



**Caio Araujo Marinho**

**AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS DE DISPOSIÇÃO E  
SECAGEM DE UM REJEITO DE LAVAGEM DE BAUXITA**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental PUC-Rio.

Orientador: Prof. Tácio Mauro Pereira de Campos

Rio de Janeiro,  
abril 2023



**Caio Araujo Marinho**

## **AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS DE DISPOSIÇÃO E SECAGEM DE UM REJEITO DE LAVAGEM DE BAUXITA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

**Prof. Tácio Mauro Pereira de Campos**

Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof<sup>a</sup>. Marina Bellaver Corte

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof. Lúcio Flávio de Souza Villar

UFMG

Prof<sup>a</sup>. Mariana Ferreira Benessiuti Motta

UNESP

Rio de Janeiro, 20 de abril de 2023

Todos os direitos reservados. A reprodução, total ou parcial, do trabalho é proibida sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

## Caio Araujo Marinho

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Federal de São João Del Rei. Ingressou no mestrado em Geotecnia pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2020. Principais áreas de interesse: geotecnia ambiental e mecânica dos solos teórica e experimental.

### Ficha catalográfica

Marinho, Caio Araujo

Avaliação dos processos de disposição e secagem de um rejeito de lavagem de bauxita / Caio Araujo Marinho ; orientador: Tácio Mauro Pereira de Campos – 2023.

190 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2023.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil e Ambiental – Teses. 2. Rejeito de bauxita. 3. Ressecamento. 4. Gerenciamento de rejeito. 5. Trincas. 6. Campo experimental. I. Campos, Tácio Mauro Pereira de. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. III. Título.

CDD: 624

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Genilda e Jurema, e minha irmã, Lais, pelo amor incondicional.

Ao meu orientador Professor Tácio M. Pereira de Campos por ter aceitado e abraçado a proposta de estudo, mesmo que ainda embrionária.

À Mineração Rio do Norte pela permissão da divulgação dos dados e fornecimento de recursos para desenvolvimento do estudo.

Ao Hermes Ferreira, Paulo Junqueira e Alexandre Schuler e toda liderança da GB por não medirem esforços e recursos para realização do estudo.

Ao José Ronaldo, Adones, Sr. Ailton, Emerson, Roldnei, Toninho e todo time da GBO, GBG e Terra Santa pelo apoio diário nas atividades de campo.

À turma do CD pela amizade, companheirismo e churrascos, tornando mais prazerosa minha estadia em Porto Trombetas.

À Aline, Joanna, Natacha, Miryan, Priscilla e demais amigos da PUC pelo grande apoio ao longo do Mestrado.

Ao Guilherme, Sabrina, Fernando e toda turma da Pimenta de Ávila pela amizade, discussões técnicas e opiniões ao longo dos trabalhos.

Ao Professor e amigo Tales e toda turma do INFRAGEO da UFSJ por minha formação pessoal e profissional.

À Letícia pelo companheirismo e incentivo, fundamentais para conclusão do trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.



## RESUMO

Marinho, Caio Araujo; Campos, Tácio (Orientador). **Avaliação dos processos de disposição e secagem de um rejeito de lavagem de bauxita.** Rio de Janeiro, 2023. 190p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O gerenciamento e estocagem dos resíduos de mineração apresentam desafios constantes devido às crescentes demandas do setor, dessa forma, o aperfeiçoamento dos processos de gestão dos rejeitos e a otimização da capacidade de estocagem dos reservatórios são fundamentais para a viabilidade de um empreendimento de exploração de recursos minerais. O presente trabalho apresenta a metodologia utilizada para avaliação do processo de ressecamento de rejeito da lavagem de bauxita da Mineração Rio do Norte, sendo proposta a execução de dois reservatórios experimentais, em escala piloto, possibilitando o monitoramento do comportamento de ressecamento do rejeito *in loco* e a execução de ensaios em laboratório. A proposta do estudo é avaliar o comportamento do rejeito quando disposto em diferentes espessuras de camadas, incluindo aspectos de condições climáticas e tempo de secagem. O objetivo foi calibrar o modelo de enchimento e otimizar a área dos reservatórios contidos no sistema de contenção de rejeitos da MRN, aperfeiçoando a previsibilidade do final da vida útil das estruturas e maior assertividade do balanço de massas no longo prazo. Os estudos de campo e laboratório consistiram na disposição e monitoramento de camadas com 0,50 m e 0,80 m. Dessa forma, foi possível a avaliação dos teores de sólidos ao final do período de secagem das camadas dispostas, avaliar as curvas de enchimento e recalque do rejeito, medir os ângulos de repouso no momento da disposição e após período de ressecamento e analisar a morfologia e desenvolvimento das trincas de contração. Com base nos resultados laboratoriais e de campo obtidos nesse trabalho, conclui-se que o comportamento do processo de ressecamento do rejeito é influenciado por uma série de fatores, podendo citar a permeabilidade do fundo dos reservatórios e as condições climáticas (incidência pluviométrica e taxa de evaporação) como os mais impactantes ao processo. No trabalho não foi observado uma grande diferença do comportamento de rejeito para as camadas de 0,50 cm e 0,80 cm.

## **PALAVRAS-CHAVE**

Rejeito de bauxita, ressecamento, gerenciamento de rejeito, trincas, campo experimental.

## ABSTRACT

Marinho, Caio Araujo; Campos, Tácio (Advisor). **Evaluation of the disposal and drying processes of a washed bauxite tailings**. Rio de Janeiro, 2023. 190p. Master Dissertation - Department of Civil and Environmental Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The management and storage of mining waste present constant challenges due to the increasing demands of the sector. Therefore, improving waste management processes and optimizing the storage capacity of reservoirs are fundamental to the viability of a mineral resource exploration project. This study presents the methodology used to evaluate the desiccation process of washed bauxite tailings at Mineração Rio do Norte (MRN). The implementation of two experimental reservoirs at a pilot scale is proposed, allowing on-site monitoring and laboratory tests for the tailings desiccation behavior. The objective of the study is to assess the tailings behavior when disposed in different layer thicknesses, considering aspects such as weather conditions and drying time. The aim was to calibrate the filling model and optimize the area of the reservoirs within MRN's tailings storage facility, thus improving the predictability of the structures' end-of-life and enhancing the accuracy of long-term mass balance. Field and laboratory studies involved the deposition and monitoring of layers with thicknesses of 0.50 m and 0.80 m. This enabled the evaluation of the solids content at the end of the drying period, assessment of filling and settlement curves, measurement of the angle of repose at the time of deposition and after the drying period, and analysis of crack morphology and development. Based on the field and laboratory results obtained in this study, it can be concluded that the behavior of the tailings desiccation process is influenced by several factors. The permeability of the reservoir bottom and weather conditions (rainfall and evaporation rate) are identified as the most impactful to the process. No significant difference in the behavior of the waste was observed between the 0.50 cm and 0.80 cm layers.

## KEYWORDS

Bauxite tailings, desiccation, tailings management, cracks, experimental field.

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	21
1.1	Considerações Iniciais .....	21
1.2	Objetivos.....	22
1.3	Estrutura do Trabalho.....	22
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	24
2.1	Propriedades e Características do Rejeito de Bauxita.....	24
2.1.1	Composição Mineralógica.....	25
2.1.2	Composição Química .....	27
2.1.3	Massa Específica dos Grãos .....	28
2.1.4	Granulometria.....	30
2.1.5	Limite de Consistência .....	31
2.1.6	Superfície Específica .....	33
2.2	Metodologia de Disposição de Rejeitos.....	34
2.3	Processo de Ressecamento.....	36
2.3.1	Contração do Solo .....	37
2.3.2	Formação e Característica das Trincas .....	38
2.4	Modelo de Ressecamento de Rejeito .....	39
2.4.1	Modelo de Ressecamento Proposto por Abu-Hejleh & Znidarcic ..	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	42
3.1	Ensaio de Laboratório .....	42
3.2	Ensaio de Sedimentação em Coluna .....	43
3.3	Ensaio de Coluna Modificado.....	45
3.4	Teste de Campo – Reservatórios Experimentais.....	49
3.4.1	Localização de Área Experimental.....	49
3.4.2	Geometria dos <i>Ponds</i> Experimentais.....	50

3.4.3	Terraplenagem .....	52
3.4.4	Layout de Tubulação e Espigotamento.....	54
3.4.5	Caldeiraria e Montagem de Tubulação .....	55
3.4.6	Caracterização Geológica-Geotécnica da Área Experimental.....	58
3.4.7	Sistema de Extravasamento .....	61
3.4.8	Sistema de Espigotamento.....	62
3.4.9	Plataforma de Amostragem .....	63
3.5	Instrumentação e Monitoramento .....	63
3.5.1	Réguas Linimétricas .....	64
3.5.2	Piezômetros Elétricos .....	65
3.5.3	Placas de Recalque .....	67
3.5.4	Sistema de Monitoramento Meteorológico .....	68
3.6	Operação e Execução dos Testes de Campo .....	74
3.6.1	Premissas para a Disposição de Rejeito .....	75
3.6.2	Amostragem de Rotina .....	75
3.7	Morfologia e Desenvolvimento das Trincas .....	80
3.7.1	Determinação da Função de Abertura e Propagação da Trinca .....	82
3.8	Influência da Formação de Crosta no Processo de Ressecamento .....	82
4	ANÁLISE E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS – ENSAIO DE LABORATÓRIO .....	85
4.1	Análise Mineralógica .....	85
4.2	Análise Química .....	86
4.3	Massa Específica dos Grãos.....	86
4.4	Distribuição Granulométrica.....	89
4.5	Limites de Consistência .....	92
4.5.1	Limite de Liquidez.....	92
4.5.2	Limite de Plasticidade .....	93

4.5.3	Limite de Contração .....	94
4.6	Superfície Específica .....	95
4.7	Adensamento a Taxa de Deslocamento Constante (CRD).....	96
4.8	Adensamento Induzido por Força de Percolação (HCT).....	98
4.9	Ensaio de Sedimentação em Coluna .....	100
4.10	Ensaio de Coluna Modificada .....	102
4.10.2	Variação da Altura da Camada .....	106
4.10.3	Perfil de Sólidos .....	106
5	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS – ENSAIOS DE CAMPO	109
5.1	Caracterização Geológica-Geotécnica da Área Teste .....	109
5.2	Ensaio <i>In-Situ</i> e Caracterização da Área dos Ponds Experimentais....	112
5.3	Dispositivos Operacionais dos <i>Ponds</i> Experimentais.....	115
5.3.1	Sistema de Extravasamento .....	115
5.3.2	Sistema de Espigotamento.....	118
5.4	Monitoramento Meteorológico .....	123
5.4.1	Temperatura Ambiente .....	124
5.4.2	Chuva.....	124
5.4.3	Umidade Relativa do Ar .....	126
5.4.4	Velocidade do Vento .....	126
5.4.5	Evaporação .....	127
5.5	Ângulo de Repouso – Camada de Selagem .....	129
5.5.1	Ângulo de repouso do rejeito na disposição.....	130
5.5.2	Ângulo de repouso após período de secagem.....	130
5.6	Monitoramento da Curva de Secagem.....	131
5.6.1	Período de Verão 2021 .....	131
5.6.2	Período de Inverno 2022 .....	136

5.7	Perfil de Teor de Sólidos .....	140
5.7.1	Primeira Camada de Inverno – 80 e 50 cm .....	140
5.7.2	Segunda Camada de Inverno – 80 cm e 50 cm.....	142
5.7.3	Comparação entre Perfil da Primeira e Segunda Camada .....	144
5.8	Instrumentação e Monitoramento .....	146
5.8.1	Réguas Linimétricas .....	146
5.8.2	Placa de Recalque .....	152
5.8.3	Piezometria .....	154
5.9	Morfologia e Desenvolvimento das Trincas .....	160
5.9.1	Propagação das Trincas .....	164
5.9.2	Proporção de Áreas das Trincas.....	166
5.10	Propriedades Constitutivas.....	175
5.10.1	Compressibilidade e Permeabilidade – $e_x \sigma'_v$ e $k_x$ e.....	175
5.10.2	Função de Abertura e Propagação das Trincas ( <i>Cracking Function</i> ) 175	
5.11	Influência da Formação de Crosta no Processo de Ressecamento do Rejeito.....	176
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA O DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA .....	180
6.1	Ensaio de Laboratório .....	180
6.2	Reservatórios Experimentais .....	181
6.3	Monitoramento de Campo .....	181
6.4	Sugestões .....	183
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	184
	APÊNDICE A.....	190

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Difratoograma de raio-X de resíduo de lavagem de bauxita (adaptado de Villar, 2002) .....	26
Figura 2.2. Difratoograma de raio-X de resíduo de lavagem de bauxita.....	27
Figura 2.3. Curva Granulométrica – Comparação entre rejeitos da lavagem de bauxita.....	30
Figura 2.4. Carta de plasticidade – Comparação entre rejeito da lavagem de bauxita. ....	32
Figura 2.5. Sistema de disposição por ponto único (adaptado de Vick, 1990).....	35
Figura 2.6. Sistema de disposição em espigotamento periférico (adaptado de Vick, 1990).....	35
Figura 2.7. Curva de contração típica de solos coesivos. ....	37
Figura 3.1. Coleta e acondicionamento de amostras de rejeito. ....	42
Figura 3.2. Proveta para ensaio convencional de sedimentação.....	43
Figura 3.3. Tubo de grandes dimensões para ensaio de sedimentação.....	44
Figura 3.4. Representação esquemática do ensaio de sedimentação em coluna. ..	45
Figura 3.5. Ensaio de sedimentação em coluna modificado.....	46
Figura 3.6. Base drenante do ensaio de coluna modificado. ....	47
Figura 3.7. Localização da área de implantação dos <i>ponds</i> experimentais. ....	49
Figura 3.8. Localização dos <i>ponds</i> piloto e área teste. ....	50
Figura 3.9. Geometria dos Reservatórios Experimentais. ....	51
Figura 3.10. a) Início da escavação do fundo do reservatório; b) Início da compactação com trator D6; c) Representação do aterro compactado e corte do terreno; d) Terraplenagem dos <i>ponds</i> em fase final. ....	52
Figura 3.11. a) Corte da parede para instalação do extravasor, b) Instalação da tubulação do extravasor; c) Compactação do aterro sobre o extravasor com compactador manual; d) Vista do extravasor após instalação. ....	53
Figura 3.12. Vista dos <i>Ponds</i> experimentais e área teste.....	54



Figura 3.13. Layout de tubulação e espigotamento dos reservatórios piloto. ....	55
Figura 3.14. a) Usinagem da tubulação de alimentação em PEAD; b) Montagem da tubulação de alimentação em PEAD; c) Montagem do manifold de alimentação; d) Instalação do espigote tipo flauta.....	56
Figura 3.15. a) Instalação do guarda corpo na treliça adaptada como passarela de amostragem; b) Instalação das sapatas na plataforma de amostragem, c) Instalação da rampa de acesso à plataforma, c) Plataforma de amostragem instalada .....	57
Figura 3.16. Vista do Layout de tubulação dos reservatórios experimentais. ....	57
Figura 3.17. Localização dos pontos de investigação geológica-geotécnica. ....	58
Figura 3.18. Localização das trincheiras de exploração nos <i>Ponds</i> Piloto.....	59
Figura 3.19. Ensaio de permeabilidade em trincheira. ....	60
Figura 3.20. Determinação do peso específico aparente pelo ensaio Frasco de Areia. ....	60
Figura 3.21. Extravasador metálico e stop-logs em madeira. ....	61
Figura 3.22. Medidor de vazão em vertedor triangular. ....	61
Figura 3.23. Representação dos espigotes tipo flauta e válvulas tipo borboletas..	62
Figura 3.24. Plataformas de amostragem. ....	63
Figura 3.25. Planta esquemática do posicionamento das réguas dos reservatórios experimentais.....	64
Figura 3.26. Representação das réguas em madeira instaladas no reservatório. ....	65
Figura 3.27. Instalação dos Piezômetros Elétricos na fundação e parede de divisa dos <i>Ponds</i> Piloto. ....	66
Figura 3.28. Piezômetro instalado durante a disposição de uma nova camada de rejeito. ....	67
Figura 3.29. Configuração de instalação dos piezômetros elétricos.....	67
Figura 3.30. a) Placa de recalque instalada antes de nova disposição de rejeito; b) Placa de recalque após disposição de rejeito. ....	68

Figura 3.31. Sistema de monitoramento meteorológico do Platô Saracá Leste. ...	69
Figura 3.32. (a) Estação pluviométrica; (b) Evaporímetro tipo tanque classe A...	69
Figura 3.33. Estação de monitoramento automático – TP-2. ....	70
Figura 3.34. Estação de monitoramento automático – SP-09.....	71
Figura 3.35. Pluviômetro instalado nos <i>Ponds</i> Piloto. ....	71
Figura 3.36. Fluxograma dos ensaios de campo.....	75
Figura 3.37. Amostragem na tubulação a montante do <i>manifold</i> de alimentação dos espigotes. ....	76
Figura 3.38. Amostrador tipo “Caneco”: Amostragem de rejeito com baixa densidade. ....	77
Figura 3.39. Amostrador tipo Pistão Estacionário.....	78
Figura 3.40. Sequenciamento da operação do pistão estacionário. ....	78
Figura 3.41. Pontos de coleta de amostra nos <i>ponds</i> piloto.....	79
Figura 3.42. Definição das trincas para monitoramento.....	80
Figura 3.43. Formação de trincas no contato do talude, perto das régua e passarela. ....	81
Figura 3.44. Comportamento anômalo do processo de ressecamento do rejeito sobre folhas e pedregulhos. ....	83
Figura 3.45. Materiais instalados assentes ao rejeito. ....	84
Figura 4.1. Resultado do ensaio DRX – Amostra de rejeito MRN. ....	85
Figura 4.2. Histograma de massa específica dos grãos - campanha 2017.....	87
Figura 4.3. Histograma de peso específico real dos grãos - campanha 2020.....	88
Figura 4.4. Histograma de massa específica dos grãos - campanhas 2017 e 2020. ....	88
Figura 4.5. Curva granulométrica – Campanha 2017.....	89
Figura 4.6. Curva granulométrica – Campanha 2020.....	90
Figura 4.7. Curva Granulométrica das campanhas 2017 e 2021. ....	91

Figura 4.8. Histograma de limite de liquidez - campanha 2017.....	92
Figura 4.9. Histograma de limite de plasticidade - campanha 2017.....	93
Figura 4.10. Carta de plasticidade do rejeito. ....	94
Figura 4.11. Curva de contração do rejeito.....	95
Figura 4.12. Resultado de ensaio CRD – índice de vazios x Tensão Efetiva. ....	97
Figura 4.13. Resultados de Ensaio CRD – Índice de vazios x Permeabilidade (cm/s). .....	97
Figura 4.14. Curva de compressibilidade – HCT. ....	99
Figura 4.15. Curva de permeabilidade - HCT. ....	99
Figura 4.16. Curva de sedimentação para diferentes teores de sólidos. ....	101
Figura 4.17. Curvas de teor de sólidos x tempo – Influência da espessura da camada. .....	103
Figura 4.18. Curvas de teor de sólidos x tempo – Influência da permeabilidade do elemento drenante. ....	104
Figura 4.19. Curvas de teor de sólidos x tempo – Influência do teor de sólidos do material. ....	105
Figura 4.20. Variação da altura da camada de sólidos no tempo – 50 cm e 80 cm. .....	106
Figura 4.21. Perfil de teor de sólidos do ensaio de coluna modificado – T4. ....	107
Figura 4.22. Contração na porção superior da coluna de rejeito. ....	108
Figura 5.1. Perfil de sondagem SP9-SPT-P5 realizado na área do <i>Pond</i> 02. ....	110
Figura 5.2. Perfil de sondagem SP9-SPT-P6 realizado na área do <i>Pond</i> 01. ....	110
Figura 5.3. Estratigrafia – <i>Ponds</i> piloto.....	111
Figura 5.4. Carta de plasticidade. ....	114
Figura 5.5. Curva granulométrica.....	114
Figura 5.6. Implementação do sistema de extravasamento com cunhas e tiras elásticas.....	116
Figura 5.7. Acúmulo de água na região do extravasor. ....	117

Figura 5.8. Vazão após remoção de placa stop-log.....	118
Figura 5.9. Reservatório após disposição controlada. ....	119
Figura 5.10. Reservatório após disposição descontrolada. ....	120
Figura 5.11. Espigotamento sub horizontal com a utilização do espigote tipo flauta. .....	121
Figura 5.12. Distribuição granulométrica do material disposto nos reservatórios experimentais. ....	122
Figura 5.13. Distribuição granulométrica de pontos dentro do reservatório piloto. .....	123
Figura 5.14. Temperatura média mensal no período dos testes. ....	124
Figura 5.15. Pluviometria média diária. ....	125
Figura 5.16. Umidade relativa média mensal do ar. ....	126
Figura 5.17. Velocidade do vento média mensal. ....	127
Figura 5.18. Taxa de evaporação média diária. ....	128
Figura 5.19. Análise de sensibilidade para Kp. ....	129
Figura 5.20. <i>Pond</i> 02 - Monitoramento da 1° camada de 0,50 m.....	132
Figura 5.21. <i>Pond</i> 02 - Monitoramento da 2° camada de 0,50 m.....	133
Figura 5.22. <i>Pond</i> 01 - Monitoramento da 1° camada de 0,80 m.....	134
Figura 5.23. Comparação entre curvas de secagem – Período de Verão. ....	135
Figura 5.24. Monitoramento da 1° camada – <i>Pond</i> 01 e <i>Pond</i> 02.....	137
Figura 5.25. Monitoramento da 2° camada – <i>Pond</i> 01 e <i>Pond</i> 02.....	138
Figura 5.26. Comparação entre curvas de secagem – Período de Inverno. ....	139
Figura 5.27. Perfil de teor de sólidos - 1° Camada de inverno 2022.....	141
Figura 5.28. Perfil de índice de vazios - 1° Camada de inverno 2022. ....	142
Figura 5.29. Perfil de teor de sólidos - 2° Camada de inverno 2022.....	143
Figura 5.30. Amostra de rejeito ao final do período de ressecamento da 2° camada de 50cm.....	144

Figura 5.31. Perfil de teor de sólidos camada de 80cm – <i>Pond</i> 01. ....	145
Figura 5.32. Perfil de teor de sólidos camada de 50cm – <i>Pond</i> 02. ....	145
Figura 5.33. Ciclos de enchimento e secagem verão 2021 – <i>Pond</i> 02. ....	147
Figura 5.34. Ciclos de enchimento e secagem verão 2021 – <i>Pond</i> 01. ....	148
Figura 5.35. Ciclos de enchimento e secagem inverno 2022 – <i>Pond</i> 02. ....	149
Figura 5.36. Ciclos de enchimento e secagem inverno 2022 – <i>Pond</i> 01. ....	151
Figura 5.37. Leituras da placa de recalque – <i>Pond</i> 02. ....	152
Figura 5.38. Leituras da placa de recalque – <i>Pond</i> 01. ....	153
Figura 5.39. Gráfico de leitura PZE-02. ....	155
Figura 5.40. Gráfico de leitura PZE-03. ....	156
Figura 5.41. Gráficos de leituras PZE-01. ....	157
Figura 5.42. Imagem aérea do <i>Pond</i> 02 – 24/09/2021. ....	158
Figura 5.43. Gráfico de leituras PZE-04. ....	160
Figura 5.44. Formação das trincas nas réguas linimétricas. ....	161
Figura 5.45. Início das trincas primárias: 15 dias após o lançamento da 1° camada de 50cm do período de inverno 2022. ....	162
Figura 5.46. Propagação das trincas primárias e formação das trincas secundárias e terciárias: 40 dias após o lançamento da 1° camada de 50cm do período de inverno 2022. ....	163
Figura 5.47. Formação do mosaico de trincas: 65 dias após o lançamento da 1° camada de 50cm do período de inverno 2022. ....	163
Figura 5.48. Desenvolvimento e propagação das trincas monitoradas. ....	164
Figura 5.49. Evolução da abertura das trincas. ....	165
Figura 5.50. Relação abertura x profundidade das trincas. ....	166
Figura 5.51. Ortofoto 1° camada de 0,80 m – <i>Pond</i> 01. ....	167
Figura 5.52. Mosaico de trincas da 1° camada de 0,80 m – <i>Pond</i> 01. ....	168
Figura 5.53. Ortofoto 1° camada de 0,50 m – <i>Pond</i> 02. ....	169

Figura 5.54. Mosaico de trincas da 1° camada de 0,50 m – <i>Pond</i> 02.....	170
Figura 5.55. Ortofoto 2° camada de 0,80 m – <i>Pond</i> 01.....	171
Figura 5.56. Mosaico de trincas da 2° camada de 0,80 m – <i>Pond</i> 01.....	172
Figura 5.57. Ortofoto 2° camada de 0,50 m – <i>Pond</i> 02.....	173
Figura 5.58. Mosaico de trincas da 2° camada de 0,50 m – <i>Pond</i> 02.....	174
Figura 5.59. Função de abertura e propagação das trincas.....	176
Figura 5.60. Região após remoção dos materiais instalados assentes ao rejeito.	177
Figura 5.61. Geomembrana após período de ressecamento. ....	178
Figura 5.62. Geotêxtil após período de ressecamento. ....	178
Figura 5.63. Mosquiteiro após período de ressecamento. ....	179

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Ensaio de DRX realizados em amostras de bauxitas brasileiras (adaptado de Li & Rutherford, 1996). .....	25
Tabela 2.2. Ensaio de DRX realizados em amostras de resíduo da lavagem de bauxita (adaptado de Villar, 2002). .....	26
Tabela 2.3. Composição química média de resíduos da lavagem de bauxita. ....	28
Tabela 2.4. Peso específico real dos grãos médio de resíduos da lavagem de bauxita. ....	29
Tabela 2.5. Resumo das distribuições granulométricas de rejeitos da lavagem de bauxita. ....	31
Tabela 2.6. Limites de consistência médios de resíduos da lavagem de bauxita. .	32
Tabela 2.7. Superfície específica de resíduos da lavagem de bauxita. ....	33
Tabela 3.1. Discriminação dos ensaios realizados em coluna modificada. ....	48
Tabela 4.1. Resultado do ensaio FRX. ....	86
Tabela 4.2. Resumo das distribuições granulométricas das campanhas de 2017 e 2020. ....	91
Tabela 4.3. Quadro de informações – Adensamento CRD. ....	96
Tabela 4.4. Parâmetros constitutivos do rejeito da MRN. ....	100
Tabela 4.5. Funções constitutivas do rejeito da MRN. ....	100
Tabela 4.6. Velocidade de sedimentação para diferentes teores de sólidos. ....	101
Tabela 5.1. Resultados dos ensaios de infiltração em furo de sondagem. ....	111
Tabela 5.2. Resultados dos ensaios <i>in situ</i> . ....	112
Tabela 5.3. Resultados dos ensaios de caracterização. ....	113
Tabela 5.4. Resumo do monitoramento do período de 47 dias de testes – Verão 2021. ....	136
Tabela 5.5. Resumo do monitoramento do período de 63 dias de testes – Inverno 2022. ....	140
Tabela 5.6. Área de Trincas 1º camada de 0,80 m – <i>Pond</i> 01. ....	168

Tabela 5.7. Área de Trincas 1° camada de 0,50 m – Pond 02. ....	170
Tabela 5.8. Área de Trincas 2° camada de 0,80 m – <i>Pond</i> 01. ....	172
Tabela 5.9. Área de Trincas 2° camada de 0,50 m – <i>Pond</i> 02. ....	174
Tabela 5.10. Funções constitutivas de compressibilidade e permeabilidade.....	175



## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Considerações Iniciais

O gerenciamento e estocagem dos resíduos de mineração apresentam desafios constantes devido às crescentes demandas do setor, reformas políticas de segurança e aumento das exigências ambientais associadas às novas áreas de operação. O aperfeiçoamento dos processos de gestão dos rejeitos, a otimização da capacidade de estocagem de estruturas existentes e o aprimoramento do projeto de novas estruturas de contenção de rejeitos passaram a ser fundamentais para a viabilidade de um empreendimento de exploração de recursos minerais.

Nesse contexto, a Mineração Rio do Norte (MRN), localizada em Porto Trombetas – PA, está elaborando um plano diretor de balanço de massas para gerenciamento dos resíduos provenientes do inventário mineral de longo prazo. Desta forma, a determinação da vida útil dos reservatórios em operação e a definição de investimentos para a construção de novas estruturas de contenção de rejeito é fundamental para uma correta modelagem econômica do empreendimento.

Atualmente, as premissas para modelagem do enchimento dos reservatórios de rejeito da MRN consistem na disposição de rejeitos com concentração de sólidos média de 22%, em camadas de aproximadamente 50 cm, nos reservatórios. As disposições, realizadas de maneira cíclica, entre os reservatórios operacionais, permite a exposição ao ressecamento solar, até que o material apresente aproximadamente 55% de teor de sólidos.

As premissas de ressecamento do rejeito e ciclos de disposições influenciam significativamente na modelagem do enchimento dos reservatórios em operação e na previsão da necessidade de construção de novas áreas para disposição de rejeitos, impactando todo plano diretor de balanço de massas e gerenciamento de rejeitos da empresa.

Dentro deste contexto, o entendimento do processo de ressecamento do rejeito é fundamental para o estudo de ocupação/esgotamento dos volumes disponíveis dos reservatórios e tomada de decisão de investimentos de ampliação dos ativos do sistema de disposição de rejeitos de qualquer empreendimento mineral envolvendo, ao final, a produção de alumínio.

## 1.2 Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo principal uma avaliação do processo de ressecamento do rejeito de lavagem de bauxita da MRN considerando o seu comportamento quando disposto em diferentes espessuras de camadas, incluindo aspectos de condições climáticas e tempo de secagem.

O trabalho, que envolveu estudos de campo e laboratório, se propõe a contribuir ao conhecimento do comportamento do processo de ressecamento de rejeito da lavagem da bauxita, quando dispostos em reservatórios, visando uma otimização de processos de gerenciamento dos mesmos.

Os objetivos específicos do presente trabalho são: (i) avaliar o comportamento das disposições de camadas de 0,50m e 0,80m de espessura em campo e laboratório; (ii) avaliar os teores de sólidos ao final do período de secagem (ciclo de disposição) em campo e laboratório; (iii) avaliar as curvas de recalque em campo e laboratório; (iv) definir em campo o ângulo de repouso do rejeito imediatamente após a disposição e após o período de secagem; (v) compreensão da morfologia e desenvolvimento das trincas de contração em campo; (vi) avaliar a influência da formação de uma crosta com menor índice de vazios no topo da camada de rejeito.

## 1.3 Estrutura do Trabalho

A dissertação de mestrado está organizada em seis capítulos, sendo que, no presente capítulo introdutório, são apresentadas as considerações iniciais sobre o sistema de disposição de rejeito da MRN, objetivo da elaboração do estudo do processo de ressecamento de resíduos da lavagem de bauxita e estrutura do trabalho.

O Capítulo 2 inclui uma revisão bibliográfica onde são apresentadas as propriedades e características do rejeito da lavagem de bauxita de diferentes empreendimentos minerais, metodologia de disposições de rejeitos e aborda o processo de ressecamento de rejeito, apresentando o processo de contração dos materiais, formação e característica das trincas, modelos de ressecamento para solos finos e o modelo proposto por Abu-Hejleh & Znidarcic (1995).

Os materiais e métodos utilizados para elaboração do estudo estão dispostos no Capítulo 3. Inicialmente é apresentada a metodologia executiva da campanha de

ensaios de laboratório, sendo constituída por ensaios de sedimentação em proveta convencional e tubos de grandes dimensões e uma proposta de ensaios de coluna modificado. Também é apresentada a localização e proposta de caracterização da área teste, dimensionamento e execução dos reservatórios experimentais e seus elementos auxiliares, especificação dos elementos de monitoramento e instrumentação dos testes de campo e climatológicos, operação e condução dos ensaios de campo.

O Capítulo 4 refere-se às análises e discussões dos resultados obtidos em ensaios de caracterização, consolidação e condutividade hidráulica previamente realizados com o resíduo da lavagem da bauxita da MRN. Também são abordadas as análises dos resultados de ensaio de sedimentação performados em provetas convencionais e em tubos de grandes dimensões, além dos resultados dos ensaios de coluna modificada.

O Capítulo 5 tem por objetivo analisar e discutir os resultados do monitoramento dos testes de campo, apresentando a caracterização geológica-geotécnica da área teste, dispositivos operacionais utilizados nos reservatórios experimentais, monitoramento meteorológico ao longo do período de testes, determinação do ângulo de repouso do rejeito disposto com vazões e velocidades controladas, monitoramento das curvas de secagem do período de verão de 2021 e inverno de 2022, curvas de enchimento do reservatório, leituras de piezômetros instalados na fundação e na polpa de rejeito lançada, monitoramento da morfologia e desenvolvimento das trincas, determinação da proporção de área das trincas, determinação das propriedades constitutivas do rejeito da lavagem de bauxita da MRN, determinação do perfil de teor de sólidos das camadas dispostas nos testes de secagem bem como a determinação qualitativa da influência da formação de crosta no processo de ressecamento de rejeito.

Por fim, o Capítulo 6 conclui o trabalho com a síntese das análises e discussões apresentadas ao longo do mesmo, além de apresentar algumas sugestões para continuidade do estudo do processo de ressecamento do resíduo da lavagem de bauxita.

## **2 REVISÃO DA LITERATURA**

Neste capítulo, são apresentados os estudos dos principais tópicos envolvidos na elaboração da pesquisa. A abordagem compreende na apresentação das propriedades e características físicas do rejeito da lavagem de bauxita, metodologias de disposição de rejeito em reservatórios, processo de ressecamento de materiais finos, modelos numéricos propostos para o processo de ressecamento e apresentação do modelo de ressecamento proposto por Abu-Hejleh & Znidarcic (1995).

### **2.1 Propriedades e Características do Rejeito de Bauxita**

O resíduo proveniente da lavagem da bauxita é o subproduto (rejeito) do processo de beneficiamento parcial, sendo um material inerte e sem contaminantes químicos. A produção anual de bauxita em 2020 no Brasil chegou a aproximadamente 33 milhões de toneladas (ANB, 2021). Considerando uma produção mássica média dos empreendimentos exploradores de bauxita de 70%, pode-se estimar uma geração de 10 milhões de toneladas de resíduo gerado pelo beneficiamento de bauxita.

Em alguns empreendimentos minerais, a bauxita apresenta um beneficiamento parcial, sendo cominuída em britadores e selecionada em processos de peneiramento e cicloneamento. Após esse processo, é destinada a outros empreendimentos onde será beneficiada para extração do óxido de alumínio para se conseguir o metal alumínio.

As jazidas de bauxita brasileiras apresentam taxas de alumina reativa elevadas, sendo consideradas de excelente qualidade para o beneficiamento do alumínio. Os principais minerais portadores do óxido de alumínio são as gipsitas e alumina tri-hidratada (Villar 1990).

As características do rejeito da lavagem da bauxita e suas propriedades mecânicas e hidráulicas estão atreladas à composição químico-mineralógico do minério de origem (Villar, 1990). Dessa forma, serão apresentados dados do resíduo da lavagem de bauxita de diferentes regiões, possibilitando a comparação das diferenças em função de sua procedência.

### 2.1.1 Composição Mineralógica

A composição mineralógica do resíduo proveniente da lavagem da bauxita influencia diretamente nas características e comportamento do material quando estocados em reservatórios (Villar, 1990).

A composição mineralógica dos materiais pode ser obtida por meio de ensaios de difração de raio-X, onde a interação de ondas de raio-X permite a determinação das distâncias interplacares, possibilitando a caracterização da natureza dos minerais presentes na amostra.

Li & Rutherford (1996) determinaram a composição mineralógica de sete amostras obtidas no sudeste do Brasil, apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Ensaio de DRX realizados em amostras de bauxitas brasileiras (adaptado de Li & Rutherford, 1996).

