



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**  
Centro de Tecnologia e Ciências  
Faculdade de Engenharia

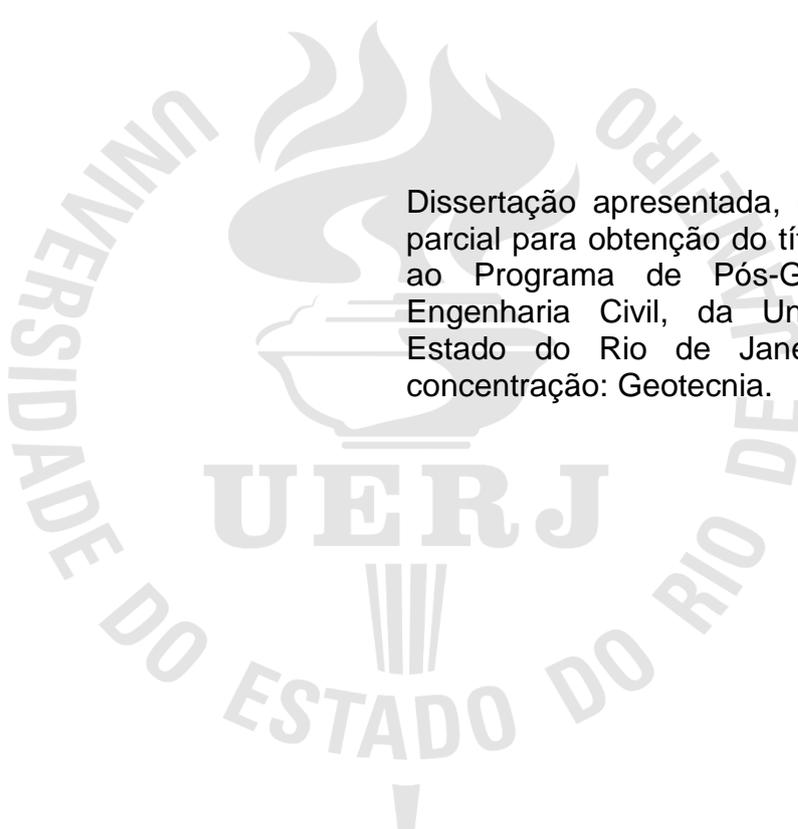
Letícia Guimarães Cedro

**Análise do processo de adensamento aplicado ao fechamento  
de reservatório de rejeito de bauxita**

Rio de Janeiro  
2023

Letícia Guimarães Cedro

**Análise do processo de adensamento aplicado ao fechamento de reservatório  
de rejeito de bauxita**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.

Orientadores: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Cristina Castro Fontenla Sieira  
Prof. Dr. Armando Prestes de Menezes Filho

Rio de Janeiro

2023

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

C389 Cedro, Leticia Guimarães.  
Análise do processo de adensamento aplicado ao fechamento de reservatório de rejeito de bauxita / Leticia Guimarães Cedro. – 2023.  
143 f.

Orientadores: Ana Cristina Castro Fontenla Sieira, Armando Prestes de Menezes Filho.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Engenharia geotécnica - Teses. 3. Barragens de rejeitos - Teses. 4. Recalque de estruturas - Teses. 5. Análise numérica - Teses. I. Sieira, Ana Cristina Castro Fontenla. II. Menezes Filho, Armando Prestes de. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 624.131.3

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

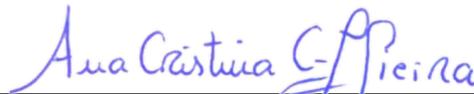
Letícia Guimarães Cedro

**Análise do processo de adensamento aplicado ao fechamento de reservatório  
de rejeito de bauxita**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovado em: 17 de agosto de 2023.

Banca Examinadora:



---

Profa. Dra. Ana Cristina Fontenla Sieira (Orientadora)  
Faculdade de Engenharia – UERJ



---

Prof. Dr. Armando Prestes de Menezes Filho  
Faculdade de Engenharia – UERJ



---

Prof. Dr. Bruno Teixeira Lima  
Faculdade de Engenharia – UERJ



---

Profa. Dra. Ana Cristina Malheiros Gonçalves Carvalho  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio

Rio de Janeiro

2023

## DEDICATÓRIA

À minha mãe e ao meu irmão Pedro que sempre foram minha fortaleza.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus orientadores Ana Cristina e Armando por todo suporte, paciência e atenção dadas a mim ao longo da orientação.

Aos professores do PGEIV, especialmente Rogério Feijó, Bruno Lima, Bernadete Ragoni e Marcus Pacheco por tanto ensinamento.

Aos colegas de mestrado pelas trocas, especialmente à Lais por toda dedicação e disponibilidade.

À MRN pelo incentivo à pesquisa, principalmente ao Marcelo Mollica e à Jordanna Vogt por todo apoio.

Aos colegas de Porto Trombetas que deixaram essa caminhada mais leve, em especial a Naiara.

Ao André por todo apoio técnico e suporte ao longo dessa jornada.

À minha mãe Euciene, meu irmão Pedro e minha avó Ângela pelo amor incondicional.

Ao meu pai, minhas avós Fátima e Rita, ao tio Evando e dinda Aila pelo carinho.

À tia Angelina e à Dayanne pela amizade incondicional, incentivo, força e pela alegria que sempre trazem.

Ao Caio por todo apoio, compreensão, companheirismo e discussões técnicas fundamentais para conclusão do trabalho.

A todos os amigos e familiares que compreenderam minha ausência por muitas vezes nos últimos anos.

## RESUMO

Cedro, Letícia Guimarães. **Análise do processo de adensamento aplicado ao fechamento de reservatório de rejeito de bauxita**. 2023. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Durante a concepção do projeto de fechamento de uma barragem de rejeitos são definidas as etapas de monitoramento geotécnico e ambiental. Uma das vertentes do monitoramento geotécnico é o acompanhamento da evolução do processo de adensamento na camada de rejeito o qual pode gerar recalques diferenciais na superfície de conformação. A previsão deste processo permite a preparação para o tempo que será despendido até que os recalques não sejam significativos. A estimativa aponta o período em que o reservatório ainda poderá demandar ajustes na superfície antes que possa ser reflorestado, o fato se deve porque os pontos de abatimento tendem a acumular água que, por sua vez, dificulta o crescimento da vegetação. O presente trabalho teve como objetivo analisar a aderência de duas metodologias para previsão do processo de adensamento confrontando-as com os resultados obtidos em campo, além de apresentar as etapas do processo de fechamento de um reservatório nos âmbitos legais nacionais e internacionais abrangendo os contextos geotécnicos, ambientais e sociais. A primeira metodologia consistiu na obtenção dos parâmetros de entrada para a Teoria Clássica do Adensamento a partir de ensaios de piezocone e de palheta. A segunda correspondeu à modelagem numérica, no programa PLAXIS 2D, utilizando como dados de entrada os parâmetros obtidos por ensaios triaxiais e de adensamento induzido por força de percolação. Os valores encontrados em campo foram advindos de monitoramento topográfico. As metodologias foram analisadas com diversas hipóteses a fim de reproduzir o cenário obtido em campo, sendo a variação do módulo edométrico a mais relevante para a primeira e a consideração de uma crosta ressecada sobre a camada de rejeito, a mais relevante para a segunda. Confrontando os cenários com os resultados de campo, a modelagem numérica apresentou a melhor aderência, destacando o potencial de análises por elementos finitos em problemas geotécnicos complexos, como é o caso de barragens de rejeitos.

Palavras-chave: Fechamento de reservatório. Adensamento. Recalque. Rejeito. Modelagem numérica.

## ABSTRACT

Cedro, Letícia Guimarães. **Analysis of the consolidation process applied to a bauxite tailings reservoir closure**. 2023. 143 f. M. Sc. Dissertation – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

During the conception of the project for the closure of a tailings dam, the stages of geotechnical and environmental monitoring are defined. One aspect of geotechnical monitoring is tracking the consolidation process in the tailings layer, which can cause differential settlements on the surface. Predicting this process allows preparation for the time it will take until settlements become irrelevant. The estimation identifies the period during which the reservoir may still require surface adjustments before reforestation can take place, mainly because depression points tend to accumulate water, hindering vegetation growth. The present study aimed to analyze the performance of two methodologies for predicting the consolidation process, comparing them with field results, and to present the steps involved in the closure of a reservoir from national and international legal perspectives, including geotechnical, environmental, and social contexts. The first methodology involved obtaining input parameters for the Classical Consolidation Theory through piezocone and vane tests. The second methodology consisted of numerical modeling using the PLAXIS 2D program, employing input parameters obtained from triaxial and consolidation induced by permeation tests. The field values were obtained through topographic monitoring. The methodologies were analyzed under various assumptions to reproduce the field scenario, with the variation of the modulus of elasticity being most relevant for the first methodology, and the consideration of a desiccated crust over the tailings layer being most relevant for the second. When comparing the scenarios with field results, the numerical modeling demonstrated the best adherence, highlighting the potential of finite element analyses in complex geotechnical problems such as tailings dams.

Keywords: Dam closure. Consolidation. Settlement. Tailings. Numerical modeling.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Comparativo volumétrico dos diferentes tipos de barragem: (a) Montante, (b) Jusante e (c) Linha de centro. Adaptado de Vick (1990) | 26 |
| Figura 2 – Barragens de rejeito cadastradas no SIGBM 2019 e 2023  | 27 |
| Figura 3 – Fluxograma TSF. Adaptado de ICMM (2021)  | 28 |
| Figura 4 – Comparativo entre as causas de incidentes em barragens de rejeito ativas e inativas. Adaptado de ICOLD (2001)                      | 32 |
| Figura 5 – Áreas para obtenção do fator a (Adaptado de Schnaid e Odebrecht, 2012)   | 47 |
| Figura 6 – Sistema de rejeitos da MRN com destaque para o SP-4 Leste  | 51 |
| Figura 7 – Seção típica dos reservatórios de rejeito de bauxita da MRN  | 52 |
| Figura 8 – Fluxograma esquemático do sistema de rejeitos da MRN. Adaptado do acervo MRN.  | 53 |
| Figura 9 – Pluviometria maio/2018 a novembro/2022   | 54 |
| Figura 10 – Localização estação pluviométrica TP-01   | 55 |
| Figura 11 – Rejeito após ciclo de disposição  | 56 |
| Figura 12 – Crosta de rejeito ressecado   | 56 |
| Figura 13 – SP-4 Leste antes do plano de descaracterização (2020)   | 58 |
| Figura 14 – Limpeza da região interna do SP-4 Leste   | 58 |
| Figura 15 – Superfície projetada do SP-4 Leste  | 59 |
| Figura 16 – SP-4 Leste após obras de fechamento (2021)  | 60 |
| Figura 17 – Sistema extravor em caixas de gabião  | 61 |
| Figura 18 –Pontos de monitoramento da água no corpo receptor  | 63 |
| Figura 19 – SP-4 Leste após obras de fechamento e implantação de barreiras vegetais (2021)  | 64 |
| Figura 20 – Piezômetros instalados no SP-4 Leste  | 65 |
| Figura 21 – Malha de piquetes para monitoramento topográfico  | 66 |
| Figura 22 – Localização dos ensaios CPTu e piezômetros no rejeito   | 67 |
| Figura 23 – Histograma de massa específica dos grãos - campanha 2017  | 75 |
| Figura 24 – Histograma de massa específica dos grãos - campanha 2020  | 75 |
| Figura 25 – Curva granulométrica – Campanha de 2017   | 76 |
| Figura 26 – Curva granulométrica – Campanha de 2020   | 77 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 27 – Curva granulométrica sem utilização de defloculante (Pedrosa, 2012)                             | 78  |
| Figura 28 – Curva granulométrica com utilização de defloculante (Pedrosa, 2012)                             | 78  |
| Figura 29 – Histograma de limite de liquidez – campanha 2017  | 79  |
| Figura 30 – Histograma de limite de plasticidade – campanha 2017  | 80  |
| Figura 31 – Perfil do teor de sólidos   | 82  |
| Figura 32 – Perfil do teor de umidade   | 82  |
| Figura 33 – Perfil do peso específico   | 83  |
| Figura 34 – Triaxial CIU em amostra de rejeito com 64% de T.S.  | 85  |
| Figura 35 – Resistência de ponta e poropressão CPTu-06  | 88  |
| Figura 36 – Resistência de ponta e poropressão CPTu-08  | 89  |
| Figura 37 – Índice de classificação dos materiais $I_c$   | 90  |
| Figura 38 – Curvas de dissipação $t_{50}$   | 92  |
| Figura 39 – Resistência de ponta da camada de rejeito   | 93  |
| Figura 40 – Módulo edométrico da camada de rejeito  | 93  |
| Figura 41 – Resistência de ponta da camada de rejeito modificada  | 94  |
| Figura 42 – Módulo edométrico da camada de rejeito modificada   | 94  |
| Figura 43 – Perfil de resistência não drenada $S_u$   | 96  |
| Figura 44 – Sensibilidade do rejeito  | 97  |
| Figura 45 – Comparação entre a compactação com rolo (porção esquerda) e com trator esteira (porção direita) | 98  |
| Figura 46 – Histograma de grau de compactação da camada de rejeito desaguado                                | 99  |
| Figura 47 – Histograma de umidade da camada de rejeito desaguado  | 100 |
| Figura 48 – Histograma de peso específico da camada de rejeito desaguado                                    | 100 |
| Figura 49 – Monitoramento da turbidez no extravasor do SP-4 Leste   | 101 |
| Figura 50 – Leituras dos piezômetros instalados no rejeito  | 103 |
| Figura 51 – Mapeamento das regiões com acúmulo de água  | 104 |
| Figura 52 – Mapa hipsométrico dos maiores recalques monitorados   | 105 |
| Figura 53 – Início da revegetação   | 106 |
| Figura 54 – Resistência de ponta dos ensaios CPTu   | 109 |
| Figura 55 – Mapa hipsométrico $M = 250,0$ kPa   | 111 |
| Figura 56 – Mapa hipsométrico $M = 103,0$ kPa   | 112 |
| Figura 57 – Mapa hipsométrico $M = 407,7$ kPa   | 113 |
| Figura 58 – Classificação de camadas a partir do módulo edométrico  | 114 |
| Figura 59 – Mapa hipsométrico $M$ por camadas   | 115 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 60 – Mapa hipsométrico $M = 708,1$ kPa  | 116 |
| Figura 61 – Curvas de adensamento para a camada compressível                                 | 117 |
| Figura 62 – Malha e estratigrafia para camada única de rejeito                               | 119 |
| Figura 63 – Malha e estratigrafia para camada de rejeito com crosta ressecada                | 120 |
| Figura 64 – Deslocamentos para camada única de rejeito para aterro de 1,6 m                  | 124 |
| Figura 65 – Deslocamentos da camada de rejeito com crosta para aterro de 1,6 m               | 124 |
| Figura 66 – Deslocamentos para camada única de rejeito para aterro de 0,8 m                  | 125 |
| Figura 67 – Deslocamentos da camada de rejeito com crosta para aterro de 0,8 m               | 125 |
| Figura 68 – Evolução Recalque x Tempo em função da construção do aterro – cenários numéricos | 126 |
| Figura 69 – Comparativo Recalque x Tempo para os cenários teóricos e numéricos               | 129 |

## LISTA DE TABELAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 1 - Metodologias para alteamento de barragens                              | 25  |
| Tabela 2 - Legislações e normas brasileiras                                       | 30  |
| Tabela 3 - Referências internacionais   | 31  |
| Tabela 4 – Valores típicos de coeficiente de permeabilidade em solos sedimentares | 38  |
| Tabela 5 – Aplicabilidade do ensaio CPT na determinação de parâmetros             | 43  |
| Tabela 6 – Classificação SBT a partir índice de classificação do material $I_c$   | 44  |
| Tabela 7 – Razão de permeabilidade em argilas                                     | 46  |
| Tabela 8 – Sensibilidade das argilas  | 49  |
| Tabela 9 – Fator tempo (T) em função da porcentagem de dissipação                 | 70  |
| Tabela 10 – Composição química rejeito MRN  | 74  |
| Tabela 11 – Índice de vazios por camada   | 84  |
| Tabela 12 – Índices de compressão segundo ensaios HCT                             | 86  |
| Tabela 13 – Índices de compressão segundo correlação de Robertson (2015)          | 95  |
| Tabela 14 – Cotas da camada de rejeito conforme CPTu                              | 110 |
| Tabela 15 – Limites das camadas a partir do módulo edométrico                     | 115 |
| Tabela 16 – Previsão do tempo para ocorrência do maior recalque observado         | 118 |
| Tabela 17 – Índices de compressão segundo ensaios HCT                             | 121 |
| Tabela 18 – Parâmetros e índices físicos do rejeito                               | 122 |
| Tabela 19 – Parâmetros e índices físicos dos materiais drenados                   | 123 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|        |  |
|--------|--|
| ABNT   | Associação Brasileira de Normas Técnicas                       |
| ANCOLD | Australian National Committee on Large Dams                    |
| ANM    | Agência Nacional de Mineração                                  |
| CDA    | Canadian Dam Association                                       |
| CNRH   | Conselho Nacional de Recursos Hídricos                         |
| CPT    | Ensaio de cone   |
| CPTu   | Ensaio de piezocone  |
| FNMA   | Fundo Nacional do Meio Ambiente                                |
| GISTM  | Global Industry Standard on Tailings Management                |
| HCT    | Ensaio de adensamento induzido por força de percolação         |
| IBRAM  | Instituto Brasileiro de Mineração                              |
| ICMM   | International Council for Mining and Metals                    |
| ICOLD  | International Commission On Large Dams                         |
| MRN    | Mineração Rio do Norte   |
| NBR    | Norma Técnica Brasileira                                       |
| NRM    | Normas Reguladoras de Mineração                                |
| PGECIV | Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil                  |
| PNSB   | Política Nacional de Segurança de Barragens                    |
| PRI    | Principles for Responsible Investment                          |
| SIGBM  | Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração          |
| TSF    | Tailings Storage Facilities                                    |
| TSF    | Tailings Storage Facilities                                    |
| UERJ   | Universidade do Estado do Rio de Janeiro                       |
| UNEP   | United Nations Environment Programme                           |
| USBR   | United States Department of the Interior Bureau of Reclamation |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|            |  |
|------------|--|
| $a_v$      | Coeficiente de compressibilidade                             |
| $c_c$      | Índice de compressão virgem                                  |
| $c_r$      | Índice de recompressão                                       |
| $c_s$      | Índice de expansão   |
| $c_\alpha$ | Coeficiente de compressão secundária                         |
| $c_h$      | Coeficiente de adensamento horizontal                        |
| $c_v$      | Coeficiente de adensamento vertical                          |
| $E$        | Módulo de elasticidade                                       |
| $G$        | Módulo Cisalhante  |
| $e$        | Índice de vazios   |
| $e_0$      | Índice de vazios inicial ou de campo                         |
| $e_f$      | Índice de vazios final                                       |
| $G_s$      | Densidade relativa real dos grãos                            |
| $k_h$      | Coeficiente de permeabilidade horizontal                     |
| $k_v$      | Coeficiente de permeabilidade vertical                       |
| $k_0$      | Coeficiente de empuxo lateral no repouso                     |
| LL         | Limite de liquidez   |
| LP         | Limite de plasticidade                                       |
| LC         | Limite de contração  |
| $M$        | Módulo edométrico  |
| $m_v$      | Coeficiente de variação volumétrica                          |
| OCR        | Razão de pré-adensamento ( <i>Over Consolidation Ratio</i> ) |
| $S$        | Grau de Saturação  |
| $S_u$      | Resistência ao cisalhamento não drenada indeformada          |
| $S_{ur}$   | Resistência ao cisalhamento não drenada amolgada             |
| $S_t$      | Sensibilidade  |
| $F$        | Fator tempo  |
| $t$        | Tempo  |
| $u$        | Poropressão  |
| $U$        | Porcentagem média de adensamento                             |

|                |   |
|----------------|---|
| $w$            | Teor de umidade                                     |
| $w_{ot}$       | Teor de umidade ótimo                               |
| $z$            | profundidade  |
| $\phi$         | Ângulo de atrito                                    |
| $c$            | Coesão  |
| $\psi$         | Ângulo de dilatação                                 |
| $\gamma$       | Peso específico                                     |
| $\gamma_d$     | Peso específico seco                                |
| $\gamma_{sat}$ | Peso específico saturado                            |
| $\gamma_w$     | Peso específico da água                             |
| $\nu$          | Coefficiente de Poisson                             |
| $\rho$         | Recalque  |
| $\sigma$       | Tensão  |
| $\sigma_v$     | Tensão vertical                                     |
| $\sigma_{vo}$  | Tensão vertical inicial                             |
| $\sigma_3$     | Tensão de confinamento                              |
| $q_c$          | Resistência de ponta do cone                        |
| $q_t$          | Resistência de ponta do cone normalizada            |
| $Q_c$          | Força atuante no cone                               |
| $Q_t$          | Força atuante no cone normalizada                   |
| $A_c$          | Área do cone  |
| $B_q$          | Razão de excesso de poropressão                     |
| $F_s$          | Força de atrito                                     |
| $F_r$          | Força de atrito normalizada                         |
| $R_r$          | Razão de atrito                                     |
| $D_r$          | Densidade relativa                                  |
| $I_c$          | Índice de classificação do material                 |
| SBT            | Comportamento do solo ( <i>Soil Behavior Type</i> ) |

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>INTRODUÇÃO</b> .....  | <b>17</b> |
| <b>Contexto geral</b> .....  | <b>17</b> |
| <b>Objetivo</b> .....  | <b>20</b> |
| <b>Estrutura do trabalho</b> .....   | <b>21</b> |
| <b>1 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....   | <b>23</b> |
| <b>1.1 Barragens de rejeitos e aspectos legais</b> .....   | <b>23</b> |
| <b>1.2 Descomissionamento e Descaracterização</b> .....  | <b>31</b> |
| 1.2.1 Plano de descaracterização .....   | 34        |
| <b>1.3 Previsão do Processo de Adensamento</b> .....   | <b>36</b> |
| 1.3.1 Teoria de Terzaghi .....   | 36        |
| 1.3.2 Estimativa de Recalque .....   | 38        |
| <b>1.4 Ensaio de laboratório aplicados à determinação de parâmetros de compressibilidade e adensamento</b> ..... | <b>40</b> |
| 1.4.1 Ensaio de adensamento por força de percolação – HCT .....  | 41        |
| <b>1.5 Ensaio de campo aplicados à determinação de parâmetros de compressibilidade e adensamento</b> .....       | <b>42</b> |
| 1.5.1 Ensaio de piezocone – CPTu .....   | 45        |
| 1.5.2 Ensaio de palheta – Vane Test .....  | 49        |
| <b>2 RESERVATÓRIO DE REJEITO DE BAUXITA SP-4 LESTE</b> .....   | <b>51</b> |
| <b>2.1 Sistema de Lavra e Rejeitos da MRN</b> .....  | <b>51</b> |
| <b>2.2 Obras de Fechamento do SP4-Norte Área Leste</b> .....   | <b>57</b> |
| 2.2.1 Metodologia Construtiva .....  | 59        |
| 2.2.2 Monitoramento Ambiental .....  | 62        |
| 2.2.3 Monitoramento Geotécnico .....   | 65        |
| <b>2.3 Processo de adensamento</b> .....   | <b>68</b> |
| 2.3.1 Previsão teórica .....   | 68        |
| 2.3.2 Previsão numérica .....  | 71        |
| <b>3 ANÁLISE E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS – ENSAIOS DE LABORATÓRIO</b> .....                                      | <b>73</b> |
| <b>3.1 Análise química</b> .....   | <b>73</b> |
| <b>3.2 Análise mineralógica</b> .....  | <b>74</b> |

|   |            |
|---|------------|
| <b>3.3 Massa específica dos grãos .....</b>                           | <b>74</b>  |
| <b>3.4 Granulometria .....</b>  | <b>76</b>  |
| <b>3.5 Limites de consistência .....</b>                              | <b>78</b>  |
| 3.5.1 Limite de liquidez.....   | 79         |
| 3.5.2 Limite de plasticidade .....                                    | 80         |
| 3.5.3 Limite de contração .....                                       | 80         |
| <b>3.6 Teor de sólidos, teor de umidade e peso específico .....</b>   | <b>81</b>  |
| 3.6.1 Índice de vazios.....   | 84         |
| <b>3.7 Parâmetros de resistência.....</b>                             | <b>85</b>  |
| <b>3.8 Índice de compressão.....</b>                                  | <b>86</b>  |
| <b>4 ANÁLISE E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS – ENSAIOS DE CAMPO .....</b> | <b>87</b>  |
| <b>4.1 Piezocone.....</b>   | <b>87</b>  |
| 4.1.1 Resistência de ponta do cone e o perfil de poropressões.....    | 87         |
| 4.1.2 Classificação SBT .....   | 89         |
| 4.1.3 Dissipação de poropressão .....                                 | 91         |
| 4.1.4 Módulo edométrico .....   | 92         |
| 4.1.5 Índice de compressão .....                                      | 94         |
| <b>4.2 Vane Test .....</b>  | <b>95</b>  |
| 4.2.1 Resistência não drenada.....                                    | 95         |
| 4.2.2 Sensibilidade .....   | 97         |
| <b>5 ANÁLISE E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS – METODOLOGIA</b>            |            |
| <b>CONSTRUTIVA E MONITORAMENTOS.....</b>                              | <b>98</b>  |
| <b>5.1 Compactação do rejeito desaguado .....</b>                     | <b>98</b>  |
| <b>5.2 Turbidez do excedente hídrico.....</b>                         | <b>101</b> |
| <b>5.3 Monitoramento geotécnico.....</b>                              | <b>102</b> |
| <b>6 PROCESSO DE ADENSAMENTO - PREVISÃO E ANÁLISE .....</b>           | <b>107</b> |
| <b>6.1 Previsão a partir de ensaios CPTu .....</b>                    | <b>108</b> |
| 6.1.1 Definição da camada de rejeito .....                            | 108        |
| 6.1.2 Coeficiente de adensamento.....                                 | 110        |
| 6.1.3 Cenário de Projeto .....  | 111        |
| 6.1.4 Cenário 1 – Módulo edométrico mínimo.....                       | 112        |
| 6.1.5 Cenário 2 – Módulo edométrico médio.....                        | 113        |
| 6.1.6 Cenário 3 – Módulo edométrico por camadas.....                  | 113        |
| 6.1.7 Cenário 4 – Módulo edométrico máximo .....                      | 116        |

|   |            |
|---|------------|
| 6.1.8 Previsão do processo de adensamento .....                       | 117        |
| <b>6.2 Modelagem numérica aplicada à estimativa de recalque .....</b> | <b>118</b> |
| 6.2.1 Parâmetros e índices físicos adotados.....                      | 120        |
| 6.2.2 Análise e discussão dos resultados .....                        | 124        |
| <b>6.3 Resultados e discussões.....</b>                               | <b>127</b> |
| <b>7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>                                 | <b>131</b> |
| 7.1.1 Metodologia construtiva e monitoramentos .....                  | 131        |
| 7.1.2 Processo de adensamento – estimativa teórica e numérica .....   | 132        |
| 7.1.3 Propostas para trabalhos futuros .....                          | 134        |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>   | <b>135</b> |
| <b>ANEXOS .....</b>   | <b>139</b> |

## INTRODUÇÃO

### Contexto geral

Nas últimas décadas a necessidade pela preservação ambiental acima da exploração humana acarretou em grande demanda por estudos ambientais, hidrológicos, geológicos e geotécnicos. A engenharia geotécnica detém vastas ramificações, podendo-se citar a concretização de projetos que integrem o desejo social, as engenharias e o meio ambiente, como as barragens de mineração.

A extração mineral tem por objetivo atender às demandas da sociedade por aço, alumínio, cobre, níquel, ouro, nióbio e tantos outros presentes no cotidiano, seja na moda, nos eletrodomésticos, nos automóveis ou até nos equipamentos hospitalares. O processo até a obtenção do produto final está associado a grande geração de estéril e rejeito.

A destinação adequada dos rejeitos é de responsabilidade da companhia mineral, estes podem ser encontrados em polpa, pasta ou secos. Quando em estado seco ou pasta com elevado teor de sólidos, oportunamente sua deposição pode ser feita através de pilhas de rejeito e no preenchimento das cavas de onde foram escavados. No caso dos rejeitos com maior teor de umidade, podendo variar bruscamente a consistência, o material precisa ser confinado através de alguma estrutura, de forma geral, as barragens.

Embora o barramento estudado no presente trabalho seja cadastrado como barragem no SIGBM, o mesmo não apresenta as características mais conhecidas de uma estrutural convencional como núcleo e filtro por exemplo, podendo ser mais facilmente reconhecido por reservatório contido por diques periféricos.

Por definição, barragem de mineração contempla barragens, barramentos, diques, cavas com barramento em cota superior à da topografia original e estruturas associadas ao barramento destinadas à atividade mineral. As estruturas que estão recebendo rejeitos ou sedimentos, são notoriamente classificadas como ativas, entretanto as descomissionadas e desativadas são distinguidas por uma linha tênue (Resolução nº 95, 2022).

O descomissionamento refere-se ao encerramento das operações e remoção dos componentes operacionais, como espigotes, válvula e tubulações. Não obstante, as barragens desativadas ou inativas se mantêm com aspecto de barragem de mineração, entretanto não recebem materiais oriundos de sua atividade.

A Mineração Rio do Norte encontra-se situada no interior de uma unidade de conservação de uso sustentável - Floresta Nacional de Saracá-Taquera, de tal maneira, as atividades desenvolvidas na unidade de conservação e causadora de impactos ambientais são de competência fiscalizatória de órgãos federais. Nesse aspecto, a mineração deve descomissionar e descaracterizar cada reservatório ao final da sua vida útil de maneira a reconstituir o cenário natural.

Pautado na norma brasileira NBR 13.028 (2017), o plano de desativação deve contemplar todas as atividades posteriores à vida útil do barramento, abrangendo revestimentos para proteção dos taludes e sistemas de drenagem, monitoramento, instrumentação e medidas necessárias para garantir as condições de estabilidade. Em complemento, o plano de fechamento de uma barragem deve descrever os processos e as alternativas do uso futuro da estrutura, visando a integração ao plano de fechamento da mina.

A preparação da estrutura a ser descaracterizada deve garantir a estabilidade física, química e biológica, além da estrutural. Com o intuito de retornar a área ao meio ambiente, se faz necessário considerar todos os fatores do longo prazo, como segurança, durabilidade e integração. De maneira geral, há pouca experiência registrada no âmbito das obras de fechamento de reservatório, desse modo, os experimentos e as inovações aderem contribuições muito relevantes na construção do conhecimento empírico, buscando alcançar as diretrizes mais eficientes para cada tipo de estrutura.

Durante a concepção do projeto de descaracterização são definidas as etapas de monitoramento geotécnico e ambiental das quais perduram até que seja realizada a reintegração da estrutura ao meio ambiente. Uma das vertentes do monitoramento geotécnico é o acompanhamento do processo de adensamento na camada de rejeito o qual pode gerar abatimentos na superfície de conformação.

A previsão do processo de adensamento permite que tanto a empresa quanto os órgãos fiscalizadores sejam capazes de se preparar para o tempo que será decorrido até a inexistência de recalques significativos, já que é possível estimar quanto tempo será despendido até o final do processo e suas proporções. Os riscos

associados à ocorrência de abatimentos justifica dada importância, já que os pontos que ficam mais baixos tendem a acumular água que, por sua vez, dificulta o reflorestamento.

Neste trabalho, compreende-se por barragem, barramento, reservatório e *pond* a estrutura destinada à contenção de rejeitos que, por sua vez, são o resultado da lavagem ou beneficiamento do minério. Enquanto descomissionamento entende-se como termo referente à etapa precedente à descaracterização, enquanto fechamento pode ser considerado o conjunto das etapas ou cada uma individualmente em um contexto mais amplo.

## Objetivo

O presente estudo tem como objetivo geral analisar o processo de adensamento em reservatório de rejeito de bauxita, a fim de contribuir para a construção do conhecimento empírico, com o objetivo de colaborar para a definição de diretrizes mais eficientes para o fechamento de cada tipo de estrutura.

## Objetivos específicos

- Aferir a aderência da aplicação de parâmetros determinados através do ensaio de piezocone (CPTu) à teoria convencional do adensamento e os parâmetros determinados através do ensaio de adensamento induzido por força de percolação (HCT) à modelagem numérica a partir da comparação com os resultados obtidos em campo através do monitoramento topográfico.

- Analisar a aderência de duas metodologias (teórica e numérica) para a previsão do adensamento em reservatório de bauxita aos resultados obtidos a partir do monitoramento geotécnico com estudo de caso de adensamento em barragem de rejeito de bauxita em fase de descaracterização com exposição e análise dos dados referentes à:

- Metodologia construtiva utilizada nas obras de fechamento, do plano de monitoramento ambiental e geotécnico;
- Obtenção dos parâmetros de adensamento a partir dos resultados de ensaios de piezocone;
- Avaliação da influência do refinamento do módulo edométrico por camada na estimativa de recalque;
- Estimativa dos recalques através das correlações do CPTu propostas por Robertson (2015) e princípios da Teoria do Adensamento de Terzaghi;
- Modelagem numérica no software PLAXIS 2D abordando a previsão do adensamento a partir de uma seção representativa do reservatório;
- Apreciação dos resultados obtidos através dos cálculos teóricos e da modelagem numérica em comparação com os resultados obtidos com o monitoramento topográfico em campo.

## Estrutura do trabalho

O presente trabalho dispõe de 7 capítulos, além do presente capítulo, referente à introdução, contemplando o contexto geral da necessidade de fechamento de reservatório de rejeito, os objetivos e a estrutura da dissertação.

O capítulo 1 consolida referências bibliográficas sobre os aspectos legais de barragens de rejeito; conceitos e tratativas nacionais e internacionais sobre o plano de fechamento. Este abrange também o que diz respeito ao estudo do adensamento na camada de rejeito dentro do reservatório: estimativa de recalque, teorias de adensamento, determinação de parâmetros de compressibilidade e adensamento do solo através de ensaios de laboratório e de campo.

O capítulo 2 discorre sobre o sistema de lavras da MRN, aspectos do reservatório SP-4 Leste e detalhes sobre a metodologia construtiva das obras de fechamento do barramento, aborda os planos de monitoramento ambiental e geotécnico que foram propostos em projeto, além de mencionar os métodos utilizados para obtenção dos parâmetros aplicados na previsão do processo de adensamento e explanar as metodologias utilizadas para a estimativa.

No capítulo 3 e 4 são apresentados e analisados os dados da caracterização do rejeito de bauxita da MRN e os resultados de ensaios de laboratório e campo, respectivamente, utilizados para definição de parâmetros abordados no estudo.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos no monitoramento ambiental e geotécnico no SP-4 Leste, conforme proposições expostas no capítulo anterior, abordando desde os monitoramentos, incluindo o resultado da turbidez e intervenção proposta para melhoria deste indicador.

O capítulo 6 conta com a previsão e a análise do processo de adensamento da camada de rejeito no interior do barramento em estudo. Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações teóricas na previsão do recalque a partir da variação do módulo edométrico e definição da camada de rejeito. O capítulo conta ainda com apresentação da modelagem numérica realizada a partir do software PLAXIS 2D contemplando o mesmo cenário do modelo teórico e um comparativo adicional que abrange a inclusão da camada ressecada de rejeito. Dessa forma, são apresentadas análises comparativas entre os cenários simulados e o monitorado em campo.

Finalmente, o capítulo 7 abrange uma conclusão geral da pesquisa, além de propor temas potencialmente relevantes para serem desenvolvidos em trabalhos futuros.

## 1 REVISÃO DA LITERATURA

### 1.1 Barragens de rejeitos e aspectos legais

As barragens de mineração, conforme a Resolução nº95 publicada em fevereiro de 2022 e alterações publicadas em fevereiro de 2023 na Resolução nº 130, compreendem barragens, barramentos, diques, cavas com barramento em cota superior à da topografia original e estruturas associadas ao barramento destinadas à atividade minerária. As estruturas que estão recebendo rejeitos ou sedimentos, são notoriamente classificadas como ativas, entretanto as descomissionadas e desativadas são distinguidas por uma linha tênue.

Segundo Lozano (2006), as atividades minerais geram dois tipos de resíduos, os estéreis e os rejeitos. O primeiro grupo se refere aos materiais sem valor comercial que resultam do processo de lavra nas jazidas, estes são comumente dispostos em pilhas, podendo também auxiliar na própria extração do minério. Paralelamente, os rejeitos são resultantes do beneficiamento do minério, podendo conter substâncias tóxicas ou serem inertes.

Durante a concepção do projeto de uma barragem, é imprescindível avaliar as condições geológicas, geotécnicas e hidrológicas através de investigação de campo e laboratório antes de determinar a localização do empreendimento. De maneira geral, as barragens se localizam próximas à planta de beneficiamento, devido ao rejeito ser corriqueiramente transportado com consistência de polpa ou pasta através de rejeitodutos ou caminhos a céu aberto. Sendo assim, quanto menor a distância, maior a economia de materiais e manutenção a médio e longo prazo (Fernandes, 2020).

A definição do volume útil a ser disponibilizado pelo barramento está relacionada à produtividade mineral da companhia e da área disponível para implantação. Todavia, a geometria das paredes depende diretamente das análises de estabilidade e avaliação quanto aos materiais e métodos a serem utilizados de forma a garantir o melhor desempenho e custo-benefício. Motivos pelos quais se torna demasiadamente importante submeter o projeto a todas as fases, desde o conceitual, passando pelo básico até a maturidade ideal para que seja detalhada a alternativa a ser implantada.

As barragens de rejeito podem ser de solo, enrocamento ou até mesmo rejeitos que podem passar por ciclonagem ou serem segregados hidraulicamente até apresentarem granulometria, resistência ao cisalhamento e permeabilidade adequadas. As estruturas podem ser erguidas em etapa única ou por alteamentos sucessivos. Há ainda o método de empilhamento drenado que garante a drenagem livre permitindo condições não saturadas (NBR 13028, 2018).

Segundo Fernandes (2020), além das diversas configurações geométricas definidas no projeto geotécnico, as barragens podem contemplar núcleo, filtro, dreno e até revestimento de montante em diferentes materiais como enrocamento, concreto e geossintético. Similarmente, os sistemas de drenagem também são versáteis, incluindo desde a própria declividade dimensionada para escoamento superficial por gravidade até canais, escadas d'água, descidas metálicas e extravasores.

Resumidamente, os alteamentos se devem à necessidade de aumentar o volume útil para disposição em certa barragem, podendo ser constituído pelo próprio rejeito em condições adequadas de trabalhabilidade ou por material de empréstimo. O método de jusante, considerado o mais seguro, estrutura o trecho incremental no terreno de fundação e no maciço, tendo o eixo deslocado para o bordo de jusante.

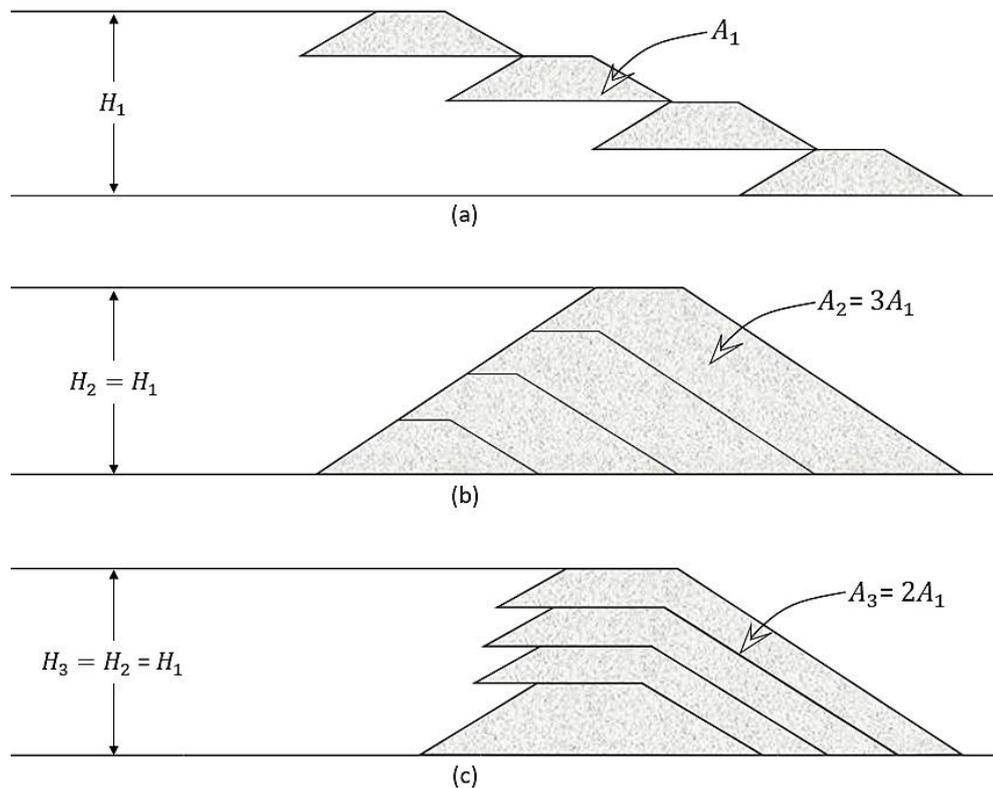
Vick (1990) discrimina os métodos citando que o alteamento a montante se caracteriza pelo eixo ser deslocado para montante, dessa forma o trecho adicional passa a ser sustentado pelo próprio rejeito, o que demanda muito estudo e análise sobre o comportamento deste material que possui uma variabilidade substancial. Paralelamente, o alteamento por linha de centro se faz entender como intermédio entre os demais, o eixo é mantido ao centro, sendo sustentado pelo terreno de fundação, pelo maciço da barragem e pelo rejeito em uma pequena parcela.

