



**Simpósio de Métodos  
Numéricos em Engenharia**

**25 a 27 de outubro, 2017**

## *Avaliação de deformações de um aterro experimental a partir de análises numéricas*

Tennison Freire de Souza Jr.  
Departamento de Construção Civil - DCC  
UFPR  
Curitiba, Brasil

Sidnei Helder Cardoso Teixeira  
Departamento de Construção Civil - DCC  
UFPR  
Curitiba, Brasil

Cristhyano Cavali da Luz  
Departamento de Construção Civil - DCC  
UFPR  
Curitiba, Brasil

João Paulo Santos da Silva  
Departamento de Construção Civil - DCC  
UFPR  
Curitiba, Brasil

Paulo Roberto de Paiva  
Diretoria  
Geohydrotech Engenharia  
São Paulo, Brasil

**Resumo** — Este trabalho apresenta análises numéricas de deformações decorrentes de um aterro experimental construído sobre um reservatório de rejeitos. O objetivo do presente estudo foi avaliar os parâmetros de deformabilidade dos rejeitos depositados no reservatório. Os parâmetros obtidos permitem prever o comportamento geomecânico de aterros que venham a ser construídos sobre os rejeitos, para formação de diques no reservatório, alteamento ou construção de uma barragem de contenção de rejeitos. Foram feitas análises de deformação em duas e três dimensões, com utilização dos programas PLAXIS® e TOCHNOG®, respectivamente. As análises bidimensionais foram feitas para o estado plano de deformações e permitiram uma calibração prévia dos parâmetros elásticos do modelo. As análises tridimensionais foram realizadas para verificar a calibração dos parâmetros e para representar com maior fidelidade a geometria do aterro experimental.

**Palavras-chave** — *deformação; aterro experimental; barragem de contenção de rejeitos.*

### I. INTRODUÇÃO

A mineração é uma importante atividade econômica que contribui para o desenvolvimento do país, sendo este setor responsável por cerca de 20% do total das exportações comerciais brasileira em 2016 [1]. Na exploração das jazidas, além do minério, são obtidos materiais de baixo valor agregado, denominados estéreis (provenientes dos processos de decapeamento da mina) e os rejeitos (provenientes dos processos de beneficiamento). Estes materiais são comumente descartados em estruturas na forma de barragens ou empilhamentos drenados [1]. Desta forma, aterros são construídos para atender necessidades relativas à construção de barragens, obras viárias, entre outras. Em barragens de rejeitos, os aterros representam estruturas de contenção e estocagem de rejeitos, as quais apresentam comportamentos geomecânicos incertos e que exigem um controle contínuo ao longo da construção e operação das praias de rejeitos ou lago [4].

Em obras de elevada magnitude, o aterro experimental representa uma técnica atraente a um controle tecnológico e processual construtivo dos aterros. Essa técnica orienta a escolha adequada dos equipamentos e das umidades, da espessura e do número de passadas em cada camada. [4]. Contudo, é possível direcionar esta técnica para avaliar o comportamento da deformabilidade do material durante o processo construtivo da barragem.

O presente estudo avaliou os parâmetros de deformabilidade dos rejeitos depositados a partir de um aterro experimental implantado em um reservatório. Com uso de análises numéricas bi e tridimensionais, buscou-se obter a forma mais representativa do comportamento de uma barragem de rejeitos, tendo como referência dados de instrumentação.

## II. ATERRO EXPERIMENTAL

Neste tópico são apresentados os aspectos referentes à geometria adotada na concepção do aterro experimental, assim como a técnica construtiva e a instrumentação utilizada na estrutura.

### A. Geometria do aterro

O aterro experimental foi projetado para ter uma altura máxima de 10 metros e taludes com inclinação 1,0V:1,5H. O topo do aterro possui, em planta, uma geometria retangular com 30 metros de comprimento e 12 metros de largura. Foi utilizada uma berma de 4 metros de altura e 25 metros de largura para estabilizar o talude posterior (lado oposto ao que foi instrumentado).

A Fig. 1 ilustra a seção transversal do aterro experimental estudado. Nesta mesma ilustração é perceptível a existência de uma camada de rejeito com espessura estimada em 23 metros.