Amostra	Mineral Al: Gibbsita	Mineral Fe		Mineral Ti: Anatase
		Hematita	Goethita	
BB1	Alto	Baixo	Baixo	-
BB2	Muito Alto	Baixo	Traço	Traço
BB3	Alto	Traço	Baixo	Traço
BB4	Alto	Baixo	Baixo	-
BB5	Alto	Baixo	Baixo	Traço
BB6	Muito Alto	Baixo	Baixo	-
BB7	Muito Alto	Baixo	Traço	Traço

As amostras obtidas no sudeste do Brasil apresentaram a gibbsita como mineral de maior presença, seguido pela hematita, goethita e, em algumas amostras, traços de anatase. A baixa presença de sílica está evidenciada com a baixa presença de caulinita.

Villar (2002) apresentou a composição mineralógica dos rejeitos da lavagem de bauxita obtidos em Porto Trombetas - PA.

A Figura 2.1 e a Tabela 2.2 ilustram o difratograma e os minerais que compõem o resíduo da lavagem de bauxita de Porto Trombetas - PA, respectivamente.

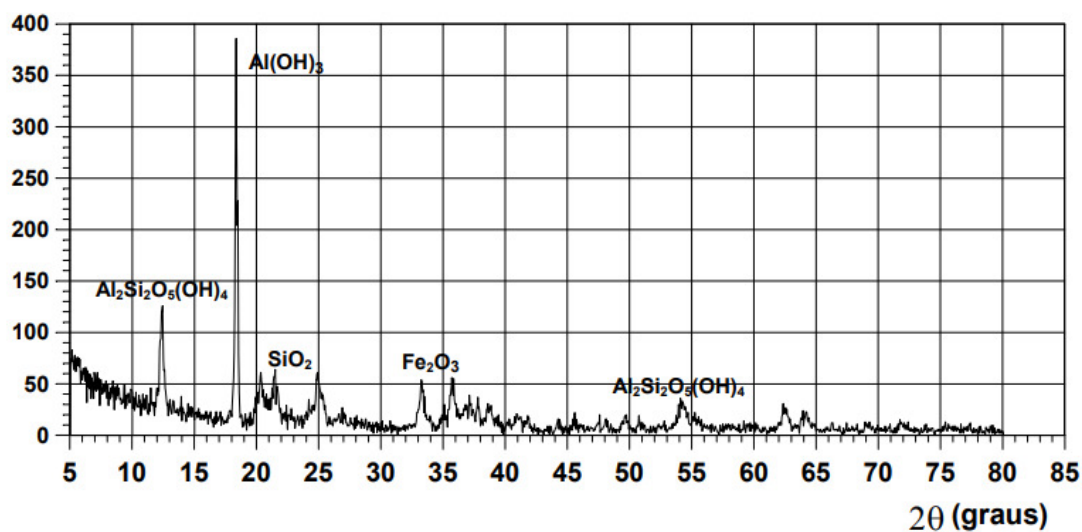


Figura 2.1. Difratograma de raio-X de resíduo de lavagem de bauxita  
(adaptado de Villar, 2002)

Tabela 2.2. Ensaios de DRX realizados em amostras de resíduo da lavagem de bauxita  
(adaptado de Villar, 2002).

Catálogo	Mineral	Classificação
33-0664	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Hematita
18-1170	$\text{SiO}_2$	Tridymita
7-0324	$\text{Al(OH)}_3$	Gibbsita
29-1488	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	Caulinita

Conforme ilustrado no difratograma e apresentado na Tabela 2.2, a amostra do resíduo da lavagem de bauxita de Porto Trombetas é constituída pelos minerais gibbsita, hematita, tridymita (sílica) e caulinita.

Pedrosa (2012) apresentou a composição mineralógica do rejeito da lavagem de bauxita de Paragominas - PA. O difratograma da amostra está ilustrado na Figura 2.2.

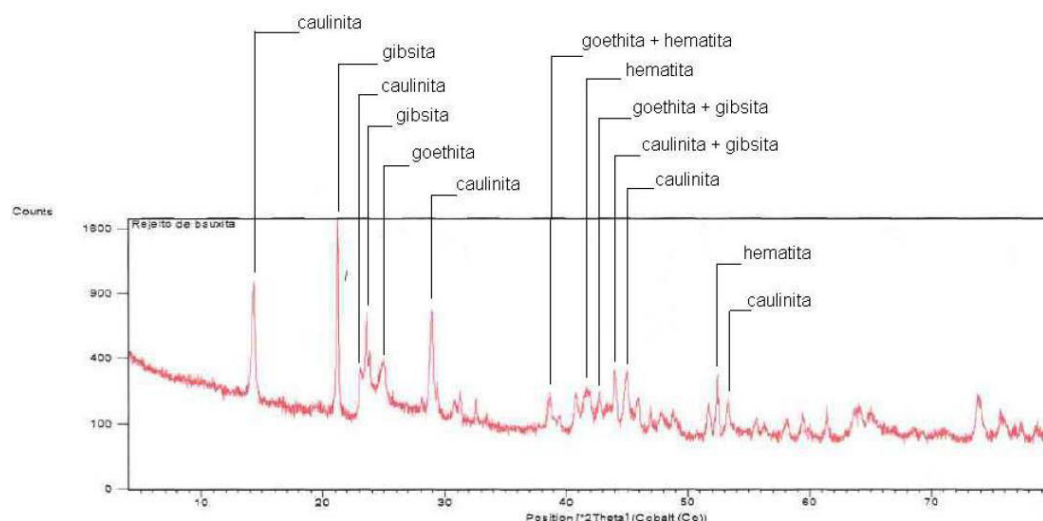


Figura 2.2. Difratoograma de raio-X de resíduo de lavagem de bauxita  
(adaptado de Pedrosa, 2012)

Os resultados dos ensaios de difração de raio-X realizados nas amostras de resíduo da lavagem de bauxita de Paragominas – PA evidenciam a presença dos minerais caulinita, gibbsita, goethita e hematita.

### 2.1.2 Composição Química

A composição química está estreitamente relacionada com a composição mineralógica, podendo variar fortemente a depender da jazida lavrada. As propriedades e o comportamento do material após a disposição em reservatórios de contenção de rejeito são influenciados pela composição química do material.

Li & Rutherford (1996) determinaram a composição química de sete amostras obtidas no sudeste do Brasil por ensaios de fluorescência de raio-X. Villar (2002) determinou a composição química de amostras de resíduo da lavagem de bauxita obtidas em Porto Trombetas – PA, também por ensaios de fluorescência de raio-X.

As composições químicas médias apresentadas nos trabalhos de Li & Rutherford (1996) e Villar (2002) estão disposta na Tabela 2.3.

Tabela 2.3. Composição química média de resíduos da lavagem de bauxita.

Composto Químico	Teor (%)	
	Li & Rutherford (1996)	Villar (2002)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Total	35,18	31,20
SiO <sub>2</sub> Total	0,82	21,00
*PPC	25,83	14,80
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34,13	28,00
TiO <sub>2</sub>	4,03	3,80
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	<0,05
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0,04
MgO	-	<0,10
ZrO <sub>2</sub>	-	-
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-
CuO	-	-
FeO	-	0,28
CaO	-	0,17
Na <sub>2</sub> O	-	0,51
K <sub>2</sub> O	-	0,02
NiO	-	<0,003
F	-	0,047
Cl	-	0,008

\* PPC - Perda por calcinação à 1000 °C.

As amostras de resíduo da lavagem de bauxita ensaiadas por Li & Rutherford (1996) apresentam teores de sílica muito inferiores quando comparado com a amostra de Villar (2002). Também pode ser destacada a maior concentração de óxido de ferro e perda por calcinação nas amostras ensaiadas no trabalho de Li & Rutherford (1996).

### 2.1.3 Massa Específica dos Grãos

A massa específica dos grãos é diretamente relacionada pela mineralogia presente na rocha de origem, sendo fortemente influenciada pelo teor de óxido de ferro contido no material (Villar, 1990). Mesmo sendo uma propriedade intrínseca do



material, a densidade dos grãos varia consideravelmente ao longo do reservatório de contenção devido à metodologia de disposição e segregação do resíduo (Villar 2002).

Li & Rutherford (1996) determinaram a massa específica dos grãos de sete amostras obtidas no sudeste do Brasil por ensaios em picnômetros a gás hélio. Villar (2002) apresentou os valores médios da massa específico dos grãos do rejeito da lavagem de bauxita obtidos em Porto Trombetas - PA, adotando amostras com diferentes faixas granulométricas e metodologia de secagem. Pedrosa (2012) e Bretas (2021) apresentaram a massa específica média do rejeito da lavagem de bauxita de Paragominas. A massa específica dos grãos do material da lavagem de bauxita de Weipa, estado de Queensland, Austrália, está disposta no trabalho de Williams (2011). Silva (2020) definiu a massa específico média do rejeito de bauxita obtido em Porto Trombetas - PA por ensaios em balão volumétrico.

Os valores médios da massa específica dos materiais provenientes da lavagem de bauxita estão ilustrados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4. Peso específico real dos grãos médio de resíduos da lavagem de bauxita.

<b>Referência Bibliográfica</b>	<b>Origem do Resíduo da lavem de Bauxita</b>	<b>Massa Específica dos Grãos (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Li & Rutherford (1996)	Sudeste do Brasil	2,79
Villar (2002)	Porto Trombetas, PA	2,96
Pedrosa (2012)	Paragominas, PA	2,67
Williams et al. (2011)	Weipa, QLD (Austrália)	2,73
Silva (2020)	Porto Trombetas, PA	2,89
Bretas (2021)	Paragominas, PA	2,78

<sup>(1)</sup> Valores médios apresentados nos trabalhos.

Pode ser observado que as massas específicas dos diferentes tipos de rejeitos da lavagem de bauxita variam entre si, uma vez que apresentam origem e, possivelmente, mineralogia distintas.

### 2.1.4 Granulometria

A distribuição granulométrica dos resíduos da lavagem da bauxita está relacionada com a mineralogia da bauxita lavrada e dos argilominerais constituintes. Além da variabilidade da granulometria por jazidas exploradas, ainda há uma grande variação da distribuição granulométrica do rejeito dentro dos reservatórios devido à segregação do material no momento de sua deposição.

Villar (2002) apresentou a distribuição granulométrica do resíduo da lavagem de bauxita de Porto Trombetas - PA. Williams (2011) obteve a granulometria do rejeito da lavagem de bauxita de uma amostra localizada a 50 m da parede de espigotamento de um reservatório em Weipa, estado de Queensland, Austrália. Pedrosa (2012) realizou ensaios de granulometria com e sem a adição de defloculante na etapa de sedimentação em amostras de resíduo de bauxita de Paragominas – PA. Silva (2020) realizou ensaio de granulometria por meio de cicloclassificador (*cyclosize*) no resíduo de bauxita de Porto Trombetas – PA. Bretas (2021) obteve a curva granulométrica por ensaios em granulômetros a laser em amostras de Paragominas-PA.

As curvas granulométricas dos rejeitos da lavagem de bauxita e as referentes porcentagens correspondentes de cada material estão apresentadas na Figura 2.3 e Tabela 2.5, respectivamente.

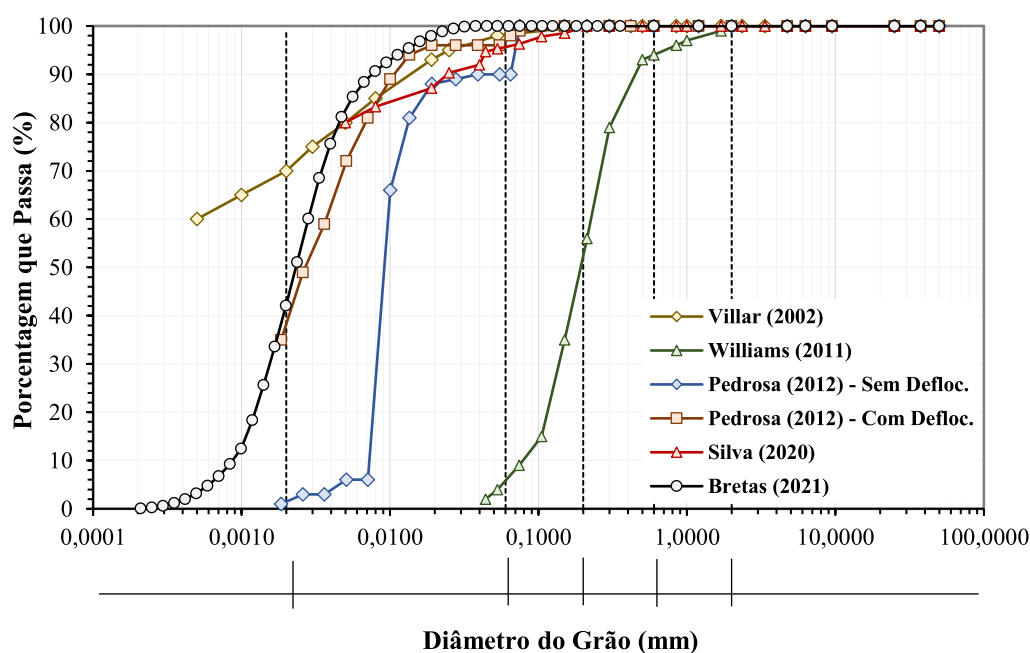


Figura 2.3. Curva Granulométrica – Comparação entre rejeitos da lavagem de bauxita.

Tabela 2.5. Resumo das distribuições granulométricas de rejeitos da lavagem de bauxita.

Gran.	Porcentagem Correspondente					
	Villar (2002)	Williams (2011)	Pedrosa (2012) <sup>(1)</sup>	Pedrosa (2012) <sup>(2)</sup>	Silva (2020)	Bretas (2021)
Pedreg.	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Areia G.	0%	6%	0%	0%	0%	0%
Areia M.	0%	41%	1%	0%	2%	0%
Areia F.	3%	48%	9%	3%	2%	0%
Silte	27%	5%	89%	59%	96%	58%
Argila	70%	-	1%	38%	-	42%

<sup>(1)</sup> Sem defloculante / <sup>(2)</sup> Com defloculante

Como pode ser observado, o resíduo da lavagem de bauxita de Weipa, apresentado por Williams, é composta essencialmente pela granulometria arenosa, destoando dos materiais obtidos no Brasil.

Os resultados dos ensaios de Pedrosa (2012) demonstram a influência da metodologia executiva do ensaio na distribuição granulométrica. Granulometrias obtida por ensaio de sedimentação com adição de defloculantes resultam em distribuições granulométrica muito distintas de ensaio performados sem a adição de dispersores químicos.

### 2.1.5 Limite de Consistência

Segundo Villar (1990), os limites de consistência são bons indicadores para a classificação dos solos, apresentando informações dos possíveis comportamentos mecânico e hidráulico do material.

Mello et al. (1987) e Silva (2020) apresentaram os limites de consistência médio do resíduo da lavagem de bauxita de Porto Trombetas - PA. Villar (2002) apresentou os valores médios dos limites de consistência do rejeito da lavagem de bauxita obtidos em Porto Trombetas - PA, adotando amostras com diferentes faixas granulométricas e metodologia de secagem. Pedrosa (2012) e Bretas (2021) apresentaram valores médios dos limites de Atterberg para amostras de Paragominas - PA. Os resultados médios dos limites de consistência do rejeito da

lavagem de bauxita de Weipa, estado de Queensland, Austrália, estão apresentados em Williams et al. (2011).

Os limites de consistência médios dos resíduos da lavagem de bauxita estão apresentados na Tabela 2.6.

Tabela 2.6. Limites de consistência médios dos resíduos da lavagem de bauxita.

Referência Bibliográfica	Origem do Resíduo da lavem de Bauxita	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Mello et al. (1987)	Porto Trombetas, PA	51%	25%	26%
Villar (2002)	Porto Trombetas, PA	62%	33%	29%
Pedrosa (2012)	Paragominas, PA	57%	32%	25%
Williams et al. (2011)	Weipa, QLD (Austrália)	35%	26%	9%
Silva (2020)	Porto Trombetas, PA	55%	29%	26%
Bretas (2021)	Paragominas, PA	47%	25%	22%

De posse dos limites de consistência dos resíduos proveniente da lavagem de bauxita, pode-se elaborar a carta de plasticidade proposta por Casagrande, ilustrada na Figura 2.4, facilitando a comparação e classificação das amostras apresentadas por cada autor.

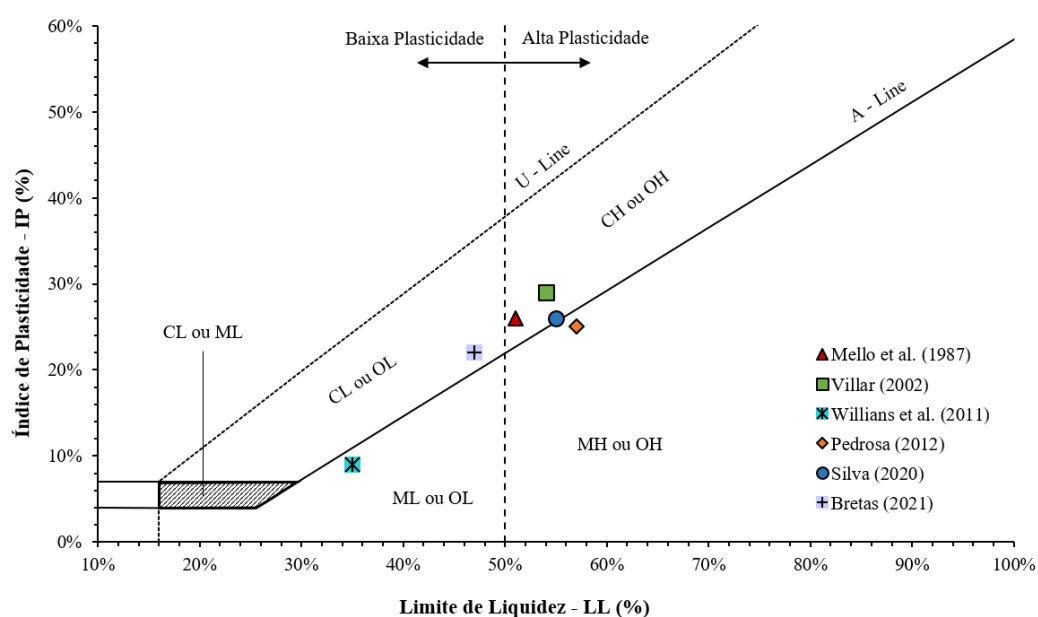


Figura 2.4. Carta de plasticidade – Comparação entre rejeito da lavagem de bauxita.

Sendo “C” materiais argilosos, “M” materiais siltsos, “O” materiais orgânicos, L materiais com baixa plasticidade e H materiais com alta plasticidade.

Analisando a carta de plasticidade dos resíduos da lavagem de bauxita, percebe-se grande diferença da plasticidade do rejeito australiano, quando comparado com os rejeitos brasileiros.

A plasticidade é fortemente influenciada pelos argilominerais constituintes do material.

### 2.1.6 Superfície Específica

A superfície específica de um solo é a soma da área superficial de uma partícula sobre o seu volume ou peso (Lambe & Whitman, 1969). Quanto mais planar e menor for a partícula, maior será a área específica.

Segundo Villar (1990), a superfície específica pode ser utilizada como indicador da plasticidade do material e seu comportamento no processo de sedimentação e adensamento.

Li & Rutherford (1996) determinaram a superfície específica de sete amostras obtidas no sudeste do Brasil pelo método de adsorção de nitrogênio, realizando os cálculos pela metodologia proposta por Brunauer, Emmett e Teller (B.E.T) (1938). Bretas (2021) apresentou a superfície específica da bauxita do resíduo da lavagem de bauxita de Paragominas sem discriminar o número de amostras ou a metodologia de ensaio.

A Tabela 2.7 compila as superfícies específicas média dos rejeitos de bauxita.

Tabela 2.7. Superfície específica de resíduos da lavagem de bauxita.

Referência Bibliográfica	Origem do Resíduo da lavagem de Bauxita	Superfície Específica (m <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> )
Li & Rutherford (1996)	Sudeste do Brasil	46,13
Bretas (2021)	Paragominas, PA	16,00

Como pode ser observado, as amostras de bauxita obtidas no sudeste do Brasil, estudadas por Li & Rutherford (1996), apresentaram uma superfície específica superior que as amostras de Paragominas, encontrada por Bretas (2021).

A divergência entre os resultados das superfícies específicas apresentados na Tabela 2.7 se deve pela diferença entre a composição química e mineralógica das jazidas de bauxita ensaiadas.

## **2.2 Metodologia de Disposição de Rejeitos**

Os rejeitos podem ser dispostos de forma subaquática (abaixo do nível de água) ou por técnicas subaéreas (acima do nível de água), sendo esta última a mais utilizada (DPI, 2003). A metodologia de disposição afeta drasticamente os processos físicos experimentados pelo rejeito ao longo do tempo.

Segundo Hardy & Engels (2007), a disposição subaérea geralmente é praticada com lançamento de camadas ao longo do perímetro do sistema de contenção de rejeito, permitindo a rotatividade das disposições em diferentes locais em torno do reservatório, possibilitando o adensamento e ressecamento de camadas recém-dispostas, enquanto novas camadas são depositadas em outras zonas do reservatório.

O rejeito, após disposto em reservatórios, passa pelos processos de sedimentação, adensamento e ressecamento. Dentre esses fenômenos físicos, a ocorrência e intensidade do fenômeno ressecamento é fortemente influenciado pela metodologia de disposição do material, sendo a técnica de disposição subaérea uma das mais eficientes (Costa *et al*, 1999).

Conforme apresentando por Vick (1990), a disposição ao longo do perímetro do reservatório é desejável, para otimização do volume útil da estrutura de contenção de rejeito. O sistema de disposição de rejeito pode ser realizado por pontos de descarga único ou em espigotamento. O sistema de disposição por ponto único de descarga é realizado deixando o final da linha da tubulação de rejeito aberta, eventualmente sendo necessário desacoplar segmentos da tubulação para realocação da deposição do rejeito, conforme ilustrado na Figura 2.5.

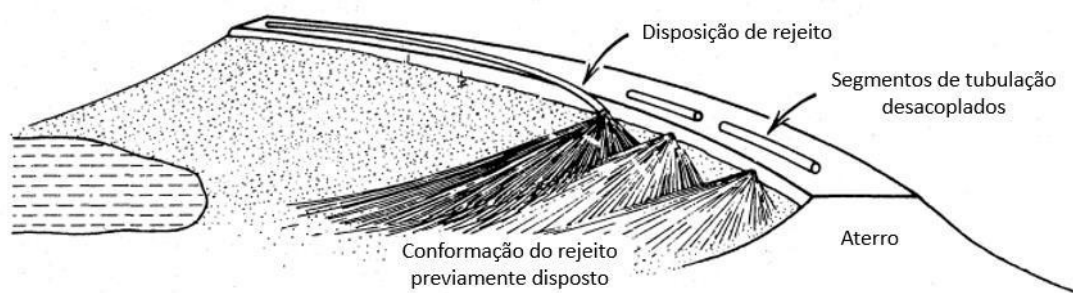


Figura 2.5. Sistema de disposição por ponto único (adaptado de Vick, 1990).

O sistema de espigotamento periférico consiste na disposição ao longo do perímetro do reservatório através de espigotes, sem a necessidade do desacoplamento ou realocação da tubulação de rejeito, conforme apresentado na Figura 2.6. Os espigotes são geralmente espaçados de 25 a 50 metros (Vick, 1990).

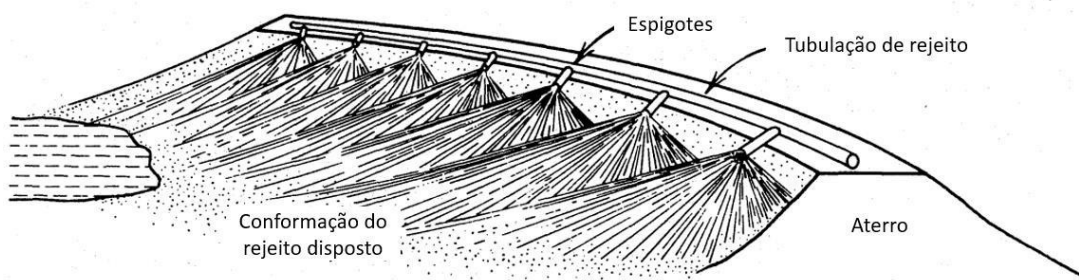


Figura 2.6. Sistema de disposição em espigotamento periférico (adaptado de Vick, 1990).

Segundo Knight & Haile (1983), a técnica de disposição subaérea consiste no lançamento de finas camadas de rejeito, permitindo seu adensamento e ressecamento por exposição solar antes do lançamento de novas camadas, caracterizando os ciclos de disposições.

Conforme apresentado por Ávila *et al.* (1995), o sistema de contenção de rejeitos deve possuir área suficiente para que seja possível o gerenciamento do rejeito respeitando o tempo de ciclos de disposições, isto é, tempo definido para disposição, adensamento e ressecamento do rejeito até que nova camada possa ser disposta.

Norman & Raforth (1998) cita que a frequência da disposição de rejeito e número de zonas de lançamento é dependente do clima, taxa de produção de rejeito,

características do ressecamento do rejeito e da geometria do sistema de contenção de rejeitos.

Segundo Chandler (1988), a exposição solar e consequente ressecamento do rejeito ao longo dos ciclos de disposição, possibilita uma maior densificação do material e otimização do volume útil dos reservatórios, permitindo a construção de reservatórios menores e mais simples.

A otimização da capacidade de armazenamento dos reservatórios, quando aplicada a metodologia de disposições em ciclos de secagem, também foi apresentada por Norman & Raforth (1998). O autor cita que a técnica permite o gerenciamento de aproximadamente o dobro da quantidade de rejeito quando comparado com a disposição de rejeito pelo método convencional.

Além dos ganhos na capacidade de armazenamento dos reservatórios, a maior densificação do rejeito, devido ao processo de ressecamento, proporciona o aumento da resistência, baixas poropressões e eventualmente sucções quando o material passa para o estado não saturado (Ulrich *et al.*, 2000).

### **2.3 Processo de Ressecamento**

O processo de ressecamento de um solo é caracterizado pela perda de água do material por meio de evaporação, drenagem ou a combinação dos dois fatores. A perda de água no processo de ressecamento reflete na redução volumétrica do material.

O início do processo de ressecamento é marcado exclusivamente por variações verticais, isto é, contrações unidimensionais (CHANDLER, 1988). Ao longo do processo de ressecamento, tensões de tração laterais são formadas devido à diminuição do volume. Quando essas tensões superam a resistência à tração do material, ocorre a formação de trincas. A ocorrência de trincas indica o início do processo de contração tridimensional.

Segundo Krizek *et al.* (1977), o processo de ressecamento provoca a variação do índice de vazios, teor de umidade e poropressões do material, influenciando nas propriedades mecânicas (compressibilidade) e propriedades hidráulicas (permeabilidade).



### 2.3.1 Contração do Solo

A contração é um dos fenômenos mais importantes do solo, ocorrendo exclusivamente em solos coesivos (Oliveira Filho, 1998). Segundo Allbrook (1992), a redução do volume do solo, nos estágios iniciais do processo de ressecamento, equivale à perda de água do material por drenagem do material saturado.

A variação volumétrica do solo é normalmente apresentada pela curva de contração, descrevendo a relação entre o índice de vazios e o teor de umidade (Tariq & Durnford, 1993). A Figura 2.7 apresenta a curva de contração típica de solos coesivos.

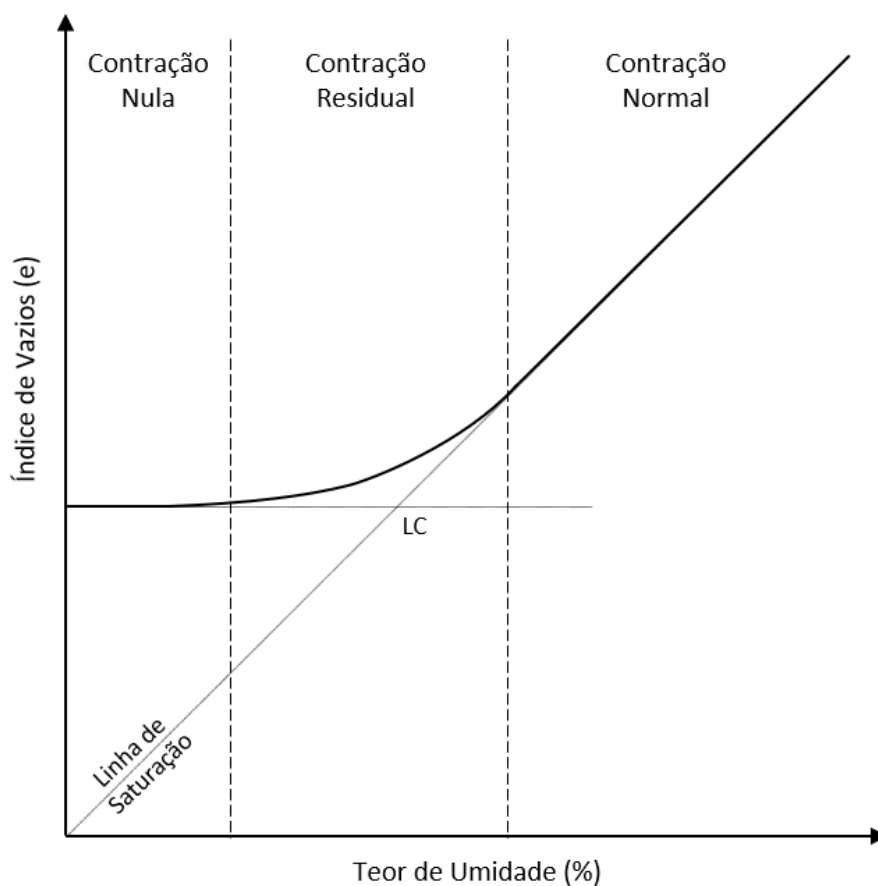


Figura 2.7. Curva de contração típica de solos coesivos.

(adaptado de Oliveira Filho, 1998)

A curva de contração pode ser separada em três zonas, sendo a zona de contração normal onde a variação volumétrica equivale essencialmente à perda de água do material saturado; a zona de contração residual representa o trecho da curva onde a variação volumétrica é menor que o volume de água removido do solo, implicando no aumento do volume de ar; e a zona de contração nula, sendo a fase onde não há mais variação volumétrica do solo mesmo com diminuição no teor de umidade, indicando o estado mais denso do material (Oliveira Filho, 1998)

De acordo com Lambe & Whitman (1969), a intersecção de uma linha tangente traçada da zona de contração normal com uma linha tangente traçada da zona de contração nula, define o teor de umidade referente ao limite de contração do solo.

O potencial de contração do solo é influenciado pela porcentagem de argila, argilomineral, formação geológica, arranjo das partículas, tensões do solo, grau de intemperismo, teor de umidade inicial, dentre outros fatores (Rao & Satyadas 1985).

Segundo Oliveira Filho (1998), o limite de contração do solo indica o quão contrátil o solo pode ser, isto é, limites de contração baixos indicam altas capacidades de contração do solo.

### **2.3.2 Formação e Característica das Trincas**

Conforme apresentado por Chandler (1988), a formação e propagação das trincas se dá quando tensões de tração, devido ao processo de contração, excedem as forças de resistência à tração do material. À medida que as forças de tração aumentam ao longo do processo de ressecamento, as fissuras se alargam e tornam-se mais profundas.

Morris et al (1992) citam que a morfologia das trincas depende dos argilominerais constituintes do material, das propriedades físicas e mecânicas do rejeito (plasticidade e resistência à tração) e das variáveis climáticas, podendo citar como mais relevantes a incidência solar, temperatura, umidade relativa do ar, velocidade dos ventos e intensidade pluviométrica.

Segundo Oliveira Filho (1998), a interceptação de trincas e/ou a formação de trincas adjacentes a uma trinca principal existente, tendem a formar ângulos de

aproximadamente 90°, constituindo um mosaico de descontinuidades apresentando feições poligonais.

De acordo com Yassoglou et al. (1994), trincas de mesma profundidade apresentam aberturas praticamente constantes, indicando a linearidade da área das trincas em função da profundidade.

## **2.4 Modelo de Ressecamento de Rejeito**

A previsão das propriedades dos resíduos de mineração e de seu comportamento ao longo do período de estocagem é fundamental para entendimento do processo de enchimento e previsão da vida útil das estruturas de contenção de rejeito.

Segundo Villar (2002), os modelos propostos para previsão de sedimentação, adensamentos a grandes deformações e das propriedades do rejeito depositados via úmida estão bem calibrados, apresentando resultados coerentes e satisfatórios.

Devido à complexidade das soluções analíticas para o processo de ressecamento, vários modelos numéricos vêm sendo desenvolvidos e implementados para melhor previsão do comportamento dos resíduos expostos ao ressecamento. Oliveira Filho (1998) e Villar (2002) citam alguns modelos que seguem esta linha de pesquisa, podendo destacar os trabalhos de Krizek (1977), Cargill (1985), Cooling (1985), Brownswijk (1988), Swarbrick & Fell (1991) e por fim, o modelo de ressecamento proposto por Abu-Hejleh & Znidarcic (1995), que vem apresentando resultados otimistas na previsibilidade do comportamento dos resíduos de mineração, conforme apresentado em Almeida (2004) e Lima (2006).

### **2.4.1 Modelo de Ressecamento Proposto por Abu-Hejleh & Znidarcic**

O modelo de ressecamento proposto por Abu-Hejleh & Znidarcic (1995) corresponde aos processos que ocorrem no rejeito após sua disposição, sendo: processos de adensamento por compressão unidimensional, contração unidimensional, início da formação e propagação das trincas e contração tridimensional do material.

São adotadas as seguintes hipóteses e simplificações para o modelo proposto:

- O material permanece saturado ao longo dos processos de adensamento por compressão unidimensional e contração tridimensional até que o índice de vazios ( $e$ ) atinja o índice de vazios equivalente ao limite de contração ( $e_{min}$ ), isto é, ponto onde o material passa para o estado parcialmente saturado;
- São considerados somente fluxos unidimensionais verticais, que resultam em deformações verticais durante o processo de adensamento por compressão unidimensional e deformações verticais e laterais ao longo do processo de ressecamento tridimensional;
- O material é horizontalmente homogêneo;
- O processo de ressecamento resulta em abertura e profundidades de trincas uniformes;
- Os planos vertical e horizontal são os planos de tensões principais através de qualquer ponto da fissura e da camada de solo saturada ao longo do processo de ressecamento;

A equação governante para a fase de compressão tridimensional do processo de ressecamento proposto por Abu-Hejleh (1993) baseou-se na teoria de adensamento a grandes deformações proposta por Gibson et al. (1967).

A equação governante do processo de ressecamento é uma equação diferencial de derivadas parciais de segunda ordem, não linear, do tipo parabólica, sendo o índice de vazios ( $e$ ) a variável dependente em coordenadas lagrangeanas.

Posteriormente, Yao & Znidarcic (1997) implementaram a perda de água que ocorre pelas paredes das trincas na equação para análise do ressecamento. A equação 2.1 descreve matematicamente o processo de compressão tridimensional do ressecamento.

$$\frac{\partial}{\partial a_1} \left[ k - \frac{k}{\gamma_w} \frac{(e\gamma_w + \gamma_s)}{1 + e} \left( 1 - \frac{\partial \sigma'_v}{\partial e_{cr}} \frac{de_{cr}}{d\sigma'_v} \right) - \frac{k}{\gamma_w} \frac{\alpha(1 + e_{cr})}{1 + e} \left( \frac{\partial \sigma'_v}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial a_1} \right) \right] - \eta E \frac{\partial \alpha}{\partial a_1} = \frac{1}{\alpha(1 + e_{cr})} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.1)$$

Onde  $a_1$  é a coordenada lagrangeana,  $k$  é o coeficiente de permeabilidade, “ $e$ ” é o índice de vazios no tempo,  $\gamma_w$  é o peso específico da água,  $\gamma_s$  peso específico real

dos grãos,  $\sigma'_v$  é a tensão efetiva vertical,  $t$  é o tempo,  $e_{cr}$  é o índice de vazios na abertura da trinca,  $\alpha$  é a função alpha,  $\eta$  é o parâmetro de evaporação das paredes das trincas e  $E$  é a taxa de evaporação.