A abrangente adoção do método de alteamento a montante se deve aos aspectos relacionados, principalmente, aos materiais e às áreas disponíveis, além do tempo necessário e complexibilidade construtiva. Lozano (2006) descreve as vantagens e desvantagens de cada metodologia, de forma sucinta apresentadas na Tabela 1

**Tabela 1 - Metodologias para alteamento de barragens**

|                 | Vantagens   | Desvantagens  |
|-----------------|---|---|
| Montante        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor volume de material;</li> <li>• Menor custo de construção;</li> <li>• Maior velocidade de alteamento;</li> <li>• Menor necessidade de área disponível para implantação.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Freática próxima do talude de jusante;</li> <li>• Maior susceptibilidade à liquefação a depender das condições do rejeito;</li> <li>• Maior probabilidade de ocorrência de <i>piping</i>.</li> </ul> |
| Jusante         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Freática distante do talude de jusante;</li> <li>• Menor susceptibilidade à liquefação</li> <li>• Menor probabilidade de ocorrência de <i>piping</i>;</li> <li>• Maior segurança devido ao controle construtivo e geométrico.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maior volume de material;</li> <li>• Maior custo de construção;</li> <li>• Menor velocidade de alteamento;</li> <li>• Maior necessidade de área disponível para implantação.</li> </ul>              |
| Linha de centro | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Volume de material menor em relação ao método de jusante;</li> <li>• Eixo de alteamento constante;</li> <li>• Menor necessidade de área disponível para implantação em relação ao método de jusante.</li> </ul>                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Necessidade de sistemas de drenagem eficientes;</li> <li>• Maior complexibilidade construtiva;</li> <li>• Maior custo de construção.</li> </ul>  |

A comparação geométrica pode ser compreendida através da proposta apresentada por Vick (1990), conforme Figura 1.

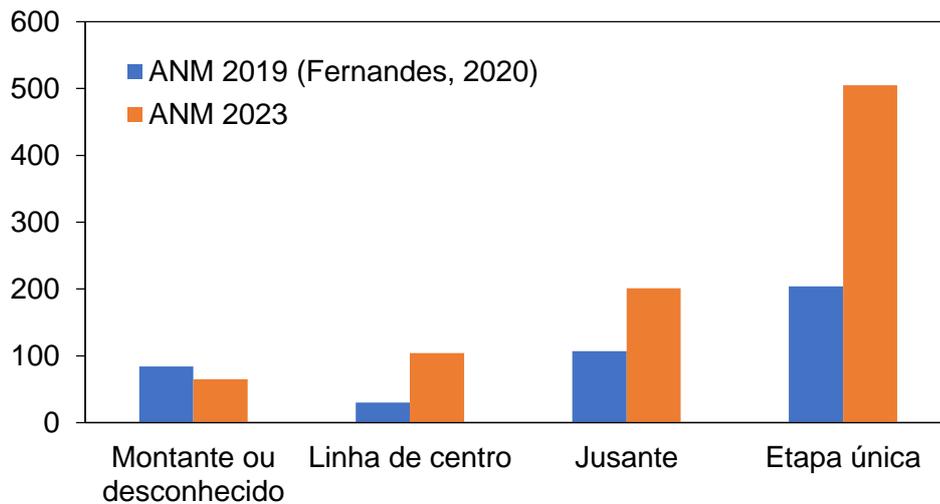


**Figura 1 – Comparativo volumétrico dos diferentes tipos de barragem: (a) Montante, (b) Jusante e (c) Linha de centro. Adaptado de Vick (1990)**

A partir do comparativo volumétrico ( $V$ ) supracitado, que considera dimensões similares para todos os diques, nota-se que o alteamento de montante demanda aproximadamente um terço do material despendido pelo alteamento de jusante, enquanto a metodologia por linha de centro consome o dobro da quantidade de material utilizada na metodologia de montante, sendo:

$$V_{\text{montante}} < V_{\text{linha de centro}} < V_{\text{jusante}}$$

De acordo com os dados divulgados pela ANM em fevereiro de 2023 através do SIGBM Público, é possível identificar a quantidade de barragens cadastradas no Brasil e seu respectivo método de alteamento. A Figura 2 apresenta o comparativo entre os dados da ANM de 2023 e de 2019 que foram analisados por Fernandes (2020).



**Figura 2 – Barragens de rejeito cadastradas no SIGBM 2019 e 2023**

O comparativo supracitado permite observar uma redução no número de barragens alteadas pelo método de montante e, em contrapartida, um aumento no cadastro de barragens construídas em etapa única ou alteadas por linha de centro e jusante.

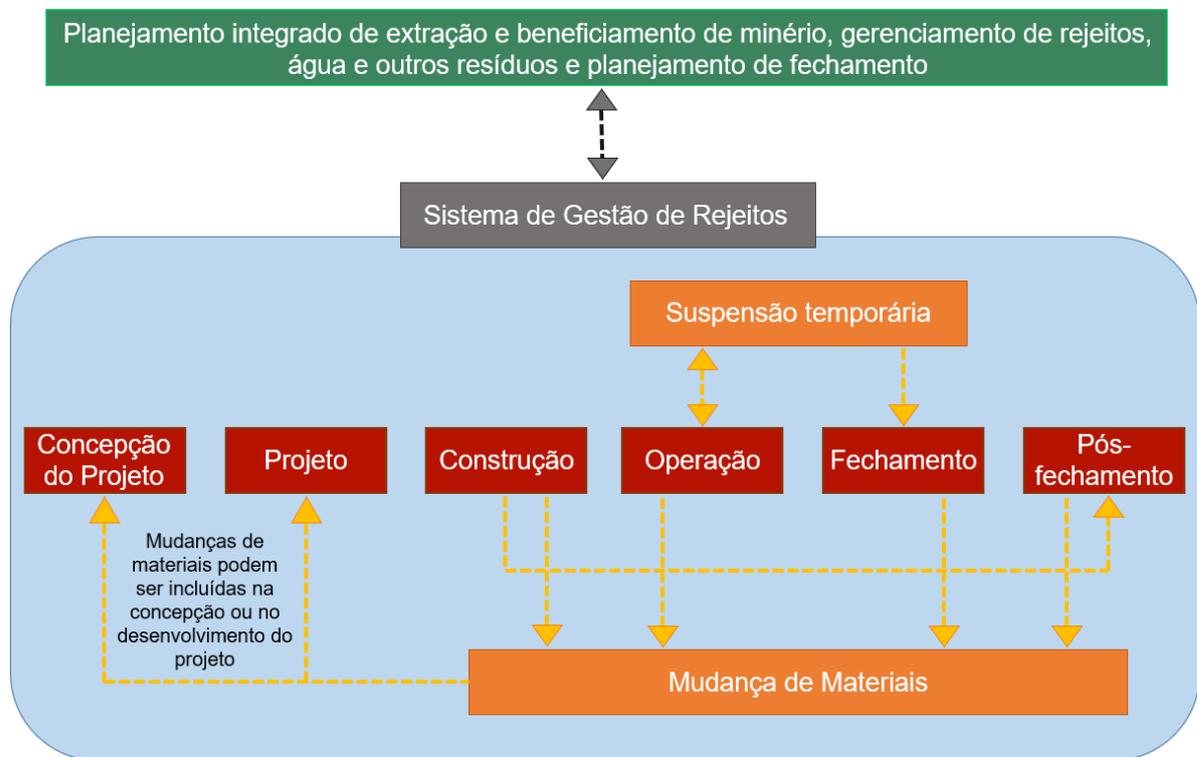
O fato da redução no cadastro das barragens construídas ou alteadas pelo método de montante ou desconhecido pode ser decorrente da publicação da lei 14.066/2020 em setembro de 2020 que tornou obrigatória a descaracterização de todas as barragens alteadas pelo método de montante, além de proibir a construção ou alteamento por este método. Dessa forma, as mineradoras se preocuparam em classificar as estruturas que apresentavam método desconhecido.

Conforme o GISTM (2020), as propriedades físicas e químicas do rejeito devem ser atualizadas regularmente, abrangendo os conhecimentos geotécnicos, sísmicos, climatológicos, geomorfológicos, geológicos, geoquímicos, hidrológicos e hidrogeológicos. Além da caracterização detalhada sobre o local onde encontram-se as estruturas, as atualizações sobre o contexto ambiental, social, e econômico devem ocorrer pelo menos a cada cinco anos e sempre que houverem mudanças relevantes na estrutura de disposição de rejeitos ou no contexto social.

Em 2020, através do esforço conjunto entre a *United Nations Environment Programme* (UNEP), *International Council for Mining and Metals* (ICMM) e a iniciativa *Principles for Responsible Investment* (PRI), foi criado o *Global Industry Standard on Tailings Management* - GISTM ou Padrão Global da Indústria para Gestão de Rejeitos

que busca soluções para uma mineração mais segura e responsável em todo o mundo (UNEP, 2021).

Quanto ao sistema de rejeitos, internacionalmente conhecido como *Tailings Storage Facilities* – TSF, o ICMM (2021) esquematiza, de maneira geral para qualquer TSF, o fluxograma correspondente ao ciclo de vida desde a concepção até o fechamento das estruturas conforme ilustrado na Figura 3.



**Figura 3 – Fluxograma TSF. Adaptado de ICMM (2021)**

No fluxograma supracitado os itens em vermelho se referem à atividades esperadas para todas as instalações de rejeitos. As caixas laranjas indicam atividades ou relações que têm possibilidade de ocorrer. As fases são descritas pelo GISTM como:

- 1 e 2 – Concepção, planejamento e desenho do projeto;
- 3 – Construção inicial;
- 4 – Operação e construção permanente;
- 5 – Fechamento incluindo cuidado ativo;
- 6 – Pós-fechamento incluindo cuidados passivos.

Pode-se observar similaridade entre a definição brasileira e internacional quanto aos ciclos de vida da estrutura, assim sendo:

Ciclo de vida: sucessão de fases na vida da estrutura de contenção de rejeitos/sedimentos, contemplando o planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento e primeiro vertimento, operação, desativação e descaracterização. RESOLUÇÃO nº95 (2022).

A Resolução nº 130 (ANM, 2023) apresenta pela primeira vez, em aspectos legais brasileiros, o detalhamento de informações referentes à etapa de monitoramento do fechamento. A mesma divide este período em duas etapas: etapa de monitoramento ativo e etapa de monitoramento passivo.

Sendo o período ativo correspondente ao monitoramento mínimo de dois anos podendo se estender de acordo com a necessidade e avaliação da projetista. Algumas obrigadoriedades desta etapa são a atualização de documentações normativas, inspeções periódicas e monitoramento geotécnico.

Após o fim do monitoramento ativo até o descadastramento da estrutura, deve-se observar os critérios preconizados nas normas técnicas e nas boas práticas de engenharia a fim de garantir a estabilidade física e química no longo prazo, este período é definido como monitoramento ativo.

Nesse sentido, além da indústria mineral atender as obrigadoriedades legais brasileiras, conforme compilado na Tabela 2, diversas outras referências internacionais, descritas na Tabela 3, vem sendo adotadas como boa prática.

Nota-se que a maioria das normas, resoluções e guias são recentes. No Brasil, o fato se deve à influência dos acidentes da barragem de Fundão em Mariana-MG e da mina Córrego do Feijão em Brumadinho-MG. Diversas mineradoras vêm adaptando seus processos de forma a atender às boas práticas internacionais, como adequar as operações visando atender ao Padrão Global da Indústria de Gestão de Rejeitos (ICMM, 2020).

O GISTM abrange 15 princípios e 77 requisitos auditáveis específicos distribuídos em seis tópicos principais: comunidades afetadas; base integrada de conhecimentos; projeto, construção, operação e monitoramento de estruturas de disposição de rejeitos; gestão e governança; respostas às emergências e recuperação de longo prazo; e divulgação pública e acesso à informação.

**Tabela 2 - Legislações e normas brasileiras**

| Referência  | Descrição  |
|---|--|
| NBR 11.174/1990   | Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) - Armazenamento de resíduos classes II - não inertes e III - inertes – Procedimento.   |
| Normas Reguladoras de Mineração 01 (NRM)- Portaria nº 237, de 18 de outubro de 2001                 | As Normas Reguladoras de Mineração – NRM têm por objetivo disciplinar o aproveitamento racional das jazidas, considerando-se as condições técnicas e tecnológicas de operação, de segurança e de proteção ao meio ambiente, de forma a tornar o planejamento e o desenvolvimento da atividade minerária compatíveis com a busca permanente da produtividade, da preservação ambiental, da segurança e saúde dos trabalhadores. |
| Normas Reguladoras de Mineração 19 (NRM) - Portaria nº 237, de 18 de outubro de 2001                | Disposição de Estéril, Rejeitos e Produtos.  |
| NBR 11.682/2009   | Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) - Estabilidade de encostas.  |
| Lei nº 12.334/2010  | Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de barragens.  |
| Resolução Nº 143/2012 – Ministério do Meio Ambiente – Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) | Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo volume do reservatório, em atendimento ao art. 7º da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010.   |
| Resolução Nº 144/2012 - Ministério do Meio Ambiente – Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) | Estabelece diretrizes para implementação da Política Nacional de Segurança de Barragens, aplicação de seus instrumentos e atuação do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens, em atendimento ao art. 20 da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que alterou o art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997.  |
| NBR 13.028/2017   | Associação Brasileira de Normas Técnicas - Mineração – Elaboração e Apresentação de Projetos de Barragens para Disposição de Rejeitos, Contenção de Sedimentos e Preservação de Água.  |
| NBR 13.029/2017   | Associação Brasileira de Normas Técnicas - Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha.   |
| IBRAM/2019  | Instituto Brasileiro de Mineração. Guia de Boas Práticas de Gestão de Barragens e Estruturas de Disposição de Rejeitos.  |
| Lei nº 14.066/2020  | Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração).                                   |
| Resolução Nº 95/2022 - Ministério de Minas e Energia – Agência Nacional de Mineração (ANM)          | Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração.  |

| Referência  | Descrição  |
|---|--|
| Resolução Nº 130/2023 - Ministério de Minas e Energia – Agência Nacional de Mineração (ANM) | Altera a Resolução ANM nº 95, de 7 de fevereiro de 2022, e dá outras providências. |

**Tabela 3 - Referências internacionais**

| Referência         | Descrição   |
|--------------------|---|
| USBR: 1977         | <i>United States Department of the Interior Bureau of Reclamation-Design of Small Dams, A Water Resources Technical Publication, 1977</i> |
| Whitman, R.V, 1981 | <i>Robert Whitman: Evaluating Calculated Risk in Geotechnical Engineering.</i>  |
| ANCOLD:2012        | <i>Australian National Committee on Large Dams: Guidelines on Tailings Dam Planning, Design, Construction, Operation and Closure</i>      |
| CDA: 2013          | <i>Canadian Dam Association: Dam Safety Guidelines 2007 (Revised 2013).</i>   |
| ICMM: 2019         | <i>International Council on Mining &amp; Metals: Integrated mine closure: good practice guide.</i>  |
| ICMM: 2020         | <i>International Council on Mining &amp; Metals: Global Industry Standard on Tailings Management</i>                                      |
| ICMM: 2021         | <i>International Council on Mining &amp; Metals: Conformance Protocols: Global Industry Standard on Tailings Management.</i>              |
| ICMM: 2021         | <i>International Council on Mining &amp; Metals: Tailings Management: Good Practice Guide.</i>  |
| ICMM: 2022         | <i>International Council on Mining &amp; Metals: Closure Maturity Framework – Tool for Closure Use Guide.</i>                             |

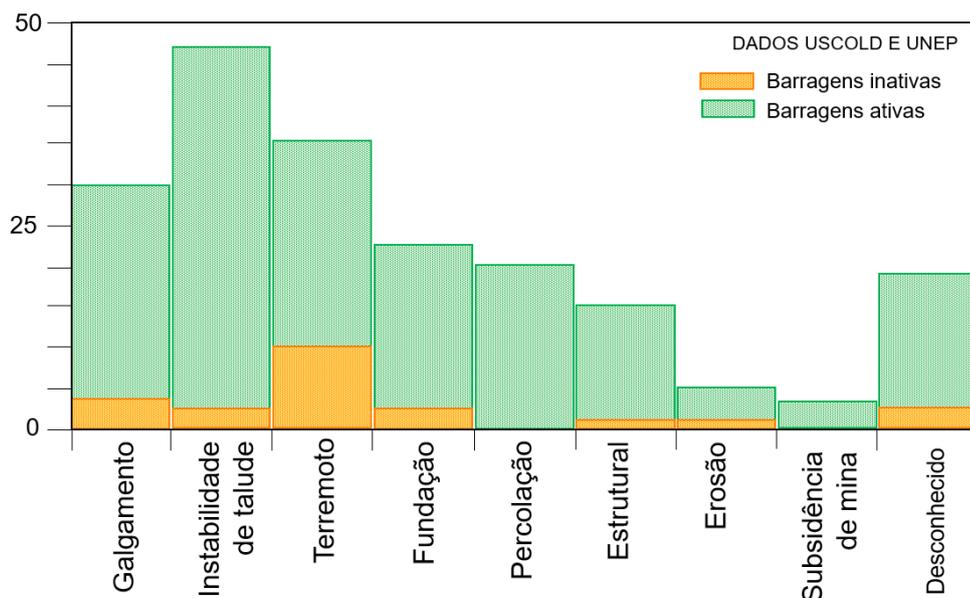
## 1.2 Descomissionamento e Descaracterização

Entende-se por descomissionamento as etapas precedentes à descaracterização, das quais contemplam a interrupção das atividades de disposição de rejeitos no reservatório, a remoção das tubulações, a adaptação do manejo e controle dos efluentes, revegetação e demais intervenções que se fizerem necessárias com o objetivo de iniciar a próxima etapa (ICMM, 2019).

Os rompimentos das barragens de Fundão em Mariana e Córrego do Feijão em Brumadinho, em 2015 e 2019 respectivamente, acarretaram em diversas mudanças

normativas no Brasil. A principal delas foi o veto ao método de alteamento a montante e obrigatoriedade em descomissionar todas as estruturas construídas a partir dessa metodologia. Embora diversas barragens de montante demandassem medidas a serem providenciadas para aumentar a segurança, estas seriam apenas em caráter provisório até a conclusão da descaracterização.

De acordo com ICOLD (2001), os maiores causadores de incidentes em barragens de rejeito ativas são instabilidade de talude, galgamento e terremotos, enquanto nas barragens inativas os casos mais frequentes se dão por galgamento e ocorrência de terremotos, conforme apresentado na Figura 4. Com o objetivo de reduzir e até eliminar os riscos das estruturas fora de operação, é necessário descaracterizá-la parcialmente ou por inteiro.



**Figura 4 – Comparativo entre as causas de incidentes em barragens de rejeito ativas e inativas. Adaptado de ICOLD (2001)**

A não consideração do projeto de fechamento durante a concepção das estruturas de disposição de rejeitos, tem se mostrado um dificultador para a elaboração e a execução da descaracterização de barragens. O Guia de Boas Práticas para o Fechamento Integrado de Mina (ICMM, 2019) recomenda a integração do plano de fechamento logo nas fases iniciais de concepção do projeto, indicando

diversos dos benefícios gerados pela integração do plano de fechamento nas fases iniciais da vida útil do ativo, podendo-se mencionar:

- O projeto e a operação são conduzidos em acordo com o plano de fechamento, o que gera maior eficiência e economia devido à diminuição de dupla movimentação de materiais e às oportunidades de agregar valor durante a fase operacional;
- Os passivos são progressivamente reduzidos, além da empresa conseguir se planejar e prever os custos com maior assertividade;
- Os riscos são melhor compreendidos e podem ser previamente estudados;
- As oportunidades de uso da área pós-fechamento são mais claras e reconhecidas preliminarmente.

Segundo Fernandes (2020), embora o descomissionamento e a descaracterização sejam atividades complementares, podem ser distinguidas através da frequência do monitoramento e manutenção. As estruturas descomissionadas requerem monitoramento e manutenção constantes, enquanto as estruturas descaracterizadas demandam pouco acompanhamento até que sejam definitivamente entregues ao meio-ambiente.

Para um monitoramento eficiente do fechamento de um barramento, é importante considerar possíveis colapsos relacionados à deslizamentos, liquefação, erosão, *piping*, galgamento, instabilidade estrutural e falhas no sistema de drenagem. Há ainda o risco de vandalismo e deterioração de instrumentos, podendo ser citados, principalmente, pluviômetros, inclinômetros e marcos superficiais.

Ao estabelecer o padrão adequado ao que se refere à estabilidade estrutural, qualidade do excedente hídrico, do ar e do solo, a estrutura pode ser considerada estável e apta a iniciar o processo de revegetação. Conforme a Resolução ANM nº130 (2023), o monitoramento deve ser mantido pelo período mínimo de 2 (dois) anos após conclusão das obras de descaracterização, a fim de garantir a eficácia das medidas de estabilização e de controle hidrológico e hidrogeológico.

Consequentemente, se faz necessário observar a qualidade da vegetação e o desenvolvimento da mesma, a fim de garantir que a flora e a fauna sejam reestabelecidas da maneira que se encontravam antes da intervenção humana. A

partir de então, inicia-se a etapa de pós-fechamento onde o monitoramento é realizado com intervalos maiores visando o longo prazo e o atendimento aos requisitos legais.

Em geral, o conjunto de todas as etapas é chamado de plano de fechamento, o qual pode ser temporário, parcial ou permanente. Do ponto de vista de Fernandes (2020), o primeiro aspecto a ser observado deve ser a segurança e a estabilidade da estrutura em termos de risco e probabilidade de falha. Em seguida, deve-se avaliar se os critérios econômicos e sociais são aceitáveis perante as comunidades adjacentes.

O plano de fechamento deve garantir a devolução da área ao meio ambiente de forma a assegurar a estabilidade física, química, biológica e no pós-fechamento, também no âmbito social. Segundo o ICMM (2019), a base de conhecimento para construção do plano de fechamento deve abranger 4 (quatro) grandes áreas, sendo: estrutural, ambiental, socioeconômica e normativa.

Adicionalmente, o PRINCÍPIO 2 do GITSM aborda sobre a necessidade de desenvolver, documentar e atualizar uma caracterização física, química, geotécnica, geológica, geomorfológica, climática, sísmica e hidráulica além dos contextos sociais, econômicos locais periodicamente e sempre que houverem mudanças relevantes na estrutura. (GITSM, 2020)

### 1.2.1 Plano de descaracterização

O planejamento para a descaracterização, assim como sua operação devem fazer parte de toda vida útil da estrutura, podendo ser pensados durante a concepção do projeto de implantação da nova barragem. Em diversos casos, o pós-fechamento pode ser a transformação da estrutura em relevo com aspectos similares ao natural, sendo importante realizar testes de fechamento a fim de garantir a aceitação dos órgãos regulatórios e das partes interessadas (ICMM, 2021).

O gerenciamento das estruturas após cessar as atividades, deve ser mantido e adequado, tendo em vista que apesar da não disposição de rejeitos, a mesma precisa se manter estável física, biológica e estruturalmente. Nesse sentido, como constituintes do plano de fechamento, o Conselho Internacional de Mineração e Metais (ICMM, 2021), recomenda:

- Implantar as intervenções de acordo com o plano de fechamento e com o projeto final de descaracterização;
- Realizar operação, manutenção e monitoramento de acordo com o plano de gerenciamento de riscos, critérios e premissas estabelecidos e plano de fechamento;
- Acompanhar o comportamento da estrutura e dos rejeitos depositados atentando para os indicativos de déficit e intervir com medidas necessárias;
- Atualizar, de acordo com o ganho de informações, os critérios e premissas, o sistema de gestão de rejeitos, o manual de operações, o plano de emergência, os modelos de caracterização e as avaliações de risco.

Entende-se a operação das estruturas em fechamento como sendo a execução de atividades relacionadas à manutenção, como eventual necessidade de direcionar as águas de forma que não se acumulem no interior do reservatório; intervenções de otimização devido ao ganho de informações através da coleta de dados e eventuais ajustes que se fizerem necessários para garantir as premissas de projeto. Vale ressaltar que tais premissas podem e devem ser revisadas de acordo com o conhecimento agregado ao longo do período de monitoramento.

Com o intuito de consolidar critérios a serem avaliados no fechamento da área *Mining Area C*, localizada na Austrália Ocidental, a BHP Billiton Iron Ore elaborou um plano de fechamento – *Closure Plan Mining Area C* (BHP, 2017). De forma a facilitar o procedimento, a mineradora organizou um checklist contendo os principais pontos a serem avaliados, apesar do documento ser direcionado ao fechamento da mina, este abrange diversos aspectos pautáveis em fechamento de barragens. Desta forma, pode-se considerar o checklist como uma ferramenta de apoio a novos planos de fechamento.

No âmbito dos projetos de descaracterização existem algumas configurações que vêm sendo adotadas, pode-se citar o fechamento por remoção parcial do rejeito e das paredes do reservatório; remoção total do rejeito e das paredes do reservatório; retaludamento da estrutura a fim de favorecer a drenagem. A escolha da metodologia depende diretamente da configuração da barragem, dos recursos disponíveis e das áreas para destinação dos materiais retirados.

### 1.3 Previsão do Processo de Adensamento

O reservatório de rejeito de bauxita, estudado no presente trabalho, apresentou recalques na camada compressível na ordem de 1% da altura total durante os 18 meses de monitoramento.

Sendo assim, embora o estudo do comportamento de materiais finos com alta compressibilidade, como os rejeitos gerados pelos processos de mineração, por vezes sejam tratados no âmbito das grandes deformações, a presente pesquisa considerou a Teoria de Terzaghi que aborda pequenas deformações e se baseia seguintes hipóteses:

- 1) O solo é homogêneo e completamente saturado - a permeabilidade não varia com a profundidade e todos os vazios são preenchidos por água;
- 2) A compressibilidade dos sólidos e da água são desprezíveis em relação à compressibilidade do solo;
- 3) A compressão é unidimensional;
- 4) Não há diferença entre o comportamento de massas de solo de grandes ou pequenas espessuras;
- 5) O fluxo é unidirecional e governado pela lei de Darcy;
- 6) A compressibilidade é constante;
- 7) O índice de vazios varia linearmente com o aumento da tensão efetiva.

#### 1.3.1 Teoria de Terzaghi

Devido à necessidade de estudar o comportamento dos solos compressíveis, Terzaghi (1943) propôs a Teoria Clássica de Adensamento, que também ficou conhecida como Teoria de Adensamento de Terzaghi. A partir desta teoria é possível analisar o comportamento dos solos compressíveis quando solicitados verticalmente considerando um cenário de pequenas deformações, por esta razão é considerada como teoria para deformações infinitesimais.

Segundo a norma brasileira NBR 6122 (2019), solos compressíveis são aqueles que apresentam deformações elevadas quando solicitados por sobrecargas pouco significativas ou mesmo por efeito de carregamento devido ao seu peso próprio. Este é o cenário encontrado nos depósitos de materiais argilosos, como os reservatórios de rejeito de mineração.

Quando este material recebe um carregamento vertical, as tensões são suportadas primeiramente pela água e, gradualmente, vão sendo transferidas para o arcabouço sólido dos solos. A transferência ocorre apenas se a drenagem da água for permitida, por esta razão utiliza-se a equação de fluxo para descrever o processo de forma analítica.

Terzaghi (1943) descreveu a redução do excesso de poropressão com a variação do tempo, sendo equivalente à Equação (1). Considerando a premissa de que o carregamento é instantâneo e não varia com o tempo, a Equação (1) se reduz à Equação (2).

$$\frac{\partial \Delta u}{\partial t} - \frac{\partial \sigma}{\partial t} = c_v \cdot \frac{\partial^2 \Delta u}{\partial z^2} \quad (1)$$

$$c_v \cdot \frac{\partial^2 \Delta u}{\partial z^2} = \frac{\partial \Delta u}{\partial t} \quad (2)$$

O grau de adensamento médio ou porcentagem de recalque (U), representa a relação entre o recalque ocorrido na camada de solo até o instante t e o recalque total estimado, conforme apresentado através da Equação 3. Quanto menor for a permeabilidade do solo e a distância de drenagem, mais lentos serão os recalques, seu efeito pode ser observado e estimado através das curvas de porcentagem de recalque em função de fator tempo ( $T_v$ ), conforme a equação 3 e 4.

$$\rho_t = U \cdot \rho_{total} \quad (3)$$

$$T_v = \frac{c_v}{H^2} t \quad (4)$$

Dessa forma, o grau de adensamento é proporcional ao acréscimo de tensão efetiva, isto é, a transferência das tensões da água para o arcabouço sólido.

### 1.3.2 Estimativa de Recalque

Recalque é a deformação gerada no maciço devido a um carregamento, este se dá através da deformação e deslocamento das partículas e expulsão de água e ar dos vazios. Dessa forma, pode-se subdividi-lo em recalque inicial e recalque por adensamento. O recalque inicial pode ocorrer em qualquer tipo de solo, já o recalque por adensamento apesar de também ocorrer nos solos grossos, é muito mais significativo nos solos finos.

Das e Sobhan (2014) expõem que nos solos grossos, os recalques por adensamento não costumam ser um problema já que estes detêm menor quantidade de água e vazios, além de terem uma permeabilidade maior que facilita o fluxo de água. Em contra partida, os solos argilosos e siltosos que dispõem de mais vazios e maior quantidade de água, possuem baixa permeabilidade a qual permite que o processo de adensamento perdure por anos.

Pinto (2011) distribuiu valores típicos de coeficiente de permeabilidade para argilas, siltes e areis em suas diferentes granulometrias, conforme **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

**Tabela 4 – Valores típicos de coeficiente de permeabilidade em solos sedimentares**

| Solo sedimentar  | Coeficiente de permeabilidade |
|------------------|-------------------------------|
| Argilas          | $< 10^{-9}$ m/s               |
| Siltes           | $10^{-9}$ a $10^{-6}$ m/s     |
| Areias argilosas | $10^{-7}$ m/s                 |
| Areias finas     | $10^{-5}$ m/s                 |
| Areias médias    | $10^{-4}$ m/s                 |
| Areias grossas   | $10^{-3}$ m/s                 |

Fonte: Adaptada de Pinto (2011)

Conforme pode ser observado, os valores representam uma ordem de grandeza do coeficiente de permeabilidade para cada tipo de solo sedimentar. O valor preciso para cada material depende ainda da estrutura e da compactidade ou consistência do mesmo. Quando o fluxo se torna turbulento, já não é válida a Lei de Darcy, como no caso dos pedregulhos e algumas areias grossas.

Existem os métodos diretos e indiretos para a determinação das relações constitutivas: índice de vazios x tensão efetiva e índice de vazios x permeabilidade. Os métodos diretos permitem que essas propriedades sejam medidas diretamente nos ensaios. Em contra partida os métodos indiretos, denominados por Znidarcic e Schiffman (1982) como solução inversa, necessitam de um modelo matemático que receba os dados do ensaio como dados de entrada e os retrocalcule encontrando os dados de entrada que, nesse caso, serão os dados de saída.

Velloso e Lopes (2010) remetem a mesma analogia, porém quanto aos métodos de cálculo. Sendo, diretos quando se estima o recalque diretamente pela solução empregada ou indiretos quando se estima o recalque a partir de deformações específicas de camadas que são integradas posteriormente. Exemplos do primeiro caso são os cálculos através da Teoria da Elasticidade ou por métodos numéricos.

Segundo Velloso e Lopes (2010), os métodos para previsão dos recalques de acordo com a obtenção dos parâmetros podem ser divididos em três grandes categorias:

- Métodos racionais: os parâmetros de deformabilidade são obtidos em laboratório ou *in situ* através de ensaio pressiométrico e de placa. Neste método a previsão do recalque se deve aos modelos teoricamente exatos;
- Métodos semiempíricos: os parâmetros de deformabilidade são obtidos através de correlação com ensaios *in situ* de penetração estática ou dinâmica, CPT e SPT respectivamente. Neste método prevê-se o recalque através de modelos teoricamente exatos ou adaptações dos mesmos;
- Métodos empíricos: as tensões admissíveis do solo são associadas a recalques usualmente aceitos em estruturas convencionais e podem ser consultados através de tabelas.

Nota-se que para estimar os recalques se faz necessário conhecer algumas características intrínsecas ao solo. Nesse sentido, Brandi (2004) afirma que os índices

físicos, parâmetros de resistência e compressibilidade são as principais propriedades físicas e mecânicas que podem ser obtidas através de ensaios de campo e laboratório.

#### 1.4 Ensaios de laboratório aplicados à determinação de parâmetros de compressibilidade e adensamento

A determinação de parâmetros de compressibilidade e adensamento pode ser dada a partir de ensaios de laboratório e campo. Dentre os ensaios de laboratório, pode-se destacar o ensaio de adensamento unidimensional e o ensaio triaxial.

De acordo com Espindola (2021), o ensaio de adensamento edométrico convencional tem como princípio tornar possível a estimativa do tempo e a magnitude dos recalques que ocorrerão na respectiva camada de solo. Obtém-se a deformabilidade do material a partir das variações volumétricas que ocorrem em função das pressões aplicadas.

O ensaio de adensamento se mostra ideal para os casos em que as deformações horizontais são nulas, sua previsão pode ser realizada em termos de Módulo Edométrico ou Índice de Compressão, conforme apresentado por Velloso e Lopes (2010).

O ensaio triaxial reproduz a condição de um caso de deformação 3-D do qual as deformações horizontais são relevantes. Nos ensaios convencionais, onde a tensão de confinamento ( $\sigma_3$ ) se mantém constante, os parâmetros obtidos são Módulo de Young e Coeficiente de Poisson, conforme exposto por Velloso e Lopes (2010)

Embora Velloso e Lopes (2010) apresentem detalhadamente como obter os parâmetros drenados e não drenados a partir de ensaios triaxiais isotrópicos e anisotrópicos, Almeida e Marques (2014) sugerem a utilização do ensaio como dado adicional para obtenção do perfil  $S_u$  de projeto, tendo em vista a influência do amolgamento e alívio de tensões que estes sofrem.

Segundo Almeida e Marques (2014), para estudar o comportamento de um solo através de ensaios de laboratório é imprescindível conhecer a qualidade das amostras, especialmente no caso dos solos moles. Durante a amostragem, o solo sofre um alívio de tensões inevitável, não sendo possível afirmar que a amostra apresenta estado de confinamento idêntico ao *in situ*. De tal maneira considera-se que quanto menor o amolgamento, maior a confiabilidade dos resultados.

Embora existam proposições para correção da parametrização das amostras de má qualidade, questiona-se a representatividade de corrigir algo não representativo. A identificação de uma amostra de boa qualidade de argila mole pode se dar através da clara curvatura do trecho virgem no gráfico  $\log \sigma'_v \times e$  (Coutinho, 1998).

Adicionalmente, Velloso e Lopes (2010) afirmam que para obter resultados mais fidedignos às condições de campo, se faz estritamente necessário entender o estado de tensões da fundação para que os parâmetros de deformação sejam retirados das curvas de laboratório de forma coerente, do trecho pré-adensado ou normalmente adensado.

#### 1.4.1 Ensaio de adensamento por força de percolação – HCT

Embora o ensaio de adensamento por força de percolação não seja amplamente disseminado, a obtenção do índice de compressão do presente trabalho se deu a partir deste. Dessa forma, o item 1.4.1 sintetiza os principais pontos a respeito do HCT, maiores detalhes podem ser consultados em Botelho (2001).

O ensaio de adensamento induzido por força de percolação consiste, primeiramente, no adensamento por peso próprio, em seguida pelo adensamento por força de percolação e um estágio de carregamento e, por fim, o ensaio de percolação. Através do ensaio é possível obter as relações constitutivas de compressibilidade e permeabilidade a partir dos índices de vazios, permeabilidade e tensões efetivas calculadas.

A primeira fase se dá a partir do peso próprio da amostra em repouso, já a fase do adensamento por força de percolação consiste na aplicação de um fluxo descendente imposto por uma bomba e pela liberação da saída de água na base. O processo continua até que seja alcançado o equilíbrio.

Ao final desta etapa, a tensão efetiva e a altura da amostra são registradas e se dá início ao incremento com carregamento a partir da aplicação de pesos na amostra até que esta seja completamente adensada. Novamente é medida a altura da amostra e calculada a tensão efetiva.

### 1.5 Ensaio de campo aplicados à determinação de parâmetros de compressibilidade e adensamento

Conforme Schnaid e Odebrecht (2012), o pressiômetro se mostra eficiente na determinação do comportamento tensão-deformação de solos *in situ* e o dilatômetro possibilita estimar parâmetros constitutivos do solo através de correlações semiempíricas. O ensaio de cone, conhecido pela sigla CPT (*cone penetration test*) caracteriza-se como uma ferramenta de suma importância na prospecção geotécnica sendo aplicáveis na definição do perfil estratigráfico, determinação das propriedades dos materiais prospectados e na previsão da capacidade de carga de fundações.

O CPT foi incrementado para possibilitar a aferição de poropressões ( $u$ ) através de um elemento filtrante, se estabelecendo como CPTu (*piezocone penetration test*). Posteriormente, o ensaio foi novamente incrementado, dessa vez aderindo a possibilidade de avaliar aspectos sísmicos do solo a partir do diagnóstico de propagação de ondas de compressão e cisalhamento, sendo assim SCPTu (*Seismic Cone Penetration Test*) (SCHNAID, 2012).

Segundo Lima (2007), o piezocone, o pressiômetro e o dilatômetro são os ensaios de campo mais usuais. Quando o objetivo é a determinação de parâmetros de compressibilidade, adensamento e permeabilidade, se destacam o CPTu, o pressiômetro e a permeabilidade *in situ*. Os ensaios de campo apresentam grande importância no conhecimento do subsolo já que o avaliam em seu estado natural, embora não sejam claras as condições de contorno do ensaio e o grau de amolgamento.

Medina (2007) explica que o ensaio piezocone consiste na cravação vertical, a uma velocidade lenta e constante de 20 mm/s<sup>2</sup>, de uma ponteira cônica. Conforme procede-se com a cravação das hastes no solo, são feitas medidas de acordo com a profundidade obtendo os valores da resistência a penetração da ponta ( $q_c$ ); resistência por atrito lateral ( $f_s$ ); poropressão ( $u$ ). Mais detalhes podem ser consultados em ASTM D5778:2020.

A Tabela 5 apresenta a aplicabilidade do CPTu apontada por Robertson (2010) para estimar os parâmetros do solo onde a escala vai de 1 a 5, sendo 1 a mais alta aplicabilidade até a mais baixa representada pelo 5, os campos vazios indicam que

não o CPTu não é aplicável para a determinação do parâmetro. Caso seja acrescentado o ensaio sísmico (SCPT), a capacidade de estimar a rigidez do solo ( $E$ ,  $G$  e  $G_0$ ) aumenta ainda mais.

**Tabela 5 – Aplicabilidade do ensaio CPT na determinação de parâmetros**

| Tipo de solo | $D_r$ | $\psi$ | $K_0$ | $OCR$ | $S_t$ | $S_u$ | $\phi'$ | $E, G$ | $M$ | $G_0$ | $k$ | $c_h$ |
|--------------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|---------|--------|-----|-------|-----|-------|
| Areia        | 2-3   | 2-3    |       | 5     |       |       | 2-3     | 2-3    | 2-3 | 2-3   | 3   | 3-4   |
| Argila       |       |        | 2     | 1     | 2     | 1-2   | 4       | 2-4    | 2-3 | 2-4   | 2-3 | 2-3   |

Fonte: Adaptada de Robertson (2010)

A partir do ensaio de piezocone, pode-se correlacionar a resistência de ponta corrigida  $q_t$  com o fator de capacidade de carga do solo corrigido  $N_{kt}$ , obtida a partir do Vane Test, e determinar resistência não drenada  $S_u$  ao longo do perfil de CPTu. Através da obtenção  $S_u$  ao longo da profundidade é possível estudar o subsolo em camadas que apresentem comportamento semelhante, obtendo-se resultados que podem ser mais realistas a cada horizonte, embora seja mais expedito considerar  $N_{kt}$  médio para todo o perfil estratigráfico.

Houlby e Teh (1988) propõem a obtenção do coeficiente de adensamento horizontal  $c_h$  em argilas, através do ensaio de dissipação do CPTu. Robertson (2010) apresenta outros dados importantes que podem ser obtidos no ensaio CPTu, como o parâmetro da razão de excesso de poropressão  $B_q$ , força de atrito lateral  $f_s$ , além do índice de classificação do material  $I_c$ .