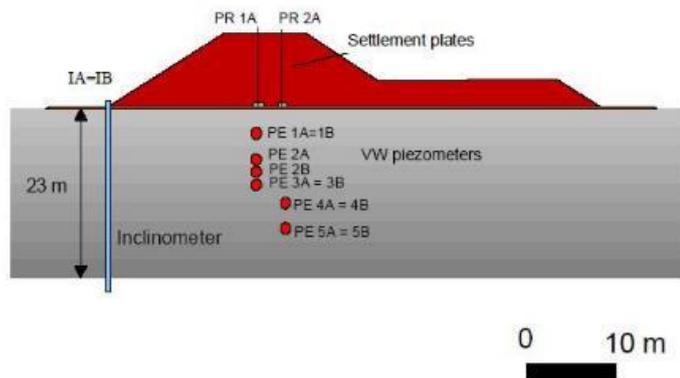


Fig. 1. Seção transversal do aterro experimental

### B. Construção do aterro

Foi utilizado um material de caráter siltoso, extraído de uma área de empréstimo próxima ao local do aterro. O aterro experimental foi construído a uma distância de, aproximadamente, 100 metros da margem do reservatório,

buscando garantir assim uma espessura significativa da camada de rejeito abaixo do aterro experimental.

Uma camada de geotêxtil não-tecido com  $400 \text{ g/m}^2$  foi instalada em toda a área do aterro, seguida por uma camada de aterro simplesmente lançado, com espessura variando entre 80 e 90 cm. A camada de geotêxtil contribuiu para minimizar a espessura da primeira camada de solo, necessária para permitir o tráfego de tratores e caminhões basculantes na área. Após a construção desta plataforma de trabalho, a construção foi interrompida para a instalação da instrumentação e realização das leituras de referência.

### C. Instrumentação

A instrumentação do aterro experimental foi constituída por dez piezômetros de corda vibrante, instalados no rejeito (fundação do aterro); dois inclinômetros, instalados no pé do talude mais alto; um perfilômetro hidráulico de recalques, instalado ao longo da base da seção transversal média do aterro; por fim, quatro placas de recalque, instaladas na parte central do aterro (Fig. 1).

## III. DADOS DA INSTRUMENTAÇÃO

Os registros de deslocamentos verticais ao longo do eixo transversal do aterro experimental, obtidos com a utilização do perfilômetro, estão apresentados na Fig. 2. Os máximos recalques medidos foram de aproximadamente 700 mm, situando-se abaixo do trecho onde o aterro apresenta maior altura.

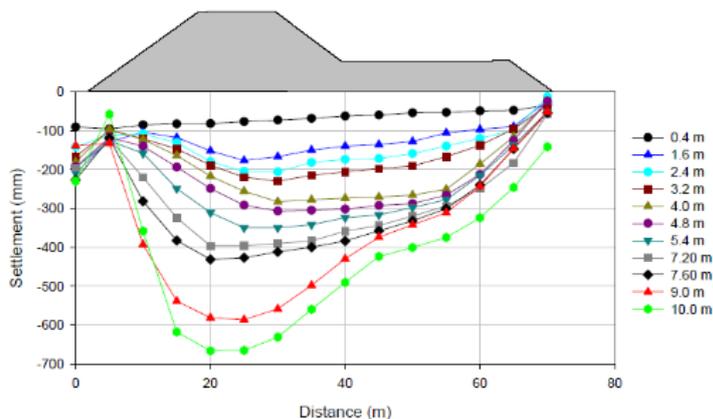
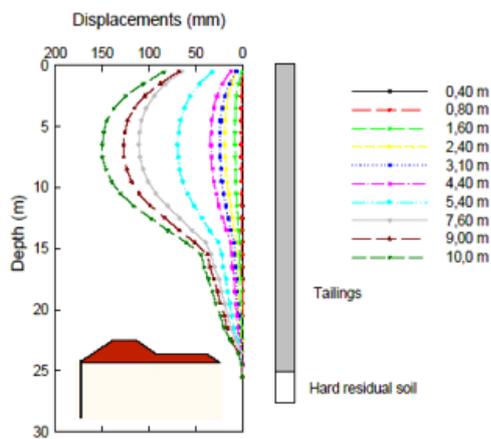
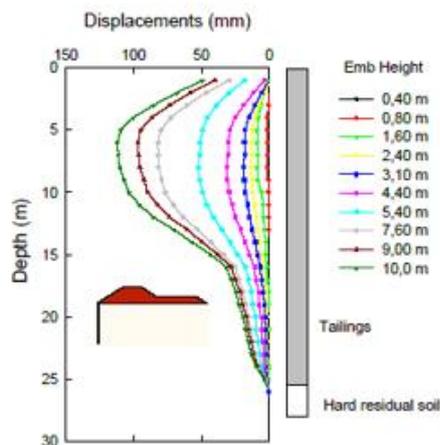


