados emparelhados das variáveis X e Y de uma amostra. É importante ressaltar que a interpretação do resultado final deve considerar tanto o aspecto matemático quanto a situação em análise, já que a interpretação numérica isolada não confirma a relação causal do estudo (ANDRIOTTI, 2003).

## 2.2 Hipótese

No estudo em questão, é importante considerar que uma carga aplicada a um terreno inclinado pode ser decomposta em vetores horizontal e vertical. Esse conceito será aplicado de forma análoga ao caso em estudo. Acredita-se que a inclinação associada a um carregamento superficial uniforme favoreça o deslizamento da camada compressível sobre a camada rígida de baixa deformabilidade. Com base nesses pressupostos, formulou-se uma hipótese para explicar os resultados observados nas placas de recalque. A Figura 1 apresenta hipótese de deslocamento horizontal.

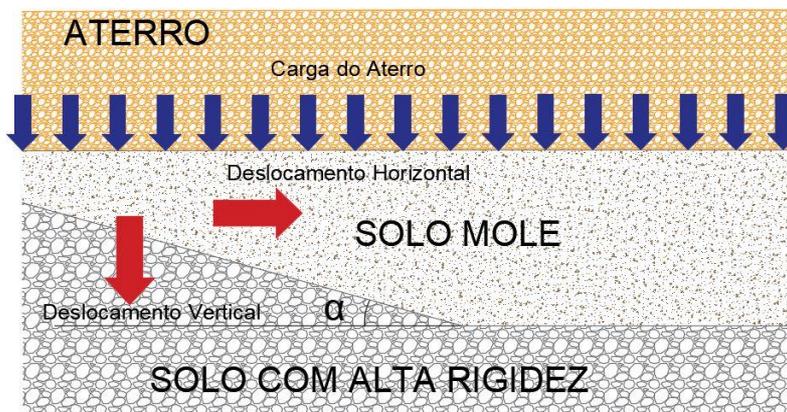


Figura 1. Hipótese de deslocamento horizontal

A hipótese considera duas camadas de solo distintas: uma camada de solo mole e deformável sobre uma camada impenetrável com perfil inclinado. Foi suposto que a inclinação ( $\alpha$ ) seja uma constante enquanto a espessura da camada de solo mole será variável, o que afetará o comportamento da carga uniformemente aplicada na superfície e o deslocamento horizontal. A pesquisa visa analisar como a variação na espessura do solo compressível afeta esses resultados.

## 2.3 Simulações Numéricas

Os perfis da investigação geotécnica de campo, dados dos ensaios laboratoriais e instrumentação, foram utilizados para a modelagem numérica no sistema Geostudio, a fim de realizar a retroanálise.

Com base nos perfis geotécnicos identificados pela investigação, as análises numéricas foram estruturadas da seguinte maneira: utilizou-se o índice de compressão constante, obtido por retroanálise a partir do deslocamento vertical da instrumentação. Incorporou-se variações geométricas na espessura (foi adotado um acréscimo de 30° na inclinação ( $\alpha$ ), encontrada na investigação geotécnica), e, com base nos dados da investigação geotécnica, que incluem a geometria inicial, obteve-se parâmetros de resistência e elasticidade das camadas, além da resistência ao cisalhamento não drenada, determinada por ensaios de adensamento.

As simulações foram realizadas para avaliar a influência da espessura nos deslocamentos horizontais observados nos instrumentos da obra. Para isso, foi adotado três espessuras de solo distintas das encontradas no perfil em análise, mas representativas dos depósitos de solos moles brasileiros.

## 2.4 Calibração e Aferição do Modelo a partir dos dados de Campo

Para desenvolver o modelo numérico, além do perfil II (Figura 2), foram considerados outros perfis e todos os ensaios de adensamento disponíveis (Figure 1).