A solução da equação 2.1 requer que sejam conhecidas as funções constitutivas: relação de compressibilidade ( $\sigma'_v \times e$ ), permeabilidade ( $k \times e$ ), início de abertura e propagação das trincas - *cracking function* ( $\sigma'_v \times e_{cr}$ ), relação de deformação vertical e lateral durante o processo de contração tridimensional – *alpha function* e parâmetro eta ( $\eta$ ) referente à evaporação das paredes da trinca.

A função de abertura e propagação das trincas (*cracking function*) pode ser obtida experimentalmente em ensaios realizados em centrífugas (Oliveira Filho, 1998) ou em ensaios e observações de campo (Silva, 2003).

A função de deformação vertical e lateral durante o processo de contração tridimensional (*alpha function*) pode ser determinada a partir de ensaios de contração livre (Silva, 2003).

Não existe uma proposta de metodologia para obtenção do parâmetro eta ( $\eta$ ), sendo estimado devido a característica atmosférica da ocorrência do processo de ressecamento. Segundo Oliveira Filho (1998), a utilização de valores entre 2,0 e 3,0 apresentaram boa aderência com ensaios realizados em centrífuga.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo tem como finalidade apresentar os materiais e métodos utilizados para a análise e compreensão do processo de ressecamento do rejeito proveniente da lavagem de bauxita da Mineração Rio do Norte.

Para isso, foram realizados ensaios de laboratório para estudo do processo de sedimentação e adensamento por peso próprio em ensaios de coluna e foi proposta uma metodologia para ensaio de coluna modificado.

Além dos ensaios de laboratório, foram construídos dois reservatórios, em escala piloto, em uma área experimental, possibilitando o acompanhamento e monitoramento do ressecamento das camadas dispostas de rejeito em condições de campo.

#### 3.1 Ensaio de Laboratório

Para a campanha de ensaios de laboratório do rejeito de bauxita da MRN, foram coletadas amostras do material em uma derivação da tubulação de recalque das bombas *booster*, conectada ao sistema de bombeamento de rejeito, preservando as condições normais de operação do material dragado. As amostras foram acondicionadas em recipientes de 5 e 20 litros, conforme lustrado na Figura 3.1.



Figura 3.1. Coleta e acondicionamento de amostras de rejeito.

### 3.2 Ensaios de Sedimentação em Coluna

Com o objetivo de estudar a sedimentação do rejeito de bauxita e o comportamento do deslocamento da interface sólido-líquido sobrenadante, foram realizados ensaios de sedimentação em coluna utilizando provetas convencionais de 2000 mL e tubos em vidro de grandes dimensões.

A realização dos ensaios em proveta convencional de 2000 mL com diâmetro interno de 8,5 cm e tubo em vidro de grandes dimensões com diâmetro interno de 18,5 cm tiveram a finalidade de analisar as possíveis divergências dos resultados dos ensaios de sedimentação, conforme estudado por Silva (2008). As Figura 3.2 e Figura 3.3 ilustram a proveta convencional de 2000 mL e o tubo de grandes dimensões utilizados nos ensaios, respectivamente.



Figura 3.2. Proveta para ensaio convencional de sedimentação.



Figura 3.3. Tubo de grandes dimensões para ensaio de sedimentação.

Buscando a maior representatividade dos resultados, os ensaios foram conduzidos com o rejeito apresentando teores de sólidos entre 18% e 22%. A faixa de concentração de sólidos para realização dos testes foi definida por ser o *range* operacional do rejeito dragado e disposto nos reservatórios para o processo de ressecamento.

O ensaio consistiu na homogeneização de uma amostra de rejeito com teor de sólidos desejado e deposição do material na proveta/tubo, formando a coluna de rejeito. A coluna é deixada em repouso, sendo verificada e anotada a variação da interface líquido-sólido em função do tempo, até a estabilização. Dessa forma, é possível definir a velocidade de sedimentação do rejeito, bem como determinar o momento onde a variação da interface líquido-sólido passa a ser influenciada majoritariamente pelo processo de adensamento por peso próprio.

O desenho esquemático do início e do final do ensaio de sedimentação em coluna está apresentado na Figura 3.4, sendo  $h_i$  a altura inicial da polpa de rejeito,  $h_f$  altura da interface líquido-sólido e  $h_w$  altura do líquido sobrenadante.



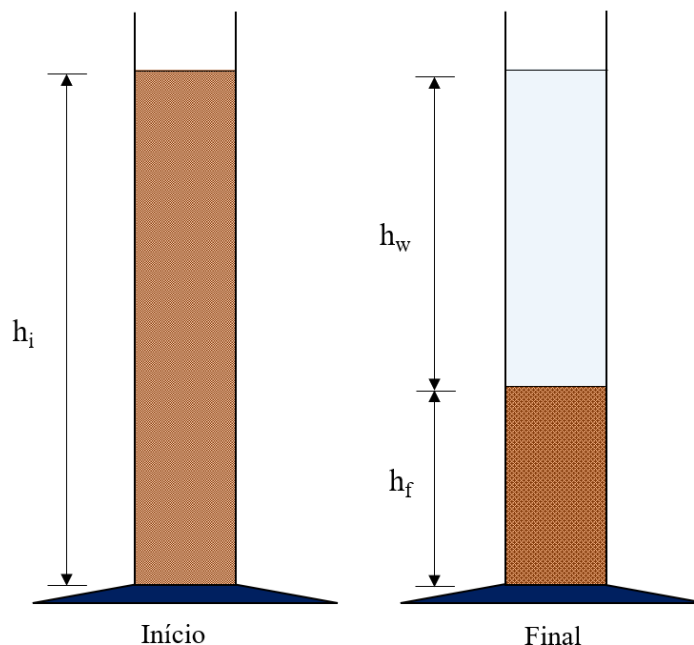


Figura 3.4. Representação esquemática do ensaio de sedimentação em coluna.

Para a realização do ensaio de sedimentação em coluna, foram realizados três ensaios em proveta de 2 litros com concentrações de 18,7%, 20,6% e 21,7% de sólidos e dois ensaios em tubo de grandes dimensões com teores de sólidos de 19,8% e 22,2%.

Os ensaios realizados nas provetas de 2000 ml e em tubo de grandes dimensões foram monitorados por 17 e 19 dias, respectivamente.

### 3.3 Ensaio de Coluna Modificado

Com a finalidade de estudar o ganho de teor de sólidos devido aos processos de sedimentação e adensamento por peso próprio das camadas de rejeito proveniente da lavagem de bauxita, foi proposta uma campanha de ensaios em coluna modificados.

Os ensaios de coluna modificados foram performados em camadas de 80 e 50 cm, simulando as médias das camadas dispostas nos lançamentos dos testes do *ponds* experimentais, que serão apresentados no item 3.6. Os tubos utilizados nos testes possuem diâmetro de 15 cm e alturas de 80 cm, para as colunas de 50cm, e 100 cm de altura para as colunas de 80cm. Não foi utilizado óleo vegetal ou outro material

para diminuir o atrito com a parede dos tubos. A Figura 3.5 ilustra o esquema do ensaio de coluna modificado.



Figura 3.5. Ensaio de sedimentação em coluna modificado.

Para simulação do comportamento das primeiras camadas assentes a uma base permeável, as colunas foram construídas com elemento drenante na base do tubo, possibilitando os fluxos verticais.

Com objetivo da avaliação qualitativa da influência da diminuição da permeabilidade de fundo no processo de sedimentação e adensamento por peso próprio, simulando a consolidação de camadas previamente dispostas, foram propostos três tipos de elemento drenante, sendo separados em baixa, média e alta permeabilidade.

Para simulação das bases drenante, foram realizados 18 furos no *cap* inferiores do tubo e instaladas: i) duas camadas de geotêxtil não tecido como elemento de alta permeabilidade; ii) uma camada de geotêxtil não tecido e uma camada de papel filtro como dispositivo de média permeabilidade; iii) duas camadas de geotêxtil não tecido e duas camadas de papel filtro como material de baixa permeabilidade. A Figura 3.6 apresenta o *cap* modificado para atuar como elemento drenante.

O geotêxtil não tecido utilizado como elemento drenante foi o RT10, apresentando uma permeabilidade normal de 0,39 cm/s. O papel filtro utilizado como elemento drenante apresenta grau de filtragem de 3 $\mu$ m e gramatura de 80g/m<sup>2</sup>

As condutividades hidráulicas dos elementos filtrantes foram obtidas através de ensaios de permeabilidade conforme preconizado na NBR 14545, sendo realizado ensaios a carga variável (elementos de média e baixa permeabilidade) e permeabilidade a carga constante (elemento de alta permeabilidade), sendo obtido: baixa permeabilidade – 9,23x10<sup>-5</sup> cm/s; média permeabilidade – 2,06x10<sup>-3</sup> cm/s; alta permeabilidade – 1,47x10<sup>-2</sup> cm/s.

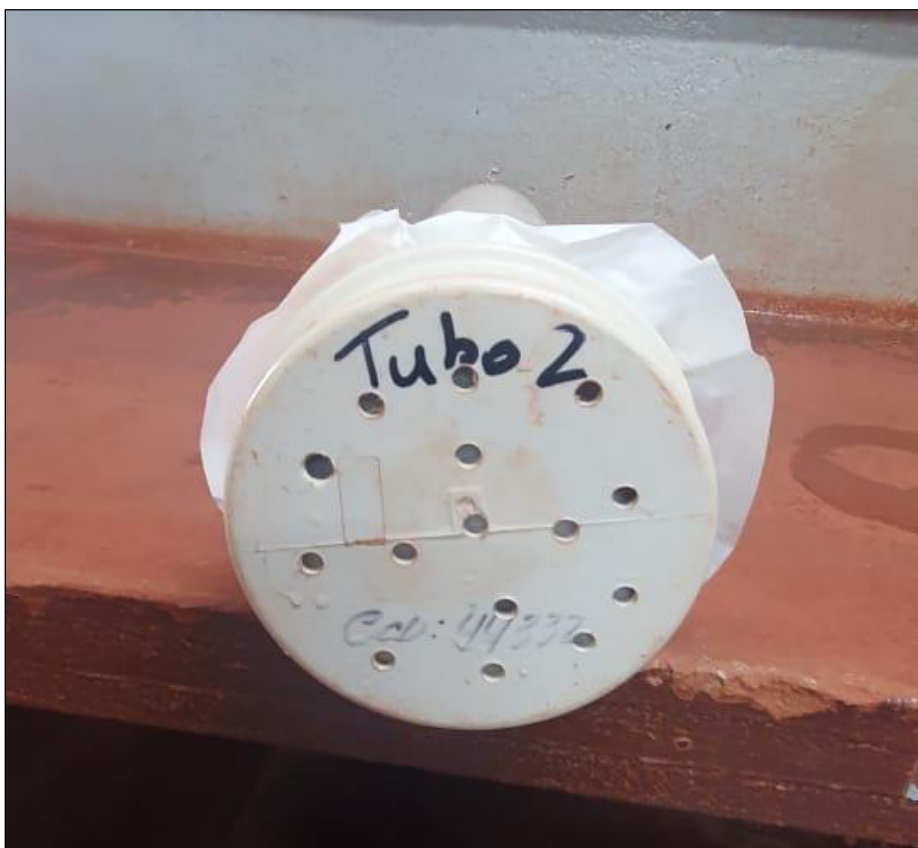


Figura 3.6. Base drenante do ensaio de coluna modificado.

O ensaio de coluna modificado consistiu na homogeneização de uma amostra de rejeito com o teor de sólidos desejado e deposição do material no tubo, formando a coluna de rejeito. O conjunto tubo mais rejeito foi pesado e deixado em repouso. A cada 12h foi retirada a água sobrenadante do rejeito com auxílio de pipeta Pasteur

ou seringa, tomando o cuidado para não remover nenhuma partícula sólida. Após o esgotamento da água sobrenadante, a coluna é transportada para uma balança onde é aferida a massa do conjunto da coluna de rejeito.

De posse da variação de massa da coluna de rejeito, é possível inferir a variação de teor de sólidos médio da polpa.

Ao longo da realização do ensaio, é aferido a variação da altura da camada de rejeito com auxílio de trena, possibilitando a construção de uma curva da altura da camada de sólidos de cada coluna de rejeito.

Foram realizadas quatro baterias de ensaios de coluna modificado, alterando a espessura da camada, permeabilidade do elemento drenante e teores de sólidos iniciais da polpa disposta em coluna. A Tabela 3.1 discrimina as características dos ensaios realizados.

Tabela 3.1. Discriminação dos ensaios realizados em coluna modificada.

Ensaio	Altura da Camada (cm)	Permeabilidade (cm/s)	Teor de Sólidos inicial (%)
T2	50	Alta $k_a = 1,47 \times 10^{-2}$	22,0%
	80		
T3	50	Média $k_m = 2,06 \times 10^{-3}$	21,3%
	80		
T4	50	Baixo $k_b = 9,23 \times 10^{-5}$	22,5%
	80		
T5	50	Baixo $k_b = 9,23 \times 10^{-5}$	27,1
	80		

Os ensaios foram nomeados: “*Ensaio (Ti)*” – “*Altura da camada (50 ou 80)*” – “*Permeabilidade da base (“A” Alta, “M” média e “B” baixa)*” – “*Teor de sólidos inicial (%)*”.

A variação de massa e altura da camada de rejeito foi monitorada por, pelo menos, 60 dias.

### 3.4 Teste de Campo – Reservatórios Experimentais

Os testes de campo consistiram na construção de dois *ponds* experimentais, em escala piloto, com o objetivo de simular os ciclos de disposição de rejeito e estudar, para diferentes condições de lançamento, condições climáticas, e espessuras das camadas, o comportamento do ressecamento do rejeito.

O dimensionamento geométrico, *layout* de espigotamento e sistema de extravasor dos *ponds* experimentais apresentaram considerações mínimas para mitigação de interferências gerais devido ao fator de escala, com o objetivo de apresentar resultados suficientemente representativos para simulação de condições operacionais e oferecerem resultados válidos para aplicação futuras em escala industrial de reservatório de rejeito.

#### 3.4.1 Localização de Área Experimental

O local definido para a implantação da área experimental foi a região de empréstimo a oeste do reservatório SP-09, localizado no sistema de rejeitos da MRN, conforme indicado na Figura 3.7.

A área foi escolhida por ser uma região com pouco tráfego de equipamentos e sem interferência com projetos futuros.

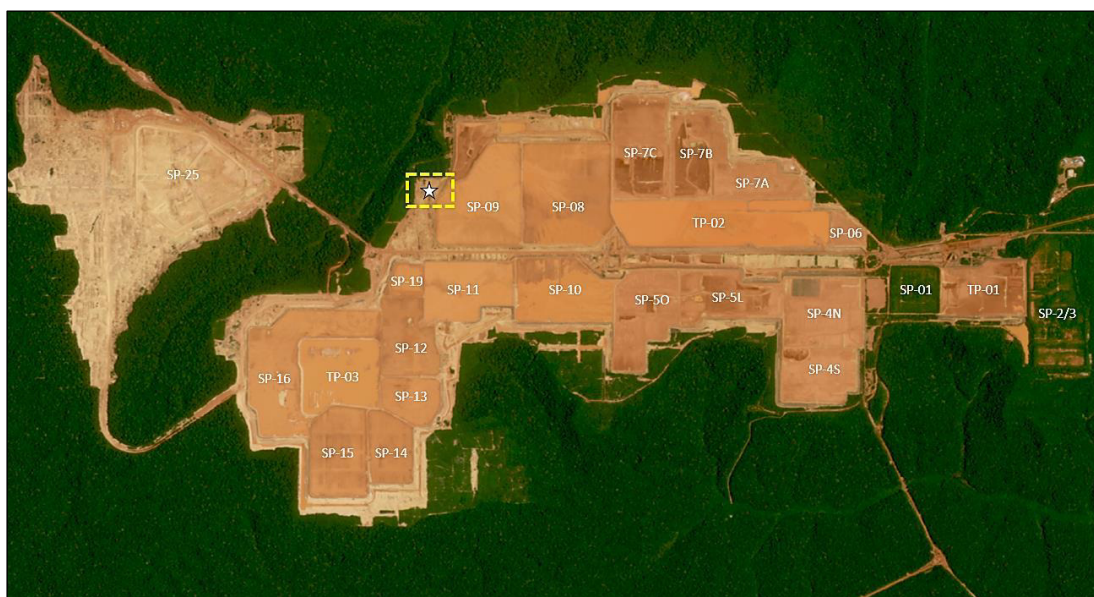


Figura 3.7. Localização da área de implantação dos *ponds* experimentais.



A Figura 3.8 ilustra o local de implantação dos *ponds* piloto e área teste.



Figura 3.8. Localização dos *ponds* piloto e área teste.

### 3.4.2 Geometria dos *Ponds* Experimentais

Os *ponds* experimentais foram projetados com áreas unitárias de  $600\text{m}^2$ , sendo 20m de largura e 30m de comprimento, conforme apresentado na Figura 3.9. Como forma de garantir uma elevação final mínima de rejeito pós-secagem de 2,0m, considerado este um valor razoável para um estudo piloto, os taludes internos dos diques possuem altura mínima de 2,5m entre crista e o fundo do reservatório, com inclinação igual a 1V:1,5H. Desta maneira, a premissa da espessura final máxima de 2,0m de rejeito foi respeitada, considerando ainda borda livre remanescente para a segurança hidrológica do sistema contra galgamentos.

Foi prevista, também, a regularização do fundo do reservatório, aplicando-se neste uma inclinação constante de 0,3%, com cotas decrescendo da parede de instalação dos espigotes em direção ao sistema extravasor. Este valor foi definido tomando-se como base a inclinação com que o rejeito, de maneira geral, ocupa os reservatórios do sistema ao final do ciclo de disposição (lançamento e tempo de secagem). A

existência de uma inclinação de fundo faz com que o processo de ocupação do rejeito ao longo do reservatório se dê de maneira mais ordenada e de projeção homogênea.

As cristas foram mantidas em elevação constante e largura de 4m, oferecendo, assim, condições de trafegabilidade para caminhões e equipamentos pesados.

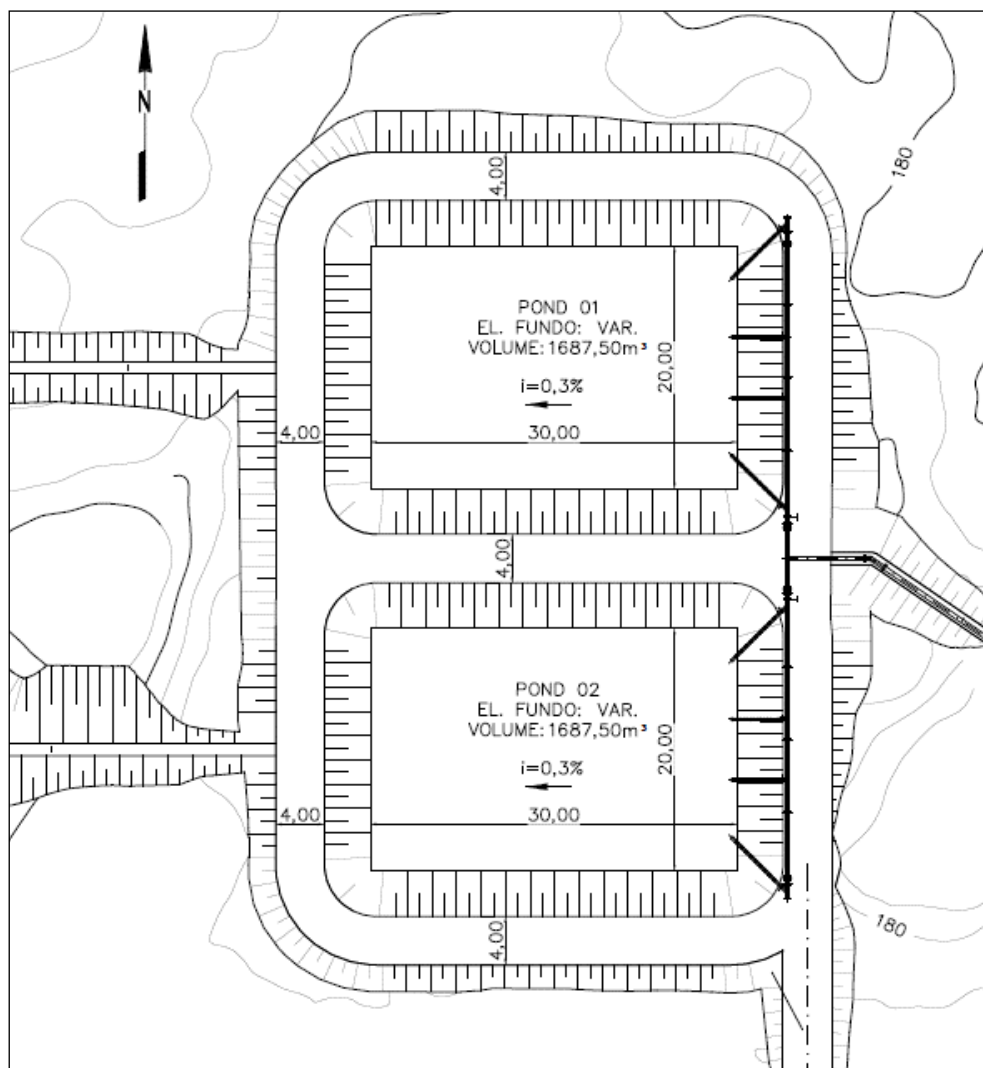


Figura 3.9. Geometria dos Reservatórios Experimentais.



### 3.4.3 Terraplenagem

Os trabalhos de terraplenagem foram realizados com auxílio de caminhões basculantes de 16m<sup>3</sup>, escavadeira hidráulica CAT 320 – braço longo e trator de esteira D6.

A primeira etapa de terraplenagem consistiu na limpeza da área de implantação dos *ponds* piloto e a escavação da fundação até a cota de projeto, já considerando as inclinações de 0,3% em direção à parede dos extravasores.

Após a conclusão da escavação do fundo dos reservatórios, iniciou-se o processo de compactação e construção das paredes dos reservatórios. O trabalho de compactação foi realizado via esteiramento com auxílio de trator de esteira D6. O material utilizado para construção das paredes foi argila amarela (belterra), comumente utilizada como material de engenharia no sistema de rejeito da MRN.

A Figura 3.10 ilustra as etapas de corte, compactação e acabamento da infraestrutura dos *ponds* piloto.



Figura 3.10. a) Início da escavação do fundo do reservatório; b) Início da compactação com trator D6; c) Representação do aterro compactado e corte do terreno; d) Terraplenagem dos *ponds* em fase final.



Para instalação do sistema de extravasores em caixa metálica, foi necessário o corte da parede externa e compactação com auxílio de compactador vibratório manual do tipo “sapinho”. A Figura 3.11 ilustra o processo de instalação e compactação dos extravasores.



Figura 3.11. a) Corte da parede para instalação do extravasor, b) Instalação da tubulação do extravasor; c) Compactação do aterro sobre o extravasor com compactador manual; d) Vista do extravasor após instalação.

A Figura 3.12 apresenta a vista em planta e indicações da geometria após o processo de terraplenagem da área experimental.

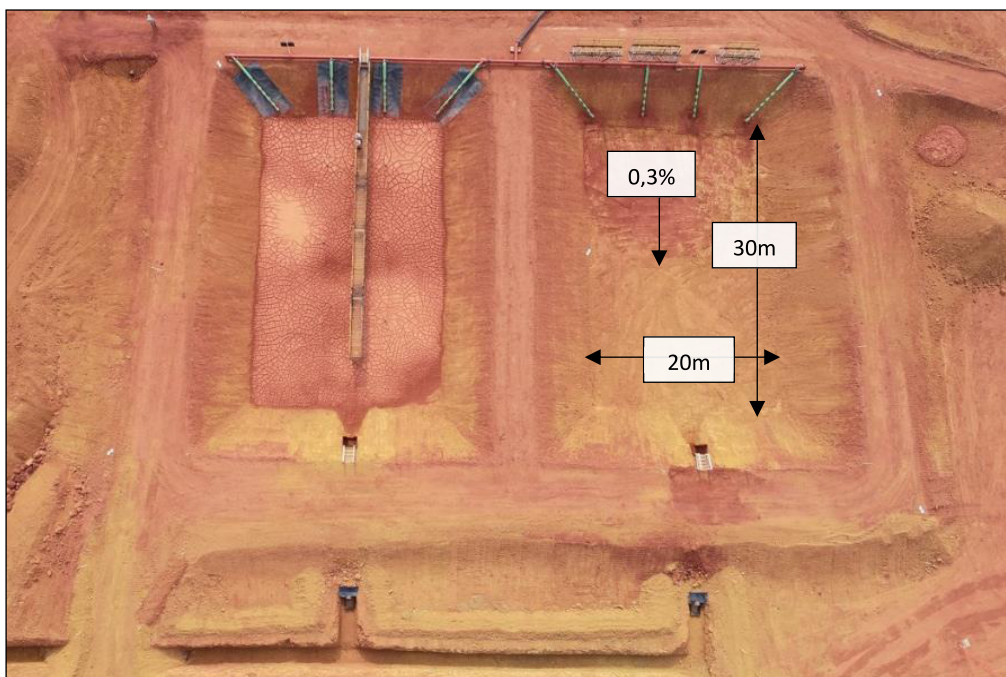


Figura 3.12. Vista dos *Ponds* experimentais e área teste.

#### 3.4.4 Layout de Tubulação e Espigotamento

A partir da tubulação de recalque da draga com diâmetro de 28", localizada na crista do SP-09, foi feita a conexão de alimentação dos reservatórios experimentais com tubulação de diâmetro 12" em PEAD, com aproximadamente 180 m de comprimento.

Na tubulação principal, próximo aos reservatórios experimentais, foi instalada uma válvula do tipo borboleta, que permite a adequação do regime de fluxo e velocidade de disposição do rejeito. Foi instalado um *manifold* na chegada dos reservatórios de forma a atender alternativamente cada estrutura. Válvulas específicas de bloqueio foram instaladas, além de um manômetro, para verificação da pressão da linha. Foi instalado também um ponto de amostra antes do *manifold* de distribuição dos reservatórios, possibilitando a amostragem e determinação das características do rejeito na alimentação dos reservatórios ao longo do enchimento.

Os espigotes, 04 para cada reservatório, foram construídos em tubulação de diâmetro 08" e 10", em aço carbono, dotados de válvula em cada trecho. O dimensionamento dos diâmetros foi considerado para se ter velocidades adequadas na descarga dos espigotes ao longo do processo de enchimento dos reservatórios.

O projeto e vista do layout de tubulação e espigotamento está apresentado na Figura 3.13.

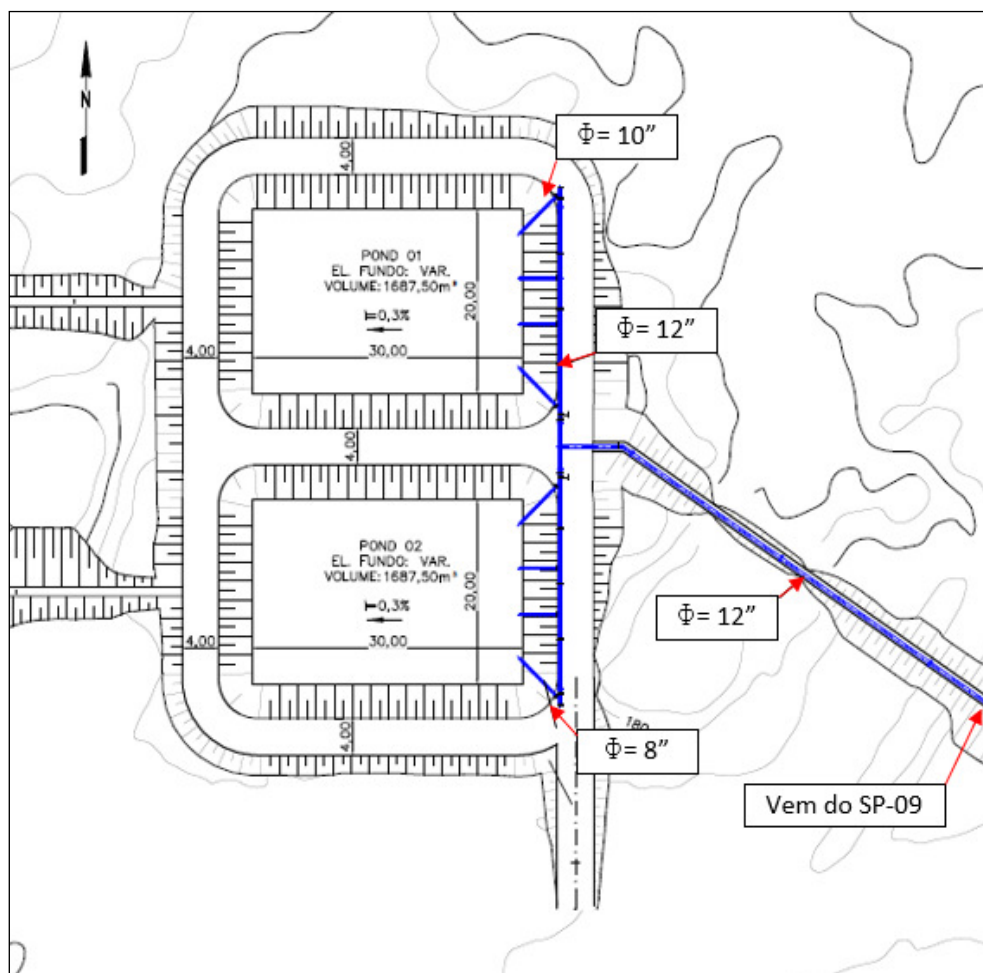


Figura 3.13. Layout de tubulação e espigotamento dos reservatórios piloto.

### 3.4.5 Caldeiraria e Montagem de Tubulação

O trabalho de caldeiraria e montagem de tubulação consistiu na fabricação dos extravasores em caixa metálica, adaptação de guarda corpos, preparação das plataformas de amostragem em treliça metálica, confecção dos espigotes tipo flauta e *manifold* de alimentação de rejeito, montagem da tubulação de alimentação de rejeito dos *ponds* e instalação de válvulas e manômetros.

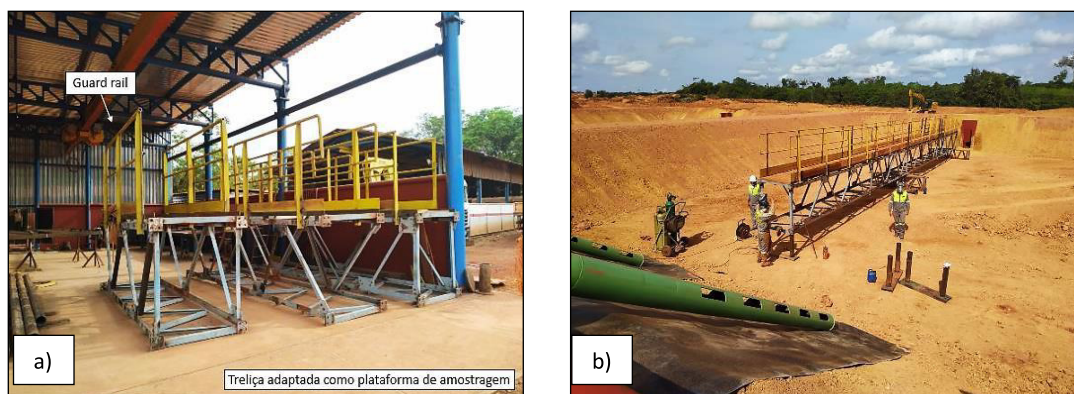
As etapas de montagem de tubulação estão apresentadas na Figura 3.14.





Figura 3.14. a) Usinagem da tubulação de alimentação em PEAD; b) Montagem da tubulação de alimentação em PEAD; c) Montagem do manifold de alimentação; d) Instalação do espigote tipo flauta.

A Figura 3.15 apresenta a parte de execução e adaptação dos guarda corpos das passarelas de amostragem.





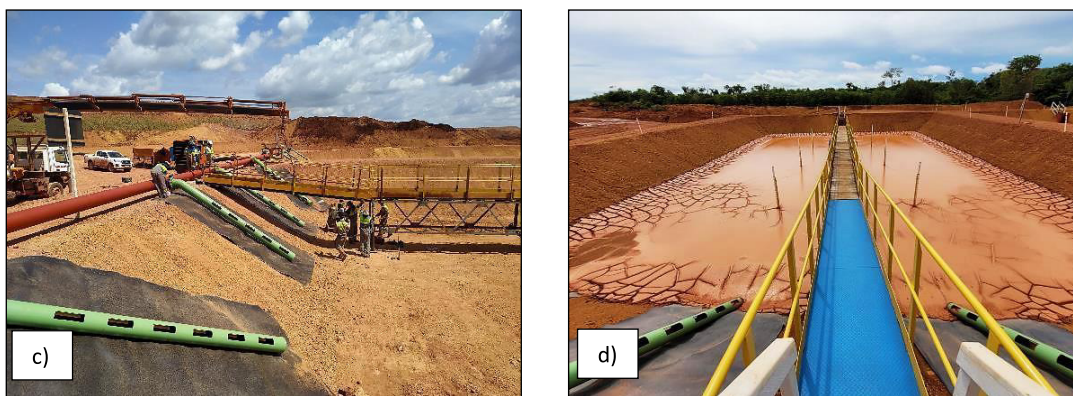


Figura 3.15. a) Instalação do guarda corpo na treliça adaptada como passarela de amostragem; b) Instalação das sapatas na plataforma de amostragem, c) Instalação da rampa de acesso à plataforma, c) Plataforma de amostragem instalada

A Figura 3.16 apresenta a vista em planta dos reservatórios experimentais e indicação das tubulações após conclusão da etapa de montagem.

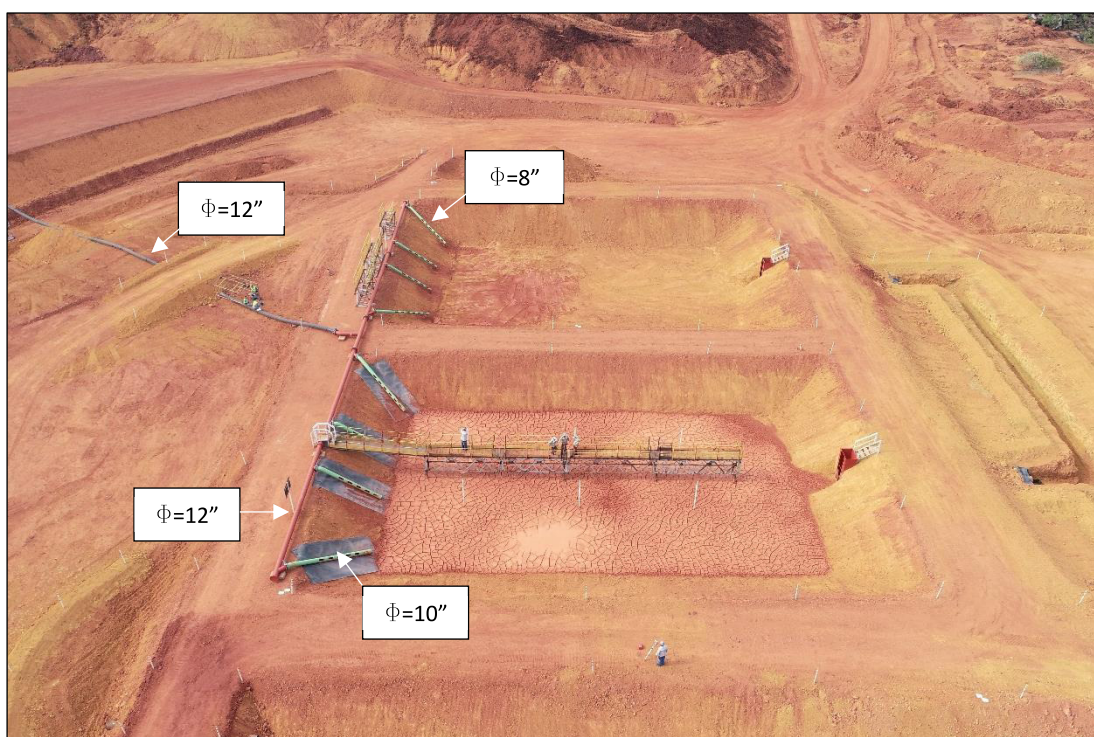


Figura 3.16. Vista do Layout de tubulação dos reservatórios experimentais.