Fig. 2. Dados do perfilômetro

Os gráficos das Fig. 3a e Fig. 3b apresentam os deslocamentos horizontais com a profundidade, para várias alturas de aterro. Os deslocamentos horizontais máximos foram em torno de 150 mm e 110 mm, a uma profundidade de 7 m, para os inclinômetros IA e IB, respectivamente.



a) IA



b) IB

Fig. 3. Registros dos inclinômetros ao longo da construção do aterro. a) inclinômetro IA; Inclinômetro IB.

A Fig. 4 apresenta os recalques em função da altura do aterro, mensurados com uso das placas de recalque.

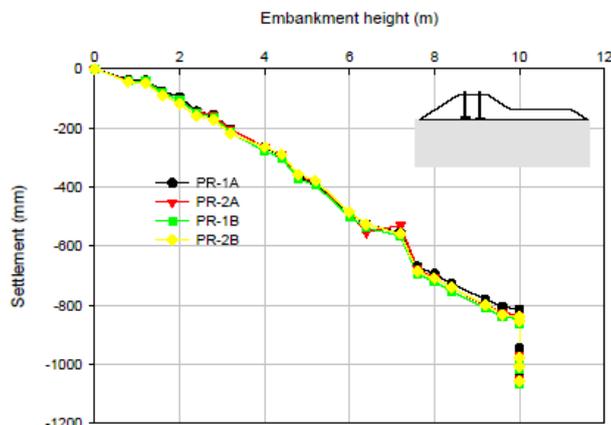


Fig. 4. Recalques medidos com as placas de recalque

Os máximos recalques observados na Fig. 4, ao término da construção, foram de aproximadamente 800 mm. Os máximos recalques obtidos pelo perfilômetro, entretanto, foram em torno de 700 mm. Pode-se dizer que as placas de recalque fornecem resultados mais realísticos, enquanto que o perfilômetro fornece o formato dos recalques.

#### IV. MODELOS NUMÉRICOS ADOTADOS

Para entendimento do comportamento do aterro experimental, foram desenvolvidos modelos numéricos com base no método dos elementos finitos, através dos *softwares* PLAXIS® e TOCHNOG® para análises das deformações bi e tridimensionais do aterro, respectivamente.

##### A. Análises bidimensionais com base em dados de instrumentação

Nas análises bidimensionais utilizou-se o *software* PLAXIS®, considerando o estado plano de deformações, assim como para calibração dos parâmetros de deformabilidade do rejeito. Quanto ao comportamento de deformação dos materiais, frente às tensões impostas, foi considerado o modelo constitutivo linear elástico perfeitamente plástico e o critério de plastificação de *Mohr-Coulomb* para o solo de aterro e para o rejeito.

Os valores dos parâmetros utilizados nas análises bidimensionais são apresentados na Tabela. I. Para a calibração desses parâmetros, procurou-se ajustar os valores do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson do rejeito.

TABELA I: PARÂMETROS UTILIZADOS NAS ANÁLISES BIDIMENSIONAIS, CALIBRADOS A PARTIR DA INSTRUMENTAÇÃO DO ATERRO EXPERIMENTAL.

Solo	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	$C'$ (KPa)	$\Phi'$ (°)	$E$ (KPa)	$\mu$
Aterro lançado	19	10	31	10.000	0,35
Rejeito	17	0	18	8.000	0,20

Para o rejeito, foram selecionados parâmetros de resistência ao cisalhamento que conduzissem o talude do aterro a um fator de segurança próximo de 1,0, para altura do aterro igual a 10 metros.

A representação do processo construtivo do aterro, quanto aos elementos finitos referentes ao aterro experimental, foi gerada com a subdivisão em quatro camadas e aplicação em etapas. As duas primeiras camadas possuíam altura de 2,0 metros e as duas últimas, de 3,0 metros, cada uma, perfazendo um total de 10 metros.

A Fig. 5 mostra os deslocamentos verticais no rejeito devido ao carregamento induzido pelo aterro experimental. Os deslocamentos verticais máximos no rejeito são da ordem de

800 mm (0,80 m na escala), tal como os obtidos pelas placas de recalque.