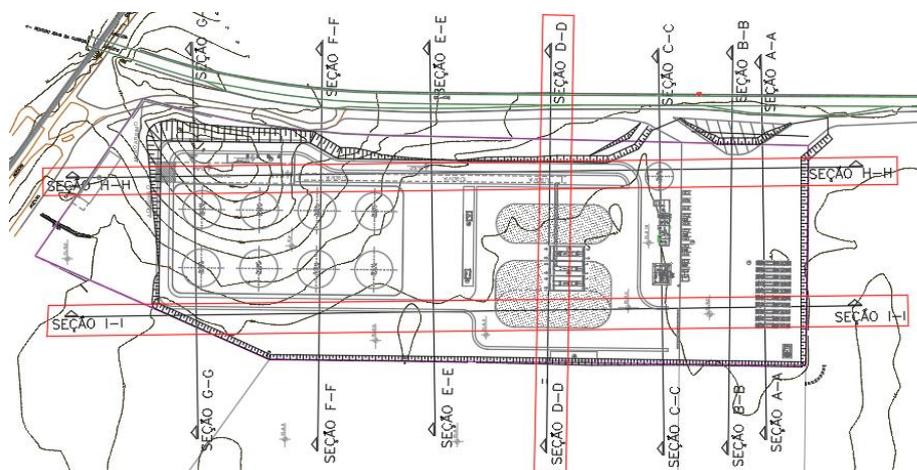


Figure 1. Locação dos perfis

Devido à distância dos ensaios em relação ao ponto analisado e à homogeneidade do material, optou-se por utilizar a média do índice de compressão, decompressão e índice de vazios nas primeiras análises do modelo. Posteriormente, apenas o índice de compressão foi ajustado para a calibração.

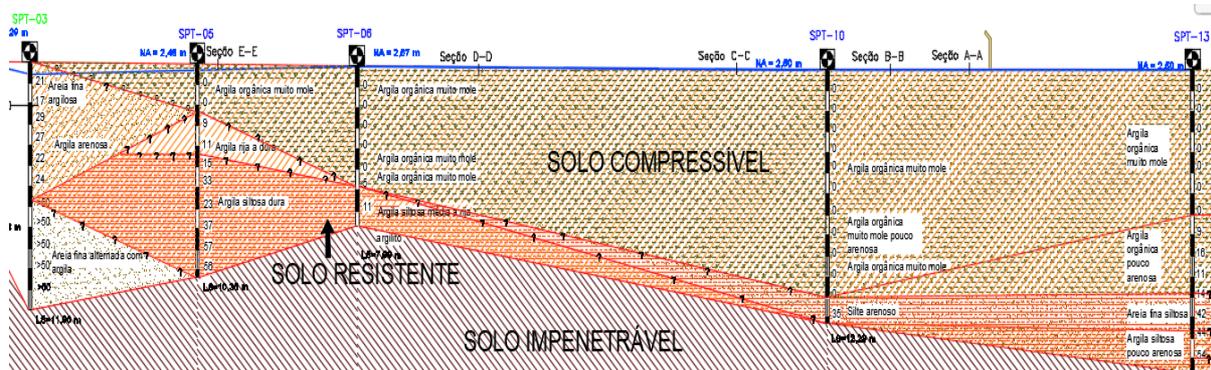


Figura 2. Perfil II

O perfil II foi reproduzido no software devido à sua grande semelhança com a hipótese de estudo e proximidade com o ponto de calibração. O perfil II foi usado como referência para a calibração.

A geometria dos perfis foi incorporada ao modelo computacional para representar as condições iniciais da obra e avaliar os deslocamentos verticais e horizontais. Os parâmetros-chave para o projeto de aterro em solos moles incluem coeficientes de adensamento vertical e horizontal, além da resistência não drenada. No entanto, devido à fundamentação teórica do software, que se baseia no modelo constitutivo de Cam-Clay

Modificado, os parâmetros editáveis para o solo compressível são: módulo de compressão, módulo de descompressão, coeficiente de Poisson, índice de vazios inicial, ângulo de atrito, coeficiente de empuxo em repouso, e peso específico. Para outros tipos de solo, foi utilizado o modelo Elástico Linear com parâmetros como módulo de elasticidade, peso específico, ângulo de atrito e coeficiente de empuxo em repouso.