Robertson (1990) propôs a previsão do comportamento dos solos a partir dos gráficos  $Q_t - F_r$  e  $Q_t - B_q$  para definir o comportamento do solo normalizado SBTn (*Soil Behavior Type*). Jefferies e Davies (1993) sugeriram que o  $I_c$  poderia representar o comportamento do solo e indicar as zonas do SBT. Robertson e Wride (1998) propuseram uma variação para obtenção do  $I_c$  e, posteriormente, Robertson (2009) atualizou a formulação com a normalização do  $Q_t$ , conforme Equação 5.

$$I_c = [(3,47 - \log Q_{tn})^2 + (\log F_r + 1,22)^2]^{0,5} \quad (5)$$

O termo  $Q_{tn}$  é a normalização de  $Q_t$  com o expoente  $n$ , no caso dos solos argilosos, o valor de 1,0 se aplica bem, sendo assim,  $Q_{tn} = Q_t$  (Robertson, 2015).

Maiores detalhes e cartas de classificação SBT (*soil behavior type*) podem ser encontradas, segundo Souza (2017), em:

- Begemann (1965):  $q_c \times f_s$
- Schmertmann (1969):  $q_c \times R_f$
- Douglas e Olsen (1981):  $q_c \times F_r$
- Jones e Rust (1982):  $\Delta_u \times B_q$
- Senneset e Janbu (1984):  $q_t \times B_q$
- Robertson *et al.* (1986):  $q_t \times B_q$  e  $q_t \times R_f$
- Robertson (1990, 2010):  $Q_{tn} \times B_q$  e  $Q_{tn} \times F_r$

**Tabela 6 – Classificação SBT a partir índice de classificação do material  $I_c$**

| Zona | SBT                                 | $I_c$       |
|------|-------------------------------------|-------------|
| 1    | Granulometria fina, sensível        | N/A         |
| 2    | Solos orgânicos                     | > 3,60      |
| 3    | Argila siltosa à argila             | 2,95 – 3,60 |
| 4    | Silte argiloso à argila siltosa     | 2,60 – 2,95 |
| 5    | Silte arenoso à areia siltosa       | 2,05 – 2,60 |
| 6    | Areia à areia siltosa               | 1,31 – 2,05 |
| 7    | Areia pedregulhosa à areia densa    | < 1,31      |
| 8    | Areia muito densa à areia argilosa* | N/A         |
| 9    | Granulometria fina, muito dura*     | N/A         |

\* Fortemente sobreadensado ou cimentado.

Fonte: Adaptado de Robertson (2010)

Robertson (2015) propõe a obtenção do Módulo Edométrico (M), essencial nos estudos de adensamento dos solos, através do valor de resistência de ponta corrigida

( $q_t$ ) obtido, ponto a ponto, durante o ensaio de piezocone, correlaciona-se a tensão vertical ( $\sigma_{vo}$ ) com a espessura da camada de sobrecarga.

Sendo assim, verifica-se a possibilidade de aplicação dos resultados de ensaios CPTu na determinação dos parâmetros utilizados na previsão de adensamento em solos argilosos.

### 1.5.1 Ensaio de piezocone – CPTu

Uma das formas para obtenção de parâmetros de deformabilidade se dá a partir de métodos semiempíricos que propõem correlações advindas dos resultados de ensaios *in situ*, neste caso em específico, o ensaio de piezocone.

Para estimar a resistência não drenada através do ensaio de piezocone, pode-se correlacionar a resistência de ponta com  $N_k$  ou  $N_{kt}$  se for utilizado o valor da resistência de ponta corrigida, conforme Equação 6. (Robertson, 2015). A correção da resistência de ponta se deve ao fato de que esta sofre influência da água presente no arcabouço sólido, e por isso se faz necessário considerá-la.

$$S_u = \frac{q_t - \sigma_v}{N_{kt}} \quad (6)$$

Sendo  $N_{kt}$  o fator de capacidade de carga do solo, entende-se que a cada profundidade que se obtém um  $N_{kt}$  a partir do Vane Test, é possível refinar a resistência não drenada a cada leitura do CPTu. De tal maneira, se torna possível estudar o subsolo em camadas que apresentem comportamento semelhante, podendo-se obter resultados mais realistas a cada horizonte, embora seja mais comum o uso do  $N_{kt}$  médio para todo o perfil estratigráfico.

Houlsby e Teh (1988) apresentaram a Equação 7 para obtenção do coeficiente de adensamento horizontal ( $C_h$ ) em argilas, através do ensaio de dissipação do CPTu.

$$C_h = \frac{T \cdot r^2 \cdot \sqrt{I_r}}{t} \quad (7)$$

Sendo,  $r$  o raio do piezocone.

Para dissipações relativamente curtas, os resultados podem ser plotados na escala de raiz do tempo, onde a Equação 8 apresenta a influência do gradiente inicial  $m$  e do índice de rigidez da argila  $I_r$ .

$$c_h = \left( \frac{m}{M_T} \right)^2 r^2 (I_r)^{0,5} \quad (8)$$

Sendo  $I_r$  o índice de rigidez da argila, representado pela Equação 9:

$$I_r = \frac{G}{S_u} = \frac{3E_u}{S_u} \quad (9)$$

Onde,  $G$  e  $E_u$  são o módulo de rigidez ao cisalhamento e o módulo de elasticidade, respectivamente.

O coeficiente de adensamento vertical ( $c_v$ ) pode ser obtido através do produto entre  $C_h$  e a razão de permeabilidade ( $k_h/k_v$ ). A Tabela 7 expõe as faixas de valores para a relação de anisotropia de permeabilidade vertical e horizontal  $k_h/k_v$ .

**Tabela 7 – Razão de permeabilidade em argilas**

| Natureza da argila  | $k_h/k_v$ |
|---|-----------|
| Depósitos homogêneos, sem macroestrutura definida                         | 1,0 a 1,5 |
| Macroestrutura definida, presença de descontinuidades e lentes permeáveis | 2,0 a 4,0 |
| Depósitos com ocorrência de várias camadas de material permeável          | 3,0 a 15  |

Fonte: Jamiolkowski et al. (1985)

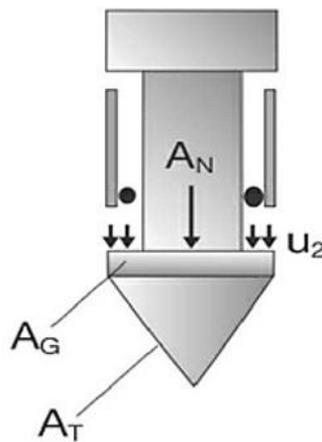
Segundo Robertson (2015), o valor da resistência de ponta ( $q_c$ ) obtido no ensaio CPT se refere à força que atua no cone ( $Q_c$ ) dividido pela área do cone ( $A_c$ ), conforme Equação (10).

$$q_c = \frac{Q_c}{A_c} \quad (10)$$

Como há influência da poropressão nessa resistência, faz-se necessário corrigi-la, conforme equação 11 e 12 onde  $a$  é a razão entre a área da base da luva de atrito ( $A_n$ ) e a área da base do cone ( $A_t$ ), conforme Figura 5.

$$q_t = q_c + u_2(1 - a) \quad (11)$$

$$a = \frac{A_n}{A_t} \quad (12)$$



**Figura 5 – Áreas para obtenção do fator  $a$**   
(Adaptado de Schnaid e Odebrecht, 2012)

Robertson (2010) apresenta outros dados importantes que podem ser obtidos no ensaio CPTu, como o parâmetro da razão de excesso de poropressão ( $B_q$ ), força de atrito lateral ( $f_s$ ), além do índice de tipo de desempenho do solo ( $I_c$ ), conforme exposto nas equações (13 e (14).

$$Bq = \frac{(u_2 - u_0)}{(q_t - \sigma_{v0})} \quad (13)$$

$$f_s = \frac{F_s}{A_s} \quad (14)$$

Robertson (2015) propõe a obtenção do módulo edométrico  $M$ , essencial nos estudos de adensamento dos solos, através do valor de resistência de ponta corrigida ( $q_t$ ) obtido, ponto a ponto, durante o ensaio de piezocone, correlaciona-se a tensão vertical ( $\sigma_{v0}$ ) com a espessura da camada, conforme Equação 15.

$$M = \alpha_M \cdot (q_t - \sigma_{v0}) \quad (15)$$

Onde  $\alpha_M$ :

- Para solos de granulometria fina:

$$\alpha_M = Q_t, \text{ se } Q_t < 14$$

$$\alpha_M = 14, \text{ se } Q_t > 14$$

Sendo a resistência de ponta normalizada  $Q_t$ , expressa pela Equação 16:

$$Q_t = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{\sigma'_{v0}} \quad (16)$$

- Para solos de granulometria grossa  $\alpha_M$  pode ser calculado a partir da Equação 17:

$$\alpha_M = 0,0188[10^{(0,55I_c + 1,68)}] \quad (17)$$

### 1.5.2 Ensaio de palheta – Vane Test

Schnaid e Odebrecht (2012) explicam que o ensaio de palheta, também conhecido por Vane Test, contempla uma palheta com quatro aletas de aço e dispositivo de aplicação de torque para rotacionar o conjunto haste fina/palheta de  $6 \pm 0,6^\circ/\text{min}$ , com base no torque medido pode-se determinar a resistência não drenada ( $S_u$ ) e a resistência não drenada amolgada ( $S_{ur}$ ), conforme Equação 18.

$$S_u \text{ ou } S_{ur} = \frac{0,86M}{\pi D^3} \quad (18)$$

A classificação das argilas de acordo com a sensibilidade ( $S_t$ ) pode ser verificada através da razão entre a resistência não drenada e a resistência não drenada amolgada, conforme exposto na Equação 19 e

Tabela 8.

$$S_t = \frac{S_u}{S_{ur}} \quad (19)$$

**Tabela 8 – Sensibilidade das argilas**

| Sensibilidade | $S_t$  |
|---------------|--------|
| Insensível    | 1      |
| Baixa         | 1 a 2  |
| Média         | 2 a 4  |
| Sensível      | 4 a 8  |
| Alta          | 8 a 16 |
| Muito Alta    | >16    |

Fonte: Adaptado de Skempton e Northey (1952)

O ensaio se mostra eficiente na determinação da resistência ao cisalhamento não drenada em depósitos de argilas moles. No Brasil, a palheta especificada pela norma apresenta bons resultados em argilas com resistência de até 50 kPa. Algumas recomendações para usabilidade do ensaio são:

- $N_{SPT} \leq 2$  ou resistência à penetração do cone ( $q_c$ )  $\leq 1.000$  kPa;
- Material predominantemente argiloso ( $> 50\%$  passando na peneira #200,  $LL > 25$ ,  $IP > 4$ );
- Ausência de lentes de areia.

As lentes de areia devem ser definidas previamente por ensaios de penetração.

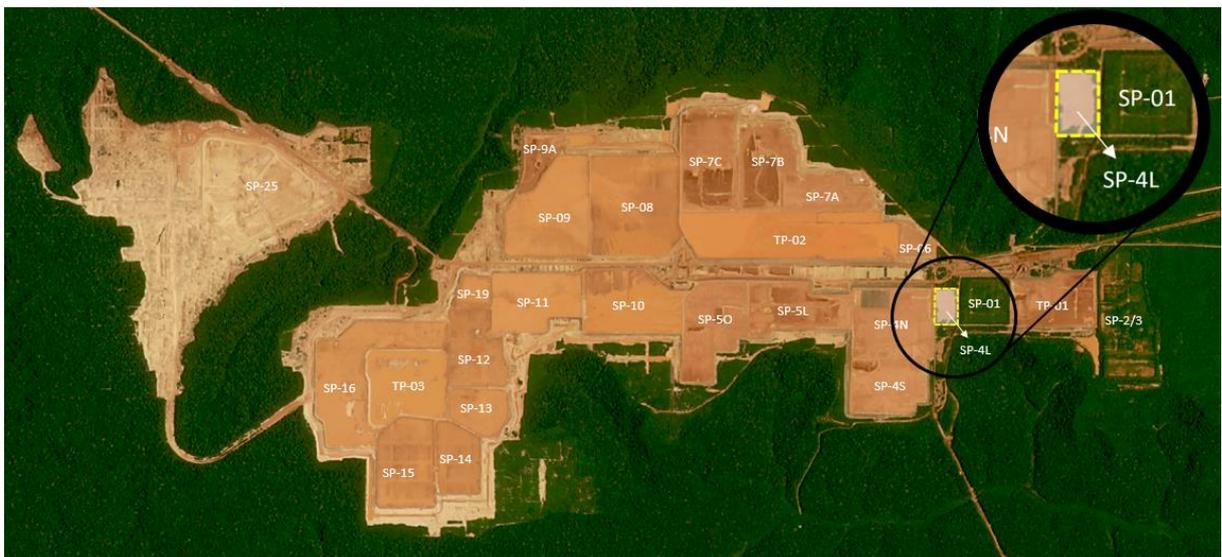
## 2 RESERVATÓRIO DE REJEITO DE BAUXITA SP-4 LESTE

O presente capítulo apresenta os aspectos relacionados ao estudo de caso de um dos reservatórios de rejeito de bauxita pertencente à Mineração Rio do Norte, o SP4-Norte Área Leste. Primeiramente aborda-se o sistema de lavra e rejeitos, a fim de construir uma base de conhecimento a respeito da formação da estrutura em pauta. Em seguida, relata-se o passo a passo do processo de fechamento do reservatório, desde a concepção do projeto até a implantação, apresentando:

- A metodologia construtiva utilizada;
- O plano de monitoramento ambiental proposto;
- O plano de instrumentação e monitoramento geotécnico proposto.

### 2.1 Sistema de Lavra e Rejeitos da MRN

O sistema de rejeitos da Mineração Rio do Norte está localizado no Platô Saracá no distrito de Porto Trombetas no estado do Pará, região norte do Brasil. A Figura 6 apresenta o sistema de rejeitos da Mineração Rio do Norte e destaca o reservatório SP-4 Leste estudado no presente trabalho.

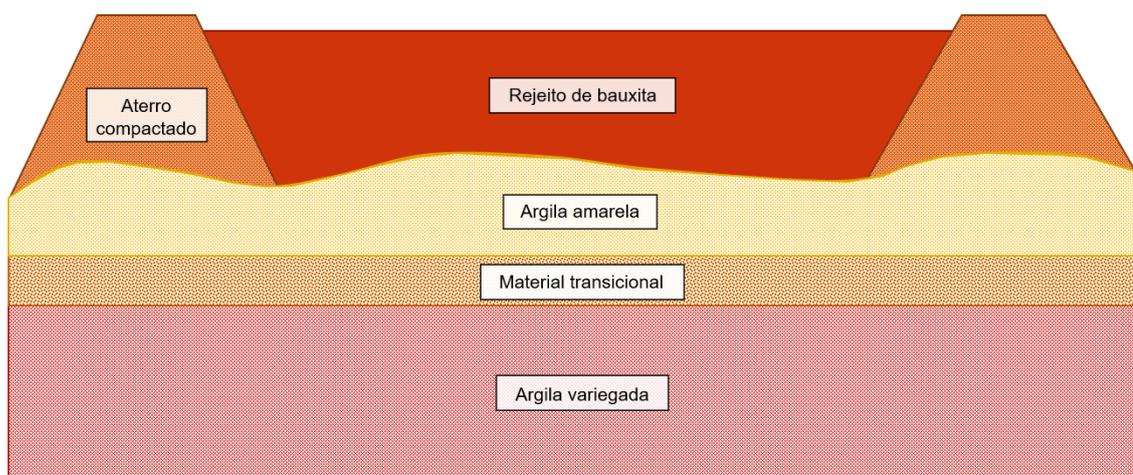


**Figura 6 – Sistema de rejeitos da MRN com destaque para o SP-4 Leste**

O processo de lavra adotado pela MRN é conhecido como “*strip mining*” ou lavra em faixas. Neste ocorre o decapeamento do solo vegetal, da argila belterra, comumente chamada de argila amarela, da bauxita nodular e da laterita. As camadas superiores à bauxita maciça são depositadas na faixa adjacente na qual o minério fora lavrado, formando pilhas de estéril. Sendo assim, os taludes que compõe as paredes dos reservatórios são caracterizados pelas seguintes camadas:

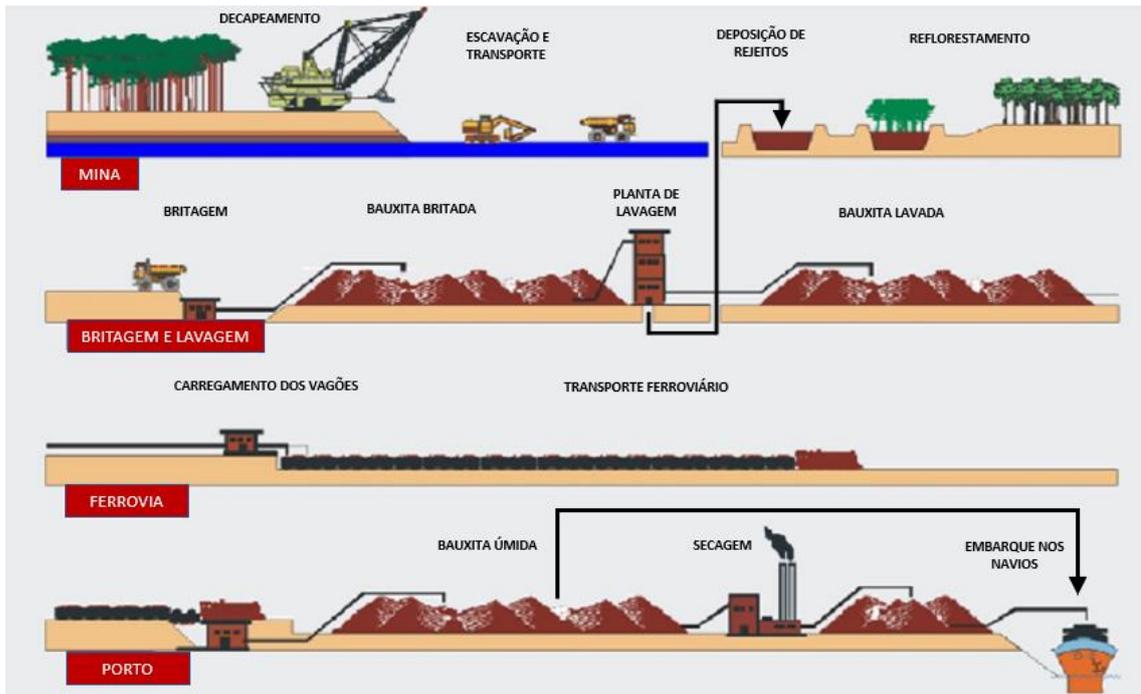
- I. Aterros constituídos por materiais predominantemente argilosos, compactados;
- II. Pilhas de solos sedimentares argilosos oriundos do processo de lavra local (escavação e redeposição no local) e pilhas com detritos vegetais derivadas do processo de remoção da camada vegetal;
- III. Subjacente às pilhas encontra-se uma camada com resquícios da camada de bauxita que não foi explorada, denominada bauxita transicional; e
- IV. O solo de fundação é caracterizado pela presença de uma camada de argila variegada de ocorrência generalizada na região.

A Figura 7 apresenta a seção típica encontrada nos reservatórios de rejeito de bauxita da Mineração Rio do Norte.



**Figura 7 – Seção típica dos reservatórios de rejeito de bauxita da MRN**

Posteriormente, o estéril (argila amarela) que foi depositado nas faixas adjacentes recebe camadas de aterro até atingir a cota desejada, dando origem aos reservatórios que armazenam o rejeito gerado através do processo esquematizado na Figura 8.



**Figura 8 – Fluxograma esquemático do sistema de rejeitos da MRN. Adaptado do acervo MRN.**

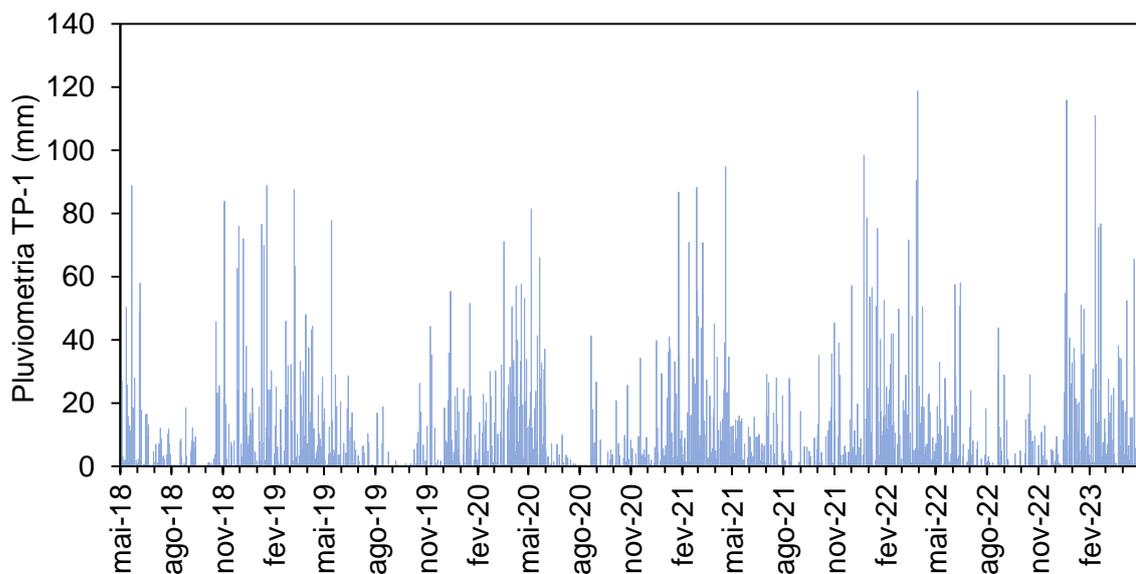
Após ser lavrada, a bauxita é transportada até a área de britagem onde tem sua granulometria reduzida atingindo o diâmetro máximo de três polegadas para ser direcionada à planta. As correias transportadoras conduzem o material até a planta onde este passa pelo processo de lavagem e classificação por sistema de peneiramento e cicloneamento, em seguida, o minério é levado de trem até o Porto. Antes de embarcar nos navios para ser comercializada, a bauxita segue úmida para o pátio de estocagem podendo passar ainda pelo processo de secagem, caso o destino final apresente baixas temperaturas que possam causar o congelamento da água presente no minério úmido.

Os reservatórios da Mineração Rio do Norte se dividem entre os *Thickener Ponds* (TP) – reservatórios de espessamento, e os *Settling Ponds* (SP) – reservatórios

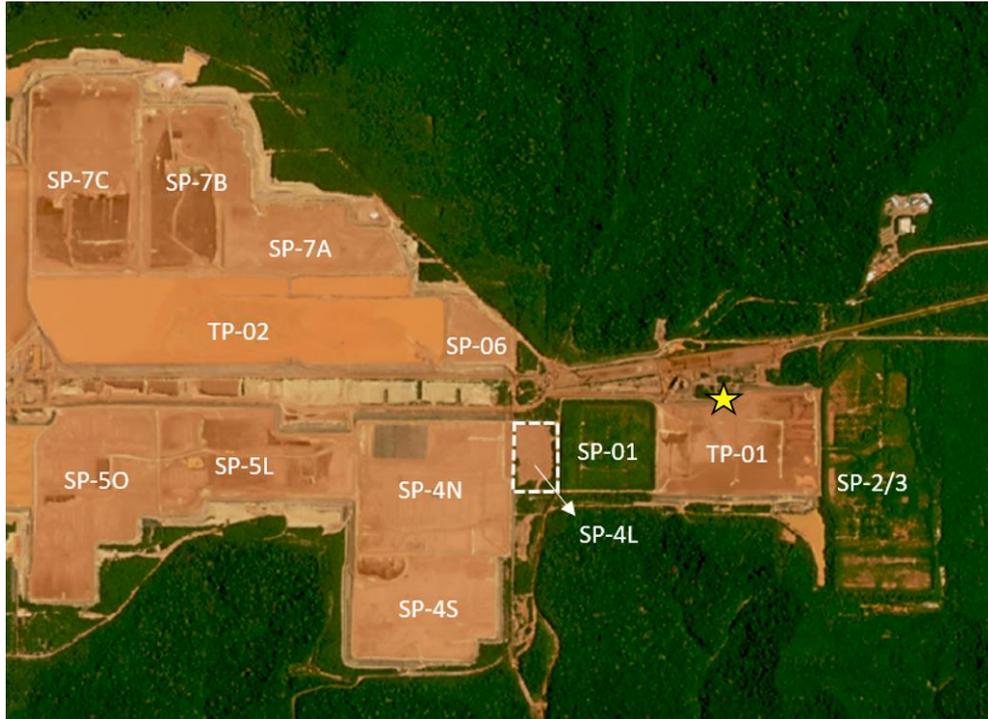
de adensamento, ambos construídos sobre pilhas provenientes da lavra em tiras. Os *thickener ponds* são responsáveis por receberem o rejeito de bauxita proveniente da planta de lavagem com aproximadamente 8% de sólidos em massa. O material adensa até atingir um teor de sólidos de 22% em média, ganhando aspecto de polpa e sendo então direcionado aos *settling ponds* através de um sistema de dragagem e bombeamento.

Os ciclos de disposição nos *settling ponds* se distribuem conforme as estações amazônicas tendo como objetivo adensar o rejeito até que este adquira o teor de sólidos de aproximadamente 55%. Os lançamentos são de 50cm de espessura e, após o adensamento a camada atinge aproximadamente 15cm de espessura.

Cabe destacar que as estações amazônicas são bem delimitadas entre inverno e verão. Sendo o inverno amazônico o período mais chuvoso que corresponde aos meses de dezembro a maio aproximadamente e o verão amazônico que se restringe aos meses de julho a dezembro apresentando menor índice pluviométrico. As delimitações podem ser facilmente observadas através da pluviometria exposta na Figura 9 referente às leituras do pluviômetro TP-1 localizado próximo ao SP-4 Leste, conforme Figura 10 .



**Figura 9 – Pluviometria maio/2018 a novembro/2022**



**Figura 10 – Localização estação pluviométrica TP-01**

Durante o inverno, a camada de rejeito recém disposta necessita de 60 dias exposta às intempéries naturais antes de receber a próxima camada sobrejacente. Enquanto no período mais seco, uma camada de mesma espessura alcança o mesmo teor de sólidos em apenas 30 dias. O aspecto obtido após o período de adensamento pode ser observado na Figura 11.

Após o fim das disposições em determinado reservatório, este pode ficar em processo de adensamento por anos até que se inicie as obras de fechamento. Com isso, a camada superficial de rejeito tende a ressecar mais que os horizontes inferiores, gerando uma crosta como pode ser observado na Figura 12.

Escavações realizadas no interior dos reservatórios em condições similares mostrou que a crosta supracitada chega a alcançar 2,0 metros de profundidade. Também é verificada a influência desta nos primeiros metros seguintes, onde se observa alto teor de sólidos.



**Figura 11 – Rejeito após ciclo de disposição**



**Figura 12 – Crosta de rejeito ressecado**

## 2.2 Obras de Fechamento do SP4-Norte Área Leste

O SP-4 Norte, integra o sistema de rejeitos da MRN, sendo um reservatório de 66,7 hectares, do qual passou por alteamentos pelo método da linha de centro. Sua operação teve início no ano de 1995. No ano de 2004, a Mineração Rio do Norte segregou 10,6 hectares da porção Leste do reservatório para permitir a construção da correia transportadora que interliga a mina do Aviso, conseqüentemente a área parou de ser utilizada para disposição de rejeitos. Dessa forma, deu-se origem ao SP-4 Leste, utilizado como área piloto para descaracterização.

A separação se concretizou através da construção de uma parede apoiada sobre rejeito, fato este que demanda uma maior criteriosidade durante a etapa de monitoramento, devendo-se atentar para a ocorrência de recalques diferenciais. Ao findar sua capacidade de disposição, o reservatório foi desativado, reflorestado e passou pela primeira tentativa de descaracterização.

Entretanto, nos trechos que ocorreram os maiores recalques, os resultados foram insatisfatórios quanto ao desenvolvimento da vegetação mesmo após mais de uma década. O fato foi decorrente do acúmulo de água nos pontos mais baixos. A Figura 13. apresenta o SP-4 Leste em 2020 antes do início das obras do plano de descaracterização.

Como a parcela de vegetação não satisfatória era majoritária, a Mineração Rio do Norte juntamente com a projetista optou por iniciar um novo procedimento desde o princípio. Dessa maneira, procedeu-se com a limpeza da região interna do reservatório e nova conformação da superfície com rejeito desaguado, regularizando e direcionando a drenagem superficial para o extravasor, a Figura 14 expõe o início do processo



**Figura 13 – SP-4 Leste antes do plano de descaracterização (2020)**



**Figura 14 – Limpeza da região interna do SP-4 Leste**

De modo a facilitar a drenagem da água superficial para os lagos existentes e, futuramente para os igarapés da região, implantou-se o novo sistema extravasor na porção sul do reservatório em substituição ao existente na porção norte. A superfície de projeto está representada na Figura 15.



**Figura 15 – Superfície projetada do SP-4 Leste**

Para o direcionamento da água pluvial ao novo sistema extravasor, considerou-se 0,7% de declividade do terreno em direção ao canal de drenagem e 0,5 % no interior do canal.

### 2.2.1 Metodologia Construtiva

A conformação do fechamento consistiu na execução da camada de aterro desaguado após as etapas de supressão vegetal e limpeza da superfície. Utilizou-se o próprio rejeito, proveniente da escavação da camada superficial de outros reservatórios do sistema, como material de aterro. O tratamento deste consistiu na exposição à luz solar e na adequação da umidade. Sendo a obra uma experiência inicial para avaliação do material e melhores condições executivas, foram propostas diretrizes a serem seguidas para garantir a trabalhabilidade do rejeito:

- Lançamento no interior do reservatório com umidade ótima pré-estabelecida em laboratório;
- Material disposto em faixas paralelas ao eixo longitudinal da parede sul com camadas soltas de 0,20 m;
- Espalhamento e esteiramento realizado com trator esteira;
- O grau de compactação de 98% do ensaio Proctor Normal, sendo admitido um grau mínimo de 96% e desvio de umidade  $w_{ot} - 2\% < w_{ot} < w_{ot} + 1\%$  em relação à umidade ótima.

Para a compactação do aterro foi avaliado o desempenho de dois modelos de rolo compactador em baixa vibração em comparação ao trator de esteiras de modo que o grau de compactação mínimo fosse de 96%.

Nas regiões de corte, onde o nível do terreno se encontrava acima da camada de conformação de projeto, escarificou-se 0,30 m da camada superficial do solo e procedeu-se com a compactação nas mesmas diretrizes apontadas. Em sequência, a fim de se atingir as elevações indicadas em projeto, regularizou-se a superfície. A Figura 16 apresenta o aspecto final da mesma.



**Figura 16 – SP-4 Leste após obras de fechamento (2021)**

A fim de facilitar a condução dos efluentes para o canal existente na porção sul do sistema, construiu-se um novo sistema extravasor temporário na parede sul do

reservatório e realizou-se o tamponamento do que se encontrava localizado na parede norte. O tamponamento se deu através de injeção de argamassa na tubulação existente de jusante para montante garantindo o completo preenchimento.

O novo sistema extravasor, consistiu em uma estrutura de gabião, tubulação de fundo em aço, geomembrana ao redor de toda estrutura e conta ainda com uma abertura frontal que possibilita a colocação de stop-logs de 0,80 m de largura útil, sua geometria é composta por 12,0 m de comprimento, 3,0 m de largura, com altura total de 3,0 m, tendo a parede de gabião 1,0 m, conforme a Figura 17.

Os *stop-logs* são placas metálicas operacionais que dificultam o carreamento dos finos do rejeito para dentro da tubulação extravasora, evitando-se o assoreamento dos canais de drenagem. A geomembrana ao redor da estrutura compartilha da mesma função, já que o rachão, material de preenchimento das caixas de gabião, possui permeabilidade elevada.



a) Vista frontal do novo extravasor



b) Vista superior do novo extravasor

**Figura 17 – Sistema extravasor em caixas de gabião**

Nos projetos de fechamento, as estruturas de drenagem precisam se integrar ao meio ambiente quando o reservatório findar as etapas de observação e apresentar resultados satisfatórios quanto aos requisitos hídricos, biológicos e estruturais. Dessa forma, prevê-se a substituição do extravasor temporário por uma descida em saco de solo-cimento.

### 2.2.2 Monitoramento Ambiental

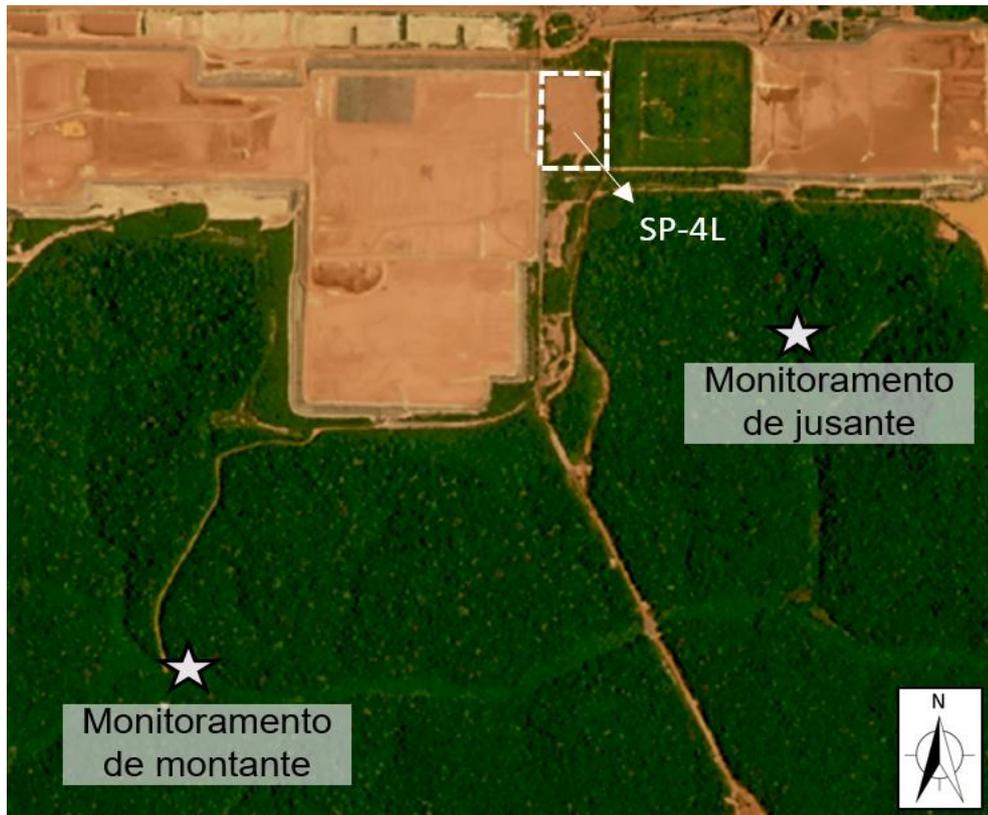
O monitoramento ambiental contempla o acompanhamento da qualidade da água pluvial que entra em contato com a estrutura; do corpo receptor; do sedimento do corpo receptor; da qualidade do ar; bem como da flora, fauna e solo. Sendo dividido em dois estágios: o estágio I, contempla o acompanhamento da qualidade da água pluvial que entra em contato com a estrutura, do corpo receptor, do sedimento do corpo receptor e da qualidade do ar; o estágio II, pós-fechamento, abrange a qualidade do solo, da flora e da fauna e deve ser acompanhado após a revegetação da região.

A concepção do monitoramento se deu em função da classificação dos rejeitos dispostos no barramento serem classificados como Resíduos classe II B – Inertes, nos termos da norma brasileira NBR 10.004 (2004). Ainda no âmbito das classificações, de acordo com os corpos hídricos aos quais a água excedente será direcionada, a Resolução CONAMA nº 357 (2005) determina o limite de 100 NTU para turbidez na zona de mistura.

O monitoramento da qualidade do excedente da água pluvial visa a identificação do momento a partir do qual o efluente estará apto a ser lançado diretamente ao meio ambiente, sem nenhum tipo de tratamento prévio, dessa forma recomendou-se que este se desse apenas após o restabelecimento inicial da vegetação. Cabe frisar que para a identificação de patamares satisfatórios e estáveis, faz-se necessário uma série de dados suficiente para a efetiva análise estatística da variabilidade da qualidade do efluente, a qual deverá ser realizada em conformidade com acordo prévio junto ao órgão ambiental competente.

A qualidade do ar se verifica através de pontos estratégicos no sistema de rejeitos, de acordo com a direção preferencial do vento, para verificação dos valores de partículas totais em suspensão, em atendimento a Resolução CONAMA nº 491 (2018).

O monitoramento da água no corpo receptor se dá através de um ponto a montante, como referência, e outro a jusante da estrutura. A Figura 18 indica os tais pontos considerados para o SP-4 Leste, entretanto, este apenas se inicia após a liberação para que os descartes hídricos sejam direcionados ao meio ambiente, fato este atrelado ao período de inspeção no ciclo fechado não contemplado no presente trabalho.



**Figura 18 –Pontos de monitoramento da água no corpo receptor**

Para o monitoramento das águas superficiais deve-se observar o disposto na Resolução CONAMA nº 357 (2005), que trata da classificação dos corpos de água e dá diretrizes ambientais para o seu enquadramento. As amostragens devem ser realizadas nos pontos de monitoramento definidos, com a utilização de medidor multiparâmetro devidamente calibrado e revisado para a leitura dos indicadores de qualidade.

A coleta de amostras e análise de sedimentos no corpo receptor em que será realizado o monitoramento de água superficial deve ocorrer para a determinação de possível correlação entre este material e a eventual contribuição de rejeitos de dentro do reservatório. A norma de referência a ser utilizada é a Resolução CONAMA nº 454 (2012).

Os resultados obtidos com o monitoramento ambiental fornecem o subsídio para a determinação do período necessário para a continuidade dos mesmos e permite uma gestão mais eficiente nos períodos de fechamento e pós-fechamento,

como também a realização de um prognóstico quanto à qualidade futura da água superficial de todo Platô Saracá no longo prazo.

Durante o ciclo hidrológico fechado, onde o efluente que sai pelo sistema extravasor retorna para a planta, a inspeção ocorre no desemboque da tubulação a jusante do maciço. No SP4-Leste a coleta de água para monitoramento da turbidez ocorre com frequência similar aos dias chuvosos, dessa forma tem-se, consideravelmente, mais leituras do período referente ao inverno amazônico. Conforme as chuvas se intensificam, são inseridos *stop logs*, placas que agem como barreiras e que podem gerar acúmulo de água na região próxima ao extravasor.

Após o primeiro ano de monitoramento da turbidez, foram notados elevados valores que precisariam ser reduzidos para que fosse respeitado o limite de 100 NTU corresponde ao ponto de monitoramento.

Portanto, a fim de melhorar a qualidade da água, foi elaborado um *layout* de barreiras no interior do reservatório com caráter experimental, de acordo com a Figura 19.



**Figura 19 – SP-4 Leste após obras de fechamento e implantação de barreiras vegetais (2021)**

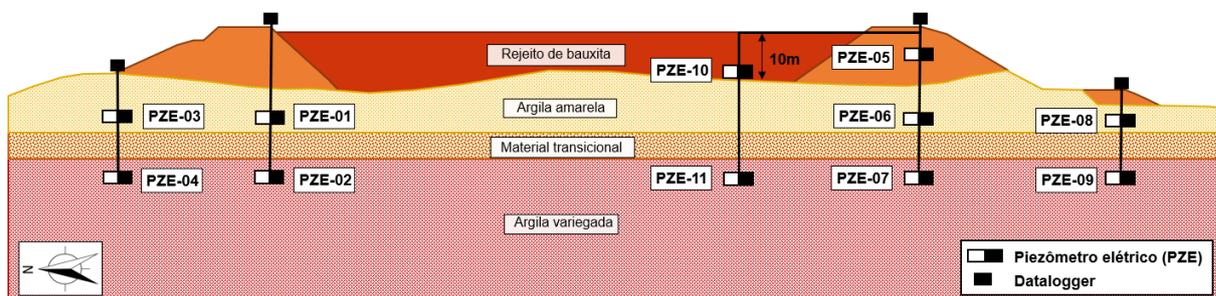
Estas foram compostas por galhos secos e material argiloso e, por isso, nomeadas de “barreiras vegetais”.

O estágio II do monitoramento da qualidade do excedente hídrico não será contemplado no presente trabalho, pois não se iniciou até o período considerado para o desenvolvimento da pesquisa. Vale ressaltar que o segundo estágio, somente se inicia após aprovação ambiental do monitoramento de todos os parâmetros normativos quanto à qualidade da água.