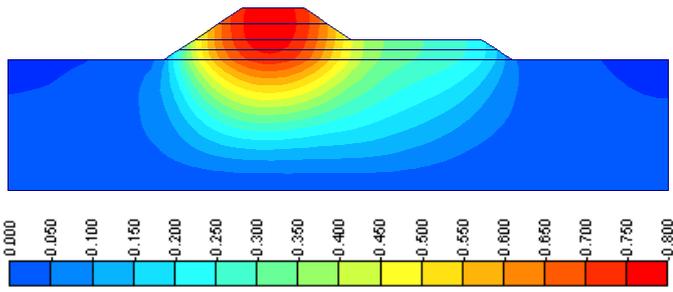


Fig. 5. Deslocamentos verticais no rejeito, após a construção do aterro experimental, determinados nas análises bidimensionais (seção transversal)

Quanto aos valores de deslocamentos na vertical que passa pelo pé do talude mais alto, os mesmos podem ser comparados com os deslocamentos medidos com o uso dos inclinômetros. Como pode ser visto na Fig. 6, os deslocamentos horizontais máximos atingiram valores de 150 mm (0,15 m na escala), comparáveis aos obtidos pela instrumentação.

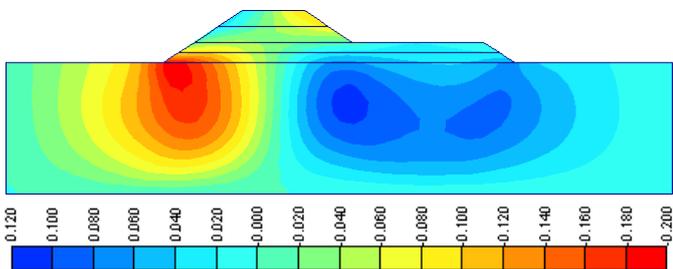


Fig. 6. Deslocamentos horizontais no rejeito, após a construção do aterro experimental, determinados nas análises bidimensionais (seção transversal)

A Fig. 7 compara os recalques (deslocamentos verticais) obtidos nas simulações numéricas com os deslocamentos obtidos com o uso do perfilômetro, instalado na seção central do aterro, imediatamente acima do rejeito. As curvas se referem às alturas de aterro iguais a 4,0 e 10,0 metros.

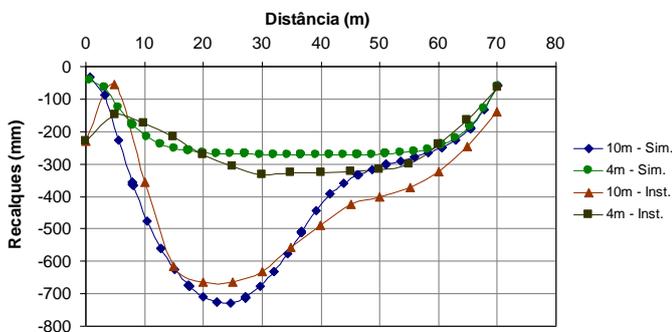


Fig. 7. Comparação entre os recalques obtidos nas simulações numéricas com os medidos no perfilômetro

Pode-se perceber que ambos os valores dos recalques, ou seja, os obtidos com as simulações numéricas e com as instrumentações *in loco*, seguem uma mesma trajetória de tendências.

A Fig. 8 apresenta uma comparação entre os deslocamentos horizontais no rejeito, determinados nas simulações numéricas bidimensionais e os mensurados com uso do inclinômetro IA, para alturas do aterro iguais a 4,0 e 10,0 metros.

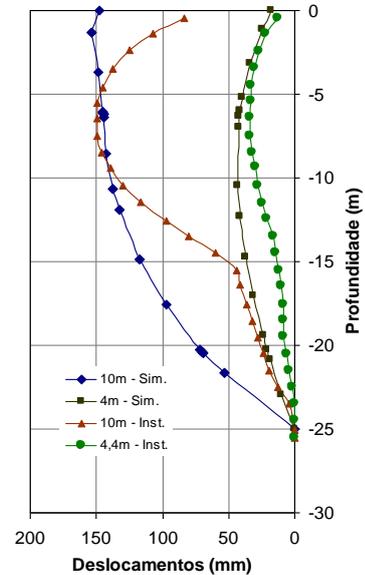


Fig. 8. Comparação entre os deslocamentos horizontais calculados e medidos

### B. Análises tridimensionais com calibração dos dados de instrumentação

As análises tridimensionais foram realizadas com uso do software TOCHNOG®. Assim como nas análises bidimensionais, foi considerada a construção do aterro em quatro camadas, sendo que as duas camadas inferiores possuem altura de 2,0 metros e as duas superiores possuem altura de 3,0 metros cada uma. Na modelagem, foram utilizados elementos finitos tetraédricos de quatro nós.

