



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA**

**ANÁLISE NUMÉRICA DE GEOFÔRMAS PARA DESAGUAMENTO DE REJEITOS DE  
MINERAÇÃO**

**DIANA CAROLINA RIVAS ORTEGA**

**ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA**

**CO-ORIENTADOR: ANDRÉ RICARDO FAHEL**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO:**

**BRASÍLIA / DF, JANEIRO DE 2026**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA**

**ANÁLISE NUMÉRICA DE GEOFÔRMAS PARA DESAGUAMENTO DE REJEITOS DE  
MINERAÇÃO**

**DIANA CAROLINA RIVAS ORTEGA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
CIVIL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

**APROVADA POR:**

---

**ENNIO MARQUES PALMEIRA, D.Sc. (UnB)**  
**(ORIENTADOR)**

---

**ANDRÉ RICARDO DA SILVA FAHEL, DSc. (Mosaic)**  
**(COORDINADOR)**

---

**GERMÁN VINUEZA, D.Sc. (UnB)**  
**(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**MICHAEL VARGAS BARRANTES, D.Sc. (Nova Engevix)**  
**(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, JANEIRO DE 2026.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

ORTEGA, DIANA CAROLINA RIVAS.

Análise numérica de geofôrmas para desaguamento de rejeitos de mineração (Distrito Federal) 2026.

xii, - 88p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2026)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- |                         |                                |
|-------------------------|--------------------------------|
| 1. Tubos geotêxteis     | 2. Obras de proteção ambiental |
| 3. Geotêxtil não tecido | 4. Processo de desaguamento    |
| I. ENC/FT/UnB           | II. Mestre                     |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ORTEGA, D.C.R. (2026). Análise numérica de geofôrmas para desaguamento de rejeitos de mineração. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-429/2026 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, xii-88p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: DIANA CAROLINA RIVAS ORTEGA.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Análise numérica de geofôrmas para desaguamento de rejeitos de mineração.

GRAU / ANO: Mestre / 2026

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Diana Carolina Rivas Ortega

SQN 405, Bloco J, apto 307, Asa Norte

CEP 70846-100 – Brasília/DF – Brasil

diana.civil@gmail.com

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha mais profunda gratidão a todas as pessoas que, com generosidade e apoio, tornaram esta jornada acadêmica e pessoal possível.

À minha família, pilar fundamental da minha força. O apoio financeiro e, acima de tudo, o amor, a presença constante e o carinho à distância foram essenciais em cada passo deste caminho.

Ao Brasil, país que me acolheu com generosidade, me apresentou sua cultura e me proporcionou a oportunidade de estudar e crescer. Levo comigo não apenas o aprendizado acadêmico, mas também as experiências humanas construídas ao longo desta trajetória.

À Universidade de Brasília (UnB) e ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, pelo ambiente acadêmico e pelas condições que viabilizaram o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos professores e amigos que me inspiraram: ao Professor Hernán Martínez, pela motivação e pelo impulso que me levaram para fora da minha zona de conforto; sua confiança no meu potencial foi decisiva para que eu iniciasse esta jornada. Também ao Carlos Suescún, meu amigo e colega, pelo incentivo e por ter sido quem me impulsionou a tomar a decisão de vir estudar no Brasil.

Aos amigos que se tornaram família em Brasília: à Milena, que me acolheu com generosidade e cuja amizade tornou a minha integração neste novo país mais fácil. Ao Carlos, por sua amizade constante e bom humor, que tornaram meus dias mais agradáveis. À Kathe, por suas palavras de encorajamento e por estar ao meu lado nos momentos mais difíceis. Ao Mario, por sua paciência, gentileza e companheirismo. Ao Esteban, amigo e doutorando, pelos conselhos, pela escuta e pelo apoio ao longo desta trajetória. A amizade de vocês foi um refúgio precioso nesta caminhada. Aos meus amigos de turma (Kelisson, Kassio, Arthur e Gabriel), por estarem sempre dispostos a ajudar, por cada explicação e pelo tempo e conhecimento que compartilharam.

Ao meu orientador, o Professor Ennio Marques Palmeira, pela paciência, dedicação e compreensão. Sua escuta atenta e generosidade fizeram toda a diferença, especialmente ao me guiar pelos desafios de me expressar em uma língua que não é a minha. Ao meu coorientador, o Dr. André Fahel, pelas contribuições técnicas e pela orientação em cada etapa da pesquisa. Ao Professor Juan Félix, pelo apoio decisivo no desenvolvimento do modelo numérico no PLAXIS e pelas discussões técnicas que fortaleceram esta dissertação.

À empresa Terratek, em especial ao Professor Dr. Alberto Ortigão, pelo apoio, pela disponibilização de dados e pela confiança depositada neste trabalho, que possibilitaram a integração entre os resultados de campo e a modelagem numérica desenvolvida nesta pesquisa.

A cada pessoa que, de perto ou de longe, esteve presente nesta caminhada: esta dissertação também é de vocês.

Por fim, agradeço à CAPES e ao Governo do Brasil pelo apoio financeiro que tornou esta experiência uma realidade.

"Você ganha força, coragem e confiança a cada experiência em que encara o medo de frente. Você deve fazer a coisa que acha que não consegue fazer."  
(Eleanor Roosevelt)

## RESUMO

O uso de geofôrmas confeccionadas com geotêxteis tem se expandido significativamente nas últimas décadas, especialmente em aplicações de contenção e desaguamento de rejeitos de mineração, por representarem uma alternativa técnica de rápida implantação, baixo custo e reduzido impacto ambiental. Esses sistemas favorecem a recuperação de áreas afetadas e a reutilização da água, aspectos relevantes em um contexto de sustentabilidade e segurança de barragens.

Este estudo avalia o comportamento geomecânico de uma geofôrma em geotêxtil não tecido empregada no desaguamento de rejeitos de mineração, por meio de modelagem numérica bidimensional (plane strain) no software Plaxis 2D, utilizando o modelo constitutivo Soft Soil. O modelo numérico reproduz a geofôrma preenchida até a altura de 1,8 m, seguida da imposição de condições hidráulicas transientes destinadas a gerar excesso de poropressão no rejeito. A sequência de simulação incluiu fases de consolidação nas quais o modelo foi executado até que a sobrepressão intersticial atingisse valores inferiores a  $1 \text{ kN/m}^2$ , registrando-se o tempo necessário para essa dissipação.

Os resultados evidenciaram redução exponencial da sobrepressão intersticial, da ordem de  $18 \text{ kN/m}^2$  para valores menores que  $1 \text{ kN/m}^2$  em poucos dias, indicando drenagem eficaz pelo sistema geofôrma - rejeito. O assentamento decorrente do adensamento alcançou aproximadamente  $12,6 \text{ mm}$ , correspondente a  $0,7\%$  da altura máxima, concentrando-se nas primeiras horas após o enchimento e desacelerando à medida que a poropressão foi dissipada.

Adicionalmente, foi realizada análise paramétrica considerando variações da permeabilidade e da rigidez do rejeito, bem como do módulo de tração do geotêxtil, verificando-se que a permeabilidade constitui o parâmetro mais sensível no controle do tempo de dissipação da poropressão.

Conclui-se que as geofôrmas em geotêxtil representam uma alternativa técnica viável e ambientalmente sustentável para o desaguamento e confinamento de rejeitos, oferecendo subsídios práticos para o dimensionamento, instrumentação e operação segura dessas estruturas.

## **ABSTRACT**

The use of geomattresses made of geotextiles has expanded significantly in recent decades, especially in applications for the containment and dewatering of mining tailings, as they represent a technically efficient, rapidly deployable, low-cost, and environmentally sustainable alternative. These systems also contribute to the recovery of impacted areas and to water reuse, which are key aspects in the current context of sustainability and dam safety.

This study evaluates the geomechanical behavior of a nonwoven geotextile geomattress used for tailings dewatering through two-dimensional plane-strain finite-element modeling in Plaxis 2D, employing the Soft Soil constitutive model. The numerical model reproduces a geomattress filled to 1.8 m in height, followed by the imposition of transient hydraulic conditions that generate excess pore pressure in the tailings. Consolidation stages were simulated until the excess pore pressure decreased to values below 1 kN/m<sup>2</sup>, and the time required for this dissipation was recorded.

The results showed an exponential reduction in excess pore pressure, from about 18 kN/m<sup>2</sup> to values below 1 kN/m<sup>2</sup> within a few days, indicating efficient drainage through the geomattress - tailings system. The settlement resulting from consolidation reached approximately 12.6 mm, corresponding to 0.7% of the maximum height, with most deformation occurring in the first hours after filling and slowing down as pore pressure dissipated.

Additionally, a parametric analysis was carried out considering variations in tailings permeability and stiffness, as well as in the tensile modulus of the geotextile, showing that permeability is the most sensitive parameter controlling porepressure dissipation time.

It is concluded that geomattresses represent a technically viable and environmentally sustainable solution for tailings dewatering and confinement, providing practical guidance for the design, instrumentation, and safe operation of these structures.

# SUMÁRIO

---

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Objetivos</b>	<b>2</b>
1.1.1 Objetivo geral	2
1.1.2 Objetivos específicos	2
<b>1.2 Justificativa</b>	<b>3</b>
<b>1.3 Estrutura da dissertação</b>	<b>4</b>
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>6</b>
<b>2.1 Geossintéticos: tipos, propriedades físicas, hidráulicas e mecânicas</b>	<b>6</b>
<b>2.2 Geofôrmas e tubos geotêxteis: princípios de funcionamento, aplicações e limites de uso</b>	<b>7</b>
2.2.1 Uso de sistemas de confinamento com geotêxteis	8
2.2.2 Geofôrmas em geotêxtil	10
<b>2.3 Características dos rejeitos relevantes ao desaguamento</b>	<b>11</b>
<b>2.4 Sistemas de disposição de rejeitos</b>	<b>13</b>
<b>2.5 Princípios de filtração e desaguamento em tubos geotêxteis</b>	<b>15</b>
<b>2.6 Solicitações mecânicas e deformações</b>	<b>17</b>
2.6.1 Forma dos tubos geotêxteis	18
<b>2.7 Esforços mobilizados nos tubos geotêxteis</b>	<b>20</b>
<b>2.8 Avaliação dos métodos analíticos</b>	<b>23</b>
2.8.1 Estados limites de projeto	25
<b>3 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DO SISTEMA DE GEOFÔRMAS EM GEOTÊXTIL IMPLEMENTADO NA UHE RISOLETA NEVES (CANDONGA)</b>	<b>29</b>
<b>3.1 Contexto e objetivos do projeto</b>	<b>29</b>
<b>3.2 Localização e condições do local de implantação das geofôrmas</b>	<b>30</b>
<b>3.3 Configuração e geometria da geofôrma em geotêxtil</b>	<b>31</b>
<b>3.4 Instrumentação e ensaio de campo da geofôrma experimental</b>	<b>33</b>
<b>3.5 Ensaios de laboratório e propriedades dos materiais</b>	<b>34</b>
3.5.1 Rejeito de mineração	34
3.5.2 Geotêxtil não tecido (geofôrma)	35
<b>4 MODELAGEM NUMÉRICA</b>	<b>36</b>
<b>4.1 Considerações gerais sobre modelagem numérica</b>	<b>36</b>

4.1.1	Revisão da importância da modelagem em geotecnia.	38
4.1.2	Uso de softwares de elementos finitos na simulação de geofôrmas e tubos geotêxteis: aplicações, vantagens e limitações	39
<b>4.2</b>	<b>Geometria do modelo</b>	<b>41</b>
4.2.1	Configuração adotada para a geofôrma (dimensões, altura de enchimento).	42
4.2.2	Definição do domínio numérico e condições de contorno	43
4.2.3	Malha numérica e critérios de refinamento.	44
4.2.4	Representação numérica da geofôrma	46
<b>4.3</b>	<b>Caracterização do material de enchimento</b>	<b>47</b>
<b>4.4</b>	<b>Condições hidráulicas e de drenagem</b>	<b>49</b>
<b>4.5</b>	<b>Fases de simulação</b>	<b>51</b>
4.5.1	Fase inicial	52
4.5.2	Desenvolvimento das poropressões	53
4.5.3	Etapa de consolidação	54
<b>4.6</b>	<b>Crítérios de análise e saídas do modelo</b>	<b>55</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>60</b>
<b>5.1</b>	<b>Considerações iniciais</b>	<b>60</b>
<b>5.2</b>	<b>Poropressões</b>	<b>61</b>
<b>5.3</b>	<b>Deslocamentos verticais da geofôrma</b>	<b>64</b>
5.3.1	Leituras dos extensômetros acústicos	65
5.3.2	Comparação entre deformações no geotêxtil: modelo numérico versus campo	65
<b>5.4</b>	<b>Deslocamento horizontal na geofôrma</b>	<b>66</b>
<b>5.5</b>	<b>Análise integrada dos resultados</b>	<b>68</b>
<b>5.6</b>	<b>Considerações finais do capítulo</b>	<b>70</b>
<b>6</b>	<b>ANÁLISES PARAMÉTRICAS</b>	<b>72</b>
<b>6.1</b>	<b>Considerações iniciais</b>	<b>72</b>
<b>6.2</b>	<b>Variação da permeabilidade</b>	<b>73</b>
6.2.1	Crítérios adotados para as simulações	73
6.2.2	Resultados de $\Delta u(t)$	74
6.2.3	Resultados dos deslocamentos verticais.	76
6.2.4	Discussão crítica.	78
<b>6.3</b>	<b>Variação do parâmetro <math>\lambda^*</math></b>	<b>80</b>
6.3.1	Crítérios adotados para as simulações.	80
6.3.2	Resultados em termos de dissipação de $\Delta u(t)$ .	81
6.3.3	Resultados em termos de deslocamentos verticais de recalques.	82
6.3.4	Discussão crítica.	84
<b>6.4</b>	<b>Síntese das análises paramétricas</b>	<b>85</b>

<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	<b>88</b>
7.1	Considerações gerais	88
7.2	Principais conclusões	88
7.3	Recomendações para pesquisas futuras	90
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>91</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema de alimentação e bocais de enchimento de um tubo geotêxtil	9
Figura 2.2 - Fases do processo de desidratação de tubos geotêxteis	9
Figura 2.3 - Vista geral do projeto implementado em Kalimantan do Sul, Indonésia	13
Figura 2.4 - Tubos geotêxteis para desaguamento de efluente em Rio das Ostras	14
Figura 2.5 - Esquema ilustrativo dos mecanismos de desaguamento em um tubo geotêxtil: (a) variação do teor de umidade no tubo geotêxtil; (b) distribuição das partículas no tubo geotêxtil	15
Figura 2.6 - Configurações transversais típicas de tubos geotêxteis: falsa elipse, elipse perfeita e seção circular (modificado - Pilarczyk, 2000)	18
Figura 2.7 - Parâmetros geométricos típicos utilizados na caracterização de tubos geotêxteis	19
Figura 2.8 - Distribuição da tensão circunferencial em tubos geotêxteis	20
Figura 2.9 - Distribuição da tensão circunferencial nos tubos geotêxteis	21
Figura 2.10 - Máxima tensão axial no tubo geotêxtil	22
Figura 2.11 - Esquema da distribuição de tensões em um tubo geotêxtil:	24
Figura 2.12 - Modos de falha externos em tubos geotêxteis: escorregamento, rolamento	26
Figura 2.13 - Modos de falha internos em tubos geotêxteis	26
Figura 2.14 - Medidas de controle	27
Figura 4.1 - Condições de contorno aplicadas à geofôrma	44
Figura 4.2 - Malha adotada com 120.145 nós	45
Figura 4.3 - Deformação vertical no ponto A em função do número de nós	46
Figura 4.4 - Resistência a tração vs. deformação	47
Figura 4.5 - Geofôrma preenchida até 1,80 m com rejeito saturado e linha freática no topo.	53
Figura 4.6 - Distribuição inicial de poropressões ( $\Delta u$ ) no interior da geofôrma	54
Figura 4.7 - Estado final da geofôrma ao término da consolidação: dissipação das poropressões até valores residuais.	55
Figura 4.8. Localização da instrumentação em planta na geofôrma de teste	57
Figura 5.1 - Dissipação de poropressão	61
Figura 5.2 - Leituras de poropressões registradas pelos piezômetros acústicos	62
Figura 5.3. Evolução do excesso de poropressão - leituras de campo e resultado do modelo numérico	63
Figura 5.4 - Deslocamentos verticais obtidos no modelo numérico	64
Figura 5.5 - Leituras de extensômetros acústicos no ensaio de campo	65
Figura 5.6. Comparação do deslocamento vertical ao longo do tempo	66
Figura 5.7. Evolução do deslocamento horizontal $u_x$ ao longo do tempo no modelo numérico.	67
Figura 5.8 - Contornos de deslocamento horizontal $u_x$ ao final da etapa de consolidação	67
Figura 6.1. Dissipação da poropressão para diferentes valores de permeabilidade vertical ( $K_y$ )	74
Figura 6.2. Evolução dos deslocamentos verticais ( $U_y$ ) no coroamento da geofôrma	76
Figura 6.3. Dissipação da poropressão ( $\Delta u$ ) para diferentes valores do parâmetro $\lambda^*$ no ponto A da geofôrma.	81

## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 2.1 - Relação aproximada dos parâmetros de engenharia e geométricos dos tubos geotêxteis (modificado – Lawson, 2008) _____	19
Tabela 2.2 - Vantagens e limitações dos métodos analíticos _____	24
Tabela 4.1 - Parâmetros geomecânicos do rejeito com sedimentos aluvionares _____	48
Tabela 4.2 - Tabela resumo com os parâmetros utilizados nas análises numéricas. _____	57
Tabela 6.1 - Variação de $t_{50}$ e $t_{90}$ em função da permeabilidade vertical ( $K_y$ ). _____	75
Tabela 6.2 - Deslocamento vertical no coroamento ao final do período analisado em função de ( $K_y$ ). _____	77
Tabela 6.3 - Influência comparativa de $K_y$ e $\lambda^*$ na resposta da geofôrma _____	86

# LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

## Abreviaturas e siglas

ANM	Agência Nacional de Mineração
CU	Ensaio triaxial adensado não drenado com medição de poropressão
EA	Rigidez axial do geotêxtil (força por unidade de largura)
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
OCR	Overconsolidation Ratio (razão de sobre-adensamento)
SPT	Standard Penetration Test (ensaio de penetração padrão)
UHE	Usina Hidrelétrica
MEF	Método dos Elementos Finitos
NCL	Normal Consolidation Line (linha de compressão virgem)
URL	Unloading-Reloading Line (linha de descarregamento-recarregamento)
VST	Vane Shear Test (ensaio de palheta)

## Símbolos

A	Área da seção transversal da geofôrma ( $m^2$ )
B	Base de contato da geofôrma (m)
$c'$	Coesão efetiva ( $kN/m^2$ )
$c_v$	Coefficiente de adensamento ( $m^2/s$ ou $m^2/dia$ )
D	Diâmetro teórico associado ao perímetro da seção (m)
$\Delta_u$	Excesso de pressão neutra ( $kN/m^2$ )
$EA_1$	Rigidez axial característica do geotêxtil ( $kN/m$ )
$\gamma$	Peso específico do solo ou rejeito ( $kN/m^3$ )
$G_s$	Gravidade específica dos sólidos
H	Altura de enchimento da geofôrma (m)
$K_x$	Permeabilidade horizontal (m/dia)
$K_y$	Permeabilidade vertical (m/dia)
$\lambda^*$	Índice de compressibilidade virgem (Soft Soil)
$\kappa^*$	Índice de recompressão (Soft Soil)
L	Comprimento da geofôrma (m)
$m_v$	Coefficiente de compressibilidade volumétrica ( $m^2/kN$ )
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\phi'$	Ângulo de atrito efetivo ( $^\circ$ )
$\psi$	Ângulo de dilatação ( $^\circ$ )
S	Perímetro da seção transversal da geofôrma (m)
$\sigma'_v$	Tensão vertical efetiva ( $kN/m^2$ )
$t_{50}$	Tempo característico de dissipação de 50% da poropressão
$t_{90}$	Tempo característico de dissipação de 90% da poropressão
W	Largura da geofôrma (m)

# 1. INTRODUÇÃO

A mineração desempenhou papel central no desenvolvimento econômico e territorial do Brasil desde o período colonial, quando a exploração de jazidas alterou profundamente a sua ocupação e a economia. Com o aumento da escala e da complexidade das operações, a gestão dos rejeitos gerados pelo beneficiamento a úmido tornou-se um desafio técnico e ambiental de primeira ordem, exigindo práticas de confinamento e drenagem cada vez mais seguras e controladas (Azam e Li, 2010).

Historicamente, o método de alteamento com os próprios rejeitos foi adotado por sua eficiência econômica, mas mostrou-se vulnerável a falhas catastróficas. Os rompimentos das barragens de Fundão (Mariana, 2015) e de Córrego do Feijão (Brumadinho, 2019) evidenciaram as consequências humanas, ambientais e socioeconômicas dessas falhas e motivaram revisões regulatórias e operacionais no país (IBAMA, 2019). Em resposta, a Agência Nacional de Mineração implementou regras mais estritas, incluindo a proibição do alteamento a montante e exigências reforçadas de monitoramento e auditoria técnica (ANM, 2019).

Nesse contexto, cresce o interesse pelo uso de geossintéticos em soluções de contenção e manejo de rejeitos. Em especial, os tubos geotêxteis ou geofôrmas têm sido empregados em diferentes países para o desaguamento de sedimentos dragados, lodos industriais e rejeitos de mineração (Lawson, 2008; Fowmes *et al.*, 2008). Esses dispositivos funcionam a partir do enchimento com polpa de rejeito e subsequente drenagem da água através do geotêxtil, que retém as partículas sólidas. Como resultado, ocorre a redução de volume, o aumento da resistência do material e a possibilidade de reaproveitamento da água drenada (Koerner, 2012).

O desempenho de geofôrmas depende da interação entre propriedades do geotêxtil, características granulométricas e hidráulicas do rejeito, procedimento de enchimento e condições de drenagem. Compreender esses mecanismos é essencial para dimensionar de modo seguro estruturas que eventualmente serão empilhadas ou submetidas a carregamentos operacionais, além de prever a evolução temporal de pressões intersticiais e recalques.

Estudos experimentais e numéricos têm contribuído para compreender o desempenho desses sistemas, incluindo a eficiência de desaguamento, a formação do rejeito filtrado na superfície do geotêxtil e os mecanismos de adensamento do rejeito confinado (Guo *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2023; Sheng *et al.*, 2024). O avanço da modelagem numérica com softwares de elementos finitos, como o PLAXIS 2D, permite representar o acoplamento hidromecânico entre o rejeito e a geofôrma, fornecendo estimativas realistas de dissipação de poropressões, recalques e evolução de deformações (Plaxis B.V., 2021).

Com base nesse quadro, o presente trabalho propõe uma abordagem integrada, combinando modelagem numérica e dados de campo fornecidos pela empresa Terratek, para avaliar o comportamento geomecânico de geofôrmas aplicadas ao desaguamento de rejeitos. O objetivo é quantificar a eficiência de drenagem, a dissipação de poropressão e os recalques associados, fornecendo subsídios técnicos para uso prático e normas de projeto que priorizem segurança e sustentabilidade.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo geral

Avaliar, por meio de modelagem numérica no PLAXIS 2D, o comportamento geomecânico de uma geofôrma em geotêxtil não tecido empregada no desaguamento de rejeitos, utilizando os dados fornecidos pela empresa Terratek (projeto Candonga).

### 1.1.2 Objetivos específicos

1. Avaliar a aplicabilidade e a acurácia da ferramenta computacional empregada nas análises, por meio da comparação com os resultados obtidos em campo.
2. Avaliar a evolução temporal das poropressões e dos deslocamentos verticais no processo de consolidação do rejeito.
3. Conduzir análise de sensibilidade em relação à malha, permeabilidade e rigidez axial do geotêxtil (EA) para quantificar incertezas.
4. Apresentar recomendações operacionais e de instrumentação com base na comparação entre simulação e resultados de instrumentação.

## 1.2 Justificativa

A gestão segura e eficiente dos rejeitos constitui um dos maiores desafios da mineração moderna, sobretudo em países com grande produção mineral como o Brasil. Falhas em estruturas de rejeitos demonstram que os mecanismos de colapso são múltiplos, envolvendo aspectos geotécnicos, hidráulicos e operacionais, e que os impactos socioambientais podem ser catastróficos (Azam e Li, 2010). No contexto nacional, os rompimentos de Mariana (2015) e Brumadinho (2019) evidenciaram consequências humanas e ambientais profundas e motivaram revisões regulatórias e de fiscalização, bem como a produção de relatórios técnicos que sintetizam lições aprendidas e exigem maior rigor em projeto e monitoramento (IBAMA, 2019; ANM, 2019).

Nesse cenário de exigência crescente por segurança e sustentabilidade, as geofôrmas e os tubos geotêxteis surgem como alternativas técnicas promissoras para o confinamento e o desaguamento de rejeitos, pois possibilitam a separação física entre sólidos e líquidos e a recuperação de água por filtração através do geotêxtil, reduzindo o teor de umidade e o volume final do resíduo (Koerner, 2012). Estudos experimentais e numéricos recentes têm aprofundado o entendimento desses processos, investigando a formação do rejeito filtrado e a eficiência de desidratação em geotubos, o que contribui para a definição de parâmetros de projeto e operação mais robustos (Li *et al.*, 2023; Sheng *et al.*, 2024).

Do ponto de vista prático e econômico, essa tecnologia é especialmente adequada a operações de pequeno e médio porte, nas quais os custos de implantação e manutenção de grandes barragens são frequentemente proibitivos. No entanto, a adoção em escala mais ampla depende de uma base técnico-científica consolidada, que integre medições de campo, ensaios e modelagem numérica. Ferramentas de elementos finitos, como o Plaxis 2D, permitem simular o acoplamento hidráulico-mecânico do sistema geofôrma-rejeito, estimando a dissipação de pressões intersticiais, a evolução de recalques e os tempos de adensamento, informações fundamentais para critérios de projeto e monitoramento (Plaxis B.V., 2021).

Diante disso, a presente pesquisa justifica-se pela necessidade de produzir conhecimento aplicável e verificável sobre a eficiência hidráulica e o comportamento geomecânico de geofôrmas. Ao combinar modelagem numérica com os dados obtidos por instrumentação de campo, este trabalho

pretende gerar subsídios técnicos para a adoção segura e sustentável de geofôrmas em projetos de desaguamento de rejeitos.

### 1.3 Estrutura da dissertação

Além deste Capítulo 1 (Introdução), a dissertação encontra-se organizada em sete capítulos subsequentes (Capítulos 2 a 8), descritos a seguir.

O Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura, consolidando os fundamentos necessários para a compreensão do tema. São discutidos os diferentes tipos de geossintéticos e suas propriedades físicas, hidráulicas e mecânicas, com destaque para o papel das geofôrmas e dos tubos geotêxteis no desaguamento de rejeitos. Este capítulo aborda ainda as características geotécnicas dos rejeitos finos de mineração, os mecanismos de filtração e a formação do material filtrado, bem como os processos de adensamento e as solicitações mecânicas que governam a resposta dessas estruturas.

O Capítulo 3 apresenta o estudo de caso e a base de dados utilizada como referência do comportamento em campo, incluindo a síntese do arranjo executivo, o contexto de instrumentação e os principais parâmetros/insumos adotados para orientar as análises e comparações do trabalho.

O Capítulo 4 é dedicado à modelagem numérica. São apresentados os princípios que orientam o uso de métodos numéricos na engenharia geotécnica e a aplicação do PLAXIS 2D na simulação de geofôrmas, incluindo geometria, domínio numérico, condições de contorno, malha, representação do geotêxtil e do rejeito, condições hidráulicas de drenagem e fases de simulação.

O Capítulo 5 reúne os resultados obtidos no modelo base e a respectiva discussão. São analisadas a evolução das poropressões, os deslocamentos/recalques da geofôrma e, em seguida, realizada uma análise integrada dos resultados, relacionando o desempenho numérico aos registros de campo para verificar a consistência do modelo.

O Capítulo 6 trata das análises paramétricas, avaliando a sensibilidade do modelo frente às variações da permeabilidade e do parâmetro de compressibilidade  $\lambda^*$ . Apresentam-se os critérios adotados e os resultados em termos de dissipação de poropressão e deslocamentos, seguidos de discussão crítica e síntese técnica.

O Capítulo 7 contém as conclusões e recomendações da pesquisa, destacando as principais contribuições, limitações e sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, o Capítulo 8 apresenta as Referências Bibliográficas utilizadas ao longo da dissertação.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

---

### 2.1 Geossintéticos: tipos, propriedades físicas, hidráulicas e mecânicas

Os geossintéticos constituem um conjunto de materiais poliméricos amplamente empregados em engenharia geotécnica, desempenhando funções de separação, filtração, reforço, drenagem e contenção (Koerner, 2012). Entre as famílias mais utilizadas destacam-se os geotêxteis tecidos, não tecidos e trançados, as geogrelhas, as geomembranas e os geocompostos. Para aplicações de desaguamento, os geotêxteis não tecidos são geralmente preferidos devido à combinação de permeabilidade inicial e capacidade de retenção de finos, que favorece a formação controlada do rejeito filtrado (Koerner, 2012; Aydilek e Edil, 2002).