### 2.2.3 Monitoramento Geotécnico

Uma das proposições do monitoramento geotécnico contemplou análises mensais dos dados da piezometria existente, a fim de monitorar a poropressão. Os piezômetros de corda vibrante do reservatório são integrados ao sistema de monitoramento automatizado, sendo adotada a frequência padrão do monitoramento do sistema de rejeitos da MRN: duas leituras diárias.

Na MRN todos os piezômetros elétricos são conectados a um *datalogger* que, por sua vez, transmite as leituras para um sistema automatizado de monitoramento 24h. Na estrutura SP-4 Leste existem duas seções instrumentadas, a Figura 20 representa um corte longitudinal no reservatório passando por ambas as seções.



**Figura 20 – Piezômetros instalados no SP-4 Leste**

Ao todo são 11 piezômetros de corda vibrante instalados, sendo 4 verticais nas paredes e uma no interior do barramento com 1 PZE posicionado na camada de rejeito

e o outro no maciço. Como os piezômetros da camada de rejeito foram instalados em março de 2022 após o início da construção do aterro que iniciou em novembro de 2020, as poropressões geradas já haviam sido parcialmente dissipadas.

O plano também contemplou a realização de levantamentos topográficos de alta precisão abrangendo toda a superfície de conformação do interior do reservatório através da malha de 213 piquetes distribuídos conforme a Figura 21. Além do mapeamento das zonas de acúmulo de água através de imagens e vídeos aéreos.



**Figura 21 – Malha de piquetes para monitoramento topográfico**

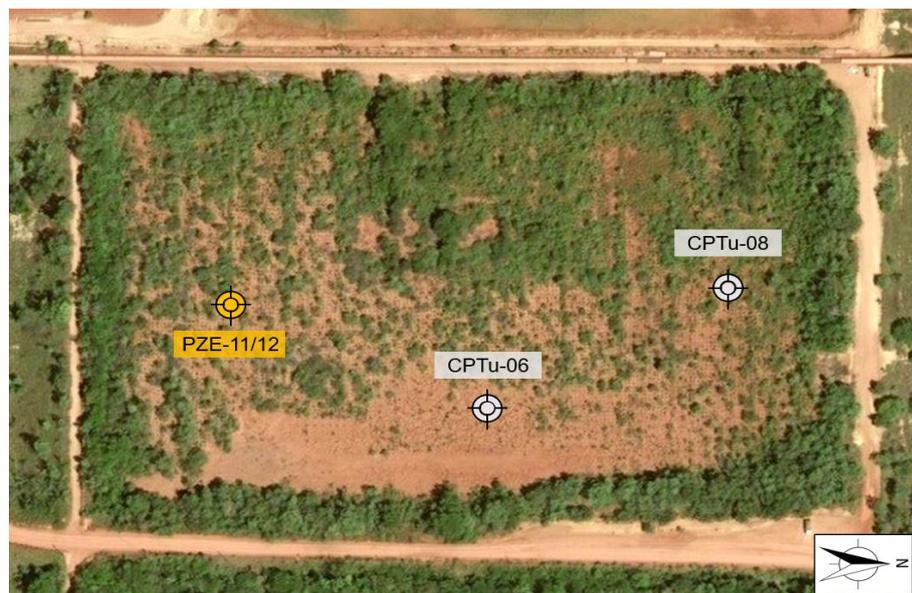
Nota-se uma baixa concentração de piquetes na região sul do reservatório e demais extremidades, fato que se deve à existência de vegetação mantida no processo do novo fechamento. As leituras foram realizadas mensalmente, tendo sido o primeiro levantamento imediatamente após a implantação da superfície de conformação do reservatório, com duração de no mínimo 1 ano, estendendo-se pelo menos até o início do período de revegetação.

Ao longo do monitoramento, em caso de ocorrência de recalques na superfície de conformação, deveria ser realizado o preenchimento das áreas abatidas mantendo as elevações definidas em projeto, de modo a evitar a ocorrência de acúmulo de água na superfície do reservatório.

Embora existissem diversas campanhas de investigação no rejeito dos reservatórios da MRN, a fim de entender a situação imediatamente anterior ao início das obras de fechamento foram executadas duas verticais de ensaio CPTu com ensaios de dissipação de poropressão na camada compressível, estes deram origem ao estudo de adensamento do rejeito no SP4-L.

Os ensaios de dissipação de poropressão foram fundamentais para obtenção do coeficiente de adensamento do solo e consequente estimativa do tempo para decorrer o processo. O CPTu-06 atingiu 24,0 m de profundidade e contou com 3 ensaios de dissipação nas profundidades -3,5 m, -5,5 m e -9,5 m, já o CPTu-08 alcançou 30,0 m de profundidade e contou com 2 ensaios de dissipação nas profundidades -3,0 m e -7,5 m.

Em fase preliminar do projeto foram realizadas 2 verticais de ensaio de piezocone no interior do reservatório, indicadas na Figura 22.



**Figura 22 – Localização dos ensaios CPTu e piezômetros no rejeito**

O CPTu-08 e CPTu06 foram realizados em janeiro e março de 2020, respectivamente, período correspondente ao inverno amazônico que conta com maior incidência de chuvas conforme pode ser observado através da distribuição pluviométrica medida na estação próxima ao reservatório TP-1 e apresentada na Figura 10.

Por fim, foram incluídas inspeções regulares no interior do reservatório e nas paredes do aterro compactado bem como suas fundações, por um período mínimo de 01 ano após o fim das obras da conformação da superfície. Após o término do primeiro ano de monitoramento, a periodicidade das avaliações poderia ser reavaliada a depender dos resultados observados.

## 2.3 Processo de adensamento

### 2.3.1 Previsão teórica

A estimativa dos recalques, ainda em fase de projeto, é essencial para a previsão das magnitudes dos abatimentos e por quanto tempo a estrutura deverá ter a superfície corrigida. Todavia, o presente trabalho confronta os resultados esperados com os medidos em campo a fim de se obter a metodologia que mais se aproxime dos resultados reais.

Para que fosse possível a comparação entre os valores esperados e os obtidos, foram reproduzidos os cálculos partindo das mesmas premissas precedentes ao monitoramento. Em seguida, foram realizadas análises de sensibilidade quanto aos parâmetros de entrada na estimativa de adensamento a fim de se obter o cenário mais realista.

As magnitudes dos abatimentos foram estimadas a partir da Teoria de Terzaghi (1943) em conjunto com as correlações apresentadas por Robertson (2015) para determinação do módulo edométrico (M). O valor adotado do módulo foi o mais representativo do CPTu-06, sendo definido como 250,0 kPa.

Foram estimados os recalques que ocorreriam no horizonte de rejeito após a conformação da área com a camada de aterro desconsiderando qualquer abatimento

da fundação que, já sofreu sobrecarga de todas as camadas de rejeito que foram sendo depositadas ao longo dos anos, apesar de ser constituída por pilhas de estéril composta por argila. Além das pilhas não serem mapeadas no interior do reservatório, também não são observados, no sistema de rejeitos, abatimentos visíveis após diversas disposições de rejeito.

Conforme exposto por Robertson (2015), a teoria unidimensional se aplica a diversos casos, já que os efeitos 2D e 3D são, de maneira geral, pequenos. Dessa forma, pode ser utilizada para estimar o recalque lançando mão dos dados obtidos através do ensaio de piezocone, a partir da Equação 20.

$$\rho = H \cdot \left( \frac{\Delta\sigma'_v}{M} \right) \quad (20)$$

Nota-se que os valores de entrada na equação supracitada são a altura da camada compressível, a tensão vertical efetiva aplicada e o módulo edométrico considerado. A altura da camada compressível foi definida a partir da resistência de ponta do cone e do perfil de poropressões obtidos a partir das verticais de ensaio de piezocone que foram executados no interior do reservatório SP-4 Leste no ano de 2020, sendo CPTu-06 e CPTu-08.

A partir dos ensaios de compactação descritos na metodologia executiva da camada de conformação em rejeito esteirado foi possível obter o peso específico médio considerado no cálculo da sobrecarga gerada pela camada de aterro de conformação. A altura do aterro de conformação foi definida em 608 pontos com a diferença da cota medida a partir de aerolevanteamento da condição anterior à construção do aterro e a superfície projetada, as alturas variaram de 0,00 m a 1,60 m.

Considerando a sobrecarga e a espessura da camada de rejeito, tornou-se possível estimar o recalque ponto a ponto de acordo com o respectivo módulo edométrico. Para refinar a malha da estimativa de recalque foram considerados 608 pontos distribuídos dentro do reservatório a partir de levantamento aéreo. Confrontando os pontos com a superfície de conformação de projeto obteve-se a

altura de aterro de conformação necessária ponto a ponto, isto é, a altura de rejeito desaguado compactado que seria disposto como sobrecarga.

Com fins analíticos foram estudados quatro cenários para M, além do considerado em projeto. Através do software AutoCad Civil 3D, tornou-se possível a geração de mapas hipsométricos capazes de auxiliar e aprimorar a interpretação dos resultados.

Para determinação do tempo correspondente ao término do processo de adensamento da camada de rejeito no interior do reservatório SP-4 Leste, foi necessário obter o coeficiente de adensamento horizontal do rejeito  $C_h$ . Para tanto, foi escolhido o método de Houlsby e Teh (1988), conforme Equação 7, onde  $t_{50}$  é obtido através dos ensaios de dissipação do piezocone,  $r$  é o raio do cone,  $T$  o fator tempo em função da porcentagem de dissipação da poropressão, conforme Tabela 9 foi adotado o fator tempo de 0,245.

**Tabela 9 – Fator tempo (T) em função da porcentagem de dissipação**

| U (%) | Filtro na face do cone ( $u_1$ ) | Filtro na base do cone ( $u_2$ ) |
|-------|----------------------------------|----------------------------------|
| 20    | 0,014                            | 0,038                            |
| 30    | 0,032                            | 0,078                            |
| 40    | 0,063                            | 0,142                            |
| 50    | 0,118                            | 0,245                            |
| 60    | 0,226                            | 0,439                            |
| 70    | 0,463                            | 0,804                            |
| 80    | 1,040                            | 1,600                            |

Fonte: Adaptado de Houlsby e Teh (1998) apud Oliveira (2015)

Maiores detalhes para a escolha do fator a ser adotado podem ser encontrados em Schnaid e Odebrecht (2012) e Oliveira (2015).

### 2.3.2 Previsão numérica

Com o intuito de entender diversos cenários em busca do que mais se aproximasse da condição real monitorada, a partir das mesmas premissas expostas ao longo do trabalho, o horizonte de rejeito contido no SP-4 Leste também foi analisado numericamente através do software Plaxis 2D. Esta teve como objetivo reproduzir a evolução dos recalques e poropressões com o tempo após a construção do aterro.

O PLAXIS é um programa de elementos finitos capaz de obter avaliações realistas de deslocamentos e tensões em determinado problema estrutural ou geotécnico, no presente estudo as incógnitas principais foram os deslocamentos. Embora sejam disponíveis outros modelos constitutivos na ferramenta, neste trabalho foram utilizados os modelos *Mohr-Coulomb* e *Soft Soil* devido aos dados disponíveis e o cenário em questão.

Para o rejeito de bauxita foi utilizado o modelo constitutivo *Soft Soil*, o qual é adequado para materiais com comportamento altamente compressível. Para os demais materiais, por ser um modelo mais simples, foi utilizado o modelo constitutivo *Mohr-Coulomb*.

O modelo *Soft Soil* considera o endurecimento volumétrico e superfície de escoamento *Mohr-Coulomb* que é definida por um ângulo de atrito ( $\phi$ ) e coesão ( $c$ ). A deformação volumétrica é considerada na formulação das linhas de compressão e descompressão, onde os índices  $C_c$  e  $C_s$  podem ser obtidos a partir de ensaios de adensamento com etapas de compressão e descompressão. De maneira geral, os solos moles não apresentam dilatação significativa durante o cisalhamento, dessa forma, considera-se o ângulo de dilatação ( $\psi$ ) igual a zero (Bentley, 2014).

Maior detalhamento sobre o PLAXIS e os modelos constitutivos podem ser encontrados em Bentley (2014) e Bentley (2020), versões do manual do programa e em Lima (2007).

Para fins comparativos aos resultados obtidos em campo, foi estabelecido o registro dos deslocamentos após a finalização das obras, isto é, a partir do início do monitoramento.

As estimativas teóricas foram analisadas pontualmente conforme a sobrecarga gerada pela camada de aterro que chegou à altura máxima de 1,60 metros. Dessa

forma, na modelagem foi adotado carregamento uniforme referente à sobrecarga máxima. Posteriormente, também foi realizada a modelagem com a altura média de aterro na seção longitudinal do canal – trecho que apresentou a maior incidência de recalques.

A partir da determinação dos deslocamentos verticais tornou-se possível estabelecer o comparativo entre os valores calculados numericamente e os efetivamente monitorados.

### 3 ANÁLISE E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS – ENSAIOS DE LABORATÓRIO

As caracterizações apresentadas neste capítulo foram realizadas em momentos precedentes à pesquisa e têm como objetivo enriquecer o trabalho com as propriedades do material enfatizado, o rejeito de bauxita da Mineração Rio do Norte.

Neste sentido são apresentadas a caracterização física, as análises química e mineralógica. A caracterização física apresentada neste item contempla os resultados dos ensaios quanto à massa específica dos grãos, granulometria e limites de consistência.

A determinação da massa específica dos grãos e da distribuição granulométrica do rejeito de bauxita foi realizada a partir de duas campanhas exploratórias de caracterização geotécnica, sendo a primeira realizada em 2017 e segunda em 2020. Os limites de consistência foram contemplados apenas pela segunda campanha.

#### 3.1 Análise química

Para analisar a composição química da fase sólida do rejeito da MRN foi realizado o ensaio de fluorescência de raio-X (FRX), tendo como resultados o exposto na Tabela 10.

Tabela 10 – Composição química rejeito MRN

| Amostra                              | Teor (%) |
|--------------------------------------|----------|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Total | 36,56    |
| SiO <sub>2</sub> Total               | 26,07    |
| *PPC                                 | 16,76    |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>       | 16,70    |
| TiO <sub>2</sub>                     | 3,62     |
| ZrO <sub>2</sub>                     | 0,16     |
| V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>        | 0,05     |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>        | 0,03     |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>       | 0,03     |
| MgO                                  | 0,01     |
| CuO                                  | 0,01     |

\*PPC: Perda por calcinação

A partir dos resultados do ensaio pode-se aferir a composição majoritária por óxido de alumínio, dióxido de silício, perda por calcinação e óxido de ferro.

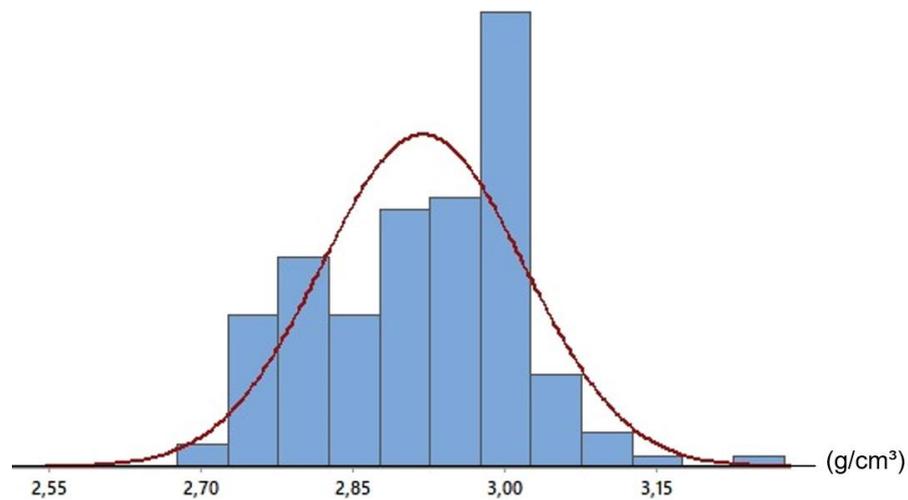
### 3.2 Análise mineralógica

Para analisar a composição mineralógica do rejeito da MRN foi realizado o ensaio de difração de raio-X (DRX) em 13 amostras de rejeito de diferentes reservatórios. A partir destes foi constatada a presença de gibbsita, caulinita, hematita, anatásio, goethita e rutilo. Os resultados obtidos para as amostras do SP-4 Norte estão dispostos no ANEXO I.

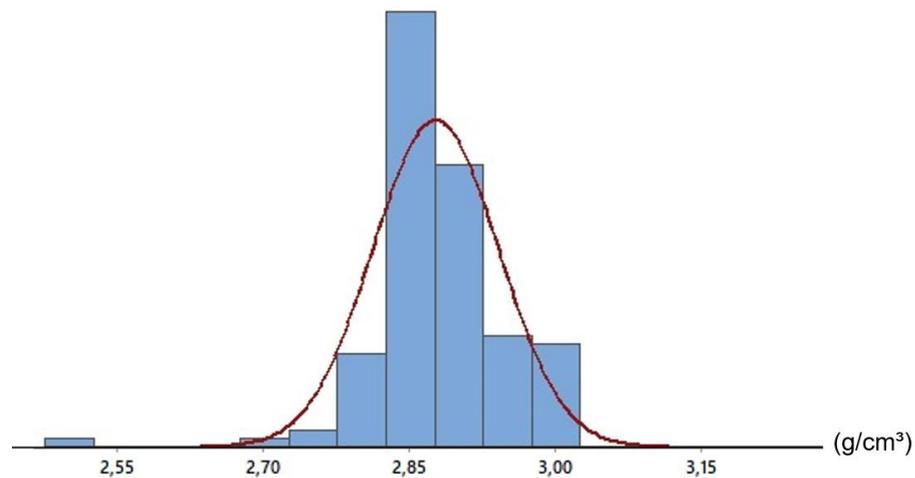
### 3.3 Massa específica dos grãos

Para a determinação da massa específica dos grãos foram estudadas 268 amostras. Sendo 144 amostras da campanha de 2017 de acordo com a norma

internacional ASTM D854 (2002) e 124 amostras da campanha de 2020 analisadas através do método do picnômetro a gás hélio. Os histogramas de distribuição de dados estão dispostos na Figura 23 e Figura 24.



**Figura 23 – Histograma de massa específica dos grãos - campanha 2017**



**Figura 24 – Histograma de massa específica dos grãos - campanha 2020**

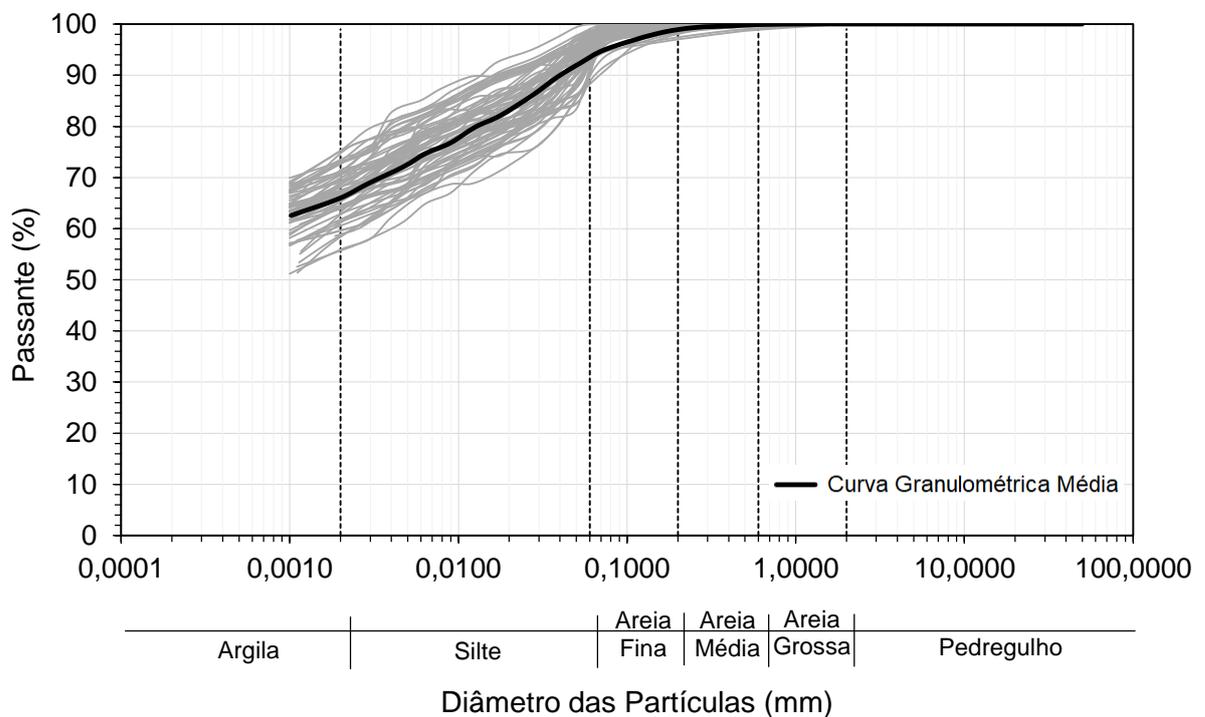
A partir dos ensaios foi possível encontrar a faixa da massa específica dos grãos delimitada entre 2,51 g/cm<sup>3</sup> e 3,25 g/cm<sup>3</sup>.

Como pode ser observado através dos histogramas, a massa específica média obtida foi de, respectivamente, 2,88 g/cm<sup>3</sup> e 2,90 g/cm<sup>3</sup>. Embora tenham sido

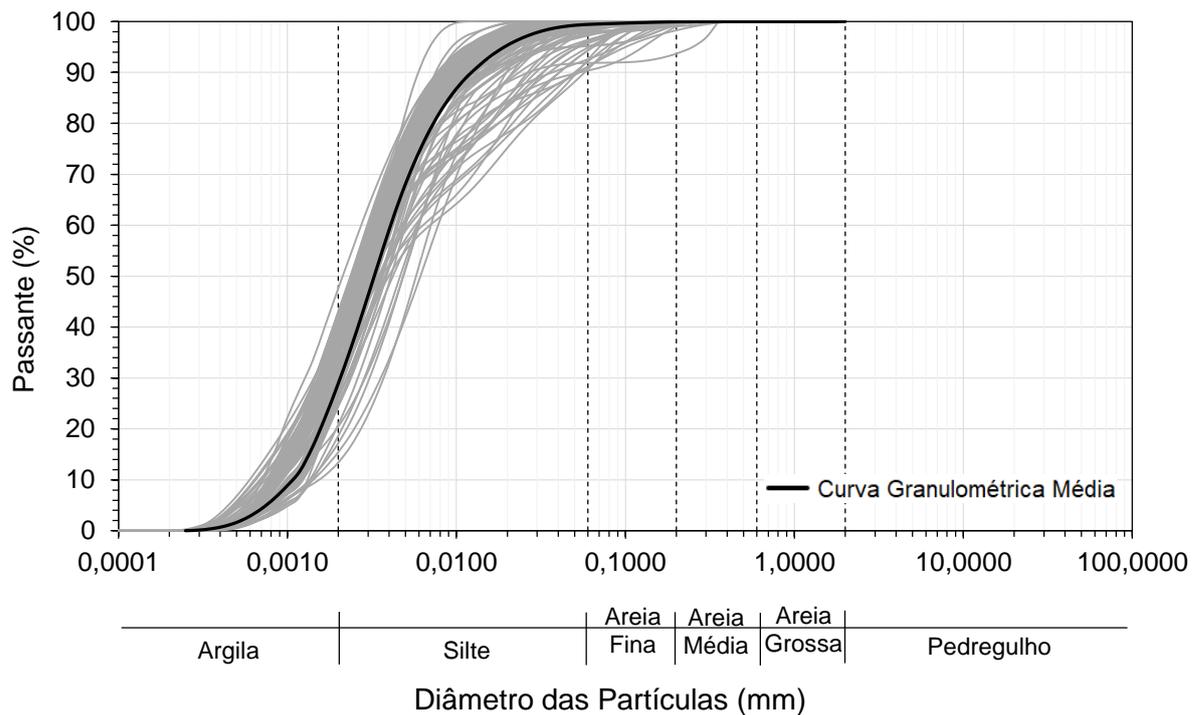
utilizados métodos distintos para obtenção dos resultados, nota-se a convergência entre os valores que quando analisados de forma conjunta.

### 3.4 Granulometria

A granulometria foi estudada a partir de 239 amostras. Sendo 144 amostras da campanha de 2017 analisadas pelo método da combinação de peneiramento e sedimentação com utilização de defloculante em consonância com a norma brasileira NBR 7181 (ABNT 2016). A campanha de 2020 contemplou 95 amostras e se concretizou através do método por difração de raio laser com faixa de detecção de 0,1 a 350  $\mu\text{m}$  de diâmetro. As curvas granulométricas estão dispostas na Figura 25 e Figura 26.



**Figura 25 – Curva granulométrica – Campanha de 2017**



**Figura 26 – Curva granulométrica – Campanha de 2020**

Como pode ser observado nas imagens supracitadas, o rejeito se caracteriza como uma argila siltosa, conforme campanha de 2017, enquanto os resultados da campanha de 2020 o reportam como silte argiloso. O fato se deve às diferentes metodologias utilizadas em cada campanha.

Maiores detalhes podem ser observados em Villar (1990) que compara a composição granulométrica com e sem defloculante na lama vermelha, como são chamados os resíduos do processamento da bauxita para extração do óxido de alumínio. Pedrosa (2012) também apresenta a curva granulométrica do rejeito de bauxita analisado pelas duas metodologias, tendo resultados também de argila siltosa e silte argiloso, respectivamente, conforme exposto nas curvas da Figura 27 e Figura 28.

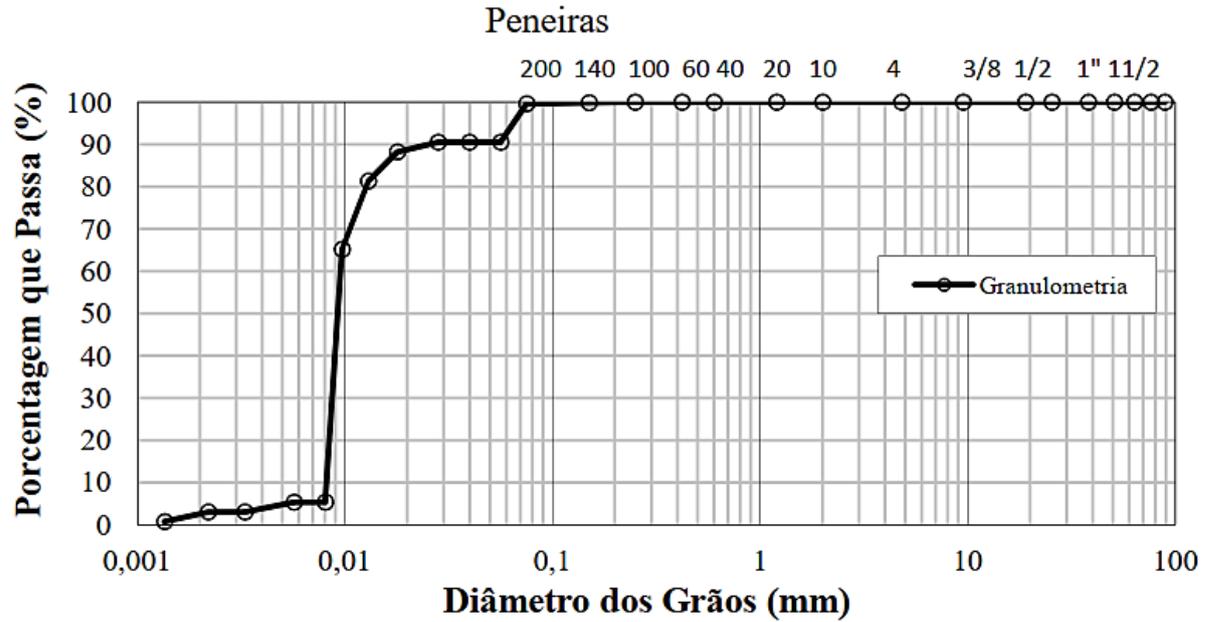


Figura 27 – Curva granulométrica sem utilização de defloculante (Pedrosa, 2012)

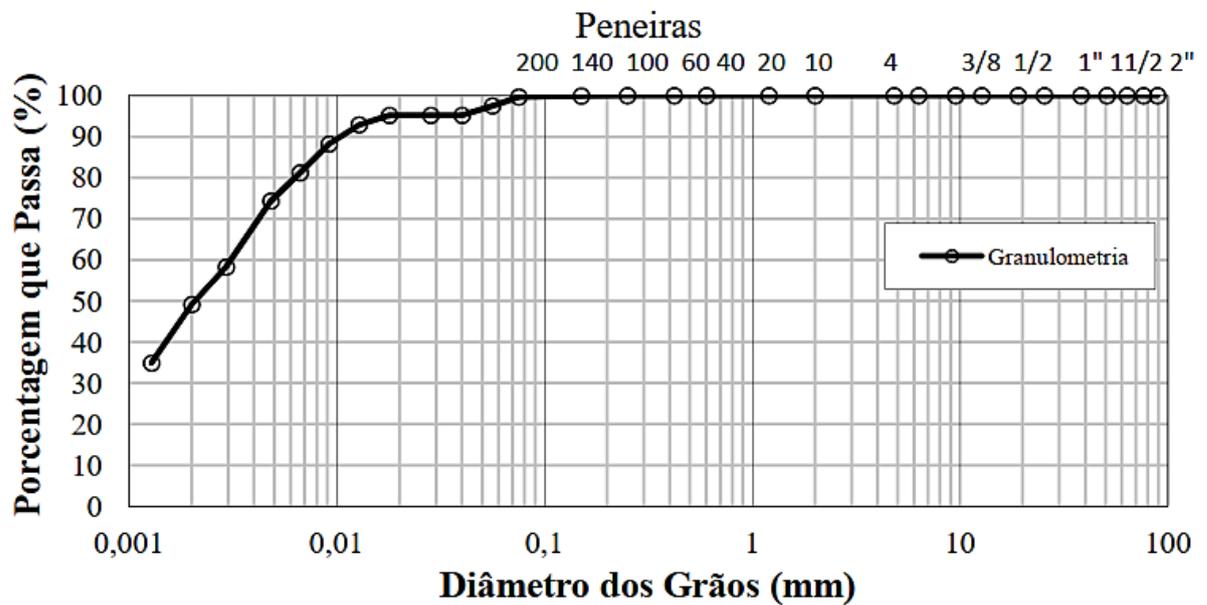


Figura 28 – Curva granulométrica com utilização de defloculante (Pedrosa, 2012)

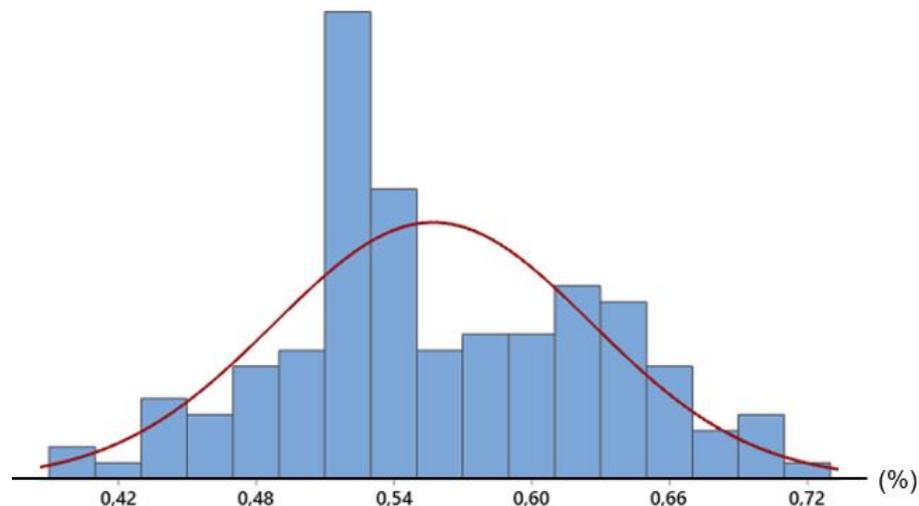
### 3.5 Limites de consistência

A determinação dos limites de consistência de um material, isto é, a fronteira entre os estados líquido, plástico e sólido de um material é definido pelos ensaios de

limite de liquidez, limite de plasticidade e limite de contração. Para determinação do limite de liquidez e plasticidade foram ensaiadas 144 amostras da campanha de 2017. O limite de contração do rejeito foi determinado a partir de 1 amostra ensaiada em 2009 e 12 amostras ensaiadas, posteriormente, durante a campanha de 2017.

### 3.5.1 Limite de liquidez

Para determinação do limite de liquidez (LL) as 144 amostras foram ensaiadas em consonância com a NBR 6459 (ABNT, 2016) e os resultados foram analisados através do histograma de distribuição elaborado através do software Minitab, conforme disposto na Figura 29.

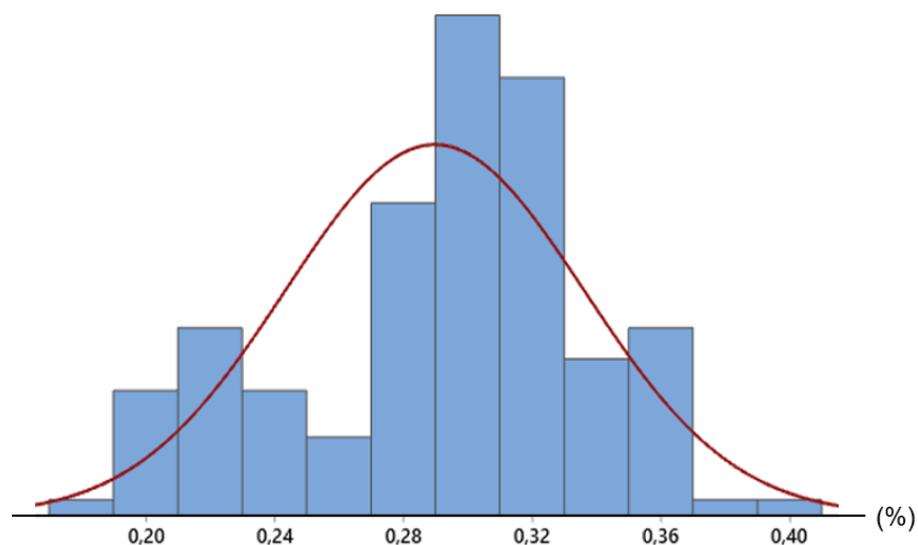


**Figura 29 – Histograma de limite de liquidez – campanha 2017**

A faixa de valores encontrada nos ensaios de limite de liquidez abrange de 25% a 74% de teor de umidade e, a partir do histograma supracitado, a média obtida para o rejeito da MRN foi de 56% de teor de umidade.

### 3.5.2 Limite de plasticidade

Para determinação do limite de plasticidade (LP) as 144 amostras foram ensaiadas em consonância com a norma brasileira NBR 7180 (2016) e os resultados foram analisados através do histograma de distribuição elaborado através do software Minitab, conforme disposto na Figura 30.



**Figura 30 – Histograma de limite de plasticidade – campanha 2017**

A faixa de valores encontrada nos ensaios de limite de plasticidade abrange de 16% a 40% de teor de umidade e, através do histograma, observa-se uma média de 29% de teor de umidade para o rejeito da MRN.

### 3.5.3 Limite de contração

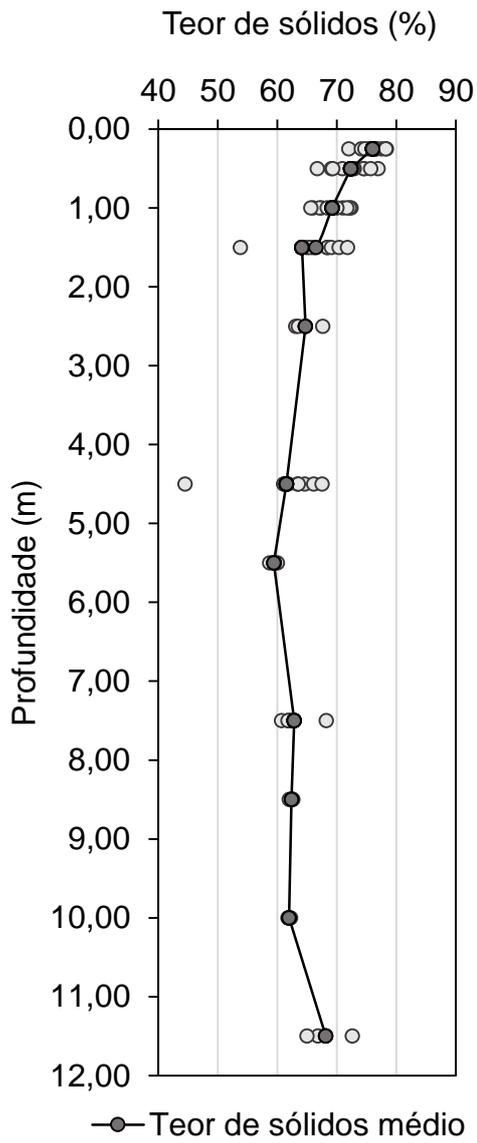
O limite de contração (LC) corresponde ao valor de umidade da qual o solo não sofre variação volumétrica em função da variação do teor de umidade, a condição também é conhecida por contração nula.

A amostra de 2009 foi interpretada graficamente obtendo-se um LC de aproximadamente 30%. A partir da interpretação conjunta aos resultados obtidos através da campanha de 2017, a faixa de percentual de umidade para o limite de contração do rejeito de bauxita se restringe aos valores de 29% a 36% e a média corresponde a 33%.

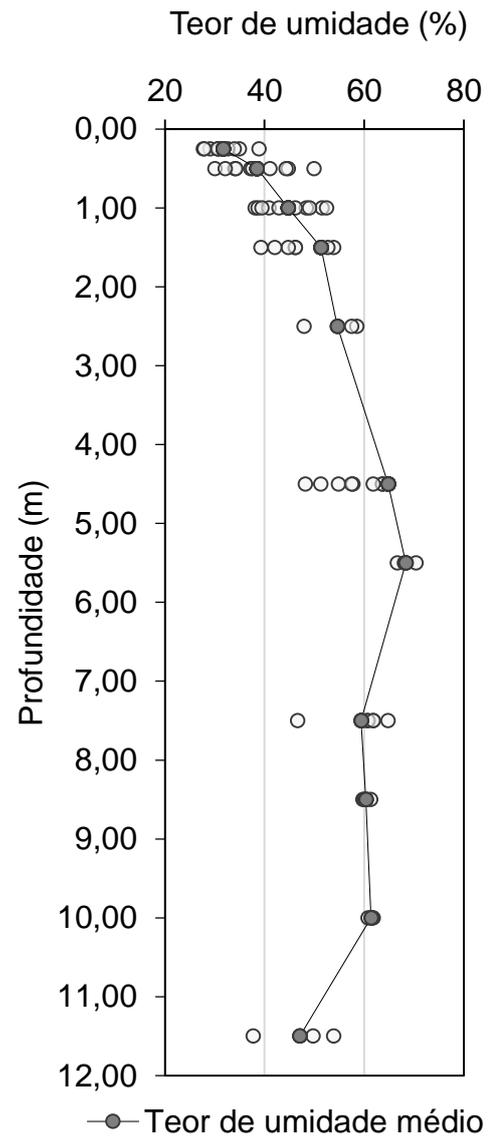
### 3.6 Teor de sólidos, teor de umidade e peso específico

A definição do perfil de teor de sólidos, umidade e peso específico variando com a profundidade foi obtida através da consolidação dos resultados de 69 amostras retiradas nos anos de 2017 e 2021 no SP-4 Norte e ensaiadas em laboratório. Os perfis obtidos podem ser observados na

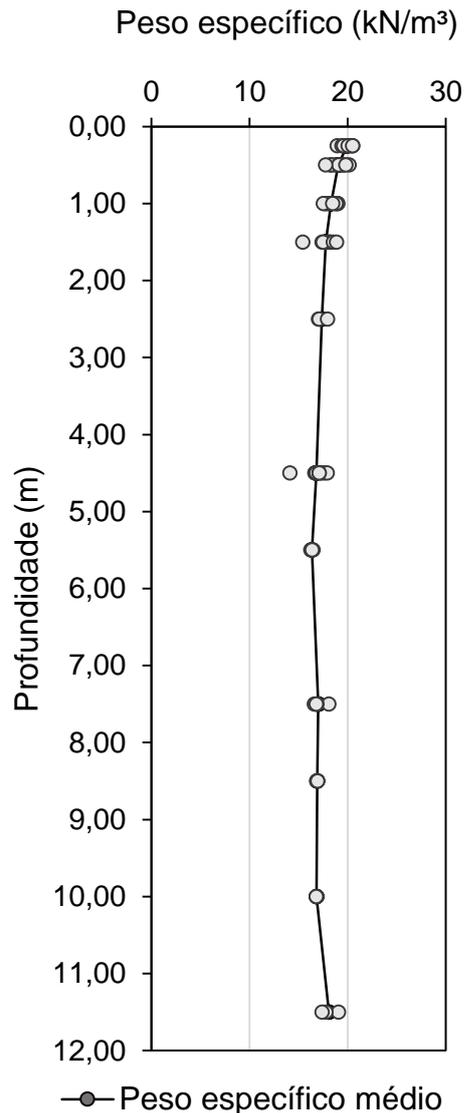
Figura 31, Figura 32 e Figura 33.