### 3.4.6 Caracterização Geológica-Geotécnica da Área Experimental

Para melhor entendimento das propriedades geológica-geotécnica, físicas e hidráulicas da fundação da área experimental, foi proposta uma campanha de investigação geológica, ensaios *in situ* e de laboratório.

A campanha de investigação geológica-geotécnica consistiu na execução de dois pontos de prospecção (P5 e P6) localizados no centro de implantação dos *ponds*, conforme apresentado na Figura 3.17, sendo realizado ensaios SPT a cada metro.

Após a execução de prospecção geotécnica no ponto P5 e definição das estratigrafias presentes na área teste, foram realizados ensaios de infiltração em furo de sondagem na vertical P6 para cada camada estratigráfica encontrada, conforme recomendações da ABGE.

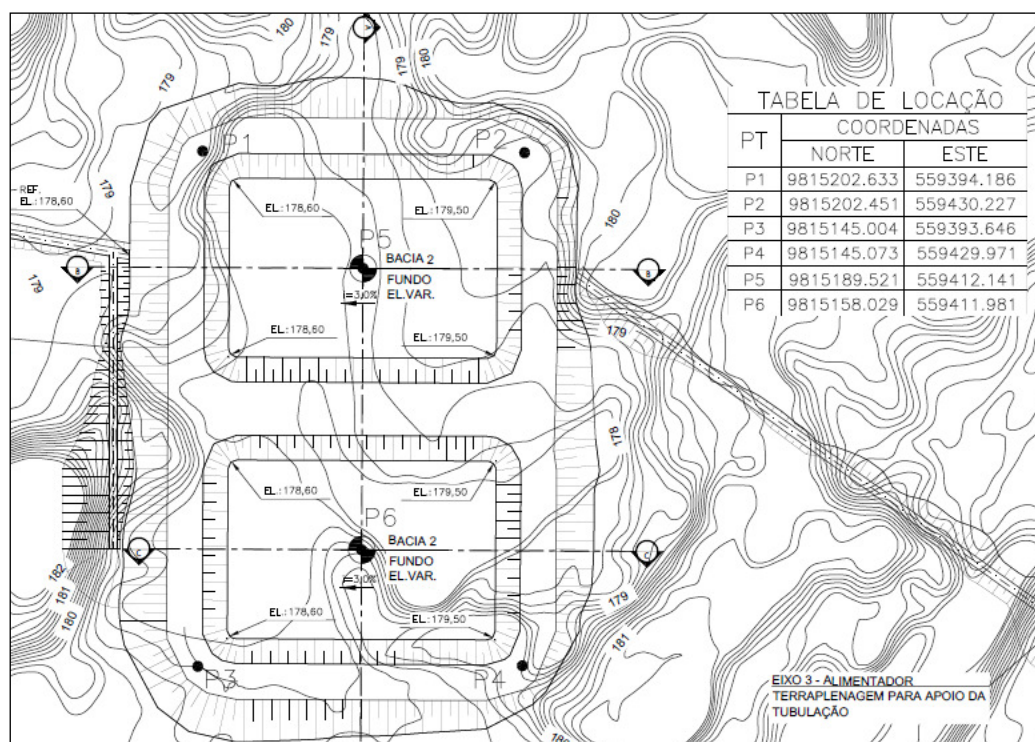


Figura 3.17. Localização dos pontos de investigação geológica-geotécnica.

Para a campanha de ensaios *in-situ*, foram executadas duas trincheiras exploratórias em cada reservatório, conforme apresentado na Figura 3.18, para realização de ensaio de permeabilidade e possibilitando a coleta de amostras deformadas do material de fundação para caracterização geotécnica. Além disso, foram realizados



ensaios de frasco de areia, seguindo a NBR 7185, para determinação do peso específico ao lado de cada trincheira.

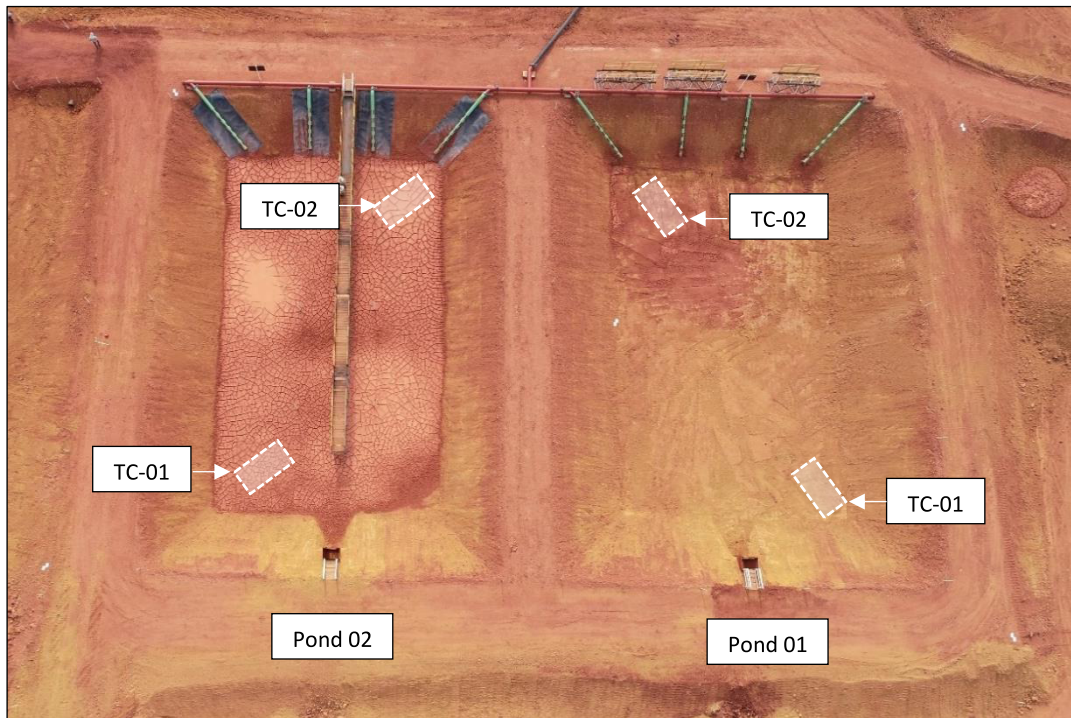


Figura 3.18. Localização das trincheiras de exploração nos *Ponds* Piloto.

Os ensaios de permeabilidade *in situ* foram executados com auxílio de caminhão pipa e hidrômetro em trincheiras com dimensões aproximadas de 1,5 m de comprimento, 1,0m de largura e 0,8m de profundidade, conforme ilustrado na Figura 3.19.



Figura 3.19. Ensaio de permeabilidade em trincheira.

Os ensaios para determinação do peso específico, foram realizados pelo método frasco de areia, devido a presença de material granular, impossibilitando a utilização do ensaio de cravação de cilindro biselado. O ensaio de frasco de areia está representado na Figura 3.20.



Figura 3.20. Determinação do peso específico aparente pelo ensaio Frasco de Areia.



### 3.4.7 Sistema de Extravasamento

O sistema de extravasamento proposto para os dois reservatórios experimentais possui componentes de dimensões idênticas, sendo composto por um extravasor metálico operacionalizado com *stop-logs* em madeira e medidor de vazão tipo vertedor triangular à jusante da tubulação de extravasamento, conforme ilustrado nas Figura 3.21 e Figura 3.22, respectivamente.



Figura 3.21. Extravasor metálico e stop-logs em madeira.



Figura 3.22. Medidor de vazão em vertedor triangular.

O extravasor em caixa metálica apresenta dimensões: 1,2 m x 0,8 x 3,0 m (largura x comprimento x altura) e aberturas para o sistema de *stop-log* de 0,70m. A tubulação de extravasamento utilizada foi de 20” de diâmetro e 1% de declividade.

O medidor de vazão utilizado no sistema de extravasamento é do tipo vertedor triangular metálico com 10cm de seção vertente.

### 3.4.8 Sistema de Espigotamento

De forma a possibilitar o controle das pressões e velocidades do rejeito no momento de disposição, mitigar a segregação do material e diminuir o efeito de escala dos *ponds* piloto, espigotes tipo flauta e válvulas tipo borboletas foram utilizadas no sistema de espigotamento.

A Figura 3.23 ilustra os espigotes tipo flauta e válvulas borboletas instalados em campo.

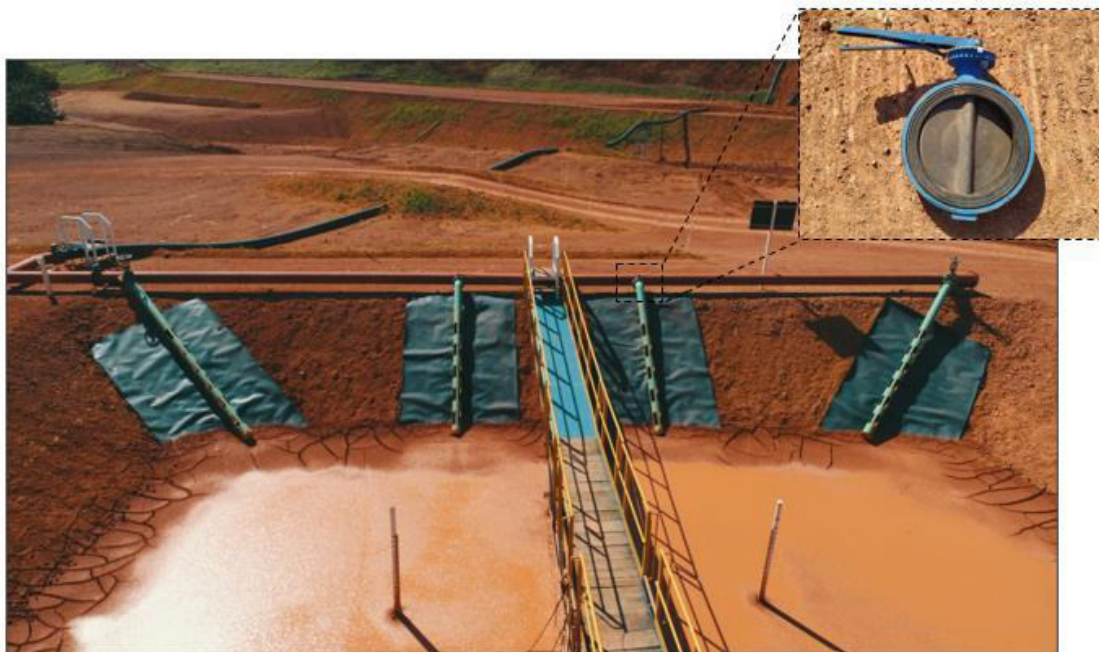


Figura 3.23. Representação dos espigotes tipo flauta e válvulas tipo borboletas.



### 3.4.9 Plataforma de Amostragem

Para a amostragem dos rejeitos no interior dos reservatórios, foi necessária a instalação de plataformas de acesso. As plataformas foram executadas em treliças metálicas fixadas no fundo do reservatório.

A Figura 3.24 ilustra a plataforma de amostragem instalada dentro dos reservatórios experimentais.

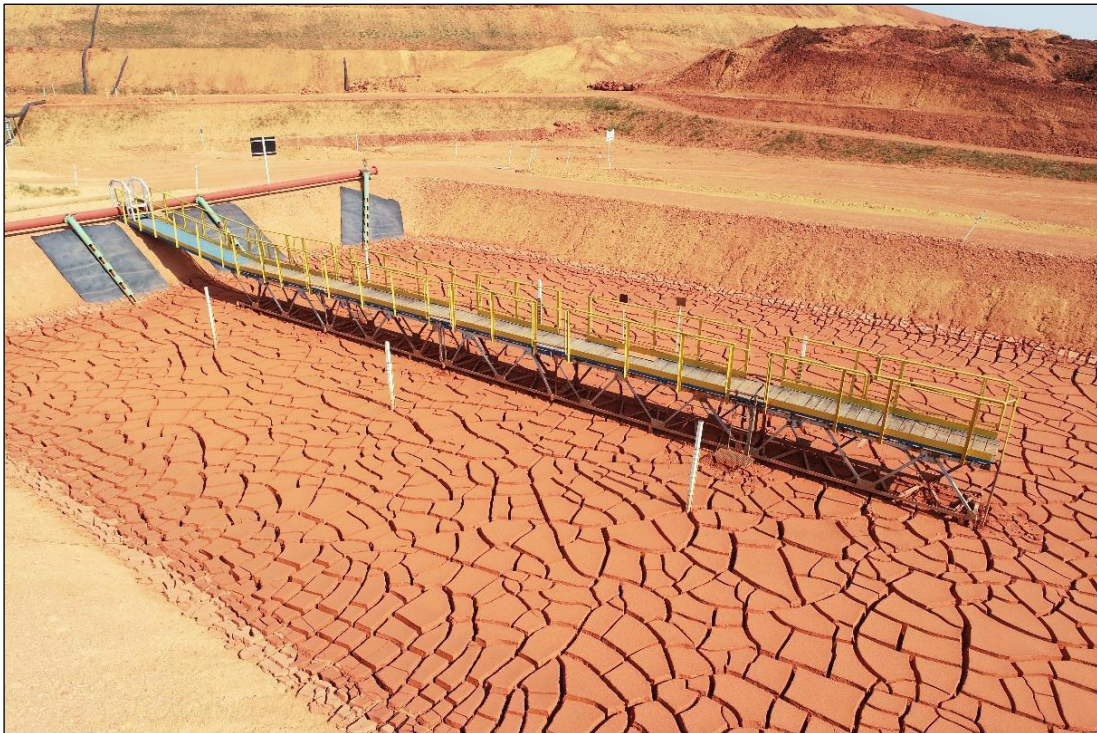


Figura 3.24. Plataformas de amostragem.

### 3.5 Instrumentação e Monitoramento

A instrumentação e monitoramento dos *ponds* piloto visaram subsidiar informações para melhor entendimento do comportamento do ressecamento do rejeito ao longo dos ciclos de disposições e identificar a influência das condições climáticas.

Para instrumentação e monitoramento dos *ponds*, foram instaladas réguas linimétricas, placas de recalques e piezômetros elétricos.

### 3.5.1 Régua Linimétrica

Como forma efetiva e direta de monitorar o enchimento do reservatório através da elevação do rejeito depositado e controle da variação volumétrica no período de sedimentação, adensamento unidimensional e secagem do rejeito, foram instaladas régua linimétrica (graduadas) no interior dos reservatórios, conforme esquema apresentado na Figura 3.25.

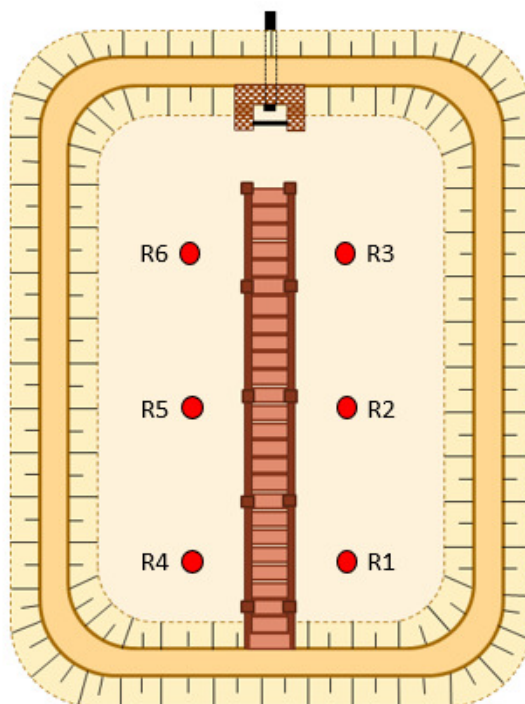


Figura 3.25. Planta esquemática do posicionamento das régua dos reservatórios experimentais.

Durante o período de monitoramento da camada lançada, as leituras das régua foram aferidas diariamente em horários fixos. As medidas das régua possibilitaram o acompanhamento dos recalques do rejeito em função do tempo.

As régua apresentam graduação até a elevação de 2,0m a partir do fundo do reservatório e foram fixadas em terreno natural.

Devido à sua graduação centimétrica, as régua foram posicionadas em locais de fácil acesso, a uma distância de observação que possibilita a realização de leituras a olho nu, de forma clara, minimizando possibilidades de erro durante a tomada dos dados. Sendo assim, as régua foram propostas em regiões próximas às plataformas

de amostragem em três seções de monitoramento, conforme ilustrado na Figura 3.26.

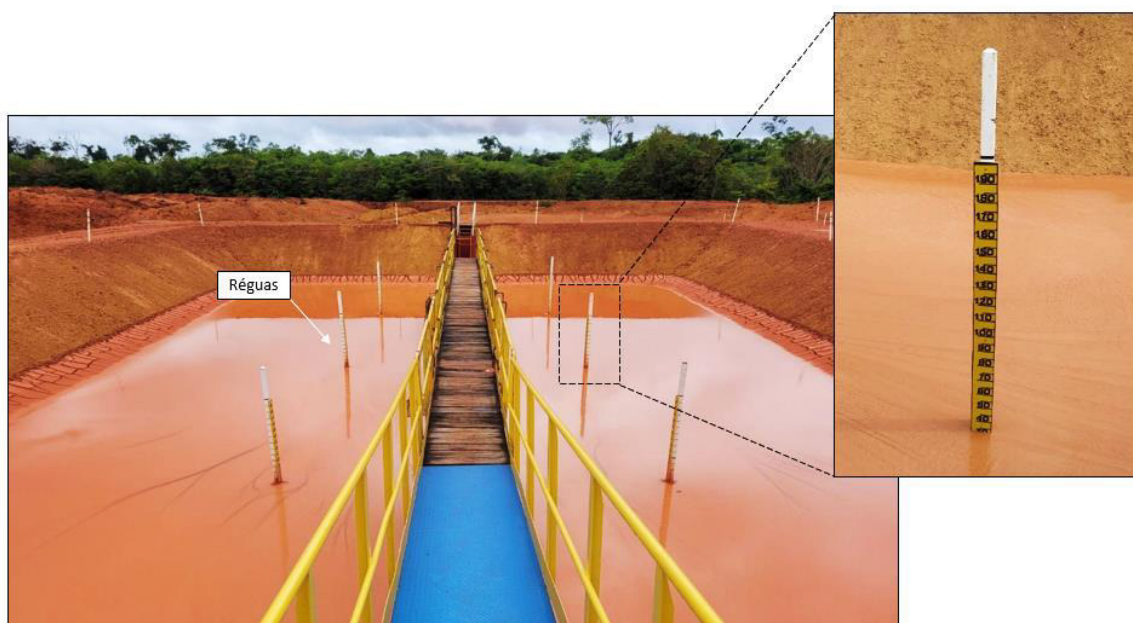


Figura 3.26. Representação das réguas em madeira instaladas no reservatório.

### 3.5.2 Piezômetros Elétricos

De modo a subsidiar informações da influência da infiltração de águas provenientes do processo de desaguamento do rejeito e de incidências pluviométricas na base dos reservatórios, foram instalados dois piezômetros elétricos do tipo corda vibrante na fundação do reservatório.

O PZE-02 foi instalado 3,0 m abaixo do *Pond* 01 e o PZE-03 foi instalado na elevação de fundo dos reservatórios na parede de divisa, como apresentado na Figura 3.27.





Figura 3.27. Instalação dos Piezômetros Elétricos na fundação e parede de divisa dos Ponds Piloto.

Com a finalidade de acompanhar a dissipação de poropressões e geração de excesso de poropressões devido às sobrecargas geradas pela disposição de novas camadas de rejeito, os piezômetros elétricos de corda vibrante PZE-01 e PZE-04 foram instalados juntos à disposição da camada de rejeito. O PZE-01 foi instalado assente à fundação do *pond* 02, aferindo as leituras da primeira camada de 50cm e os efeitos da disposição de uma segunda camada disposta. O PZE-04 foi instalado no *pond* 01 sobre a primeira camada já ressecada, monitorando a dissipação de excesso de poropressões da segunda camada de 80 cm. O piezômetro instalado para monitoramento do comportamento do rejeito disposto está ilustrado na Figura 3.28.

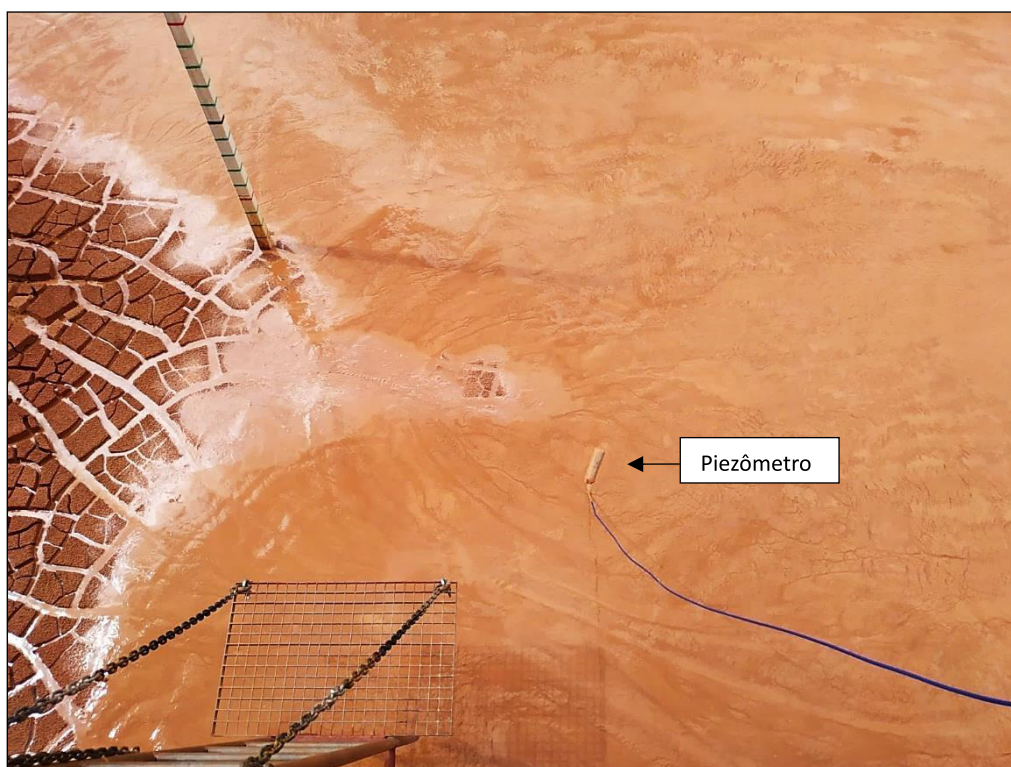


Figura 3.28. Piezômetro instalado durante a disposição de uma nova camada de rejeito.

A configuração da instalação dos piezômetros elétricos nos *ponds* piloto pode ser observada na Figura 3.29.

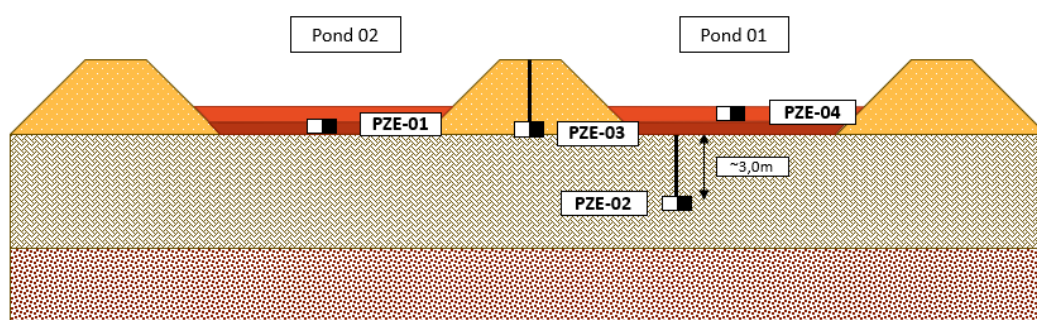


Figura 3.29. Configuração de instalação dos piezômetros elétricos.

### 3.5.3 Placas de Recalque

Com o objetivo de acompanhamento dos recalques devidos à sobrecarga gerada pela disposição de novas camada de rejeito, placas de recalque foram instaladas



assentes ao rejeito dos reservatórios experimentais entre a parede e a plataforma de amostragem, conforme listrado na Figura 3.30.

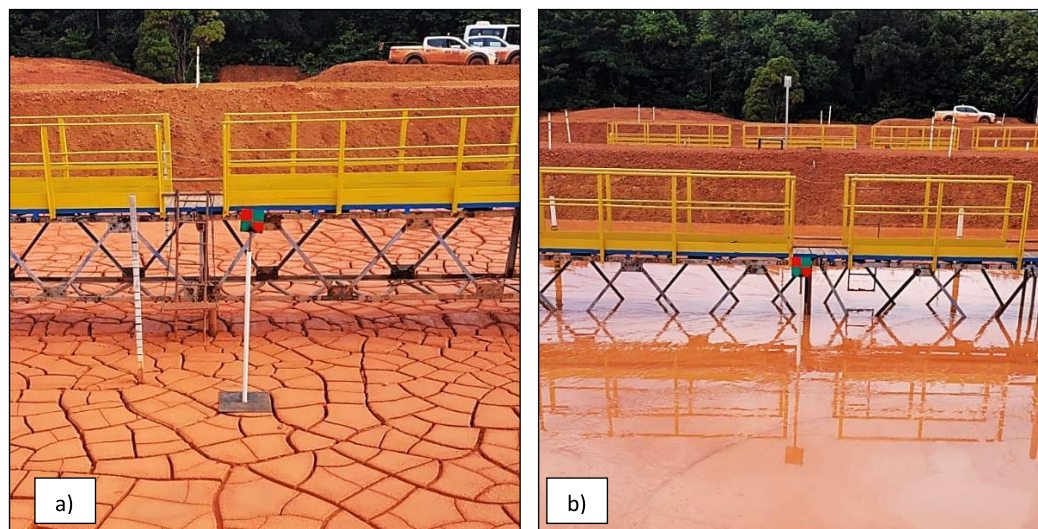


Figura 3.30. a) Placa de recalque instalada antes de nova disposição de rejeito; b) Placa de recalque após disposição de rejeito.

As placas de recalque foram referenciadas topograficamente, tendo sido registrada suas posições (cadastro de coordenadas e elevação) no momento de instalação.

Durante o período de monitoramento dos testes, foram aferidas periodicamente as elevações das placas de recalque utilizando Estação Total. O monitoramento das deformações das placas informa o recalque em função do tempo das camadas previamente dispostas, possibilitando uma correção dos recalques medidos pelas leituras das régua.

#### 3.5.4 Sistema de Monitoramento Meteorológico

O monitoramento das condições climáticas ao longo dos testes é de grande importância, sendo o índice pluviométrico e a taxa de evaporação fundamentais para entendimento do processo de ressecamento do rejeito.

Para o monitoramento climático dos testes, foram utilizados 02 pontos de monitoramento meteorológico, localizados na proximidade do TP-02 (*Thickener Pond*) e SP-09 (*Settling Pond*), conforme apresentado na Figura 3.31.



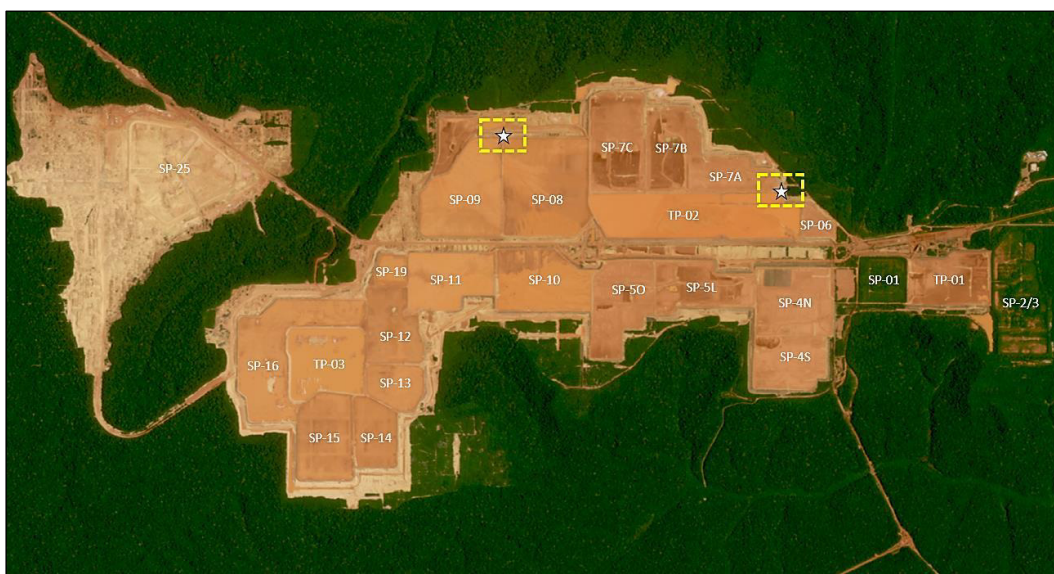


Figura 3.31. Sistema de monitoramento meteorológico do Platô Saracá Leste.

O sistema meteorológico é composto por estação pluviométrica, responsável pelo monitoramento pluviométrico e evaporímetros tipo tanque classe A, responsável pelo monitoramento da taxa de evaporação. A Figura 3.32 ilustra a estação pluviométrica e o tanque classe A instalados no TP-02.

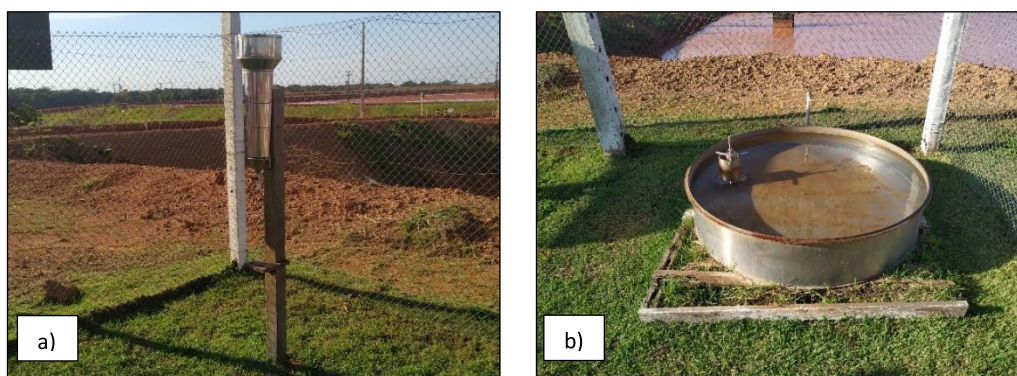


Figura 3.32. (a) Estação pluviométrica; (b) Evaporímetro tipo tanque classe A.

O sistema de monitoramento meteorológico do TP-2 também é composto por estação de monitoramento automático. Estas estações fazem a aferição periódica da temperatura média do ar, umidade relativa do ar, velocidade média dos ventos,

direção dos ventos, taxa de radiação global, pressão atmosférica e precipitação. A Figura 3.33 ilustra a estação de monitoramento automático contido no TP-02.



Figura 3.33. Estação de monitoramento automático – TP-2.

O sistema de monitoramento meteorológico do SP-09 é composto somente por estações de monitoramento automático. Esta estação faz a aferição periódica da temperatura média do ar, velocidade média dos ventos, direção dos ventos e precipitação. A Figura 3.33 ilustra a estação de monitoramento automático contida no SP-09.

Devido à distância e a grande variação da incidência pluviométrica ao longo do Platô Saracá Leste, se viu necessário a instalação de um pluviômetro convencional para verificação e calibração dos índices pluviométricos incidentes na região da área experimental. O pluviômetro instalado está apresentado na Figura 3.35.





Figura 3.34. Estação de monitoramento automático – SP-09



Figura 3.35. Pluviômetro instalado nos *Ponds* Piloto.

#### 3.5.4.1 Operação e Monitoramento de Pluviômetro

A quantidade de chuva recolhida pelo recipiente do pluviômetro é medida numa proveta graduada, devendo ser medida diariamente pela manhã.

No caso de um evento intenso de precipitação dentro das 24 horas de monitoramento, ocasionando o enchimento/transbordamento do aparelho, o mesmo deve ser esvaziado, tendo-se registrado o volume de água da proveta e a hora deste procedimento. Dessa forma, o volume total de água de precipitação é dado pelo somatório entre o volume de água medido até o esvaziamento do aparelho e o volume de água medido no período seguinte até as 07:00 horas da manhã, completando, assim, as 24 horas de medição.

#### **3.5.4.2 Operação e Monitoramento – Tanque Classe A**

Os evaporímetros tipo tanque classe A são instrumentos que possibilitam uma medida direta do poder evaporativo da atmosfera, estando sujeitos aos efeitos da radiação, temperatura, vento e umidade.

Os passos seguidos para medição da evaporação utilizando o tanque Classe A foram:

- Verificar se o tanque está posicionado em local adequado e se ele apresenta bom estado de conservação;
- Ler no micrômetro o nível de água e anotar, seguindo as instruções;
- Se o nível de água estiver a mais de 7,5 cm da borda, anotar o nível de água, adicionar água até o líquido chegar a aproximadamente 5 cm da borda;
- Se o nível de água estiver a menos de 7,5 cm da borda, anotar o nível de água no tanque;
- Medir a precipitação no pluviômetro mais próximo ou consultar o valor já medido e anotar o valor em mm. Essa medição deve ser feita diariamente pela manhã, juntamente com a medição da pluviometria.

A taxa de evaporação mensurada pelo evaporímetro tipo tanque classe A precisa ser corrigida, uma vez que suas medidas superestimam a evaporação na superfície de um reservatório. A variação observada se deve ao aquecimento do pequeno volume de água utilizado no equipamento metálico. O fator de correção da taxa de evaporação medida no evaporímetro varia entre a faixa de 0,4 a 0,85 (Drooesnbos & Pruitt, 1977).

### 3.5.4.3 Monitoramento da Evaporação – Modelo Matemático

A taxa de evaporação total (ET) pode ser estimada pelo método combinado de Penman modificado por Doorenbos e Pruitt (1977).