As propriedades físicas de maior interesse para projeto incluem a massa por unidade de área ( $\text{g/m}^2$ ), a espessura nominal e a orientação e entrelaçamento das fibras. Esses parâmetros controlam a acomodação do geotêxtil sobre o terreno, a resistência mecânica, a porosidade e a suscetibilidade à colmatação. A abertura efetiva dos poros e a porosidade definem a capacidade de retenção de partículas e a qualidade do efluente.

Do ponto de vista hidráulico, distinguem-se dois mecanismos relevantes de escoamento: o fluxo perpendicular ao plano do geotêxtil, caracterizado pela permeabilidade normal e pela permissividade; e o fluxo paralelo ao plano, caracterizado pela permeabilidade ao longo do plano e pela transmissividade. Ambos os parâmetros são fundamentais em projetos, sobretudo quando se analisa drenagem superficial ou escoamento lateral em geofôrmas e geocompostos (Aydilek e Edil, 2002; Moo-Young e Tucker, 2002). Quanto ao comportamento mecânico, destacam-se a resistência à tração, a curva tensão–deformação, o alongamento na ruptura e a rigidez à tração por unidade de largura (J).

Na utilização de geofôrmas, a seleção do material deve considerar conjuntamente o desempenho hidráulico e mecânico. Em particular, recomenda-se a caracterização por ensaios padronizados de gramatura, espessura, tração, permissividade e transmissividade, bem como por ensaios de caracterização da estrutura porosa do geotêxtil (por exemplo, AOS/O90 e porometria), que subsidiam a avaliação da retenção de finos e do potencial de colmatação. Embora esses ensaios de porometria não tenham sido realizados no presente estudo, sua relevância é destacada na literatura.

Na ausência de dados completos, análises de sensibilidade sobre permeabilidade e rigidez à tração são indispensáveis para avaliar a robustez das previsões numéricas (Mitchell e Soga, 2005; PLAXIS B.V., 2021).

## 2.2 Geofôrmas e tubos geotêxteis: princípios de funcionamento, aplicações e limites de uso

Geofôrmas e tubos geotêxteis operam como bolsas permeáveis que recebem polpas de rejeito, lodos etc.; a água intersticial escoar através do geotêxtil enquanto as partículas sólidas se acumulam internamente, formando progressivamente uma camada superficial conhecida como rejeito filtrado, a qual passa a controlar a permissividade do conjunto (Koerner, 2012; Li *et al.*, 2023). Esse mecanismo permite a recuperação de água, a redução do teor de umidade e a diminuição do volume final a ser disposto, razão pela qual a técnica é aplicada em dragagens, no tratamento de sedimentos e, mais recentemente, no manejo de rejeitos de mineração (Sheng *et al.*, 2024; Aparicio-Ardila *et al.*, 2020).

As primeiras aplicações consolidaram-se em dragagens e proteção costeira, mas atualmente a técnica desperta interesse crescente na disposição de rejeitos por oferecer vantagens como menor área requerida e custos reduzidos de infraestrutura em comparação aos depósitos convencionais (Newman, 2004; Aparicio-Ardila *et al.*, 2020). Operacionalmente, o desempenho depende da compatibilidade entre as propriedades hidráulicas e mecânicas do geotêxtil e as características da polpa (granulometria, concentração de sólidos e comportamento de adensamento).

Parâmetros críticos para projeto e modelagem incluem a permeabilidade hidráulica efetiva do sistema composto pelo rejeito filtrado e pelo geotêxtil, a granulometria e a concentração de sólidos da polpa, a rigidez à tração do geotêxtil ( $J = EA$ , onde  $E$  é o módulo de Young e  $A$  a área da seção transversal), bem como as condições de confinamento. Em modelagens numéricas com o software PLAXIS, por exemplo, o geotêxtil é usualmente representado por elementos do tipo *Geogrid* (rigidez axial sem resistência à flexão), enquanto o rejeito é modelado por um modelo constitutivo voltado a solos moles saturados, como o *Soft Soil*, capaz de capturar a compressibilidade e a evolução da poropressão durante o adensamento (PLAXIS B.V., 2021; Koerner, 2012).

A evolução do rejeito filtrado altera gradualmente a permeabilidade efetiva do sistema; assim, a condição hidráulica é inerentemente transiente e dependente da história de carregamento. Nos estágios iniciais do enchimento, a taxa de drenagem é elevada, mas, à medida que o rejeito filtrado se consolida, a transmissividade tende a reduzir e estabilizar em níveis que refletem a granulometria e a compactação da camada (Aydilek e Edil, 2002; Moo-Young e Tucker, 2002; Sheng *et al.*, 2024).

Quanto aos limites e riscos, a técnica apresenta eficiência reduzida em rejeitos ultrafinos de alta plasticidade, nos quais o rejeito filtrado pode tornar-se pouco permeável, originando entupimento e retardando a drenagem. A uniformidade do enchimento e o controle operacional também influenciam a resposta hidráulica e geométrica; entre os riscos operacionais destacam-se entupimento localizado, falhas em costuras, degradação química ou por radiação UV e efeitos tridimensionais de borda não capturados em modelos 2D (Moo-Young e Tucker, 2002; Cantré, 2002). Por essas razões, a adoção da solução requer especificação criteriosa dos materiais, procedimentos operacionais padronizados incluindo a definição do teor ou concentração de sólidos da polpa e a eventual necessidade de condicionamento químico com polímeros floculantes e planejamento de ensaios preliminares que subsidiem o projeto.

### 2.2.1 Uso de sistemas de confinamento com geotêxteis

Os tubos geotêxteis são estruturas permeáveis projetadas para receber polpas e permitir a saída do fluido intersticial ao longo de toda a sua área permeável, enquanto as partículas sólidas permanecem confinadas, acumulando-se internamente (Cantré, 2002; Moo-Young e Tucker, 2002).

O arranjo dos bocais de enchimento e da tubulação de alimentação exerce papel fundamental, pois controla localmente as velocidades de entrada da polpa e, conseqüentemente, a distribuição inicial de sólidos e a taxa de formação do *cake*. A Figura 2.1 ilustra um esquema típico de tubulação e bocais de enchimento, indicando os pontos de alimentação e as direções predominantes de fluxo no interior do tubo. Na prática, esse mecanismo tem duas implicações diretas:

- A utilização de múltiplos bocais e a distribuição adequada da alimentação favorecem a formação mais uniforme do *cake*.

- As regiões próximas às extremidades e aos bocais apresentam gradientes hidráulicos mais elevados, o que resulta em maior heterogeneidade de umidade e rigidez do *cake* ao longo do comprimento do tubo.

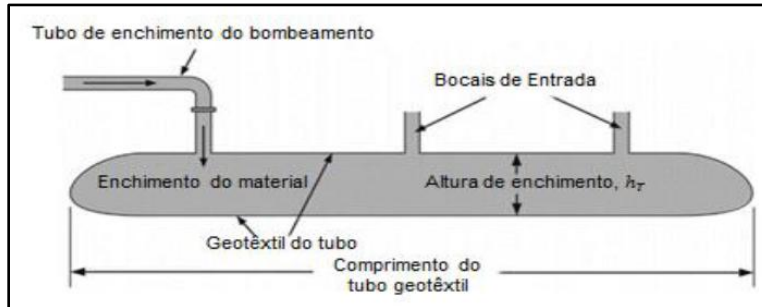


Figura 2.1 - Esquema de alimentação e bocais de enchimento de um tubo geotêxtil (modificado - Lawson, 2006)

O processo temporal de enchimento, desaguamento que inclui o *drawdown* (liberação inicial de água livre) e a drenagem progressivamente controlada pelo *cake* e adensamento pode ser sintetizado pela Figura 2.2, que representa o comportamento típico do volume contido ao longo de ciclos sucessivos de enchimento.

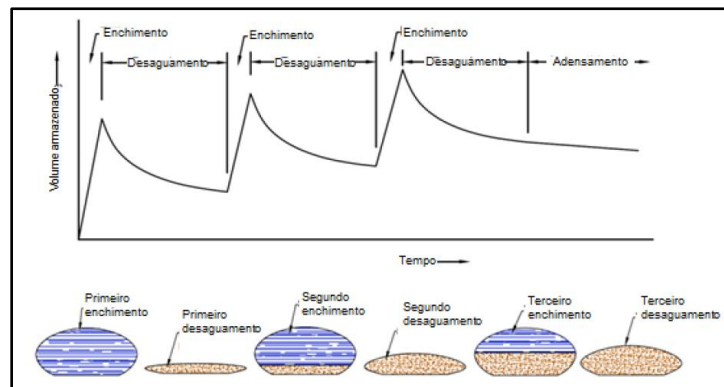


Figura 2.2 - Fases do processo de desidratação de tubos geotêxteis (modificado - Ratnayesuraj *et al.*, 2018)

A disposição de bocais de enchimento ao longo do comprimento da geofôrma, bem como o tipo de geotêxtil e as condições operacionais de bombeamento, afetam a drenagem e o comportamento geométrico do sistema, uma vez que a saída de água pela base pode ser diretamente influenciada pela sedimentação dos sólidos em seu interior, prejudicando a drenagem ao longo do tempo. Os enchimentos cíclicos também são característicos de geotêxteis tecidos empregados na construção

das geofôrmas. Já com geotêxteis não tecidos, em geral mais permissivos, o escoamento tende a ser mais distribuído e as transições entre enchimento e desaguamento são menos nítidas, embora a evolução do *cake* possa igualmente reduzir a eficiência de drenagem. A dimensão da geofôrma e a taxa de alimentação/bombeamento também são fatores determinantes.

Esse comportamento decorre, em parte, do mecanismo de drenagem influenciado pela sedimentação interna dos sólidos, que pode reduzir a eficiência de saída de água pela base, mesmo quando existe carga drenante. Ressalta-se, portanto, que a descrição em “estágios” (enchimento - desaguamento - adensamento) deve ser entendida como uma idealização útil para análise e modelagem, pois, na operação real, especialmente com geotêxteis não tecidos, o processo pode ocorrer de forma mais contínua, com transições menos marcadas entre as fases.

### 2.2.2 Geofôrmas em geotêxtil

Além dos tubos geotêxteis, estruturas tridimensionais conhecidas como geofôrmas vêm sendo utilizadas em larga escala para o confinamento e o desaguamento de rejeitos de mineração. As geofôrmas são formadas por painéis de geotêxtil costurados, geralmente de não tecidos agulhados de alta gramatura, capazes de suportar o carregamento hidráulico durante o enchimento e permitir a drenagem controlada da água através de suas paredes permeáveis (Lawson, 2008; Koerner, 2012).

O enchimento é realizado por bombeamento da polpa para o interior da geofôrma, e a drenagem ocorre pela passagem da água através do geotêxtil, formando-se uma torta de filtração aderida às paredes internas. Esse processo combina filtração e adensamento natural, resultando em redução de volume e aumento de resistência do material contido (Moo-Young *et al.*, 2002; Aydilek e Edil, 2002). O desempenho hidráulico depende da compatibilidade entre o geotêxtil e o rejeito, definida pela relação entre o tamanho efetivo de abertura ( $O_{95}$ ) e a granulometria característica do material ( $D_{85}$  ou  $D_{15}$ ).

Estudos experimentais e de campo comprovam a eficiência dessas estruturas. (Palmeira e Fahel, 2020) descreveram aplicações de geofôrmas em barragens e áreas de disposição de rejeitos, destacando o caso da UHE Risoleta Neves (Candonga), onde ensaios em escala real realizados pela empresa Terratek Engenharia Ltda. (2016) demonstraram bom desempenho hidráulico e estabilidade do sistema. Barrantes (2018) complementou esse estudo, com análises experimentais

e numéricas, confirmando a eficácia das geofôrmas no desaguamento e confinamento de rejeitos arenosos e siltosos.

As geofôrmas apresentam vantagens adicionais em relação aos tubos geotêxteis tecidos, como maior capacidade volumétrica, adaptação geométrica à topografia e execução mais simples, além de reduzido impacto ambiental e possibilidade de reutilização da água drenada. Essas características as tornam uma alternativa compatível com as atuais diretrizes de sustentabilidade e de segurança de barragens, em conformidade com a Resolução ANM nº 13 (2019).

Conclui-se que as geofôrmas em geotêxtil constituem uma solução técnica viável e sustentável para o desaguamento e confinamento de rejeitos de mineração, fornecendo base prática e conceitual para os estudos numéricos desenvolvidos nos capítulos seguintes.

### 2.3 Características dos rejeitos relevantes ao desaguamento

A atividade de mineração gera rejeitos ao longo das etapas de beneficiamento, classificação, moagem, concentração e desaguamento, cujas propriedades físico-químicas e granulométricas variam em função do processo adotado e do tipo de minério (Peres *et al.*, 2002; Carneiro *et al.*, 2023). Esses rejeitos podem apresentar desde materiais arenosos, relativamente drenantes, até polpas finas ricas em silte e argila; em alguns casos, incluem reagentes de flotação ou contaminantes que modificam o comportamento hidráulico e impõem restrições ambientais adicionais (Carneiro *et al.*, 2023).

Do ponto de vista geotécnico e hidráulico, seis grupos de propriedades controlam de forma decisiva a resposta da geofôrma:

1. Granulometria e grau de gradação: Condicionam a porosidade e a permeabilidade intrínseca.
2. Índices de consistência: Indicam sensibilidade hídrica e potencial de compressibilidade (Mitchell e Soga, 2005).
3. Permeabilidade do rejeito e transmissividade dinâmica do conjunto rejeito filtrado + geotêxtil: Expressa por  $k_t$ , evolui durante a formação do *cake* e regula a velocidade de dissipação das poropressões (Aydilek e Edil, 2002; Moo-Young e Tucker, 2002).

4. Parâmetros de compressibilidade e coeficientes de adensamento: Definem magnitudes de recalque e escalas temporais de dissipação, sendo fundamentais para modelos constitutivos como o *Soft Soil* no PLAXIS 2D (PLAXIS B.V., 2021; Mitchell e Soga, 2005).
5. Comportamento reológico da polpa: Tensão de escoamento e viscosidade aparente, que controlam deposição e taxa inicial de desaguamento.
6. Em rejeitos de característica tipicamente argilosa e percentual de sólidos no bombeamento para a geofôrma, muito inferior a 20%, é comum a utilização de flocculantes, melhorando a permeabilidade inicial e otimizando a formação da torta no interior da geofôrma.

Rejeitos dominados por frações finas tendem a formar *cakes* densos e de baixa permeabilidade, reduzindo a eficiência do desaguamento. Já os materiais arenosos drenam mais rapidamente, originando *cakes* rasos. Em consequência, a transmissividade efetiva do sistema é função do tempo: nas primeiras horas após o enchimento, a perda de água é elevada; com a consolidação do *cake*, a permeabilidade do sistema diminui até um patamar dependente da granulometria, do grau de compactação e da presença de aditivos.

Para estimar deformações e tempos de dissipação recomenda-se a realização de ensaios edométricos, a fim de obter curvas de compressibilidade e coeficientes de adensamento, além de ensaios de permeabilidade em amostras representativas. Esses parâmetros subsidiam a definição do modelo constitutivo a se utilizar em análises numéricas.

O uso de flocculantes e as propriedades reológicas da polpa afetam de forma marcante o processo de deposição. Flocculantes adequados promovem agregação de partículas, gerando *cakes* mais permeáveis, acelerando a clarificação do efluente; por outro lado, rejeitos tixotrópicos ou altamente coloidais podem requerer condicionamento químico para alcançar taxas viáveis de filtração (Aparicio-Ardila *et al.*, 2020).

A caracterização mínima recomendada para parametrização numérica e suporte ao projeto inclui: curva granulométrica completa; densidade dos sólidos ( $G_s$ ); limites de Atterberg (LL, PL); teor de sólidos e massas úmida/seca; ensaios edométricos ( $m_v$ ,  $c_v$ ); ensaios de permeabilidade em amostras representativas; e ensaios de filtração. Em casos específicos, devem-se incluir ensaios reológicos e testes com flocculantes. Em suma, o desempenho hidráulico e mecânico de geofôrmas e tubos

geotêxteis depende de caracterizações robustas dos rejeitos e de protocolos operacionais que assegurem alimentação uniforme durante enchimento.

## 2.4 Sistemas de disposição de rejeitos

Os sistemas de disposição de rejeitos têm evoluído em direção a soluções que privilegiam segurança operacional e redução de impactos ambientais. Entre as alternativas viáveis destaca-se o uso de tubos geotêxteis e geofôrmas para desaguamento e confinamento. Os tubos geotêxteis ou geofôrmas são instalados sobre plataformas preparadas e alimentados por bomba; o geotêxtil interno atua como elemento filtrante enquanto a água drenada é conduzida por sistema de base. A exigência de uma preparação de sistema de drenagem na base é necessária apenas nos casos da geofôrma ser em geotêxtil tecido. Cuidado especial deve haver para que não ocorram perfurações durante a operação.

A Figura 2.3 ilustra uma implantação em escala industrial (projeto em Kalimantan, Indonésia), onde se observa a disposição linear dos tubos sobre plataforma drenante e a infraestrutura de alimentação e coleta; essa configuração evidencia a necessidade de projeto da base e de controle de efluentes durante a operação (TenCate Geosynthetics, 2014).



Figura 2.3 - Vista geral do projeto implementado em Kalimantan do Sul, Indonésia (modificado - TenCate Geosynthetics, 2014)

No plano operacional, o processo passa por fases bem definidas: enchimento hidráulico, liberação inicial de água livre e consolidação do material confinado. A Figura 2.4, referente ao projeto experimental em Rio das Ostras (Brasil), mostra a configuração prática de tubulação e o aspecto dos tubos em operação; esse tipo de imagem é útil para avaliar distribuição de bocais, acessibilidade

para instrumentação e possíveis pontos críticos de entupimento ou sobrepressão (Castro *et al.*, 2008; Guimarães e Urashima, 2013).



Figura 2.4 - Tubos geotêxteis para desaguamento de efluente em Rio das Ostras (modificado – Castro, 2008)

Casos documentados indicam que a combinação de polímeros floculantes, controle de taxa de alimentação e configuração de bocais pode permitir tratamento eficiente de uma ampla gama de rejeitos (arenosos a finos). Estudos de campo e em escala piloto demonstraram redução substantiva de sólidos suspensos e de teor hídrico, viabilizando o empilhamento subsequente dos materiais desaguados (Morais *et al.*, 2020; Budhai e Naidoo, 2024). Assim, o dimensionamento técnico deve considerar permissividade do conjunto rejeito filtrado + geotêxtil, granulometria da polpa, concentração de sólidos, rigidez axial do geotêxtil (EA) e procedimentos de alimentação (Pilarczyk, 2000; Aydilek e Edil, 2002).

No que se refere à modelagem e à transferência para escala real, cabe destacar que muitas das análises numéricas publicadas (2D ou 3D) indicam boa concordância com leituras de campo quando o modelo incorpora representações transientes do processo de enchimento e dissipação; variação da transmissividade com a formação do rejeito filtrado; e parâmetros de compressibilidade e permeabilidade representativos (PLAXIS B.V., 2021; Silva *et al.*, 2021).

Por fim, as vantagens operacionais (redução de área ocupada, recuperação de água e possibilidade de reaproveitamento do material desaguado) devem ser balanceadas com as limitações: eficiência reduzida para rejeitos ultrafinos e altamente plásticos, sensibilidade ao procedimento de enchimento e necessidade de controle da durabilidade e resistência do geotêxtil (Moo-Young e Tucker, 2002; Li *et al.*, 2023). Protocolos de especificação do material, procedimentos operacionais

padronizados e plano de instrumentação (Extensômetros para acompanhar o grau de deformação e solicitação na geofôrma durante o enchimento) são condicionantes essenciais para adoção segura em escala industrial.

## 2.5 Princípios de filtração e desaguamento em tubos geotêxteis

O processo de filtração em tubos geotêxteis caracteriza-se pela separação entre a fase líquida e os sólidos suspensos em polpas ou lamas de alta umidade. A Figura 2.5 ilustra de forma esquemática dois aspectos centrais do processo. Na Figura 2.5(a) observa-se a distribuição do teor de umidade ao longo da seção transversal do tubo: o núcleo central conserva maior teor de água (zona mais úmida) e, radialmente, a umidade ( $w$ ) decresce até a zona próxima ao geotêxtil, onde o *cake* tende a apresentar menor  $w$ . Na Figura 2.5(b) é representada a segregação granulométrica: Este tipo de segregação é representativa para as geofôrmas em geotêxteis tecidos, que são comumente estudados, uma vez que o enchimento ocorre por bocais distribuídos ao longo do seu eixo. Nas geofôrmas em geotêxtil não-tecido (especificamente os Eco-Bags) os bocais são nas extremidades e diametralmente opostos, embora apenas um ponto de enchimento seja normalmente utilizado.

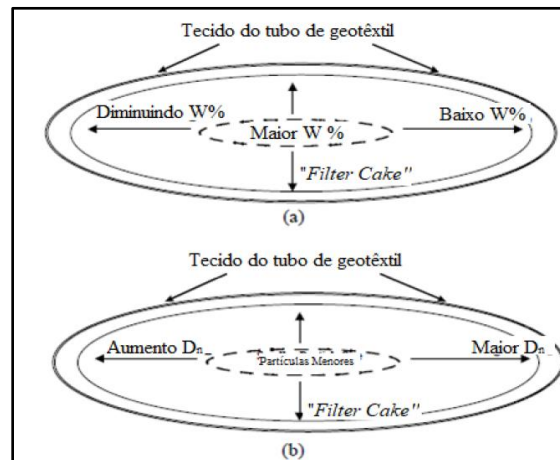


Figura 2.5 - Esquema ilustrativo dos mecanismos de desaguamento em um tubo geotêxtil: (a) variação do teor de umidade no tubo geotêxtil; (b) distribuição das partículas no tubo geotêxtil (modificado - Moo-Young *et al.*, 2002)

Em termos práticos, a Figura 2.5 reforça três recomendações operacionais essenciais:

- Instrumentação distribuída (piezômetros, leituras geométricas e amostragens) para capturar heterogeneidades radiais e longitudinais.

- Realização de ensaios de transmissividade e ensaios de saco (*bag test*) para determinar  $k_t$  inicial e sua evolução.
- Definição de procedimentos operacionais (por exemplo, taxa de alimentação/bombeamento e programação de enchimento) que minimizem heterogeneidades de enchimento e o risco de colmatação; em geofôrmas com geotêxtil tecido, aspectos como o número e a posição de bocais ao longo do comprimento e a adoção de períodos de repouso podem ser especialmente relevantes para controlar a evolução do desaguamento.

A formação do rejeito filtrado resulta de mecanismos complementares, sedimentação e retenção na interface com o geotêxtil, rearranjo e compactação das partículas sob o peso do próprio rejeito; e efeitos reológicos (coalescência e floculação) que alteram a estrutura do *cake*. Na fase inicial do enchimento, a transmissividade é relativamente alta e a perda de água é rápida; à medida que o *cake* se estabelece, a transmissividade decai e a drenagem passa a ser controlada pelo comportamento do *cake* mais do que pelo geotêxtil (Aydilek e Edil, 2002; Aparicio-Ardila *et al.*, 2020). Adicionalmente, a literatura recomenda a caracterização da estrutura porosa do geotêxtil (por exemplo, AOS/O90 e porometria pelo método *bubble point*) como subsídio para avaliar retenção de finos e potencial de colmatação; no presente estudo, tais ensaios não foram realizados

O fenômeno de colmatação refere-se à obstrução dos poros do geotêxtil (ou do próprio *cake*) por acúmulo de finos, precipitação química ou incrustações orgânicas, reduzindo significativamente a capacidade de drenagem e podendo gerar sobrepressões intersticiais prolongadas. Em rejeitos coloidais ou ultrafinos, o risco de colmatação é elevado; estratégias de mitigação incluem testes de compatibilidade geotêxtil–rejeito, condicionamento com floculantes, controle operacional da taxa de alimentação e projeto de redundância de drenagem (Aparicio-Ardila *et al.*, 2020; Moo-Young e Tucker, 2002).

Do ponto de vista de modelagem e projeto, é imprescindível distinguir duas fases operacionais: a fase transiente inicial, dominada pela formação do *cake* e pela rápida liberação de água livre; e a fase de consolidação, onde a dissipação de poropressões e a compressibilidade do material definem os recalques. Para representar adequadamente essas fases em análises numéricas, recomenda-se utilizar modelos constitutivos que capturem compressibilidade e evolução de poropressão (por

exemplo, *Soft Soil* no programa Plaxis) e parametrizar a transmissividade  $k_t$  com base em ensaios de filtração e de transmissividade (Mitchell e Soga, 2005; PLAXIS B.V., 2021).

## 2.6 Solicitações mecânicas e deformações

O comportamento mecânico de tubos geotêxteis e geofôrmas resulta da interação entre as ações aplicadas (peso próprio do rejeito, sobrecargas operacionais e empilhamento), as propriedades do geotêxtil (rigidez à tração, resistência à tração e integridade das costuras), as características do rejeito (compressibilidade, permeabilidade e reologia) e as condições de apoio da fundação. Em regimes transientes, a evolução das pressões intersticiais controla a transferência de carga entre a fase fluida e a fase sólida, influenciando diretamente as deformações e os estados de solicitação no geotêxtil (Mitchell e Soga, 2005; PLAXIS B.V., 2021).

Para análise e projeto, é necessária uma caracterização integrada que contemple: (i) ensaios mecânicos do geotêxtil (tração e ensaios de costura); (ii) ensaios hidráulicos (permissividade, testes de transmissividade e *bag test*); e (iii) ensaios geotécnicos do rejeito (curvas granulométricas, limites de Atterberg, ensaios edométricos e permeabilidade). Esses parâmetros permitem alimentar modelos numéricos representativos.

Do ponto de vista operacional, a uniformidade do enchimento determinada pelo número e pela disposição dos bocais de alimentação, pela taxa de bombeamento e pela eventual adição de floculantes influencia a formação do rejeito filtrado e, conseqüentemente, a transmissividade temporal  $k_t$  do conjunto rejeito filtrado + geotêxtil. Essa evolução hidráulica condiciona o perfil de poropressões e, portanto, os regimes de deformação predominantes nos primeiros dias após o enchimento (Aydilek e Edil, 2002; Moo-Young e Tucker, 2002).

Em síntese, previsões numéricas confiáveis requerem modelagem acoplada ou, quando o acoplamento completo não for viável, análises de sensibilidade em parâmetros-chave ( $k$ ,  $J$ ), sempre complementadas por instrumentação de campo (piezômetros, extensômetros e leituras geométricas) para validação e calibração do modelo. Nesse sentido, o teste piloto em campo, devidamente instrumentado, constitui a principal referência para calibrar a resposta numérica às condições reais (Mitchell e Soga, 2005; PLAXIS B.V., 2021).

### 2.6.1 Forma dos tubos geotêxteis

A forma transversal do tubo é um indicador prático da redistribuição de tensões e do grau de desagramento. Habitualmente reconhecem-se três formas idealizadas: falsa elipse (achatamento na base), elipse perfeita e seção circular, que refletem diferentes equilíbrios entre pressão interna, tração no geotêxtil e reação do apoio (Pilarczyk apud Koerner, 2012). A compreensão dessa evolução geométrica é essencial para estimativas de volume, perímetro de contato e distribuição de esforços.

A Figura 2.6 ilustra essas configurações. A falsa elipse tende a ocorrer quando há suporte de base amplo e drenagem eficiente na zona de contato; a seção circular aparece em enchimentos com elevadas pressões internas e suporte reduzido; a elipse perfeita representa um estado intermediário. Essas diferenças geométricas alteram a relação entre esforços no geotêxtil e a carga transmitida à fundação: perfis mais altos ( $H$  maior) exigem maior resistência à tração e maior rigidez à tração do geotêxtil ( $J$ ), enquanto perfis com maior base de apoio ( $B$ ) tendem a reduzir a demanda no geotêxtil e diminuir a tensão média de contato transmitida à fundação, devido à distribuição da carga em uma área maior (Koerner, 2012).

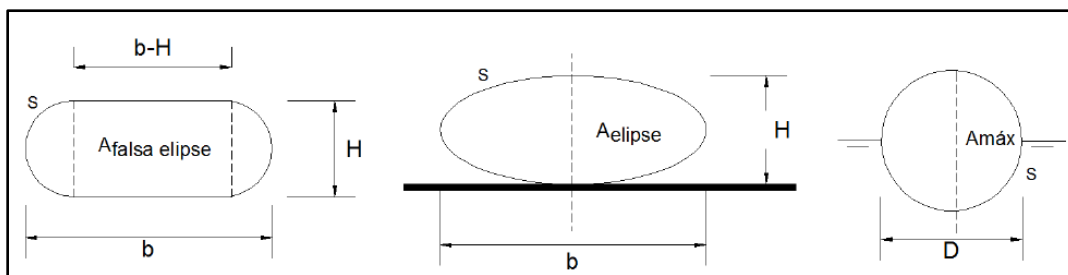


Figura 2.6 - Configurações transversais típicas de tubos geotêxteis: falsa elipse, elipse perfeita e seção circular (modificado - Pilarczyk, 2000)

Os parâmetros geométricos básicos usados para quantificar a forma e para estimativas rápidas de volume e áreas de seção são a altura preenchida ( $H$ ), largura ( $W$ ), comprimento ( $L$ ), dimensão da base de contato com o solo ( $B$ ) e perímetro ( $S$ ), sendo também útil o conceito de diâmetro teórico ( $D$ ) associado ao perímetro. A Figura 2.7 mostra a definição dos parâmetros usados para quantificar a forma de tubos e geofôrmas.

