



**LUCAS OLIVEIRA MENDES**

**AVALIAÇÃO GEOMECÂNICA DE PILHA DE REJEITO FILTRADO:  
MODELAGEM NUMÉRICA EM ESTRUTURAS DE GRANDE ALTURA**

**Nova Lima, MG**

**2023**

**LUCAS OLIVEIRA MENDES**

**AVALIAÇÃO GEOMECÂNICA DE PILHA DE REJEITO FILTRADO:  
MODELAGEM NUMÉRICA EM ESTRUTURAS DE GRANDE ALTURA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de Especialista em Geotecnia Avançada.

Área de concentração:

Orientador: Nilo Cesar Consoli

**Nova Lima, MG**

**2023**

Título: AVALIAÇÃO GEOMECÂNICA DE PILHA DE REJEITO FILTRADO: MODELAGEM NUMÉRICA EM ESTRUTURAS DE GRANDE ALTURA

Classificação: ( X ) Confidencial ( ) Restrita ( ) Uso Interno ( ) Pública

**Informações Confidenciais** - Informações estratégicas para o Instituto e sua Mantenedora. Seu manuseio é restrito a usuários previamente autorizados pelo Gestor da Informação.

**Informações Restritas** - Informação cujo conhecimento, manuseio e controle de acesso devem estar limitados a um grupo restrito de empregados que necessitam utilizá-la para exercer suas atividades profissionais.

**Informações de Uso Interno** - São informações destinadas à utilização interna por empregados e prestadores de serviço.

**Informações Públicas** - Informações que podem ser distribuídas ao público externo, o que, usualmente, é feito através dos canais corporativos apropriados.

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação(CIP)

M492a

Mendes, Lucas Oliveira

Avaliação geomecânica de pilha de rejeito filtrado: modelagem numérica em estruturas de grande altura. Lucas de Oliveira Mendes... [et al.] - Ouro Preto, MG: ITV, 2023.

100 p.: il.

Monografia (Especialização latu sensu) - Instituto Tecnológico Vale, 2023.  
Orientador: Nilo Cesar Consoli

1. Rejeitos. 2. Empilhamento. 3. Tensões Elevadas. 4. Tensão-Deformação. 5. Modelagem Numérica. II. Consoli, Nilo Cesar. II. Título.

CDD.23. ed. 627.8

**Lucas Oliveira Mendes**

**AVALIAÇÃO GEOMECÂNICA DE PILHA DE REJEITO FILTRADO:  
MODELAGEM NUMÉRICA EM ESTRUTURAS DE GRANDE ALTURA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de especialista *lato sensu* em [Engenharia Geotécnica Avançada].

Orientador: Prof. Ph.D. Nilo Cesar Consoli

Trabalho de conclusão de curso defendido e aprovado em 22 de dezembro de 2023 pela banca examinadora constituída pelos professores:

---

Prof. Ph.D. Nilo Cesar Consoli  
Orientador – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

---

Prof. D.Sc. André Luís Brasil Cavalcante  
Membro externo – Universidade de Brasília (UnB)

---

Prof. D.Sc. Hugo Carlos Scheuermann Filho  
Membro externo – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Os Signatários declaram e concordam que a assinatura será efetuada em formato eletrônico. Os Signatários reconhecem a veracidade, autenticidade, integridade, validade e eficácia deste Documento e seus termos, nos termos do art. 219 do Código Civil, em formato eletrônico e/ou assinado pelas Partes por meio de certificados eletrônicos, ainda que sejam certificados eletrônicos não emitidos pela ICP-Brasil, nos termos do art. 10, § 2º, da Medida Provisória nº 2.200-2, de 24 de agosto de 2001 (“MP nº 2.200-2”).

## PROTOCOLO DE ASSINATURA(S)

O documento acima foi proposto para assinatura digital na plataforma Portal de Assinaturas Vale. Para verificar as assinaturas clique no link: <https://vale.portaldeassinaturas.com.br/Verificar/9FC5-FF09-C0F6-6C46> ou vá até o site <https://vale.portaldeassinaturas.com.br:443> e utilize o código abaixo para verificar se este documento é válido. The above document was proposed for digital signature on the platform Portal de Assinaturas Vale . To check the signatures click on the link: <https://vale.portaldeassinaturas.com.br/Verificar/9FC5-FF09-C0F6-6C46> or go to the Website <https://vale.portaldeassinaturas.com.br:443> and use the code below to verify that this document is valid.