A evaporação total é um somatório da taxa de evaporação diária, conforme Equação 3.1

$$ET = \sum E_i \text{ (mm)} \quad \text{para } i = 1 \text{ a } 24\text{h} \quad (3.1)$$

Para a determinação da taxa de evaporação horária, utilizam-se equações específicas para o dia ( $R_{ni} > 0$ ) e para noite ( $R_{ni} \leq 0$ ), conforme apresentado nas equações 3.2 e 3.3 abaixo:

$$E_i = W_i \cdot R_{ni} + (1 - W_i) \cdot (e_{si} - e_{di}) \cdot K_{di} \quad \text{para } R_{ni} > 0 \quad (3.2)$$

$$E_i = W_i \cdot R_{ni} + (1 - W_i) \cdot (e_{si} - e_{di}) \cdot K_{ni} \quad \text{para } R_{ni} \leq 0 \quad (3.3)$$

Sendo:

$$W_i = \frac{\Delta_i}{\Delta_i + \gamma_i} \quad (3.4)$$

$$\Delta_i = \left( \frac{e_{si}}{T_{ki}} \right) \left( \frac{6790,499}{T_{ki}} - 5,028 \right) \quad \text{em kPa/}^\circ\text{C} \quad (3.5)$$

$$e_{si} = 0,611 \cdot \exp \left( \frac{13,27 \cdot T_i}{T_i + 237,3} \right) \quad \text{em kPa} \quad (3.6)$$

$$e_{di} = 4,58 \cdot 10^{\left( \frac{7,5 \cdot T_i}{T_i + 237,3} \right)} \quad \text{em mm-Hg} \quad (3.7)$$

Onde:

Temperatura em Kelvin:  $T_{ki} = 273,16 + T_i$  em Kelvin;

Constante psicrométrica:  $\gamma_i = 0,655 \times 10^{-3} \cdot P$  (Pa/°C);

Pressão atmosférica:  $P = 0,1013 \exp \left( \frac{-Z}{8200} \right)$  (Pa);

Coeficiente de transporte de massa – dia:  $K_{di} = 0,030 + 0,058 \cdot U_i$  (mm/kPa);

Coeficiente de transporte de massa – noite:  $K_{ni} = 0,125 + 0,044 \cdot U_i$  (mm/kPa);

Radiação efetiva:  $R_{ni} = \frac{R_{si}}{694,5 \cdot (1 - 9,46 \times 10^{-3} \cdot T_i)}$  (mm)

$U_i$  = Velocidade do vento (m/s);

$T_i$  = Temperatura do ar (°C);

$e_{si}$  = pressão de saturação do vapor da água na atmosfera (kPa);

$e_{di}$  = pressão de vapor (kPa);

$R_{si}$  = radiação solar ( $W/m^2$ );

### 3.6 Operação e Execução dos Testes de Campo

O sistema de secagem tem como princípio básico o processo de sedimentação, adensamento e ressecamento dos rejeitos em reservatórios sobreteor drenagem de fundo, drenagem periférica e evaporação.

As disposições de rejeito realizadas no reservatório intitulado *pond* 02 tiveram o objetivo de verificar a curva de secagem dos rejeitos para espessuras de camadas dispostas de 0,50 m. Já as camadas dispostas em espessuras de 0,80 m foram realizadas no reservatório *pond* 01.

O monitoramento dos testes ocorreu no período de setembro a dezembro de 2021 e janeiro a maio de 2022. O período de testes realizados em 2021 foi nomeado “verão de 2021” devido à baixa incidência pluviométrica. Os testes realizados em 2022 foram intitulados “inverno 2022”, devido ao alto índice pluviométrico.

No final de dezembro, as camadas dispostas nos reservatórios para os testes de verão 2021 foram removidas para permitir o início dos testes do período inverno 2022 com as mesmas condições de permeabilidade de fundação nos testes de verão, possibilitando a comparação do desempenho entre os períodos e avaliar a influência das condições climáticas na curva de secagem do material.

O fluxograma dos ensaios de campo realizados nos reservatórios experimentais está apresentado na Figura 3.36.

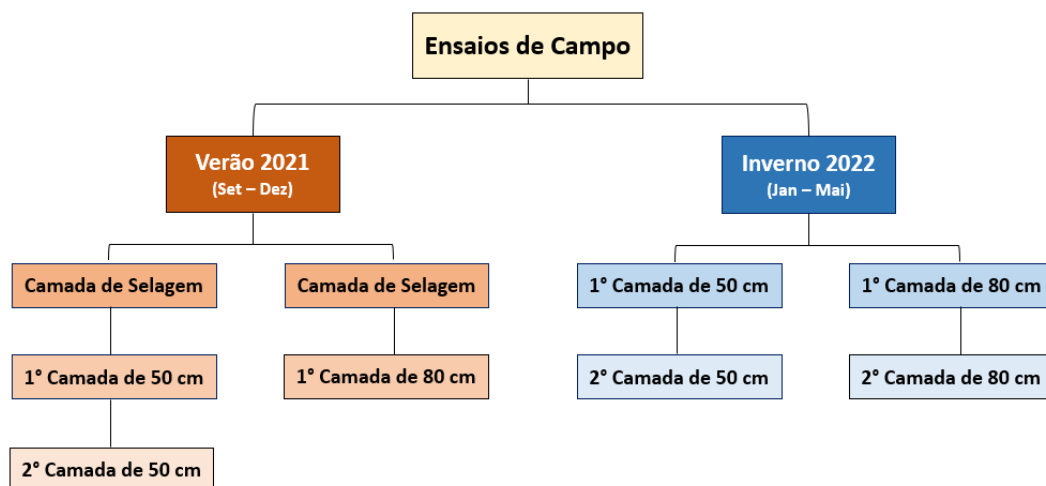


Figura 3.36. Fluxograma dos ensaios de campo.

### 3.6.1 Premissas para a Disposição de Rejeito

O rejeito disposto para os testes apresentava teor de sólidos médio de aproximadamente 22%, medido em amostras coletadas no ponto de alimentação da tubulação dos *ponds* piloto, com determinação aferida com frequência horária por meio da utilização de estufa, conforme preconizado na NBR 16097 (ABNT, 2012).

O rejeito foi lançado em camadas de espessuras controladas de 0,5 m e 0,8 m, as quais foram aferidas em réguas linimétricas instaladas ao longo do reservatório. As pressões na linha de alimentação de rejeito foram aferidas em manômetro instalado a montante do *manifold* de distribuição dos espigotes.

As disposições de novas camadas ocorriam em ciclos de aproximadamente 50 dias para o verão (julho a dezembro) e 70 dias para o inverno (janeiro a junho) ou com o atingimento da curva de secagem de aproximadamente 50% de teor de sólidos.

A operação do sistema de extravasamento via remoção de placas de *stop-logs* foi realizada ao longo do período de monitoramento, quando o rejeito recalrava, possibilitando a remoção sem arraste de sólidos pelo extravasador.

### 3.6.2 Amostragem de Rotina

Para a rotina de monitoramento da secagem do rejeito durante a vigência dos testes, foram realizadas coletas de amostras na tubulação de chegada do *manifold* de distribuição de rejeito para os espigotes no período do lançamento das camadas e



coletas de amostras periódicas no interior do reservatório para monitoramento da curva de secagem ao longo do tempo.

### 3.6.2.1 Amostragem na Tubulação de Descarga de Rejeito

O monitoramento do teor de sólidos da disposição de rejeito na tubulação de descarga foi necessário para controle do teor de sólidos do material espigotado em cada lançamento. As amostragens eram realizadas pela válvula instalada a montante do *manifold* de distribuição de rejeito, ao longo da disposição de rejeito. A coleta de amostra na tubulação de descarga de rejeito está ilustrada na Figura 3.37.



Figura 3.37. Amostragem na tubulação a montante do *manifold* de alimentação dos espigotes.

### 3.6.2.2 Amostragem do Rejeito Após Disposição

As amostragens de rotina durante a operação dos reservatórios experimentais, executadas a partir das plataformas de amostragem, foram realizadas diariamente ao longo do teste de secagem, possibilitando o acompanhamento do aumento do teor de sólidos com o tempo.

Nas primeiras semanas, após a disposição do material, as amostragens foram realizadas diariamente e, como ainda apresentavam baixa concentração de sólidos



(consistência de lama), foi utilizado o amostrador tipo “caneco”, conforme apresentado na Figura 3.38.



Figura 3.38. Amostrador tipo “Caneco”: Amostragem de rejeito com baixa densidade.

O amostrador tipo “caneco” adotado pela MRN é uma adaptação no projeto descrito no trabalho de Villar (1990), sendo dotado de uma haste fixa com o recipiente de amostragem em sua extremidade e uma haste móvel, conectada à tampa do recipiente. Para proceder com a amostragem dos rejeitos com menor concentração de sólidos, o operador deve posicionar o recipiente do amostrador na elevação de amostragem desejada, empurrar para baixo a haste móvel, permitindo a entrada da lama, puxar para cima a haste móvel para fechamento do recipiente e, por fim, retirar o conjunto amostrador do reservatório.

Após o avanço do processo de sedimentação e adensamento e início do processo de ressecamento, foi possível a utilização do amostrador do tipo pistão estacionário, também baseado no projeto descrito em Villar (1990), que possibilitou a amostragem de todo perfil do rejeito, conforme apresentado na Figura 3.39.



Figura 3.39. Amostrador tipo Pistão Estacionário.

A metodologia de amostragem com o amostrador tipo pistão estacionário está ilustrada na Figura 3.40:

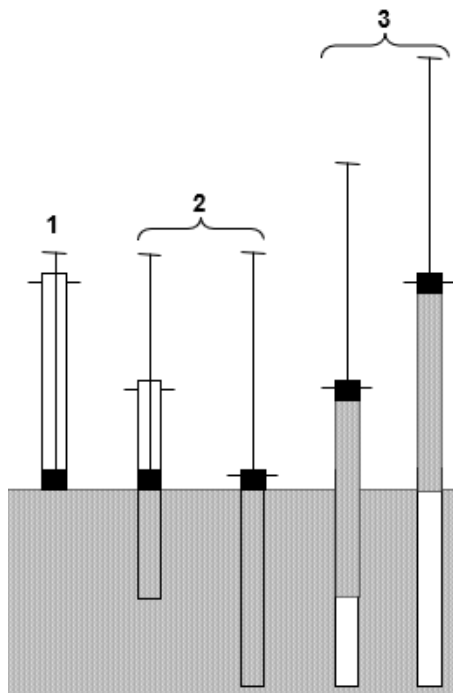


Figura 3.40. Sequenciamento da operação do pistão estacionário.

- 1) Apoia-se o amostrador sobre a camada de rejeito com pistão todo recolhido;
- 2) Crava-se o amostrador na camada de rejeito, tomando-se o cuidado do pistão manter estacionário e verticalizado;
- 3) Eleva-se o conjunto, trazendo a amostra;
- 4) A amostra é extrudada, retornando-se o pistão para a posição totalmente recolhido;

As coletas das amostras de rejeitos com amostradores tipo “caneco” ou tipo pistão estacionário, para o monitoramento do teor de sólidos durante os ciclos de secagem, foram realizadas ao longo do reservatório, sendo tomadas duas amostra a 5,0 m do ponto de espigotamento, duas amostra no centro do reservatório (distanto 15,0 m do ponto de espigotamento), duas amostras próximas ao extravasor (distanto 20,0 m do ponto de espigotamento), e uma amostra coletada no final da plataforma de amostragem (distanto 25,0 m do ponto de espigotamento), conforme apresentado no esquema da Figura 3.41.

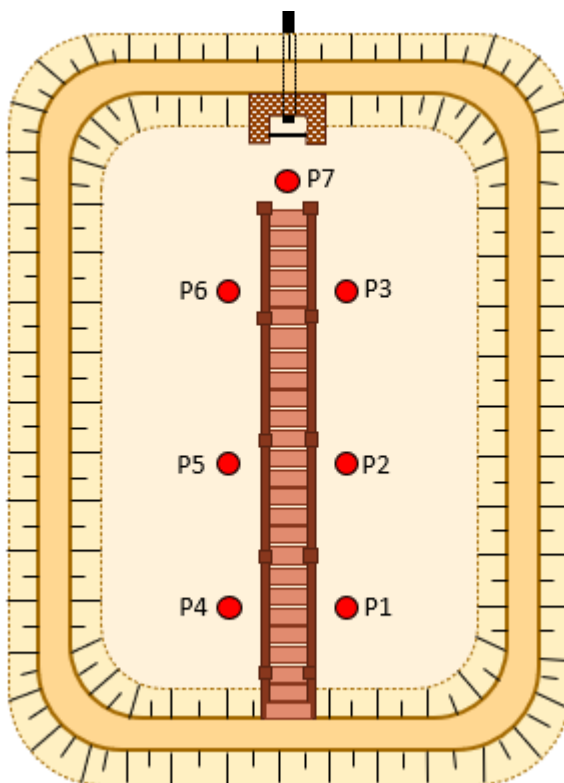


Figura 3.41. Pontos de coleta de amostra nos *ponds* piloto.

Imediatamente após a amostragem, pelo amostrador “caneco” ou pelo amostrador do tipo pistão estacionário, as amostras eram acondicionadas em recipientes plásticos, os quais eram hermeticamente vedados. Esse cuidado foi fundamental para que não houvesse perda de umidade do rejeito durante o processo de transporte ao laboratório.

### 3.7 Morfologia e Desenvolvimento das Trincas

No início da formação das trincas, ao longo dos testes de ressecamento de rejeito nos *ponds* experimentais, cinco trincas foram monitoradas para definição do comportamento de desenvolvimento e propagação das trincas, sendo uma trinca primária (T1), duas trincas secundárias (T2 e T3) e duas trincas terciárias (T4 e T5), definição conforme disposição espacial, apresentada na Figura 3.42.

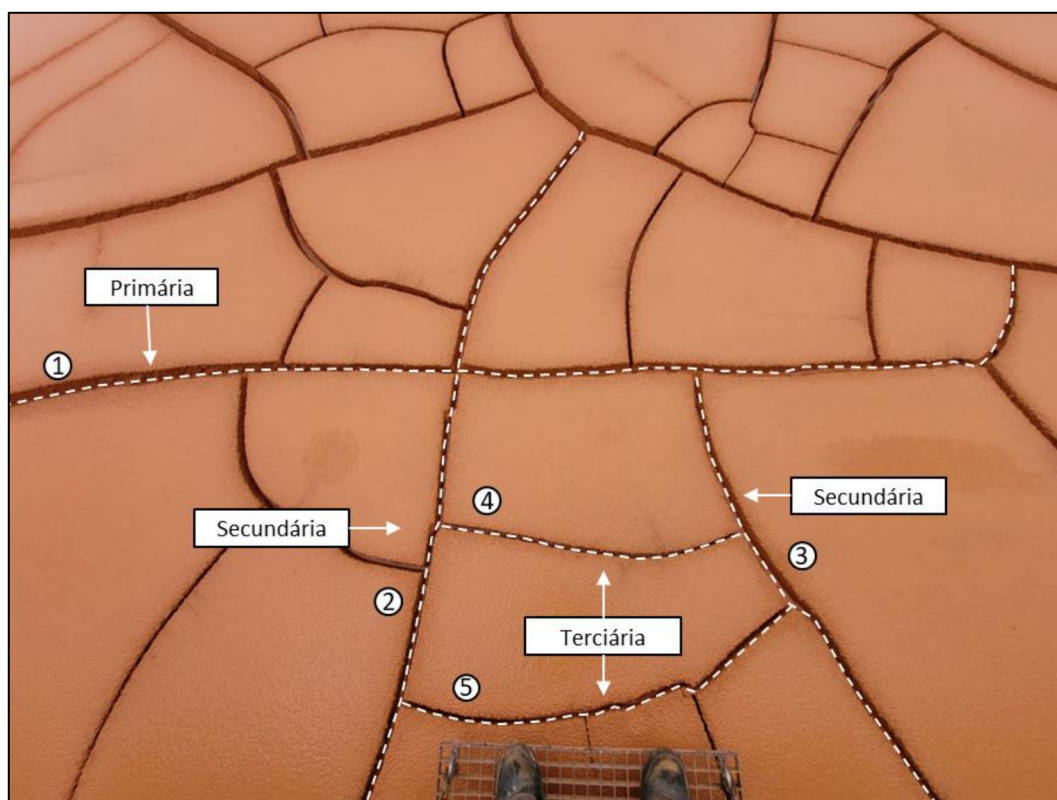


Figura 3.42. Definição das trincas para monitoramento.

O monitoramento consistiu na aferição da largura e propagação vertical das trincas através de leituras periódicas *in-situ* com auxílio de trenas centimétricas.



Ao final de cada ciclo de secagem das camadas dispostas no período de inverno de 2022, foi gerada uma ortofoto da área experimental, possibilitando determinar a proporção de área de trincas por área de reservatório.

Para determinar a proporção de áreas das trincas, foram definidas 06 áreas de 9m<sup>2</sup> para representar o comportamento do desenvolvimento das trincas na região perto dos espigotes, no centro do reservatório e na área perto do extravasor. Para ter uma melhor representatividade da proporção de trincas, as regiões foram delimitadas com *offsets* das paredes do reservatório e da plataforma de amostragem, uma vez que estas apresentam maior densidade de trincas devido a variações da espessura (menores camadas no contato com a face do talude, gerando camadas menos espessas) e inserção de elementos externos no rejeito (régua e passarela de amostragem), conforme ilustrado na Figura 3.43.

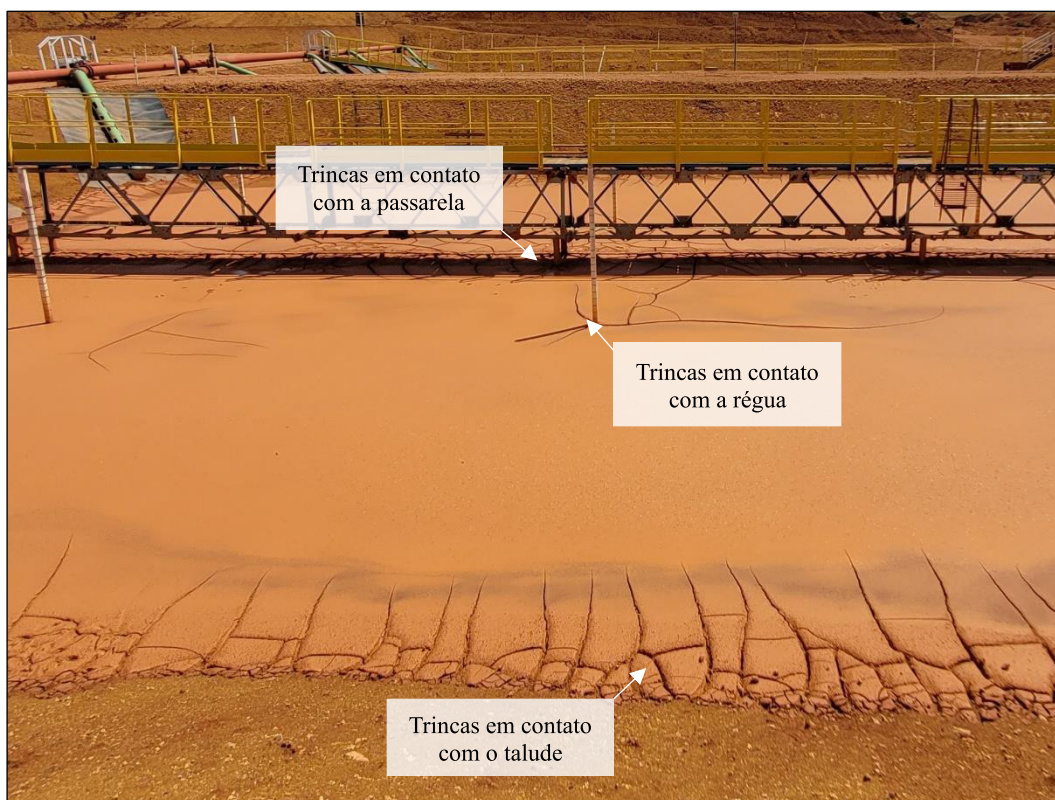


Figura 3.43. Formação de trincas no contato do talude, perto das régua e passarela.

### 3.7.1 Determinação da Função de Abertura e Propagação da Trinca

Conforme proposto por Silva (2003), a função de abertura e propagação das trincas (*cracking function*) foi obtida através do monitoramento dos índices de vazios e tensões verticais ao longo do processo de ressecamento e propagação das trincas do rejeito disposto nos reservatórios experimentais.

O monitoramento da propagação das trincas foi realizado através da aferição periódica da profundidade das discontinuidades com o auxílio de trena. Para definição do índice de vazios correspondente à propagação das trincas, foi realizada amostragem com auxílio do pistão estacionário em uma área próxima, geralmente no centro das placas de rejeito delimitadas pela trinca de interesse, evitando gerar interferências ou influenciar na propagação das discontinuidades devido à amostragem.

Da amostragem, separava-se 5 cm da elevação do final da propagação da trinca para determinação do índice de vazios no vértice da trinca ( $e_{cr}$ ), enquanto o restante era utilizado para determinar a tensão total exercida pela camada de rejeito acima do horizonte da trinca.

O ajuste da *cracking function* foi realizado pela ferramenta *solver* no e

Excel, aplicando o método dos mínimos quadrados para ajustar o modelo proposto por Yao e Znidarcic (1997), representado pela equação 3.8.

$$e_{cr} = \frac{1}{d} + \frac{1}{(b \cdot \sigma + a)^c} \quad (3.8)$$

Onde  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  são as constantes da função a serem obtidas.

### 3.8 Influência da Formação de Crosta no Processo de Ressecamento

Durante o monitoramento dos ensaios de campo, foram observadas, dentro dos reservatórios experimentais, a presença de folhas de árvores levadas pelos ventos e pedregulhos que foram carreados da face do talude devido a incidência pluviométrica.

Foi constatado um comportamento anômalo do rejeito subjacente a esses materiais ao longo do processo de ressecamento, conforme ilustrado na Figura 3.44. A



presença de materiais sobre o rejeito representa, mesmo que de forma qualitativa, a formação da crosta com menores teores de sólidos, e muita das vezes, não saturadas, devido à evaporação por exposição à irradiação solar.



Figura 3.44. Comportamento anômalo do processo de ressecamento do rejeito sobre folhas e pedregulhos.

Com a finalidade de avaliar a influência da formação e desenvolvimento de crosta no topo da camada de rejeito ao longo do ressecamento, foi proposta a instalação de materiais com diferentes permeabilidades assentes ao rejeito. Os materiais de diferentes permeabilidades possibilitaram, mesmo de forma qualitativa, simular a existência de crosta no topo da camada e avaliar sua influência no período de transição de consistência de polpa para pasta.

Quando as primeiras trincas começaram a ser formadas, foram instalados 03 materiais de diferentes permeabilidades para avaliação da sua influência no processo de ressecamento do rejeito subjacente: (i) geomembrana, representando um material com baixa permeabilidade; (ii) geotêxtil não tecido como material semipermeável; (iii) tela de mosquiteira em fibra de vidro correspondendo a um material com alta permeabilidade, conforme apresentado na Figura 3.45.

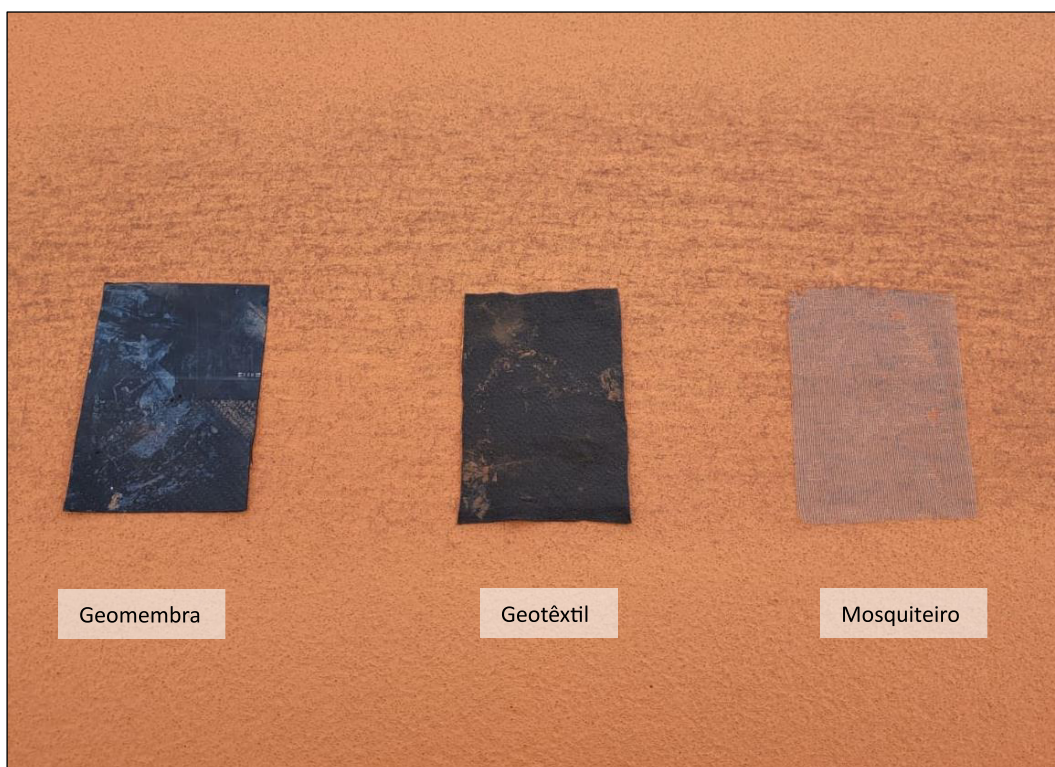


Figura 3.45. Materiais instalados assentes ao rejeito.

Ao final do período de monitoramento, foi comparado os recalques e comportamento do rejeito abaixo dos materiais instalados e o rejeito na proximidade do experimento, possibilitando avaliar a influência da existência de materiais de diferentes permeabilidades assentes ao rejeito, correlacionando-se, mesmo que qualitativamente, com a formação de crosta no topo da camada de rejeito devido ao processo de ressecamento.

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS – ENSAIO DE LABORATÓRIO

Este capítulo tem a finalidade de apresentar as análises e discussões dos resultados dos ensaios de laboratório realizados no rejeito proveniente da lavagem de bauxita da MRN.

As análises mineralógicas, química, caracterização física, adensamento a taxa de deslocamento constante (CRD) e adensamento por indução por força de percolação (HCT) foram realizados em momentos anteriores a este trabalho, porém estão apresentados a seguir com o intuito de enriquecer as informações das propriedades do material.

### 4.1 Análise Mineralógica

A análise mineralógica do rejeito da MRN foi realizada pelo ensaio de difração de raio-X, onde a interação de ondas de raio-X permite a determinação das distâncias interplacares, possibilitando a caracterização da natureza dos minerais presentes na amostra.

Os resultados dos ensaios de difração de raio-X realizados no rejeito da MRN está ilustrados na Figura 4.1.

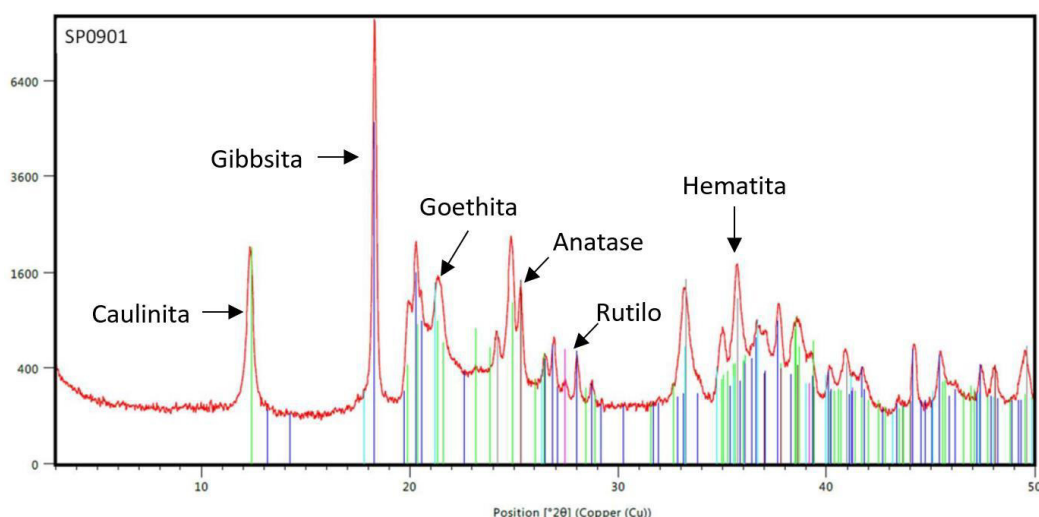


Figura 4.1. Resultado do ensaio DRX – Amostra de rejeito MRN.

É possível observar a presença dos minerais gibbsita, caulinita, hematita, anatase, goethita e rutilo.

## 4.2 Análise Química

A análise química da fase sólida do rejeito da MRN foi realizada pelo ensaio de fluorescência de raio-X, onde a incidência de raio-X excita os níveis eletrônicos de átomos, permitindo a identificação da composição e concentração de elementos presentes na amostra.

O resultado do ensaio de fluorescência de raio-X realizado está apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Resultado do ensaio FRX.

Amostra	Teor (%)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Total	36,56
SiO <sub>2</sub> Total	26,07
*PPC (Matéria Orgânica)	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

Com o resultado do ensaio FRX, pode-se observar a presença majoritária dos óxidos de alumínio e ferro, dióxido de silício (sílica), matéria orgânica e dióxido de titânio.

## 4.3 Massa Específica dos Grãos

Para determinação da massa específica dos grãos foram utilizadas duas campanhas exploratórias de caracterização geotécnica, conforme apresentado nos ensaios de granulometria.

A primeira campanha foi realizada em 2017, totalizando 144 amostras de rejeito. Os ensaios de definição do peso específico real dos grãos foram realizados em consonância com a norma ASTM D854 (2002).

O histograma de distribuição da massa específica dos grãos obtidas nos ensaios realizados na campanha de 2017 foi realizado pelo software Minitab e está apresentado na Figura 4.2.

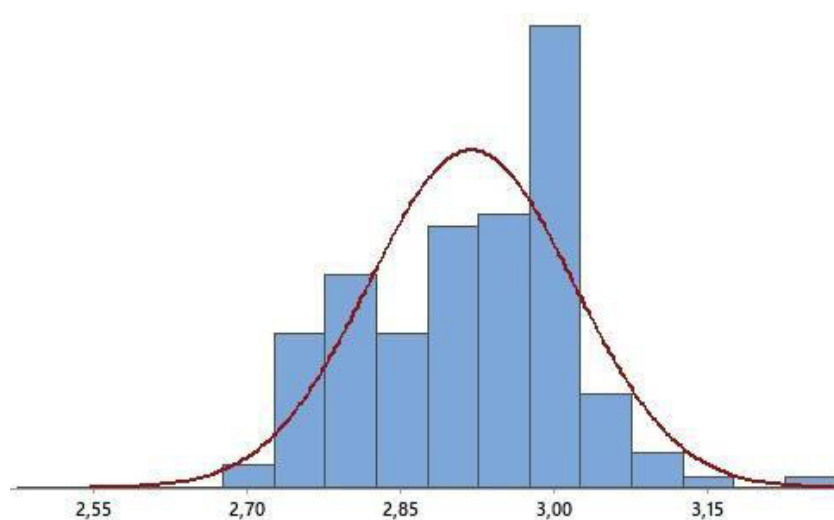


Figura 4.2. Histograma de massa específica dos grãos - campanha 2017.

A média dos resultados obtidos para massa específica dos grãos foi de 2,92 g/cm³.

A segunda campanha foi realizada em 2020, sendo analisadas 124 amostras através do método de picnômetro a gás hélio. O ensaio é realizado pela comparação da variação de pressão de gás hélio entre uma câmara de volume conhecido e uma câmara com a amostra a ser analisada.

O histograma de distribuição de dados dos ensaios da campanha de 2020 foi realizado pelo software Minitab e está ilustrado na Figura 4.3.

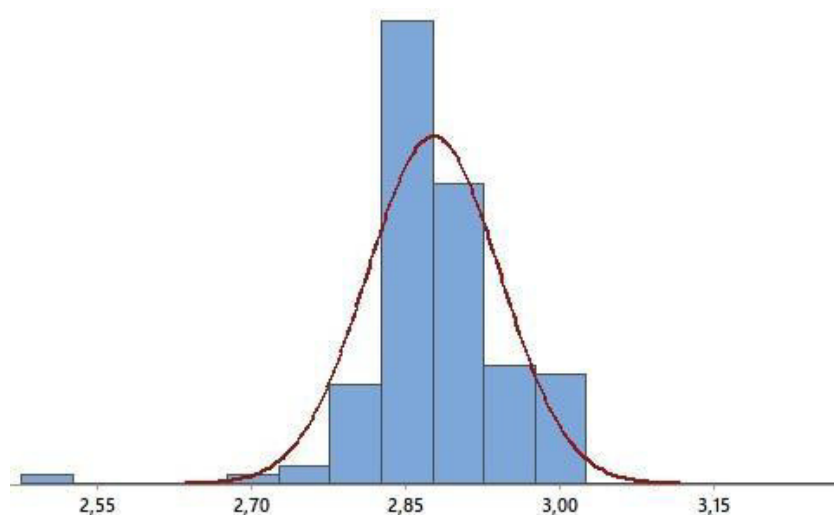


Figura 4.3. Histograma de peso específico real dos grãos - campanha 2020.

A média da massa específica dos grãos obtida foi de 2,88 g/cm<sup>3</sup>.

Mesmo sendo utilizadas metodologias executivas distintas, os resultados de massa específica dos grãos médias obtidas pela campanha 2017 e pela campanha 2020 estão aderentes entre si.

Sendo assim, foram compilados os 268 resultados obtidos nas campanhas de 2017 e 2020 para realização do histograma de distribuição de dados, conforme exposto na Figura 4.4.

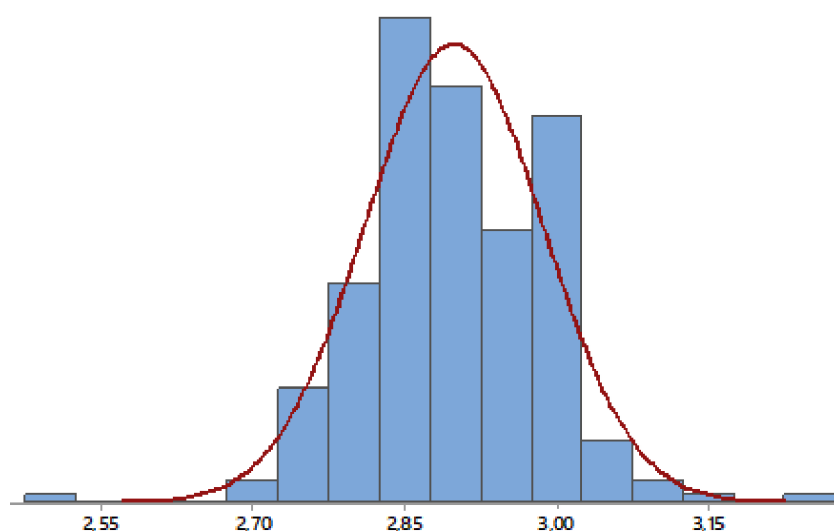


Figura 4.4. Histograma de massa específica dos grãos - campanhas 2017 e 2020.



Consolidando os resultados obtidos na campanha de 2017 e 2020, foi obtida uma massa específica dos grãos média de 2,90 g/cm<sup>3</sup> para o rejeito da MRN.

#### 4.4 Distribuição Granulométrica

Para a determinação da distribuição granulométrica foram utilizadas duas grandes campanhas exploratórias de caracterização geotécnica do rejeito de bauxita.

A primeira campanha foi realizada em 2017, totalizando em 144 amostras de rejeito tomadas em diversos reservatórios do sistema de rejeito da MRN. Os ensaios de determinação granulométrica foram realizados de acordo com a norma NBR 7181 (ABNT 2016a) por peneiramento e sedimentação com utilização de hexametáfosfato de sódio como dispersor químico (defloculante).

As curvas granulométricas obtidas nos ensaios realizados na campanha de 2017 estão apresentadas na Figura 4.5.

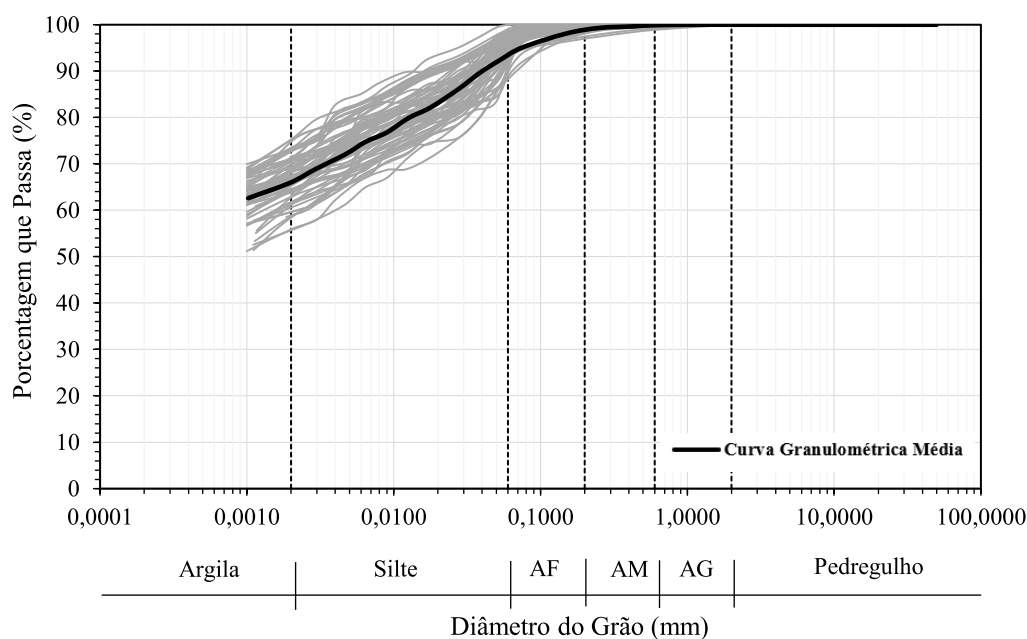


Figura 4.5. Curva granulométrica – Campanha 2017.