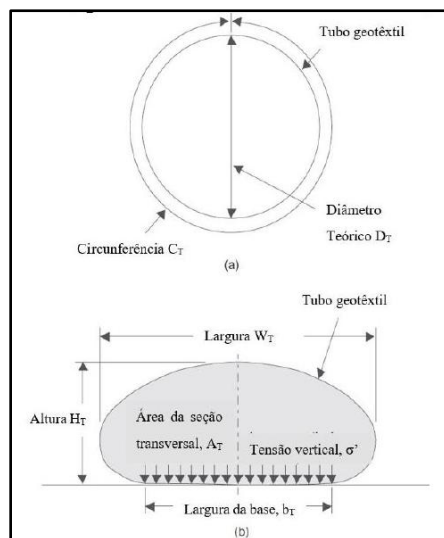


Figura 2.7 - Parâmetros geométricos típicos utilizados na caracterização de tubos geotêxteis (modificado – Lawson, 2008)

A Tabela 2.1 apresenta relações empíricas úteis para estimativas iniciais (Pilarczyk, 2000; Freitas Silva, 2017).

Tabela 2.1 - Relação aproximada dos parâmetros de engenharia e geométricos dos tubos geotêxteis (modificado – Lawson, 2008)

Parâmetros de engenharia	Relação em termos do diâmetro teórico (D)	Relação em termos do perímetro (S)
Altura máxima do tubo preenchido (H)	$H \approx 0,55D$	$H \approx 0,18S$
Largura do tubo preenchido (W)	$W \approx 1,5D$	$W \approx 0,5S$
Base de contato (B)	$B \approx D$	$B \approx 0,3S$
Área da seção transversal (A)	$A \approx 0,6D^2$	$A \approx 0,06S^2$
Tensão vertical média na base ( $\sigma'_v$ )	$\sigma'_v \approx 0,7\gamma D$	$\sigma'_v \approx 0,22\gamma S$

Do ponto de vista mecânico, a forma afeta duas grandezas críticas: a distribuição de esforços no geotêxtil (tração) e a posição e magnitude dos esforços verticais transmitidos à fundação. Tubos com base de contato ampla (maior B em relação a D) transferem maior carga para a fundação, podendo reduzir esforços no geotêxtil, enquanto tubos mais estreitos (maior H e menor B) aumentam os esforços no geotêxtil e nas costuras. Esses efeitos são determinantes na avaliação de

resistência à ruptura por tração e no dimensionamento da rigidez à tração ( $J$ ) do geotêxtil (Koerner, 2012).

## 2.7 Esforços mobilizados nos tubos geotêxteis

Durante o processo de enchimento hidráulico de tubos geotêxteis, desenvolvem-se transformações significativas no estado de tensões atuantes na estrutura. Essas tensões decorrem da pressão interna exercida pelo material de enchimento, da interação entre o tubo e a fundação e da distribuição de curvaturas ao longo da superfície do geotêxtil (Lawson, 2008). A avaliação dessas tensões é fundamental para a segurança global do sistema, para o desempenho estrutural do tubo e para o planejamento de empilhamentos subsequentes.

Três tipos de solicitações podem ser reconhecidos nas estruturas de tubos geotêxteis: os esforços globais de tração circunferencial e axial  $T_c$  e axial  $T_a$ , e uma solicitação local associada ao bocal de enchimento  $T_p$ . O esforço circunferencial atua transversalmente à direção do tubo, estando diretamente relacionado à curvatura da seção transversal. O esforço axial se desenvolve longitudinalmente ao longo do eixo do tubo. Já  $T_p$  corresponde a uma concentração local de esforços e deformações na região de entrada do material bombeado, cuja importância depende da configuração do enchimento e do tipo de geotêxtil, sendo mais frequentemente discutida em geofôrmas de geotêxtil tecido com alimentação por bocais. A Figura 2.8 ilustra as direções de atuação de  $T_c$ ,  $T_a$  e a região associada a  $T_p$  (Lawson, 2008).

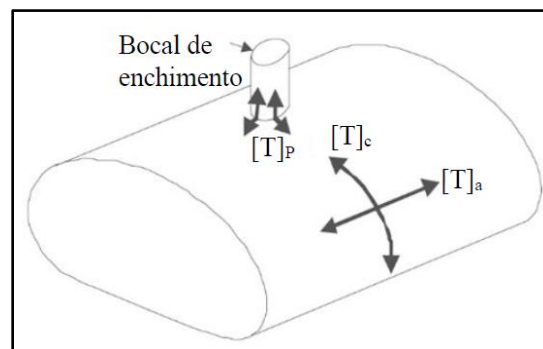


Figura 2.8 - Distribuição da tensão circunferencial em tubos geotêxteis (modificado - Lawson, 2008)

A distribuição do esforço circunferencial ao longo da seção transversal não é uniforme. Estudos teóricos indicam que os maiores valores tendem a ocorrer nas laterais, onde a curvatura do tubo é mais acentuada, enquanto na base (região quase plana em contato com a fundação) o esforço é consideravelmente menor. De forma aproximada, valores típicos sugerem que a base concentra cerca de 10–15% do esforço máximo, enquanto o topo e os flancos podem atingir entre 50–70% do valor máximo (Lawson, 2008). Ressalta-se, entretanto, que em geofôrmas confeccionadas com geotêxtil não tecido a porção superior pode apresentar solicitações significativamente menores, conforme indicado pelas leituras de extensômetros instalados em diferentes orientações no coroamento. Assim, a Figura 2.9 mostra na geofôrma em geotêxtil não-tecido, as solicitações na porção superior são muito menores, conforme instrumentação com extensômetros (perpendicular, a 45 graus e longitudinal).

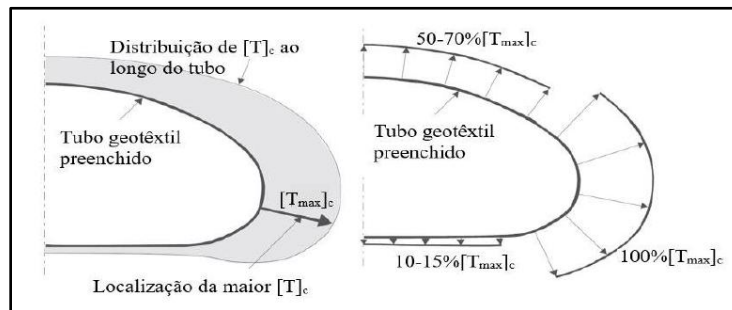


Figura 2.9 - Distribuição da tensão circunferencial nos tubos geotêxteis (modificado - Lawson, 2008)

No caso do esforço axial,  $T_a$ , Palmerton (2002) propôs uma relação simplificada com o esforço circunferencial máximo, frequentemente expressa como:

$$T_a \approx 0,63 T_c$$

Essa formulação tem sido amplamente utilizada em análises preliminares de dimensionamento, uma vez que permite estimar  $T_a$  a partir de  $T_c$ . Embora seja prática, sua aplicação exige cautela, pois pressupõe hipóteses simplificadoras, como estado plano de deformação e ausência de efeitos localizados (Palmerton, 2002; Lawson, 2008). A Figura 2.10 ilustra a proporcionalidade entre  $T_a$  e  $T_c$ , evidenciando a utilidade da simplificação para dimensionamentos conservadores.

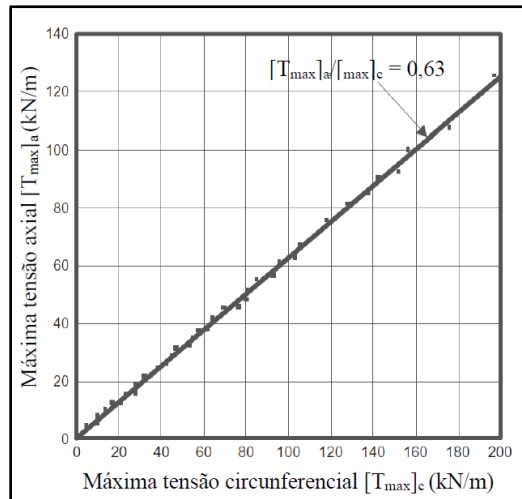


Figura 2.10 - Máxima tensão axial no tubo geotêxtil (modificado - Palmerton, 2002)

A complexidade no cálculo dos esforços é ampliada pela influência de fatores como propriedades reológicas do material de enchimento, permeabilidade do geotêxtil, taxa de enchimento e evolução temporal da geometria do tubo. Métodos analíticos clássicos foram propostos por Liu (1981), Plaut e Suherman (1998), Kazimierowicz (1994) e Guo *et al.* (2014), que empregaram teorias de membrana para representar o comportamento dos tubos. Esses modelos, contudo, assumem simplificações importantes, como a consideração do enchimento como fluido sem resistência ao cisalhamento e a distribuição constante de tensões ao longo do tubo.

Kazimierowicz (1994) destacou três cenários distintos para a geração de esforços, esforços determinados exclusivamente pela pressão de enchimento; esforços influenciados pela pressão de enchimento e pelo peso específico do material; e esforços associados apenas ao peso específico, assumindo enchimento pleno. Cada hipótese conduz a uma configuração geométrica e um estado de tensões próprios, implicando abordagens diferenciadas de cálculo.

Outro aspecto relevante refere-se à localização das costuras na manta de geotêxtil. Quando situadas em regiões de maior solicitação, estas podem constituir pontos críticos de falha, devendo o projeto considerar margens de segurança adicionais. A correta estimativa da distribuição das tensões é, portanto, essencial para a definição de critérios de projeto, bem como para a escolha do geotêxtil em termos de resistência à tração e durabilidade (Lawson, 2008; Kazimierowicz, 1994).

Os resultados obtidos por meio de modelagens numéricas confirmam que os esforços circunferenciais tendem a se concentrar nas porções superiores e laterais do tubo, diminuindo na base. Já os esforços axiais são geralmente menores, porém relevantes, especialmente em situações de enchimento prolongado ou em geometrias alongadas. Estudos de retroanálise baseados em casos reais, como o de Freitas Silva (2017), também indicam que essas distribuições não são simétricas e variam conforme o grau de adensamento e o tempo de operação do sistema.

A correta estimativa dos esforços no geotêxtil é imprescindível para garantir o desempenho estrutural do tubo geotêxtil ao longo de sua vida útil, bem como para evitar falhas prematuras associadas à ruptura do geossintético, ao escoamento de sólidos ou ao colapso por deformação excessiva. O uso combinado de modelos analíticos e simulações numéricas, além de monitoramento em campo, constitui a abordagem mais segura e eficaz para o dimensionamento confiável desses sistemas.

## 2.8 Avaliação dos métodos analíticos

A utilização de métodos analíticos tem sido, historicamente, uma ferramenta inicial para prever o comportamento estrutural de tubos geotêxteis submetidos a enchimento hidráulico para confinamento de rejeitos. Esses métodos permitem descrever, a partir de leis da mecânica e hipóteses simplificadoras, a forma assumida pela seção transversal dos tubos e os esforços resultantes ao longo do geotêxtil. Embora não representem com exatidão a complexidade do comportamento em campo, constituem abordagens de grande valor, pois oferecem estimativas rápidas e confiáveis de parâmetros essenciais, como a altura de enchimento, o raio de curvatura e os esforços máximos atuantes (Plaut; Suherman, 1998; Guo *et al.*, 2014).

De modo geral, os modelos analíticos assumem que o tubo funciona como uma membrana delgada, flexível e impermeável, submetida a pressões internas uniformes. O conteúdo do tubo (normalmente polpa de rejeito com elevada proporção de água) é tratado como um fluido incompressível, com peso específico constante e comportamento hidrostático. A pressão interna é considerada função da profundidade, e a interação entre geotêxtil e fundação é, em grande parte, desconsiderada, assim como os efeitos da rigidez do material, variações na permeabilidade ou deformações plásticas do geossintético (Lawson, 2008). A Figura 2.11 mostra como a geometria

assumida é simplificada para que se deduza o equilíbrio de forças, base para formulação das equações matemáticas pertinentes.

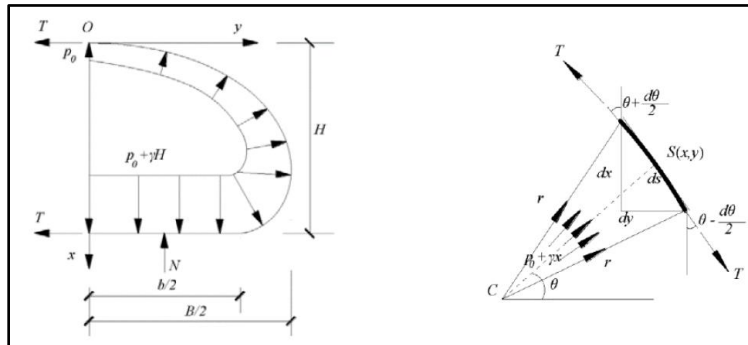


Figura 2.11 - Esquema da distribuição de tensões em um tubo geotêxtil:  
 (a) Diagrama para metade da seção; (b) diagrama para ponto infinitesimal  
 (modificado - Guo *et al.*, 2014)

Com esse conjunto de premissas, podem-se formular expressões diferenciais que descrevem o equilíbrio de forças no contorno do tubo. Essas equações relacionam a forma geométrica assumida (circular, elíptica ou semioval) com a tensão circunferencial necessária para resistir à pressão interna. A solução fornece o perfil da seção transversal e o campo de tensões em regime estacionário, assumindo que, após o enchimento, não ocorrem deformações adicionais significativas.

Esses métodos apresentam vantagens notórias: simplicidade, rapidez e possibilidade de prever valores críticos de esforços de forma preliminar. No entanto, também possuem limitações importantes, sobretudo relacionadas ao fato de não considerarem efeitos de adensamento ao longo do tempo, variações reológicas do rejeito, interação com a fundação ou deformações progressivas do geotêxtil (Lara, 2019).

A Tabela 2.2 sintetiza as potencialidades e restrições desses métodos, destacando seu papel como ferramenta preliminar de projeto e as lacunas que justificam a aplicação de métodos numéricos.

Tabela 2.2 - Vantagens e limitações dos métodos analíticos  
 (modificado – Lara, 2019)

Vantagens	Limitações
Aplicações simples	O atrito entre o geossintético, material e fundação é desprezado

<b>Vantagens</b>	<b>Limitações</b>
<b>Ideal para avaliação preliminar do projeto</b>	Considera-se tração constante ao longo de todo o perímetro do geossintético
<b>Curto tempo de resolução se comparado à modelagem numérica</b>	Não se considera o desaguamento durante o processo de enchimento do tubo geossintético
<b>Bons resultados são obtidos quando comparados a casos reais</b>	Não simula o processo de adensamento durante o procedimento de enchimento do tubo geossintético
<b>Como simplificação, podem ser utilizados para geossintéticos permeáveis</b>	Necessidade de resolução de equações complexas
<b>Podem ser utilizados quando não há um software complexo para dimensionamento preliminar</b>	

Dois modelos são amplamente citados na literatura para estimar a forma e os esforços em tubos geossintéticos a partir da teoria das membranas. O modelo de Plaut e Suherman (1998) adota uma formulação clássica em que a solução envolve integrais elípticas, sendo empregada para obter a geometria da seção e a distribuição de tensões sob hipóteses idealizadas. Já Guo *et al.* (2014) apresentam soluções para tubos sobre fundação rígida com base no equilíbrio de membrana, cujo procedimento numérico é formulado a partir da resolução de equações diferenciais ordinárias de 1ª ordem (por exemplo, via métodos do tipo Runge–Kutta), permitindo estabelecer relações entre pressão de bombeamento e parâmetros geométricos para pré-dimensionamento. Ambos os modelos são úteis para estimativas preliminares, porém assumem condições idealizadas (p.ex., ausência de desaguamento durante o enchimento), razão pela qual análises numéricas tornam-se necessárias quando se deseja representar o comportamento dependente do tempo e a evolução da poropressão.

### 2.8.1 Estados limites de projeto

O dimensionamento de tubos geotêxteis deve ser conduzido com base em critérios de segurança que considerem os diferentes modos potenciais de falha. Para tanto, adota-se o conceito de estados limites de projeto, prática consolidada na engenharia geotécnica e estrutural. Os estados limites representam as condições além das quais a estrutura deixa de atender aos requisitos de desempenho e segurança (Lawson, 2008).

Dois grupos principais são reconhecidos, os estados limites últimos (ELU), associados à ruptura estrutural ou instabilidade global, e os estados limites de serviço (ELS), relacionados a perda de funcionalidade ou deformações excessivas que comprometem a operação. Nos tubos geotêxteis, os

ELU envolvem, por exemplo, ruptura da manta por tração, escorregamento ou rolamento do tubo, ou instabilidade da pilha por falha externa. Já os ELS estão ligados a deformações elevadas na seção, redução da capacidade de drenagem ou recalques diferenciais significativos (Lawson, 2008; Silva, 2017). A Figura 2.12 ilustra graficamente as principais instabilidades globais, dependentes da geometria da base e das condições de fundação.

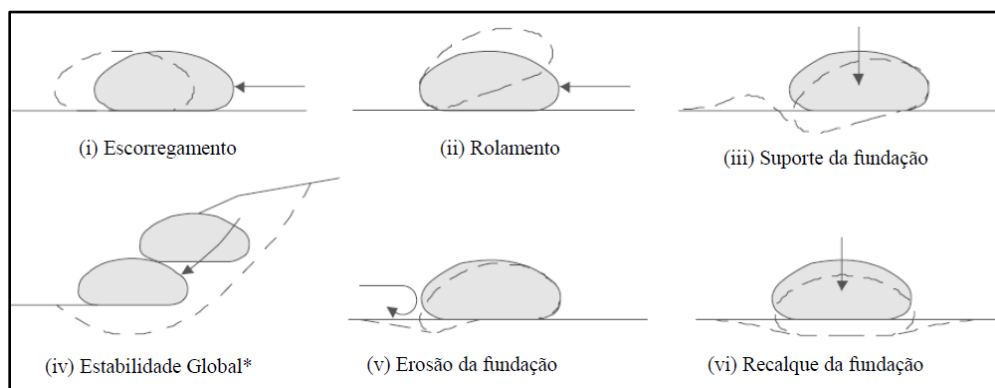


Figura 2.12 - Modos de falha externos em tubos geotêxteis: escorregamento, rolamento e instabilidade global (modificado - Lawson, 2008)

Para garantir estabilidade, Lawson (2008) recomenda que a relação entre a base de apoio (B) e a altura (H) do tubo seja de aproximadamente 1,5. Em tubos de menor diâmetro ( $H < 2,0$  m), reforça-se a necessidade de verificar a estabilidade, uma vez que estruturas mais baixas tendem a ser mais vulneráveis a escorregamentos, sobretudo em terrenos inclinados ou de baixa aderência. A Figura 2.13 exemplifica como tubos de menor diâmetro apresentam maior suscetibilidade a falhas globais.

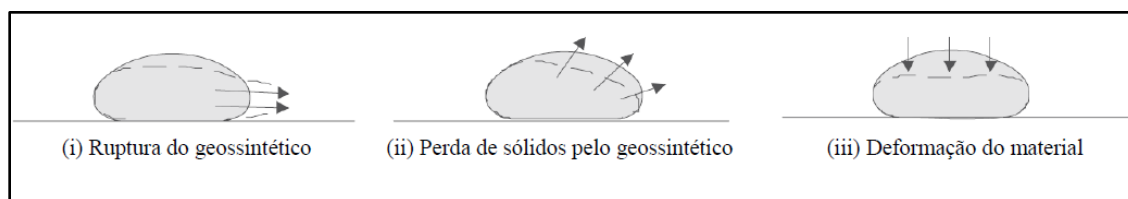


Figura 2.13 - Modos de falha internos em tubos geotêxteis (modificado - Lawson, 2008)

Além dos modos externos, há também os modos de falha internos, que dizem respeito diretamente ao desempenho do geotêxtil. Estes incluem a ruptura da manta por tração, o escoamento de partículas sólidas (*piping*), o entupimento (*clogging*) e a ruptura das costuras. Tais falhas estão

frequentemente associadas a seleção inadequada do material ou a pressões de enchimento mal controladas (Silva, 2017).

A Figura 2.14 exemplifica situações de falha ligadas ao próprio geotêxtil e apresenta esquemas de ações corretivas, por meio de piquetes e amarrações.

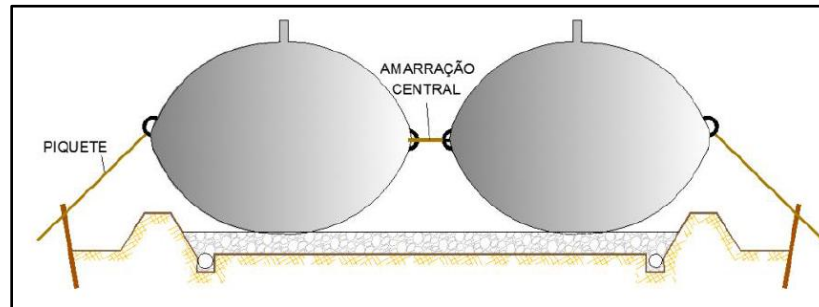


Figura 2.14 - Medidas de controle  
(modificado - Silva, 2017)

A correta seleção do material, considerando resistência à tração, capacidade de filtração e durabilidade, é essencial para evitar tais falhas. Além disso, a aplicação de fatores de segurança globais e parciais deve ser realizada conforme normas técnicas, de modo a contemplar tanto a confiabilidade estrutural como a operacional.

Por fim, é importante ressaltar que os estados limites não devem ser avaliados apenas no momento do enchimento, mas também ao longo do tempo, considerando efeitos de adensamento do conteúdo, ciclos de secagem e variações climáticas que impactem diretamente na estabilidade global. A integração de análises teóricas, modelagens numéricas e dados de campo constitui a abordagem mais confiável para garantir a segurança e a durabilidade de sistemas de confinamento baseados em tubos geotêxteis.

Diante da revisão apresentada, observa-se que o desempenho dos sistemas de disposição em tubos geotêxteis depende de uma interação complexa entre propriedades do geotêxtil, características do rejeito, mecanismos de filtração e solicitações mecânicas. Embora a literatura documente avanços significativos em ensaios laboratoriais, aplicações em campo e formulações analíticas, persiste a necessidade de ferramentas que permitam integrar esses aspectos em análises preditivas robustas.

Nesse contexto, a modelagem numérica por elementos finitos surge como recurso essencial para simular o comportamento hidráulico e geomecânico de tubos geotêxteis e geofôrmas, com ênfase em estruturas confeccionadas com geotêxtil não tecido, como no caso analisado nesta pesquisa. No Capítulo 3 desenvolve-se essa abordagem, discutindo-se os fundamentos, as escolhas de modelagem e as implicações para o estudo de tubos geotêxteis aplicados ao desaguamento de rejeitos.

### **3 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DO SISTEMA DE GEOFÔRMAS EM GEOTÊXTIL IMPLEMENTADO NA UHE RISOLETA NEVES (CANDONGA)**

---

A presente seção apresenta a descrição e a análise do sistema de geofôrmas em geotêxtil utilizado na contenção e no desaguamento de rejeitos no reservatório da Usina Hidrelétrica Risoleta Neves (UHE Candonga), desenvolvido pela empresa Terratek Engenharia Ltda. a serviço da Samarco Mineração S.A. após o rompimento da Barragem de Fundão, em 2015. O capítulo reúne as informações de campo, os ensaios de caracterização e os resultados de instrumentação obtidos durante a implantação e o monitoramento das geofôrmas, que serviram de base experimental e referência prática para as análises numéricas apresentadas no Capítulo 4.

#### **3.1 Contexto e objetivos do projeto**

O rompimento da Barragem de Fundão, em novembro de 2015, provocou o lançamento de aproximadamente 39 milhões de metros cúbicos de rejeitos de ferro no sistema fluvial do Rio Gualaxo do Norte e, posteriormente, no Rio Doce, atingindo o reservatório da Usina Hidrelétrica Risoleta Neves (UHE Candonga), localizada entre os municípios de Santa Cruz do Escalvado e Rio Doce, em Minas Gerais. O acúmulo desse material reduziu drasticamente a capacidade útil do reservatório, comprometendo as operações da usina e exigindo ações imediatas de contenção, dragagem e disposição ambientalmente segura dos sedimentos depositados (ANM, 2019).

Com o objetivo de viabilizar o desassoreamento do reservatório e garantir a estabilidade das estruturas adjacentes, a Samarco Mineração S.A., responsável pelo empreendimento, contratou a Terratek Engenharia Ltda. para o desenvolvimento e a execução de um sistema de confinamento e desaguamento de rejeitos utilizando geofôrmas em geotêxtil, denominadas Eco-BAGs. Essa solução inovadora foi adotada devido à sua rápida implantação, baixo impacto ambiental e alta eficiência hidráulica, em substituição a alternativas convencionais de contenção e disposição de rejeitos.

O sistema de geofôrmas implantado em Candonga foi projetado para funcionar simultaneamente como estrutura de contenção física e unidade de desaguamento. As polpas provenientes da dragagem eram bombeadas para o interior das geofôrmas, onde a água livre era drenada através do

geotêxtil, promovendo o adensamento e a consolidação progressiva dos rejeitos. Esse processo possibilitou a redução significativa do volume inicial e o confinamento seguro do material sólido, atendendo às exigências de segurança e às diretrizes ambientais estabelecidas pela Agência Nacional de Mineração (ANM, 2019).

Além de sua função operacional, o projeto teve caráter experimental e de pesquisa aplicada. A Terratek implantou uma geofôrma-teste instrumentada, permitindo o monitoramento das poropressões, deformações e recalques durante as fases de enchimento e drenagem. Os resultados obtidos serviram como referência para o aperfeiçoamento do método executivo e para o desenvolvimento de modelos numéricos subsequentes, que buscam reproduzir o comportamento hidráulico e geomecânico observado em campo (Terratek, 2016; Palmeira e Fahel, 2020).

### 3.2 Localização e condições do local de implantação das geofôrmas

A Usina Hidrelétrica Risoleta Neves (UHE Candonga) está localizada no município de Santa Cruz do Escalvado, no estado de Minas Gerais, a aproximadamente 230 km de Belo Horizonte, integrando o sistema energético da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) em parceria com a Samarco Mineração S.A. O reservatório ocupa parte do vale do Rio Doce, em uma região caracterizada por relevo ondulado e presença de solos residuais.

Após o rompimento da Barragem de Fundão em novembro de 2015, uma grande quantidade de rejeitos de ferro atingiu o reservatório da UHE Candonga, reduzindo sua capacidade de armazenamento e afetando a operação da usina. O material depositado apresentava composição predominantemente areno-siltosa, com baixo teor de argila e elevada fração de partículas finas dispersas em água, o que demandava técnicas adequadas de dragagem, confinamento e desaguamento (Terratek, 2016).

O projeto de recuperação do reservatório foi executado em uma área situada na margem direita do Rio Doce, em terreno com inclinação suave e logística favorável à implantação do sistema, sobretudo pela proximidade com a frente de dragagem e pelo reduzido percurso de transporte da polpa. O local foi selecionado para atender às necessidades imediatas de capacidade de deposição de rejeitos, por situar-se no vale mais próximo do barramento principal. Ressalta-se, contudo, que a fundação natural apresentava baixa capacidade de suporte, sendo necessário o reforço da

plataforma para dissipar as cargas transferidas a cada enchimento dos Eco-BAGs e garantir a estabilidade operacional até a cota final do projeto. O reforço de base foi composto por geossintéticos de alta resistência, destacando-se o emprego do geotêxtil tecido Stablenka 1600/100 como elemento principal de reforço, complementado por uma camada de geogrelhas Fortrac 300/30-30T (300 kN/m) com sobreposição transversal (perpendicular) de 1 m. Adicionalmente, foi prevista a instalação de um geotêxtil não tecido de alta gramatura (950 g/m<sup>2</sup>) atuando como elemento separador, com o objetivo de reduzir o risco de erosão interna e garantir a integridade da fundação. A combinação desses elementos proporcionou resistência total à tração da ordem de 2.052 kN/m, valor adotado nas verificações de estabilidade global da estrutura empilhada, (Terratek, 2016).

As geofôrmas, confeccionadas com geotêxtil não tecido, foram instaladas sobre uma base de fundação drenante (camada granular e/ou brita), a qual, além de permitir o escoamento do efluente e reduzir o acúmulo de água sob as estruturas, atuou como regularização e viabilizou o acesso e o tráfego de equipamentos durante a operação, em função das condições de solo mole na fundação (Terratek, 2016). O sistema foi projetado para receber sucessivos enchimentos de polpa provenientes da dragagem, garantindo o confinamento físico e o desaguamento controlado dos rejeitos (Terratek, 2016).