A retroanálise foi realizada variando o índice de compressão do solo para alcançar o recalque observado em campo. Após atingir o deslocamento vertical desejado, verificou-se o deslocamento horizontal correspondente para o índice de compressão encontrado, utilizando como base a geometria identificada nos perfis e nos dados da instrumentação.

## 2.5 Espessura

Conforme detalhado na hipótese de pesquisa, foi considerado a avaliação das espessuras das camadas. Segundo a hipótese, as cargas verticais aplicadas em planos inclinados podem se decompor em forças que causam deslocamentos tanto verticais quanto horizontais. Para isso, a modelagem numérica empregou as geometrias com o ângulo mencionado ( $32,36^\circ$ ). Sabe-se que a espessura do solo compressível no Perfil II (Figura 2) é de aproximadamente 11 metros. Portanto, foi realizado quatro análises numéricas com diferentes espessuras de solo em adensamento (5, 11, 15 e 20 metros).

O propósito dessas modelagens foi avaliar, de maneira indireta, a conexão entre a carga do aterro e a espessura do solo mole. Adicionalmente, a variação na espessura teve como intuito investigar se existe uma correlação entre a altura da camada de solo compressível e o fenômeno de escorregamento sobre a camada rígida.

## 3 RESULTADOS

### 3.1 Calibração do Modelo

Para a calibração do modelo numérico, foram analisadas as leituras das placas de recalque e realizado um processo de retroanálise do índice de compressão, com base no deslocamento vertical medido no campo. Para determinar o módulo de compressão do terreno natural, reproduziu-se o perfil do solo no modelo computacional, desta forma a estratigrafia com maior proximidade as placas, além de ser paralela a direção do deslocamento, é a do perfil II.

Com a definição do perfil II, sua geometria foi inserida no software (Figura 3). Para uma melhor visualização dos modelos, foi utilizada uma escala vertical diferente da horizontal, sendo que a altura total do perfil é de aproximadamente 14,64 metros, enquanto sua extensão é de 390 metros.