**Figura 31 – Perfil do teor de sólidos**



**Figura 32 – Perfil do teor de umidade**



**Figura 33 – Perfil do peso específico**

O teor de sólidos e de umidade ao longo de toda a camada de rejeito detém de um valor médio de 66% e 52% respectivamente, e o peso específico o valor médio de 18  $\text{kN/m}^3$ , os três considerando o topo superior ressecado. A primeira camada de aproximadamente 1,5m apresenta condições bem distintas das demais, fato que se deve às intempéries das quais a superfície está exposta.

Similarmente às considerações idealizadas nos estudos teóricos, dos quais desconsideraram os resultados iniciais dos ensaios CPTu, para a modelagem numérica decorreu-se da mesma maneira.

Sendo assim, os valores médios considerados para o teor de sólidos e de umidade foi de 63,4% e 58,4% respectivamente. Para o teor de sólidos a faixa limitante

foi de 59,4% a 68,1%, enquanto para o teor de umidade foi de 47,1% a 68,4%. Embora o perfil do peso específico tenha se limitado a valores de 14 kN/m<sup>3</sup> a 20,5 kN/m<sup>3</sup> obtidos a partir das amostras retiradas do SP-4 Norte, para o presente estudo foi considerado o peso específico médio obtido a partir dos ensaios de CPTu realizados no SP-4 Leste, sendo este com o valor de 14 kN/m<sup>3</sup>.

### 3.6.1 Índice de vazios

O índice de vazios do rejeito pode ser verificado em camadas a partir do perfil de teor de umidade. Este se deu através do produto entre a densidade relativa dos grãos e o teor de umidade.

O banco de dados analisado, desconsiderando a camada inicial, permitiu encontrar o intervalo de 1,09 a 3,62 para o índice de vazios do rejeito através do produto entre a densidade relativa dos grãos e o teor de umidade. A Tabela 11 expõe os valores médios encontrados para camada considerada.

**Tabela 11 – Índice de vazios por camada**

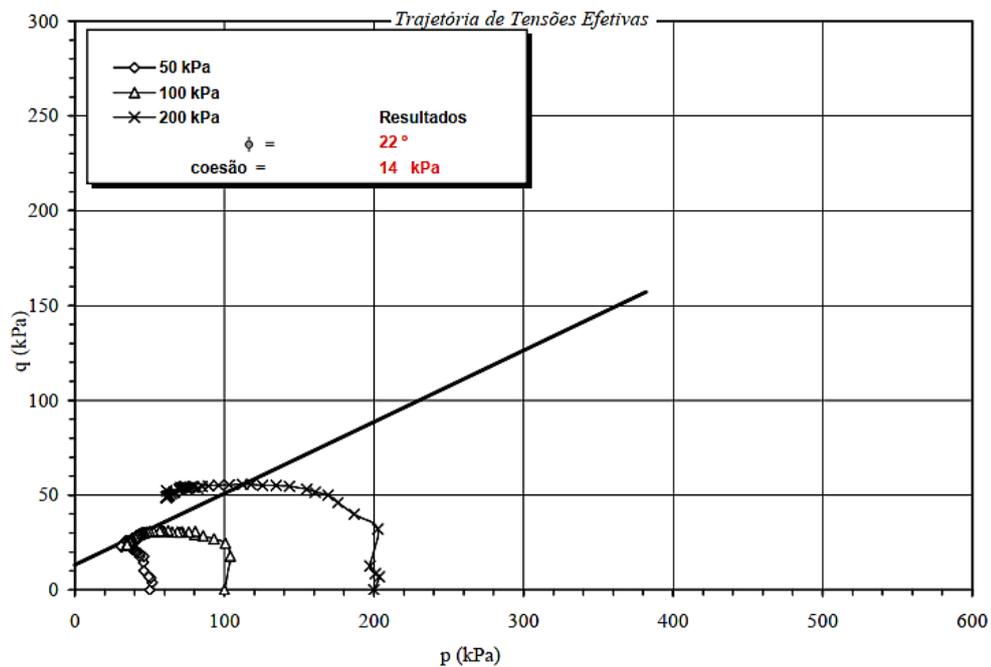
| Camada (m) | Índice de vazios (e) |
|------------|----------------------|
| 0,0 a 1,0  | 1,54                 |
| 1,0 a 3,0  | 1,73                 |
| 3,0 a 4,0  | 1,93                 |
| 4,0 a 6,0  | 1,85                 |
| 6,0 a 8,5  | 1,75                 |
| 8,5 a 10,0 | 1,57                 |

Nota-se que há uma tendência de redução de umidade e índice de vazios no limite inferior da camada de rejeito de bauxita, como esperado devido ao adensamento do material em conjunto com a fundação drenante. Já a redução de vazios no limite

superior, tende-se a entender que se deve ao ressecamento do horizonte exposto às intempéries.

### 3.7 Parâmetros de resistência

No presente trabalho a definição dos parâmetros de resistência do rejeito ( $\phi'$  e  $c'$ ) decorreu do ensaio triaxial adensado não drenado (CIU) realizado em 2008 em uma amostra com teor de sólidos de 64% e exposto na Figura 34.



**Figura 34 – Triaxial CIU em amostra de rejeito com 64% de T.S.**

Como resultado foi obtido o ângulo de atrito de  $22^\circ$  e uma coesão de 14 kPa. O ensaio triaxial se mostrou fortemente representativo devido ao teor de sólidos da amostra ser compatível com o perfil encontrado na Figura 31.

### 3.8 Índice de compressão

A obtenção dos índices de compressão por ensaios de laboratório se deu a partir do resultado de 5 ensaios de adensamento induzido por força de percolação (HCT) com teor de sólidos coerente aos encontrados em campo e considerados no presente estudo, estes estão dispostos no ANEXO II. Os resultados dos índices de compressão pelos ensaios HCT estão dispostos na Tabela 12.

**Tabela 12 – Índices de compressão segundo ensaios HCT**

| HCT | Teor de sólidos (%) | $C_c$ |
|-----|---------------------|-------|
| 01  | 61,7                | 0,38  |
| 02  | 60,3                | 0,43  |
| 03  | 68,3                | 0,46  |
| 04  | 61,3                | 0,29  |
| 05  | 61,3                | 0,45  |

Os valores encontrados para  $C_c$  se limitam a faixa de 0,29 a 0,46, com um valor médio de 0,40.

Embora Pedrosa (2012) também tenha apresentado ensaios HCT realizados em amostras de rejeito de bauxita, os índices de compressão são substancialmente distintos, já que o teor de sólidos das amostras ensaiadas abrange a faixa de 23% e 32%.

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS – ENSAIOS DE CAMPO

### 4.1 Piezocone

Os ensaios de piezocone foram realizados antes das obras de fechamento, não tendo reconformação da superfície até o momento referido. Dessa forma, se fez necessário construir aterros de conquista de aproximadamente 1,70m cada para que fosse possível a ancoragem da sonda, o peso específico considerado para o aterro de conquista foi de 18 kN/m<sup>3</sup>.

A sobrecarga considerada na execução dos ensaios de piezocone se deu apenas pelo aterro de conquista. A Equação 21 apresenta a composição da sobrecarga:

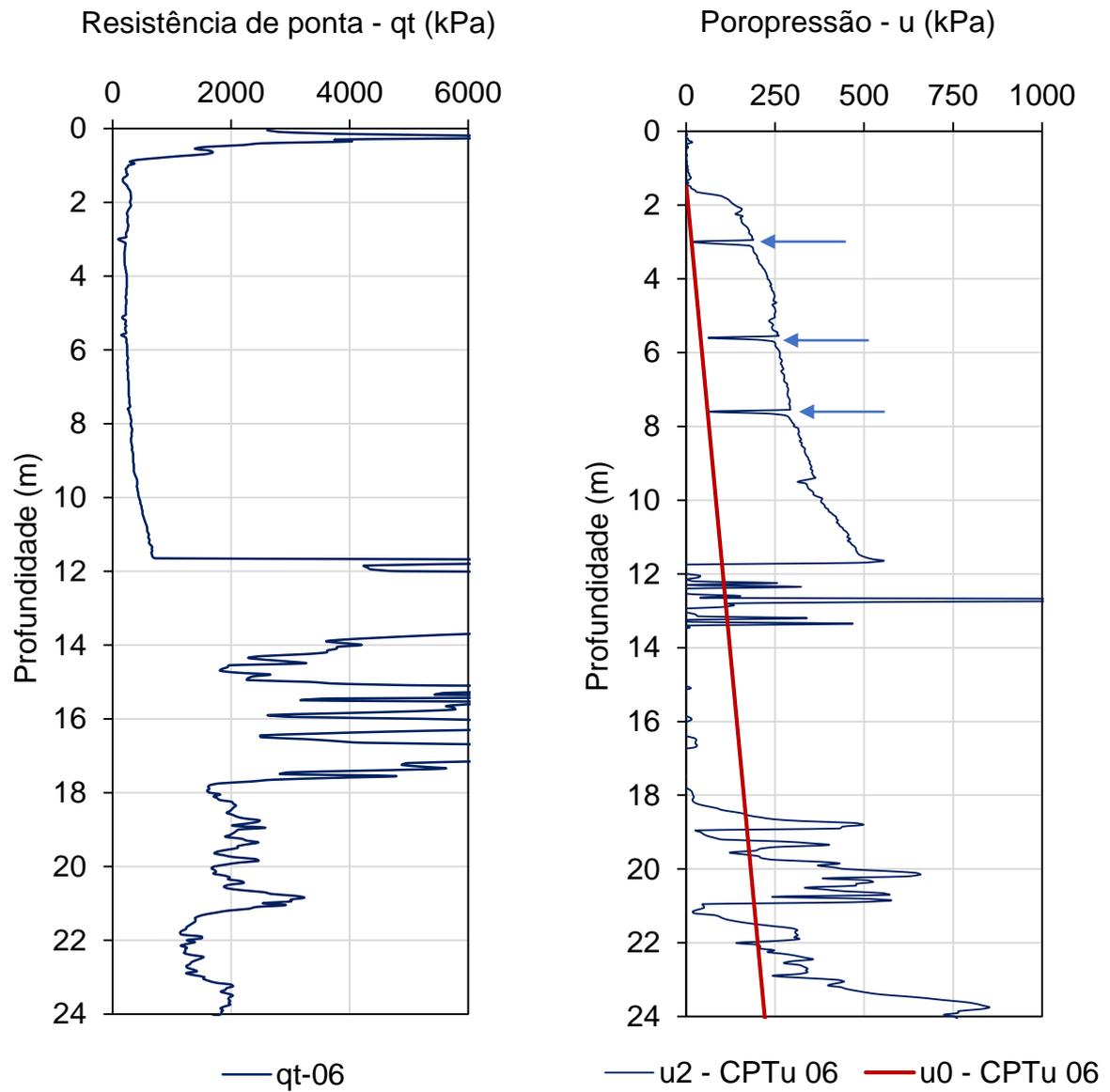
$$\sigma_{v0} = \gamma_{aterro\ conquista} \cdot h_{aterro\ conquista} \quad (21)$$

$$\sigma_{v0} = 18 \cdot 1,7 = 30,6 \text{ kN/m}^3$$

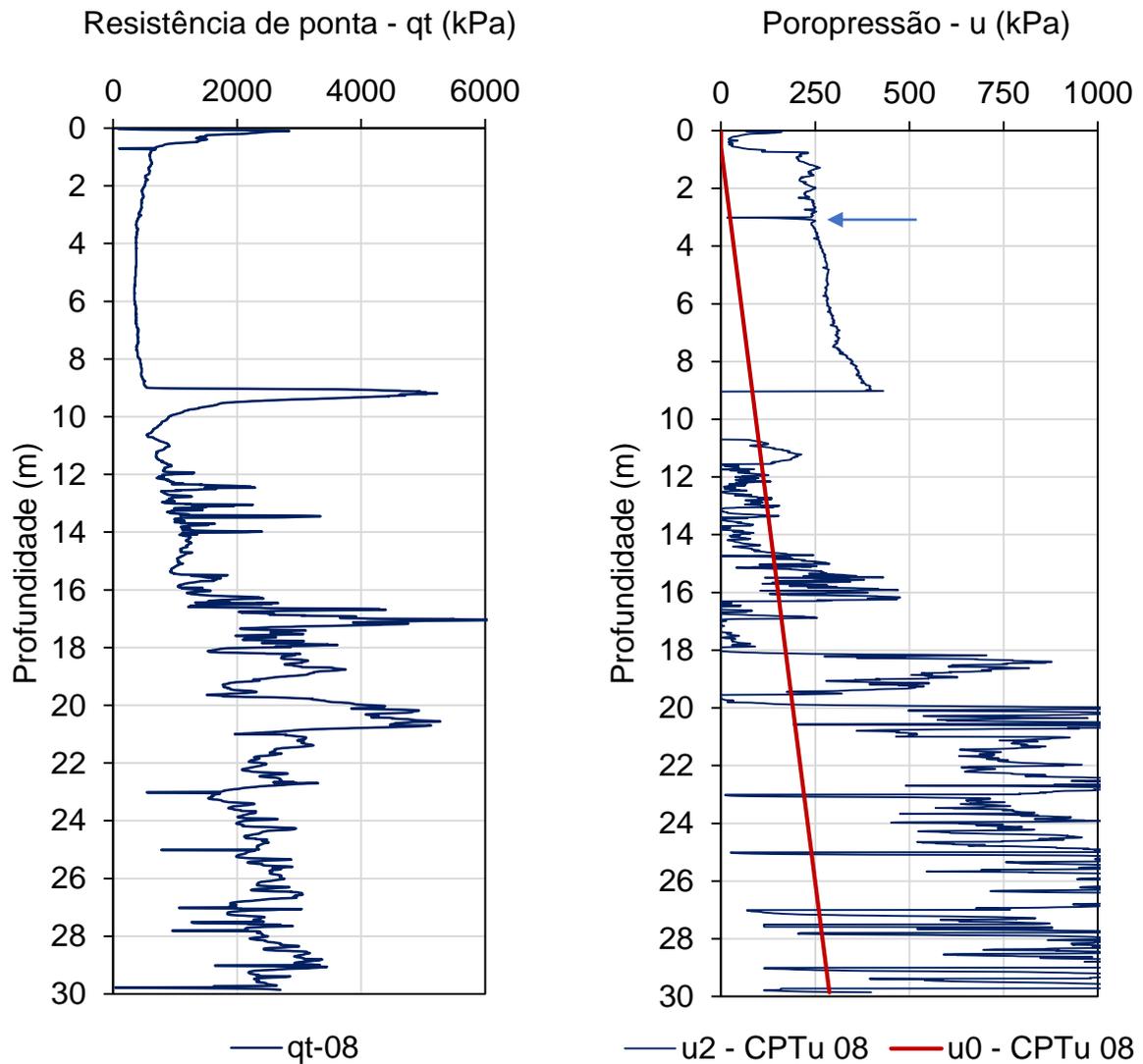
Pode ser observado, em ambas as verticais de CPTu, a existência uma camada superficial com maior resistência de ponta, o fato se deve ao pré-adensamento gerado por esse aterro de conquista e também pela crosta ressecada de rejeito. Os dados da camada superficial foram desconsiderados para o estudo do rejeito por não ser representativa do material contido no reservatório como um todo.

#### 4.1.1 Resistência de ponta do cone e o perfil de poropressões

Os dois ensaios abrangem o perfil do rejeito e da fundação, os gráficos resultantes contendo a resistência de ponta do cone e o perfil de poropressões estão dispostos na Figura 35 e Figura 36.



**Figura 35 – Resistência de ponta e poropressão CPTu-06**



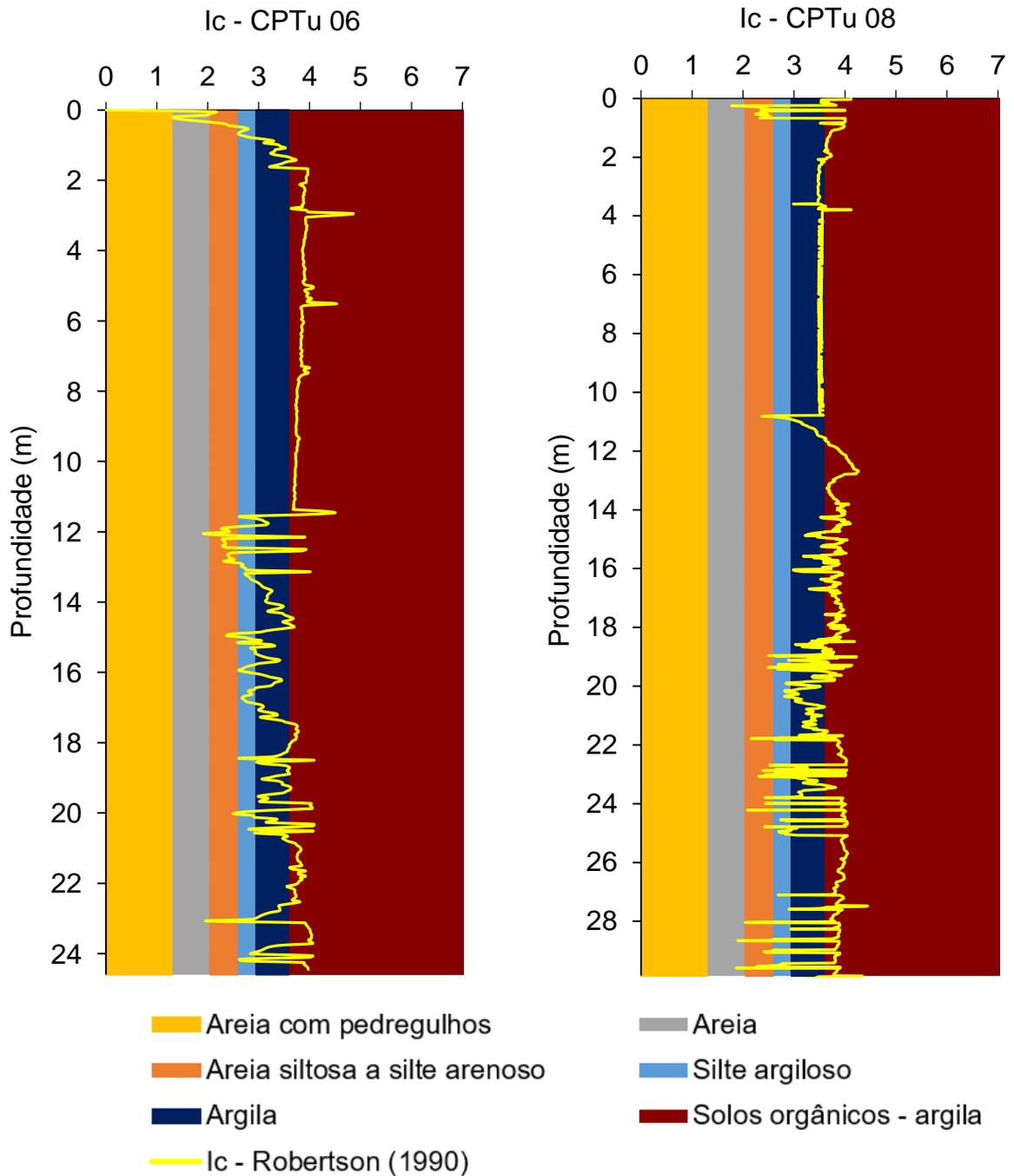
**Figura 36 – Resistência de ponta e poropressão CPTu-08**

Pode-se notar que foram realizados ensaios de dissipação durante a execução do CPTu, estes estão indicados pelas setas azuis, sendo 3 no CPTu-06 e apenas 1 no CPTu-08, as curvas de dissipação estão apresentadas no item 6.1.2

#### 4.1.2 Classificação SBT

A fim de possibilitar maior clareza na identificação dos materiais, também foi realizada a classificação SBT (*Soil Behavior Type*) através da elaboração do gráfico

de índice de classificação do material  $I_c$  com a partir das proposições de Robertson (1990), os resultados estão dispostos na Figura 37.



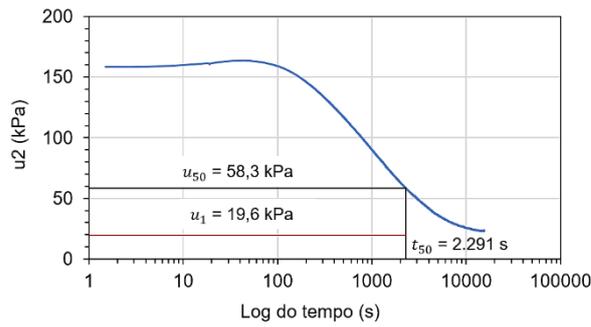
**Figura 37 – Índice de classificação dos materiais  $I_c$**

Nota-se que a camada de rejeito no CPTu-06 detém classificação de solos orgânicos à argilosos, enquanto no CPTu-08 a classificação se encontra no limite entre argilosa e solo orgânico. Os resultados dos ensaios convergem quanto à baixa resistência de ponta, elevado excesso de poropressão e moderada força de atrito lateral.

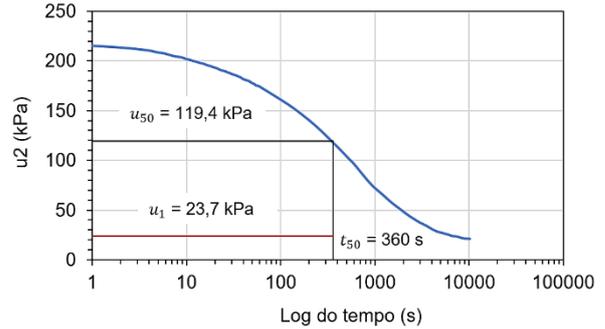
#### 4.1.3 Dissipação de poropressão

Na Figura 35 e Figura 36 é possível identificar as profundidades em que ocorreram o ensaio de dissipação, para cada uma delas foi gerada a curva poropressão ( $u_2$ ) x log do tempo ( $t$ ) tornando possível a identificação do  $t_{50}$  a partir do  $u_{50}$ , conforme apresentado na Figura 38.

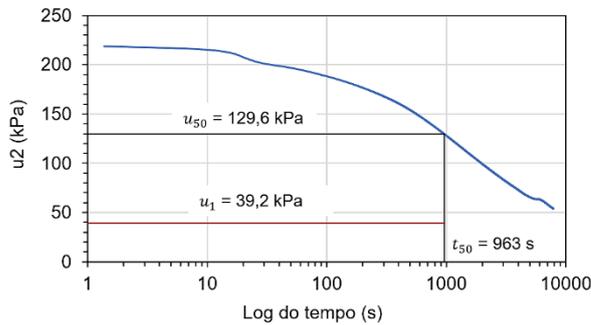
Nas curvas de dissipação,  $u_1$  representa a pressão hidrostática na profundidade em que foi realizado o ensaio, enquanto  $u_2$  indica a poropressão medida através do filtro no cone.



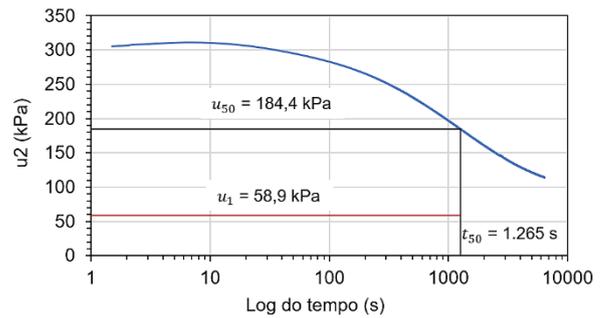
a) 3,5 m – CPTu-06



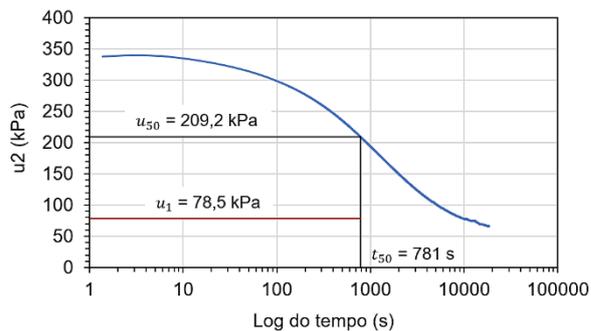
b) 3,0 m – CPTu-08



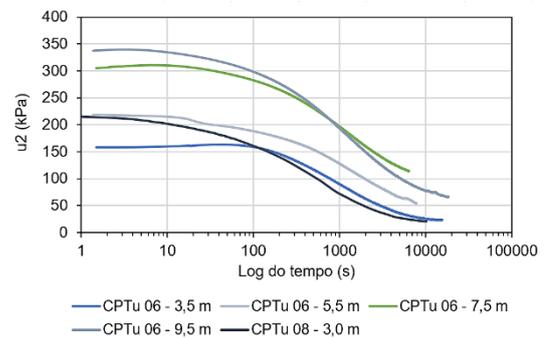
c) 5,5 m – CPTu-06



d) 7,5 m – CPTu-06



e) 9,5 m – CPTu-06

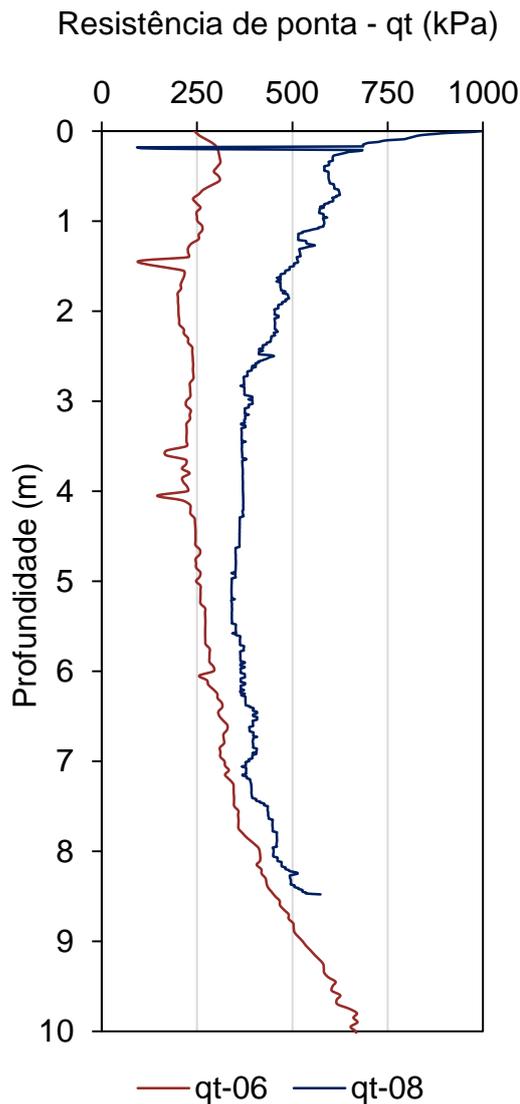


f) Curvas até 9,5 m

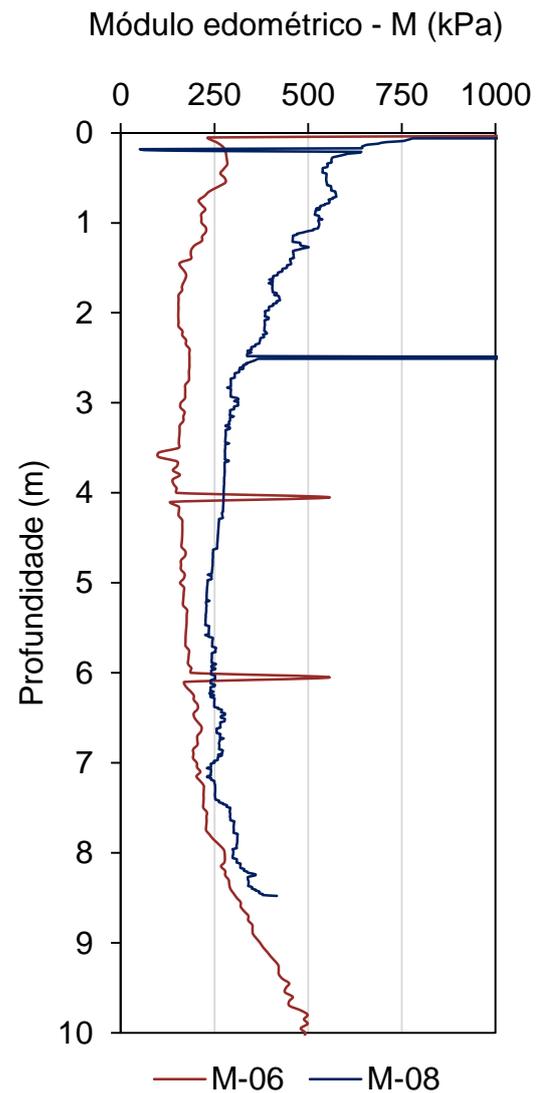
Figura 38 – Curvas de dissipação  $t_{50}$ 

#### 4.1.4 Módulo edométrico

Através da Equação (15) obteve-se o gráfico Módulo edométrico (M) x Profundidade (m), apresentado na Figura 39 e Figura 40.



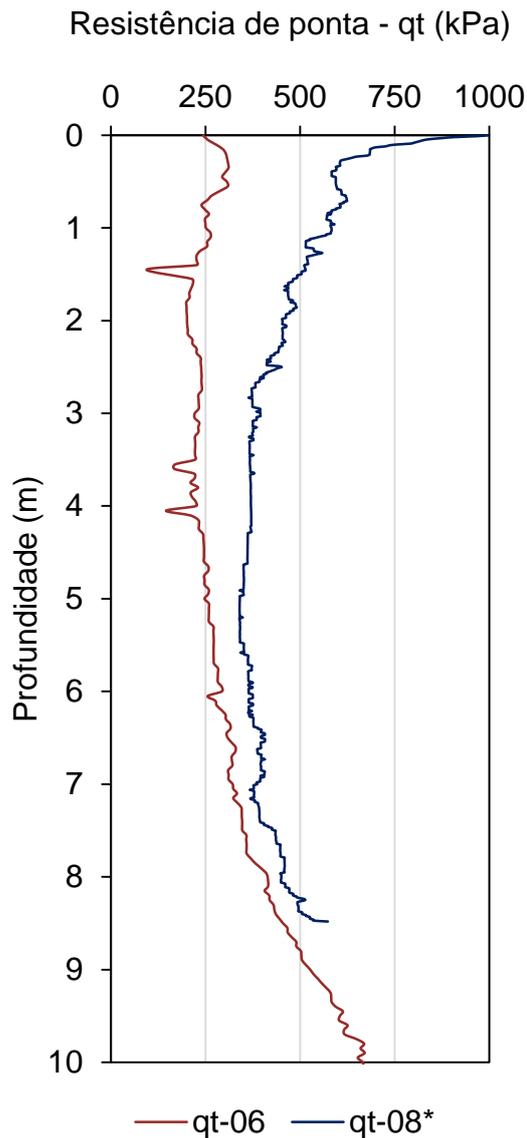
**Figura 39 – Resistência de ponta da camada de rejeito**



**Figura 40 – Módulo edométrico da camada de rejeito**

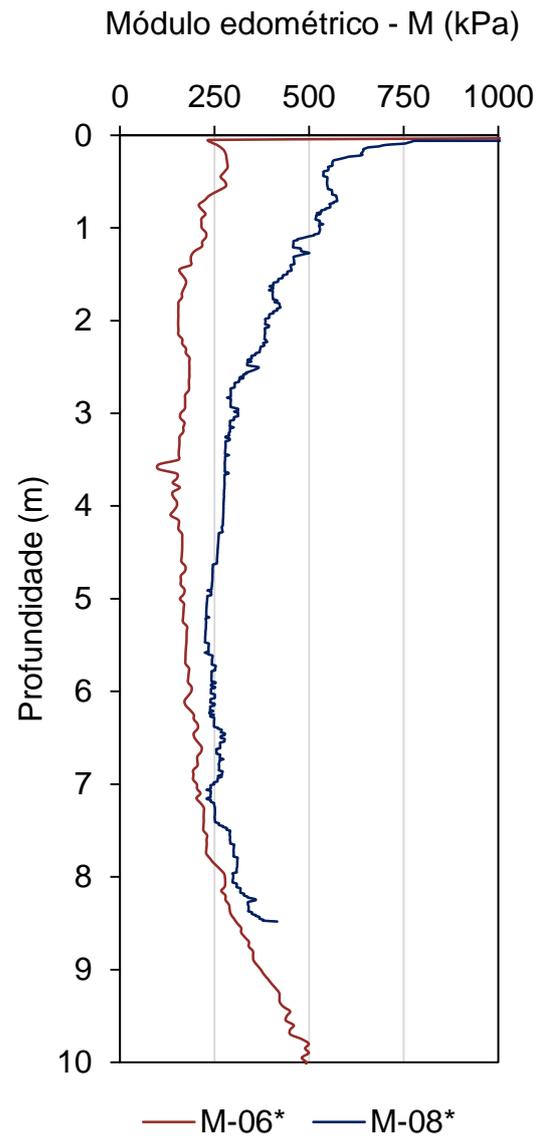
Nota-se uma perda abrupta de resistência de ponta no início do ensaio CPTu-08, além do módulo edométrico apresentar picos em regiões aleatórias. A partir da análise dos dados é possível identificar que os picos no segundo gráfico se devem à redução repentina de poropressão que eleva a tensão efetiva e, conseqüentemente, o módulo edométrico.

A fim de representar toda a camada como o material homogêneo que é considerada, os valores discrepantes foram neutralizados através da interpolação entre os valores imediatamente anterior e superior à discrepância, os resultados podem ser observados na Figura 41 e Figura 42.



**Figura 41 – Resistência de ponta da camada de rejeito modificada**

\*Valores de pico neutralizados



**Figura 42 – Módulo edométrico da camada de rejeito modificada**

#### 4.1.5 Índice de compressão

A determinação do índice de compressão  $C_c$  se deu através da correlação proposta por Robertson (2015) conforme Equação 22 para os diferentes módulos edométricos (M). Os resultados de máximo e mínimo da primeira etapa estão dispostos na Tabela 13.

$$M = \frac{1}{m_v} = 2.3 (1+e_0) \frac{\sigma'_{vo}}{C_c} \quad (22)$$

**Tabela 13 – Índices de compressão segundo correlação de Robertson (2015)**

| M (kPa) | $C_{c,mín}$ | $C_{c,máx}$ |
|---------|-------------|-------------|
| 103,0   | 2,92        | 3,37        |
| 250,0   | 1,20        | 1,39        |
| 407,7   | 0,74        | 0,85        |
| 780,1   | 0,39        | 0,45        |

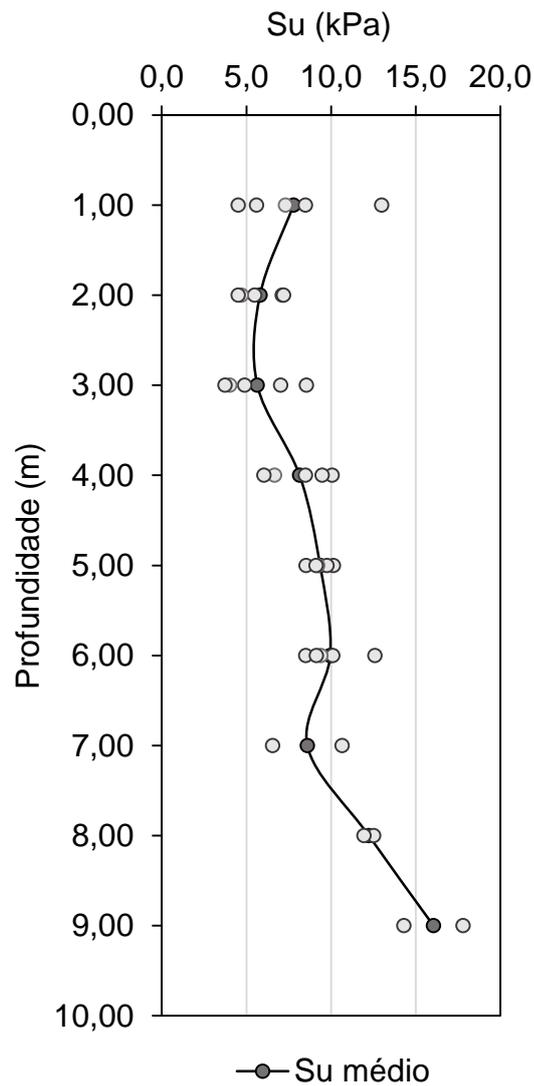
O valor mínimo corresponde à adoção do menor índice de vazios ( $e=1,54$ ), enquanto o valor máximo corresponde ao valor de  $C_c$  obtido para o maior índice de vazios (1,93), conforme Tabela 11.

#### 4.2 Vane Test

Foram considerados 36 ensaios Vane Test no interior dos reservatórios SP-4 Norte e SP-4 Leste em diferentes profundidades pelo fato de que ambos tiveram sua construção, início e fim de operação ocorrendo simultaneamente em 1993, 1994 e 2016, respectivamente.

##### 4.2.1 Resistência não drenada

Com a consolidação dos resultados obtidos a partir da Equação 18 para cada amostra de acordo com a profundidade foi possível obter perfil de resistência não drenada, conforme pode ser observado na Figura 43.

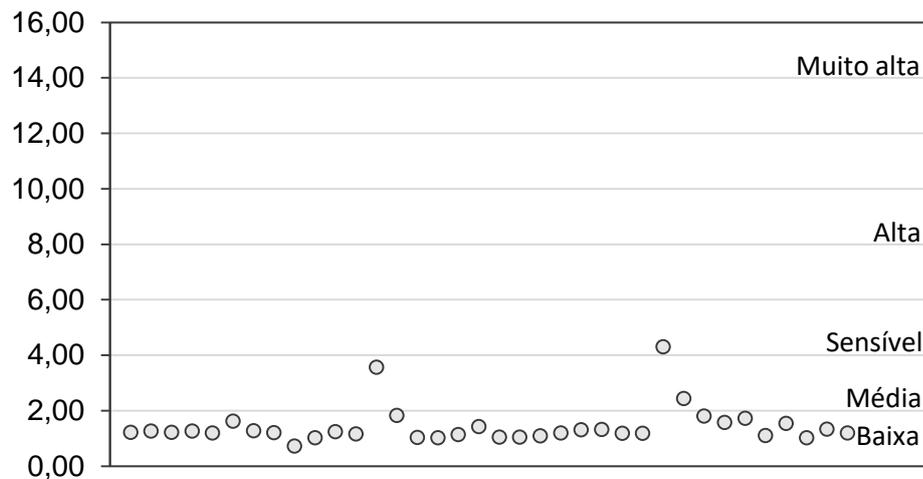


**Figura 43 – Perfil de resistência não drenada  $S_u$**

Pode-se notar através do perfil supracitado que, embora existam algumas variações, a resistência não drenada apresentou uma tendência de aumento de acordo com a profundidade, o que esperado, apresentando valores de 3,7 a 17,8 kPa.

#### 4.2.2 Sensibilidade

A sensibilidade das argilas, conforme descrito no tópico 1.5.2, indica a perda relativa de resistência do material quando bastante amolgado. A partir da análise dos 36 resultados de *vane test*, foi possível classificar o rejeito quanto à sensibilidade. A Figura 44 apresenta os valores encontrados através da Equação 19.



**Figura 44 – Sensibilidade do rejeito**

As faixas de classificação expostas na Figura 44 correspondem à

Tabela 8 adaptada de Skempton e Northey (1952) e indicam que o rejeito de bauxita analisado apresenta baixa sensibilidade decorrente do amolgamento.

## 5 ANÁLISE E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS – METODOLOGIA CONSTRUTIVA E MONITORAMENTOS

### 5.1 Compactação do rejeito desaguado

A execução da camada de aterro esteirado para conformação da superfície inicialmente foi realizada com o trator de esteiras. Todavia, a superfície apresentou deslocamento ao longo das passadas tendo sido verificada a necessidade de aplicação de 6 fechos (12 passadas) com o equipamento para atingir o grau de compactação requerido de 96% do ensaio Proctor Normal.