A disposição das geofôrmas seguiu uma configuração modular e sequencial, permitindo a operação simultânea de enchimento, drenagem e remoção do efluente. Essa abordagem assegurou maior eficiência operacional e estabilidade local, integrando-se às diretrizes de segurança e monitoramento definidas pela Agência Nacional de Mineração (ANM, 2019) e aos princípios de engenharia aplicados à recuperação ambiental de estruturas impactadas (Palmeira e Fahel, 2020).

### 3.3 Configuração e geometria da geofôrma em geotêxtil

O sistema de geofôrmas implantado no reservatório da UHE Risoleta Neves foi concebido como um conjunto de unidades modulares de confinamento e desaguamento apoiadas sobre o terreno natural na margem direita do Rio Doce. Cada unidade foi confeccionada com geotêxtil não tecido agulhado de poliéster virgem, com gramatura média de 948 a 950 g/m<sup>2</sup>, oferecendo elevada resistência à tração e permeabilidade adequada ao escoamento da água de drenagem (Terratek, 2016).

As geofôrmas apresentavam altura de enchimento de aproximadamente 1,80 m, largura de base de cerca de 16,0 m e comprimento aproximado de 50,0 m, resultando em razão  $H/B \approx 0,11$ , configuração compatível com a adotada na modelagem numérica apresentada no Capítulo 4. Essas dimensões foram utilizadas como referência para a modelagem desenvolvida no capítulo seguinte, garantindo coerência entre o comportamento observado em campo e as condições simuladas. Após o enchimento, observou-se uma geometria elipsoidal suavizada, com coroamento arredondado e base praticamente plana.

Em campo, as geofôrmas foram instaladas sobre uma superfície regularizada do terreno natural, preparada para garantir o escoamento do efluente e a estabilidade das unidades durante o enchimento. O relatório executivo da Terratek (2016) menciona a existência de uma camada drenante de brita sob as estruturas, implantada para facilitar o escoamento do efluente e, adicionalmente, atuar como lastro operacional, viabilizando o trânsito e a operação de equipamentos durante as etapas sucessivas de enchimento.

No entanto, essa base granular não foi representada explicitamente na modelagem numérica. No modelo, o plano inferior do domínio foi adotado como condição de contorno mecânica com deslocamento vertical nulo, enquanto a condição hidráulica foi definida de forma a permitir a drenagem do sistema (condição drenada para o fluxo de água). Essa simplificação foi adotada porque o objetivo central do estudo não foi reproduzir o comportamento detalhado da plataforma granular e do subleito, mas investigar a resposta hidráulica (drenagem e evolução da poropressão) e mecânico-deformacional (deformações e recalques) da própria geofôrma e do rejeito sob condições controladas de contorno. Assim, os resultados devem ser interpretados como representativos do desempenho da geofôrma, podendo diferir de uma análise que modele explicitamente a estratigrafia e a plataforma granular.

As costuras longitudinais e transversais do geotêxtil foram executadas com linha de poliéster de alta tenacidade, em três costuras paralelas, posicionadas a aproximadamente 5 cm da borda, conferindo continuidade e resistência ao conjunto. Ensaios realizados pela Terratek indicaram resistência média à tração de 66 kN/m (Terratek, 2016).

O relatório da Terratek (2016) também registra a utilização de geossintéticos de reforço na fundação da estrutura de contenção, incluindo geogrelhas e geotêxteis de alta resistência,

empregados devido à baixa capacidade de suporte do subleito para estabilizar os recalques e mitigar a ocorrência de falhas na fundação associadas ao carregamento sucessivo dos Eco-BAGs, contribuindo para a estabilidade global do conjunto de deposição. No presente estudo, tais reforços não foram modelados explicitamente (por não constituírem o foco principal da análise e em função do nível de detalhamento adotado), de modo que seus efeitos não são avaliados de forma específica. Assim, os resultados devem ser interpretados no âmbito do comportamento hidráulico e deformacional global da geofôrma e do rejeito, sob as simplificações assumidas.

### 3.4 Instrumentação e ensaio de campo da geofôrma experimental

Com o objetivo de compreender o comportamento hidráulico e deformacional das geofôrmas utilizadas em Candonga, a Terratek implantou uma geofôrma de teste instrumentada, construída com as mesmas características geométricas e de material das unidades operacionais. O ensaio permitiu o registro contínuo das variações das poropressões ( $\Delta u$ ) e de deformação ( $\epsilon$ ) durante as fases de enchimento, drenagem e adensamento do rejeito.

A instrumentação foi composta por três piezômetros e três extensômetros acústicos, instalados em posições estratégicas para medir o comportamento interno do rejeito e da geofôrma:

- Piezômetros PA-01, PA-02 e PA-03, instalados ao longo do eixo de simetria da geofôrma, respectivamente nas regiões inferior, intermediária e superior, permitindo acompanhar a evolução e a dissipação das poropressões ao longo da altura.
- Extensômetros EA-01, EA-02 e EA-03, fixados na superfície externa da geofôrma e orientados segundo três direções principais paralela, perpendicular e inclinada ( $45^\circ$ ) ao eixo longitudinal, instalados para monitorar as deformações desenvolvidas na geofôrma durante as fases de enchimento e drenagem

O enchimento da geofôrma experimental foi realizado por bombeamento da polpa de rejeito em etapas, intercalando períodos de pausa para drenagem. Durante o enchimento inicial, observou-se rápida elevação das poropressões nos piezômetros inferiores, atingindo valores máximos da ordem de 12 a 13 kPa. Em seguida, verificou-se a dissipação progressiva do excesso de pressão intersticial, com redução exponencial ao longo dos primeiros dias após o término do bombeamento.

As leituras de deformação apresentadas no relatório da Terratek (2016) indicaram alongamentos máximos entre 7 e 9% na região do coroamento da geofôrma. Essas deformações concentraram-se nas horas iniciais após o enchimento, coincidindo com a fase de maior dissipação de poropressão e adensamento do rejeito. O monitoramento por extensômetros foi mantido ao longo de todo o ensaio, com registros entre 07/09/2016 e 26/09/2016 (aprox. 19 dias), abrangendo os ciclos de enchimento e as pausas para drenagem.

O ensaio permitiu confirmar o bom desempenho hidráulico e a estabilidade da geofôrma, sem registros de extravasamento. As curvas de dissipação da poropressão e deformação obtidas em campo foram posteriormente utilizadas como referência para a modelagem numérica, apresentada no Capítulo 4, de forma a reproduzir o comportamento observado.

### 3.5 Ensaios de laboratório e propriedades dos materiais

As propriedades físicas e hidráulicas do rejeito, do geotêxtil e dos materiais associados foram determinadas por meio de ensaios laboratoriais específicos, cujos principais resultados são apresentados a seguir.

#### 3.5.1 Rejeito de mineração

A caracterização do rejeito utilizado no enchimento das geofôrmas foi realizada pela Terratek Engenharia Ltda. (2016), a partir de amostras coletadas durante as operações de dragagem no reservatório da UHE Risoleta Neves (Candongá).

O material apresenta composição areno-siltosa, com reduzido teor de argila e baixa plasticidade. Os ensaios indicaram densidade real dos sólidos ( $G_s$ ) de 2,73, peso específico saturado ( $\gamma_{sat}$ ) de 17,6 kN/m<sup>3</sup> e índice de vazios inicial ( $e_0$ ) entre 1,0 e 1,2. O teor de umidade natural médio foi de 28 %, com limite de liquidez (LL) de 29 % e índice de plasticidade (IP) de 4 %, caracterizando um material de baixa plasticidade e de comportamento predominantemente não coesivo.

Os ensaios de permeabilidade a carga constante apresentaram coeficiente médio de  $k = 4,3 \times 10^{-3}$  m/dia, confirmando o comportamento altamente drenante do rejeito. Essa condição favorece a rápida dissipação de poropressões observada em campo e reproduzida nas simulações numéricas.

Os parâmetros obtidos foram utilizados como base para a definição das propriedades hidráulicas e mecânicas empregadas no modelo numérico.

### 3.5.2 Geotêxtil não tecido (geofôrma)

O geotêxtil utilizado na confecção das geofôrmas é do tipo não tecido agulhado de poliéster virgem, caracterizado por elevada resistência mecânica e adequada permeabilidade transversal para o desaguamento de polpas minerais. O material foi empregado em painéis costurados, formando o invólucro de uma geofôrma destinada ao confinamento e ao desaguamento dos rejeitos dragados.

De acordo com o Relatório Executivo Terratek (2016), o geotêxtil apresenta gramatura média de 948 a 950 g/m<sup>2</sup> e estrutura composta por fibras de poliéster de alta tenacidade. Os ensaios laboratoriais de caracterização incluíram medições de resistência à tração nas direções longitudinal e transversal, alongamento na ruptura e espessura nominal.

A permeabilidade normal ao plano do geotêxtil foi considerada satisfatória para permitir o escoamento da água de drenagem, assegurando a formação gradual da torta de filtração no interior da geofôrma. Esses resultados demonstram que o material atende plenamente às exigências de resistência e desempenho hidráulico para estruturas de confinamento temporário de rejeitos finos. Os parâmetros obtidos em laboratório foram utilizados como referência para a definição da rigidez axial equivalente ( $EA_1 = 92 \text{ kN/m}$ ) adotada na modelagem numérica.

Cabe destacar que o relatório Terratek (2016) também menciona a utilização de geossintéticos de alta resistência na fundação do sistema, empregados como medida de melhoria do subleito para estabilizar os recalques e mitigar a possibilidade de falhas de capacidade de suporte na fundação associadas ao carregamento sucessivo dos Eco-BAGs. Esses elementos, entretanto, não integraram a geofôrma analisada neste estudo e não foram representados na modelagem numérica, cujo foco se concentrou no comportamento hidráulico e deformacional do conjunto geofôrma–rejeito, sob as simplificações adotadas.

## 4 MODELAGEM NUMÉRICA

---

A modelagem numérica constitui uma ferramenta fundamental na engenharia geotécnica moderna, permitindo compreender e prever o comportamento de sistemas complexos em condições de carregamento e drenagem variáveis. No caso específico de tubos geotêxteis e geofôrmas aplicados ao desaguamento de rejeitos, a utilização de modelos de elementos finitos viabiliza a representação do acoplamento hidráulico - mecânico entre o material geossintético e o rejeito confinado. Esse recurso amplia a capacidade de análise para além dos ensaios laboratoriais e das observações de campo, fornecendo subsídios técnicos essenciais ao projeto e à operação segura dessas estruturas.

A escolha do PLAXIS 2D como ferramenta de simulação justifica-se pela ampla aplicação do software em problemas de solos moles e em estudos envolvendo geossintéticos, permitindo incorporar modelos constitutivos avançados, como o *Soft Soil*, e elementos estruturais específicos, como *Geogrid* ou *Plate*, para representação de membranas. Por meio dessa abordagem, torna-se possível avaliar a evolução das poropressões, deformações no geotêxtil e recalques na fundação, além de executar análises paramétricas que quantificam a influência de propriedades críticas como a permeabilidade do rejeito e a rigidez à tração (J) do geotêxtil.

Nesse capítulo são apresentadas as bases conceituais, as etapas de construção do modelo numérico e os critérios de análise adotados, de forma a estabelecer uma metodologia tecnicamente fundamentada para a avaliação do desempenho de tubos geotêxteis no confinamento e desaguamento de rejeitos.

### 4.1 Considerações gerais sobre modelagem numérica

A modelagem numérica consolidou-se como uma ferramenta indispensável na engenharia geotécnica contemporânea, permitindo representar fenômenos complexos que dificilmente seriam descritos apenas por métodos analíticos ou empíricos. A partir da evolução do método dos elementos finitos, tornou-se viável incorporar não linearidades constitutivas, o acoplamento hidráulico-mecânico e a interação solo - estrutura em análises mais próximas das condições reais de engenharia (Zienkiewicz e Taylor, 2000).

No campo da mecânica dos solos e de materiais granulares, a modelagem numérica permite avaliar processos de adensamento, dissipação de poropressões, estabilidade e deformações. Entretanto, é importante ressaltar que o comportamento de rejeitos de mineração pode diferir, em aspectos essenciais, daquele de solos naturais. Os rejeitos são materiais de origem industrial, resultantes de processos de britagem, moagem e beneficiamento, frequentemente com granulometria, mineralogia, estrutura e variabilidade espacial condicionadas ao processo produtivo. Nessas condições, a análise numérica constitui ferramenta relevante para identificar e quantificar tais diferenças, sobretudo quando a resposta é fortemente controlada por fenômenos transientes de fluxo e deformação (Mitchell e Soga, 2005).

Além de ampliar a compreensão dos mecanismos fundamentais, a modelagem auxilia na definição de critérios de projeto e de estratégias de monitoramento, permitindo a realização de análises paramétricas e de sensibilidade. Esse tipo de abordagem é particularmente útil para quantificar a influência de variáveis críticas como permeabilidade ( $k$ ), parâmetros de compressibilidade/adensamento e a rigidez associada a elementos geossintéticos (por exemplo, rigidez axial expressa por EA ou J, conforme o tipo de elemento adotado) sobre o desempenho global do sistema (Potts e Zdravković, 2001).

Na prática profissional, o uso de softwares especializados ampliou significativamente o alcance da modelagem geotécnica aplicada. Ferramentas como PLAXIS, FLAC e RS2, entre outras, possibilitam a análise integrada de deformações, estabilidade e fluxo, contribuindo para a avaliação do comportamento geotécnico de estruturas, a otimização de fatores de segurança e a viabilização de soluções tecnicamente robustas e economicamente adequadas. Em particular, programas baseados em elementos finitos incorporam modelos constitutivos avançados para meios porosos, capazes de representar efeitos de pré-adensamento, não linearidade e evolução temporal de poropressões (PLAXIS B.V., 2021).

Por fim, ressalta-se que a modelagem numérica não substitui ensaios laboratoriais nem o monitoramento de campo; ao contrário, deve ser entendida como complemento indispensável para interpretar resultados, reduzir incertezas e antecipar cenários operacionais. A confiabilidade das previsões depende da consistência entre hipóteses de modelagem, parâmetros obtidos em laboratório e validação com instrumentação e leituras geométricas em campo.

#### 4.1.1 Revisão da importância da modelagem em geotecnia.

A modelagem numérica consolidou-se, nas últimas décadas, como ferramenta indispensável na engenharia geotécnica. A complexidade do comportamento dos solos (materiais naturais, heterogêneos e anisotrópicos) impõe limitações significativas a abordagens puramente analíticas ou empíricas. Ensaio laboratoriais e observações de campo fornecem parâmetros fundamentais, mas são frequentemente insuficientes para caracterizar, de forma abrangente, as interações não lineares entre tensões, deformações, fluxo e variações de poropressões ao longo do tempo. Nesse contexto, métodos numéricos como o Método dos Elementos Finitos (MEF) e o Método das Diferenças Finitas (MDF) permitem representar de maneira mais realista o acoplamento hidráulico-mecânico e a evolução de processos transientes em diferentes escalas (Potts e Zdravković, 2001; Zienkiewicz e Taylor, 2000).

Do ponto de vista prático, a modelagem numérica auxilia no projeto, na avaliação de desempenho e na análise de segurança de obras geotécnicas complexas, como barragens de rejeitos, escavações profundas, túneis, aterros sobre solos moles e, mais recentemente, estruturas e sistemas com geossintéticos, incluindo soluções de reforço, contenção e impermeabilização (por exemplo, geogrelhas, geotêxteis, geomembranas e geocompostos). Entre as principais vantagens, destacam-se:

- Possibilidade de considerar geometrias e condições de contorno realistas;
- Representação de modelos constitutivos capazes de reproduzir elasticidade não linear, plasticidade e adensamento;
- Simulação de cenários alternativos e realização de análises paramétricas e de sensibilidade;
- Suporte à interpretação de instrumentação em campo e à avaliação do desempenho ao longo do tempo.

Ressalta-se, por fim, que previsões numéricas confiáveis dependem de calibração e validação adequadas, idealmente baseadas em evidências experimentais e em monitoramento de campo, de modo a reduzir incertezas e garantir consistência entre hipóteses de modelagem e o comportamento observado (Mitchell e Soga, 2005; Potts e Zdravković, 2001).

#### 4.1.2 Uso de softwares de elementos finitos na simulação de geofôrmas e tubos geotêxteis: aplicações, vantagens e limitações

A aplicação de softwares de elementos finitos em estudos geotécnicos envolvendo tubos geotêxteis e geofôrmas consolidou-se como ferramenta indispensável para avaliar processos acoplados de deformação e drenagem. Mitchell e Soga (2005) ressaltam que o valor da modelagem numérica está na possibilidade de representar a dissipação de poropressões e a compressibilidade do rejeito em condições transientes, fenômenos de difícil previsão apenas com métodos analíticos.

De modo semelhante, Gaffney *et al.* (1999) verificaram que a segregação e a deposição de partículas finas junto ao geotêxtil alteram de forma significativa a permissividade hidráulica do material, em função da colmatção progressiva dos poros e da formação do rejeito filtrado. Esse fenômeno reduz a capacidade de escoamento normal ao plano do geotêxtil ao longo do tempo, influenciando diretamente a cinética de dissipação das poropressões durante o processo de desaguamento. Com base nesses resultados, os autores destacaram a necessidade de que modelos numéricos voltados à simulação de geofôrmas e tubos geotêxteis considerem a variação temporal da permeabilidade hidráulica efetiva do sistema rejeito - rejeito filtrado - geotêxtil, de modo a representar adequadamente a evolução do comportamento hidráulico observada em ensaios de campo e laboratório.

Silva (2017), em análises bidimensionais com o PLAXIS 2D, demonstrou que a rigidez à tração do geotêxtil e a altura de enchimento são determinantes na forma final da seção e na distribuição de tensões. Seus resultados evidenciaram que a modelagem 2D reproduz satisfatoriamente tendências globais de deformação e recalque, mas subestima efeitos localizados próximos aos bocais de enchimento. Em continuidade, Silva *et al.* (2021) ampliaram a abordagem para análises tridimensionais, mostrando que o modelo 3D capta com maior realismo a variabilidade longitudinal, as diferenças de recalque entre segmentos adjacentes e a redistribuição da pressão interna. Os autores, entretanto, enfatizaram o custo computacional elevado do modelo tridimensional, recomendando seu uso em fases executivas de projeto, enquanto os modelos 2D permanecem adequados para estudos conceituais e análises preliminares.

Em outra linha, Morais *et al.* (2020) aplicaram o ABAQUS para investigar a resposta acoplada hidráulico-mecânica de geofôrmas utilizadas em escala piloto. Concluíram que a adoção de

permeabilidade constante gera previsões irreais sobre a taxa de drenagem, sendo imprescindível considerar a evolução de  $k_t$  com base em ensaios de filtração e transmissividade. Essa recomendação converge com observações de Moo-Young e Tucker (2002) e Aydilek e Edil (2002), que destacaram a importância de ensaios de laboratório para parametrizar os modelos numéricos.

Além disso, durante o desaguamento ocorre redução do teor de umidade e do grau de saturação, podendo haver variação do peso específico ( $\gamma$ ) do rejeito ao longo do tempo; essa mudança influencia o campo de tensões totais e efetivas e, conseqüentemente, os recalques previstos, devendo ser considerada na interpretação dos resultados numéricos, ainda que seja frequentemente simplificada por valores médios em análises preliminares.

De forma integrada, os estudos apontam para vantagens consistentes: capacidade de simular interações acopladas solo-água-geotêxtil, de prever deformações e recalques ao longo do tempo e de explorar cenários operacionais (pressão de enchimento, posição de bocais, uso de floclantes). Por outro lado, as limitações também são claras: elevada sensibilidade a parâmetros de entrada, necessidade de caracterização experimental robusta, custos computacionais em modelos 3D e risco de superestimação de eficiência quando não há calibração adequada com dados de campo.

Assim, a literatura evidencia que a modelagem numérica deve ser utilizada como ferramenta de apoio ao projeto e ao monitoramento, fornecendo previsões confiáveis apenas quando sustentada por caracterização geotécnica detalhada, ensaios hidráulicos representativos e instrumentação de campo capaz de validar e recalibrar continuamente os resultados.

Considerando a revisão bibliográfica e as aplicações numéricas consultadas, torna-se necessário descrever em detalhe a configuração do modelo desenvolvido nesta pesquisa. A definição da geometria do tubo geotêxtil, associada às condições de contorno e ao refinamento da malha, constitui etapa fundamental para assegurar representatividade física e confiabilidade dos resultados. Mitchell e Soga (2005) ressaltam que a fidelidade da modelagem depende diretamente da consistência entre a descrição geométrica e as propriedades constitutivas dos materiais, enquanto o manual do PLAXIS (PLAXIS B.V., 2021) destaca que a correta definição de limites e discretização influencia decisivamente a resposta hidráulico-mecânica simulada. Nesse contexto,

o item 4.2 apresenta a geometria adotada para o tubo, servindo de base para a análise do enchimento, do desaguamento e das deformações observadas no pós-enchimento.

## 4.2 Geometria do modelo

A modelagem numérica foi realizada no Plaxis 2D, em condição de deformação plana (*plane strain*). Em função da simetria da seção transversal, modelou-se apenas meia-seção da geofôrma, com imposição das condições de contorno no eixo de simetria, conforme recomendado na documentação do software (PLAXIS B.V., 2021) A malha foi composta por elementos triangulares de 15 nós (elementos de segunda ordem), conforme prática recomendada para análises acopladas com deformações e variações de poropressão.

As dimensões da geofôrma modelada foram estabelecidas a partir dos dados fornecidos pela empresa Terratek para o projeto Candonga, adotando-se altura máxima de enchimento de aproximadamente 1,80 m e largura de base de cerca de 16,0 m, valores compatíveis com as condições de operação observadas em campo. Em planta, as unidades executadas apresentavam comprimento da ordem de 50,0 m; contudo, por se tratar de uma análise 2D em *plane strain*, a geometria é representada por meio da seção transversal, assumindo-se invariância ao longo do comprimento.

O geotêxtil foi representado por meio de elemento do tipo *Geogrid*, adotado para simular o comportamento de uma membrana submetida predominantemente a esforços de tração. No presente estudo, essa representação foi empregada como idealização numérica da manta geotêxtil não tecida utilizada na geofôrma, a qual, em geral, apresenta maior deformabilidade quando comparada a geotêxteis tecidos. Dessa forma, a resposta do geossintético no modelo é governada pela rigidez axial EA atribuída ao elemento, definida com base nos resultados experimentais disponíveis e ajustada de modo a manter compatibilidade com as deformações admissíveis/observadas e com o comportamento global esperado do sistema durante as etapas de enchimento e drenagem.

Os aspectos complementares da configuração geométrica e numérica incluindo condições de contorno, refinamento da malha e propriedades constitutivas dos materiais são discutidos em maior

detalhe nas subseções seguintes, de forma a contextualizar integralmente a construção do modelo numérico.

#### 4.2.1 Configuração adotada para a geofôrma (dimensões, altura de enchimento).

A representação geométrica da geofôrma é um dos aspectos mais relevantes em modelagens numéricas desse tipo, pois influencia diretamente a redistribuição de esforços na membrana, a trajetória de fluxo de água através do geotêxtil e os recalques induzidos no material de enchimento. De acordo com Mitchell e Soga (2005), a geometria de estruturas confinadas deve ser definida a partir de dados reais de campo ou de ensaios controlados, uma vez que pequenas variações dimensionais podem resultar em diferenças significativas no comportamento hidráulico-mecânico.

No presente trabalho, as dimensões da geofôrma foram estabelecidas a partir dos dados fornecidos pela empresa Terratek para o projeto Candonga, que envolveu o encapsulamento de sedimentos com tubos geotêxteis em escala real. Adotou-se altura máxima de enchimento de 1,80 m e largura de 16,0 m. A utilização de parâmetros geométricos obtidos diretamente do projeto executivo garante maior representatividade do modelo e reduz a incerteza associada a simplificações excessivas (Pilarczyk, 2000; Koerner, 2012).

Mantidas as hipóteses numéricas descritas no item 4.2, a configuração geométrica da geofôrma foi definida a partir de informações do projeto de Candonga fornecidas pela Terratek, adotando-se altura máxima de enchimento de 1,80 m e largura de base de 16,0 m. O uso de parâmetros geométricos provenientes de dados de campo/projeto executivo aumenta a representatividade do modelo e reduz incertezas associadas a simplificações excessivas (Pilarczyk, 2000; Koerner, 2012).

O tubo geotêxtil foi modelado como elemento estrutural do tipo Geogrid, que reproduz o comportamento de membrana tracionada submetida a carregamentos internos. Essa escolha é amplamente reconhecida na literatura (Koerner, 2012; Palmeira, 2009), pois o elemento Geogrid no Plaxis permite inserir a rigidez à tração, parâmetro fundamental para representar o geotêxtil sem considerar rigidez à flexão. Além disso, a definição geométrica adotada é compatível com o comportamento descrito em aplicações anteriores de tubos de geotêxtil em obras hidráulicas e de mineração, nas quais a relação entre altura (H) e largura (W) condiciona a eficiência de desaguamento e a estabilidade global (Koerner, 2012; Palmeira, 2010). Uma altura de enchimento

relativamente baixa, como no caso de 1,80 m, implica menor pressão interna e, conseqüentemente, menor deformação do geotêxtil, mas pode também reduzir a taxa de drenagem inicial, pois a diferença de carga hidráulica disponível para promover o escoamento através do geotêxtil é menor (Aydilek e Edil, 2002).

Quanto à representação do desaguamento, adotou-se uma análise acoplada fluxo–deformação (consolidação), na qual o rejeito foi considerado inicialmente saturado e a evolução transiente das poropressões foi governada pelas condições hidráulicas do modelo. A condição drenante foi mantida ao longo de todo o contorno do invólucro geotêxtil, definido como fronteira permeável (associada ao elemento Geogrid e às interfaces hidráulicas), permitindo a passagem de água do rejeito para o meio externo. Assim, o desaguamento foi representado pela dissipação progressiva da poropressão ao longo das fases de enchimento e dos períodos subsequentes de drenagem.

#### 4.2.2 Definição do domínio numérico e condições de contorno

As restrições foram impostas de forma a reproduzir o comportamento físico da geofôrma. No limite  $X_{\min}$  (Fig. 3-1), correspondente ao eixo de simetria, restringiu-se o deslocamento horizontal ( $u_x=0$ ), permitindo apenas movimentos verticais. Essa condição garante a simetria do problema e evita rotações artificiais ao longo do eixo (PLAXIS B.V., 2021). No limite oposto,  $X_{\max}$ , todos os deslocamentos permaneceram livres ( $u_x, u_y$ ), representando a extremidade aberta da estrutura, em que não há contato direto com apoios ou barreiras laterais.

Na base do modelo ( $Y_{\min}$ ), restringiu-se o deslocamento vertical ( $u_y=0$ ), caracterizando um apoio rígido que admite deslizamento horizontal. Essa hipótese é compatível com práticas consolidadas de modelagem numérica de tubos geotêxteis, ao evitar constrangimentos que poderiam alterar artificialmente a redistribuição de tensões (Mitchell e Soga, 2005). Por fim, no topo do domínio ( $Y_{\max}$ ), todos os deslocamentos foram mantidos livres, permitindo deformações verticais e horizontais, além de se impor condição de drenagem aberta, representando a superfície exposta ao fluxo do rejeito. Essa abordagem é coerente com recomendações de Koerner (2012) e observações em simulações de tubos geotêxteis realizadas por Cantré (2002) e Morais *et al.* (2020).

A Figura 4.1 apresenta o domínio numérico utilizado na modelagem, no qual se observa a representação de metade da geofôrma, com largura de 8,0 m (metade da largura total, por conta da

simetria do problema) e altura de enchimento de 1,80 m. O contorno azul corresponde ao invólucro geotêxtil, modelado como elemento estrutural do tipo *Geogrid*, enquanto a região interna em cor alaranjada representa o material de enchimento (rejeito). Também se indicam os eixos de coordenadas adotados (x e y), que orientam a aplicação das condições de contorno descritas anteriormente. Essa configuração assegura a compatibilidade entre a geometria do modelo e as dimensões reais fornecidas pela Terratek para o projeto Candonga, permitindo a análise da resposta hidráulico-mecânica do sistema em escala representativa.

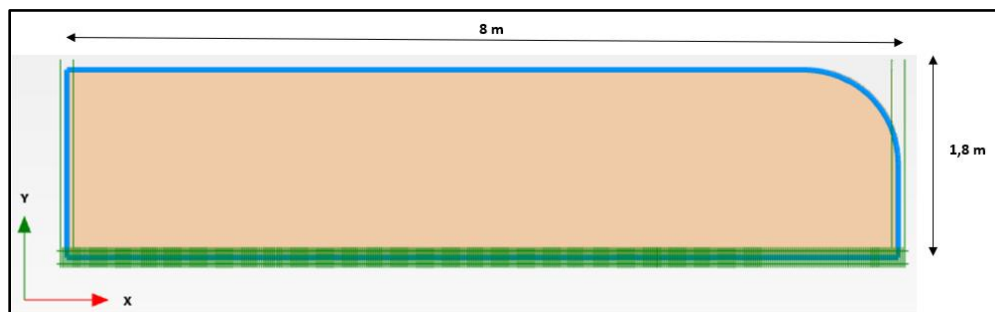


Figura 4.1 - Condições de contorno aplicadas à geofôrma

#### 4.2.3 Malha numérica e critérios de refinamento.

A discretização do domínio foi realizada com elementos triangulares de ordem elevada (isoparamétricos), obedecendo a recomendações de estudos clássicos de elementos finitos quanto à necessidade de verificar independência de malha e qualidade geométrica dos elementos (Zienkiewicz; Taylor; Zhu, 2013; Bathe, 2006; Potts; Zdravković, 2001). No PLAXIS 2D, a rotina de geração automática evita elementos degenerados, e a prática recomendada é executar um estudo de sensibilidade até que as grandezas de interesse apresentem variações desprezíveis com refinamentos sucessivos (PLAXIS B.V., 2021). As simulações foram realizadas no PLAXIS 2D (Version 2023.2.1.1079, Build 1079), cuja interface inclui recursos de inspeção da malha que auxiliam a verificação visual da qualidade geométrica dos elementos.