A segunda campanha foi realizada em 2020, totalizando em 95 amostras tomadas em reservatórios em operação e fora de operação do sistema de rejeitos da MRN. A determinação granulométrica foi realizada por difração de raio laser com faixa de detecção 0,1 – 350µm de diâmetro. Previamente ao início do ensaio, a suspensão a

ser analisada foi dispersa em um misturador RW20 IKA com uma rotação constante de 1.000 rpm por minuto. Após a preparação da amostra, a suspensão foi vertida no granulômetro a laser até atingir uma obscurecência próxima de 20%. Ao longo do ensaio foi aplicado ultrassom por 2 minutos para desaglomeração e desaeração.

As curvas granulométricas derivadas dos ensaios realizados na campanha de 2020 estão ilustradas na

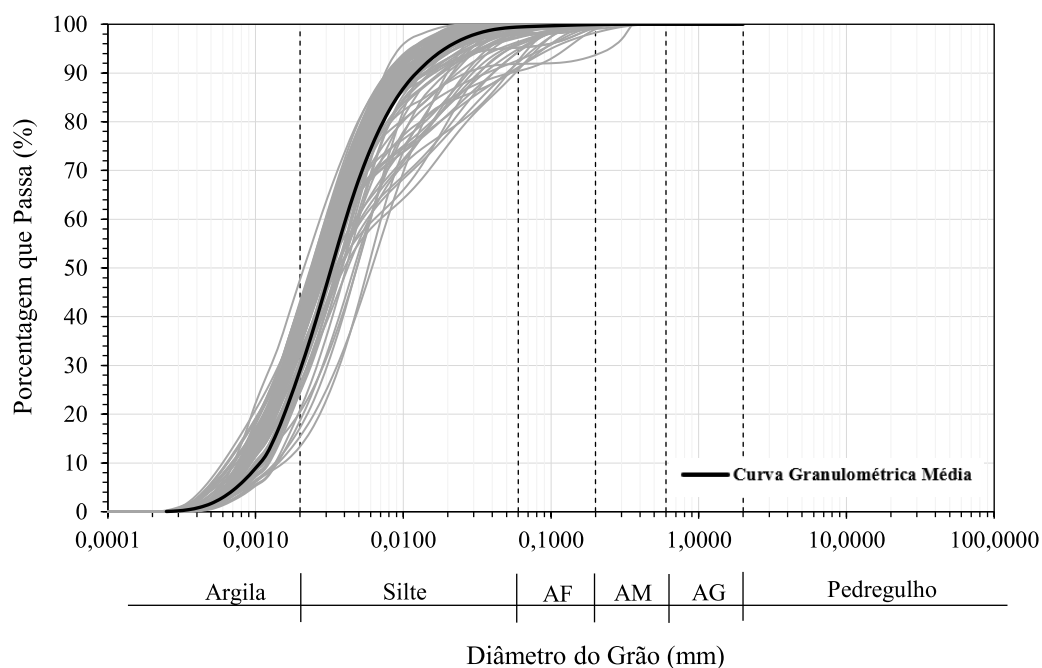


Figura 4.6. Curva granulométrica – Campanha 2020.

As distribuições granulométricas médias dos ensaios realizados nas campanhas de 2017 e 2020 estão dispostas na Figura 4.7 e Tabela 4.2 com a finalidade de facilitar a comparação dos resultados obtidos por metodologias executivas distintas.

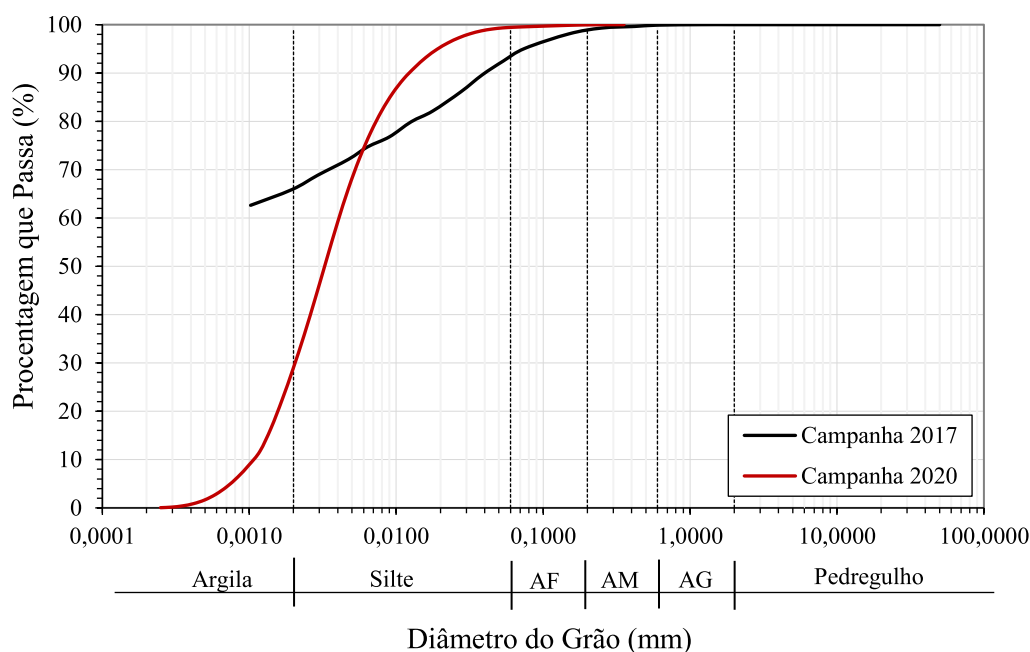


Figura 4.7. Curva Granulométrica das campanhas 2017 e 2021.

Tabela 4.2. Resumo das distribuições granulométricas das campanhas de 2017 e 2020.

Granulometria	Porcentagem Correspondente	
	Campanha 2017	Campanha 2021
Pedregulho	0 %	0 %
Areia Grossa	0 %	0 %
Areia Média	2 %	0 %
Areia Fina	4 %	1 %
Silte	28 %	70 %
Argila	66 %	29 %

Como pode ser observado, a mudança da metodologia executiva para cada campanha de ensaio influencia diretamente na distribuição granulométrica média obtida. Esse fato foi descrito por Villar (1990), onde apresentou um quadro comparativo da composição granulométrica de lama vermelha com e sem a adição de defloculantes.

Além da diferença da utilização de defloculante para dispersão química, a quantificação da porcentagem passante para determinado diâmetro da partícula para o ensaio de peneiramento e sedimentação é em função da massa retida e velocidade

de sedimentação do material. Já a determinação da porcentagem passante para determinado diâmetro da partícula do ensaio realizado no granulômetro a laser é em função do volume aferido no ensaio.

#### 4.5 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.

##### 4.5.1 Limite de Liquidez

A determinação do limite de liquidez foi realizada em 2017, sendo ensaiadas 144 amostras de rejeitos. Os ensaios foram executados conforme a NBR 6459 (ABNT, 2016b).

O histograma de distribuição de dados dos ensaios de limite de liquidez realizados na campanha de 2017 foi realizado pelo software Minitab e está apresentado na Figura 4.8.

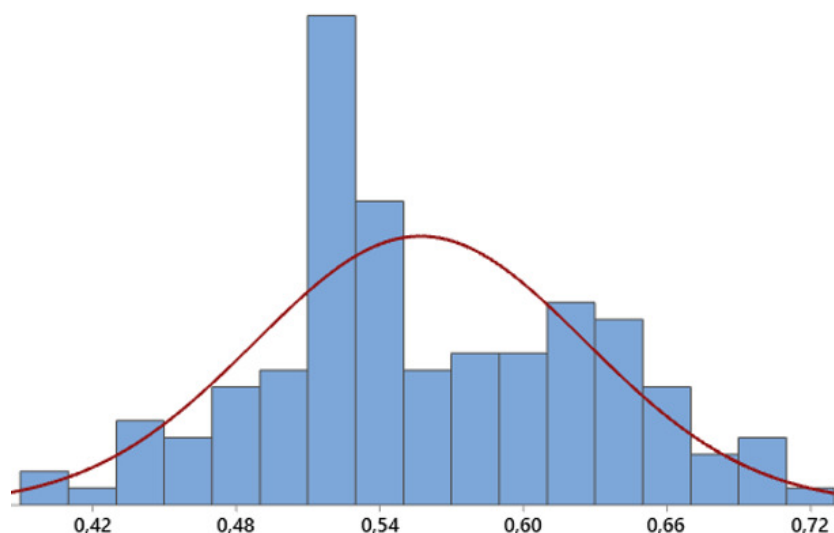


Figura 4.8. Histograma de limite de liquidez - campanha 2017.

A média dos resultados obtidos para limite de liquidez foi de 56%.

#### 4.5.2 Limite de Plasticidade

Os ensaios de limite de plasticidade foram realizados nas amostras obtidas na campanha de caracterização geotécnica exploratória realizada em 2017. Os ensaios foram conduzidos de acordo com a norma NBR 7180 (ABNT, 2016c).

O histograma de distribuição de dados dos ensaios de limite de plasticidade realizados na campanha de 2017 foi realizado pelo software Minitab e está disposta na Figura 4.9.

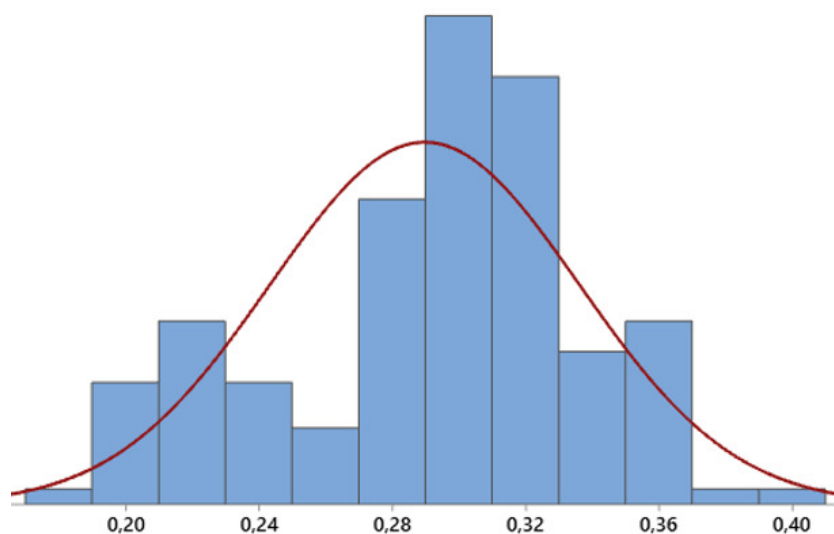


Figura 4.9. Histograma de limite de plasticidade - campanha 2017.

A média dos resultados obtidos para limite de plasticidade dos materiais ensaiados foi de 29%.

De posse dos resultados dos ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade, pode-se calcular o índice de plasticidade e construir a carta de plasticidade do material, conforme disposto na Figura 4.10. O índice de plasticidade médio obtido na campanha de 2017 para o rejeito da MRN foi de 27% de teor de umidade.

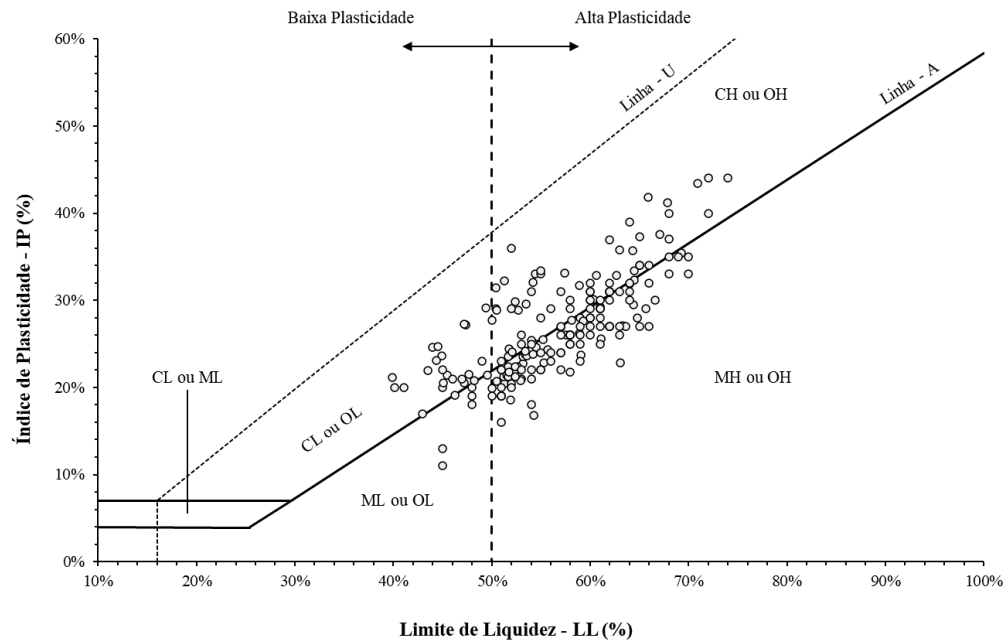


Figura 4.10. Carta de plasticidade do rejeito.

Pode-se observar na Figura 4.10 uma elevada densidade de pontos próximos da linha A da carta de plasticidade, representando solos argilosos a siltesos da alta plasticidade.

#### 4.5.3 Limite de Contração

Para a determinação do limite de contração do rejeito, foram utilizadas duas campanhas exploratórias de caracterização. A primeira campanha foi realizada em 2009 em uma amostra de rejeito, tomadas no reservatório TP-02.

A curva de contração e determinação do limite de contração estão apresentadas na Figura 4.11.



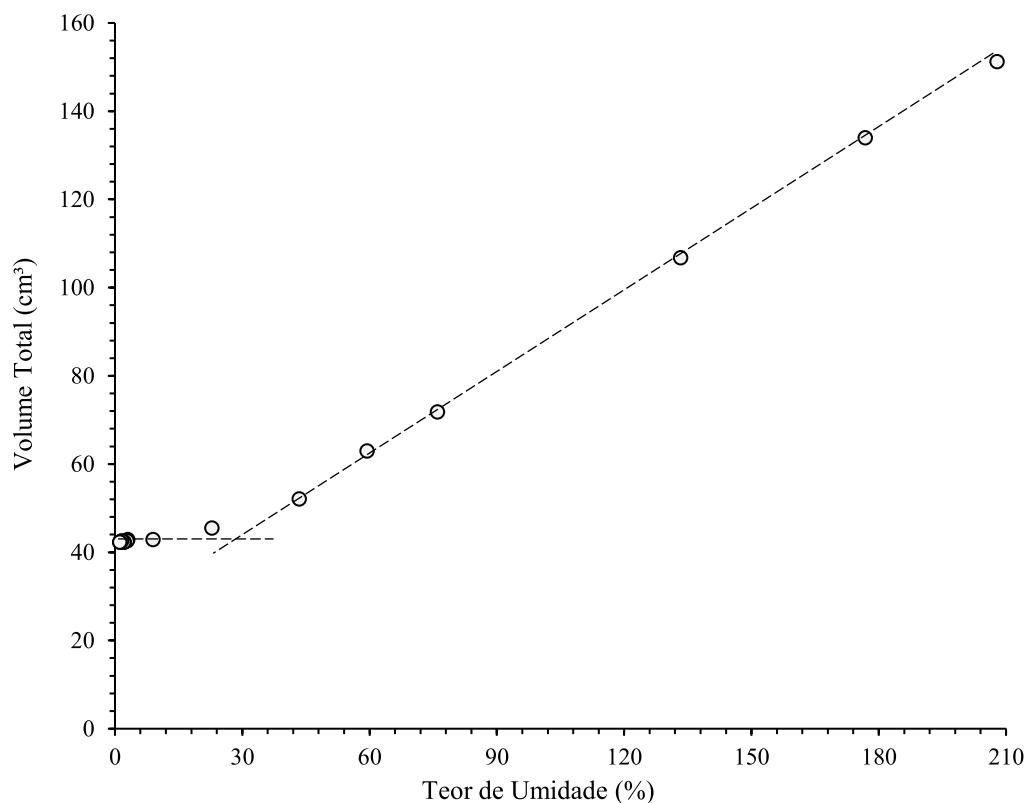


Figura 4.11. Curva de contração do rejeito

Pode-se observar um limite de contração de aproximadamente 31% de teor de umidade para a amostra de rejeito ensaiada.

A segunda campanha foi realizada em 2017, sendo analisadas 12 amostras através de ensaios de contração seguindo o método de ensaio normatizado pelo departamento nacional de estradas de rodagem DNER-ME 087/94.

O limite de contração médio obtido para o rejeito de bauxita foi de 33% de teor de umidade.

#### 4.6 Superfície Específica

A determinação da superfície específica foi realizada na campanha de caracterização de rejeito em 2020, sendo ensaiadas 13 amostras pelo método proposto por Brunauer, Emmett e Teller B.E.T. (1938). O ensaio consiste na aferição da adsorção de moléculas de gás quando exposto a uma amostra, permitindo o cálculo da extensão da superfície e tamanho dos poros.

A área superficial específica média do rejeito da MRN é de 22,66 m<sup>2</sup>/g.

#### 4.7 Adensamento a Taxa de Deslocamento Constante (CRD)

A campanha de ensaios de adensamento a taxa de deslocamento constante (CRD) foi realizada em 1992 em 04 amostras de rejeito. A Tabela 4.3, a seguir, apresenta as informações das amostras e taxa de deformação dos ensaios.

Tabela 4.3. Quadro de informações – Adensamento CRD.

Ensaio	G <sub>s</sub>	W <sub>i</sub> (%)	% Sólidos	ρ <sub>t</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	e <sub>0</sub>	e <sub>f</sub>	ρ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Vel. Ensaio (mm/min)
CRD 1	2,88	273,94	26,74	1,178	8,16	2,03	0,315	0,048
CRD 2	2,87	143,28	41,10	1,335	4,36	0,89	0,549	0,035
CRD 3	2,94	109,82	47,66	1,394	3,42	1,28	0,664	0,035
CRD 4	2,96	72,45	57,99	1,532	2,33	1,01	0,888	0,035

Onde G<sub>s</sub> é a densidade relativa dos grãos, e<sub>0</sub> e e<sub>f</sub> os índices de vazios inicial e ao final do adensamento, ρ<sub>t</sub> e ρ<sub>d</sub> as massas específicas total e seca iniciais e w<sub>i</sub> o teor de umidade inicial dos ensaios.

A Figura 4.12 apresenta os resultados de índice de vazios x tensão efetiva obtidos nos ensaios de adensamento CRD.

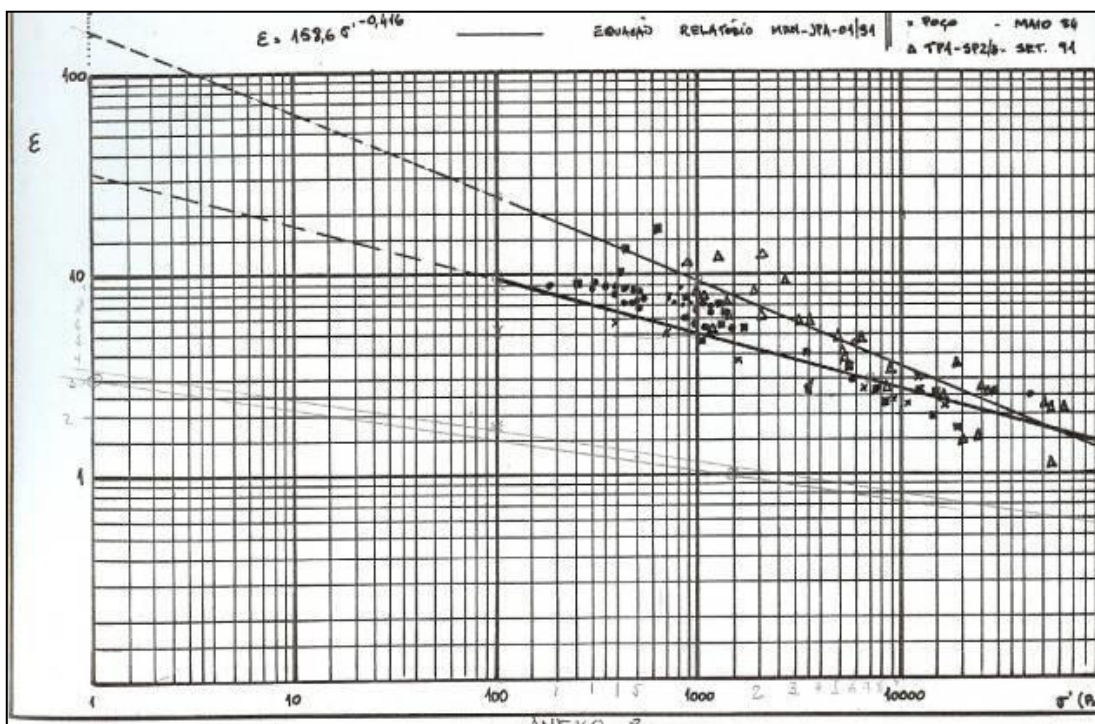


Figura 4.12. Resultado de ensaio CRD – índice de vazios x Tensão Efetiva.

As curvas de índice de vazios x permeabilidade obtidas a partir dos ensaios de adensamento CRD estão dispostas na Figura 4.13.

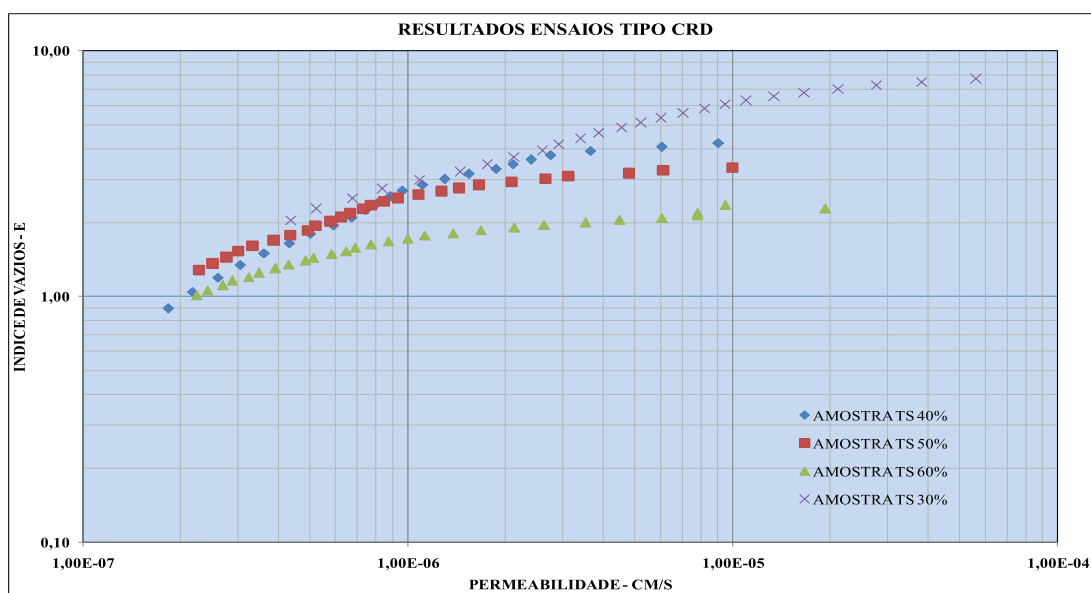


Figura 4.13. Resultados de Ensaio CRD – Índice de vazios x Permeabilidade (cm/s).

Da análise dos dados obtidos nos ensaios, pode-se determinar a relação constitutiva de compressibilidade do rejeito, apresentada na Equação 4.1.

$$e = 158,60\sigma'^{-0,416} \quad \text{em Pa} \quad (4.1)$$

#### 4.8 Adensamento Induzido por Força de Percolação (HCT)

Para determinação das relações constitutivas de compressibilidade e de permeabilidade do rejeito, foi realizada uma campanha de ensaio de adensamento induzido por força de percolação (HCT) de 03 amostra de rejeito em 2009. O material ensaiado foi diluído com água destilada para uma condição próxima à de campo, correspondendo a uma concentração de aproximadamente 20% de teor de sólidos.

A análise do ensaio foi realizada através de uma modelagem conjunta dos dados do ensaio em termos das relações constitutivas de compressibilidade (índice de vazios x tensão efetiva) e permeabilidade (índice de vazios x permeabilidade) através do programa SICTA – “Seepage Induced Consolidation Test Analysis” desenvolvido por Abu-Hejleh & Znidarcic (1992).

Dessa forma, é possível obter os parâmetros da função de compressibilidade (A, B e Z) e de permeabilidade (C e D), conforme a Equação 4.2 e Equação 4.3.

$$e = A(\sigma' + Z)^B \quad (4.2)$$

$$K = Ce^D \quad (4.3)$$

Onde A, B, C e Z são parâmetros constitutivos do adensamento a serem determinados para um dado material.

As curvas de “índice de vazios x tensão efetiva” e as curvas “índice de vazios x permeabilidade” estão ilustradas nas Figura 4.14 e Figura 4.15, respectivamente.

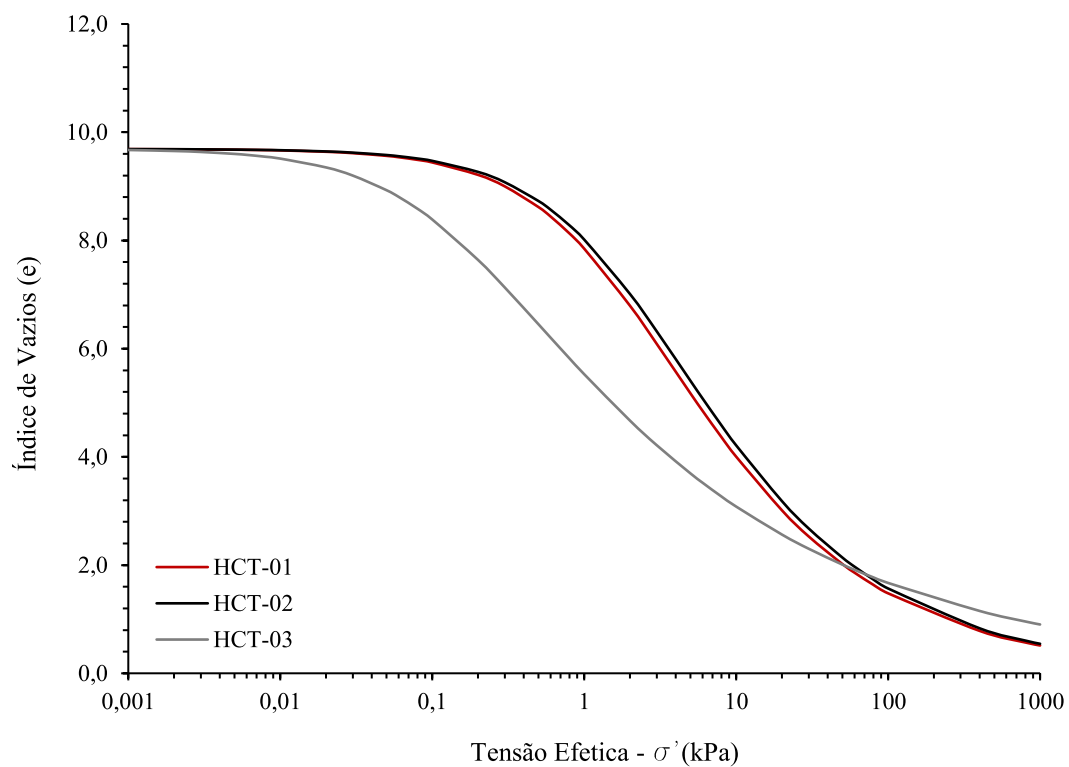


Figura 4.14. Curva de compressibilidade – HCT.

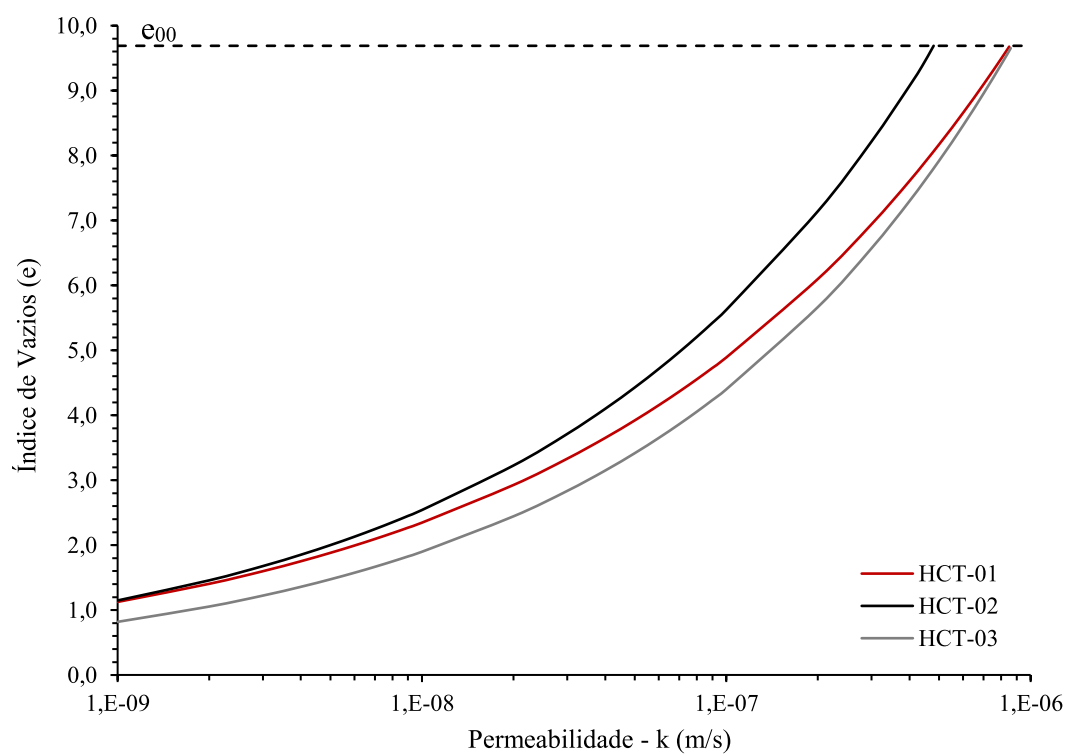


Figura 4.15. Curva de permeabilidade - HCT.

Com base nos resultados das curvas de compressibilidade e permeabilidade, pode-se obter os parâmetros e funções constitutivas do rejeito da MRN, conforme apresentado na Tabela 4.4 e Tabela 4.5, respectivamente.

Tabela 4.4. Parâmetros constitutivos do rejeito da MRN.

Parâmetros	HCT-01	HCT-02	HCT-03
A	12,462	13,242	5,725
B	-0,462	-0,461	-0,267
Z	1,726	1,968	0,140
C	6,892E <sup>-10</sup>	6,704E <sup>-10</sup>	1,729E <sup>-09</sup>
D	3,136	2,898	2,739

Tabela 4.5. Funções constitutivas do rejeito da MRN.

Ensaio	Teor de Sólidos (%)	Função de Compressibilidade	Função de Permeabilidade
HCT-01	20,4	$e = 12,462(\sigma' + 1,726)^{-0,461}$	$k = 6,892E^{-10}e^{3,136}$
HCT-02	20,4	$e = 13,242(\sigma' + 1,968)^{-0,461}$	$k = 6,704E^{-10}e^{2,898}$
HCT-03	21,5	$e = 5,725(\sigma' + 0,140)^{-0,267}$	$k = 1,729E^{-09}e^{2,739}$

#### 4.9 Ensaio de Sedimentação em Coluna

Os resultados dos ensaios de sedimentação realizados em provetas de 2 litros e em coluna de grandes dimensões estão apresentados na Figura 4.16. Os resultados dos ensaios estão apresentados no apêndice A.



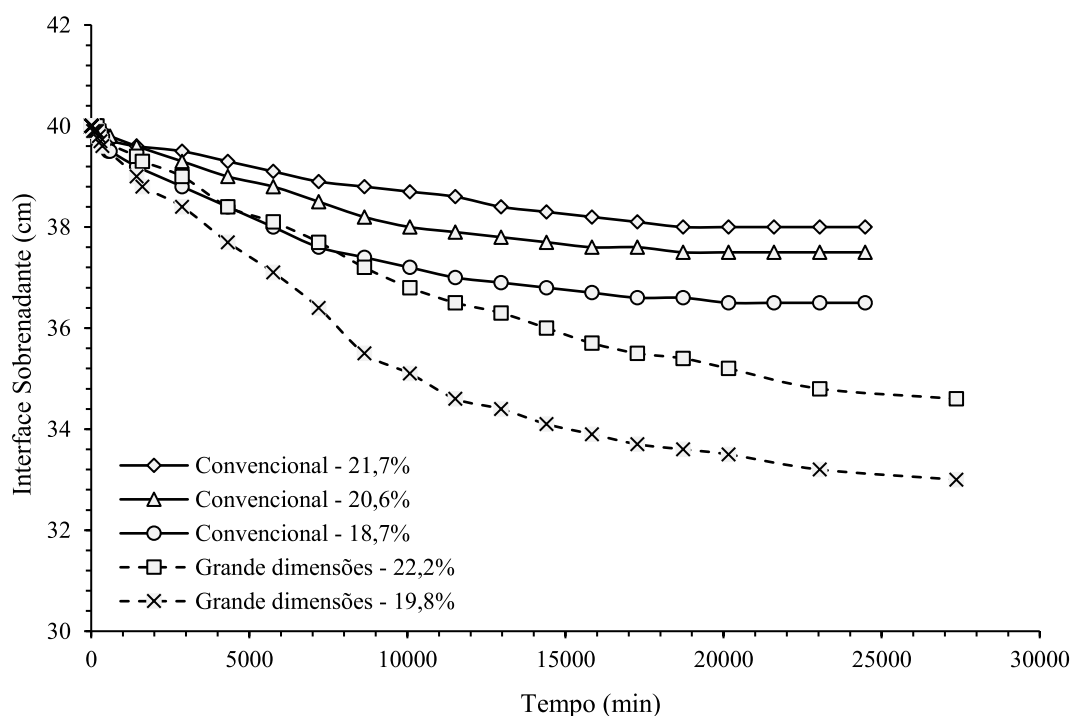


Figura 4.16. Curva de sedimentação para diferentes teores de sólidos.

De posse dos resultados dos ensaios, é possível observar a influência da concentração de sólidos inicial ( $\Psi$ ) e as dimensões dos recipientes nos quais foram ensaiadas as amostras nas colunas de sedimentação.

Conforme apresentado por Kynch (1952), quanto maior a concentração inicial de sólidos, mais lenta será a velocidade de sedimentação das partículas. Pelo método da regressão linear, foi possível estimar a velocidade de sedimentação para cada concentração dos testes realizados em proveta e em tubo de grandes dimensões. As velocidades de sedimentação estão dispostas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6. Velocidade de sedimentação para diferentes teores de sólidos.