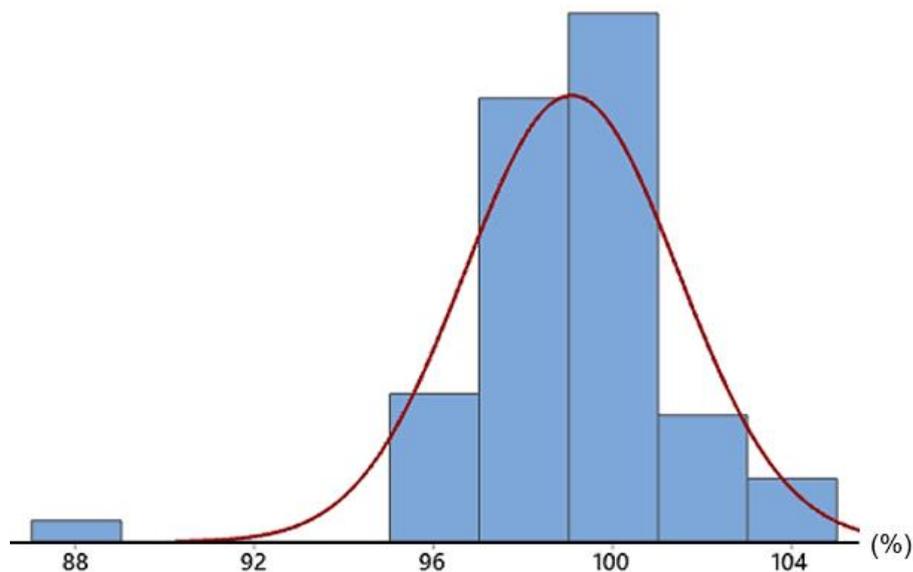
Portanto, avaliou-se a compactação do material com dois modelos de rolo compactador em baixa vibração, de modo que o grau de compactação mínimo fosse de 96%. O primeiro modelo de rolo alcançou o grau de compactação com 3 fechos (6 passadas), enquanto o segundo necessitou de 6 fechos (12 passadas). Todavia, comparando o resultado do material compactado com o trator esteira e com o obtido através dos rolos compactadores, o rejeito apresentou melhor qualidade com a utilização do equipamento rolo compactador, como pode ser observado na Figura 45.



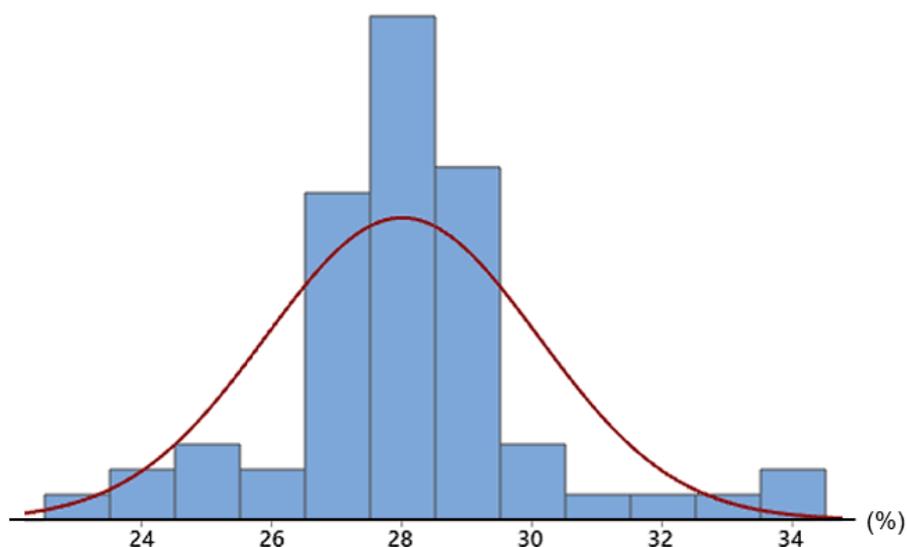
**Figura 45 – Comparação entre a compactação com rolo (porção esquerda) e com trator esteira (porção direita)**

A aferição do grau de compactação, bem como desvio de umidade das camadas ocorreu pelo método de Hilf, de modo que a verificação da densidade in situ do material foi feita pela cravação do cilindro biselado. Foram realizados, ao todo, 63 ensaios de compactação pelo método de Hilf.

Os dados obtidos foram tratados estatisticamente através do software Minitab, os resultados estão dispostos na sequência. A Figura 46 e a Figura 47 apresentam os histogramas de grau de compactação e a umidade obtidos para cada amostra respectivamente.



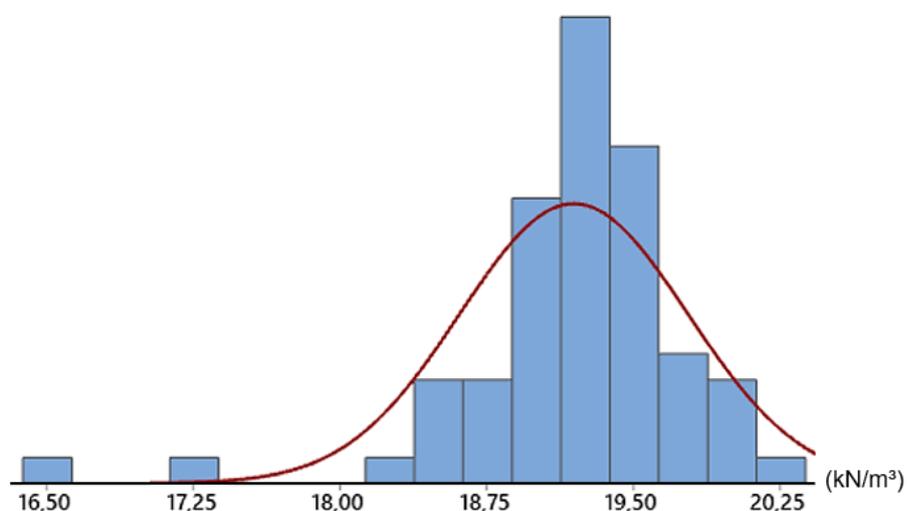
**Figura 46 – Histograma de grau de compactação da camada de rejeito desaguado**



**Figura 47 – Histograma de umidade da camada de rejeito desaguado**

De acordo com os histogramas, o grau de compactação médio foi de 99% com o mínimo de 87,3% enquanto a umidade média foi 28% com mínimo de 22,5% e máximo de 34,3%. Salienta-se que quando os ensaios resultavam em valores não condizentes com as premissas de projeto, as camadas eram abertas, tratadas e compactadas novamente.

A partir dos ensaios de compactação foi possível obter o peso específico médio, conforme histograma apresentado na Figura 48.

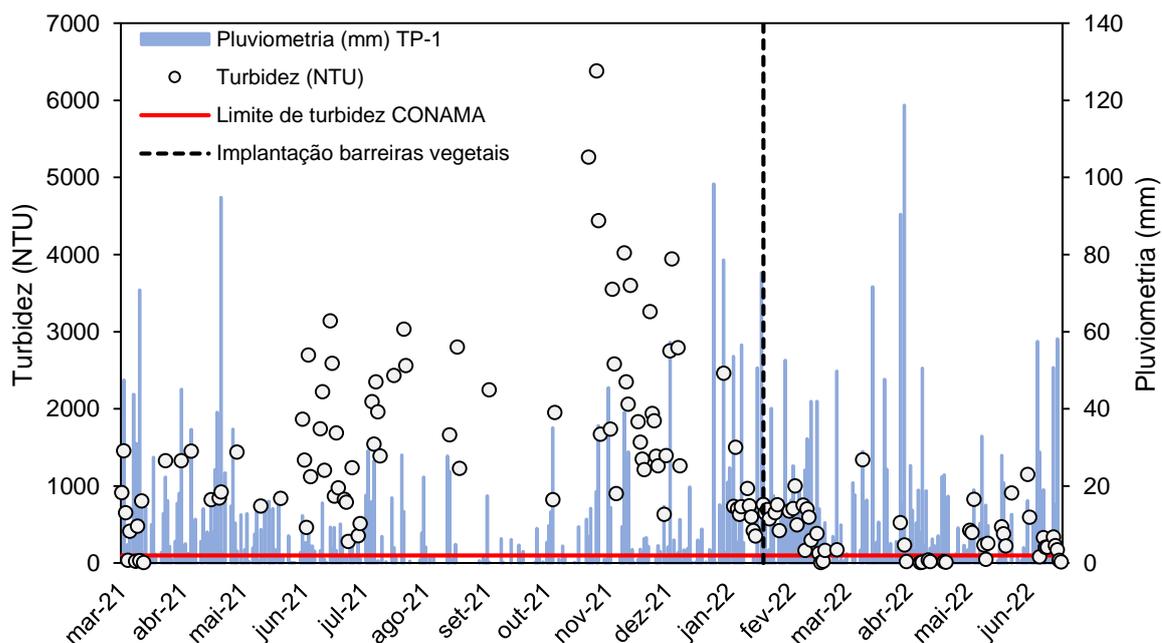


**Figura 48 – Histograma de peso específico da camada de rejeito desaguado**

O peso específico médio obtido e considerado no cálculo da sobrecarga gerada pela camada de aterro de conformação foi de 19,2 kN/m<sup>3</sup>.

## 5.2 Turbidez do excedente hídrico

A Figura 49 apresenta a variação dos índices de turbidez encontrados durante as coletas do efluente no desembocagem da tubulação do sistema extravasor do SP4-Leste.



**Figura 49 – Monitoramento da turbidez no extravasor do SP-4 Leste**

A pluviosidade apresentada se refere às leituras realizadas na estação TP-1, localizada próxima ao reservatório conforme ilustrado na Figura 10. Nota-se que os maiores valores de turbidez foram encontrados no período de junho a dezembro de 2021, período mais seco, compreendido como verão amazônico. O fato pode ser

advindo do desprendimento dos finos provenientes da camada superficial ressecada do aterro.

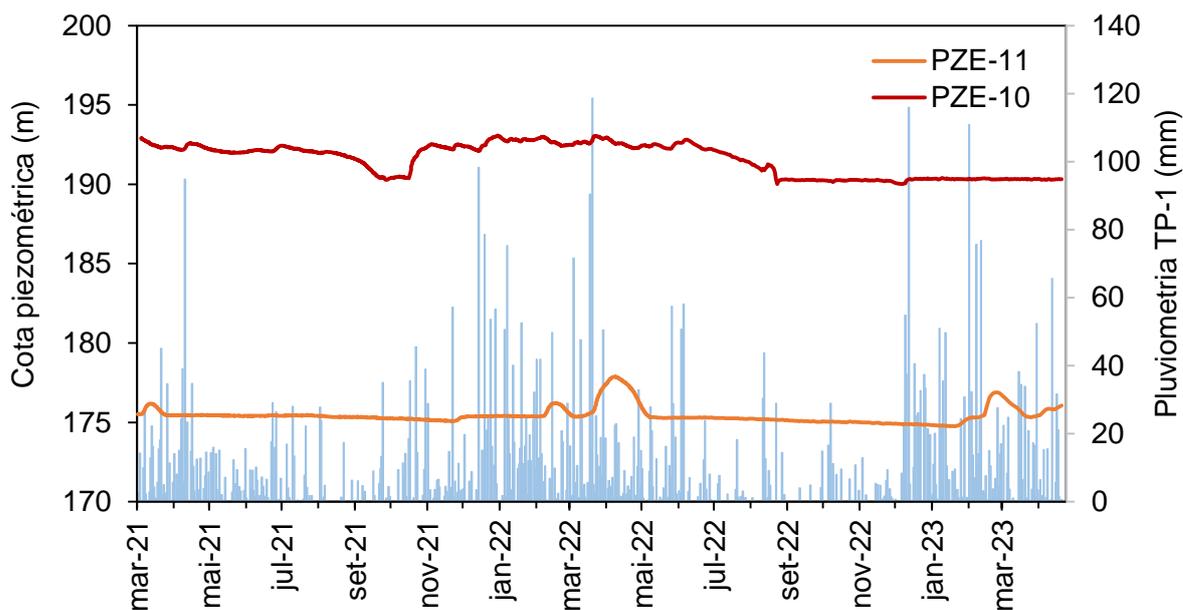
Conforme as chuvas se intensificam, se torna usual o uso dos *stop logs* que geram acúmulo de água na região próxima ao extravasor. Através da análise gráfica quanto ao período chuvoso, verifica-se que a turbidez se reduz, tal aspecto corrobora para a análise anterior. Nesse caso a água acumulada reduz o carreamento dos finos devido ao tempo que o mesmo tem para sedimentar.

A implantação das barreiras vegetais auxilia na redução da velocidade da água sobrenadante, podendo apresentar resultados positivos quanto à melhoria da qualidade do excedente hídrico. Apesar desse fator, a implantação destas ocorreu logo após o início do período chuvoso, coincidindo com a redução dos índices de turbidez.

Sendo assim, apesar da contribuição das barreiras, não é possível afirmar que esses elementos sozinhos são os responsáveis pelo decréscimo nos índices de turbidez, devido as duas variáveis ocorrerem simultaneamente. Para tanto, seria necessário observar, ao menos, mais um ciclo hidrológico completo.

### 5.3 Monitoramento geotécnico

Os instrumentos PZE-10 e PZE-11 foram posicionados de maneira estratégica a fim de confirmar se as condições de fluxo no interior do reservatório serão mantidas ao longo do tempo, como a inexistência de nível d'água comunicante entre a camada de rejeito e a fundação. O fato pode ser analisado através da interpretação das leituras de poropressão dispostas na Figura 50.



**Figura 50 – Leituras dos piezômetros instalados no rejeito**

Nota-se que o PZE-11, instalado na camada de argila variegada, na cota 176,15, não responde à pluviometria. O fato indica que este horizonte não é influenciado pelas intempéries, isto é, a camada de rejeito impede a passagem da água da chuva para o substrato. Para o PZE-10, instalado na cota 190,35, na camada de rejeito também não é possível observar uma correlação com a incidência das chuvas, o que confirma a dificuldade que a água tem em infiltrar no horizonte de rejeito.

Através da observação de imagens e vídeos aéreos realizados ao longo dos meses, tornou-se possível identificar os locais na superfície em que ocorreram abatimentos. A Figura 51 representa o mapeamento dos pontos de acúmulo de água.



**Figura 51 – Mapeamento das regiões com acúmulo de água**

A superfície do reservatório foi dividida entre três principais regiões quanto às observações realizadas, sendo:

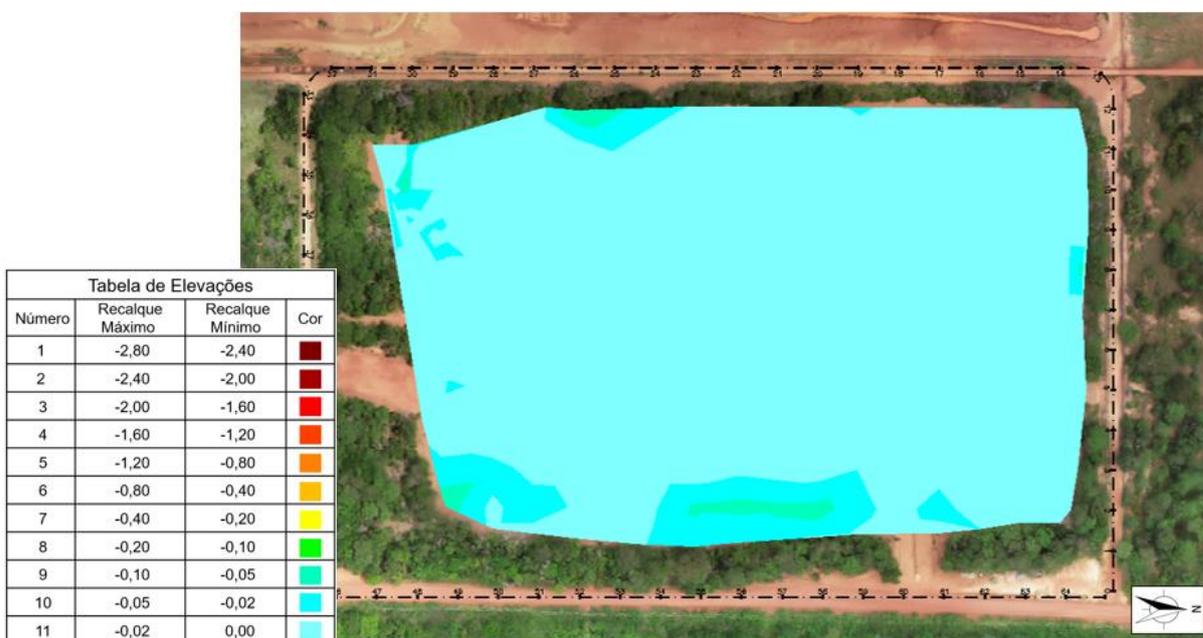
1. Regiões em que não foram identificados pontos de acúmulo de água, endossadas pelo comportamento estável dos levantamentos topográficos que evidenciam a não ocorrência de recalques durante o período corrente de monitoramento.
2. Regiões em que os levantamentos topográficos identificaram comportamento de tendência de continuidade na ocorrência de recalques.
3. Regiões com acúmulo de água sem o encaminhamento adequado para o canal principal de drenagem.

Para as regiões com ausência de água, o monitoramento indicou que, caso tenham ocorrido recalques, estes se deram, majoritariamente, durante as obras. Portanto, considerou-se a estabilização dos recalques, estando a área com inclinação adequada para o direcionamento de água para o canal de drenagem principal.

Com o objetivo de acompanhar os dados por um ciclo hidrológico completo, uma vez que o comportamento do solo pode oscilar mediante a ocorrência de precipitação, saturação e ressecamento, o monitoramento dos recalques das obras implantadas se deu através da instalação de 213 piquetes no interior do reservatório.

A instalação ocorreu no mês de março de 2021, imediatamente após a finalização do aterro e a partir de então foram iniciadas as leituras topográficas mensais.

Embora o maior abatimento tenha sido notado em abril de 2022 com o valor de 0,10 m, o monitoramento se estendeu até o novembro de 2022 quando foi constatado que as leituras estavam majoritariamente variando na faixa de incertezas do equipamento topográfico. Este fato permitiu o início da preparação do terreno para receber a nova vegetação. A Figura 52 apresenta o mapa hipsométrico dos maiores recalques aferidos durante os 18 meses de monitoramento.



**Figura 52 – Mapa hipsométrico dos maiores recalques monitorados**

Entende-se que os recalques mantiveram o direcionamento global da drenagem de projeto. Fato este que corrobora com a consideração de que a necessidade de reconformação da superfície não deve se dar por meio de estabelecimento de valores de referência, mas pela identificação de regiões em que os recalques diferenciais prejudicam a drenagem superficial e, conseqüentemente, leva ao acúmulo de água.

Vale ressaltar que o rejeito da MRN é composto por partículas de granulometria majoritariamente fina e possui baixa permeabilidade. Desta forma, mesmo décadas

após o cessar de sua operação há geração de excesso de poropressão durante a cravação de piezocones.

Sabendo-se da disformidade geométrica de fundo dos reservatórios da MRN, devido à disposição das pilhas de estéreis, os estudos prévios à implantação do projeto tiveram caráter orientativo para equalização das expectativas para os próximos fechamentos. Devendo a etapa de monitoramento ser utilizada também para avaliação comparativa e calibração dos resultados.

A revegetação ocorreu após período contemplado na pesquisa, todavia, de forma complementar a Figura 53 apresenta o resultado do primeiro plantio para o reflorestamento.



**Figura 53 – Início da revegetação**

## 6 PROCESSO DE ADENSAMENTO - PREVISÃO E ANÁLISE

O presente capítulo tem como objetivo apresentar os resultados obtidos através da previsão do processo de adensamento da camada de rejeito de bauxita a partir dos princípios da Teoria Convencional do Adensamento e utilização das proposições de Robertson (2015) para utilização dos dados de ensaios de piezocone, além de definir a resistência não drenada encontrada através de ensaios de palheta.

Ademais, também são analisados diversos cenários para o módulo edométrico visando propor o que mais se aproxima do cenário real que foi acompanhado por 18 meses. Nesse sentido são apresentados:

- Os resultados das investigações de campo utilizadas para subsidiar os estudos de adensamento;
- A definição da camada de rejeito a partir dos resultados de piezocone;
- A obtenção do módulo edométrico ( $M$ ) para cada cenário e avaliação da influência deste;
- A definição da resistência não drenada ( $S_u$ ) utilizada para estimar o tempo do processo de adensamento da camada de rejeito;
- A estimativa do recalque para os diferentes cenários com apresentação em mapas hipsométricos.
- Modelagem numérica com previsão do processo de adensamento e análises comparativas.

Nota-se que após exposta a camada superficial gera a formação de uma crosta ressecada de rejeito. A crosta ressecada pode dificultar substancialmente a drenagem pelo horizonte superior, também foi considerada essa hipótese na modelagem numérica.

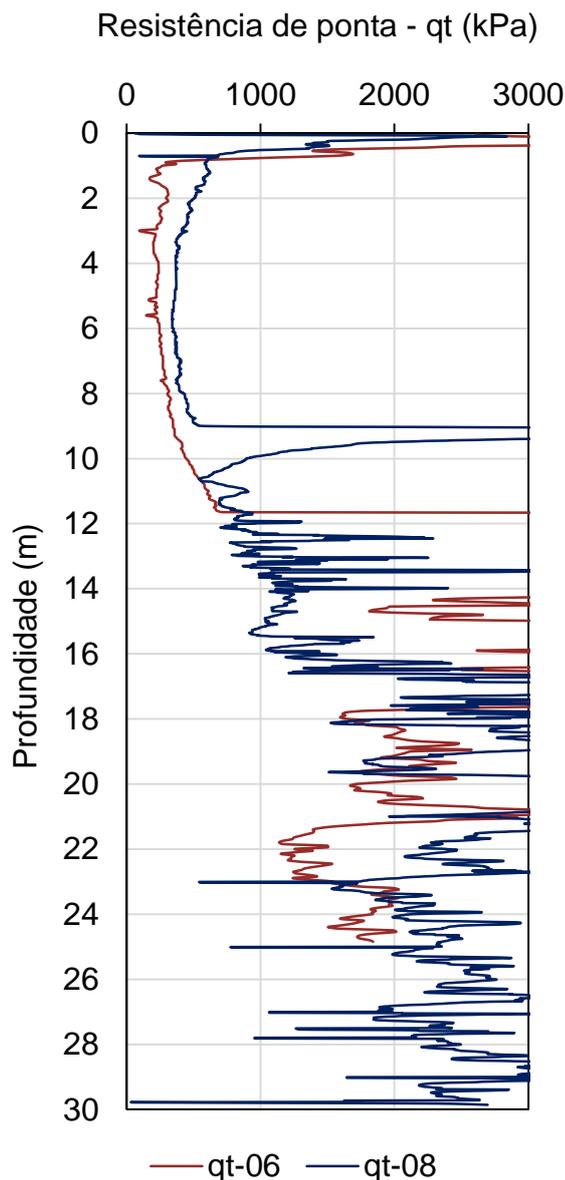
## 6.1 Previsão a partir de ensaios CPTu

As estimativas deste capítulo consistiram em obter os valores de recalque a partir da Equação 20 para cada módulo edométrico considerado, a equação foi contextualizada na previsão teórica do capítulo 2 e o processo para obtenção dos mapas hipsométricos se encontra detalhado no item 2.3.1. Nesse sentido foram encontrados valores máximos de 0,36 a 2,71 metros, dependendo do cenário, e a partir do coeficiente de adensamento vertical encontrado através dos ensaios de dissipação do CPTu, foi verificado que 95% das poropressões se dissipariam em 9,8 anos e que o valor de 10 cm ocorreria em 6,5 meses.

### 6.1.1 Definição da camada de rejeito

Para a definição da camada de rejeito e cálculo da estimativa do recalque foi necessário interpretar as verticais de ensaio de piezocone que foram executados dentro do reservatório SP-4 Leste no ano de 2020, sendo CPTu-06 e CPTu-08.

A definição da espessura do horizonte de rejeito se deu a partir da interpretação dos gráficos de resistência de ponta do cone, consolidados na Figura 54.



**Figura 54 – Resistência de ponta dos ensaios CPTu**

A camada de rejeito apresenta, majoritariamente, resistência  $q_t$  entre 250 e 420 kPa, podendo ser definida como a camada que se encontra imediatamente após a camada superficial pré-adensada e imediatamente antes do solo mais resistente. As camadas de rejeito interpretadas para cada CPTu estão dispostas na Tabela 14.

**Tabela 14 – Cotas da camada de rejeito conforme CPTu**

| Rejeito      | CPTu-06 | CPTu-08 |
|--------------|---------|---------|
| Cota inicial | 196,72  | 198,25  |
| Cota final   | 186,62  | 189,76  |
| Espessura    | 10,10   | 8,49    |

Sabe-se que o fundo do reservatório é composto por pilhas de argila amarela dispostas de forma desordenada, não sendo possível prever a localização de cada uma. Conseqüentemente, embora tenham sido obtidas diferentes profundidades de rejeito, foi arbitrada a cota 188,0 m para previsão do processo de adensamento.

#### 6.1.2 Coeficiente de adensamento

Para a obtenção do coeficiente de adensamento horizontal do rejeito  $C_h$ , a fim de determinar o tempo correspondente ao término do processo de adensamento da camada de rejeito no interior do reservatório SP-4 Leste, foi escolhido o método de Teh e Houlsby (1991), conforme Equação 7. O tempo correspondente a 50% de dissipação da poropressão gerada durante a cravação do cone corresponde ao  $t_{50}$ .

Sendo  $I_r$  o índice de rigidez a razão entre o módulo cisalhante do solo e a resistência não drenada ( $S_u$ ), foram analisados 5 ensaios de palheta em diferentes profundidades para obtenção da resistência não drenada. Os ensaios foram realizados em 2017 no interior dos reservatórios SP-4 Norte e SP-4 Sul.

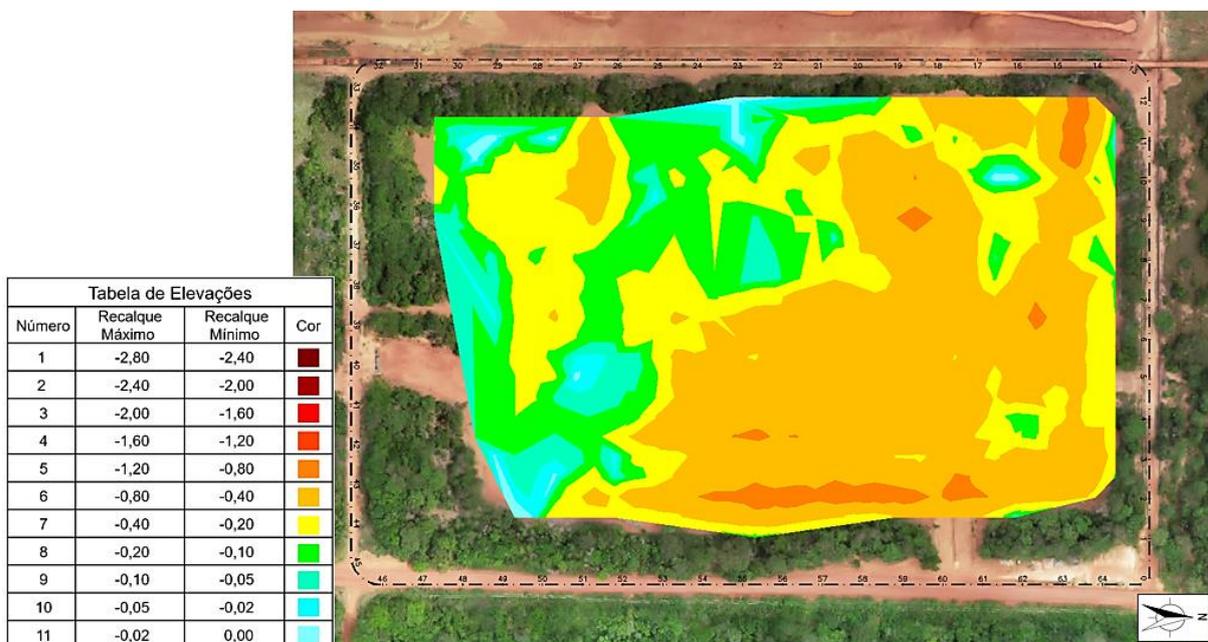
A fim de obter maior aderência aos resultados e considerar o trecho mais representativo de toda a camada, além de ser o trecho com maior número de ensaios, a média da resistência não drenada  $S_u$  foi limitada entre a faixa de 5,0 e 10,0 kPa. O valor médio encontrado foi de 7,8 kPa.

A partir dos resultados encontrados para  $t_{50}$  pode-se obter o coeficiente de adensamento horizontal do solo ( $c_h$ ) variando entre  $4,4 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  a  $2,8 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , a fim de considerar o aspecto mais conservador, para efeito de cálculo foi considerado o valor mínimo de  $t_{50}$ , sendo  $c_h$  igual a  $4,4 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Partindo do princípio que o material é uma argila homogênea estabeleceu-se a razão de permeabilidade ( $k_h/k_v$ ) como 1,2, conforme Tabela 7, obtendo um coeficiente de adensamento vertical do solo ( $c_v$ ) igual a  $3,7 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s.

### 6.1.3 Cenário de Projeto

Considerando as mesmas premissas de projeto descritas acima, foi possível estimar os recalques ponto a ponto e obter o mapa hipsométrico apresentado na Figura 55.



**Figura 55 – Mapa hipsométrico M = 250,0 kPa**

Neste cenário a faixa de recalque mais representativa da área foi de 0,20 m a 0,80 m. Considerando o módulo edométrico de 250,0 kPa, a estimativa de recalque alcançou valores de até 1,12 m, abrangendo pequenas áreas no extremo Leste e no extremo Noroeste do barramento.

#### 6.1.4 Cenário 1 – Módulo edométrico mínimo

O primeiro cálculo da estimativa do recalque foi realizado considerando o cenário mais conservador possível com o  $M_{\text{mínimo}} = 103,0 \text{ kPa}$ , sendo o menor valor encontrado a partir dos ensaios de piezocone. O mapa hipsométrico apresentado na Figura 56 remete às estimativas de recalque encontradas para o cenário 1.

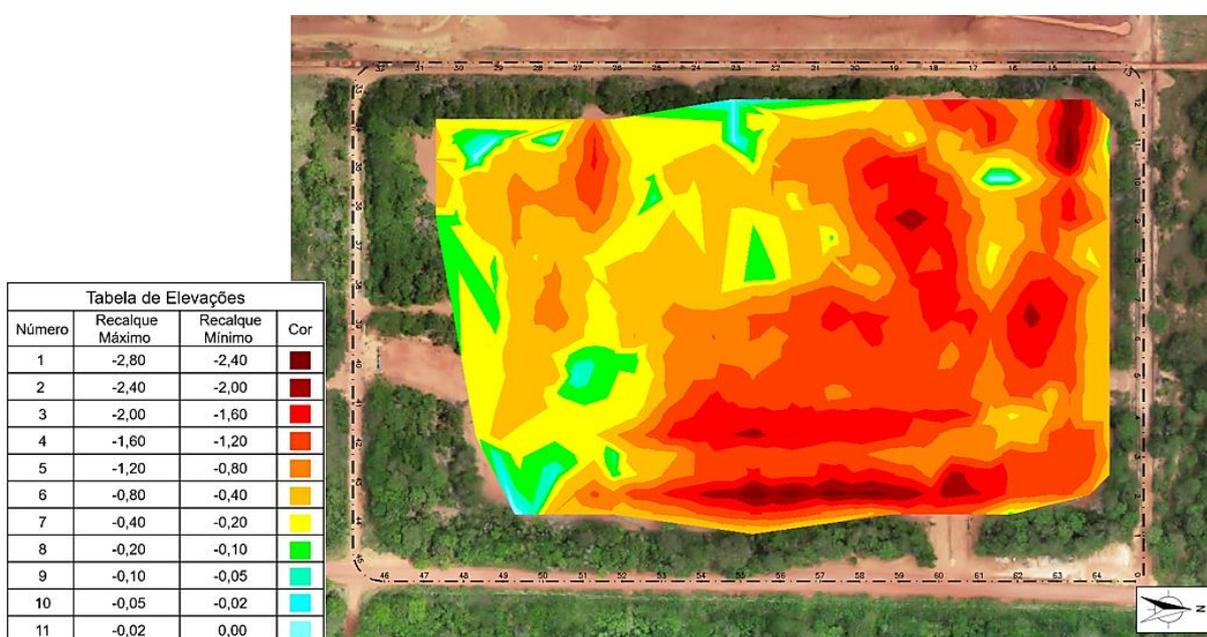


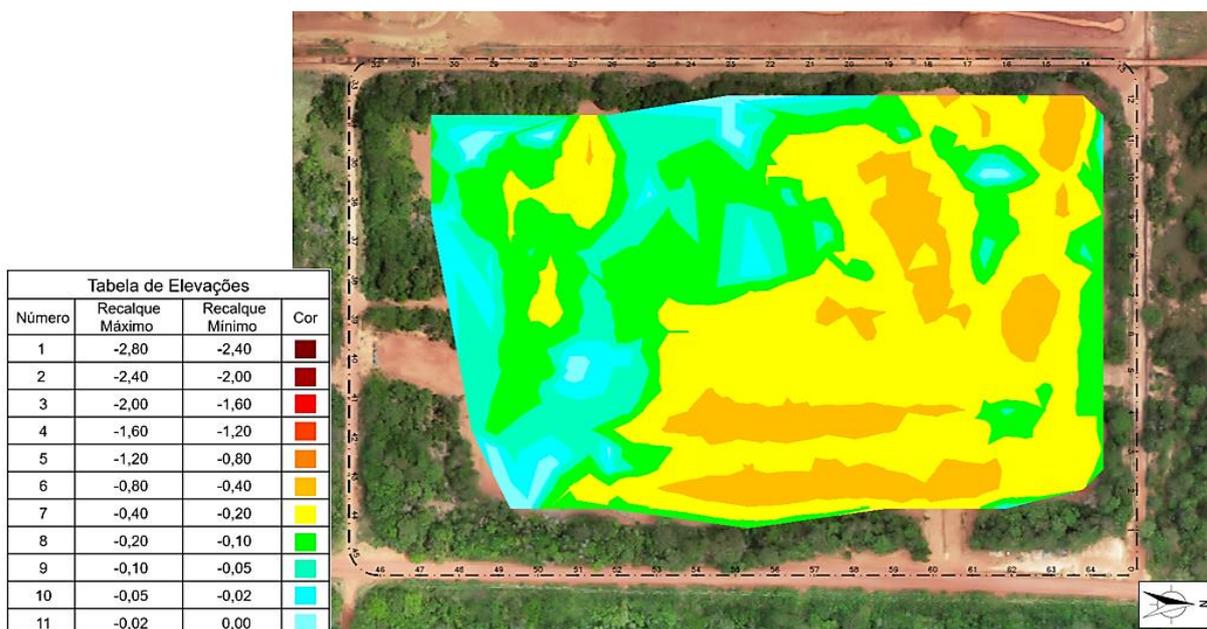
Figura 56 – Mapa hipsométrico  $M = 103,0 \text{ kPa}$

Neste caso, onde o módulo edométrico adotado foi de  $103,0 \text{ kPa}$ , a estimativa de recalque alcançou valores de até  $2,71 \text{ m}$ . As maiores magnitudes de abatimento estão dispostas na porção leste do reservatório coincidindo com a região do canal de drenagem, onde há maior acúmulo de água, apresentando coerência ao fato dos recalques serem diretamente relacionados com as tensões efetivas.

A faixa de recalque mais representativa do barramento como um todo se delimitou entre  $0,40 \text{ m}$  e  $1,60 \text{ m}$  em sua grande maioria.

### 6.1.5 Cenário 2 – Módulo edométrico médio

Considerando a representatividade de ambos os ensaios para regiões diversas dentro do reservatório, foi adotado um módulo edométrico médio para toda a camada, sendo  $M_2 = 407,7$  kPa. O mapa hipsométrico apresentado na Figura 57 remete às estimativas de recalque encontradas para o cenário 2.



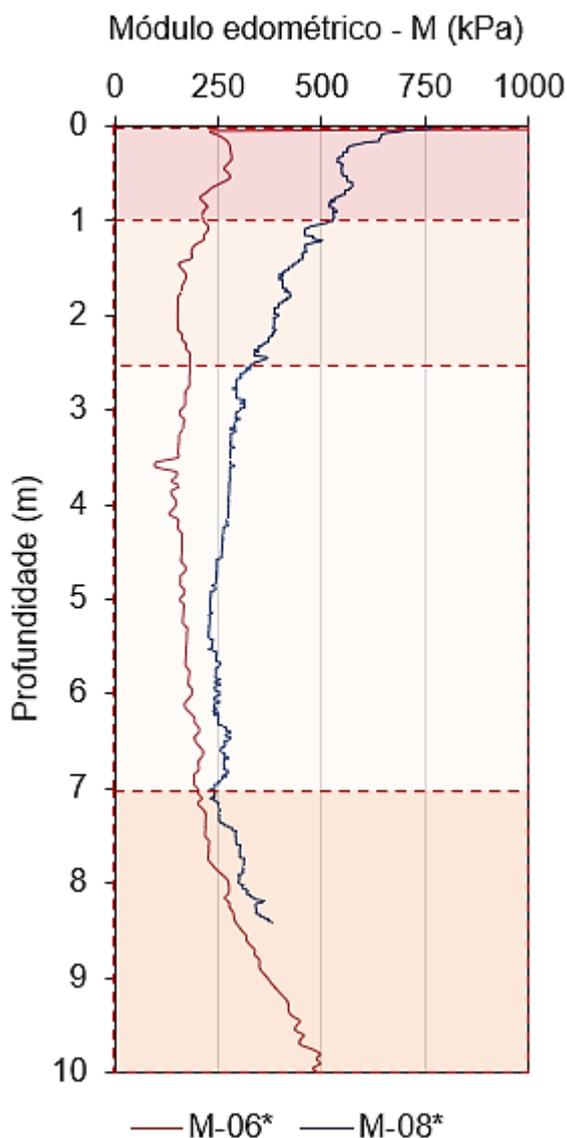
**Figura 57 – Mapa hipsométrico  $M = 407,7$  kPa**

Para o módulo edométrico de 407,7 kPa, a estimativa de recalque teve seus valores máximos reduzidos para 0,68 m e manteve predominantemente a faixa de recalque de 0,05 m a 0,40 m.

### 6.1.6 Cenário 3 – Módulo edométrico por camadas

A partir da interpretação dos ensaios CPTu é possível notar que ambos os ensaios apresentam comportamento semelhante ao longo da profundidade, isto é, quando um aumenta o valor de  $M$  o outro tende a aumentar também, o mesmo

acontece quando há redução do M. Nesse sentido, realizou-se a divisão das camadas de acordo com a profundidade e obteve-se o valor médio para cada uma delas, conforme Figura 58, onde M-08 e M-06 se referem ao Módulo Edométrico do CPTu-08 e CPTu-06, respectivamente.



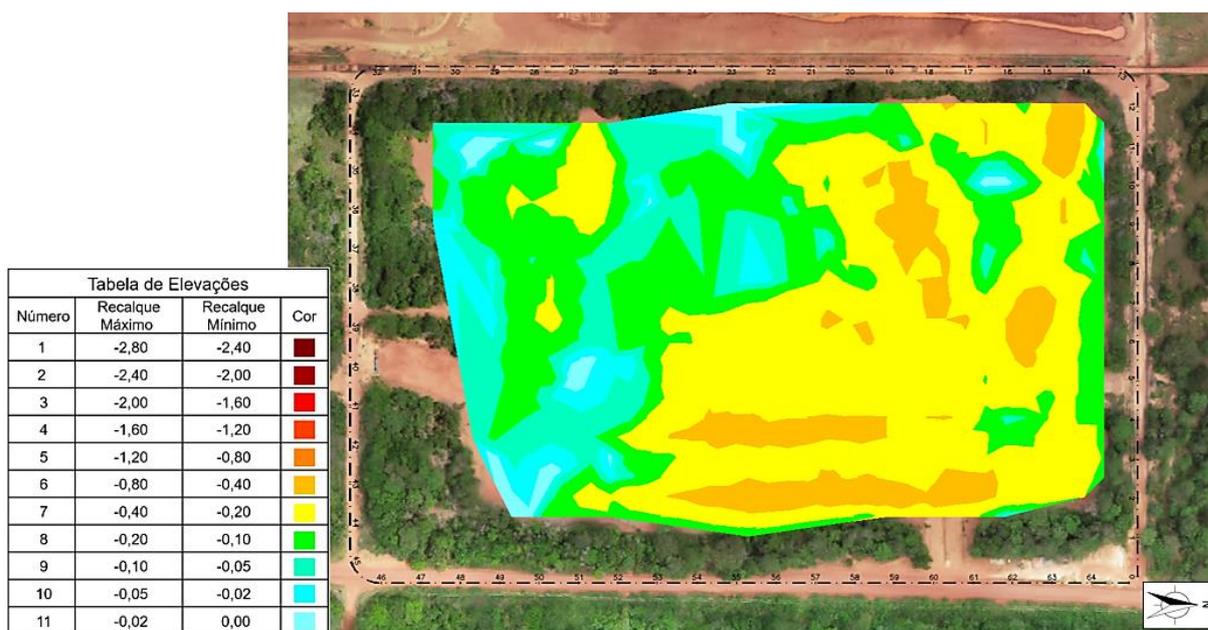
**Figura 58 – Classificação de camadas a partir do módulo edométrico**

A Tabela 15 apresenta os limites das camadas classificadas a partir do módulo edométrico representado na Figura 58.