Aplicaram-se três níveis de malha (média, fina e muito fina) e, em cada nível, refinamentos progressivos, reduzindo-se o fator de refinamento da malha de 1,0 para 0,2. Como métrica de controle da convergência numérica, adotou-se o deslocamento vertical no ponto A (no topo da geofôrmas, Figura 4.2), por refletir diretamente o recalque associado à dissipação de poropressões.

Na Figura 4.2 observa-se a malha não estruturada com refinamento localizado na região de maior curvatura do invólucro e próximo ao bordo direito, onde se esperam gradientes mais elevados de tensão e poropressão, estratégia típica para reduzir o erro de discretização sem penalizar o custo computacional (Zienkiewicz; Taylor; Zhu, 2013; PLAXIS B.V., 2021). A inspeção visual não indicou elementos severamente distorcidos (sem colapso de ângulos internos ou alongamentos extremos), e o contorno acompanha suavemente a geometria do tubo, evitando transições abruptas de tamanho. Em termos de boas práticas, esse padrão de malha atende aos critérios usuais de forma recomendados para problemas de geotecnia com grandes deformações (Bathe, 2006; Potts; Zdravković, 2001).

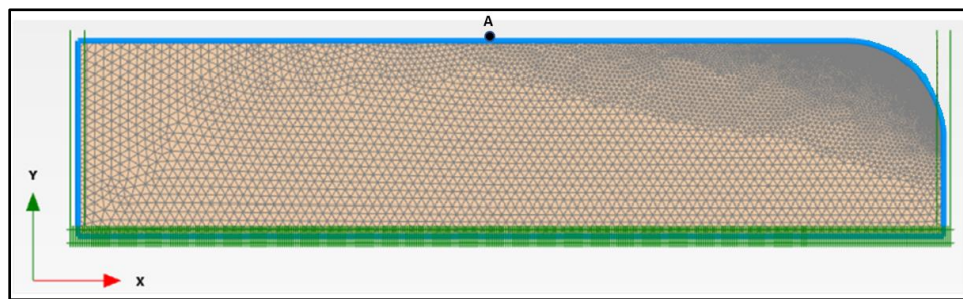


Figura 4.2 - Malha adotada com 120.145 nós

A análise de sensibilidade mostrou que, até cerca de 100 mil nós, as variações de deslocamento no ponto A ainda são perceptíveis; entretanto, a partir de 120 mil nós as diferenças tornam-se desprezíveis entre refinamentos sucessivos (variações inferiores a centésimos de milímetro), caracterizando convergência numérica. Assim, adotou-se a malha fina com *coarseness* 1,0 (120 mil nós), a qual equilibra precisão e tempo de processamento, sem ganho significativo ao avançar para malhas muito finas (Cantré, 2002; Morais; Pelisser; Urashima, 2020; PLAXIS B.V., 2021).

A Figura 4.3 sintetiza o comportamento de convergência de malha: o deslocamento vertical estabiliza-se em torno de 10,65 mm a partir de 120.000 nós, mantendo-se praticamente constante mesmo com aumentos substanciais no número total de nós. Esse resultado confirma que o erro de discretização está controlado e que a malha selecionada é adequada para as análises subsequentes (Zienkiewicz; Taylor; Zhu, 2013; PLAXIS B.V., 2021).

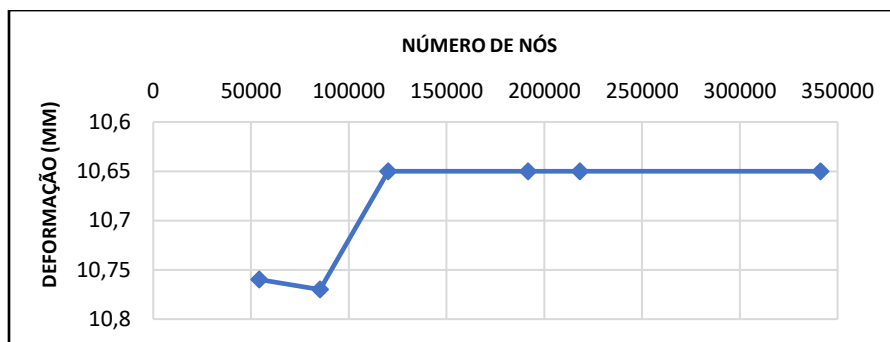


Figura 4.3 - Deformação vertical no ponto A em função do número de nós

Em síntese, a malha adotada atende simultaneamente aos requisitos de qualidade geométrica e convergência de resultados, assegurando representatividade física e eficiência computacional, condição essencial para a confiabilidade das previsões numéricas em geofôrmas e tubos geotêxteis (Bathe, 2006; Potts; Zdravković, 2001; PLAXIS B.V., 2021).

#### 4.2.4 Representação numérica da geofôrma

Na modelagem numérica, a geofôrma foi representada por meio do elemento estrutural do tipo *Geogrid* disponível no PLAXIS 2D. Essa escolha fundamenta-se na natureza do comportamento do geotêxtil, cuja função principal é resistir a esforços de tração na direção do seu plano, atuando como membrana flexível sem rigidez à flexão. De acordo com Koerner (2012) e Palmeira (2009), a resposta estrutural de tubos geotêxteis é dominada pela rigidez à tração do geotêxtil, parâmetro que controla tanto a redistribuição das tensões induzidas pelo enchimento hidráulico quanto os deslocamentos resultantes. Nesse sentido, a utilização do elemento *Geogrid* é mais adequada do que o elemento *Plate*, que inclui rigidez à flexão não representativa para esse tipo de aplicação (PLAXIS B.V., 2021).

A rigidez normal elástica ( $J = EA_1$ ) adotada foi de 92 kN/m, determinada a partir de ensaio de tração na direção perpendicular ao geotêxtil, realizado pela empresa Terratek no âmbito do projeto Candonga. O valor foi obtido considerando o módulo inicial da curva tensão–deformação ( $T-\epsilon$ ), por refletir o regime de serviço mais representativo durante o enchimento e a drenagem inicial da geofôrma (Mitchell e Soga, 2005). Esse valor de  $EA_1$  foi mantido constante em todas as fases de cálculo, tanto no enchimento quanto na consolidação, garantindo consistência entre as etapas.

A Figura 4.4 apresenta a curva  $T-\epsilon$  obtida no ensaio, na qual se observa a progressão quase linear do trecho inicial, utilizada para cálculo da rigidez axial. O ponto assinalado corresponde ao valor

característico de resistência (66 kN/m), enquanto o módulo tangente inicial foi utilizado para a determinação de  $EA_1 = 92 \text{ kN/m}$ , parâmetro de entrada no modelo numérico. Essa abordagem está em conformidade com recomendações da literatura (Koerner, 2012; Mitchell e Soga, 2005), que enfatizam a importância de se considerar o trecho inicial da curva para fins de projeto e simulação numérica, uma vez que os tubos operam predominantemente em regime de serviço e não próximo à ruptura.

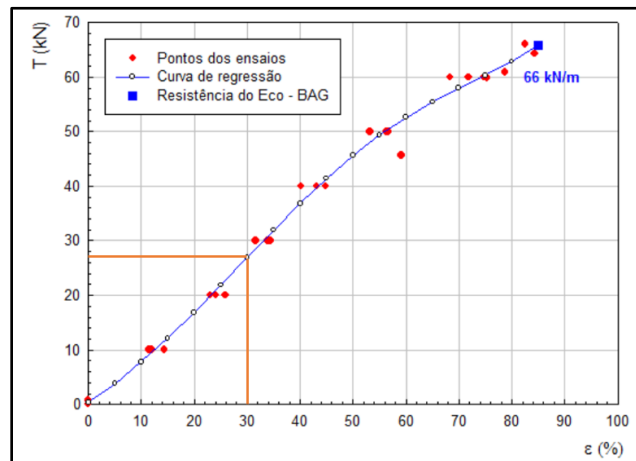


Figura 4.4 - Resistência a tração vs. deformação (modificado - Terratek, 2016)

A representação numérica do tubo geotêxtil buscou traduzir de forma realista o comportamento do material, empregando a rigidez axial obtida em ensaio laboratorial e uma formulação compatível com a resposta física do sistema. Essa definição é fundamental para a avaliação da interação hidráulico-mecânica da geofôrma e para a confiabilidade das previsões de recalque e redistribuição de tensões.

### 4.3 Caracterização do material de enchimento

O material utilizado para o preenchimento da geofôrma corresponde a sedimentos aluvionares dragados do reservatório da UHE Risoleta Neves (Candonga). No presente trabalho, não se dispôs de uma campanha laboratorial completa, especificamente voltada ao material já na condição de enchimento no interior da geofôrma. Assim, os parâmetros geotécnicos foram adotados a partir dos relatórios consolidados do projeto executivo e dos estudos de apoio ao dimensionamento, nos quais foram realizadas investigações de campo e interpretações geotécnicas para definição de propriedades compatíveis com as condições reais do local e com o modelo constitutivo empregado.

De acordo com esses relatórios técnicos, os parâmetros de deformabilidade, resistência e permeabilidade foram definidos por meio de correlações e interpretações de ensaios in situ, com destaque para resultados de piezocone (CPTU) e ensaios de palheta (Vane Shear Tests, VST), além de análises numéricas calibradas. Em particular, a estimativa de parâmetros de compressibilidade do Soft Soil foi baseada em correlações entre grandezas derivadas do CPTU (por exemplo, módulo oedométrico) e os índices modificados do modelo ( $\lambda^*$  e  $\kappa^*$ ), enquanto a resistência não drenada interpretada ( $S_u$ ) a partir de CPTU/VST foi convertida para parâmetros efetivos equivalentes ( $c'$  e  $\phi'$ ) quando necessário para viabilizar análises de consolidação. A Tabela 4.1 sintetiza os valores utilizados nesta pesquisa, extraídos dos parâmetros consolidados para o caso de Candonga.

Tabela 4.1 - Parâmetros geomecânicos do rejeito com sedimentos aluvionares (modificado - Terratek, 2016)

Tipo de material	$Y_{unsat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$Y_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\lambda^*$	$\kappa^*$	$\nu^*$	$c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi'$ (°)	$\psi$	$K_x$ (m/day)	$K_y$ (m/day)
Rejeitos com sedimentos aluviais	17	17,6	0,01214	0,00729	0,15	10	28	0	0,00432	0,00864

Nota 1.  $Y_{unsat}$ : Peso específico do solo não saturado  $Y_{sat}$ : Peso específico do solo saturado  $\lambda^*$ : Inclinação da linha de compressão virgem  $\kappa^*$ : Inclinação da linha de descarga-recarga  $\nu^*$ : Coeficiente de Poisson para descarga  $c'$ : Coesão efetiva  $\phi'$ : Ângulo de fricção efetivo  $\psi$ : Ângulo de dilatação,  $K_x$ : Permeabilidade horizontal  $K_y$ : Permeabilidade vertical.

Os resultados evidenciam um material com coesão relativamente baixa ( $c'=10$  kN/m<sup>2</sup>) e atrito efetivo moderado ( $\phi'=28^\circ$ ), características típicas de rejeitos finos com fração significativa de silte e areia. Os índices de compressibilidade ( $\lambda^*=0,01214$  e  $\kappa^*=0,00729$ ) confirmam o comportamento altamente deformável, coerente com valores reportados por Vermeer e Brinkgreve (1995) e Schnaid (2012) para solos moles e rejeitos de granulometria fina.

A permeabilidade é anisotrópica, com  $K_y = 0,00864$  m/dia, superior a  $K_x = 0,00432$  m/dia, condição associada à drenagem preferencial no sentido vertical, também observada em ensaios de dissipação de poropressão. Essa representação é consistente com a literatura que discute o comportamento de depósitos finos e saturados (Lunne *et al.*, 1997; Mitchell e Soga, 2005).

De forma geral, a caracterização mostra que o rejeito apresenta elevada compressibilidade e baixa resistência, aspectos que justificam a adoção de um modelo constitutivo avançado para a

simulação. O *Soft Soil* foi selecionado por sua adequação a solos moles e rejeitos cuja resposta depende fortemente da história de tensões. Esse modelo baseia-se na linha de compressão virgem (NCL) e na linha de descarga-recarga (URL) no espaço  $e-\ln p'$ , permitindo representar a evolução da compressibilidade em função do estado de tensões e do coeficiente de pré-adensamento (Schanz; Vermeer; Bonnier, 1999). Além disso, a formulação captura de forma simplificada a dissipação de poropressões em análises acopladas hidráulico-mecânicas, o que é particularmente importante para rejeitos de granulometria fina. Segundo Brinkgreve (2015), o modelo *Soft Soil* é mais realista do que abordagens elásticas lineares para prever recalques de consolidação, pois incorpora a diferença entre os índices de compressão ( $\lambda^*$ ) e recompressão ( $\kappa^*$ ), fundamentais para representar o comportamento de rejeitos sedimentares.

No contexto da presente modelagem, a escolha do *Soft Soil* é sustentada tanto pela literatura (Schanz; Vermeer; Bonnier, 1999; Brinkgreve, 2015) quanto pelas recomendações do manual do próprio software (PLAXIS B.V., 2021), que indicam sua aplicação preferencial para materiais de baixa rigidez e alta compressibilidade, como é o caso dos rejeitos empregados no Projeto Candonga.

#### 4.4 Condições hidráulicas e de drenagem

As condições hidráulicas constituem aspecto central na resposta de geofôrmas, uma vez que controlam a geração inicial de pressões neutras e a subsequente dissipação durante o processo de desaguamento. No modelo numérico, a condição inicial foi definida com a linha freática posicionada no topo do rejeito ( $H = 1,80$  m), instruindo o programa a considerar o material totalmente saturado e estabelecer um campo hidrostático inicial de poropressões coerente com o estado de polpa recém-bombeada (PLAXIS B.V., 2021).

Durante o enchimento, a aplicação rápida da carga hidráulica gerou excesso de poropressão ( $\Delta u$ ) em relação ao estado inicial. Esse excesso não se dissipa de forma imediata devido à baixa condutividade hidráulica do rejeito, resultando em uma resposta de curto prazo predominantemente não drenada. A magnitude e a evolução desse  $\Delta u$  são fundamentais para a análise, pois refletem a interação hidráulico-mecânica do sistema e constituem variáveis de controle na instrumentação de campo. No caso do Projeto Candonga, piezômetros instalados no interior da geofôrma permitiram

registrar a variação temporal das poropressões, o que possibilitará a calibração e validação dos resultados numéricos.

A drenagem foi representada exclusivamente pelo invólucro geotêxtil, mantido como fronteira permeável ao longo de todo o seu contorno. O contorno em cor azul na malha numérica corresponde ao invólucro geotêxtil, pelo qual ocorre o escoamento da água intersticial, enquanto as partículas sólidas permanecem retidas e formam progressivamente o rejeito filtrado (Koerner, 2012; Aydilek e Edil, 2002). Para reproduzir esse comportamento, adotaram-se coeficientes de permeabilidade anisotrópicos consolidados para o Projeto Candonga ( $K_x = 0,00432$  m/dia;  $K_y = 0,00864$  m/dia), de modo que a razão  $K_y > K_x$  representa a drenagem preferencial vertical típica de rejeitos finos (Lunne *et al.*, 1997). Ainda que o modelo tenha utilizado valores constantes, a literatura enfatiza que a transmissividade do conjunto rejeito filtrado + geotêxtil evolui no tempo, reduzindo-se à medida que a camada superficial se adensa (Mitchell e Soga, 2005; Morais *et al.*, 2020). No presente estudo, porém, não havia uma função experimental  $kt(t)$  que permitisse parametrizar explicitamente essa variação temporal; por isso, adotou-se  $kt$  constante e a adequação dessa simplificação foi avaliada pela comparação direta entre a dissipação de  $\Delta u$  calculada e as leituras piezométricas de campo. Na etapa subsequente, a simulação de consolidação transiente permitiu avaliar a dissipação gradual do excesso de poropressão e os recalques associados, sendo conduzida até que as poropressões atingissem valores residuais da ordem de  $1 \text{ kN/m}^2$ ; no caso-base, esse critério foi alcançado ao final de 2,7 dias de consolidação, assegurando compatibilidade entre os mecanismos físicos de drenagem observados em campo e as previsões numéricas.

Na etapa subsequente, a simulação de consolidação transiente permitiu avaliar a dissipação gradual do excesso de poropressões e os recalques associados, assegurando compatibilidade entre os mecanismos físicos de drenagem observados em campo e as previsões numéricas. Portanto, a definição das condições hidráulicas e de drenagem buscou representar de forma fiel o comportamento da geofôrma, equilibrando simplicidade de implementação e rigor técnico. Esse enquadramento garante que a evolução das poropressões calculadas ao longo do tempo possa ser comparada diretamente às leituras piezométricas registradas em campo, fornecendo subsídios confiáveis para a avaliação do desempenho da técnica (Mitchell e Soga, 2005; PLAXIS B.V., 2021; Karstunen e Amavasai, 2017).

#### 4.5 Fases de simulação

A modelagem numérica em elementos finitos requer a decomposição do processo físico em fases sequenciais que representem, de forma simplificada, porém realista, as etapas de carregamento e de dissipação hidráulica. Essa estratégia permite acompanhar a resposta da geofôrma desde a condição imediatamente após o enchimento até a consolidação, observando-se a evolução das poropressões e das deformações. Em materiais finos e compressíveis, a dissipação do excesso de poropressão é um mecanismo central na transferência gradual de tensões para o esqueleto do material e no desenvolvimento do adensamento (Mitchell e Soga, 2005). Em sistemas confinados por geossintéticos, como tubos geotêxteis/geofôrmas, o controle da geração e da dissipação dessas poropressões condiciona diretamente a eficiência do desaguamento e a estabilidade do confinamento (Koerner, 2012). Neste trabalho,  $\Delta u$  é definido como o acréscimo (excesso) de poropressão associado ao carregamento hidráulico aplicado durante o enchimento, em relação à poropressão inicial (hidrostática) do meio, sendo um parâmetro frequentemente monitorado e utilizado na avaliação do desempenho hidráulico em aplicações com rejeitos (Moraes; Pelisser; Urashima, 2020).

No presente estudo, a sequência de simulação foi organizada em três fases principais:

- Fase 1. Condição inicial (pós-enchimento): geofôrma considerada preenchida até a altura de projeto e rejeito inicialmente saturado, com campo hidrostático de poropressões ( $u_0$ ) definido a partir da linha freática adotada no modelo.
- Fase 2. Enchimento hidráulico (carregamento rápido): representação do bombeamento/enchimento por meio da aplicação rápida do carregamento hidráulico, gerando um excesso de poropressão ( $\Delta u$ ) em relação a  $u_0$ ; o campo de  $\Delta u$  ao final desta fase é tomado como condição inicial para a etapa de consolidação.
- Fase 3. Consolidação transiente (fluxo-deformação): dissipação progressiva de  $\Delta u$  e desenvolvimento dos recalques associados, com drenagem conforme as condições de contorno definidas no invólucro geotêxtil, até a quase completa dissipação do excesso de poropressão.

#### 4.5.1 Fase inicial

Nesta fase, o enchimento da geofôrma foi representado em uma única etapa, ativando-se todo o volume de rejeito até a altura de 1,80 m, bem como o invólucro geotêxtil (contorno azul). Para estabelecer a condição hidráulica inicial, o nível d'água (linha freática) foi definido no limite superior da geometria preenchida, isto é, no topo do material contido no interior da geofôrma, assumindo-se o preenchimento inicialmente saturado. Com isso, foi calculado o campo hidrostático inicial de poropressões e o estado de tensões devido ao peso próprio em equilíbrio quase-estático (PLAXIS B.V., 2021).

A opção por representar o enchimento em ativação monobloco é compatível com o objetivo desta etapa, que consiste em definir uma condição inicial saturada e mecanicamente equilibrada. Ressalta-se que, no Projeto Candonga, o enchimento foi realizado em múltiplas etapas com períodos de pausa para drenagem; entretanto, no presente modelo o enchimento foi idealizado em uma única etapa, de modo a padronizar a condição de partida e concentrar a análise na fase subsequente de dissipação transiente das poropressões e desenvolvimento de recalques. Em modelagens por elementos finitos, essa simplificação é usual quando a subdivisão do carregamento em múltiplos subpassos não produz alterações relevantes nas variáveis de interesse da fase inicial. Para verificar essa hipótese, realizou-se um teste comparativo com aplicação do enchimento em subpassos, não se observando variações significativas no campo inicial de poropressões nem nos deslocamentos imediatamente após o enchimento; assim, manteve-se a ativação monobloco por reduzir o custo computacional e padronizar a condição de partida (Potts e Zdravković, 2001; PLAXIS B.V., 2021).

A Figura 4.5 ilustra essa configuração inicial: geofôrma preenchida até 1,80 m, linha freática no topo e contorno azul representando o geotêxtil.

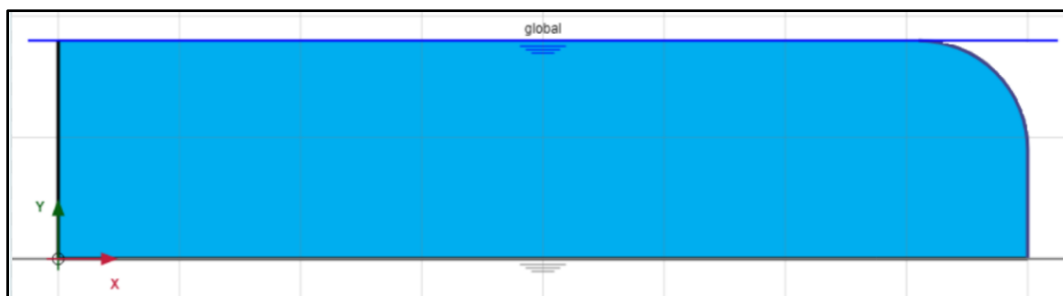


Figura 4.5 - Geofôrma preenchida até 1,80 m com rejeito saturado e linha freática no topo.

#### 4.5.2 Desenvolvimento das poropressões

Após o enchimento inicial descrito no item 4.5.1, estabeleceram-se as condições de drenagem através do geotêxtil, caracterizando o início da resposta hidráulica da geofôrma. A ativação dessa fronteira permeável resultou na geração de poropressões adicionais ( $\Delta u$ ) em relação ao campo hidrostático inicial. Esse comportamento é típico de rejeitos finos e de baixa permeabilidade, nos quais a água intersticial não consegue fluir de forma imediata, produzindo uma condição inicial predominantemente não drenada (Terzaghi *et al.*, 1996; Mitchell e Soga, 2005).

A magnitude e a distribuição de  $\Delta u$  são controladas pela altura de enchimento ( $H = 1,80$  m), pelas propriedades de compressibilidade e pela anisotropia de permeabilidade do rejeito, além da rigidez à tração do geotêxtil. Ensaio instrumentados em geofôrmas reais demonstram que, logo após o enchimento, os piezômetros registram incrementos significativos de pressão intersticial, que passam a ser a variável crítica para a avaliação da dissipação subsequente (Lawson, 2008; Morais *et al.*, 2020).

A Figura 4.6 apresenta o resultado desta etapa, evidenciando a distribuição de poropressões no interior da geofôrma. Foi observado que os maiores valores estão concentrados na zona central e

inferior do rejeito, enquanto o campo de gradientes hidráulicos indica o fluxo radial de água em direção ao geotêxtil, representado pelo contorno azul, que atua como fronteira drenante.

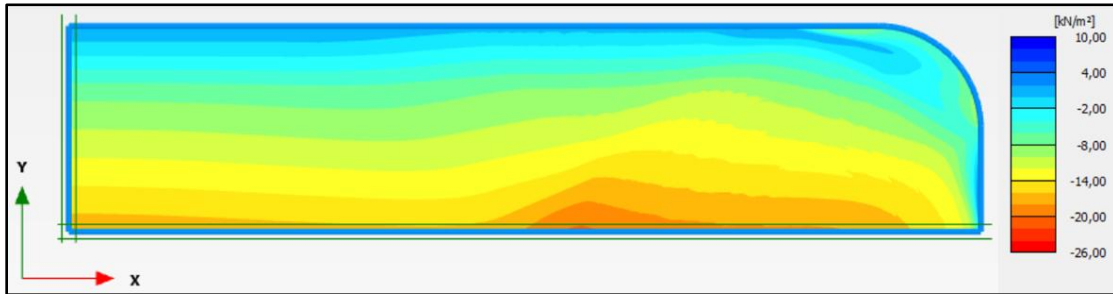


Figura 4.6 - Distribuição inicial de poropressões ( $\Delta u$ ) no interior da geofôrma

Assim, esta etapa estabelece a condição inicial de  $\Delta u$  que condiciona a evolução dos recalques e a eficiência do desaguamento, servindo de base para a análise de consolidação.

#### 4.5.3 Etapa de consolidação

Concluída a etapa de geração de poropressões, deu-se início à simulação da consolidação hidráulico-mecânica do rejeito confinado na geofôrma. Esse processo foi modelado como transiente, permitindo acompanhar a dissipação progressiva do excesso de poropressão ( $\Delta u$ ) ao longo do tempo e sua conversão gradual em tensões efetivas, conforme estabelecido pela teoria clássica de consolidação (Mitchell e Soga, 2005).

O critério de encerramento adotado para esta etapa consistiu em conduzir o cálculo até que o excesso de poropressão ( $\Delta u$ ) atingisse valores residuais da ordem de  $1 \text{ kN/m}^2$  ( $\approx 1 \text{ kPa}$ ) no domínio de interesse. Esse limiar foi adotado como critério numérico prático para caracterizar uma condição quase drenada, pois (i) representa um valor pequeno quando comparado aos picos de  $\Delta u$  gerados imediatamente após o enchimento e (ii) evita prolongar o tempo de cálculo quando as variações adicionais de  $\Delta u$  e de recalque tornam-se desprezíveis. Para reforçar a consistência desse encerramento, recomenda-se também verificar que a evolução dos recalques nos últimos incrementos de tempo é pequena, confirmando a estabilização da resposta (Schanz *et al.*, 1999; Brinkgreve, 2015).

Durante essa etapa, a resposta do modelo refletiu os mecanismos físicos esperados:

- Redução gradual de  $\Delta u$  com fluxos direcionados ao geotêxtil
- Aumento correspondente das tensões efetivas no rejeito
- Desenvolvimento de recalques verticais associados ao adensamento. Estudos prévios em geotubos instrumentados confirmam esse comportamento, relatando correlação direta entre a dissipação das poropressões e a estabilização das deformações ao longo do tempo (Lawson, 2008; Morais *et al.*, 2020).

A Figura 4.7 apresenta o resultado do modelo ao término da etapa de consolidação. Observa-se a dissipação quase completa das poropressões no interior do rejeito, com valores residuais inferiores a 1 kN/m<sup>2</sup>, compatíveis com a condição drenada de equilíbrio. As isolinhas de poropressão evidenciam um campo hidráulico progressivamente mais uniforme, indicando que o escoamento da água ocorre predominantemente em direção ao contorno drenante representado pelo geotêxtil, que atua como fronteira hidráulica do modelo. Essa configuração confirma que a dissipação das poropressões se dá por fluxo dirigido à interface permeável, com redução gradual dos gradientes hidráulicos à medida que o sistema se aproxima da condição estabilizada.

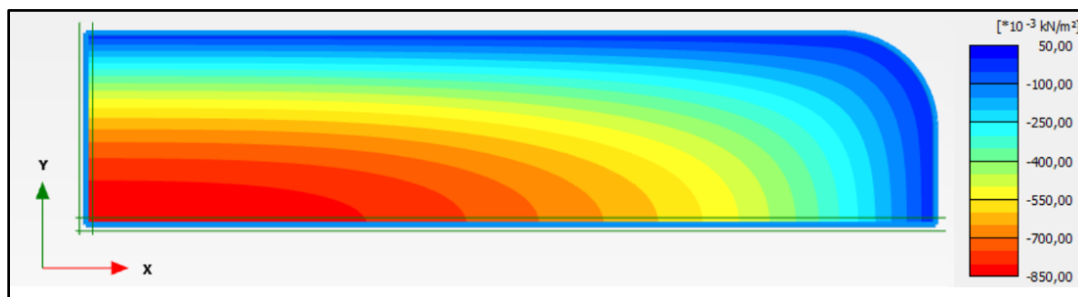


Figura 4.7 - Estado final da geofôrma ao término da consolidação: dissipação das poropressões até valores residuais.