Código para verificação: 9FC5-FF09-C0F6-6C46



### Hash do Documento

10B7F59C47C1BDE503E96D305868EAE8E8B4A81C5BDAFD6BB04103B9807A957C

O(s) nome(s) indicado(s) para assinatura, bem como seu(s) status em 29/01/2024 é(são) :

- Nilo Cesar Consoli (Signatário) - 401.067.800-34 em 29/01/2024 11:58 UTC-03:00

**Tipo:** Assinatura Eletrônica

**Identificação:** Por email: [consoli@ufrgs.br](mailto:consoli@ufrgs.br); Código de acesso: 1

### Evidências

**Client Timestamp** Mon Jan 29 2024 11:58:15 GMT-0300 (Horário Padrão de Brasília)

**Geolocation** Latitude: -30.0323132 Longitude: -51.2214323 Accuracy: 16.162

**IP** 143.54.165.230

#### Hash Evidências:

638B2802FA43CDA18DE09AD1652514184840BABF14C13BBFD1B501D6C43BD411

- Hugo Carlos Scheuermann Filho (Signatário) - em 29/01/2024 10:46 UTC-03:00

**Tipo:** Assinatura Eletrônica

**Identificação:** Por email: [hugocsf@ufrgs.br](mailto:hugocsf@ufrgs.br); Código de acesso: 1

### Evidências

**Client Timestamp** Mon Jan 29 2024 10:46:08 GMT-0300 (Horário Padrão de Brasília)

**Geolocation** Latitude: -30.0569744 Longitude: -51.1897341 Accuracy: 20.881

**IP** 189.6.238.57

#### Hash Evidências:

837562E3A35CD8C9FB0D7510B94C7BF8099A1A835B8FF9AF40C587E803931836

- André Luís Brasil Cavalcante (Signatário) - em 29/01/2024 10:45 UTC-03:00

**Tipo:** Assinatura Eletrônica

**Identificação:** Por email: albrasilc@gmail.com; Código de acesso: 1

## Evidências

**Client Timestamp** Mon Jan 29 2024 10:45:15 GMT-0300 (Hora padrão de Brasília)

**Geolocation** Latitude: -15.8367744 Longitude: -48.021504 Accuracy: 5117.82410612046

**IP** 177.96.238.112

### Hash Evidências:

432711ECDE0F39FEE1B1ECDA19DC629ED49042FC357E80AB840E0113C3FADC58



## AGRADECIMENTOS

Nos meus trabalhos meu primeiro agradecimento sempre tem sido a Deus, e não poderia ser diferente nesse momento. Com sua infinita misericórdia, mais uma vez me agracia com essa oportunidade de crescimento profissional, e com certeza Ele me deu forças para concluir este trabalho, em um ano bastante tumultuado, tanto pelas mudanças de rumo em minha carreira quanto pelas importantes perdas familiares. E a meus pais (Ribamar e Maria), meu irmão (Samuel) e minha esposa (Valéria), meu agradecimento por, literalmente, tudo.

Agradeço também ao meu orientador, Prof. Dr. Nilo Consoli, e ao Dr. Sergio Marques, pela troca de ideias ao longo do trabalho e pela orientação conduzida.

Meus agradecimentos também ao Dr. João Paulo Silva, que vem conduzindo um trabalho de ponta no CDM/Vale e que me auxiliou bastante na interpretação de ensaios com rejeitos. Entendo que na Companhia ele é a principal referência no assunto.

Agradeço ainda aos meus amigos Eng. Wesley Albert e Dr. José Allan Maia, meus parceiros desde que entrei na Vale e que não mediram esforços para me apoiar nas modelagens numéricas.

Por fim, meus agradecimentos à toda a turma da Especialização em Geotecnia Avançada do ITV, pelo grande companheirismo ao longo do curso, todos excelentes profissionais em suas áreas de atuação. Desejo a todos muito sucesso, tanto na Vale quanto na carreira em Geotecnia.