**Tabela 15 – Limites das camadas a partir do módulo edométrico**

|           | Camada (h)         | CPTu-06 | CPTu-08 | $M_{médio}$ |
|-----------|--------------------|---------|---------|-------------|
| $M_{3.1}$ | $h < 1m$           | 2077,7  | 1141,0  | 1609,4      |
| $M_{3.2}$ | $1m < h < 2,5m$    | 210,9   | 426,8   | 318,8       |
| $M_{3.3}$ | $2,5m < h < 7,0m$  | 174,8   | 263,9   | 219,3       |
| $M_{3.4}$ | $7,0m < h < 10,0m$ | 314,2   | 297,4   | 305,8       |

A Figura 59 apresenta o mapa hipsométrico obtido a partir dos recalques estimados com o cenário respectivo à variação do M com a profundidade.



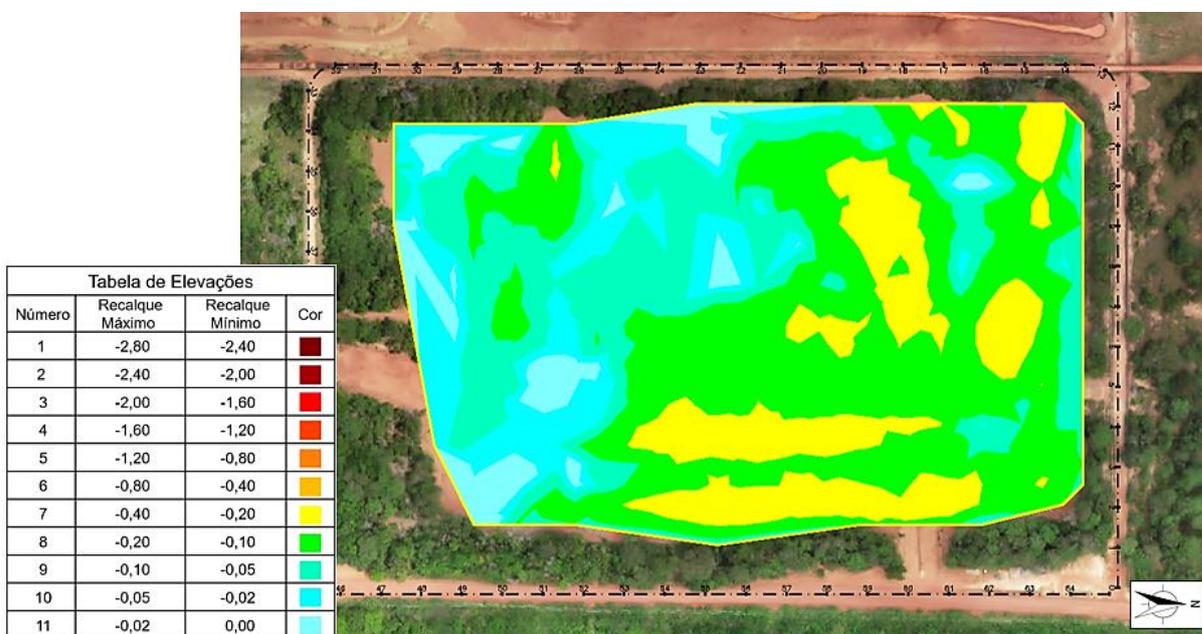
**Figura 59 – Mapa hipsométrico M por camadas**

Para o cenário em que o módulo edométrico adotado foi respectivamente proporcional a cada camada, a estimativa de recalque alcançou valores de até 0,68 m similarmente ao cenário anterior que considerou a média total. Embora o valor máximo tenha sido o mesmo, há uma diferença discreta entre os mapas.

O fato de os mapas hipsométricos serem substancialmente parecidos se deve à consideração de uma espessura única de rejeito de 10,0 m, isto é, para todos os pontos monitorados foram utilizados todos os módulos edométricos ( $M_{3,1}$  ao  $M_{3,4}$ ), o que faz com que o valor final seja muito próximo da média geral considerada no cenário 3.

#### 6.1.7 Cenário 4 – Módulo edométrico máximo

A fim de se obter uma análise de sensibilidade com os valores extremos do módulo edométrico e sua influência na estimativa de recalque foi estudado também o cenário com o maior valor de  $M$  encontrado entre os dois ensaios de piezocone, sendo  $M_{máximo} = 708,1$  kPa. Os resultados obtidos foram dispostos em mapa hipsométrico, conforme Figura 60.



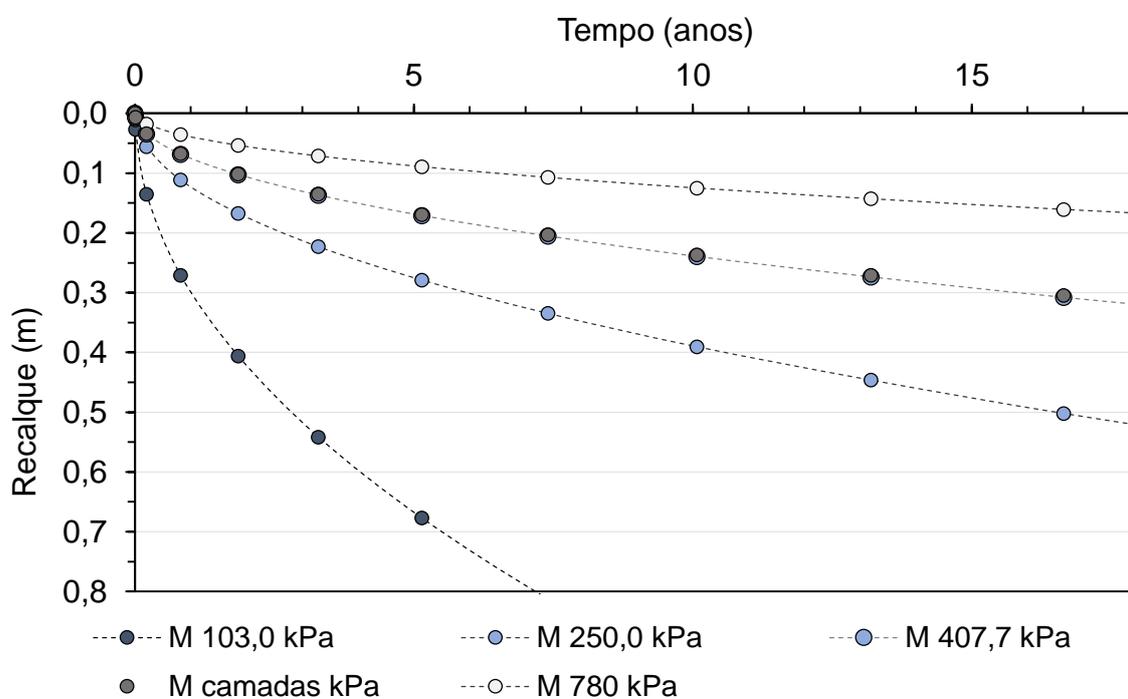
**Figura 60 – Mapa hipsométrico  $M = 708,1$  kPa**

Para o módulo edométrico máximo de 708,1 kPa, a estimativa de recalque teve seu valor máximo significativamente reduzido para 0,36 m e, majoritariamente, foi

mantida a faixa de 0 a 0,20 m de recalque no interior do reservatório. O resultado se faz coerente já que o módulo edométrico é diretamente relacionado à resistência de ponta e, considerando o rejeito um material homogêneo, o aumento da resistência de ponta pode significar que o trecho se encontra mais adensado.

### 6.1.8 Previsão do processo de adensamento

A partir da Equação 4 em conjunto com o coeficiente de adensamento vertical  $c_v = 3,7 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  encontrado através dos ensaios de dissipação do CPTu, foi possível obter as curvas do processo de adensamento para cada cenário, estas estão dispostas na Figura 61. Neste cenário, o tempo necessário para que se concretize 95% do processo de adensamento, obtido através das premissas dispostas ao longo do presente trabalho, corresponde ao período de 9,8 anos.



**Figura 61 – Curvas de adensamento para a camada compressível**

Complementarmente, tornou-se possível obter para cada cenário o tempo necessário para decorrer a maior leitura observada em campo (10 cm). Os resultados estão dispostos na Tabela 16.

**Tabela 16 – Previsão do tempo para ocorrência do maior recalque observado**

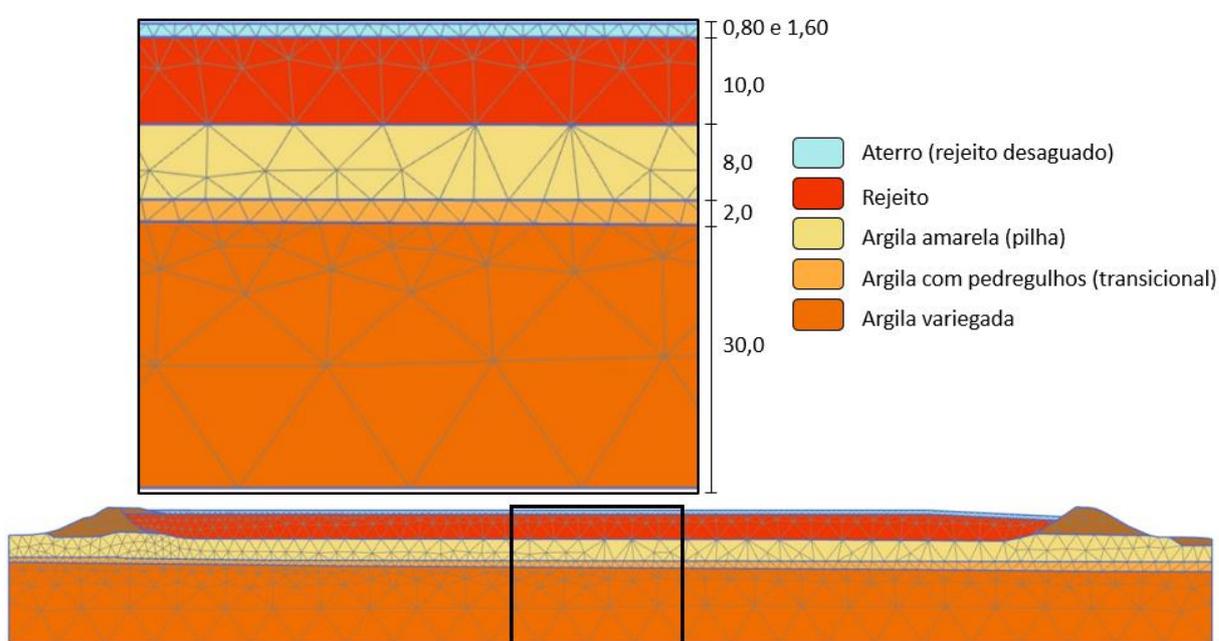
|   | Cenário   | Recalque total previsto (m) | U (%) correspondente a 0,10 m | Tempo (meses) |
|---|-----------|-----------------------------|-------------------------------|---------------|
| 1 | M mínimo  | 2,71                        | 3,7                           | 0,1           |
| 2 | M médio   | 0,68                        | 14,6                          | 1,9           |
| 3 | M camadas | 0,68                        | 14,8                          | 1,9           |
| 4 | M máximo  | 0,36                        | 28,0                          | 6,5           |
| 5 | M projeto | 1,12                        | 9,0                           | 0,7           |

Através da Tabela 16 é possível concluir que o cenário 4, correspondente à utilização do módulo edométrico máximo (780,1 kPa) para estimativa de recalque, apresentou o maior tempo para ocorrência do recalque medido com valor de 0,10 m. Este ocorreu em 194 dias no cenário mais moroso de uma única camada drenante.

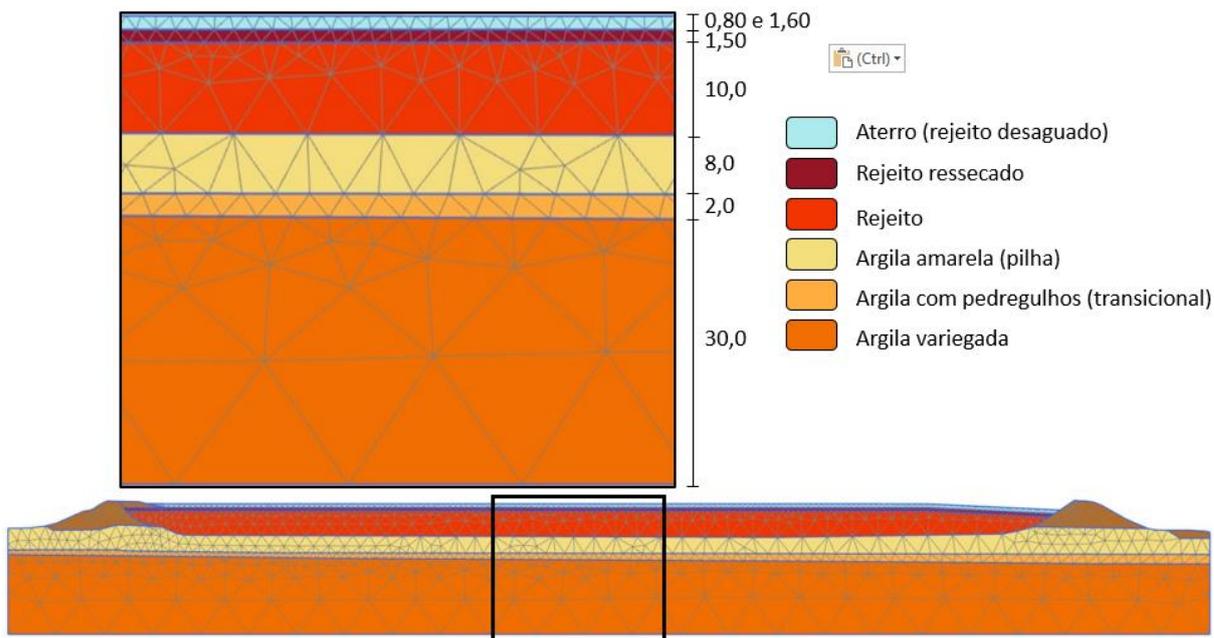
## 6.2 Modelagem numérica aplicada à estimativa de recalque

A modelagem numérica contemplou quatro cenários, sendo os primeiros referente à camada única de 10,0 metros com 1,6 e 0,8 metros de aterro de sobrecarga, como considerado no estudo teórico. O segundo cenário, foi proposto para efeito comparativo quanto à influência da crosta ressecada de rejeito também com 1,6 e 0,8 metros de aterro de sobrecarga. A camada de rejeito ressecado se forma a partir da exposição do material às intemperes, já a camada adicional de rejeito desaguado se refere ao aterro de conformação da superfície.

Ambos os cenários foram modelados com as mesmas condições de contorno e refinamento da malha. As condições de contorno adotadas consistiram em permitir o deslocamento vertical apenas nas laterais, a base foi restringida vertical e horizontalmente. As malhas de elementos finitos foram compostas por elementos triangulares de 15 nós, estas estão representadas na Figura 62 e na Figura 63, bem como a estratigrafia com alturas aproximadas já que estas são variáveis ao longo da seção.



**Figura 62 – Malha e estratigrafia para camada única de rejeito**



**Figura 63 – Malha e estratigrafia para camada de rejeito com crosta ressecada**

O processo do cálculo se deu a partir etapa de adensamento imediatamente após a construção do aterro, exatamente como se procedeu a obra, tendo sido considerado apenas um dia como o tempo de construção do aterro de forma a representar os deslocamentos medidos.

A simulação foi realizada pelo programa PLAXIS 2D a partir da opção *Consolidation* para diversos períodos de tempo, incluindo o período de monitoramento (18 meses) até o estágio de recalque final. Não foi considerado o recalque secundário no presente estudo.

### 6.2.1 Parâmetros e índices físicos adotados

Para efetivar a modelagem foi necessária a definição dos parâmetros de entrada dos materiais aderentes ao modelo constitutivo *Mohr-Coulomb*, sendo  $\phi'$ ,  $c'$ ,  $E$ ,  $k_x$ ,  $k_y$ ,  $\gamma_{sat}$ ,  $\gamma_d$ ,  $K_0$  e  $\nu$ , além dos parâmetros do rejeito aderentes ao modelo *Soft Soil*, sendo  $\phi'$ ,  $c'$ ,  $C_c$ ,  $k_x$ ,  $k_y$ ,  $\gamma_{sat}$ ,  $\gamma_d$ ,  $e_0$  e  $\nu$ . Como a análise não tratará nenhuma recompressão, não foi validado um valor para o índice de recompressão  $C_r$ .

Precedente à determinação dos parâmetros do rejeito foi analisado o teor de sólidos e de umidade do horizonte de rejeito disposto no reservatório SP-4 Norte, onde foi obtido um valor médio de vazios por camada, conforme Tabela 11.

Devido à falta de informações quanto à espessura do rejeito em cada ponto, foi considerada uma camada média de 10,0 metros de altura uniforme em toda a seção analisada, logo não foi utilizado o índice de vazios encontrado para a primeira camada de 0,0 a 1,5 m de profundidade, restando exatamente os 10,0 m analisados. Foi então adotado o valor médio para toda a camada, sendo este igual a 1,73.

A definição dos parâmetros de resistência do rejeito ( $\phi'$  e  $c'$ ) decorreu do ensaio triaxial adensado não drenado (CIU) realizado em uma amostra com teor de sólidos de 64%. Como resultado foi obtido o ângulo de atrito de  $22^\circ$  e uma coesão de 14 kPa, conforme Figura 34.

O peso específico foi adotado como constante e igual a  $14,0 \text{ kN/m}^3$  conforme valores médios encontrados nos ensaios de piezocone.

A determinação do índice de compressão  $C_c$  se deu através da correlação proposta por Robertson (2015) conforme Equação 22 para os diferentes módulos edométricos (M) sendo sequenciada da validação do índice por meio de ensaios de adensamento induzido por força de percolação (HCT).

A partir da comparação entre os índices de compressão advindos dos 5 ensaios HCT com os 4 cenários de módulo edométrico do piezocone, foi verificada maior proximidade com os valores obtidos para o módulo edométrico máximo, conforme Tabela 17.

**Tabela 17 – Índices de compressão segundo ensaios HCT**

| HCT                     | $C_{c,\text{mín}}$ | $C_{c,\text{máx}}$ |
|-------------------------|--------------------|--------------------|
| HCT                     | 0,29               | 0,46               |
| CPTu - $M_{\text{máx}}$ | 0,39               | 0,45               |

Embora haja variação do índice de compressão de acordo com a profundidade, foi adotado o valor médio advindo dos resultados de HCT, sendo  $C_c$  igual a 0,40. Para

a obtenção do índice por camadas seria necessário utilizar a correlação de Robertson da qual depende da escolha de um módulo edométrico, então, para que a análise numérica não fosse influenciada, definiu-se por assim seguir.

Os ensaios HCT também permitiram a obtenção da permeabilidade vertical  $k_y$ , esta se limitou ao intervalo de  $5,23 \times 10^{-5}$  m/dia a  $1,58 \times 10^{-4}$  m/dia e valor médio de  $3,21 \times 10^{-4}$  m/dia. Adotou-se o valor médio para a análise e a permeabilidade horizontal foi considerada como 1,2 vezes maior do que a vertical, sendo  $k_x$  igual a  $3,86 \times 10^{-4}$  m/dia.

O coeficiente de empuxo no repouso  $k_0$  foi estimado através da Equação 23 proposta por Kulhawy e Mayne (1990) apud Robertson (2015) considerando o rejeito disposto normalmente adensado, obtendo-se OCR igual a 1,0.

$$k_0 = (1 - \text{sen}\phi')(\text{OCR})^{\text{sen}\phi'} \quad (23)$$

Para a camada ressecada, foram consideradas condições que garantissem a baixa permeabilidade, como a redução brusca do índice de vazios e redução da permeabilidade em 10 vezes. Os dados de entrada adotados para a camada compressível de rejeito estão dispostos na Tabela 18.

**Tabela 18 – Parâmetros e índices físicos do rejeito**

| Parâmetros e índices físicos               | Rejeito             |                  |
|--|---------------------|------------------|
|  | Camada compressível | Camada ressecada |
| $e_0$                                      | 1,73                | 0,50             |
| $C_c$                                      | 0,40                | 0,40             |
| $c'$ (kPa)                                 | 14                  | 14               |
| $\phi'$ (°)                                | 22                  | 22               |
| $\gamma_{\text{sat}}$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 14,0                | 17,0             |
| $v'$                                       | 0,49                | 0,49             |
| $k_0$                                      | 1,01                | 1,01             |

| Parâmetros e índices físicos | Rejeito               |                       |
|------------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                              | Camada compressível   | Camada ressecada      |
| $k_y$ (m/dia)                | $3,21 \times 10^{-4}$ | $3,21 \times 10^{-5}$ |
| $k_x$ (m/dia)                | $3,86 \times 10^{-4}$ | $3,86 \times 10^{-5}$ |

Os parâmetros e índices físicos utilizados para os demais materiais, exceto a argila transicional, foram baseados em resultados de campanhas de laboratório exploratórias na MRN. Para a camada de argila transicional foram arbitrados valores intermediários referente à transição da pilha para a argila variegada, para garantir a condição efetiva de drenagem vista em ensaios de campo, adotou-se uma permeabilidade de 0,1 m/dia para garantir a drenagem.

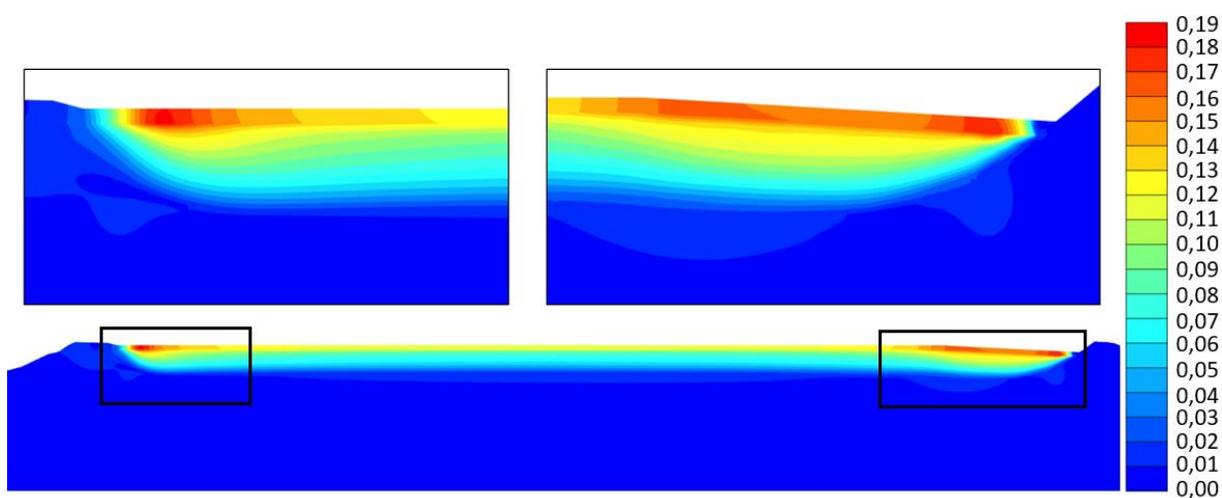
Os dados de entrada adotados para o aterro compactado, argila amarela (pilha), argila variegada e material transicional estão dispostos na Tabela 19.

**Tabela 19 – Parâmetros e índices físicos dos materiais drenados**

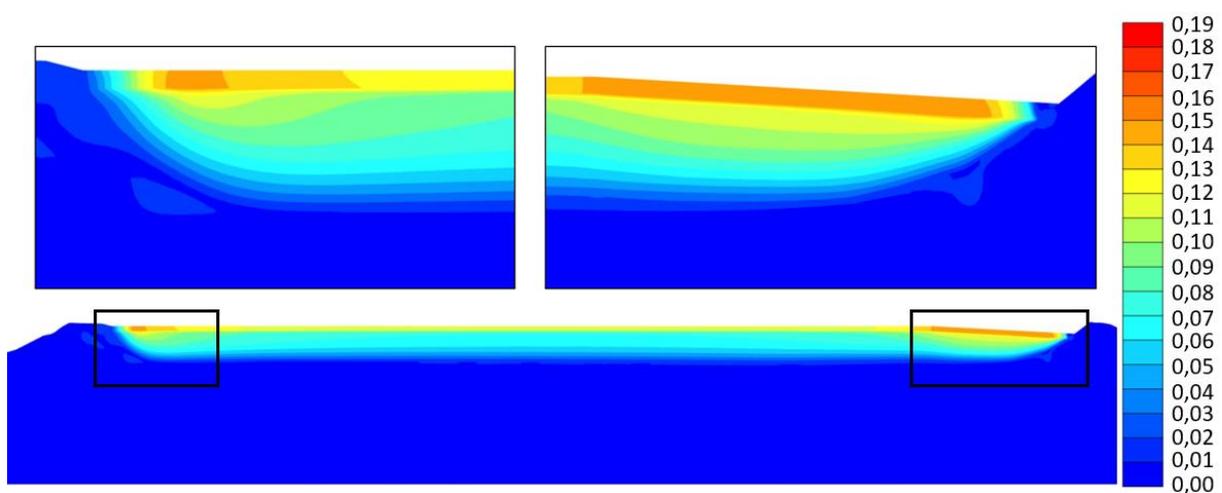
| Parâmetros e índices físicos        | Aterro compactado     | Argila amarela (pilha) | Argila variegada      | Material Transicional |
|-------------------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| $E'$ (kPa)                          | 11.000                | 9.000                  | 18.000                | 15.000                |
| $\nu'$                              | 0,42                  | 0,35                   | 0,40                  | 0,40                  |
| $c'$ (kPa)                          | 20                    | 10                     | 22                    | 21                    |
| $\phi'$ (°)                         | 34                    | 29                     | 27                    | 28                    |
| $\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 18,3                  | 18,2                   | 18,7                  | 18,4                  |
| $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )     | 13,2                  | 13,1                   | 13,9                  | 13,5                  |
| OCR                                 | 1                     | 1                      | 2,5                   | 1                     |
| $k_0$                               | 0,47                  | 1,66                   | 0,10                  | 0,73                  |
| $k_y$ (m/dia)                       | $4,32 \times 10^{-3}$ | $4,32 \times 10^{-3}$  | $3,46 \times 10^{-3}$ | 0,1                   |
| $k_x$ (m/dia)                       | $5,62 \times 10^{-3}$ | $8,64 \times 10^{-3}$  | $4,49 \times 10^{-3}$ | 0,1                   |

### 6.2.2 Análise e discussão dos resultados

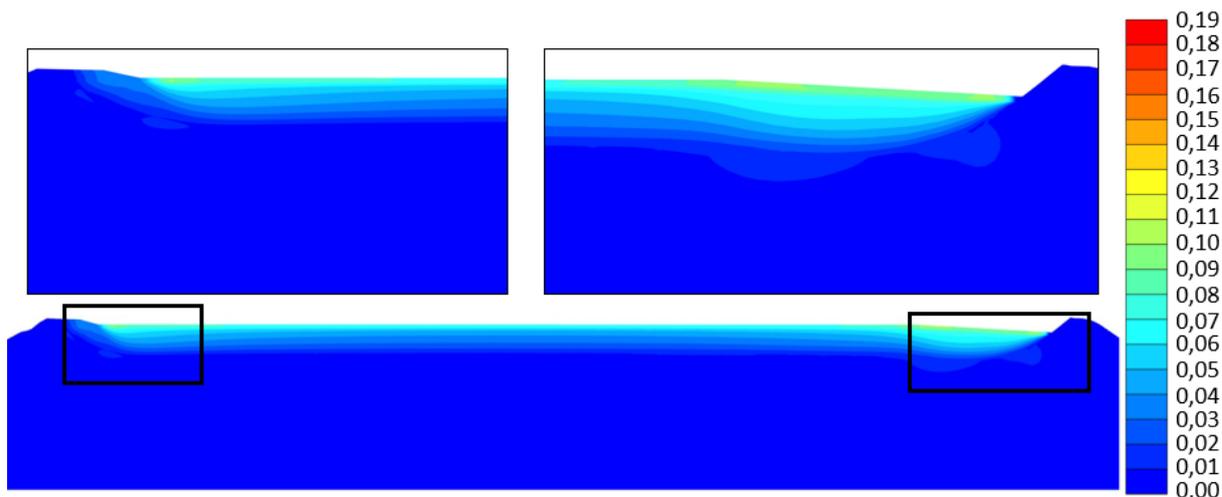
Os deslocamentos verificados para os 18 meses considerando apenas a camada única de rejeito estão dispostos na Figura 64 e Figura 66, enquanto os deslocamentos verificados para a camada de rejeito com crosta ressecada estão expostos na Figura 65 e Figura 67.



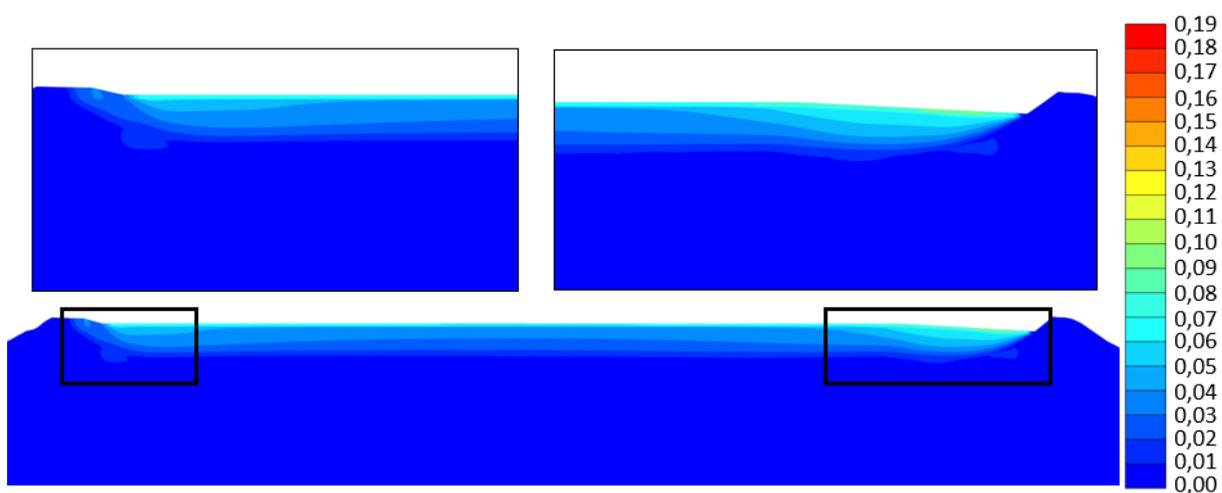
**Figura 64 – Deslocamentos para camada única de rejeito para aterro de 1,6 m**



**Figura 65 – Deslocamentos da camada de rejeito com crosta para aterro de 1,6 m**



**Figura 66 – Deslocamentos para camada única de rejeito para aterro de 0,8 m**

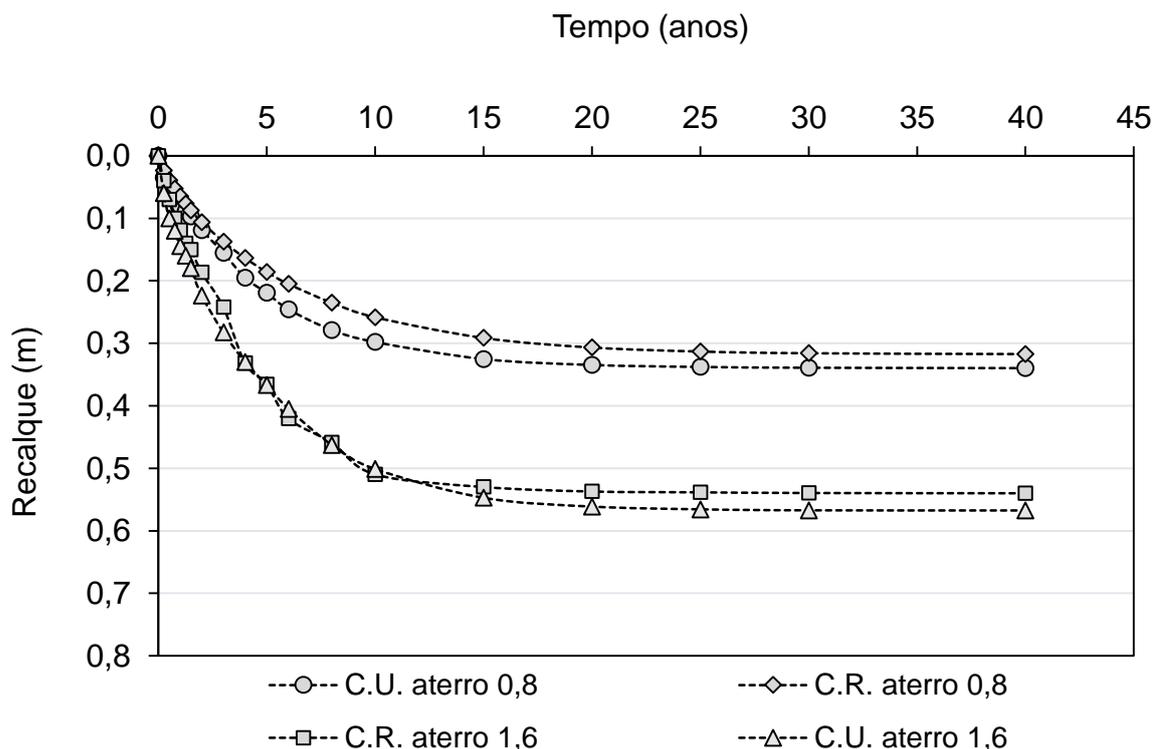


**Figura 67 – Deslocamentos da camada de rejeito com crosta para aterro de 0,8 m**

A modelagem indicou, para a sobrecarga em aterro de 1,6 m, que o processo de adensamento ao longo dos 18 meses geraria recalques de até 0,18 m no rejeito e esta reduziria para 0,15 m se considerada a crosta ressecada.

Para a contribuição do aterro com altura média de 0,8 m, as modelagens apresentaram recalques de 0,10 e 0,09 considerando a camada de rejeito homogênea e com crosta, respectivamente.

A Figura 68 apresenta a evolução do recalque ao longo do tempo para os quatro cenários numéricos.



**Figura 68 – Evolução Recalque x Tempo em função da construção do aterro – cenários numéricos**

Os resultados mostrados na Figura 68 indicam um comportamento similar quando considerada a camada ressecada ou sem esta, variando notoriamente a magnitude, sendo um pouco menor quando com a crosta ressecada.

Considerando que os recalques finalizam quando atingem 95% do processo de adensamento, em simulações de longos períodos foi possível constatar que, com uma camada uniforme de aterro de 1,6 m, estes cessam após aproximadamente 10 anos apresentando magnitudes de até 0,50 m sem influência da crosta. Caso a crosta corresponda às premissas modeladas, o processo se prolonga por 15 anos e atinge até 0,54 m.

Para as modelagens que consideraram o aterro médio de 0,8 m, os recalques chegam a 0,32 m e 0,30 m, sendo o maior referente à simulação com apenas a camada homogênea de rejeito de bauxita. Em ambos os cenários a tempo necessário para dissipação de 95% das poropressões foi de 15 anos.

### 6.3 Resultados e discussões

A estimativa teórica do processo de adensamento primeiramente tomou como base as premissas utilizadas no projeto do SP-4 Leste, utilizando o módulo edométrico de 250 kPa, este retornou que os abatimentos poderiam chegar a 1,12 metros. Para refinamento das condicionantes, foram estudadas variações do módulo edométrico a fim de aferir o que seria mais representativo das condições de campo. A variação do módulo edométrico obtido através dos ensaios de piezocone, apresentaram recalques máximos de 0,36 metros até 2,71 metros de acordo com cada cenário.

A partir do coeficiente de adensamento vertical encontrado através dos ensaios de dissipação do CPTu, foi possível obter as curvas do processo de adensamento para cada cenário. Foi constatado que tempo necessário para que se concretize 95% do processo de adensamento corresponde ao período de 9,8 anos, conforme a Teoria Clássica do Adensamento.

O cenário que considerou o módulo edométrico máximo, retornou um período de 6,5 meses para ocorrência de 0,10 metros de recalque, todavia, as leituras topográficas indicaram que tal abatimento somente ocorreu após 18 meses de monitoramento. Isto é, mesmo para o cenário mais longo os resultados obtidos a partir da utilização das correlações de CPTu indicaram um processo de adensamento mais rápido que a condição real obtida em campo. Dessa forma não foi necessário realizar a análise de sensibilidade para os valores menores de coeficientes de adensamento vertical encontrados a partir dos ensaios de dissipação.

A determinação do índice de compressão, necessário para a modelagem numérica, se deu através de resultados de ensaios de adensamento induzido por força de percolação. As resultantes foram contrapostas com os índices encontrados a partir de correlação de ensaios CPTu, onde se constatou uma proximidade com os valores encontrados para módulo edométrico máximo ( $M = 780,1$  kPa).

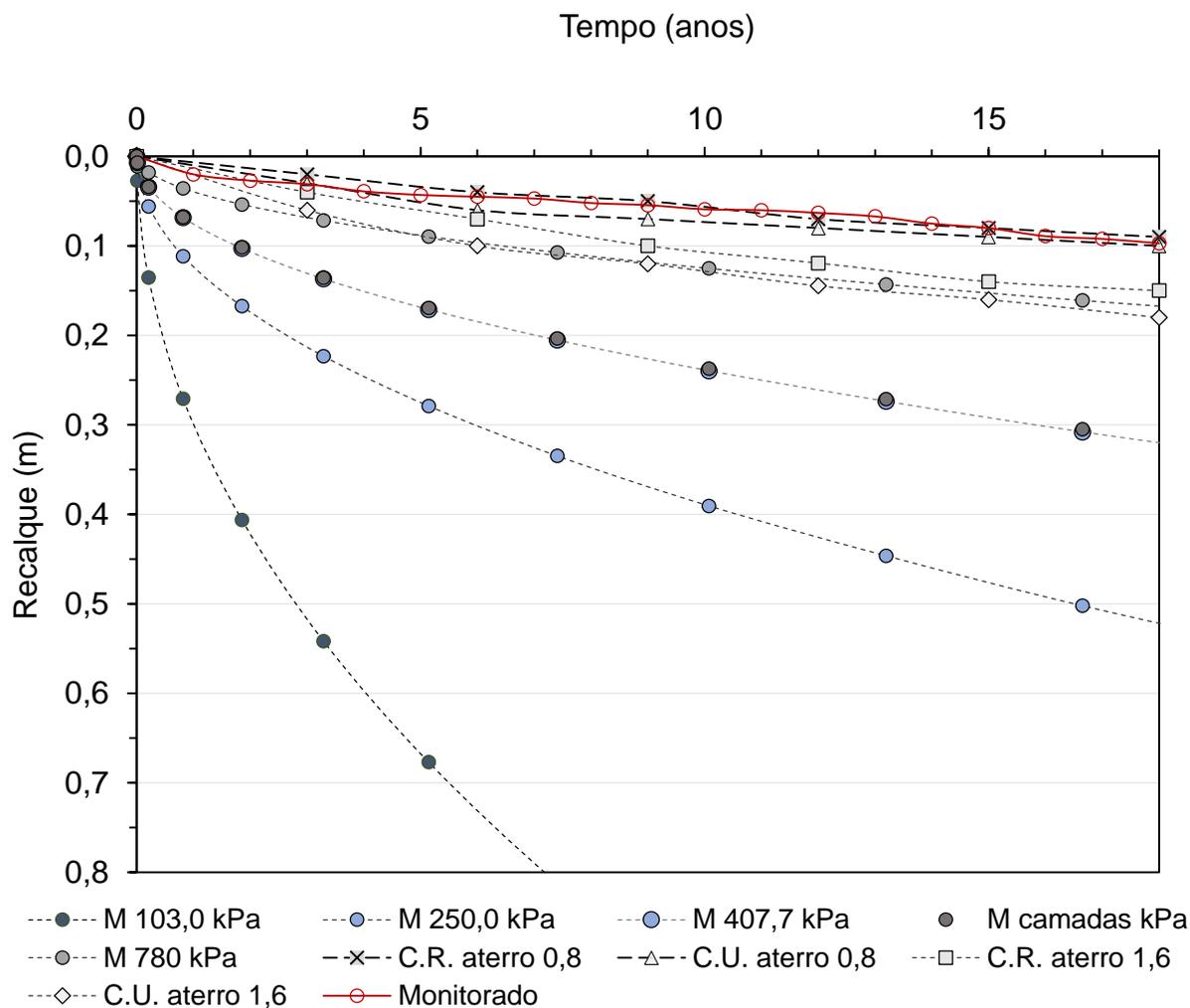
Para a camada compressível de rejeito, foi considerada a condição de apenas uma camada drenante. A consideração se deve à existência da camada de rejeito ressecado que já existia e também ao acréscimo da camada adicional de rejeito desaguado compactado.

A modelagem numérica da seção longitudinal do SP-4 Leste, realizada no programa PLAXIS 2D, indicou que o processo de adensamento ao longo dos 18

meses gera recalques de até 0,18 m no rejeito quando considerada camada única com espessura de 10 metros, este reduz para 0,15 m se considerada a crosta ressecada com aterro de 1,6 metros. Quando é considerado o aterro médio de 0,8 metros, os recalques simulados chegam a 0,10 e 0,09 para os cenários sem crosta ressecada e com crosta, respectivamente.