#### 4.6 Critérios de análise e saídas do modelo

As análises numéricas realizadas foram conduzidas considerando que o modelo representava apenas metade da seção transversal da geofôrma, explorando a condição de simetria. Dessa forma, todas as leituras foram extraídas no lado esquerdo do domínio, em pontos equivalentes à instrumentação instalada na geofôrma de campo.

Três grandezas principais foram monitoradas:

- Poropressões ( $u$ ): registradas na base do rejeito, em pontos internos junto à fundação, de forma a acompanhar a geração do excesso de poropressão ( $\Delta u$ ) imediatamente após o enchimento (fim da etapa de carregamento hidráulico) e a sua dissipação ao longo da consolidação. Esses resultados são diretamente comparáveis às leituras fornecidas pelos piezômetros instalados no protótipo experimental.
- Deformações do geotêxtil: acompanhadas na região média da seção, representando os deslocamentos laterais do tubo e a variação geométrica do seu contorno. Essa leitura numérica corresponde às medidas realizadas por extensômetros acústicos em campo, permitindo avaliar a compatibilidade entre a rigidez axial ( $EA$ ) adotada no modelo e a resposta observada no protótipo (Koerner, 2012; Lawson, 2008).
- Recalques verticais ( $s$ ): avaliados no ponto central do rejeito, ao longo do eixo de simetria, constituindo a medida de referência para o adensamento global. Essa variável será comparada com os deslocamentos observados por instrumentação instalada.

A escolha dessas variáveis está alinhada ao procedimento experimental e visa garantir a consistência entre simulação numérica e observações de campo. No Capítulo 5, os resultados calculados serão confrontados com as séries temporais instrumentais, permitindo avaliar o grau de correspondência entre o modelo e o comportamento real da geofôrma.

O modelo numérico desenvolvido neste capítulo foi concebido para representar o experimento de campo realizado na geofôrma instalada no reservatório da UHE Risoleta Neves (Candongá), cuja caracterização encontra-se apresentada no Capítulo 3. Para fins de contextualização, a Figura 4.8 ilustra o arranjo esquemático da instrumentação utilizada no ensaio real, destacando a posição dos piezômetros (PA-01, PA-02 e PA-03) e dos extensômetros acústicos (EA-01, EA-02 e EA-03) fixados no invólucro da geofôrma.



Figura 4.8. Localização da instrumentação em planta na geofôrma de teste (modificado - Terratek, 2016)

Esse arranjo permitiu monitorar, em campo, a evolução das poropressões e das deformações, fornecendo dados essenciais para a calibração e a avaliação da consistência do modelo numérico. Considerando que, na modelagem, o enchimento foi idealizado em uma única etapa, a comparação foi estabelecida a partir de instantes equivalentes, destacando-se a condição imediatamente após o enchimento (pico de  $\Delta u$ ) e a dissipação progressiva das poropressões durante a consolidação/drenagem. A concordância entre as tendências obtidas numericamente e as leituras de piezômetros e extensômetros em campo indica boa aderência do modelo adotado para interpretar o comportamento hidráulico e deformacional de geofôrmas em escala real.

A Tabela 4.2 apresenta um resumo dos principais parâmetros adotados nas análises numéricas desenvolvidas neste trabalho, incluindo propriedades do rejeito de mineração, do geotêxtil da geofôrma, da geometria do modelo e das condições hidráulicas impostas. A inclusão dessa tabela tem por objetivo sistematizar os valores efetivamente utilizados nas simulações, facilitando a reprodutibilidade do modelo e a rastreabilidade das hipóteses adotadas.

Tabela 4.2 - Tabela resumo com os parâmetros utilizados nas análises numéricas.

Material / Elemento	Parâmetro	Símbolo	Valor adotado
Rejeito de mineração	Peso específico não saturado	$Y_{unsat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	17
	Peso específico saturado	$Y_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	17,6
	Coesão efetiva	$c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	10

Material / Elemento	Parâmetro	Símbolo	Valor adotado
	Ângulo de atrito efetivo	$\phi'$ ( $^{\circ}$ )	28
	Ângulo de dilatância	$\psi$ ( $^{\circ}$ )	0
	Parâmetro de compressibilidade	$\lambda^*$	0,01214
	Parâmetro de recompressão	$\kappa^*$	0,00729
	Coefficiente de Poisson	$\nu^*$	0,15
	Permeabilidade horizontal	$K_x$ (m/dia)	0,00432
	Permeabilidade vertical	$K_y$ (m/dia)	0,00864
<b>Geotêxtil da geofôrma</b>	Rigidez axial	$EA_1$ (kN/m)	92
	Tipo de elemento no Plaxis	–	Geogrid
<b>Geometria</b>	Altura da geofôrma cheia	H (m)	1,80
	Comprimento	(m)	50,0
	Largura	W (m)	8
	Condição de análise	–	Deformação plana
<b>Condições hidráulicas</b>	Contorno da geofôrma	–	Drenante
	Superfície superior	–	Não drenante
	Base	–	Impermeável

Os parâmetros geotécnicos do rejeito de mineração foram definidos com base nos dados experimentais disponíveis no Relatório Técnico da Terratek (2016) e na caracterização discutida nos Capítulos 2 e 3. Os pesos específicos não saturado e saturado refletem as condições medidas em campo e em laboratório para o rejeito fino utilizado no ensaio em Candonga. Os parâmetros de resistência e compressibilidade foram selecionados de modo a representar um material fino saturado, compatível com a aplicação do modelo constitutivo Soft Soil, conforme fundamentado na revisão bibliográfica e na etapa de definição do modelo numérico.

Os valores de permeabilidade horizontal ( $K_x$ ) e vertical ( $K_y$ ) adotados correspondem ao conjunto de parâmetros hidráulicos consolidado para o Projeto Candonga, obtido a partir de correlações com ensaios de piezocone (CPTU) e complementado por ensaios laboratoriais, conforme documentado nos relatórios técnicos do empreendimento (Terratek, 2016). Em particular, a interpretação do

CPTU inclui estágios de dissipação de poropressão, procedimento que permite estimar coeficientes de permeabilidade em diferentes profundidades (Lunne *et al.*, 1997; Robertson, 2012). Além disso, a ordem de grandeza desses valores é compatível com resultados reportados em estudos experimentais e instrumentados sobre desaguamento de materiais finos em estruturas confinadas por geossintéticos (Cantré, 2002; Gaffney *et al.*, 1999; Castro, Guimarães e Urashima, 2008; Morais, Pelisser e Urashima, 2020).

No que se refere ao geotêxtil da geofôrma, a rigidez axial equivalente ( $EA_1 = 92 \text{ kN/m}$ ) foi definida a partir dos resultados dos ensaios de tração reportados pela Terratek (2016), conforme discutido no Capítulo 3. A representação do geotêxtil por meio de elemento do tipo *Geogrid* no PLAXIS é coerente com a função estrutural do material, que atua predominantemente à tração, sem contribuição significativa de rigidez à flexão.

Os parâmetros geométricos do modelo, como altura e largura da seção, foram definidos a partir das dimensões reais da geofôrma ensaiada em Candonga, garantindo a representatividade geométrica da simulação. As condições hidráulicas de contorno base impermeável, superfície superior não drenante e contorno lateral drenante associado ao geotêxtil foram impostas de modo a reproduzir as condições físicas do ensaio em campo, conforme descrito no Capítulo 3.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

---

### 5.1 Considerações iniciais

Os resultados apresentados neste capítulo correspondem às saídas do modelo numérico em elementos finitos descrito no Capítulo 4, abrangendo a evolução das poropressões e dos deslocamentos verticais no coroamento ao longo da etapa de enchimento (ativação monobloco) e da consolidação da geofôrma. Essas variáveis foram selecionadas por representarem diretamente os mecanismos essenciais de desempenho do sistema, notadamente a geração e a dissipação de  $\Delta u$  e o adensamento do rejeito confinado (Mitchell e Soga, 2005; Koerner, 2012).

A interpretação dos resultados numéricos é conduzida à luz das observações de campo obtidas no experimento em escala real da geofôrma-teste de Candonga. Nesse ensaio, piezômetros acústicos permitiram acompanhar a evolução temporal das poropressões internas, enquanto extensômetros registraram os deslocamentos verticais no coroamento. A comparação entre simulação e instrumentação não tem como objetivo reproduzir exatamente cada valor medido, mas sim verificar se o modelo representa, com coerência física, a ordem de grandeza e as tendências evolutivas das grandezas monitoradas (Lawson, 2008; Morais *et al.*, 2020). Essa abordagem é compatível com o uso de modelos numéricos conceituais aplicados a sistemas hidráulico-mecânicos acoplados.

Deve-se destacar que o modelo incorpora simplificações inerentes às hipóteses assumidas: (i) representação bidimensional de um problema tridimensional; (ii) consideração de meia seção por simetria na largura da geofôrma (Eco-Bag); (iii) simplificação da evolução do rejeito filtrado; e (iv) adoção de valores médios de permeabilidade e compressibilidade. Essas idealizações não invalidam o modelo, mas devem ser consideradas na interpretação dos resultados e na extrapolação para condições operacionais em escala real (Schanz *et al.*, 1999; Brinkgreve, 2015).

Dessa forma, o capítulo é organizado em três partes: (i) evolução das poropressões, (ii) deslocamentos verticais no coroamento e (iii) uma síntese integrada dos resultados. A discussão busca demonstrar a coerência física do modelo, seu alinhamento com as tendências observadas em campo e as implicações para o uso de geofôrmas no confinamento e desaguamento de rejeitos de mineração.

## 5.2 Poropressões

A análise da evolução das poropressões no interior da geofôrma constitui uma etapa central deste estudo, uma vez que o comportamento de  $\Delta u$  está diretamente associado à eficiência hidráulica do sistema e ao processo de adensamento do rejeito. No modelo numérico, o excesso de poropressão ( $\Delta u$ ) foi extraído em pontos internos ao longo do eixo de simetria, em posições equivalentes às cotas dos piezômetros PA-01 (região inferior), PA-02 (intermediária) e PA-03 (superior). Para fins de comparação direta com o comportamento crítico logo após o enchimento, o ponto inferior (equivalente ao PA-01) foi adotado como referência principal, por concentrar os maiores valores de  $\Delta u$ .

A Figura 5.1 mostra a dissipação de  $\Delta u$  obtida no modelo numérico ao longo dos primeiros 2,7 dias. A sobrepressão inicial, de aproximadamente 10,9 kN/m<sup>2</sup>, reduz-se rapidamente no primeiro dia, atingindo cerca de 3,5 kN/m<sup>2</sup> em torno de 1,0 dia e aproximando-se de 1 kN/m<sup>2</sup> ao final da simulação. Esse comportamento segue um padrão quase exponencial, coerente com a resposta hidráulica esperada para rejeitos finos sob condição de drenagem radial limitada. A tendência é compatível com a teoria clássica de consolidação (Mitchell e Soga, 2005) e com resultados experimentais observados em estudos de filtração e drenagem com geotêxteis (Aydilek e Edil, 2002).

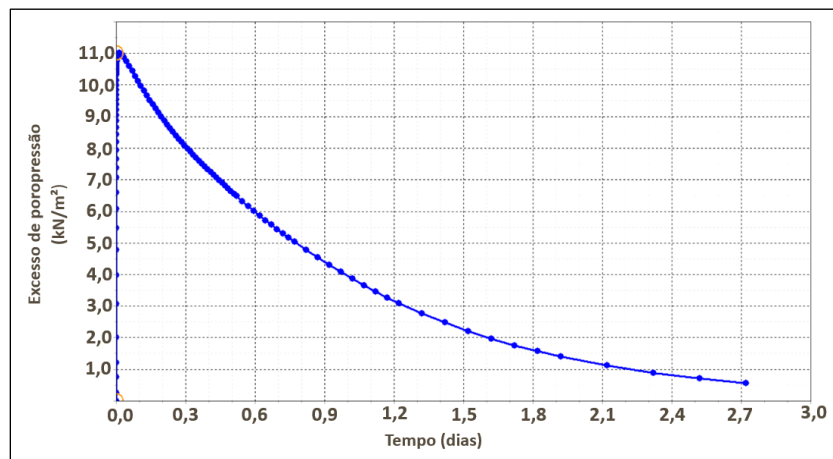


Figura 5.1 - Dissipação de poropressão

A Figura 5.2 apresenta as leituras obtidas em campo. Embora os valores absolutos sejam mais dispersos que aqueles do modelo numérico, observa-se uma tendência global semelhante: picos de pressão logo após o enchimento, seguidos por redução progressiva ao longo do tempo. As

diferenças entre sensores são atribuídas à heterogeneidade do enchimento, à variação de temperatura e às condições locais de instalação, conforme registrado no relatório técnico e de Candonga (Terratek, 2016). Esse tipo de flutuação é comum em instrumentações de estruturas hidráulicas e sistemas geossintéticos (Lawson, 2008).

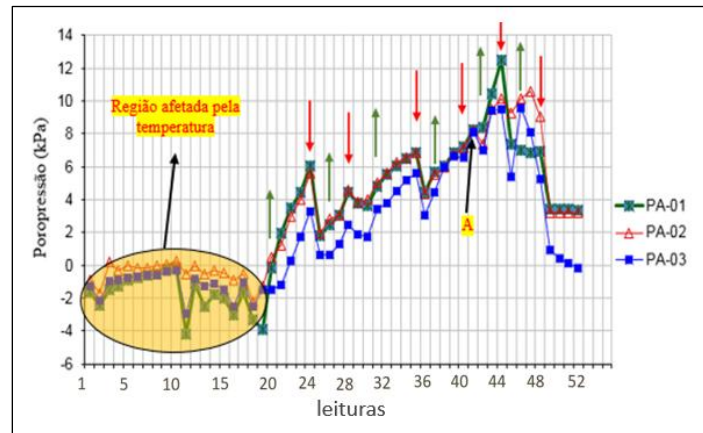


Figura 5.2 - Leituras de poropressões registradas pelos piezômetros acústicos (modificado - Terratek, 2016)

Ao longo do monitoramento foram realizadas 52 leituras em 18 dias. O início do enchimento da geofôrma ocorreu no dia 12 (leitura 24), sendo que as leituras anteriores correspondem ao período de instalação e estabilização dos instrumentos, no qual se observam oscilações atribuídas, em parte, à influência de variações de temperatura nas leituras dos piezômetros.

A Figura 5.3 apresenta a comparação entre as leituras de excesso de poropressão ( $\Delta u$ ) obtidas em campo nos piezômetros acústicos PA-01, PA-02 e PA-03 instalados ao longo do comprimento da geofôrma e os resultados do modelo numérico. Durante o enchimento executado por etapas, observa-se incremento progressivo de  $\Delta u$  nas leituras de campo, com oscilações compatíveis com a natureza incremental do carregamento e com variações operacionais do bombeamento.

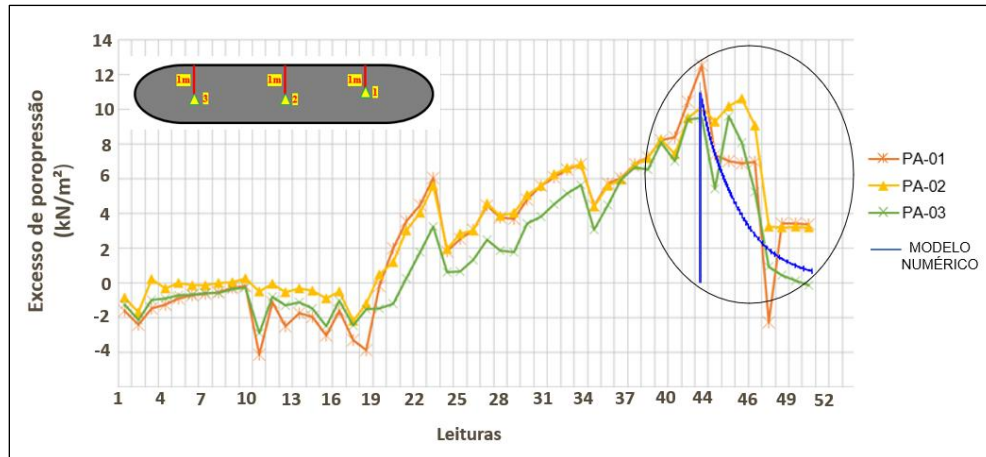


Figura 5.3. Evolução do excesso de poropressão - leituras de campo e resultado do modelo numérico

Conforme indicado, o término do enchimento ocorreu na leitura 44; a partir desse ponto, inicia-se a fase de dissipação, com redução acentuada do excesso de poropressão ( $\Delta u$ ) em direção a valores residuais. A figura reúne as séries dos piezômetros acústicos PA-01, PA-02 e PA-03, evidenciando que, durante o enchimento por etapas, as leituras apresentam flutuações associadas às condições reais de operação e ao próprio processo construtivo. Para fins de comparação com o modelo numérico, adotou-se como referência o piezômetro PA-01, instalado na região inferior (basal) da geofôrma, por dois motivos principais: (i) trata-se do ponto em que se esperam os maiores valores de excesso de poropressão ( $\Delta u$ ) logo após o enchimento, devido à maior coluna de material sobrejacente e ao maior confinamento hidráulico; e (ii) sua posição é a mais compatível com a representação em meia seção por simetria, uma vez que o ponto equivalente no modelo está localizado no interior do rejeito, próximo à região central da seção modelada, onde o fluxo de saída ocorre predominantemente através do contorno geotêxtil. Assim, PA-01 fornece uma referência mais conservadora para avaliar o pico inicial de  $\Delta u$  e a tendência de dissipação subsequente. Observa-se que o pico de  $\Delta u$  em campo no PA-01 atinge 12,51 kN/m<sup>2</sup>, ao passo que o modelo numérico fornece um valor máximo de 10,99 kN/m<sup>2</sup>. Após o término do enchimento (a partir da leitura 44), ambas as respostas passam a apresentar tendência de dissipação progressiva, sendo que diferenças na fase de geração de  $\Delta u$  são esperadas, sobretudo porque o enchimento real ocorreu por etapas, enquanto no modelo a geofôrma foi preenchida em etapa única.

### 5.3 Deslocamentos verticais da geofôrma

A evolução dos deslocamentos verticais no coroamento da geofôrma foi analisada a partir dos resultados numéricos no ponto representativo do coroamento (ponto A), com o objetivo de quantificar o recalque associado ao enchimento (ativação monobloco) e, principalmente, à dissipação transiente do excesso de poropressão ( $\Delta u$ ) durante a consolidação.

A Figura 5. apresenta a evolução do deslocamento vertical ( $U_y$ ) no ponto central do coroamento (ponto A). Observa-se um deslocamento imediato de aproximadamente 14 mm na condição imediatamente após o enchimento, seguido por aumento gradual associado à consolidação, atingindo cerca de 16 mm em torno de 0,3 dia, 18 - 19 mm próximo de 1,0 dia e aproximadamente 20 mm ao final de 2,7 dias. Esse horizonte de simulação corresponde ao critério de encerramento adotado no modelo ( $\Delta u$  residual da ordem de 1 kN/m<sup>2</sup>), a partir do qual a dissipação adicional de poropressões e o incremento de recalque tornam-se pouco significativos. Assim, não se estendeu a análise para tempos mais longos (por exemplo, 10 ou 30 dias) nesta etapa, uma vez que o objetivo principal foi reproduzir a janela inicial de dissipação e deformação observada no monitoramento de campo após o enchimento.

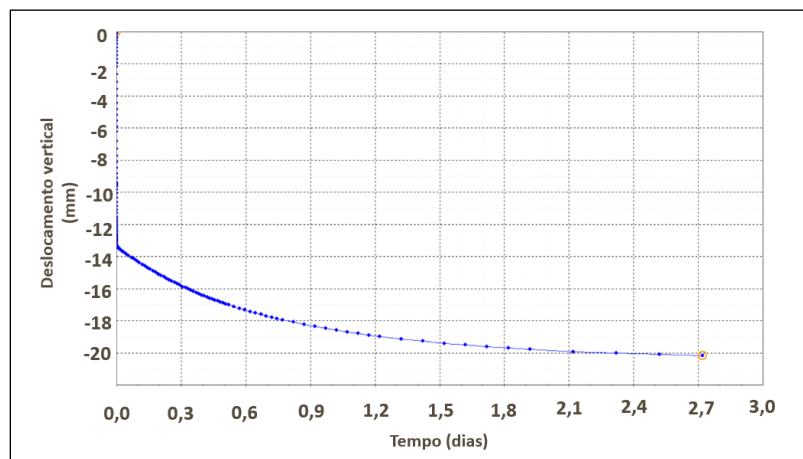


Figura 5.4 - Deslocamentos verticais obtidos no modelo numérico

Ressalva importante sobre a instrumentação de campo: no ensaio monitorado em Candonga, os extensômetros acústicos foram instalados na superfície superior do geotêxtil, com orientações distintas em relação ao eixo longitudinal do Eco-BAG, de modo que as leituras representam deslocamentos relativos associados à deformação/mobilização da manta geotêxtil.

### 5.3.1 Leituras dos extensômetros acústicos

No ensaio monitorado em Candonga, os extensômetros acústicos foram instalados na superfície superior do geotêxtil, com orientações distintas em relação ao eixo longitudinal da geofôrma, de modo que as leituras representam deslocamentos relativos associados à mobilização da manta geotêxtil. Assim, tais leituras não devem ser interpretadas como recalque global do conjunto, mas como resposta local/direcional do geotêxtil durante os ciclos de enchimento e drenagem.

A Figura 5.5 apresenta as leituras registradas pelos extensômetros acústicos (EA-01, EA-02 e EA-03) ao longo do monitoramento, evidenciando a variabilidade entre posições e orientações.

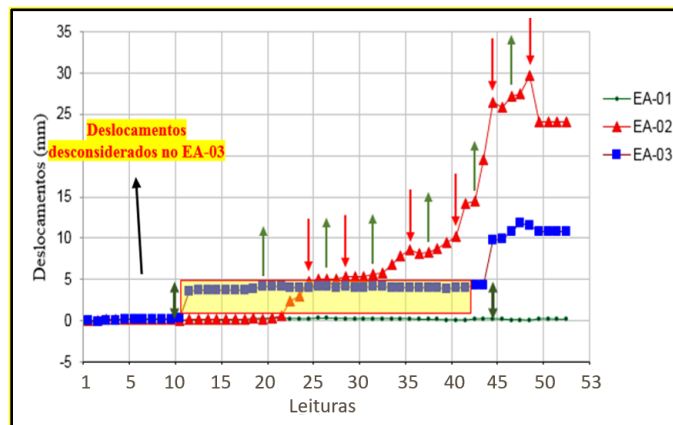


Figura 5.5 - Leituras de extensômetros acústicos no ensaio de campo (modificado – Terratek, 2016)

### 5.3.2 Comparação entre deformações no geotêxtil: modelo numérico versus campo

A Figura 5.6 apresenta a comparação entre as deformações específicas no geotêxtil obtidas no modelo numérico e aquelas medidas em campo pelo extensômetro acústico EA-01, instalado na superfície superior do geotêxtil e inclinado a 45° em relação ao eixo longitudinal da geofôrma. O EA-01 foi adotado como série de referência por estar localizado no coroamento (região mais representativa da mobilização global do invólucro) e por fornecer uma medida menos influenciada por efeitos localizados e por variações operacionais pontuais, permitindo uma comparação direta com a deformação do elemento Geogrid extraída na região superior do contorno. As leituras dos extensômetros EA-02 e EA-03 são apresentadas na Figura 5.5 para evidenciar a variabilidade associada às diferentes orientações de instrumentação e às condições operacionais do enchimento; contudo, não foram utilizadas como referência principal de validação, pois sua interpretação exige

cautela em um modelo 2D em deformação plana, no qual não se capturam efeitos tridimensionais e heterogeneidades locais ao longo do comprimento da geofôrma.

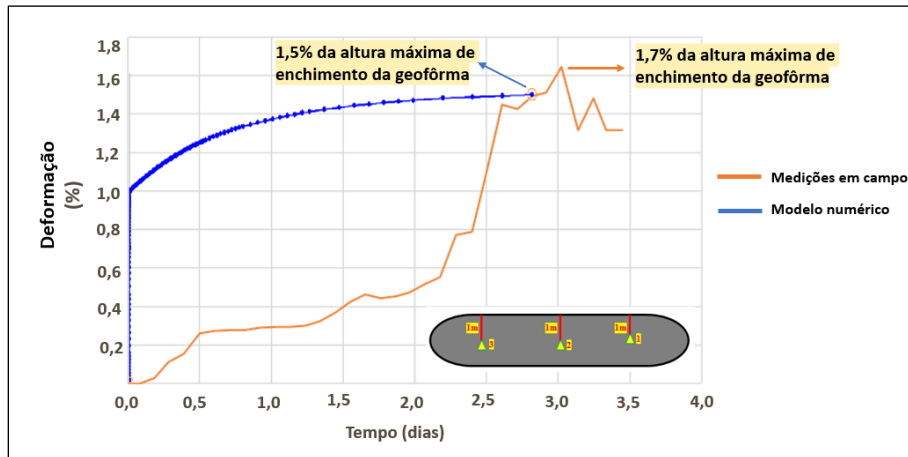


Figura 5.6. Comparação do deslocamento vertical ao longo do tempo

Observa-se que, ao longo do período de enchimento, a deformação no modelo numérico aumenta de forma contínua e suavizada, atingindo aproximadamente 1,5% na condição próxima ao término do enchimento.

Em campo, a curva do EA-01 apresenta crescimento progressivo com incrementos associados às etapas de carregamento, alcançando um pico da ordem de 1,7%, seguido de oscilações pontuais, compatíveis com a natureza incremental do enchimento e com variações operacionais do processo. Em termos de ordem de grandeza, a proximidade entre os valores máximos obtidos no modelo (1,5%) e em campo (1,7%) indica que o modelo numérico reproduz adequadamente o nível de mobilização do geotêxtil durante o enchimento, embora diferenças na forma das curvas sejam esperadas devido às idealizações do modelo e à variabilidade inerente do comportamento em campo.

#### 5.4 Deslocamento horizontal na geofôrma

A resposta em deslocamento horizontal ( $u_x$ ) ao longo do tempo mostrou-se limitada no interior da meia-seção modelada, com valores muito reduzidos nas proximidades da linha de simetria ( $x_{min}$ ), em conformidade com a condição de contorno imposta ( $u_x = 0$ ). A evolução temporal indica que, após o início do enchimento, ocorre um rápido ajuste inicial, seguido por estabilização progressiva

durante a etapa de consolidação, atingindo um valor máximo da ordem de 0,031 m ao final do período analisado.

A Figura 5.7 apresenta a evolução temporal do deslocamento horizontal  $u_x$  no modelo numérico, evidenciando a rápida mobilização inicial e a posterior tendência à estabilização.

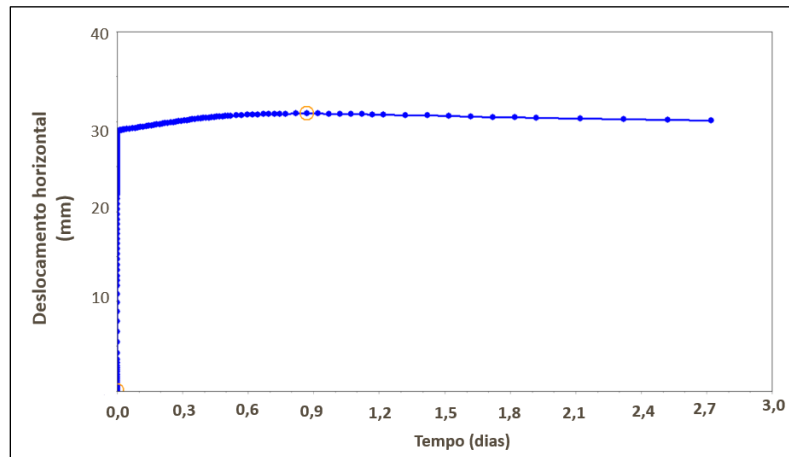


Figura 5.7. Evolução do deslocamento horizontal  $u_x$  ao longo do tempo no modelo numérico.

A fim de visualizar a distribuição espacial do deslocamento horizontal ao final da etapa de consolidação, a Figura 5.8 apresenta os contornos de  $u_x$  no domínio modelado, destacando as maiores magnitudes próximas ao arco externo do contorno geotêxtil e valores reduzidos junto ao eixo de simetria, conforme esperado pela restrição imposta.



Figura 5.8 - Contornos de deslocamento horizontal  $u_x$  ao final da etapa de consolidação

Do ponto de vista de ordem de grandeza, o valor máximo obtido numericamente ( $u_x \text{ max} = 31 \text{ mm}$ ) corresponde a aproximadamente 0,38% da meia-largura da seção modelada (8 m), o que confirma a baixa mobilização lateral global do sistema para as condições simuladas. Esse resultado é consistente com a rigidez à tração do geotêxtil, que restringe a expansão radial, e com a

predominância do mecanismo deformacional associado ao recalque vertical durante a dissipação do excesso de poropressão. Ressalta-se, entretanto, que no ensaio instrumentado de Candonga o monitoramento foi realizado por meio de piezômetros e extensômetros acústicos instalados na manta, os quais fornecem deslocamentos relativos/direcionais associados à mobilização do geotêxtil, não havendo registro direto de deslocamentos horizontais globais do contorno da geofôrma para fins de validação específica de  $u_x$ . Assim, os resultados de  $u_x$  são apresentados como saída complementar para caracterização do modo de deformação previsto pelo modelo e sua coerência com as condições de contorno adotadas.