Além disso, foram mantidos os mesmos modelos constitutivos para os materiais (Aterro lançado e rejeito), assim como os mesmos parâmetros obtidos a partir da calibração feita nas análises bidimensionais, conforme Tabela I. Posteriormente foram realizadas simulações considerando o modelo tridimensional mostrado na Fig. 9 para verificar os deslocamentos produzidos pela estrutura.

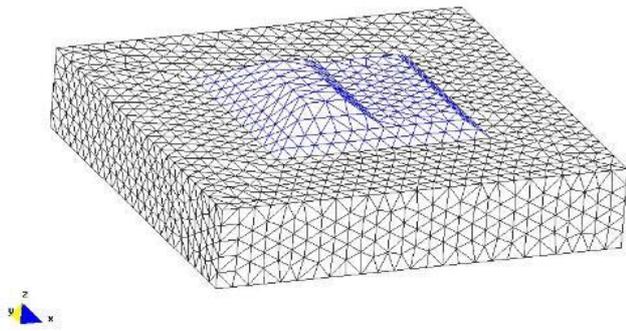


Fig. 9. Malha de elementos finitos do modelo tridimensional

A Fig. 10 mostra os deslocamentos horizontais na direção x (orientada e definida na Fig. 9) no plano vertical alinhado com o pé do talude mais alto do aterro experimental. Neste plano, estão localizados os inclinômetros. Os valores podem ser comparados com os medidos pelos inclinômetros.

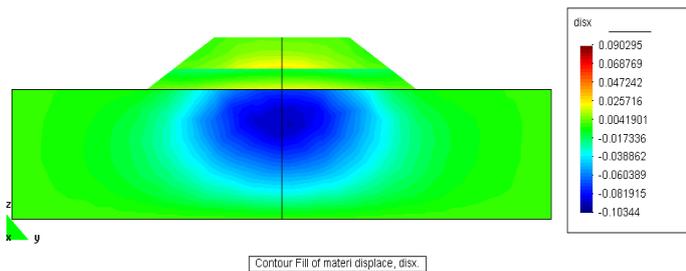


Fig. 10. Deslocamentos horizontais no rejeito, considerando parâmetros calibrados na análise bidimensional (seção longitudinal)

Como é possível perceber na Fig. 10, as curvas de mesmos deslocamentos horizontais possuem um formato de bulbo achatado, mostrando que as análises bidimensionais não são adequadas para modelar o aterro experimental. Os deslocamentos horizontais máximos obtidos na simulação são de aproximadamente 100 mm, inferiores aos obtidos pelo inclinômetro IA, que registrou deslocamentos em torno de 150 mm.

A Fig. 11 ilustra os deslocamentos horizontais no rejeito ao longo de um plano vertical que corta o aterro experimental ao meio. Essa figura pode ser comparada com a Fig. 6.

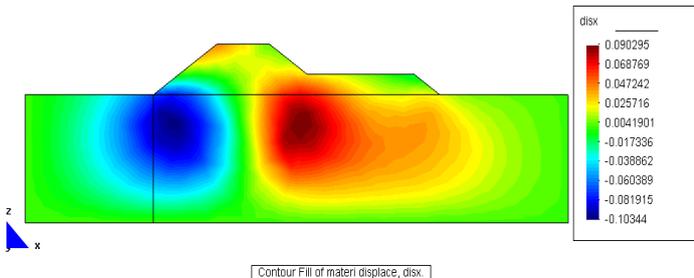


Fig. 11. Deslocamentos horizontais no rejeito, considerando parâmetros calibrados na análise bidimensional (seção transversal)

A Fig. 12 apresenta os deslocamentos verticais no plano vertical que segmenta o aterro experimental ao meio. Nota-se que os valores de deslocamento verticais máximos no rejeito são da ordem de 450 mm (0,45 m na escala), inferiores aos registrados pelo perfilômetro e pelas placas de recalque. Isso reforça a tese de que o aterro experimental, que se trata de uma estrutura tridimensional, não pode ser adequadamente representado pelo estado plano de deformações.