Os resultados apresentados para ambos cenários indicaram um comportamento similar variando apenas a magnitude, sendo este menor quando considerada a crosta ressecada. Embora os valores sejam muito próximos, considerando escala centimétrica, finalizam após aproximadamente 10 anos sem influência da crosta e 15 anos com a camada ressecada. A diferença foi de 8%, sendo os recalques de até 0,50 m e 0,54 m, respectivamente.

Dessa forma, foi possível obter o comparativo Recalque x Tempo para todos os cenários correspondentes ao período de 18 meses em que ocorreu o monitoramento topográfico, conforme apresentado na Figura 69 em que C.U. se refere à camada única de rejeito e C.R. se refere à consideração da crosta ressecada.



**Figura 69 – Comparativo Recalque x Tempo para os cenários teóricos e numéricos**

A partir dos resultados apresentados pelas curvas Recalque x Tempo, constata-se que os valores obtidos através da estimativa teórica do módulo edométrico máximo e das modelagens numéricas realizadas com o índice de compressão advindo dos ensaios HCT, se mostraram próximos quando comparados aos valores medidos em campo.

Embora a estimativa com o módulo edométrico máximo tenha indicado valores mais próximos dos reais que os demais módulos, sabe-se que este não é representativo da camada compressível como um todo, e sim de pequena parcela mais adensada como relatam os ensaios de piezocone. Além disso, o mesmo apresenta diferença de 48% a 68% quando contrapostos com os recalques monitorados topograficamente.

Os parâmetros de entrada das modelagens numéricas são mais coerentes e representativos da camada de rejeito como um todo. O fato se confirma através do perfil de teor de sólidos traçado no SP-4 Leste que coincide com os teores dos ensaios HCT e se reforça com o comparativo entre o índice de compressão dos ensaios de adensamento induzido por força de percolação e pelo piezocone.

A modelagem numérica que não considerou a crosta ressecada apresentou diferenças de 40% a 54% quando os valores de abatimento são comparados aos monitorados. Enquanto a modelagem que considerou a crosta de rejeito ressecado sobre a camada compressível de 10,0 metros e indicou recalque máximo de 15 cm após 18 meses, reduziu a diferença para a faixa de 10% a 45% de erro.

Vale ressaltar que apesar da diferença de até 54% quanto aos 10 cm medidos topograficamente, a espessura da camada não é uniforme, ou seja o ponto que recebeu maior altura de aterro pode não ter a altura total analisada, o que reduziria tal valor. Além disso, foi considerada uma camada uniforme de 1,60 metros, respectiva a maior altura de aterro, o que pode ter influenciado no aumento do abatimento.

Nesse sentido, a modelagem com altura média de aterro igual a 0,80 metros indica maior representatividade indicando diferença de 4% a 21% para camada única de rejeito e de 0% a 44% quando considerada a crosta ressecada de rejeito acima da camada homogênea. A diferença de 44% se dá na primeira leitura, nas demais o valor é reduzido significativamente e a hipótese com crosta ressecada é consideravelmente mais aderente aos recalques reais monitorados.

## 7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Este capítulo apresenta os resultados dos tópicos pautados no capítulo 3 a respeito da metodologia construtiva utilizada, do monitoramento ambiental e geotécnico durante o período que precedeu o presente trabalho e das investigações de campo e laboratório. Além de estudar o adensamento na camada de rejeito de bauxita no reservatório SP-4 Leste por método teórico e numérico, apreciar os resultados obtidos e compará-los aos resultados monitorados em campo.

### 7.1.1 Metodologia construtiva e monitoramentos

O aterro de conformação da superfície do SP-4 Leste foi construído em rejeito de bauxita desaguado. Para a compactação foi utilizado trator de esteiras e rolo compactador, o material apresentou melhor qualidade com a utilização do equipamento rolo compactador, já que com o trator de esteiras apresentou deslocamento da superfície.

O monitoramento da turbidez do excedente hídrico no desemboque do extravasor apresentou redução quando se iniciou o período chuvoso e foram implantadas as barreiras vegetais. Como a implantação destas ocorreu logo após o início do período chuvoso, não é possível afirmar que as barreiras por si só são as responsáveis pelo decréscimo nos índices de turbidez. Devido as duas variáveis ocorrerem simultaneamente, se torna necessário observar, ao menos, mais ciclo hidrológico completo.

A piezometria instalada no interior do reservatório indica que a camada de rejeito impede o fluxo da água das chuvas para a fundação. O fato foi observado tanto no piezômetro instalado na fundação quanto no instrumento no meio da camada compressível que também não sofre influência instantânea da pluviometria.

O monitoramento topográfico dos recalques no interior do SP-4 Leste indicaram que o maior abatimento foi de 0,10 m após 18 meses. Embora o monitoramento tenha sido encerrado, este não constata a finalização do processo de adensamento, mas sim que os valores medidos eram pequenos e pontuais. Dessa forma, para aspectos relacionados à estabilidade, a condição se mostrou satisfatória e facilmente ajustável

com pequenas regularizações de terraplenagem para garantir o direcionamento efetivo da drenagem. Porém, em aspectos de pesquisa, há uma parcela de adensamento que não foi monitorada.

### 7.1.2 Processo de adensamento – estimativa teórica e numérica

A estimativa teórica do processo de adensamento primeiramente tomou como base as premissas utilizadas no projeto do SP-4 Leste, utilizando o módulo edométrico de 250 kPa, este retornou que os abatimentos poderiam chegar a 1,12 metros. Para refinamento das condicionantes, foram estudadas variações do módulo edométrico a fim de aferir o que seria mais representativo das condições de campo. A variação do módulo edométrico obtido através dos ensaios de piezocone, apresentaram recalques máximos de 0,36 metros até 2,71 metros de acordo com cada cenário.

A previsão do tempo necessário para finalização do processo de adensamento na camada de rejeito foi realizada a partir do coeficiente de adensamento vertical encontrado através dos ensaios de dissipação do CPTu. A partir deste, foi constatado que tempo necessário para que se concretize 95% do processo de adensamento corresponde ao período de 9,8 anos, conforme a Teoria Clássica do Adensamento.

Para efeito comparativo foi calculado o tempo respectivo para cada cenário atingir os 10 cm que foram monitorados em campo após 18 meses. Todavia, nenhum dos cenários se mostrou representativo, mesmo o que apresentou maior tempo para a ocorrência de 0,10 m alcançou tal magnitude em menos de 7 meses.

As modelagens numéricas tiveram o índice de compressão da camada de rejeito obtido a partir de ensaios de adensamento induzido por força de percolação como um dos principais dados de entrada. Estes foram contrapostos com os índices encontrados a partir de correlações de ensaios CPTu, onde foi constatada uma proximidade com os valores encontrados a partir do módulo edométrico máximo.

As modelagens, realizadas no programa PLAXIS 2D, tiveram como base uma seção longitudinal do SP-4 Leste para 4 cenários, sendo: 1- aterro de conformação de 1,60 m e camada única de rejeito; 2- aterro de conformação de 1,60 m e camada de rejeito com crosta ressecada; 3- aterro de conformação de 0,80 m e camada única de rejeito; 4- aterro de conformação de 0,80 m e camada de rejeito com crosta ressecada.

O primeiro cenário indicou recalques de até 0,18 m ao longo dos 18 meses, este reduz para 0,15 m se considerada a crosta ressecada. Com a consideração do aterro médio de 0,8 metros, os recalques simulados chegam a 0,10 quando a camada de rejeito é única e homogênea e 0,09 quando inserida a crosta ressecada.

Como resultado final da pesquisa foi possível obter o comparativo Recalque x Tempo para todos os cenários correspondentes ao período de 18 meses em que ocorreu o monitoramento topográfico. A partir dos resultados dispostos graficamente no capítulo anterior, constata-se que os valores obtidos através da estimativa teórica do módulo edométrico máximo e das modelagens numéricas realizadas com o índice de compressão advindo dos ensaios HCT, se mostraram próximos quando comparados aos valores medidos em campo.

Embora a estimativa com o módulo edométrico máximo tenha indicado valores mais próximos dos reais que os demais módulos, o mesmo apresenta diferença de até 68% quando contrapostos com os recalques monitorados topograficamente.

Vale ressaltar que a espessura da camada não é uniforme, ou seja o ponto que recebeu maior altura de aterro pode não ter a altura total analisada. Além disso, foi considerada uma camada uniforme de 1,60 metros, respectiva a maior altura de aterro, o que pode ter influenciado no aumento do abatimento. Nesse sentido, a modelagem com altura média de aterro igual a 0,80 metros indica maior representatividade. Esta também aponta a menor diferença entre o monitoramento de campo e todos os cenários analisados, sendo a diferença de 3% a 18% para camada única de rejeito e de 1% a 53% quando considerada a crosta ressecada de rejeito acima da camada homogênea.

A partir da análise de todos os cenários, os melhores ajustes foram aderentes à modelagem numérica que considerou a altura média de aterro de 0,80 metros, realizada a partir do índice de compressão igual a 0,40 e apresentou resultados substancialmente próximos aos que foram monitorados topograficamente ao longo dos 18 meses. Estas apresentaram diferença de 4% a 21% quando considerada camada única de rejeito e de 0% a 44% quando considerada a crosta ressecada.

Embora a consideração da crosta tenha apresentado um limite superior mais alto que a camada única, este se deu apenas nas leituras iniciais, após o sexto mês a diferença se reduz significativamente e a hipótese é consideravelmente aderente aos recalques reais monitorados.

Dessa forma, o índice de compressão obtido a partir do ensaio de adensamento induzido por força de percolação se mostrou fortemente representativo para estudo do comportamento do rejeito quando aplicado à modelagem no programa PLAXIS.

Embora os tempos para dissipação de 95% das poropressões neste cenário seja de 15 anos alcançando aproximadamente 30 cm de recalque, pode-se notar que após 3 anos, esta reduz em 50%. Nesse sentido, cabe o julgamento de quantos centímetros são suficientes para gerar um acúmulo de água que prejudique o crescimento da vegetação caso a caso, isto é, determinar uma tolerância média que ao ser atingida permita o início da semeadura no reservatório.

### 7.1.3 Propostas para trabalhos futuros

Como sugestão para pesquisas futuras destacam-se:

- Aplicar as simulações teóricas e numéricas a outros reservatórios de rejeito de bauxita para validá-las com mais solidez, podendo refinar os parâmetros do rejeito de acordo com a profundidade;
- Propor correlação a partir dos ensaios CPTu que representem o cenário real com o objetivo de criar um modelo mais expedito em comparação à modelagem numérica;
- Aprofundar os estudos sobre a utilização do rejeito de bauxita desaguado como material de construção visando ganhar espaço nos reservatórios em substituição à construção de novos.

## REFERÊNCIAS

1. ALMEIDA, M. S. S. e MARQUES, M. E. S. **Aterros sobre Solos Moles: Projeto e Desempenho**. São Paulo: Oficina de Textos. 256 p. 2014.
2. RESOLUÇÃO ANM N°95, 2022. **RESOLUÇÃO ANM N° 95, DE 07 DE FEVEREIRO DE 2022**. Agência Nacional de Mineração (ANM). Brasília, 2022.  
  
RESOLUÇÃO ANM N°130, 2023. **RESOLUÇÃO ANM N° 130, DE 24 DE FEVEREIRO DE 2023**. Agência Nacional de Mineração (ANM). Brasília, 2023.
3. BENTLEY. **PLAXIS 2D-Reference Manual**. CONNECT Edition V20.02. 2020.
4. BENTLEY. **User's Manual of PLAXIS**. 2014.
5. FERNANDES, R. F. **Panorama Geotécnico das Rupturas de Barragens e gestão de risco**. Curitiba: Appris. 405 p. 2020.
6. FERNANDES, R. B. **Metodologia para gestão de risco em barragens a partir de árvore de eventos e análise FMEA**. 241p. Tese de doutorado em Geotecnia – UERJ, Rio de Janeiro, 2020..
7. BRANDI, J. L. G. **Previsibilidade e Controle de Recalques em Radiers sobre Solo Mole., dissertação de mestrado**, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2004.
8. BOTELHO, A. P. D. **Implementação de Metodologias de Ensaio para Determinação de Relações Constitutivas de Processos de Fluxo em Solos com a Utilização da Bomba de Fluxo**. Dissertação de mestrado, UFOP, Ouro Preto. 2001.
9. BHP (2017). Closure Plan Mining Area C\_Rev 3.1 October 2017. Disponível em: [BHP Billiton Iron Ore Sustaining Tonnes – EIA Style Guide \(epa.wa.gov.au\)](http://epa.wa.gov.au). (acesso: 21 de jan. de 2023). 2017.
10. CONAMA n°357, 2005. **RESOLUÇÃO CONAMA N° 357, DE 17 DE MARÇO DE 2005**. Conselho Nacional Do Meio Ambiente (CONAMA). Brasília, 2005.
11. CONAMA n°454, 2012. **RESOLUÇÃO CONAMA N° 454, DE 17 DE MARÇO DE 2005**. Conselho Nacional Do Meio Ambiente (CONAMA). Brasília, 2012.
12. CONAMA n°491, 2018. **RESOLUÇÃO CONAMA N° 491, DE 17 DE MARÇO DE 2018**. Conselho Nacional Do Meio Ambiente (CONAMA). Brasília, 2018.
13. COUTINHO, R. Q. OLIVEIRA, J. T. R. e OLIVEIRA, A. T. J., **Estudo quantitativo da qualidade de amostra de argilas moles brasileiras - Recife e Rio de Janeiro**, XI COBRAMSEG – Vol. 2, p. 927-936-Brasília – DF, 1998.

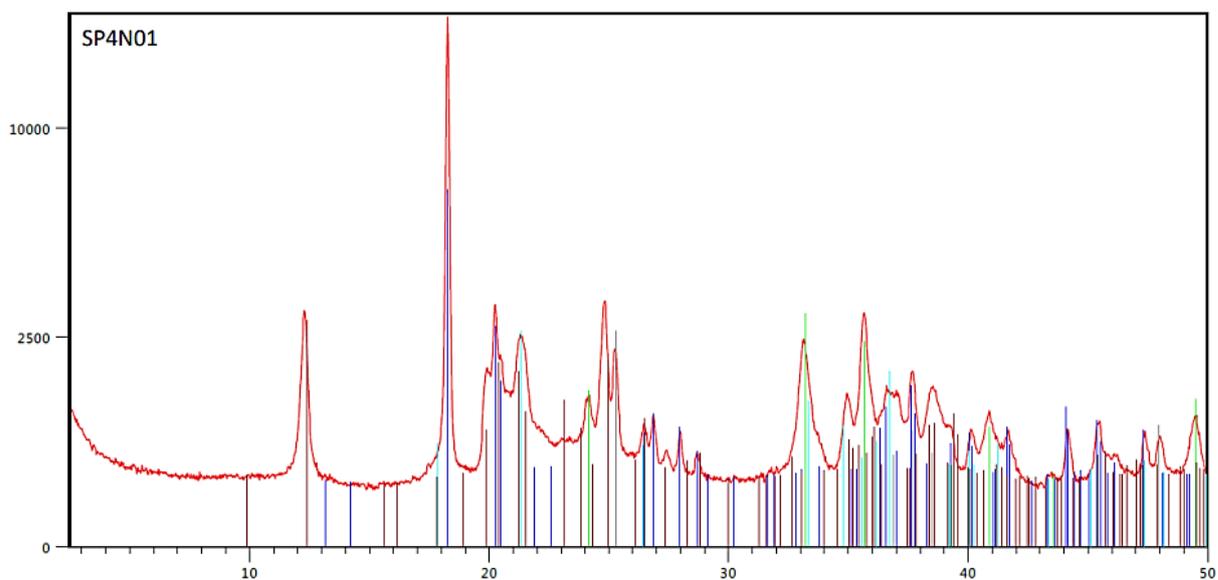
14. DAS, B. e SOBHAN, K. **Fundamentos De Engenharia Geotécnica**. Cengage, 630 p. 2014.
15. ESPINDOLA, M. S. **Análise dos parâmetros geotécnicos dos solos moles da obra de ampliação do Aeroporto Internacional Hercílio Luz, Florianópolis**. Dissertação de mestrado, UFSC, Florianópolis, 213 p. 2011.
16. GIBSON, R. E., G. L. ENGLAND and M. J. L. HUSSEY. **The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays. Finite nonlinear consolidation of thick homogeneous layers**. London, 1967.
17. GISTM (2020). **Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM)**. 2020.
18. HOULSBY, G. T.; TEH, C. I. **Analysis of The Piezocone In Clay**. Orlando, 1988. v. 2, p. 777-783.
19. ICOLD (2001). Commission Internationale des Grands Barragens (ICOLD). **Bulletin 121: Tilings Dams Risk of Dangerous Occurrences. Lessons learnt from practical experiences**. Paris, 2021.
20. ICMM (2019). International Council on Mining & Metals (ICMM). **Integrated mine closure: good practice guide**, 2nd edition. London, United Kingdom, 2019.
21. ICMM (2021). International Council on Mining & Metals (ICMM). **Tailings management: good practice guide**. London, United Kingdom, 2021.
22. JEFFERIES, M. G.; DAVIES, M. P. **Use of the CPTu to estimate equivalent SPT N60**. Geotech. Testing J., v. 16, n. 4, p. 458-468, 1993.
23. JAMIOLKOWSKI, M.; LADD, C. C.; GERMAINE, J. T.; LANCELLOTTA, R. **New developments in field and laboratory testing of soils**. Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, v. 1, p. 57–153, 1985. San Francisco, California.
24. LIMA, B. T. **Modelagem Numérica da Construção de Aterro Instrumentado na Baixada Fluminense, Rio de Janeiro**. Dissertação de mestrado, UERJ, Rio de Janeiro, 135 p. 2007.
25. LOZANO, F. A. E. **Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica**. Dissertação de mestrado, USP, São Paulo, 128 p. 2006.
26. MAGNAN, J. P. e DEROY, J. M. **Analyse graphique des Tassement Observes Sons ler Ouvrager**. Bull-Liaison Laboratoire des Ponts e Chaussés, Paris, p. 9-21.1980.

27. MEDINA, H. F. A. F. **Interpretação de ensaios de Piezocone utilizando conceitos de Similaridade**. Dissertação de mestrado, UENF, Campos dos Goytacazes. 2007.
28. MIKASA, Masato. **The consolidation of soft clay - A new consolidation theory and its application**. 1963.
29. NBR 6.122/2019. **Projeto e Execução de Fundações**. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Rio de Janeiro, 2019.
30. NBR 10.004/2004. **Resíduos sólidos – Classificação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Rio de Janeiro, 2004.
31. NBR 13.028/2017. **Mineração — Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água — Requisitos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Rio de Janeiro, 2017.
32. OLIVEIRA, M. M., **Utilização de EPS em Aterro sobre Solo Mole: Encontro do Viaduto da Pista de Duplicação da BR-470, na interseção com a BR-101- Navegantes/SC**. Trabalho de conclusão de curso, UFSC. 2018.
33. PINTO, Carlos de Souza. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3ª edição. São Paulo: Oficina de Texto, 2006.
34. PINTO, W. T. **Teoria Unidimensional do Adensamento com Grandes Deformações**. Dissertação de mestrado, PUC-RJ, Rio de Janeiro. 1988.
35. POULOS, H. G. e DAVIS, E. H. (1974). **Elastic solutions for soil and rock mechanics**. 1974. New York: John Wiley & Sons, 1974.
36. RESOLUÇÃO N°95/2022. **RESOLUÇÃO ANM N° 95, DE 07 DE FEVEREIRO DE 2022**. Agência Nacional de Mineração (ANM). Brasília, 2022.
37. ROBERTSON, P. K. **Soil classification using the cone penetration test**. Canadian Geotech. Journal, v. 27, n. 1, p. 151-158, 1990.
38. ROBERTSON, P. K. e CABAL, K. L., **Guide to Cone Penetration Testing for Geo-Environmental Engineering**. Gregg Drilling & Testing. ed. 2. 2010.
39. ROBERTSON, P. K. e CABAL, K. L., **Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering**. Gregg Drilling & Testing. 2015.
40. SCHNAID, F. e ODEBRECHT, E. **Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações - 2. ed**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
41. SILVA, F. P. **Uma Nova Construção Gráfica para Determinação da Pressão de Pré-Adensamento de uma Amostra de Solo**. Anais; IV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Guanabara, Vol. 2, p. 219-233. 1970.

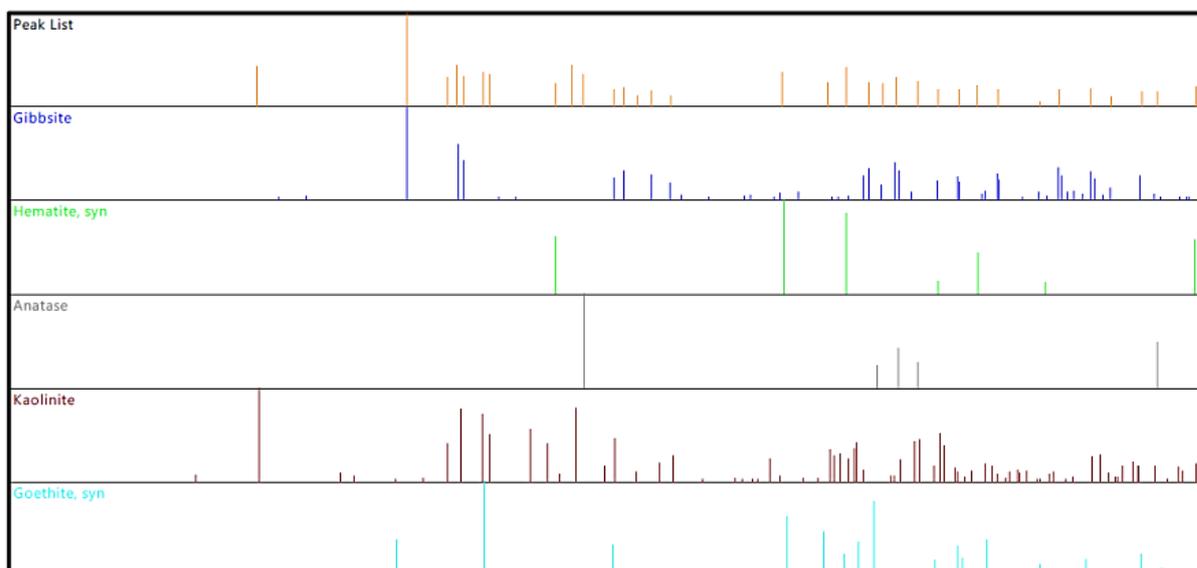
42. SOUZA, L. M., **Software Para Análise e Interpretação de Resultados de Ensaios CPT E CPTu**. Dissertação de mestrado, UFV, Viçosa, 95 p. 2017.
43. TEH, C.I. e HOUSLBY, G.T. **An analytical study of the cone penetration test in clay**. Géotechnique 42, No. 3, 529-532. 1991.
44. TEIXEIRA, A. H., GODOY, N. S. **Análise, projeto e execução de fundações rasas**. Fundações: teoria e prática. São Paulo: Pini. p. 227-264. 1996.
45. TERZAGHI, K. **Theoretical Soil Mechanics**. John Wiley and Sons, Londres e Nova York, 1943.
46. VELLOSO, D. A. e LOPES, F. R. **Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
47. VICK, S. G., **Planning, Design and Analysis of Tailings Dams**. BiTech Publishers, Vancouver. 1990.
48. VILLAR, L. F. S., **Análise do Comportamento de Resíduos Industriais de Bauxita: Desenvolvimento de Facilidades Experimentais de Campo e Laboratório**. Dissertação de mestrado, PUC-RJ, Rio de Janeiro. 1990.
49. ZNIDARCIC, D. e SCHIFFMAN, R.L., **On Terzaghi's Concept of Consolidation**. Geotechnique, 32, p. 387-389. 1982.

## ANEXOS

**ANEXO I** – Resultados de ensaio de difração de raio-X (DRX) realizado em amostra de rejeito de bauxita da MRN.



**Figura A.1 – Difração de raio-X da amostra 01 do SP-4 Norte**



**Figura A.2 – Lista de pico com identificação mineral da amostra 01 do SP-4 Norte**

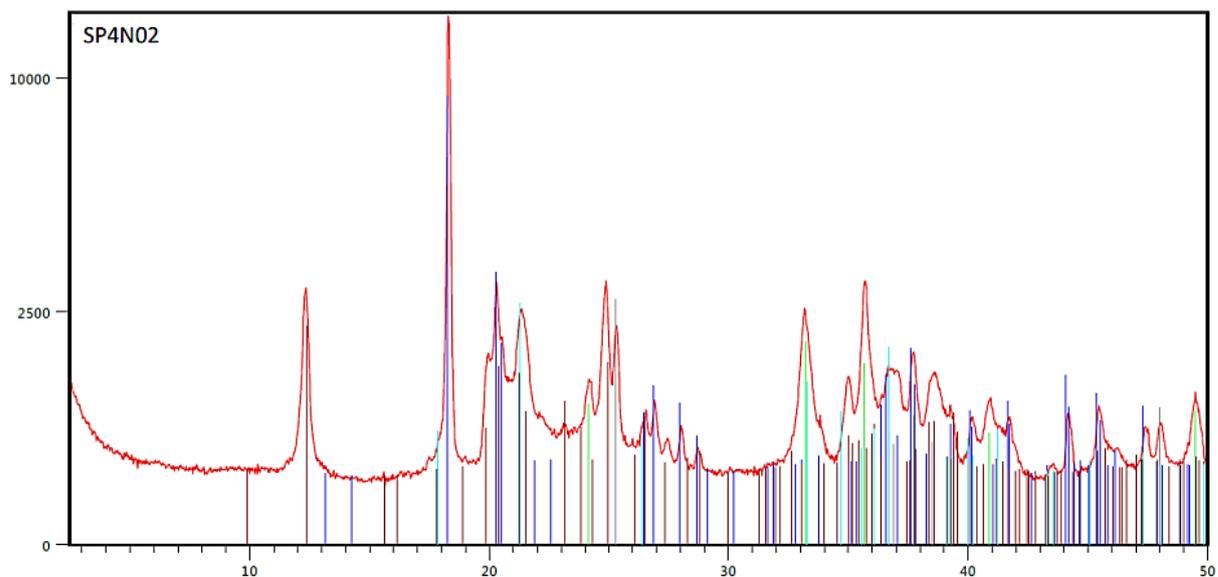


Figura A.3 – Difração de raio-X da amostra 02 do SP-4 Norte

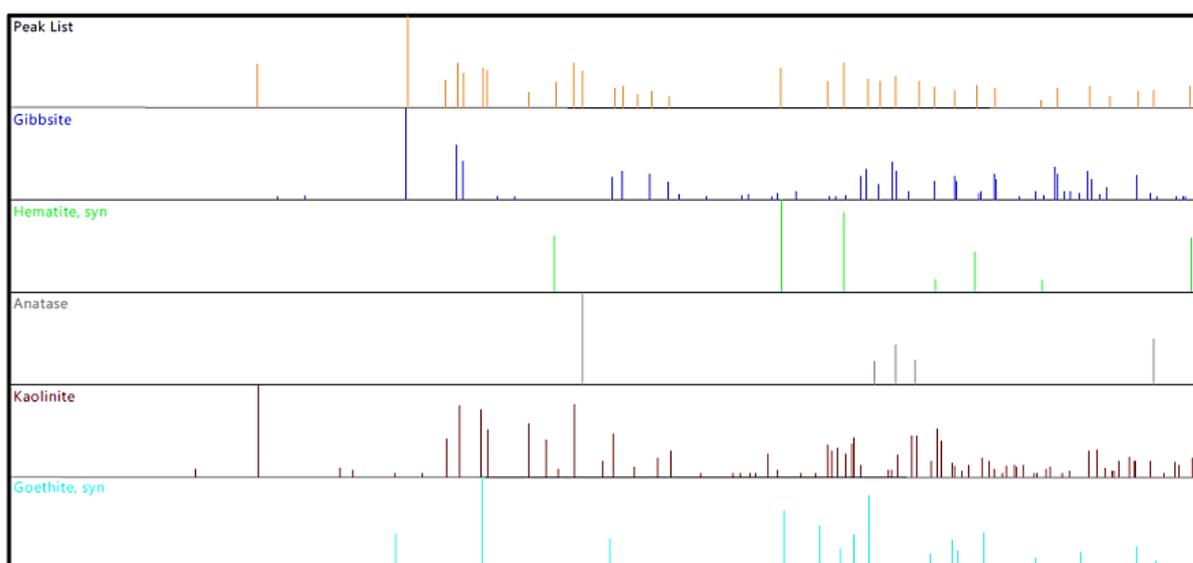
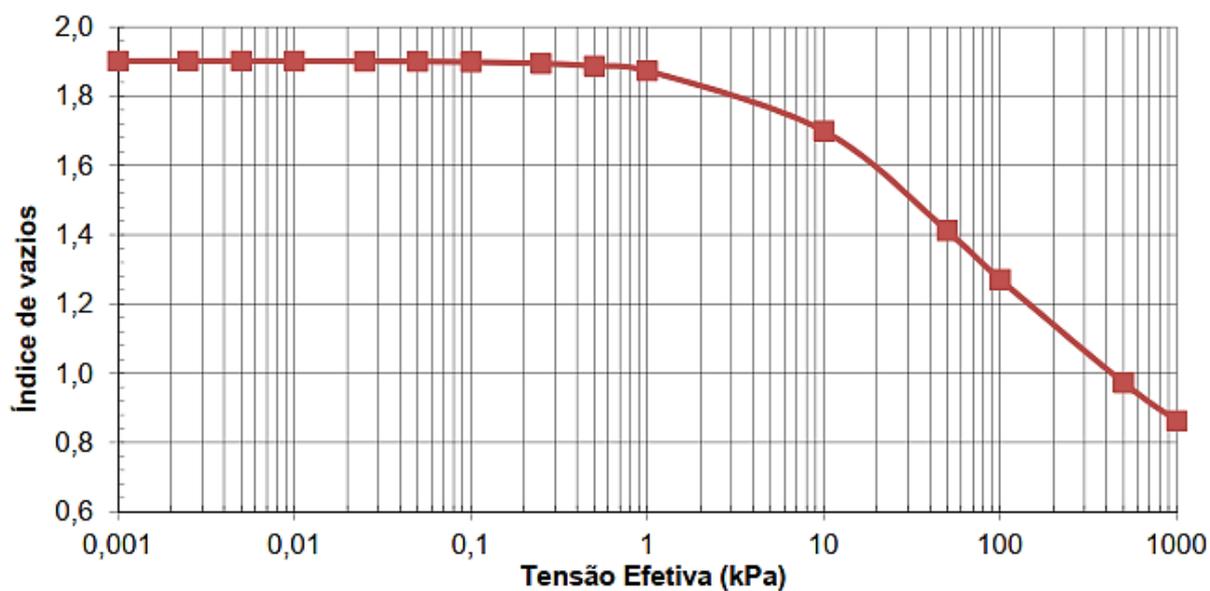
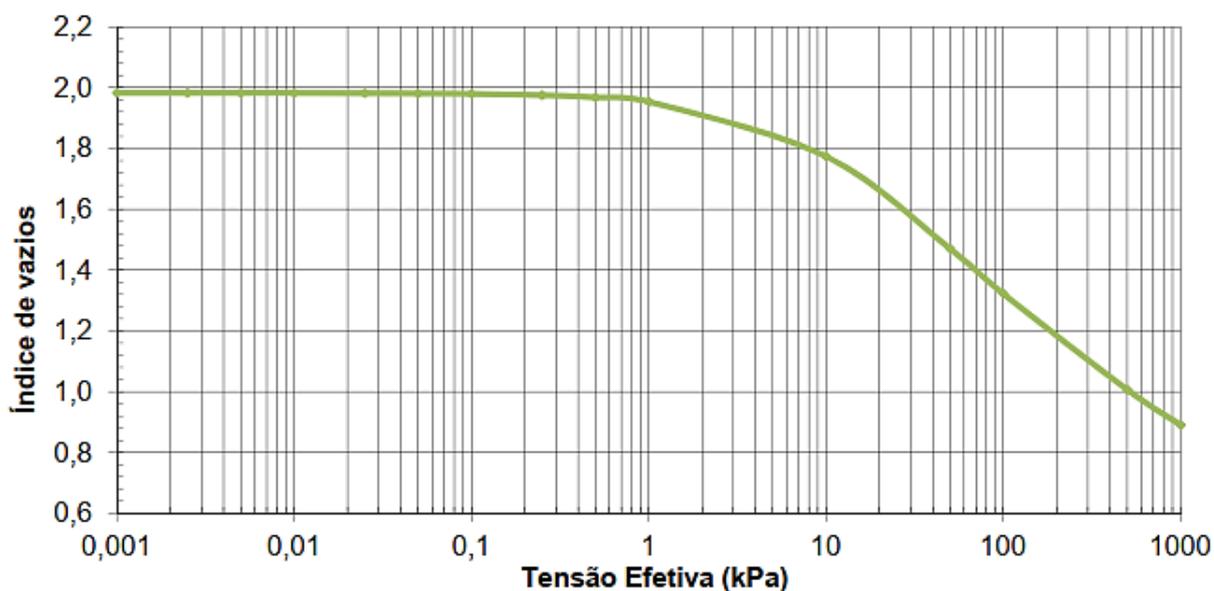


Figura A.4 – Lista de pico com identificação mineral da amostra 01 do SP-4 Norte

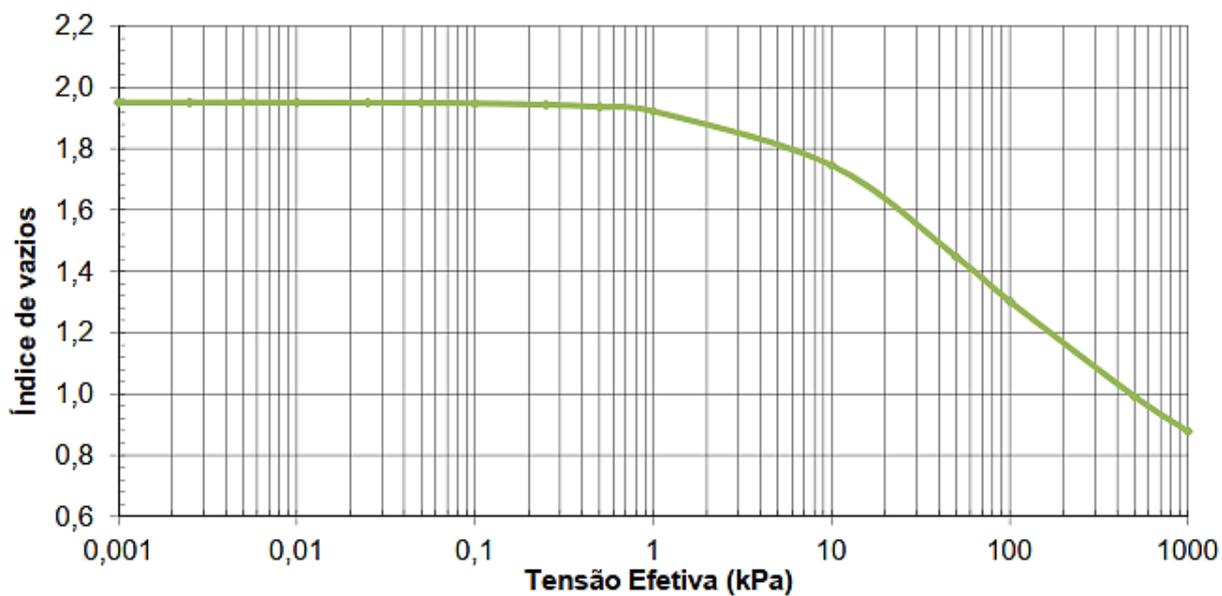
**ANEXO II** – Resultados de ensaio de adensamento induzido por força de percolação (HCT) realizado em amostras de rejeito de bauxita da MRN em diferentes reservatórios.



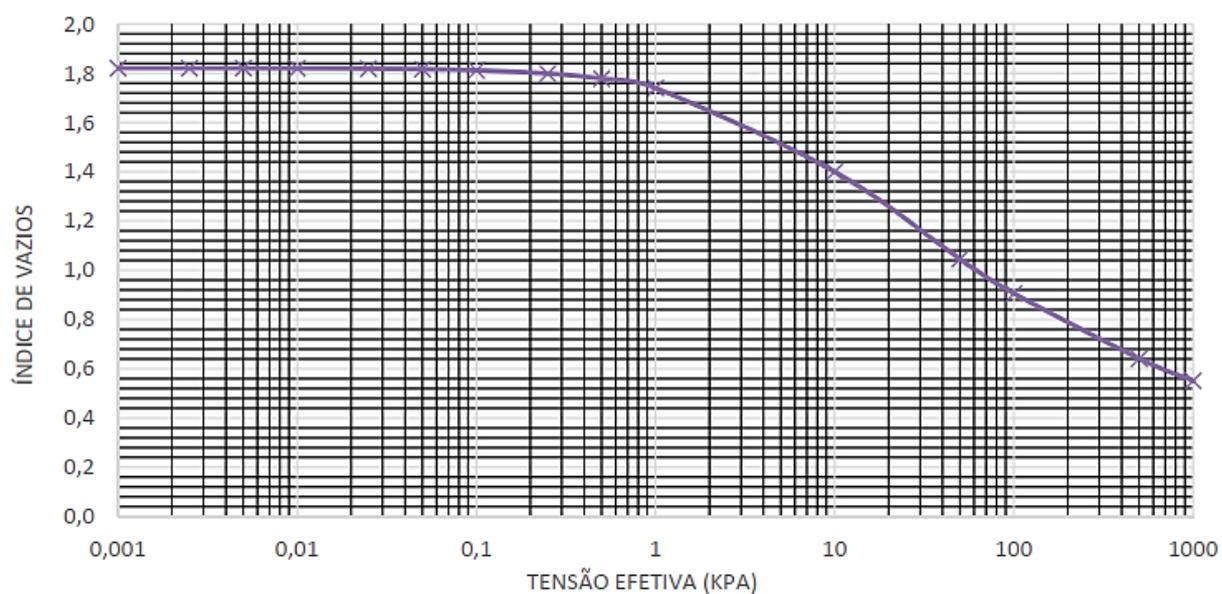
**Figura A.5** – Curva de compressibilidade de amostra com teor de sólidos de 60,3% a 4,0 metros de profundidade



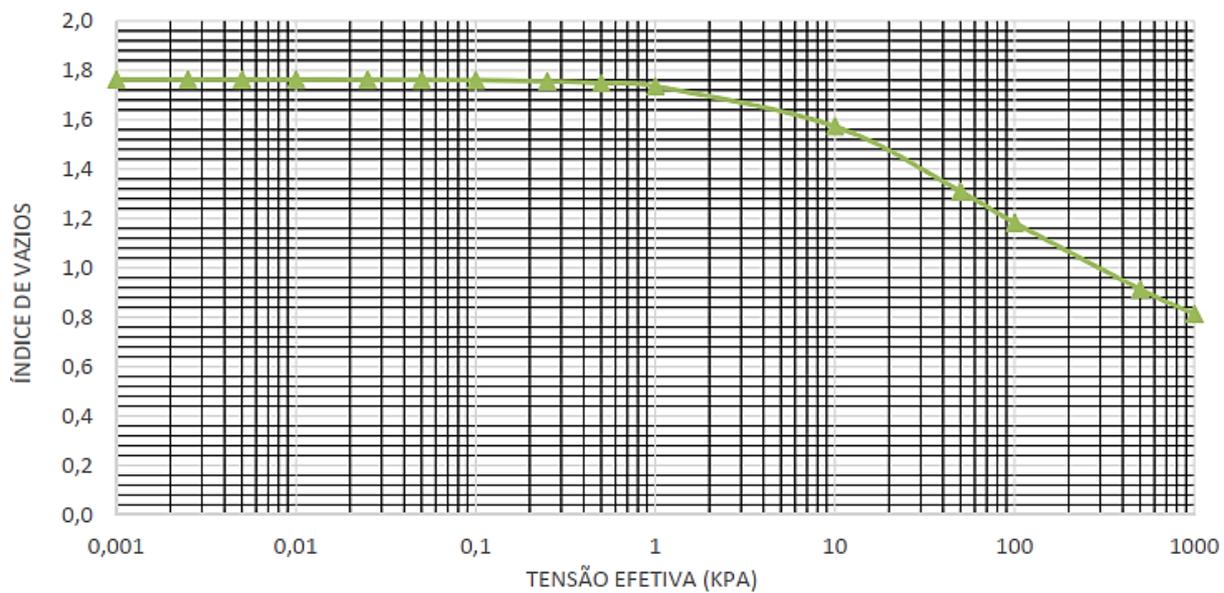
**Figura A.6** – Curva de compressibilidade de amostra com teor de sólidos de 68,3% a 8,0 metros de profundidade



**Figura A.7 – Curva de compressibilidade de amostra com teor de sólidos de 61,3% a 8,0 metros de profundidade**



**Figura A.8 – Curva de compressibilidade de amostra com teor de sólidos de 61,3% a 11,0 metros de profundidade**



**Figura A.9 – Curva de compressibilidade de amostra com teor de sólidos de 61,7% a 13,0 metros de profundidade**