## 5.5 Análise integrada dos resultados

A análise integrada dos resultados obtidos permite avaliar, de maneira consistente, a convergência entre o comportamento previsto pelo modelo numérico e as leituras de campo realizadas na geofôrma-teste do projeto Candonga, desde que a comparação seja conduzida entre grandezas físicas equivalentes, isto é, comparando variáveis hidráulicas entre si e variáveis deformacionais entre si.

Do ponto de vista hidráulico, a resposta simulada reproduziu adequadamente a dissipação do excesso de poropressão ( $\Delta u$ ) após o enchimento, com redução progressiva ao longo do período analisado. Esse comportamento é compatível com o adensamento primário controlado pela permeabilidade do rejeito e pela eficiência drenante do sistema geotêxtil + rejeito filtrado, em consonância com os princípios clássicos de consolidação discutidos por Mitchell e Soga (2005) e com evidências experimentais de filtração em sistemas geotêxtil-polpa reportadas por Aydilek e Edil (2002). As leituras piezométricas de campo apresentaram a mesma ordem de grandeza e tendência global, ainda que com maior dispersão, atribuída à heterogeneidade do enchimento, particularmente construtiva, e às condições de instrumentação. Além disso, aplicações reais com unidades de contenção em geotêxtil indicam que a resposta hidráulica tende a ser espacialmente variável, com gradientes mais elevados em regiões próximas às extremidades e aos bocais de enchimento, o que pode não ser capturado integralmente em uma análise 2D idealizada (Terratek, 2016; Lawson, 2008). Assim, a concordância global entre modelo e campo indica que a hipótese de permeabilidade adotada e as condições drenantes impostas ao contorno do geotêxtil foram suficientes para representar a dissipação de  $\Delta u$  no período avaliado.

Do ponto de vista deformacional, é fundamental explicitar que as grandezas disponíveis para comparação em campo se referem às deformações medidas no invólucro geotêxtil pelos extensômetros acústicos, enquanto o recalque vertical ( $U_y$ ) obtido no modelo representa o deslocamento do coroamento no ponto A e não possui, neste estudo, uma medição de campo estritamente equivalente para validação direta. Em particular, embora o modelo preveja um recalque vertical acumulado que se estabiliza em torno de 20 mm ao final do período analisado, os extensômetros acústicos (EA-01, EA-02 e EA-03) não medem recalque absoluto do coroamento; eles registram deslocamentos relativos/direcionais associados à mobilização do geotêxtil na superfície superior da geofôrma, em orientações distintas em relação ao eixo do tubo.

Dessa forma, a comparação deformacional deve ser estabelecida entre (i) as deformações no geotêxtil previstas no modelo (por exemplo, deformação axial/strain no elemento Geogrid ao longo de trajetórias equivalentes às orientações instrumentadas) e (ii) as deformações relativas registradas pelos extensômetros. Nessa perspectiva, apesar de o enchimento real ter ocorrido por etapas, gerando flutuações nas séries instrumentais, o modelo — com enchimento idealizado — reproduz a tendência global de mobilização e estabilização das deformações após o término do enchimento, o que é coerente com a evolução temporal observada em campo (Terratek, 2016).

Quanto às deformações horizontais ( $u_x$ ), os resultados numéricos indicaram valores reduzidos na maior parte da meia-seção, com concentrações localizadas próximas ao arco externo, onde a curvatura impõe maior relaxação radial. Esse padrão é compatível com o comportamento esperado de unidades de contenção em geotêxtil, nas quais a mobilização à tração tende a restringir a expansão lateral e a favorecer a drenagem/deformação predominante no sentido vertical (Koerner, 2012; Lawson, 2008). Como não houve medições específicas de campo de  $u_x$  para comparação, esses resultados devem ser interpretados como indicativos do mecanismo de deformação, e não como validação direta.

De modo geral, a integração entre as variáveis simuladas e as observações de campo evidencia que, embora o modelo 2D incorpore simplificações inerentes à representação bidimensional, ele reproduz de maneira coerente as tendências globais de drenagem e deformação do sistema. Esses resultados reforçam a utilidade da modelagem numérica como ferramenta de apoio ao projeto e ao monitoramento de geofôrmas em escala real, desde que a calibração e a validação sejam conduzidas

com consistência física e metrológica entre os parâmetros comparados (Lawson, 2008; Koerner, 2012).

## 5.6 Considerações finais do capítulo

Os resultados apresentados ao longo deste capítulo demonstram que a modelagem numérica foi capaz de representar, de forma fisicamente coerente, os mecanismos predominantes de comportamento hidráulico e deformacional da geofôrma. A dissipação do excesso de poropressão ( $\Delta u$ ) seguiu o padrão típico de adensamento primário, caracterizado por uma queda acentuada logo após o enchimento, seguida de uma fase de redução mais lenta, comportamento amplamente descrito na literatura clássica de consolidação (Mitchell e Soga, 2005; Terzaghi; Peck; Mesri, 1996). As curvas numéricas mantiveram ordem de grandeza e tendência global consistentes com as leituras piezométricas obtidas na geofôrma de Candonga (Terratek, 2016), ainda que os dados experimentais apresentem maior dispersão devido às condições operacionais e à variabilidade intrínseca do sistema.

No que se refere às deformações medidas em campo, ressalta-se que os extensômetros acústicos instalados na superfície da geofôrma não registram recalques verticais diretos, mas sim deslocamentos relativos ao longo da manta. Ainda assim, a evolução dessas deformações mostrou coerência temporal com o comportamento previsto numericamente, concentrando-se nos instantes iniciais do enchimento e diminuindo à medida que as poropressões se dissipam. Essa compatibilidade reforça que o modelo capturou adequadamente os mecanismos globais de resposta ao carregamento.

As deformações horizontais obtidas numericamente apresentaram magnitudes reduzidas e concentraram-se apenas na região de maior curvatura do arco externo da seção, resultado que se alinha à elevada rigidez à tração do geotêxtil (Koerner, 2012) e às limitações inerentes da representação bidimensional, que tende a restringir a expansão radial (Lawson, 2008; Silva; Almeida; Palmeira, 2021).

Em conjunto, os resultados evidenciam que a integração entre simulação e instrumentação fornece uma base sólida para a interpretação do comportamento hidráulico e deformacional da geofôrma. A coerência entre as tendências numéricas e os dados de campo sustenta a confiabilidade das

análises desenvolvidas e fundamenta as conclusões e recomendações apresentadas no capítulo seguinte.

## 6 ANÁLISES PARAMÉTRICAS

---

### 6.1 Considerações iniciais

A modelagem numérica em geotecnia não deve ser entendida apenas como ferramenta de previsão direta, mas também como instrumento para explorar a sensibilidade do sistema a parâmetros que apresentam incerteza significativa. No caso de geofôrmas para desaguamento de rejeitos, dois grupos de parâmetros se destacam: as propriedades hidráulicas, em especial a permeabilidade ( $k$ ), e os parâmetros constitutivos associados à compressibilidade, entre os quais o  $\lambda^*$  do modelo *Soft Soil*. A variação desses parâmetros tem influência direta sobre a dissipação das poropressões, os recalques verticais e a redistribuição de esforços no geotêxtil.

A importância de análises paramétricas em rejeitos está bem estabelecida na literatura. Mitchell e Soga (2005) ressaltam que pequenas variações em  $k$  ou em parâmetros de compressibilidade podem alterar substancialmente os tempos característicos de adensamento, modificando a interpretação do desempenho da estrutura. Rowe (2012) acrescenta que a heterogeneidade natural dos rejeitos de mineração, somada às incertezas laboratoriais na determinação de parâmetros, exige que os modelos numéricos sejam sempre avaliados quanto à sua robustez e capacidade de representar cenários alternativos.

As análises paramétricas foram conduzidas em duas frentes, variação da permeabilidade, considerando valores dentro da faixa relatada para rejeitos finos em estudos experimentais e de campo (Aydilek; Edil, 2002; Sheng; Wang; Wu, 2024), e variação do parâmetro  $\lambda^*$ , de acordo com intervalos de referência sugeridos para solos moles de alta compressibilidade (Schanz; Vermeer; Bonnier, 1999). O objetivo foi avaliar a resposta do modelo em termos de pressões intersticiais e deformações, verificando a sensibilidade dos resultados e a consistência física frente às observações experimentais e de campo disponíveis para a geofôrma de Candonga (Terratek, 2016).

Assim, este capítulo busca não apenas discutir os valores obtidos, mas também fornecer uma análise crítica sobre a influência de cada parâmetro na previsibilidade do comportamento das geofôrmas, oferecendo subsídios técnicos para projeto e monitoramento em condições de incerteza.

## 6.2 Variação da permeabilidade

### 6.2.1 Critérios adotados para as simulações

As análises paramétricas de permeabilidade foram realizadas com base no modelo de referência da geofôrma de Candonga, adotando-se como estratégia a variação exclusiva da permeabilidade vertical ( $K_y$ ), enquanto a permeabilidade horizontal ( $K_x$ ) foi mantida constante. Essa decisão reflete o papel dominante do fluxo vertical no processo de dissipação de poropressões em rejeitos confinados: em sistemas de geofôrmas, a drenagem ocorre essencialmente no sentido vertical, da massa de rejeito em direção ao geotêxtil, sendo o fluxo horizontal secundário e limitado pela geometria (Mitchell; Soga, 2005).

Foram simulados cinco valores de permeabilidade vertical,  $K_y = 0,0001$  m/d,  $0,0005$  m/d,  $0,001$  m/d,  $0,005$  m/d e  $0,01$  m/d.

Essa faixa foi definida de modo a abranger um intervalo amplo, compatível com diferentes condições granulométricas e mineralógicas reportadas para rejeitos de mineração. Valores da ordem de  $10^{-4}$  m/d são característicos de rejeitos ultrafinos, com predominância de partículas argilosas ou coloidais, nos quais a drenagem é extremamente lenta e o adensamento pode demandar longos períodos, conforme discutido por Aydilek (2002). Em contraste, permeabilidades próximas de  $10^{-2}$  m/d são associadas a rejeitos arenosos ou a materiais condicionados com flocculantes, nos quais a drenagem inicial é acelerada e o processo de consolidação atinge o equilíbrio em tempos mais curtos, conforme observado por Sheng e Wang (2024) e por Morais *et al.* (2020).

A escolha da faixa buscou ainda representar três cenários de interesse para a engenharia:

- Drenagem difícil: valores baixos de  $K_y$  ( $10^{-4}$  a  $5 \times 10^{-4}$  m/d), simulando rejeitos altamente plásticos ou coloidais;
- Condição intermediária: valor próximo ao adotado no modelo de referência ( $10^{-3}$  m/d), representativo dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais correlacionados ao projeto de Candonga (Terratek, 2016);
- Drenagem facilitada: valores elevados de  $K_y$  ( $5 \times 10^{-3}$  a  $10^{-2}$  m/d), representando rejeitos mais grossos ou condicionados quimicamente.

O objetivo principal dessas simulações foi avaliar a influência de  $K_y$  na dissipação de acréscimos de poropressões ( $\Delta u$ ) e nos recalques ao longo do tempo, quantificando como incertezas na determinação laboratorial da permeabilidade podem alterar a previsão de desempenho hidráulico e de deformação do sistema.

### 6.2.2 Resultados de $\Delta u(t)$

A Figura 6.1 apresenta, em um único gráfico comparativo, a evolução temporal da poropressão excedente ( $\Delta u$ ) no ponto A da geofôrma para diferentes valores de permeabilidade vertical do rejeito ( $K_y$ ), variando entre  $1,0 \times 10^{-4}$  m/d e  $1,0 \times 10^{-2}$  m/d. A consolidação dessas curvas em uma única figura permite visualizar de forma integrada o efeito direto da permeabilidade na cinética de dissipação, dispensando a necessidade de múltiplas figuras isoladas.

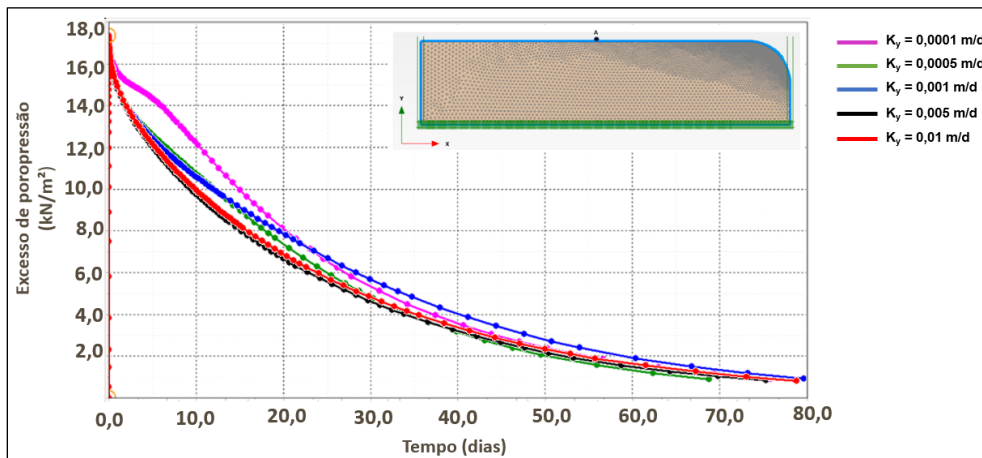


Figura 6.1. Dissipação da poropressão para diferentes valores de permeabilidade vertical ( $K_y$ )

Observa-se que valores mais baixos de permeabilidade vertical ( $K_y$ ) resultam em dissipação mais lenta do excesso de poropressão ( $\Delta u$ ), mantendo níveis elevados por períodos mais prolongados. No caso de  $K_y = 1,0 \times 10^{-4}$  m/d, a curva apresenta a maior persistência de  $\Delta u$ , permanecendo acima de aproximadamente 8 kN/m<sup>2</sup> até cerca de 20 dias. À medida que  $K_y$  aumenta, a dissipação torna-se mais rápida, sobretudo nas primeiras semanas, evidenciando o papel dominante da permeabilidade vertical na cinética inicial de dissipação.

Do ponto de vista temporal, a resposta pode ser interpretada em três faixas. Entre 0 e 5 dias ocorre uma queda rápida de  $\Delta u$  em todos os casos, com separação inicial entre as curvas. Entre 5 e 30 dias, as diferenças se tornam mais evidentes: para  $K_y=5,0\times 10^{-3}$  e  $1,0\times 10^{-2}$  m/d,  $\Delta u$  atinge valores inferiores a 8 kN/m<sup>2</sup> em torno de 12 - 15 dias, enquanto para  $K_y = 1,0\times 10^{-4}$  m/d essa redução ocorre mais tardiamente, por volta de 20 dias. A partir de 30 - 50 dias, todas as curvas continuam decrescendo e convergem gradualmente; ao final de 70 - 80 dias,  $\Delta u$  aproxima-se de valores residuais da ordem de 0,8 - 1,0 kN/m<sup>2</sup> para todos os casos, indicando que a influência de  $K_y$  é mais marcante na fase inicial e intermediária, tornando-se menos pronunciada em tempos mais longos.

De maneira integrada, os resultados confirmam a alta sensibilidade do modelo às variações de  $K_y$ . Enquanto valores baixos produzem dissipação mais lenta e mantêm  $\Delta u$  significativa por dezenas de dias, valores elevados resultam em drenagem mais rápida nas primeiras semanas e em redução antecipada dos níveis de poropressão. Esse intervalo de respostas delimita a faixa de comportamento esperada para diferentes cenários de rejeitos, constituindo ferramenta útil para análise paramétrica, avaliação de robustez e estudo de incertezas de projeto.

Para complementar a interpretação das curvas, a Tabela 6.1 sintetiza tempos característicos de dissipação para cada valor de  $K_y$  considerado. São apresentados, quando aplicável, os instantes correspondentes à dissipação de 50% ( $t_{50}$ ) e 90% ( $t_{90}$ ) da sobrepressão inicial, parâmetros usuais em análises de adensamento.

Tabela 6.1 - Variação de  $t_{50}$  e  $t_{90}$  em função da permeabilidade vertical ( $K_y$ ).

$K_y$ (m/day)	$t_{50}$ (dias)	$t_{90}$ (dias)	Observação
<b>0,0001</b>	30	>60	Rejeito argiloso, drenagem muito lenta
<b>0,0005</b>	15	35	Consolidação intermediária
<b>0,001</b>	7-8	15-16	Rejeito silto-arenoso
<b>0,005</b>	2-3	5	Drenagem acelerada
<b>0,01</b>	<1	2-3	Drenagem quase imediata, rejeito arenoso ou flocculado

Nota 1.  $K_y$ : Permeabilidade vertical.

Em síntese, a tabela evidencia que variações logarítmicas em  $K_y$  produzem diferenças de até uma ordem de grandeza nos tempos de consolidação, aspecto fundamental para o dimensionamento, planejamento de monitoramento e previsão de desempenho hidráulico de sistemas de geofôrmas.

### 6.2.3 Resultados dos deslocamentos verticais.

Os deslocamentos verticais analisados nesta seção referem-se exclusivamente aos resultados da modelagem numérica, uma vez que o ensaio de campo realizado em Candonga não incluiu instrumentação para medição direta de deslocamentos verticais absolutos. No experimento real, foram instalados extensômetros acústicos no topo da geofôrma, porém esses sensores registraram apenas deformações específicas no invólucro do geotêxtil, e não deslocamentos globais do coroamento (Terratek, 2016).

Assim, os resultados apresentados a seguir representam a resposta de deformação prevista pelo modelo numérico e são utilizados como ferramenta de interpretação da influência da permeabilidade vertical do rejeito ( $K_y$ ) sobre o comportamento global da geofôrma.

A Figura 6.2 apresenta, em um único gráfico comparativo, a evolução temporal dos deslocamentos verticais ( $U_y$ ) no coroamento para todos os valores de permeabilidade vertical simulados ( $K_y$  variando entre  $1,0 \times 10^{-4}$  e  $1,0 \times 10^{-2}$  m/d). A consolidação das curvas em uma única figura permite comparar diretamente os diferentes cenários drenantes.

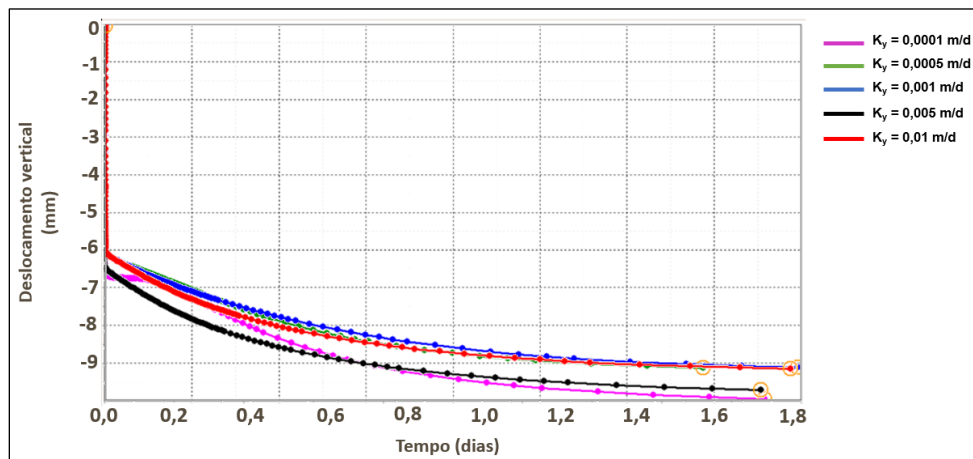


Figura 6.2. Evolução dos deslocamentos verticais ( $U_y$ ) no coroamento da geofôrma para diferentes valores de permeabilidade vertical ( $K_y$ )

Observa-se que a variação de  $K_y$  afeta principalmente a cinética dos deslocamentos verticais no intervalo analisado (0 - 1,8 dias). Em todos os casos,  $U_y$  apresenta um recalque inicial rápido nas primeiras frações de dia, seguido por uma evolução mais lenta em direção a um patamar. Para valores mais elevados de  $K_y$  (p.ex.,  $5,0 \times 10^{-3}$  e  $1,0 \times 10^{-2}$  m/d), a dissipação mais rápida de poropressões promove maior mobilização de deformações no início, resultando em curvas com

maior taxa de recalque nas primeiras horas e aproximação mais precoce ao patamar. Por outro lado, para  $K_y=1,0 \times 10^{-4}$  m/d, o recalque continua evoluindo ao longo de todo o período de 1,8 dias, atingindo os maiores valores em magnitude ao final do intervalo, o que é consistente com dissipação mais lenta do excesso de poropressão e adensamento mais prolongado. As diferenças entre cenários são da ordem de poucos milímetros, indicando que  $K_y$  controla sobretudo o ritmo de evolução dos deslocamentos no curto prazo.

Para permeabilidades intermediárias, como  $K_y=1,0 \times 10^{-3}$  m/d, os deslocamentos verticais desenvolvem-se de forma progressiva após o enchimento, com redução gradual da taxa de recalque ao longo do período analisado. Nos cenários mais drenantes ( $K_y=5,0 \times 10^{-3}$  e  $1,0 \times 10^{-2}$  m/d), observa-se uma aproximação mais rápida a um patamar nas primeiras 24 - 36 horas, atingindo valores de  $U_y$  da ordem de -0 a -9,2 mm ao final de 1,8 dias. Já para  $K_y=1,0 \times 10^{-4}$  m/d, o recalque mantém evolução mais prolongada no mesmo intervalo, alcançando valores mais negativos ao final do período, o que é consistente com a dissipação mais lenta de poropressões e a continuidade do adensamento.

Apesar das diferenças na cinética de deformação, todas as curvas apresentam um padrão comum:

- Deslocamento inicial pronunciado logo após o enchimento, associado ao rápido incremento de poropressões;
- Redução progressiva da taxa de deslocamento com o avanço da drenagem;
- Convergência para valores finais relativamente próximos entre si, ainda que atingidos em tempos distintos.

A Tabela 6.2 sintetiza os deslocamentos verticais finais previstos pelo modelo numérico no ponto A, localizado no coroamento da geofôrma, para cada valor de permeabilidade vertical  $K_y$ , e apresenta observações sobre o comportamento deformacional correspondente.

Tabela 6.2 - Deslocamento vertical no coroamento ao final do período analisado em função de ( $K_y$ ).

$K_y$ (m/dia)	Recalque final (mm)	Observações
<b>0,0001</b>	-9,7	Maior recalque ao final do intervalo; evolução ainda em queda suave até 1,8 d, indicando cinética mais lenta (dissipação/adensamento ainda em curso).

<b>K<sub>y</sub></b> <b>(m/dia)</b>	<b>Recalque final</b> <b>(mm)</b>	<b>Observações</b>
<b>0,0005</b>	-9,2	Recalque intermediário; redução progressiva da taxa de deslocamento após as primeiras horas, com tendência à estabilização no horizonte analisado.
<b>0,001</b>	-9,1	Comportamento semelhante ao caso $5,0 \times 10^{-4}$ m/d; cinética moderada e aproximação gradual à estabilização até 1,8 d.
<b>0,005</b>	-9,5	Cinética mais rápida no início (maior taxa de recalque nas primeiras horas), atingindo valores mais negativos ainda dentro de 1,8 d; evidencia que K <sub>y</sub> controla o ritmo e pode haver cruzamento de curvas no curto prazo.
<b>0,01</b>	-9,1 a -9,2	Tendência à estabilização mais rápida nas primeiras 24 - 36 h, com variações residuais pequenas até 1,8 d

Ressalta-se que o horizonte temporal foi limitado ao intervalo de cálculo adotado no modelo paramétrico (até 1,8 dias), de modo a manter consistência com as fases definidas e com o objetivo comparativo entre cenários. Extensões para tempos mais longos exigiriam redefinição explícita dos tempos de fase e do critério de término, o que não foi realizado nesta etapa.

Embora não seja possível comparar diretamente os valores numéricos com leituras de deslocamento vertical em campo, já que tais medições não foram realizadas, observa-se que as tendências qualitativas previstas pelo modelo são compatíveis com o comportamento registrado pelos extensômetros acústicos em Candonga, que indicaram deformações mais intensas nas primeiras horas, seguidas de redução progressiva durante o processo de drenagem.

De forma integrada, os resultados demonstram que a permeabilidade vertical controla de maneira decisiva a evolução dos deslocamentos verticais do coroamento, reforçando a importância da caracterização hidráulica do rejeito para fins de projeto, previsão de desempenho e análises paramétricas em geofôrmas.

#### 6.2.4 Discussão crítica.

Os resultados obtidos nas análises paramétricas de permeabilidade evidenciam que a resposta global da geofôrma é altamente sensível à variação de K<sub>y</sub>, confirmando que este parâmetro exerce controle direto sobre a cinética de adensamento e a evolução das deformações. Tal constatação está em consonância com a teoria clássica de Terzaghi, Peck e Mesri (1996) e com as análises de

Mitchell e Soga (2005), segundo as quais a permeabilidade é o fator primário na determinação dos tempos característicos de dissipação, ao passo que a compressibilidade do material governa a magnitude final das deformações.

A comparação entre as curvas de dissipação de  $\Delta u(t)$  (Seção 6.2.2) e os recalques finais sintetizados na Tabela 6.2 (Seção 6.2.3) mostra que a magnitude última de recalque (20 - 30 mm) se manteve praticamente constante, enquanto os tempos de estabilização variaram em mais de uma ordem de grandeza conforme  $K_y$ . Isso confirma que a incerteza laboratorial na determinação da permeabilidade, frequentemente reportada em ensaios de campo e de laboratório de rejeitos finos (Carneiro *et al.*, 2023), pode impactar de forma significativa as previsões de prazo para a consolidação, sem alterar de modo substancial a ordem de grandeza das deformações finais.

Do ponto de vista prático, rejeitos com  $K_y \leq 10^{-3}$  m/d devem ser tratados como materiais críticos: a lentidão no adensamento implica maior permanência de poropressões elevadas, aumentando o risco de instabilidade se o sistema não for adequadamente drenado ou monitorado (Rowe, 2012; Morais *et al.*, 2020). Já para rejeitos de maior permeabilidade ( $K_y \geq 5 \times 10^{-3}$  m/d), a rápida dissipação de pressões conduz a recalques abruptos concentrados nos primeiros dias, exigindo maior rigor no controle operacional do enchimento e na resistência das costuras e do próprio geotêxtil (Koerner, 2012; Lawson, 2008). Além disso, deve-se ressaltar as limitações inerentes ao modelo bidimensional utilizado. Conforme discutido por Kim e Dinoy (2021) e Zhang *et al.* (2022), efeitos tridimensionais associados à disposição longitudinal dos bocais, à heterogeneidade do rejeito e à interação entre múltiplas geofôrmas podem influenciar a redistribuição de esforços e deformações. Dessa forma, embora os modelos 2D sejam adequados para análises conceituais e de sensibilidade, sua extrapolação para escala de projeto requer instrumentação de campo e, quando possível, complementação com simulações tridimensionais (Silva *et al.*, 2021).

Em síntese, a análise crítica das simulações reforça três pontos fundamentais:

1.  $K_y$  governa o tempo de adensamento, sendo essencial obter valores representativos em ensaios de permeabilidade.
2. A magnitude do recalque final é pouco sensível à variação de  $K_y$ , permanecendo na ordem de 20 - 30 mm.

3. Modelos 2D fornecem boa aproximação conceitual, mas devem ser validados em campo e, sempre que necessário, complementados com análises 3D.

Esses achados consolidam a compreensão da influência da permeabilidade no desempenho hidráulico e do ponto de vista de deformação das geofôrmas, fornecendo base para as análises paramétricas subsequentes de compressibilidade ( $\lambda^*$ ), que serão discutidas na próxima seção.

### 6.3 Variação do parâmetro $\lambda^*$

#### 6.3.1 Critérios adotados para as simulações.

Nas análises paramétricas de compressibilidade, adotou-se a variação do parâmetro  $\lambda^*$  do modelo constitutivo *Soft Soil*, mantendo-se constantes os demais parâmetros de referência. O parâmetro  $\lambda^*$  corresponde à inclinação da reta virgem de compressão em escala semilogarítmica, sendo, portanto, o indicador direto da compressibilidade do material sob tensões efetivas crescentes (Schanz; Vermeer; Bonnier, 1999; Brinkgreve, 2015). Valores elevados de  $\lambda^*$  representam rejeitos mais moles, com maior deformabilidade volumétrica, enquanto valores reduzidos indicam comportamento mais rígido, típico de materiais pré-adensados ou com frações arenosas significativas. Foram testados três valores de  $\lambda^*$ , abrangendo a faixa reportada na literatura para rejeitos de mineração finos,  $\lambda^* = 0,008$ ,  $\lambda^* = 0,020$  e  $\lambda^* = 0,030$ .