## RESUMO

A indústria de mineração tem buscado, na última década, novas alternativas à disposição de rejeito, especialmente diante dos recentes casos de ruptura de barragens de rejeito. Uma das estruturas mais visadas são os empilhamentos de rejeitos filtrados, nos quais os materiais são gerados com teor de umidade próximo aos valores ótimos de compactação. Entretanto, devido às consideráveis taxas de produção diárias, há a demanda por estruturas de disposição de grande porte, que podem atingir alturas superiores a 100 m, condição que pode gerar grandes tensões no corpo da pilha, impactando o comportamento geomecânico da estrutura. Neste trabalho foram analisados ensaios triaxiais de compressão CID e CIU realizados na parcela arenosa do rejeito da Mina de Brucutu, localizada no estado de Minas Gerais, Brasil. Foram feitos ensaios nos Graus de Compactação (GC) de 80%, 90%, 95% e 100%, nas tensões confinantes de 80 kPa, 300 kPa, 800 kPa, 1200 kPa e 1600 kPa. Nos resultados foi observada uma expressiva quebra de grãos nos ensaios CID de tensões confinantes de 1200 kPa e 1600 kPa para o GC 100%, influenciando no comportamento desses ensaios no plano  $e - \ln p'$ , com expressiva contração seguida de leve dilatação. Adicionalmente, foram realizadas modelagens numéricas de uma pilha de rejeitos com 340 m de altura, de geometria hipotética, para os GCs de 100% e de 90%; os parâmetros do modelo elastoplástico do rejeito foram calibrados com base nos resultados dos ensaios CID para esses Graus de Compactação. Os resultados das modelagens numéricas mostraram tensões efetivas médias ( $p'$ ) da ordem de 2000 kPa na base da pilha, pouco maiores que as tensões confinantes ensaiadas, e deslocamentos máximos de 2,7 m para o GC 100% e de 4,4 m para o GC 90%. Foi ainda delimitada, para o GC 100% uma “zona de interesse” para quebra de grãos, através da isosuperfície da tensão efetiva média de 1200 kPa. Por fim, verificou-se a influência da geometria da pilha na distribuição das tensões, a qual é pouco afetada Grau de Compactação, que por sua vez tem maior impacto nas magnitudes. Com o presente estudo nota-se a importância da execução de análises tensão-deformação de empilhamentos antes da solicitação de ensaios, visto que é possível estimar os níveis de tensões máximas na estrutura, as quais precisam ser ensaiadas em laboratório.

**Palavras-chave:** Rejeitos. Empilhamento. Tensões elevadas. Tensão-Deformação. Modelagem Numérica.

**Fase da Cadeia:** Mina; Usina

## ABSTRACT

The mining industry has been searching, in the last decade, for new alternatives of tailings disposal, principally due to the recent episodes of tailings dam breaks. And the dry stacking of filtered tailings is one of the main alternatives, where the materials are stacked with moisture contents near to the optimal value for compaction. However, due to the high daily production of tailings, there is a demand for massive stacking structures, some of them 100 m high or superior, leading to a condition with high stresses in these structures, impacting its geomechanical behaviour. In this project were analysed CID and CIU triaxial compression tests made with sandy tailings from Brucutu Mine, located in the state of Minas Gerais, Brazil. The tests were made at samples with compaction degrees (GC) of 80%, 90%, 95% and 100%, considering the confinement stresses of 80 kPa, 300 kPa, 800 kPa, 1200 kPa and 1600 kPa. As a result, an expressive grain breakage was noticed at CID tests of 1200 kPa and 1600 kPa for GC 100%, having a influence on the behaviour of the material at  $e$  vs  $p'$  graph, with large contraction followed by a slight dilation. In addition, 3D stress-strain analyses were made for a hypothetical tailings stack, 340 m high, for the compaction degrees of 100% and 90%. The elastoplastic parameters of the tailings were calibrated based on the results of CID tests for these compaction degrees. As a result, the mean effective stresses ( $p'$ ) at the bottom of the stack were near 2000 kPa, a bit higher than the stresses of the tests; it was also observed maximum displacements of 2,7 m for the GC 100% and 4,4 m for the GC 90%. Furthermore, it was delimited, for the GC 100%, a “zone of interest” for grain breakage, using the isosurface of 1200 kPa. Additionally, it was verified that the geometry of the stack has a relevant influence on the stress distribution; it was also verified that the compaction degree has little influence on the stress distribution, having more impact on the magnitudes. Finally, the present study emphasises the importance of stress-strain analyses before the execution of the laboratory tests, in order to estimate the highest pressures on the stack, which need to be tested at the laboratory.

**Keywords:** Tailings. Dry Stacking. High Stresses. Stress-Strain Analysis. Numerical Modelling.