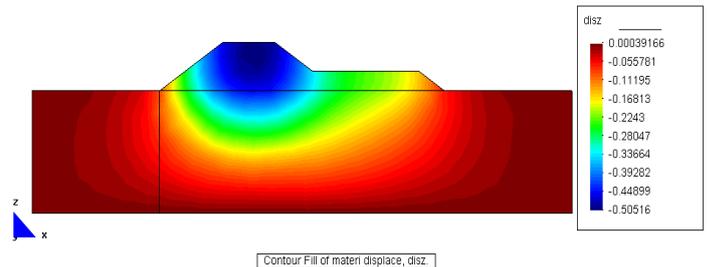


Fig. 12. Deslocamentos verticais no rejeito, considerando parâmetros calibrados na análise bidimensional (seção transversal)

### C. Análises tridimensionais com calibração a partir dos dados de instrumentação e módulo de elasticidade ajustado

Face às divergências encontradas entre os deslocamentos obtidos nas análises bi e tridimensionais, nas quais foram utilizados os mesmos valores dos parâmetros dos materiais, optou-se por proceder uma nova calibração dos mesmos, utilizando o modelo tridimensional.

Os valores obtidos da calibração estão apresentados na Tabela II. Percebe-se que o único parâmetro que foi alterado foi o módulo de elasticidade (E) do rejeito, igual a 4.200 kPa. Comparando comportamentos de deformação de aterros experimentais com os das barragens, esperam-se maiores valores de módulo de elasticidade em carregamento rápido (caso do aterro experimental) que em carregamentos lentos, uma vez que os recalques por adensamento ocorrem ao longo do tempo.

TABELA II: PARÂMETROS CALIBRADOS POR MEIO DE ANÁLISES TRIDIMENSIONAIS, COM BASE NA INSTRUMENTAÇÃO DO ATERRO EXPERIMENTAL

Solo	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	$C'$ (KPa)	$\Phi'$ (°)	$E$ (KPa)	$\mu$
Aterro lançado	19	10	31	10.000	0,35
Rejeito	17	0	18	4.200	0,20

A Fig. 13 e a Fig. 14 apresentam os deslocamentos horizontais no rejeito, obtidos de uma simulação realizada com uso dos parâmetros apresentados na TABELA. A Fig. 13 se refere aos deslocamentos em um plano vertical, que passa pelo pé do talude do aterro, e a Fig. 14 aos deslocamentos que segmenta o aterro ao meio. A Fig. 15 apresenta os deslocamentos verticais no rejeito, ao longo de plano vertical

que corta o aterro experimental ao meio. Por essa vertical, passa o perfilômetro.

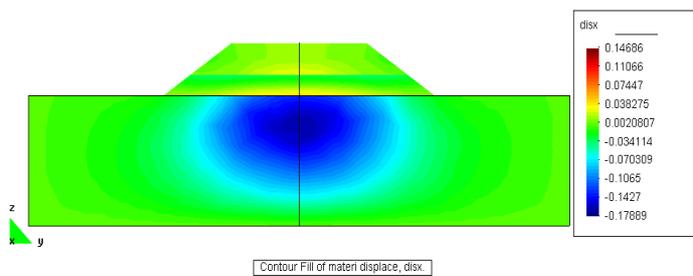


Fig. 13. Deslocamentos horizontais no rejeito, obtidos com uso de parâmetros calibrados em simulações tridimensionais (seção longitudinal)

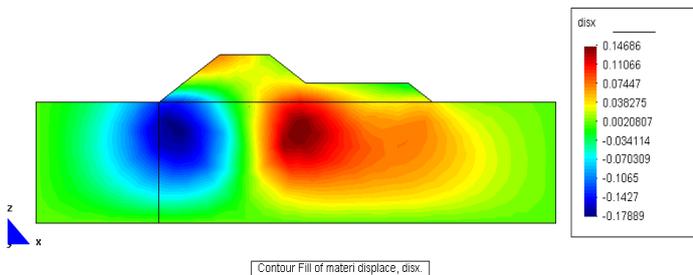


Fig. 14. Deslocamentos horizontais no rejeito, obtidos com uso de parâmetros calibrados em simulações tridimensionais (seção transversal)