Segundo Mitchell e Soga (2005), rejeitos argilosos podem apresentar  $\lambda^*$  da ordem de 0,05 - 0,08, enquanto para rejeitos mais silto-arenosos tendem a situar-se entre 0,01 e 0,03. Estudos recentes com geofôrmas aplicadas ao desaguamento de rejeitos de minério (Silva *et al.*, 2021; Sheng *et al.*, 2024) confirmam que  $\lambda^*$  é um dos parâmetros mais críticos na calibração numérica, uma vez que governa diretamente a amplitude dos recalques previstos.

O objetivo desta etapa é avaliar a sensibilidade das previsões numéricas às incertezas na determinação experimental de  $\lambda^*$ , verificando em que medida pequenas variações deste parâmetro influenciam: a dissipação das poropressões no interior da geofôrma, a magnitude e a cinética dos recalques verticais e a robustez global do modelo. Essa abordagem metodológica alinha-se às recomendações de Rowe (2012), que enfatiza a importância de análises de sensibilidade em parâmetros constitutivos-chave para aumentar a confiabilidade de projetos envolvendo rejeitos saturados e geossistemas confinados.

### 6.3.2 Resultados em termos de dissipação de $\Delta u(t)$ .

A Figura 6.3 sintetiza, em um único gráfico comparativo, os resultados obtidos para as três simulações de dissipação de poropressões ( $\Delta u$ ) no ponto A da geofôrma, para os valores de compressibilidade  $\lambda^* = 0,008, 0,020$  e  $0,030$ . A apresentação conjunta permite avaliar de maneira integrada a influência da compressibilidade do rejeito sobre a evolução temporal da dissipação das poropressões, consolidando em uma única curva comparativa o comportamento anteriormente apresentado em gráficos separados.

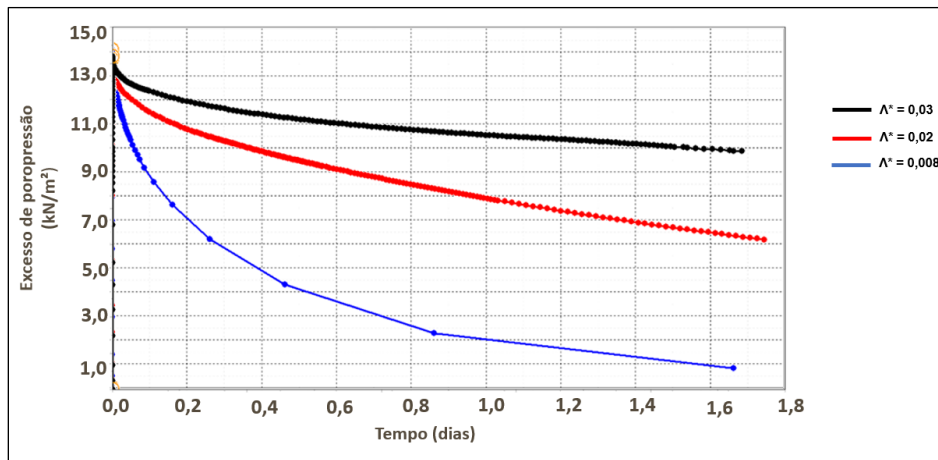


Figura 6.3. Dissipação da poropressão ( $\Delta u$ ) para diferentes valores do parâmetro  $\lambda^*$  no ponto A da geofôrma.

Observa-se que  $\lambda^*$  exerce forte controle sobre a taxa de dissipação hidráulica.

- Para  $\lambda^* = 0,008$ , correspondente a um rejeito mais rígido e de menor compressibilidade, a dissipação ocorre de forma acelerada:  $\Delta u$  reduz-se de aproximadamente 13 kN/m<sup>2</sup> para valores próximos de 1 kN/m<sup>2</sup> em menos de 1,6 dias de simulação.
- Para  $\lambda^* = 0,020$ , a dissipação é mais lenta, mantendo  $\Delta u$  acima de 7 kN/m<sup>2</sup> ao mesmo tempo de simulação.
- O comportamento mais conservador ocorre para  $\lambda^* = 0,030$ , cuja maior compressibilidade retarda significativamente a queda da poropressão, mantendo  $\Delta u$  acima de 10 kN/m<sup>2</sup> após 1,6 dias.

Esse comportamento evidencia que materiais mais compressíveis apresentam maior tendência à manutenção de poropressões residuais, o que pode influenciar o desempenho hidráulico e de deformação da geofôrma, especialmente nos estágios iniciais após o enchimento. Resultados

semelhantes são relatados na literatura para rejeitos finos e flocculados, nos quais a dissipação de  $\Delta u$  tende a ser mais lenta (Sheng *et al.*, 2024).

Com relação ao valor de  $\Delta u \leq 1 \text{ kN/m}^2$  mencionado anteriormente, esclarece-se que esse limite não corresponde a um critério operacional empregado em geofôrmas em escala real, mas constitui um critério numérico adotado neste estudo para indicar a aproximação da condição drenada. A prática de definir um valor de referência para a poropressão residual é comum em análises numéricas de adensamento, especialmente quando o objetivo é comparar a taxa ou o ritmo de dissipação entre diferentes modelos paramétricos, evitando a necessidade de simular tempos excessivamente longos que pouco contribuiriam para a interpretação. Assim, o valor de  $\Delta u \leq 1 \text{ kN/m}^2$  é utilizado apenas como indicador de convergência numérica, não como limite normativo ou operacional (Mitchell e Soga, 2005; Craig, 2014).

Em síntese, os resultados confirmam que  $\lambda^*$  é um dos parâmetros mais sensíveis do modelo Soft Soil, afetando diretamente a velocidade de dissipação das poropressões e, conseqüentemente, a previsão de desempenho hidráulico das geofôrmas. A análise reforça a importância de uma adequada caracterização laboratorial desse parâmetro para reduzir incertezas em estudos de simulação numérica aplicados a rejeitos saturados.

### 6.3.3 Resultados em termos de deslocamentos verticais de recalques.

A Figura 6.4 apresenta, em um único gráfico comparativo, a evolução dos deslocamentos verticais ( $U_y$ ) no ponto A da geofôrma para os três valores do parâmetro  $\lambda^*$  analisados (0,008; 0,020; 0,030). Os resultados evidenciam que a compressibilidade do rejeito exerce influência direta sobre a magnitude dos deslocamentos ao longo do tempo, ainda que essa influência seja menos pronunciada que no caso das poropressões (Figura 6.3).

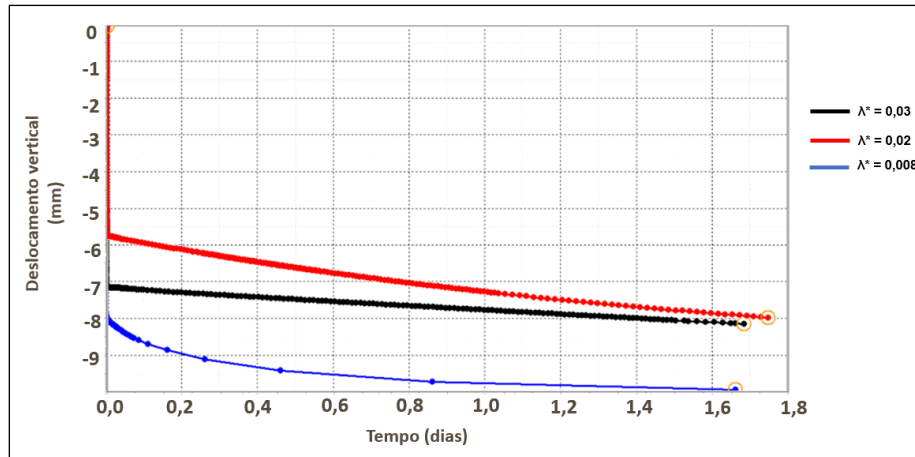


Figura 6.4. Deslocamento vertical ( $U_\gamma$ ) no ponto A da geofôrma para diferentes valores do parâmetro  $\lambda^*$

Para  $\lambda^*=0,008$  valor que representa um rejeito mais rígido, observam-se os menores deslocamentos ao longo de toda a simulação, atingindo aproximadamente -9,5 mm após 1,7 dias. Esse comportamento está associado à menor deformabilidade volumétrica prevista pelo modelo constitutivo quando  $\lambda^*$  é reduzido.

Para  $\lambda^*=0,020$ , o comportamento intermediário é claramente identificado: os deslocamentos seguem uma tendência de redução gradual, estabilizando-se em torno de -8,0 mm ao final da etapa simulada. Esse valor está próximo ao deslocamento obtido no modelo de referência da geofôrma.

Finalmente, para  $\lambda^*=0,030$  representativo de um rejeito mais compressível os deslocamentos são mais acentuados, embora as diferenças relativas permaneçam inferiores às observadas na dissipação de poropressões. O deslocamento final para esse caso é da ordem de -7,8 mm, indicando que a maior compressibilidade acelera a acomodação inicial, mas não altera significativamente a resposta global no intervalo de tempo analisado.

Em conjunto, os resultados demonstram que a variação de  $\lambda^*$  altera o nível de deformação vertical na fase inicial pós-enchimento, porém sem modificar qualitativamente a tendência geral de acomodação da geofôrma. A amplitude total de deslocamentos permanece inferior a 10 mm em todos os cenários, magnitude compatível com valores reportados para geofôrmas submetidas a carregamentos hidráulicos semelhantes na literatura técnica (Lawson, 2008; Morais, Pelisser e Urashima, 2020). Ainda que não tenham sido registradas medições de deslocamento vertical no

ensaio de Candonga, os valores simulados situam-se dentro da faixa esperada para materiais com características físicas equivalentes às observadas naquele projeto.

Esses resultados reforçam que, embora  $\lambda^*$  influencie a deformabilidade do rejeito, o comportamento de deslocamentos é dominado pela dissipação das poropressões e pela capacidade drenante do geotêxtil, sendo menos sensível às variações de compressibilidade quando comparado ao comportamento hidráulico.

#### 6.3.4 Discussão crítica.

As análises paramétricas de compressibilidade demonstram que o parâmetro  $\lambda^*$  exerce influência decisiva tanto na magnitude quanto na evolução temporal dos deslocamentos verticais previstos no interior da geofôrma. Em sistemas submetidos a adensamento primário, a permeabilidade governa a taxa de dissipação de poropressões, ao passo que a compressibilidade controla diretamente a deformabilidade volumétrica do rejeito (Mitchell e Soga, 2005; Rowe, 2012). Assim, variações em  $\lambda^*$  modificam simultaneamente a velocidade de redução de  $\Delta u$  e a amplitude final das deformações.

Os resultados obtidos para os três modelos analisados ( $\lambda^* = 0,008; 0,020; 0,030$ ) revelam uma tendência clara:

- Valores reduzidos de  $\lambda^*$  resultam em deslocamentos verticais limitados, concentrados nos instantes iniciais após o enchimento. O comportamento é característico de rejeitos de baixa compressibilidade, cuja estrutura responde de forma mais rígida ao carregamento.
- Valores intermediários e elevados de  $\lambda^*$  levam a deslocamentos mais expressivos e progressivos, acompanhados de dissipação mais lenta de poropressões, em consonância com o comportamento esperado de rejeitos finos e/ou floclados. Nesses casos, a condição aproximada de regime drenado não é alcançada no intervalo de simulação, e  $\Delta u$  permanece significativamente acima do valor inicial reduzido observado no modelo mais rígido.

Esse padrão é consistente com a teoria do adensamento unidimensional, na qual materiais de maior compressibilidade apresentam deformações mais intensas sob o mesmo incremento de tensão efetiva. A sensibilidade observada reforça a necessidade de caracterização laboratorial confiável

de  $\lambda^*$ , visto que pequenas imprecisões na sua determinação podem resultar em diferenças substanciais nas previsões numéricas.

Além disso, deve-se considerar que o modelo empregado é bidimensional, o que implica limitações inerentes relacionadas à representação de fenômenos tridimensionais, tais como heterogeneidades longitudinais, efeitos decorrentes da geometria real da geofôrma e redistribuições espaciais de tensões (Kim e Dinoy, 2021; Zhang *et al.*, 2022). Tais aspectos não invalidam as tendências identificadas, mas devem orientar a interpretação dos resultados e seu uso em aplicações de engenharia.

Em síntese, a análise crítica dos modelos com variação de  $\lambda^*$  permite destacar três conclusões principais:

- $\lambda^*$  é o parâmetro constitutivo que governa diretamente a magnitude das deformações verticais na geofôrma.
- Valores baixos ( $\lambda^* \approx 0,008$ ) levam a deformações mais discretas e rápida redução de  $\Delta u$ , enquanto valores mais elevados ( $\lambda^* \approx 0,020 - 0,030$ ) aumentam a deformabilidade e retardam o adensamento.
- A confiabilidade das previsões numéricas depende da calibração cuidadosa de  $\lambda^*$ , utilizando ensaios laboratoriais representativos e respeitando as limitações do modelo 2D.

Esses achados consolidam o papel da compressibilidade como parâmetro-chave na previsão do comportamento de deformação de geofôrmas preenchidas com rejeitos finos, complementando as análises anteriores de permeabilidade e fornecendo subsídios essenciais para o dimensionamento e o monitoramento de estruturas em escala real.

#### 6.4 Síntese das análises paramétricas

A avaliação conjunta dos resultados obtidos nas análises paramétricas permite identificar, com maior clareza, o papel relativo da permeabilidade ( $K_y$ ) e da compressibilidade ( $\lambda^*$ ) no comportamento hidráulico e de deformação da geofôrma. Embora ambos os parâmetros influenciem o processo de adensamento, seus efeitos ocorrem de maneira distinta e complementar, conforme amplamente discutido na literatura de mecânica dos solos e consolidação (Mitchell e Soga, 2005; Craig, 2014).

No caso da permeabilidade vertical, observou-se que  $K_y$  controla diretamente a velocidade de dissipação da poropressão ( $\Delta u$ ). Valores baixos ( $10^{-4}$  -  $10^{-3}$  m/d) resultam em dissipação lenta e persistência de pressões intersticiais elevadas por períodos prolongados, enquanto valores mais altos ( $\geq 10^{-2}$  m/d) conduzem a reduções acentuadas de  $\Delta u$  ainda nas primeiras dezenas de horas. Esse comportamento é consistente com estudos de consolidação de rejeitos finos, que demonstram forte dependência do fluxo vertical nos processos drenantes (Sheng *et al.*, 2024; Morais, Pelisser e Urashima, 2020).

Por outro lado, a compressibilidade  $\lambda^*$  mostrou-se determinante na magnitude dos deslocamentos verticais. Materiais com  $\lambda^*$  reduzido (0,008) apresentaram deformações discretas e estabilização rápida, enquanto valores intermediários ou elevados (0,020 - 0,030) produziram deslocamentos mais expressivos, ainda que dentro de limites compatíveis com rejeitos de granulometria semelhante. O comportamento observado é coerente com a teoria de adensamento unidimensional, segundo a qual a inclinação da curva de compressão controla diretamente a variação volumétrica sob acréscimos de tensão efetiva (Schanz, Vermeer e Bonnier, 1999; Rowe, 2012).

A Tabela 6.3 apresenta uma síntese comparativa dos efeitos relativos de  $\lambda^*$  e  $K_y$ , destacando os principais impactos de cada parâmetro sobre a dissipação de  $\Delta u$  e os deslocamentos verticais.

Tabela 6.3 - Influência comparativa de  $K_y$  e  $\lambda^*$  na resposta da geofôrma

Parâmetro	Efeito principal	Resultados observados
<b>Permeabilidade vertical (<math>K_y</math>)</b>	Controla a cinética de dissipação de poropressões	Tempos de estabilização variaram em mais de uma ordem de grandeza, mas recalques finais permaneceram na faixa de 20 - 30 mm
<b>Compressibilidade (<math>\lambda^*</math>)</b>	Governa a magnitude final dos recalques	Para $\lambda^* = 0,008 \rightarrow$ recalques: 20 mm para $\lambda^* = 0,02 - 0,03 \rightarrow$ recalques: > 30 - 40 mm com dissipação parcial de $\Delta u$

A análise integrada revela que, para o modelo numérico utilizado, a permeabilidade exerce maior influência sobre o tempo necessário para atingir condições próximas ao regime drenado, enquanto a compressibilidade governa a magnitude final das deformações. Essa distinção é fundamental para calibrações numéricas em sistemas geossintéticos e para a interpretação de ensaios de campo, como destacado por Rowe (2012) e por Lawson (2008) em estudos sobre geocontainers e geofôrmas aplicados ao desaguamento.

Do ponto de vista de projeto, os resultados reforçam a necessidade de caracterização laboratorial rigorosa de ambos os parâmetros. Enquanto a permeabilidade deve ser determinada com atenção aos efeitos de segregação granulométrica e floculação do rejeito,  $\lambda^*$  requer ensaios de compressão adequados para capturar variações estruturais sensíveis a pequenas mudanças no histórico de tensões. A integração desses parâmetros torna-se essencial para prever o desempenho hidráulico e de deformação de geofôrmas em condições reais de operação.

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

---

### 7.1 Considerações gerais

Esta dissertação analisou o desempenho hidráulico e mecânico de geofôrmas aplicadas ao desaguamento de rejeitos de mineração, integrando dados experimentais obtidos no ensaio conduzido em Candonga (Terratek, 2016) e modelagem numérica pelo método dos elementos finitos no PLAXIS 2D. A pesquisa foi fundamentada em revisão teórica sobre filtração, adensamento e resposta mecânica de sistemas geossintéticos confinados (Aydilek e Edil, 2002; Lawson, 2008; Koerner, 2012; Mitchell e Soga, 2005; Rowe, 2012). A partir desses conceitos, foi possível estruturar um modelo representativo da geofôrma ensaiada em campo, considerando o acoplamento hidráulico–mecânico e a evolução das poropressões e deformações após o enchimento.

O trabalho também contemplou análises paramétricas variando-se a permeabilidade vertical ( $K_y$ ) e a compressibilidade do rejeito ( $\lambda^*$ ), parâmetros reconhecidos como críticos no comportamento de sistemas de desaguamento com geotêxteis (Schanz; Vermeer; Bonnier, 1999). A seguir são apresentadas as principais conclusões obtidas, juntamente com recomendações práticas e direcionamentos para estudos futuros.

### 7.2 Principais conclusões

Os resultados numéricos alinhados às medições de campo indicam que o modelo desenvolvido foi capaz de reproduzir, com boa fidelidade, as tendências temporais de dissipação de poropressões e de deformações verticais observadas no ensaio da geofôrma em Candonga. A sobrepressão inicial simulada, em torno de 17–18 kN/m<sup>2</sup>, mostrou concordância com os valores registrados pelos piezômetros imediatamente após o enchimento, e a evolução subsequente seguiu comportamento típico de rejeitos finos saturados: rápida dissipação no primeiro dia, seguida de redução gradativa até estabilização em valores próximos de 1 kN/m<sup>2</sup>. Essa concordância reforça a adequação das propriedades hidráulicas adotadas e valida o modelo como ferramenta para análises paramétricas.

A resposta de deformação simulada também se mostrou consistente com os dados experimentais. Os deslocamentos iniciais do coroamento foram controlados pela geração de poropressões sob

condição não drenada, enquanto a deformação residual resultou do adensamento subsequente. Os valores finais obtidos numericamente situaram-se na mesma ordem de grandeza das medições realizadas pelos extensômetros acústicos, ainda que estas apresentem dispersão natural decorrente de heterogeneidades de enchimento e limitações instrumentais. A correlação temporal entre queda de poropressão e incremento de deslocamento reforça o mecanismo esperado de acoplamento hidráulico–mecânico.

As análises paramétricas demonstraram que a permeabilidade vertical ( $K_y$ ) controla essencialmente a escala temporal da dissipação de poropressões, sem alterar substancialmente a magnitude final dos deslocamentos. Valores baixos de  $K_y$  prolongam a presença de poropressões internas e retardam a transição para regime drenado, comportamento típico de rejeitos de baixa permeabilidade. Por outro lado, permeabilidades mais elevadas favorecem dissipação acelerada, concentrando grande parte das deformações nos primeiros instantes após o enchimento. Tais observações estão plenamente alinhadas à teoria clássica de adensamento (Mitchell e Soga, 2005; Rowe, 2012).

No que se refere à compressibilidade, o parâmetro  $\lambda^*$  mostrou exercer influência direta e decisiva sobre a magnitude dos deslocamentos verticais. Para  $\lambda^*=0,008$ , o rejeito apresentou comportamento mais rígido e deformações moderadas, com estabilização relativamente rápida. Para  $\lambda^*=0,020$  e  $0,030$ , as deformações acumuladas foram substancialmente maiores e a dissipação das poropressões tornou-se mais lenta, evidenciando que rejeitos mais compressíveis mantêm níveis mais elevados de deformabilidade volumétrica. Esses resultados reforçam que a compressibilidade é o principal parâmetro governante das deformações finais, enquanto a permeabilidade controla o tempo necessário para que tais deformações se manifestem.

A análise integrada dos resultados confirma que o desempenho global da geofôrma depende da interação entre permeabilidade efetiva e compressibilidade do rejeito. Cenários com  $K_y$  baixo e  $\lambda^*$  elevado são os mais críticos, combinando drenagem lenta e deformabilidade acentuada. Ainda que o modelo bidimensional não represente efeitos tridimensionais associados a bocais de enchimento, variações longitudinais ou múltiplas unidades, sua capacidade de reproduzir tendências globais garante valor técnico para estudos de comportamento e de sensibilidade. Assim, o uso de

modelagem numérica em conjunto com instrumentação de campo se mostra uma abordagem robusta para avaliar e projetar sistemas de desaguamento com geotêxteis.

### 7.3 Recomendações para pesquisas futuras

Do ponto de vista prático, os resultados evidenciam a necessidade de caracterização geotécnica rigorosa dos rejeitos destinados ao enchimento de geofôrmas, especialmente no que se refere aos valores de permeabilidade e compressibilidade. Ensaios laboratoriais bem controlados, incluindo edometria, ensaios hidráulicos e bag tests, são essenciais para reduzir incertezas e fornecer parâmetros confiáveis para modelagem numérica. A instalação de piezômetros e extensômetros, como realizada em Candonga, demonstrou ser fundamental para validar modelos, ajustar parâmetros e monitorar a segurança operacional, devendo ser incorporada de forma sistemática em aplicações reais.

Para o dimensionamento de geofôrmas, recomenda-se atentar para a resistência das costuras e do geotêxtil, especialmente em cenários com recalques iniciais acentuados. Procedimentos de enchimento faseado e monitoramento contínuo contribuem para mitigar riscos associados a porpressões elevadas e deformações excessivas. Deve-se considerar também que a permeabilidade efetiva é função não apenas do rejeito, mas do sistema integrado “rejeito + cake de filtração + geotêxtil”, cujo comportamento pode evoluir ao longo do tempo.

No âmbito de pesquisas futuras, destaca-se a necessidade de avançar para modelagens tridimensionais que permitam capturar efeitos longitudinais e a influência dos bocais de enchimento. Estudos que incorporem a variação temporal da permeabilidade, decorrente da formação e compactação do cake, também podem ampliar significativamente a capacidade preditiva dos modelos. Adicionalmente, investigações envolvendo períodos de tempo mais longos, incluindo consolidação secundária e possíveis efeitos visco-plásticos, são recomendadas para aplicações em escala operacional. Por fim, sugere-se integrar avaliações hidráulico-mecânicas à análise da qualidade da água drenada e ao potencial de reúso, fortalecendo a aplicação das geofôrmas dentro de princípios de sustentabilidade.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

ANM – Agência Nacional de Mineração. *Relatório de Segurança de Barragens de Mineração*. Brasília, 2019.

APARICIO-ARDILA, L. A.; RIVERA, J. F.; MARTÍNEZ, M. J. Geotextile tubes for mine tailings management: performance and challenges. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 48, p. 365–377, 2020.

AYDILEK, A. H.; EDIL, T. B. Filtration performance of nonwoven geotextiles with wastewater treatment sludge. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 20, p. 27–47, 2002.

BARRANTES, M. A. V. *Avaliação do comportamento de tubos de geotêxteis utilizados em obras de proteção ambiental*. 2023. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2023.

BRINKGREVE, R. B. J. *Plaxis Material Models Manual*. Delft: Plaxis BV, 2015.

BUDHAI, P.; NAIDOO, K. Application of geotextile dewatering technology for mine wastewater and sludge management. *Minerals Engineering*, v. 207, p. 107–210, 2024.

CANTRÉ, S. *Behaviour of geotextile tubes used for dewatering sludge*. PhD Thesis — Ghent University, 2002.

CARNEIRO, J. L.; SOUZA, M. A.; REZENDE, F. Caracterização geotécnica e mineralógica de rejeitos de mineração no Brasil. *Revista Brasileira de Geotecnia*, v. 43, n. 2, p. 101–120, 2023.

CASTRO, J. F.; GUIMARÃES, M.; URASHIMA, D. C. Field performance of geotextile tubes for sludge dewatering in Rio das Ostras, Brazil. *Geosynthetics International*, v. 15, n. 6, p. 408–418, 2008.

FREITAS SILVA, V. S. *Estudo experimental de geotêxteis aplicados em estruturas de contenção e drenagem*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) — UFOP, Ouro Preto, 2017.

GAFFNEY, D. A.; KOH, C. G.; MOO-YOUNG, H. Laboratory evaluation of dewatering performance of geotextile tubes. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 17, p. 213–234, 1999.

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. *Relatório de impactos ambientais do rompimento da barragem de Fundão*. Brasília, 2019.

KIM, S.; DINOY, R. Numerical modelling of large-scale geotextile tube applications: 2D versus 3D analyses. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 49, p. 112–126, 2021.

- KOERNER, R. M. *Designing with Geosynthetics*. 6. ed. New Jersey: Xlibris, 2012.
- LAWSON, C. R. Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 26, n. 2, p. 107–118, 2008.
- LESHCHINSKY, D.; LESHCHINSKY, O. Geosynthetic confined systems in hydraulic applications. *Geosynthetics International*, v. 3, n. 2, p. 163–182, 1996.
- LI, M.; ZHANG, Y.; WU, Y. Advances in geotextile tube technology for dewatering and coastal protection. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 149, n. 4, 04023018, 2023.
- MITCHELL, J. K.; SOGA, K. *Fundamentals of Soil Behavior*. 3. ed. New York: Wiley, 2005.
- MOO-YOUNG, H.; TUCKER, R. S. Evaluation of testing methods for assessing the performance of geotextiles used in sludge dewatering. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 20, p. 63–80, 2002.
- MORAIS, L. F.; PEREIRA, A. C.; GOMES, R. Geotextile tubes for dewatering effluents in Brazilian mining operations. *REM: Revista Escola de Minas*, v. 73, n. 4, p. 601–609, 2020.
- MORAIS, C. R.; PELISSER, F.; URASHIMA, D. Numerical modelling and pilot-scale tests of flocculated mining tailings in geotextile tubes. *Journal of Environmental Geotechnics*, v. 7, n. 4, p. 215–228, 2020.
- NEWMAN, P. Geotextile tubes: coastal and hydraulic applications. *Proceedings of the ICE – Geotechnical Engineering*, v. 157, p. 101–107, 2004.
- PALMEIRA, E. M. Geosynthetics in filtration and drainage applications. *Geosynthetics International*, v. 16, n. 5, p. 341–366, 2009.
- PALMEIRA, E. M. Geosynthetics in hydraulic applications: recent developments. *Keynote Lecture*, 9th International Conference on Geosynthetics, Guarujá, 2010.
- PERES, A. E. C.; CHAVES, A. P.; LUZ, A. B. Produção e caracterização de rejeitos de mineração no Brasil. *REM: Revista Escola de Minas*, v. 55, n. 1, p. 47–52, 2002.
- PILARCZYK, K. W. *Geosynthetics and Geosystems in Hydraulic and Coastal Engineering*. Rotterdam: Balkema, 2000.
- PLAXIS B.V. *Plaxis 2D Reference Manual*. Delft: Bentley Systems, 2021.

ROWE, R. K. Geosynthetics and the minimization of contaminant migration through soil. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 30, n. 1, p. 1–35, 2012.

SAMARCO; TERRATEK. *Relatório técnico de instrumentação e ensaios em geoformas no UHE Risoleta Neves (Candonga)*. Mariana, 2016.

SCHANZ, T.; VERMEER, P. A.; BONNIER, P. The hardening soil model: formulation and verification. In: *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*. Rotterdam: Balkema, 1999.

SHENG, D.; WANG, H.; WU, F. Recent advances in tailings dewatering with geotextile tubes. *International Journal of Geosynthetics*, v. 11, p. 55–70, 2024.

SILVA, L. C. F. *Avaliação do Processo de Enchimento e Empilhamento de Rejeito de Ouro em Tubos Geotêxteis*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 145 p., 2017.

SILVA, R. M.; ALMEIDA, M. S.; PALMEIRA, E. M. Numerical modelling of geotextile tubes for mining tailings dewatering. *Soils and Rocks*, v. 44, n. 2, p. 1–17, 2021.

TENCATE GEOSYNTHETICS. *Geotube® Technology for Dewatering and Containment*. Case Study Kalimantan (Indonesia). Almelo, 2014.

TERZAGHI, K. *Theoretical Soil Mechanics*. New York: Wiley, 1943.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 3. ed. New York: Wiley, 1996.

ZHANG, L.; CHEN, Y.; LIU, H. Three-dimensional effects in large geotextile tubes: numerical and field insights. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 50, p. 287–301, 2022.