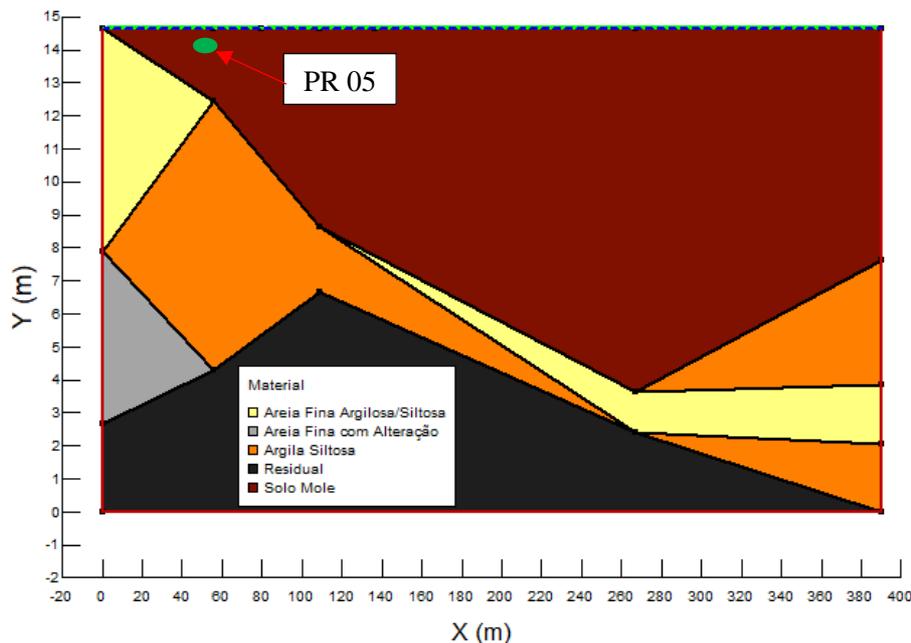


Figura 3. Modelo numérico do perfil II

Na Figura 3, a configuração das camadas foi baseada no perfil previamente estabelecido, e uma sobrecarga de  $36 \text{ kN/m}^2$  foi adicionada à parte superior do perfil, representando a carga projetada. Este valor foi determinado considerando um aterro com densidade de  $18 \text{ kN/m}^3$  e uma espessura de 2 metros, que é um valor intermediário entre as espessuras do aterro e do colchão drenante de areia, conforme definido no projeto.

Para determinar os parâmetros do modelo numérico, foram utilizadas as relações do ensaio CPTU, juntamente com os resultados dos ensaios de caracterização. A calibração inicial do modelo numérico envolveu a inclusão dos parâmetros de resistência derivados do ensaio CPTU, adensamento (com amostras Shelby) com exceção do peso específico do solo ( $\gamma$ ) e do coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), que foram definidos com base no projeto e na literatura, respectivamente.

Para atingir o módulo de compressão ( $\lambda$ ), de campo, foi necessário reduzi-lo, consecutivamente, até atingir o valor do deslocamento vertical de campo. Entretanto, na formulação de Cam-Clay, o valor do módulo de compressão não pode ser inferior ao de descompressão ( $k$ ), e estes são calculados a partir do índice de compressão ( $C_c$ ) e descompressão ( $C_s$ ), respectivamente.

O instrumento que permitiu a calibração (PR 05) está localizado a 80 m (eixo X) e 14,64 m (eixo Y), e, apresentou um deslocamento vertical de 482 mm. Após sucessivas variações o valor, do módulo de compressão, que mais se aproximou do recalque de campo foi de 0,1226, o qual obteve resultado de 482,05 mm de deslocamento vertical e 5,58 mm de deslocamento horizontal

O recalque foi atingido, com a variação do índice de compressão, entretanto, o deslocamento horizontal obteve resultado inferior (Tabela 1) ao medido em campo (199,6 mm). O valor encontrado de  $\lambda$  é correspondente a um índice de compressão ( $C_c$ ) de 0,282, resultado que se enquadra em solos descritos na literatura nacional.

### 3.2 Variação da Espessura

Com a realização das variações de inclinação ( $\alpha$ ) foram realizadas três alterações na espessura de solo mole, que totalizaram 4 espessuras distintas no ângulo analisado. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Deslocamento horizontal nas alterações de espessura

Inclinação (°)	Deslocamento horizontal (mm) - Espessura de 5m	Deslocamento horizontal (mm) - Espessura de 11m	Deslocamento horizontal (mm) - Espessura de 15m	Deslocamento horizontal (mm) - Espessura de 20m
32,36	60,43	62,4	64,1	65,23

Ao analisar Tabela 1, em todas as espessuras houve aumento do deslocamento horizontal, conforme exposto. A espessura que apresentou maior deslocamento foi a espessura de 20 metros, a qual indicou um aumento de 4,8 mm em relação a espessura de 5 m, que representa um aumento de 7,94%. Portanto, os resultados constataram aumento do deslocamento horizontal com o aumento da espessura de solo mole, quando comparado com os 5 e 20 metros de espessura.

Semelhante ao realizado, nos dados de deslocamento horizontal, foi elaborado a Tabela 2 para apresentar os resultados obtidos de deslocamento vertical.