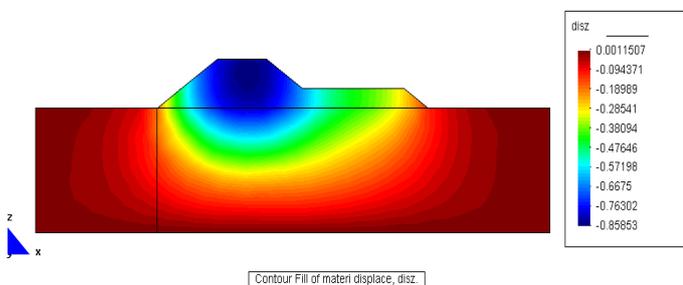


Fig. 15. Deslocamentos verticais no rejeito, obtidos com uso de parâmetros calibrados em simulações tridimensionais.

A Fig. 16 apresenta uma comparação entre os recalques (deslocamentos verticais) no rejeito, obtidos pela simulação numérica e com uso do perfilômetro, referentes a uma altura do aterro igual a 10 metros.

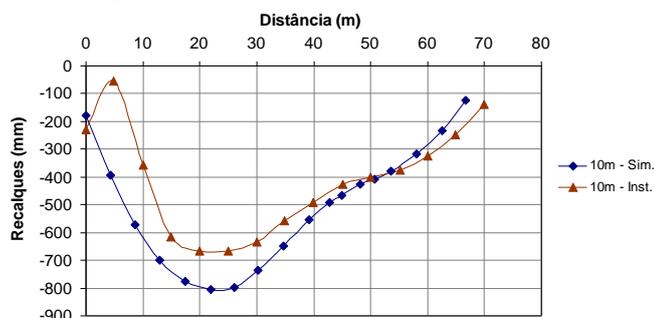


Fig. 16. Comparação entre os deslocamentos verticais, simulados na análise tridimensional, e mensurados com o inclinômetro IA.

Pode-se notar um ajuste compatível entre os formatos das duas curvas. Os deslocamentos máximos obtidos da simulação foram em torno de 800 mm, aproximadamente iguais aos deslocamentos registrados pelas placas de recalque.

## V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados das calibrações de parâmetros realizadas e com base nos resultados obtidos das análises de deformação, pode-se concluir que:

- As análises numéricas de deformação, utilizando parâmetros adequadamente calibrados, permitem a previsão do comportamento de aterros construídos sobre barragem de rejeitos;
- A calibração dos parâmetros elasto-plásticos do rejeito deve ser realizada com dados fidedignos da instrumentação instalada no aterro experimental;
- Em função das dimensões do aterro experimental e da altura da camada de rejeitos, as análises de deformação para o estado plano de deformações (análises bidimensionais) não são as mais indicadas;
- Para se conseguir uma adequada calibração dos parâmetros elasto-plásticos do rejeito, é conveniente que sejam utilizados modelos que considerem as três dimensões;
- Os dados obtidos pelo monitoramento do aterro experimental permitiram a obtenção de parâmetros elásticos adequados para uma situação de curto prazo, uma vez que os dados disponíveis se resumem a um curto período de tempo;
- Em função da elevada permeabilidade do rejeito, os dados obtidos pela instrumentação do aterro experimental se situam em uma condição intermediária entre a não-drenada e a drenada.
- No entanto, como o alteamento do aterro experimental foi executado em um curto período de tempo, condições análogas à apresentada são improváveis de ocorrer numa barragem de contenção de rejeitos ou em qualquer outro aterro que venha a ser construído sobre os rejeitos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores expressam gratidão ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná (PPGECC-UFPR), pela oportunidade ofertada de divulgação de trabalhos científicos, e ao Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq) pelo financiamento das pesquisas do programa.

## REFERÊNCIAS

- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral (2017) *Infraestrutura – Brasil*

exportou US\$ 36,6 bilhões em bens minerais em 2016. <http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2017/01/brasil-exportou-US-36-bilhoes-em-bens-minerais-em-2016>. Acessado em 31/07/2017.

[2] DAIANE, D. S. (2016) *Análise do comportamento geotécnico de aterro experimental executado sobre um depósito de rejeitos finos*. Dissertação de mestrado, Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas Civil, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

[3] GERSCOVICH, D. M. S. (2012) *Estabilidade de taludes*. Oficina de Texto Ed.

[4] PINTO, C. S. (2006) *Curso Básico Mecânica dos Solos*. Oficina de Texto Ed