Velocidade de Sedimentação (cm/hora)	Teste em Proveta 2L - Convencional			Tubo de Grandes Dimensões	
	$\Psi$ (%) 18,7	$\Psi$ (%) 20,6	$\Psi$ (%) 21,7	$\Psi$ (%) 19,8	$\Psi$ (%) 22,2
	0,06	0,04	0,02	0,06	0,04

Além do teor de sólidos inicial, pode-se observar uma influência na velocidade de sedimentação e na interface líquido-sólido final nos ensaios realizados no tubo de grandes dimensões, quando comparado com os ensaios realizados em proveta de 2000 ml.

Os ensaios realizados em tubos apresentaram uma velocidade de sedimentação maior quando comparado com ensaios realizados em proveta, com concentrações de sólidos na mesma ordem de grandeza, indicando a interferência na interação sólido-parede do recipiente no processo de sedimentação e adensamento por peso próprio. Os resultados obtidos devem ser interpretados qualitativamente, uma vez que os materiais da proveta e o tubo de grandes dimensões são distintos, apresentando rugosidade e atrito diferentes.

#### **4.10 Ensaio de Coluna Modificada**

As análises dos resultados dos ensaios de coluna modificado está apresentando em ganho de teor de sólidos, influência da espessura da camada ensaiada, influência da permeabilidade do elemento drenante e influência do teor de sólidos inicial do material, variação da altura da camada ao longo do período de monitoramento e perfil de teor de sólidos ao final do ensaio.

##### **4.10.1.1 Ganho de Teor de Sólidos**

Para facilitar a comparação e a influência das condições de contorno entre os resultados de ganhos de teores de sólidos no ensaio de coluna modificado, os resultados foram separados alterando a espessura da camada, permeabilidade do elemento drenante e teores de sólidos iniciais da polpa disposta em coluna.

##### **4.10.1.2 Influência da Espessura da Camada**

As curvas de ganho de teor de sólidos ao longo do tempo dos ensaios, comparando os ensaios realizados com camadas de 50 cm e 80 cm estão apresentados na Figura 4.17.

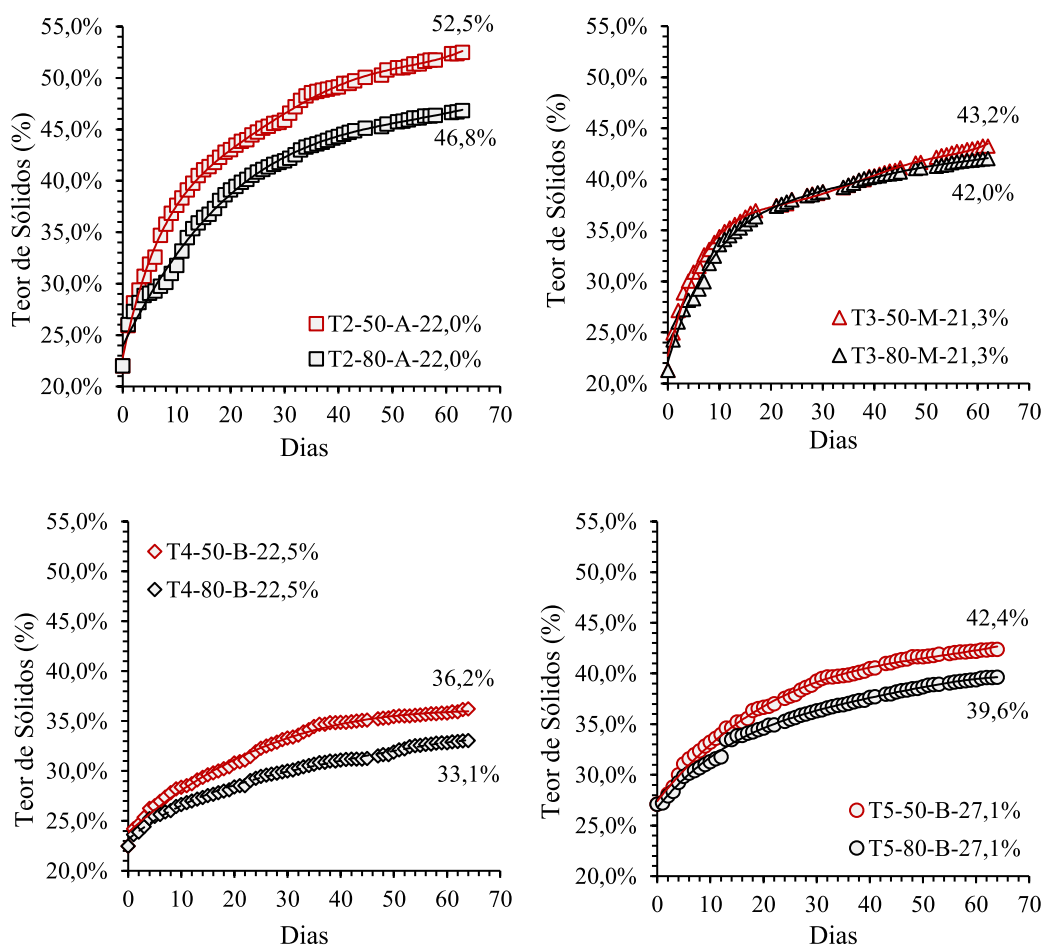


Figura 4.17. Curvas de teor de sólidos x tempo – Influência da espessura da camada.

Como pode ser observado, todas colunas de 50 cm apresentaram teor de sólido final maior que as colunas de 80 cm, quando comparados os ensaios realizados nas mesmas condições, variando somente a espessura da camada de rejeito disposta. Indicando que menores espessuras dispostas completam o processo de sedimentação e adensamento por peso próprio mais rapidamente quando comparado com camadas mais espessas.

Esperava-se uma maior variação da concentração de sólidos finais entre as camadas de 50 cm e 80 cm do ensaio T3. A pequena variação pode indicar uma incoerência dos resultados, sendo necessário uma nova bateria de ensaios para confirmar os resultados.

#### 4.10.1.3 Influência da permeabilidade do elemento drenante

As curvas de ganho de teor de sólidos ao longo do tempo dos ensaios, comparando os ensaios realizados com diferentes permeabilidades dos elementos drenantes estão ilustrados na Figura 4.18.

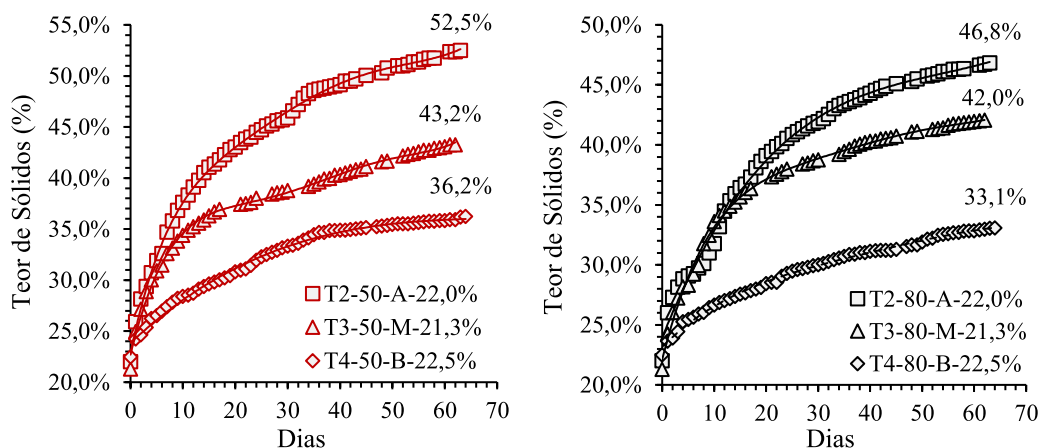


Figura 4.18. Curvas de teor de sólidos x tempo – Influência da permeabilidade do elemento drenante.

Como esperado, quanto maior a permeabilidade do elemento drenante na base da coluna, maior a concentração de sólidos ao final do teste. A permeabilidade do elemento drenante na base da coluna acelera tanto o processo de sedimentação quando o processo de adensamento por peso próprio.

De posse dos resultados, pode-se inferir uma variação do comportamento do rejeito ao longo do enchimento do reservatório, apresentando um ganho de concentração de sólidos mais elevado nas primeiras disposições (caso a fundação dos reservatórios seja um elemento drenante) e um gradual diminuição ao longo que as novas camadas são dispostas sobre uma espessura maior de camadas previamente dispostas.

#### 4.10.1.4 Influência do teor de sólidos inicial do material

As curvas de ganho de teor de sólidos ao longo do tempo dos ensaios, comparando o teor de sólido inicial da polpa estão apresentados na Figura 4.19

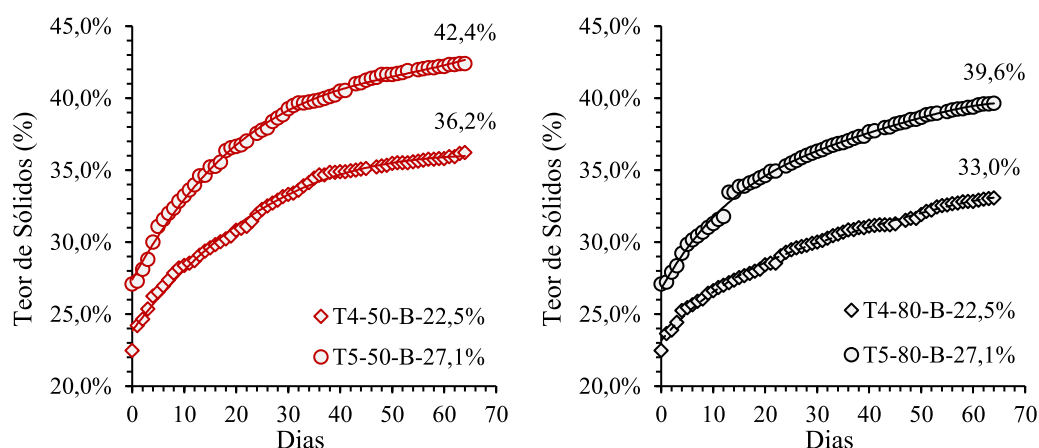


Figura 4.19. Curvas de teor de sólidos x tempo – Influência do teor de sólidos do material.

Os ensaios com maior concentração de sólidos inicial apresentam maior teor de sólido ao final dos testes, tanto para as camadas de 50 cm quanto para as camadas de 80 cm. Os ganhos médios de teores de sólidos, ao final do período dos ensaios, são da mesma ordem de grandeza, isto é, a diferença da concentração de sólidos finais corresponde à mesma diferença de teor de sólidos iniciais dos testes, indicando que a concentração de sólidos não apresenta grande influência do ganho de sólidos.

Vale ressaltar que os ensaios de laboratório não consideram o processo de ressecamento por incidência solar. Quando disposto com elevados teores de sólidos, os rejeitos apresentam tempos de sedimentação menores ou, a depender da concentração do espessado, apresentam somente os efeitos de adensamento por peso próprio, possibilitando uma exposição maior ao processo de ressecamento.

Geralmente os tempos dos ciclos de novas disposições são definidos pelo teor de sólido do rejeito ao final do período de ressecamento. Dessa forma, quando o rejeito é disposto com elevados teores de sólidos, é necessário menos tempo para que o mesmo atinja um teor de sólidos *target*, quando comparado com rejeitos dispostos com menores concentrações de sólidos. Esse ganho de tempo em ciclos pode proporcionar disposições extras ao longo do ano, possibilitando a otimização de utilização de um reservatório.

#### 4.10.2 Variação da Altura da Camada

As curvas de variação da altura da camada de sólidos para os ensaios realizados em coluna de 50 cm e 80 cm estão dispostas na Figura 4.20.

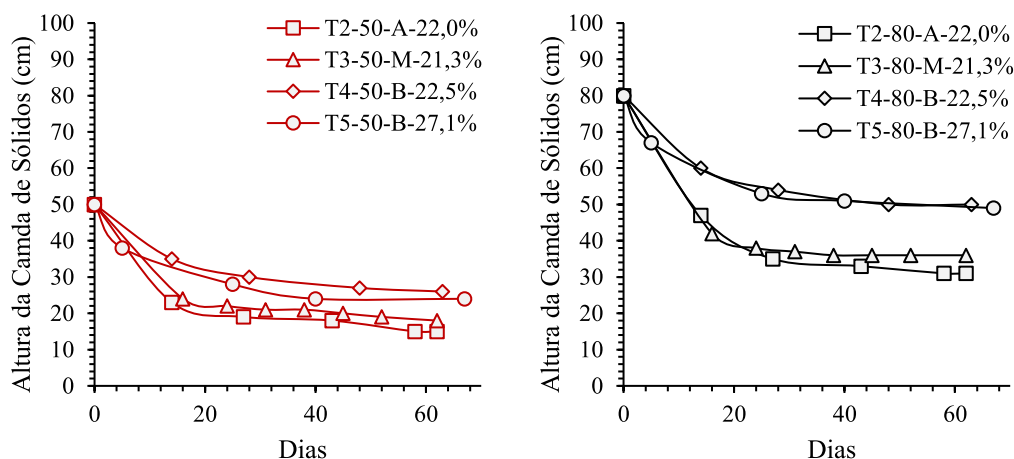


Figura 4.20. Variação da altura da camada de sólidos no tempo – 50 cm e 80 cm.

Pode-se observar uma maior variação da altura da camada de sólidos nos ensaios onde foram utilizados elemento drenantes de alta permeabilidade. Os ensaios de coluna de rejeito com 50 cm apresentaram uma diminuição gradual da variação com a mudança do elemento drenante, sendo o ensaio T4 o de menor variação.

Quando comparados os ensaios T4 e T5, ambos com elemento drenante de baixa permeabilidade, o ensaio de maior concentração de sólidos inicial apresentou maior variação na altura da camada.

Os ensaios de coluna de rejeito com 80 cm apresentaram o mesmo padrão de comportamento dos ensaios de 50 cm, porém demonstraram maior sensibilidade ao elemento drenante, sendo nítida a diminuição da variação da altura da camada de sólidos para os dois ensaios com baixa permeabilidade de fundo.

#### 4.10.3 Perfil de Sólidos

Em complemento aos ensaios de ganho de teor de sólidos e monitoramento da variação da altura da camada de sólidos no tempo, foi realizada uma amostragem no final do período de monitoramento do ensaio da coluna modificada T4 para determinação do perfil de sólidos.



Foi utilizado o amostrador pistão estacionário para amostragem de todo perfil da coluna. A amostra foi seccionada em sub amostras de 5 em 5 cm.

Os perfis de teor de sólidos obtidos estão apresentados na Figura 4.21.

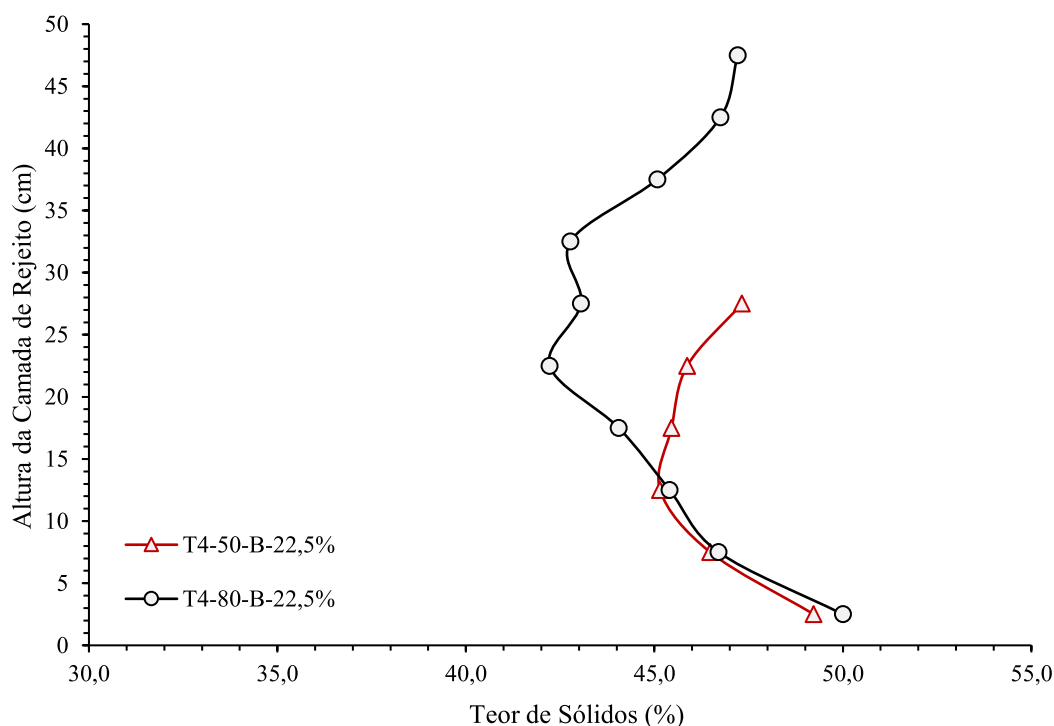


Figura 4.21. Perfil de teor de sólidos do ensaio de coluna modificado – T4.

Conforme pode ser observado, ambos os perfis apresentaram maior concentração de sólidos junto à base drenante, diminuindo gradualmente até ponto intermediário, onde começou apresentar ganho de teor de sólidos até o topo da coluna.

A maior concentração de sólidos na base da coluna se justifica devido ao processo de adensamento por peso próprio do material, potencializada com a presença de um elemento drenante, mesmo apresentando baixa permeabilidade. O ganho de teor de sólidos na porção superior da coluna pode ser explicado pelo processo de evaporação da água contida no rejeito. Ao longo do período de ensaio, foram instalados *caps* na porção superior dos tubos com a finalidade de mitigar o efeito de evaporação. A metodologia adotada, entretanto, não foi suficiente para garantir total estanqueidade do tubo, possibilitando a evaporação do material.

A Figura 4.22 ilustra a contração do material devido ao processo de ressecamento por evaporação do material ao final do teste.



Figura 4.22. Contração na porção superior da coluna de rejeito.

As amostragens para determinação do perfil de teor de sólidos foram realizadas alguns dias após o final do monitoramento dos ensaios nos testes T4 apresentado no item 4.10.1.1, dessa maneira, a altura da camada e a concentração média apresentada no perfil de sólidos não coincide com os resultados ao final do monitoramento da curva de secagem e variação da altura dos ensaios previamente apresentados.

## 5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS – ENSAIOS DE CAMPO

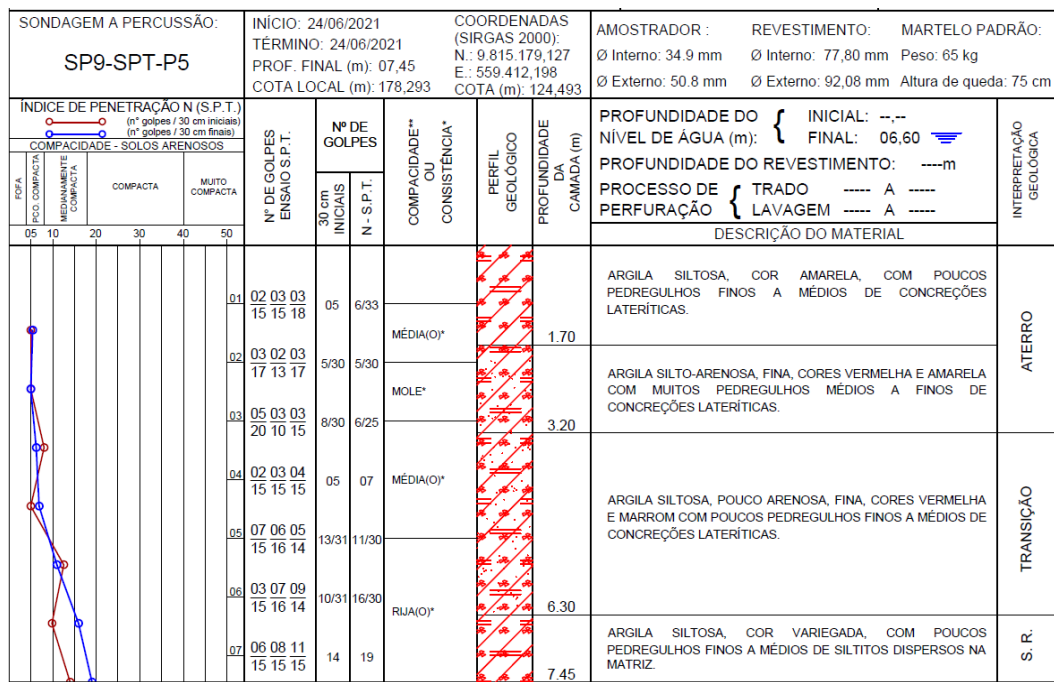
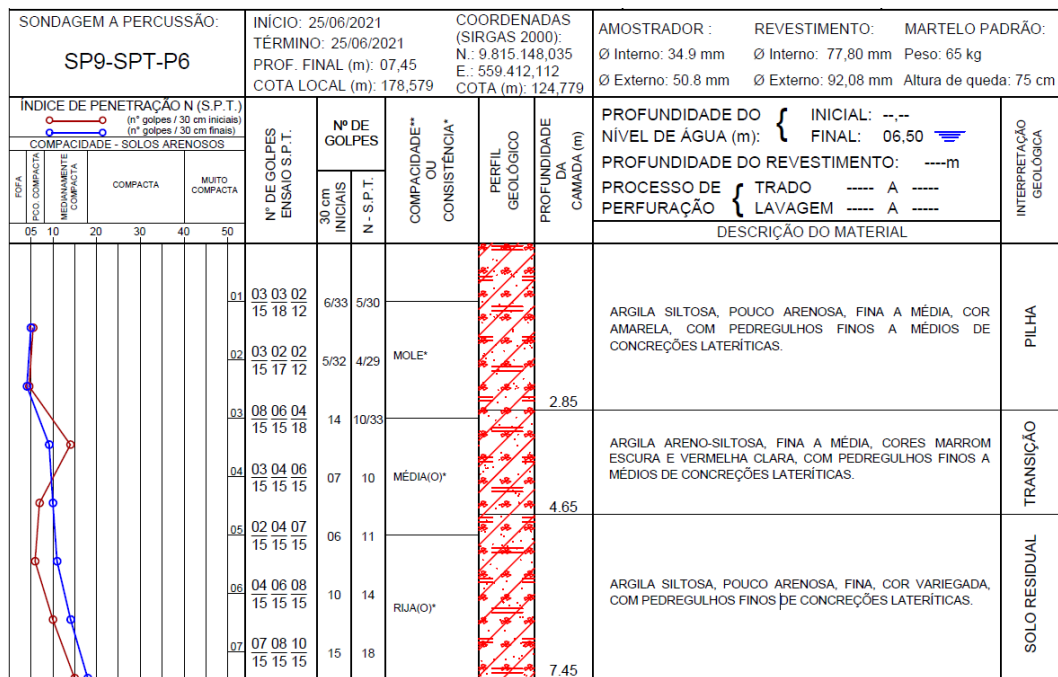
O presente capítulo tem como objetivo apresentar as análises e discussões dos resultados de monitoramento dos ensaios de campo, apresentando a caracterização geológico-geotécnica da área teste, avaliação dos ensaios *in-situ*, caracterização do material de fundação, processo de operação dos *ponds* piloto, avaliação das condições meteorológicas no período dos testes, ângulo de repouso do rejeito na disposição e após ressecamento, avaliação das curvas de secagem, acompanhamento do recalques ao longo da secagem e interpretação da instrumentação dos *ponds* piloto e área teste.

Também serão apresentadas as análises dos resultados do processo de ressecamento do rejeito, apresentando a morfologia e desenvolvimento das trincas, propriedades constitutivas das trincas conforme proposto por Abu-Hejleh e Znidarcic (1995), perfil de teor de sólidos das camadas ressecadas e uma proposta qualitativa de apresentar a influência da formação de uma crosta com menor índice de vazios no topo da camada de rejeito.

### 5.1 Caracterização Geológica-Geotécnica da Área Teste

A campanha de caracterização geológica-geotécnica da área teste dos *ponds* piloto consistiu na execução de 02 sondagens de simples reconhecimento com medida de SPT metro a metro, como apresentado no item 3.4.6..

As Figura 5.1 e Figura 5.2 ilustram os perfis obtidos com a sondagem de simples reconhecimento nas duas verticais executadas (SP9-SPT-P05 e SP9-SPT-P6).

Figura 5.1. Perfil de sondagem SP9-SPT-P5 realizado na área do *Pond 02*.Figura 5.2. Perfil de sondagem SP9-SPT-P6 realizado na área do *Pond 01*.

Não foi observado nível de água nos ensaios SPT's. Após a execução da prospecção, foi observada a presença de 03 camadas constituintes do perfil

geológico do terreno, sendo elas: argila amarela (pilha/estéril após o processo de lavra por metodologia de tiras), material de transição e argila variegada.

Como o objetivo da investigação foi definir a estratigrafia subsuperficial (pilha e material de transição) da área teste, o critério de parada dos ensaios foi o avanço de aproximadamente 2,0 m no material argila variegada.

A espessura média dos horizontes dos materiais ao longo do perfil geológico foi de aproximadamente 3,0 m de pilha e, 2,5 m para o material de transição, conforme ilustrado na Figura 5.3.

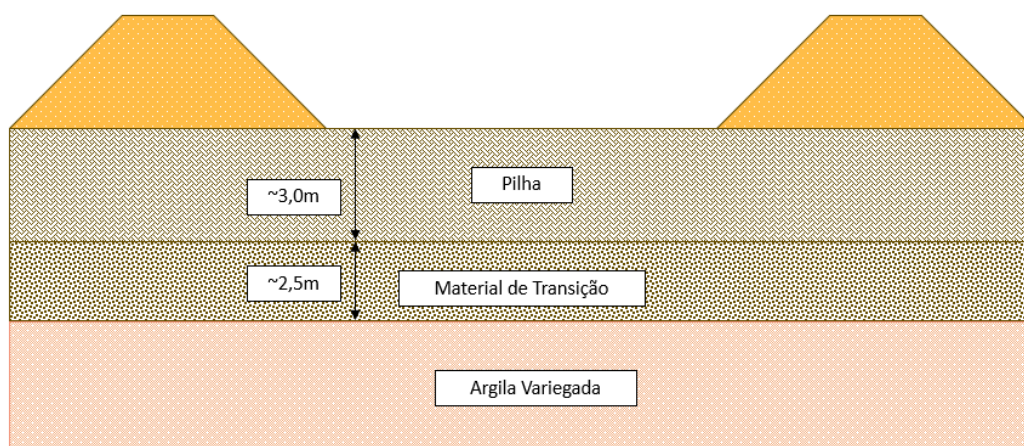


Figura 5.3. Estratigrafia – *Ponds* piloto.

Após a definição da estratigrafia obtida na prospecção do furo SP9-SPT-P5, foram realizados os ensaios de infiltração em cada camada estratigráfica encontrada.

Os resultados obtidos nos ensaios de infiltração em furo de sondagem realizado na vertical do furo SP9-SPT-P6 estão dispostos nas Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Resultados dos ensaios de infiltração em furo de sondagem.

Ensaio	Trecho Ensaiado		
	1,0 a 2,0m	3,0 a 4,0 m	6,0 a 7,0 m
Permeabilidade k (cm/s)	$2,6 \times 10^{-3}$	$6,7 \times 10^{-3}$	$7,9 \times 10^{-7}$

Conforme apresentado na estratigrafia da Figura 5.3, os materiais ensaiados nos trechos 1,0 a 2,0 m, 3,0 a 4,0 m e 6,0 a 7,0 m representam as estratigrafias de pilha, material de transição e argila variegada, respectivamente.

A estratigrafia de pilha (trecho 1,0 a 2,0m) apresentou elevada condutividade hidráulica, não sendo compatível com o histórico de ensaios realizados no mesmo material ao longo do platô Saracá leste. Após a escavação do canal de drenagem do sistema de extravasores, foi possível observar a presença de detritos vegetais e lentes pedregulhosas ao longo do terreno, podendo relacionar à elevada condutividade hidráulica obtida no ensaio de infiltração com a presença de caminhos preferencias.

O material de transição ou bauxita transicional é o material de contato da bauxita nodular (lavrada anteriormente) com a argila variegada. Apresenta fração pedregulhosa e concreções ferruginosas que corroboram com a elevada condutividade hidráulica.

A argila variegada, conforme esperado, apresentou baixa condutividade hidráulica, indo de encontro com a média dos resultados obtidos em ensaios realizados na mesma litologia ao longo do platô Saracá Leste.

## 5.2 Ensaios *In-Situ* e Caracterização da Área dos Ponds Experimentais

Os resultados dos ensaios de campo para determinação da permeabilidade, executados em trincheiras exploratórias e determinação do peso específico aparente seco pelo método frasco de areia estão apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2. Resultados dos ensaios *in situ*.

Ensaios <i>In-situ</i>	Pond 01		Pond 02	
	TC- 01	TC-02	TC-01	TC-02
Permeabilidade k (cm/s)	$7,4 \times 10^{-5}$	$4,8 \times 10^{-5}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$2,3 \times 10^{-5}$
Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )	1,393	1,422	1,452	1,488

Os coeficientes de permeabilidade encontrados nos ensaios *in-situ* no material de fundação dos *ponds* apresentaram uma ordem de grandeza de  $10^{-5}$  cm/s, estando



dentro da faixa de permeabilidade de materiais argilo siltosos a siltes argilosos e estão de acordo com a média dos coeficientes de permeabilidade obtidos em ensaios realizados na argila amarela (pilha) ao longo do Platô Saracá Leste. A trincheira 01 do *pond* 02 apresentou uma condutividade hidráulica de grandeza  $10^{-2}$  cm/s, permeabilidade esperada para materiais granulares, destoando dos demais resultados. A elevada condutividade hidráulica pode ser explicada pela existência de caminhos preferenciais gerados pela presença de detritos vegetais e/ou lente de material pedregulhoso.

Os resultados da campanha de caracterização geotécnica do material de fundação estão dispostos na Tabela 5.3.

Tabela 5.3. Resultados dos ensaios de caracterização.

Reserv.	Amostra	$\rho_s^{(1)}$ (g/cm <sup>3</sup> )	Limites de Consistência (%)			Granulometria (%)			
			LL	LP	IC	Pedr.	Areia	Silte	Argila
<i>Pond</i> 01	TC-01	2,638	76,0	30,8	45,2	31,4	6,7	9,8	52,1
	TC-02	2,615	77,7	33,1	44,6	31,0	6,5	11,6	50,9
<i>Pond</i> 02	TC-01	2,619	82,0	36,1	45,8	59,7	2,6	7,4	30,2
	TC-02	2,643	74,8	35,7	39,2	38,0	7,1	10,1	44,8

(1) Massa Específica dos grãos;

De posse dos resultados dos ensaios de laboratório, foi possível a caracterização do material de fundação (pilha) dos *ponds* piloto, plotar a carta de plasticidade do material e construir a curva de distribuição granulométrica, apresentados nas Figura 5.4 e Figura 5.5, respectivamente.

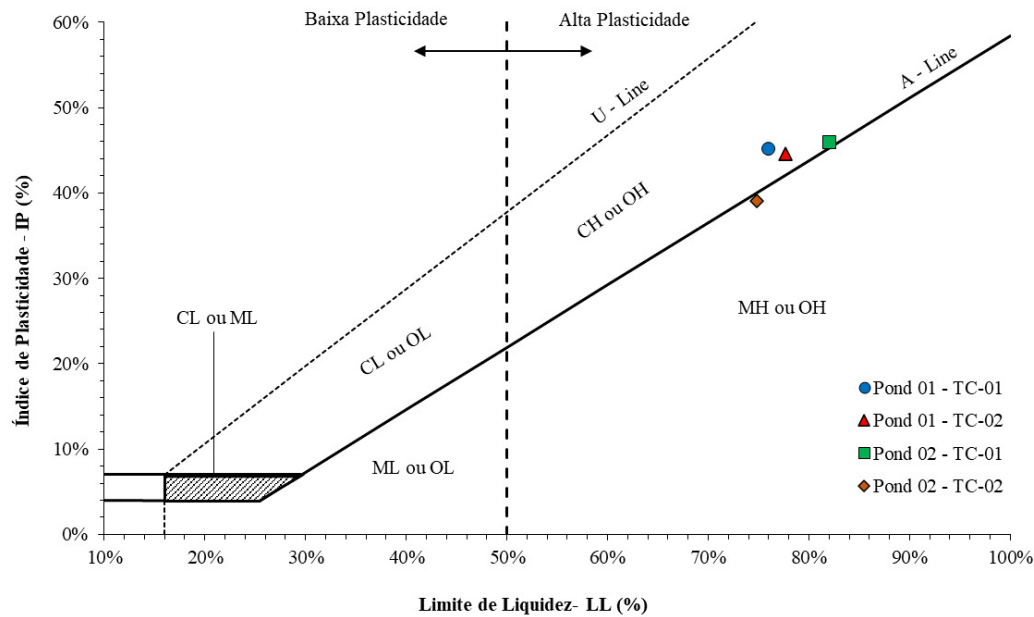


Figura 5.4. Carta de plasticidade.

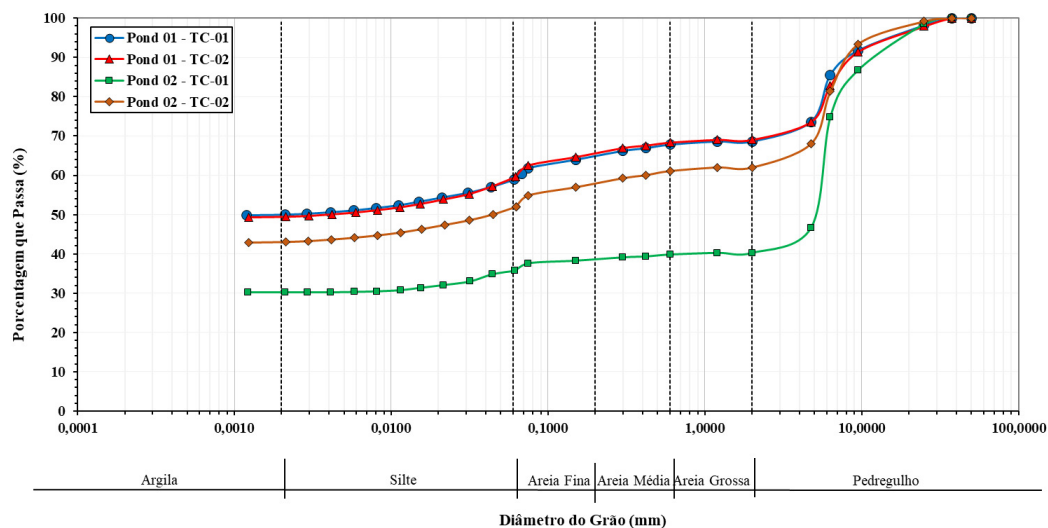


Figura 5.5. Curva granulométrica.

Os materiais obtidos nas trincheiras do *pond* 01 (*Pond* 01 – TC-01 e TC-02) e o material TC-02 do *pond* 02 são classificados no sistema internacional de classificação de solos (SUCS) como CH – Argila de alta plasticidade. Já o material TC-01 do *pond* 02 é classificado como Areia argilosa pelo SUCS, corroborando com a elevada permeabilidade encontrada nos testes *in-situ*.

### 5.3 Dispositivos Operacionais dos *Ponds* Experimentais

Os dispositivos operacionais dos *ponds* experimentais consistem em sistema de extravasamento e espigotamento. Estes dispositivos proporcionam uma melhor operacionalidade dos *ponds* ao longo do enchimento dos reservatórios para os testes de secagem de rejeito.

#### 5.3.1 Sistema de Extravasamento

Como citado no item 3.4.7, o sistema de extravasamento é composto por um extravasor metálico, placas de stop-logs em madeira e medidor de vazão a jusante da tubulação de extravasamento.

##### 5.3.1.1 Stop-log

A proposta inicial de operação dos stop-logs previa que somente o peso próprio das placas em madeira seria suficiente para impedir o fluxo de água pelo extravasor, não sendo necessário nenhum outro elemento auxiliar. Porém, ao longo dos testes, foi observado fluxo de água no espaçamento entre a placa do stop-log e a guia do extravasor metálico.