Tabela 2. Deslocamento vertical nas alterações de espessura

Inclinação (°)	Deslocamento vertical (mm) - Espessura de 5m	Deslocamento vertical (mm) - Espessura de 11m	Deslocamento vertical (mm) - Espessura de 15m	Deslocamento vertical (mm) - Espessura de 20m
32,36	509,51	594,81	635,49	674,23

Em relação aos deslocamentos verticais, foi constatado aumento em todas as espessuras. Entre todos os dados apresentados na Tabela 2, o aumento foi de 164,72 mm, relação a espessura de 5 para 20 metros, o que representa um acréscimo de aproximadamente 32,33%.

### 3.3 Correlações

Com base nos resultados obtidos de deslocamento horizontal e vertical foi calculado as correlações entre as variáveis: deslocamento horizontal e espessura de solo mole; deslocamento vertical e espessura de solo mole. Os resultados estão expostos na Tabela 3.

Tabela 3. Correlações

Inclinação (°)	Correlação (r) – deslocamento horizontal	Correlação (r) – deslocamento vertical
32,36	0,9944	0,9892

Segundo a classificação do valor do coeficiente de correlação de Pearson, os resultados encontrados apresentaram um grau de correlação quase perfeito, pois encontra-se no intervalo de 0,9 a 1. Isto indica grande relação entre as variações no deslocamento e espessura, utilizada nas simulações.

## 4 CONCLUSÕES

Os deslocamentos horizontais que ocorrem sob carregamentos uniformemente distribuídos na superfície não são contemplados nas metodologias de dimensionamento. Isso destaca a importância de investigar as possíveis causas e os impactos que esses deslocamentos podem ter nas estruturas a serem construídas.

Devido à variedade de métodos de ensaio utilizados no campo e à quantidade de ensaios realizados, foi possível identificar uma estratigrafia bem definida na região aterrada. Esta estratigrafia é caracterizada por uma camada de argila orgânica muito mole, com espessura máxima de 12 metros, seguida por um solo de alta

rigidez e material impenetrável ao SPT entre 11 e 15 metros de profundidade. O nível d'água foi encontrado na superfície.

Durante a fase de calibração, foi alcançado um valor de  $\lambda$  igual a 0,1226 e um índice de compressão de 0,282. Esses resultados permanecem dentro da faixa de valores encontrados nos solos brasileiros. O resultado de deslocamento horizontal encontrado foi inferior ao observado no local, e, indica que o modelo computacional não reproduz fielmente o que ocorreu in loco, o que sugere que outro fator tenha influenciado o deslocamento horizontal do solo.

As correlações calculadas Tabela 3, identificaram correlação extremamente forte entre as variáveis, e, apresentaram valor médio de 0,9944 para o deslocamento horizontal e 0,9892 para o deslocamento vertical. Portanto, foi possível comprovar a alta influência da espessura do solo compressível nos deslocamentos horizontais, quando submetidos a carregamentos uniformes na superfície.

A identificação dos deslocamentos horizontais destaca a importância de realizar um mapeamento detalhado do subsolo em obras que envolvam aterros sobre solos moles.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andriotti, J. L. S. Fundamentos de estatística e geostatística. Editora Unisinos. 2003
- Gil, A. C. COMO ELABORAR PROJETOS DE PESQUISA. São Paulo - SP: Editora Atlas, 2002.
- IBGE. Atlas Geográfico das Zonas Costeiras e Oceânicas do Brasil: Rio de Janeiro. 2011.
- MÁRCIO DE SOUZA, S. Almeida; MARQUES, Maria Esther Soares. Aterros sobre solos moles: projeto desempenho. Ed. Oficina de Textos, 2010.
- Marques, M. E. S. Aterros sobre solos moles: projeto e desempenho. Ed. Oficina de Textos, 2010.
- ROBSON, Colin. Real world research. Oxford: Blackwell, 2003.
- Perloff, William H.; BARON, William. Soil mechanics. Principles and applications. 1976.
- Terzaghi, K., Peck, R.B. (1987) Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd ed., McGraw Hill, New York, NY, USA, 685 p.