Sendo assim, foi identificada a necessidade de implementar o sistema de extravasamento com a utilização de cunhas em madeira e tiras elásticas, conforme apresentado na Figura 5.6.

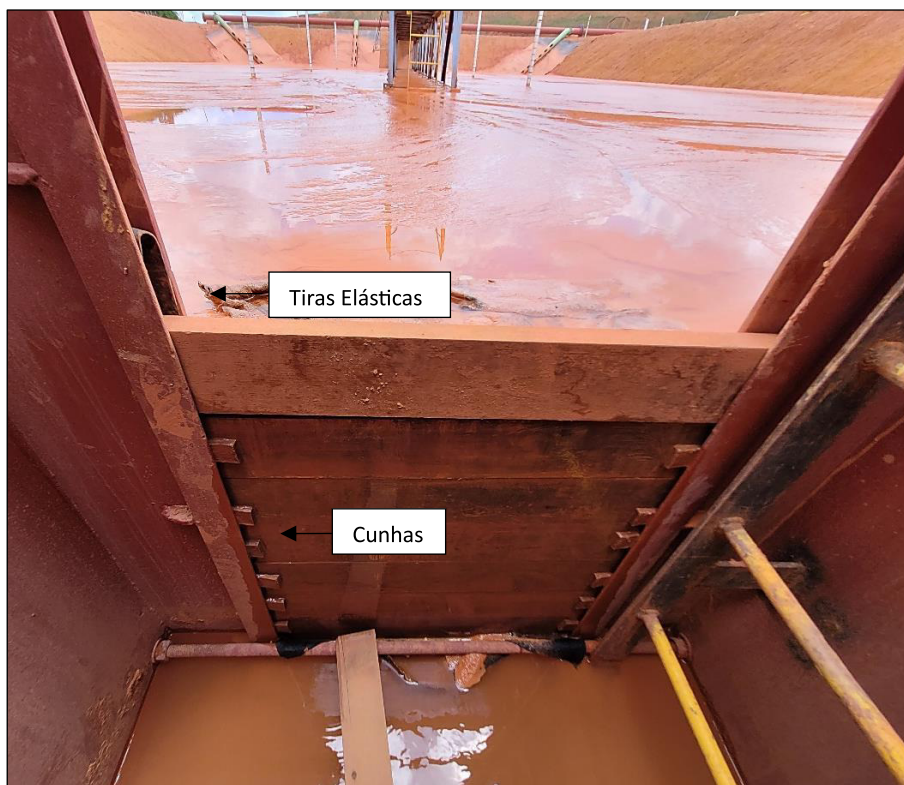


Figura 5.6. Implementação do sistema de extravasamento com cunhas e tiras elásticas.

A instalação das cunhas promove uma força de compressão nas placas stop-logs junto à guia do extravasor. As tiras elásticas foram posicionadas no contato aço-madeira, trabalhando como elemento impermeabilizante, impedindo o fluxo de água.

Após a implementação do sistema, não foi observado fluxo indesejado de água pelas placas de stop-log, possibilitando a correta operação e controle das vazões do extravasor.

### 5.3.1.2 Medidor de Vazão

A instalação dos medidores de vazão a jusante da tubulação de extravasamento teve por objetivo medir a vazão de água que saia do sistema pelo extravasador.

De posse do volume de água disposto na polpa de rejeito, contribuição pluviométrica ao longo dos testes, taxa de evaporação diária e vazão drenada pelo sistema de extravasamento, seria possível calcular o volume de água infiltrada por meio de balanço hídrico. Porém, nos testes piloto, não foi possível o cálculo do

volume de infiltração por essa metodologia, visto que, devido ao processo de sedimentação e ângulo de repouso do rejeito, nos primeiros dias após a disposição do rejeito, um grande volume de água era direcionado ao sistema de extravasamento, conforme apresentado na Figura 5.7.



Figura 5.7. Acúmulo de água na região do extravasor.

Ao remover as placas de stop-log, o grande volume de água acumulado é direcionado para o medidor de vazão a uma vazão inconstante, tornando muito difícil e imprecisas as medições em campo.

A Figura 5.8 ilustra o grande volume de água drenado no sistema de extravasamento após a remoção da placa stop-log.





Figura 5.8. Vazão após remoção de placa stop-log.

Sendo assim, após algumas tentativas, o monitoramento das vazões de água drenada pelo sistema de extravasamento deixou de ser realizado.

### 5.3.2 Sistema de Espigotamento

A utilização do espigote tipo flauta e válvula tipo borboleta proporcionou o controle das vazões do sistema de espigotamento ao longo do enchimento dos reservatórios, possibilitando uma disposição de maneira mais ordenada e de projeção homogênea.

#### 5.3.2.1 Válvula tipo Borboleta

Na Figura 5.9 é possível observar a propagação do rejeito em forma de bulbos de propagação, apresentando raios similares e projeção homogênea. Pode-se observar que os bulbos de propagação de rejeito dos espigotes (separados pela passarela de amostragem) se unem próximos ao extravasor.



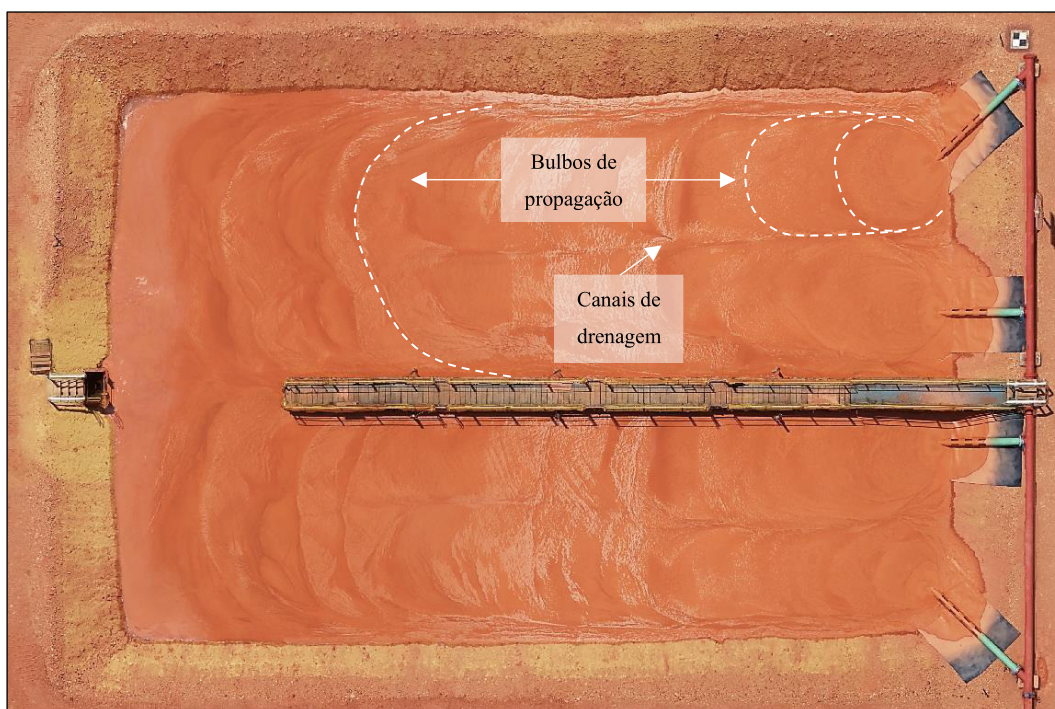


Figura 5.9. Reservatório após disposição controlada.

A disposição ordenada e homogênea proporciona um ângulo de repouso único do rejeito, resultando no acúmulo de água próximo ao sistema de extravasamento. Os pontos de intersecção dos bulbos de disposição formam essencialmente linhas retas que atuam como canal de drenagem, conduzindo a água sobrenadante do processo de sedimentação e adensamento da polpa e das águas de incidência pluviométrica em direção ao extravasor.

A Figura 5.10 ilustra um cenário onde não foi performada uma disposição controlada, apresentando diferentes pressões e vazões em cada espigote.

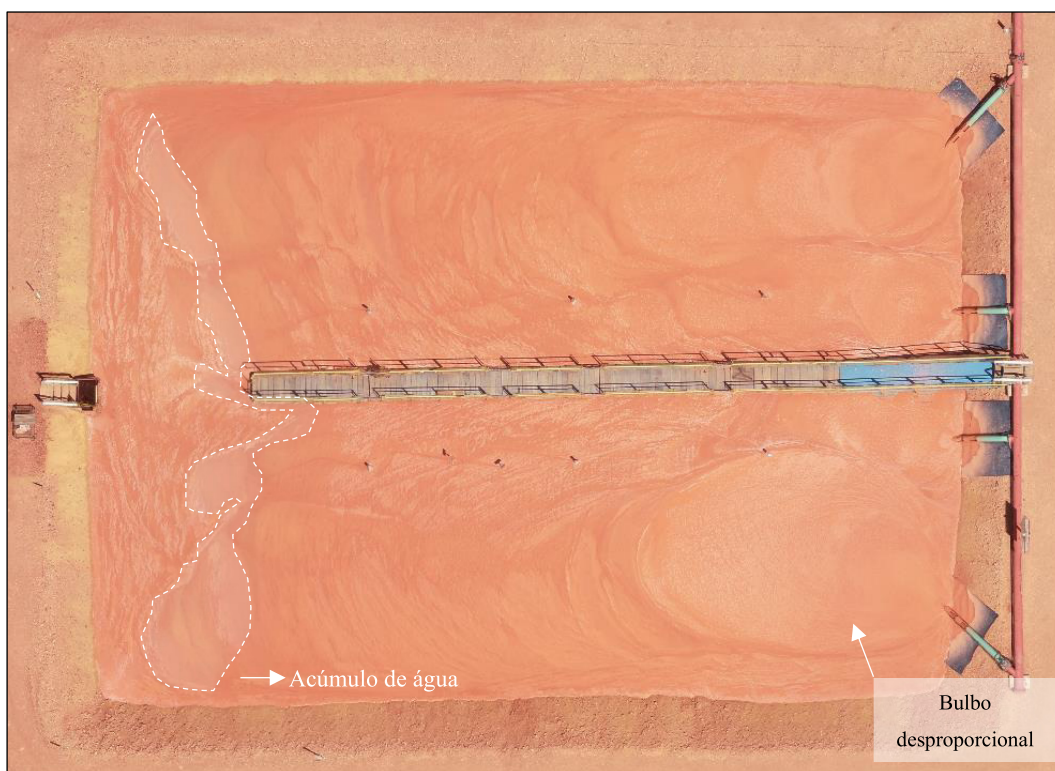


Figura 5.10. Reservatório após disposição descontrolada.

Pode-se observar que em uma disposição desordenada, onde as pressões e vazões não foram controladas para o espigote na porção de baixo da figura, os bulbos de disposição são assimétricos e desproporcionais. Não há uma formação de canal de drenagem, acarretando em pontos de acúmulo de água ao longo do reservatório e dificultando a drenagem da água sobrenadante.

A disposição do rejeito com grandes pressões e velocidades ocasiona o acúmulo de rejeito junto à parede do extrator, formando uma barreira para a drenagem da água sobrenadante do reservatório.

### 5.3.2.2 Espigote tipo Flauta

A proposta de utilização de espigotes tipo flauta teve como objetivo mudar a metodologia de disposição ocorrida com os espigotes horizontais, comumente adotadas na disposição de rejeitos, onde o material disposto tende a traçar uma trajetória parabólica, mudando a energia de queda ao longo do enchimento do reservatório. A utilização de espigotes tipo flauta proporciona disposições sub horizontais, mitigando a variação da energia no processo de disposição do material



ao longo do enchimento do reservatório, possibilitando disposições com praticamente a mesma altura de queda em toda vida útil do reservatório.

Conforme exposto por Bromwell & Oxford (1977), a metodologia de disposição com velocidades relativamente baixas tende a diminuir a segregação, imprimindo uma força cinética no sentido do escoamento do rejeito, como ilustrado na Figura 5.11.



Figura 5.11. Espigotamento sub horizontal com a utilização do espigote tipo flauta.

Para investigar a eficiência da utilização dos espigotes tipo flauta e a disposição sub horizontal com velocidades controladas, foi realizada uma campanha exploratória de análise granulométrica. Swarbrick & Fell (1991) consideram que a segregação do material ocorre nos primeiros 20-30 m do reservatório, dessa forma, amostragens ao longo dos *ponds* experimentais seriam suficientes para se notar alguma tendência de segregação do material.

Para caracterizar granulometricamente o material disposto, amostras foram tomadas a cada hora ao longo do período de enchimento dos reservatórios e realizados

ensaios de granulometria a laser. Cinco amostras foram tomadas na válvula instalada antes do *manifold* de distribuição (A a E). A Figura 5.12 apresenta as curvas granulométricas das amostras coletadas no *manifold*.

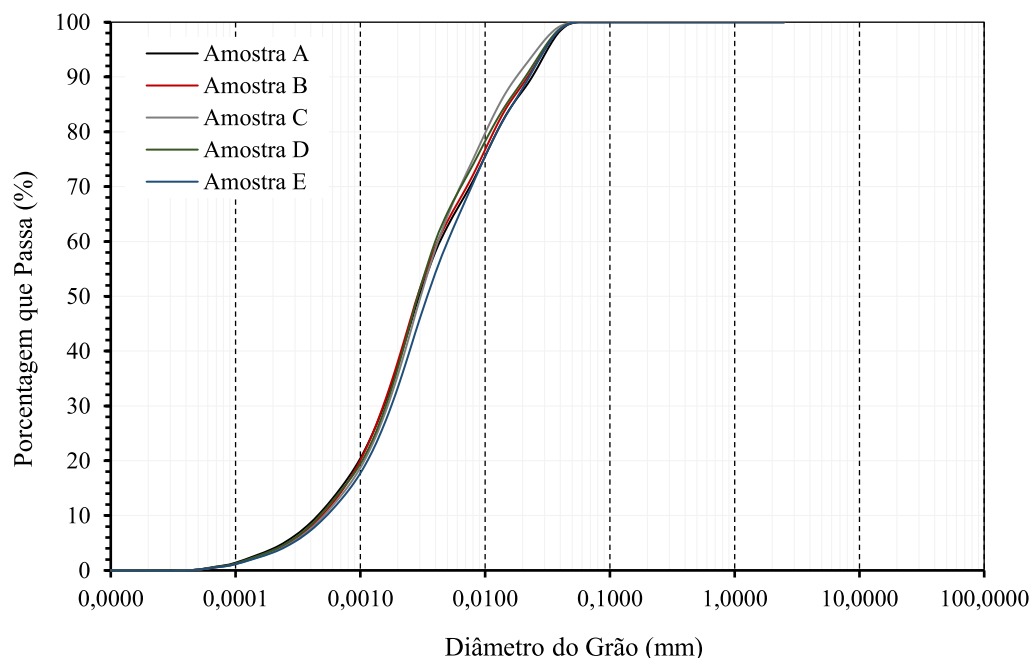


Figura 5.12. Distribuição granulométrica do material disposto nos reservatórios experimentais.

Após a coleta das amostras no *manifold*, amostras próximas ao espigote (ponto 1), no centro do reservatório (ponto 2) e próximas ao extravasor (ponto 3) foram tomadas para analisar a ocorrência do processo de segregação do material ao longo de sua deposição. As amostras foram identificadas como “*Localização da amostra (1, 2 ou 3) – Horário da amostra (B, C, D ou E)*”, conforme ilustrado na Figura 5.13.

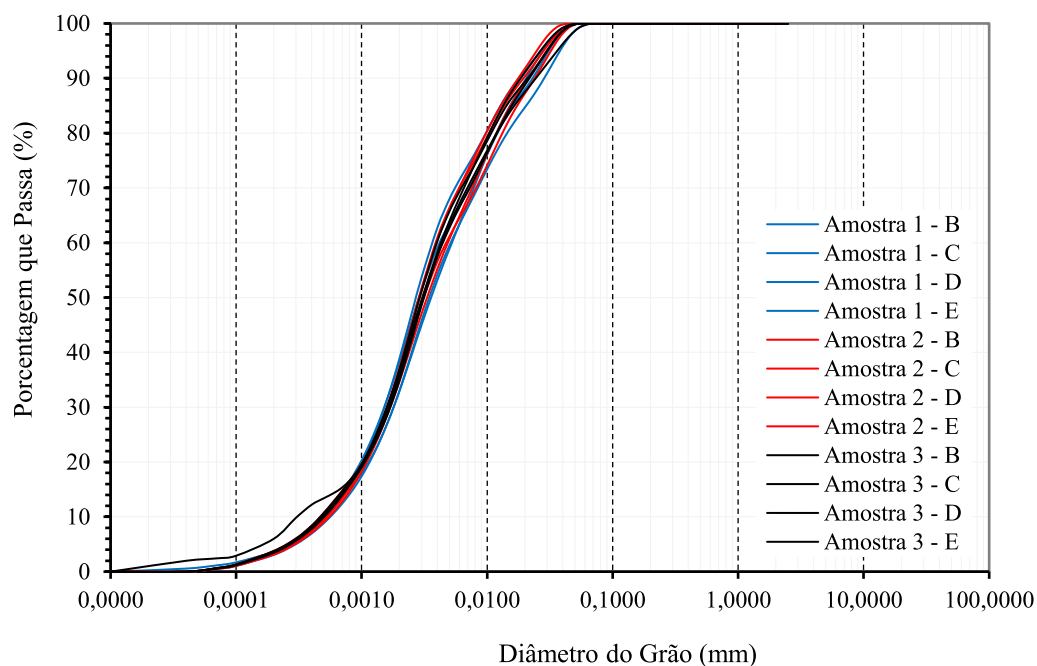


Figura 5.13. Distribuição granulométrica de pontos dentro do reservatório piloto.

Como a “Amostra A” foi tomada a primeira amostra no *manifold* no início do processo de enchimento, não havia material dentro do reservatório para se fazer a amostragem.

A amostra 3 - B realizadas próxima do extravasor apresentou um comportamento anômalo na distribuição granulométrica após o diâmetro de 1  $\mu\text{m}$ .

Conforme pode ser observado, não foi possível identificar uma tendência, mesmo que qualitativa, de segregação pela utilização da metodologia de disposição sub horizontal com velocidades controladas.

#### 5.4 Monitoramento Meteorológico

Foi realizado o monitoramento meteorológico ao longo de todo o período dos testes de ressecamento, iniciando-se em 01 de agosto de 2021 e concluindo-se em 01 de agosto de 2022.

Os dados do sistema de monitoramento meteorológico (pluviômetro e evaporímetros tipo tanques classe A) foram obtidos por leituras diárias realizadas às 6h da manhã. Já os dados obtidos pelas estações meteorológicas automatizadas eram atualizados e armazenados de hora em hora.

### 5.4.1 Temperatura Ambiente

A temperatura ambiente média mensal ao longo do período dos testes nos *ponds* pilotos está apresentada da Figura 5.14.

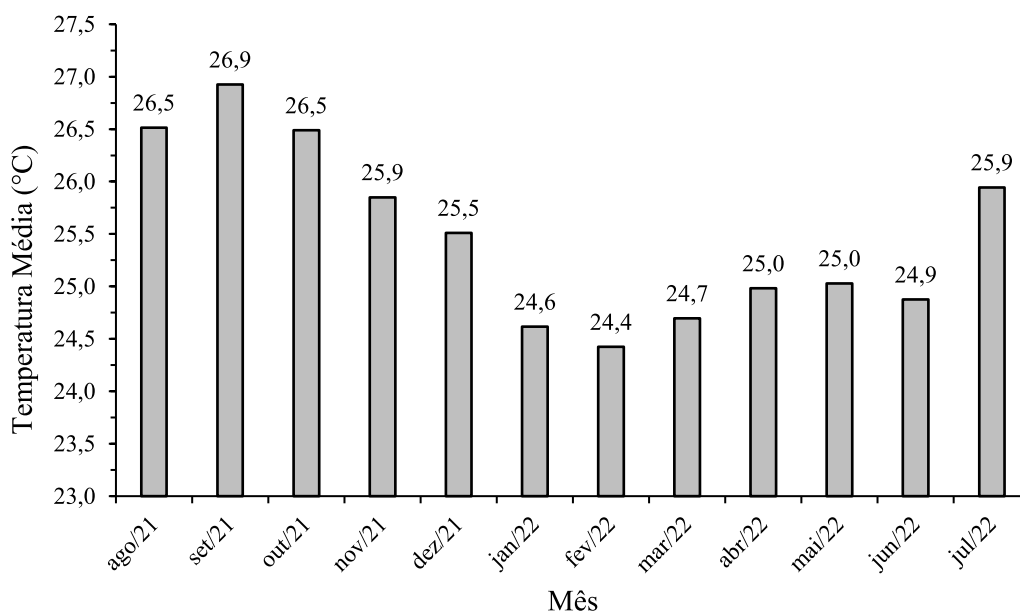


Figura 5.14. Temperatura média mensal no período dos testes.

É possível observar o pico máximo da temperatura média mensal em setembro de 2021, apresentando uma média de 26,9 °C e diminuição gradual nas temperaturas médias até o mínimo no mês de fevereiro, apresentando uma temperatura média de aproximadamente 24,4 °C.

A temperatura máxima registrada ao longo dos testes foi de 33,5°C, enquanto a mínima foi de 20,3°C.

### 5.4.2 Chuva

Inicialmente a incidência pluviométrica era aferida pelo sistema de monitoramento meteorológico automático localizado no TP-02. Ao longo dos testes, foi constatada uma variação considerável entre o índice pluviométrico medido no TP-02 e o observado na área dos *ponds* piloto.

No início do outubro de 2021, foi instalado um pluviômetro convencional na área teste para monitoramento da incidência pluviométrica, conforme explicitado no



item 3.5.4. Quando não era possível a leitura do pluviômetro, adotava-se os dados medidos no TP-02.

Em janeiro de 2022, um novo sistema de monitoramento meteorológico automático foi instalado no SP-09 que, devido à maior proximidade e menor desvio no monitoramento pluviométrico observado na área teste, passou a ser usado quando não era possível aferir a leitura no pluviômetro convencional.

A Pluviometria média diária está ilustrada na Figura 5.15..

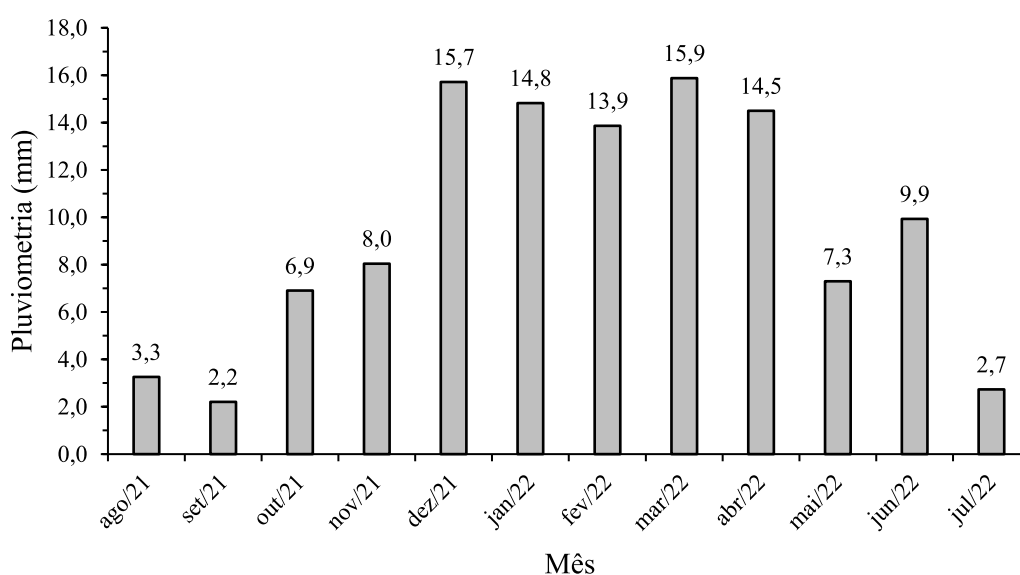


Figura 5.15. Pluviometria média diária.

A pluviometria acumulada do período de monitoramento dos testes foi de 3.494 mm, apresentando a maior incidência pluviométrica diária de 133,6 mm no mês de dezembro.

Pode-se observar um aumento expressivo na intensidade pluviométrica no período de dezembro de 2021 a abril de 2022, apresentando uma pluviometria acumulada de 2.262 mm.

### 5.4.3 Umidade Relativa do Ar

Os valores das médias mensais da umidade relativa do ar estão apresentados na Figura 5.16.

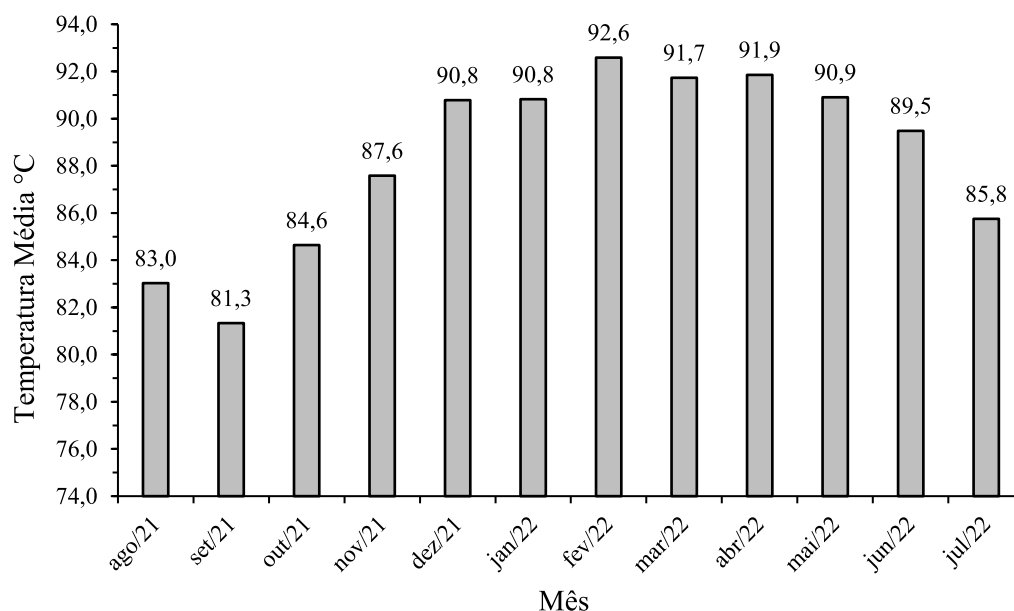


Figura 5.16. Umidade relativa média mensal do ar.

É observada a menor média mensal da umidade relativa do ar no mês de setembro e a maior média no mês de fevereiro, resultados em concordância com os dados obtidos das médias da temperatura ambiente e índice pluviométrico.

### 5.4.4 Velocidade do Vento

A velocidade média mensal do vento durante o período dos testes variou entre 1,21 e 1,63 m/s, como pode ser observado na Figura 5.17.

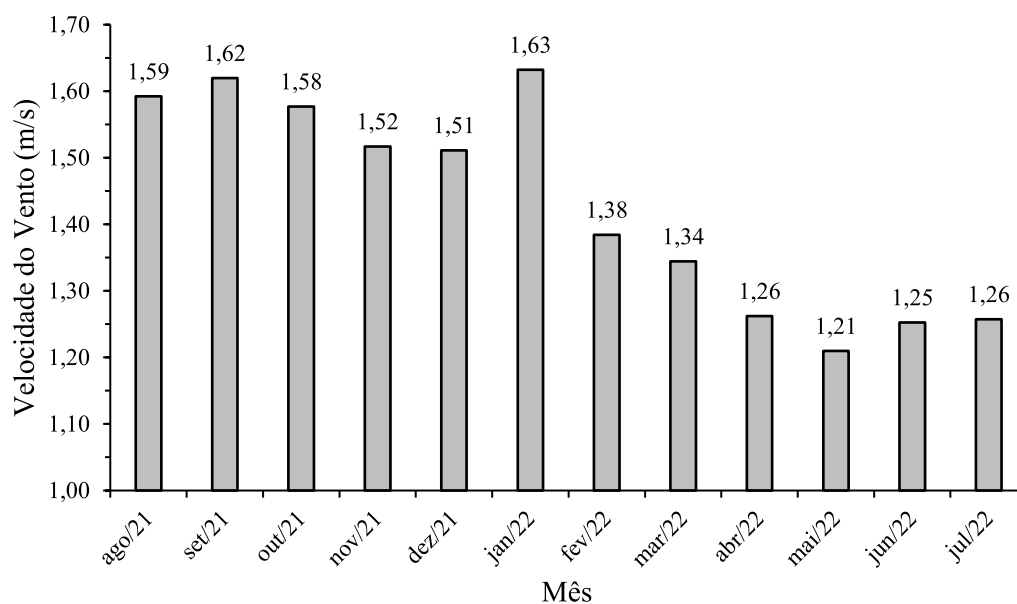


Figura 5.17. Velocidade do vento média mensal.

No período apresentado, a velocidade do vento teve seu valor máximo de 6,3 m/s.

#### 5.4.5 Evaporação

A taxa de evaporação diária foi medida pelos evaporímetros tipo tanque classe A e inferida por modelo matemático utilizando os dados de temperatura do ar, pressão de vapor, velocidade do vento e radiação solar aferidos no sistema de monitoramento meteorológico automático localizado no TP-02, conforme explicitado no item 3.5.4.

A taxa de evaporação diária está ilustrada na Figura 5.18.

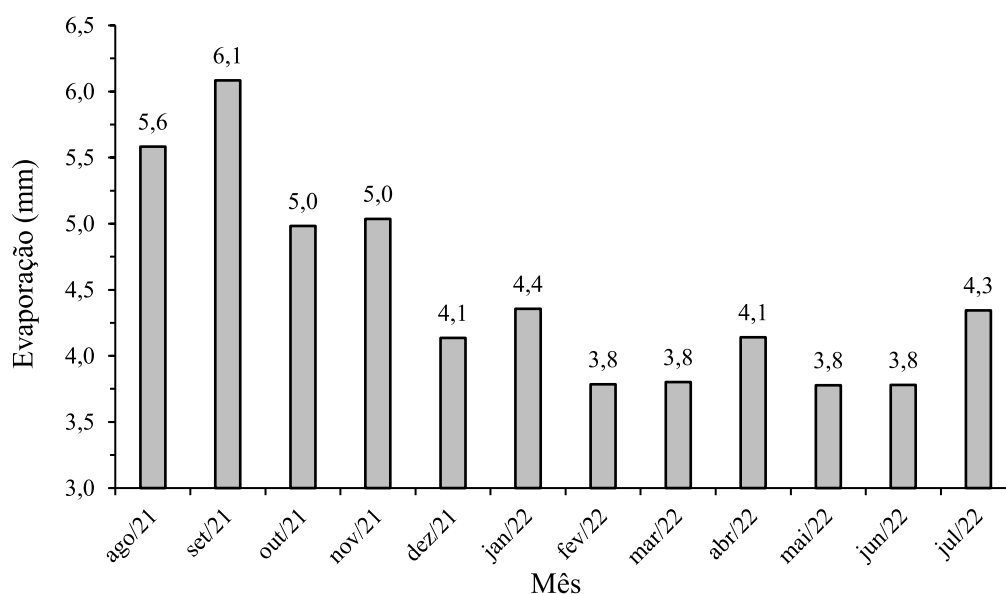


Figura 5.18. Taxa de evaporação média diária.

A evaporação acumulada do período de monitoramento dos testes foi de 1.638 mm, apresentando maior taxa de evaporação diária de 6,1 mm em setembro de 2021 e menor taxa de 3,8 mm em fevereiro de 2022. Segundo Abu-Hejleh & Zinidarcic (1995), as taxas de evaporação média diárias observadas no período dos testes são consideradas de média a alta.

Conforme observado no monitoramento da temperatura, chuva, umidade relativa do ar e velocidade média, é possível observar uma queda da taxa de evaporação a partir de dezembro de 2021 devido ao início do inverno amazônico. A tendência de aumento da evaporação era esperada na transição dos meses de maio e junho de 2022, porém só foi observada em julho de 2022, mantendo a média diária abaixo dos 5 mm.

#### 5.4.5.1 Determinação do coeficiente do tanque classe A ( $K_p$ )

O coeficiente do tanque classe A tem por objetivo converter a evaporação do tanque (ECA) em evaporação total (ET). Conforme apresentado por Doorenbos e Pruitt (1977), o coeficiente de correção  $K_p$  é um parâmetro em função da velocidade do vento e umidade relativa do ar. Há diversos métodos para estimar o valor de  $K_p$ ,

todos baseados na velocidade do vento ( $U$ ), umidade relativa do ar ( $UR$ ) e no comprimento da área de bordadura ( $B$ ).

Porém, para facilitar a determinação de  $K_p$  para a área do Saracá Leste, fez-se uma análise de sensibilidade comparando os valores obtidos nas leituras do tanque classe A, minorados com  $K_p$ , com os valores obtidos pelo método combinado de Penman modificado por Doorenbos e Pruitt (1977).

A sensibilidade de  $K_p$  está ilustrada na Figura 5.19.

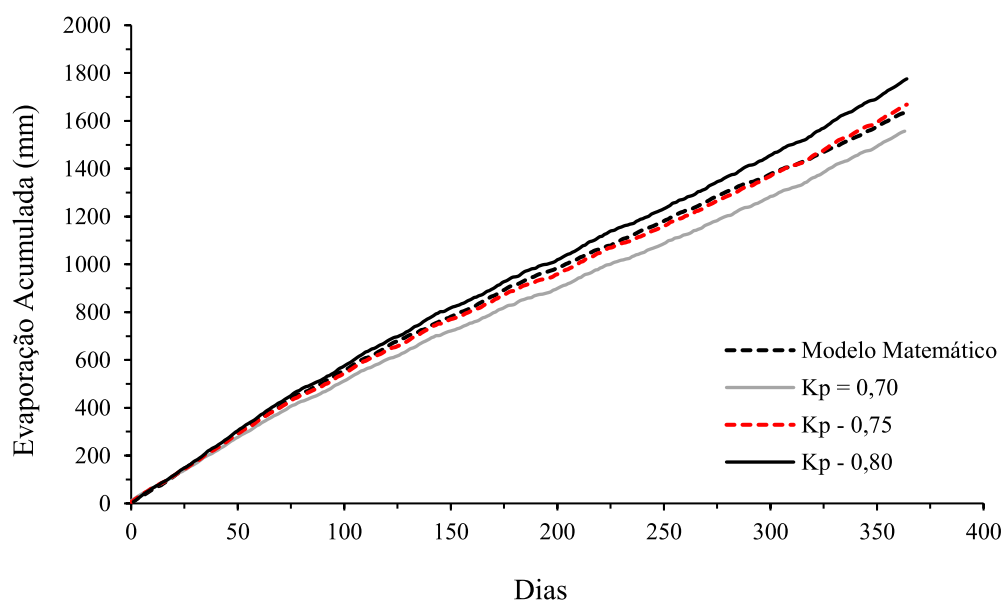


Figura 5.19. Análise de sensibilidade para  $K_p$ .

Pode-se observar que o valor de  $K_p = 0,75$  melhor se ajustou para a curva de evaporação acumulada pelo tanque classe A ao longo do período de medição.

Como já apresentado nos itens anteriores, esses parâmetros não são constantes, o que implica na variação do  $K_p$ . Porém, a fim de simplificar uma aferição expedita da evaporação via tanque classe A, a utilização de  $K_p$  na ordem de 0,75 apresentará valores coerentes para a área do Platô Saracá Leste.

## 5.5 Ângulo de Repouso – Camada de Selagem

A primeira disposição de rejeito foi definida como camada de selagem, tendo o objetivo de proporcionar o nivelamento conforme ângulo de repouso natural dos

rejeitos no final do processo de enchimento e aferição do ângulo de repouso após etapa de ressecamento.

O processo de disposição da camada de selagem foi realizado de forma controlada, até a chegada do rejeito próximo ao extravasor, cessando então a etapa de espigotamento. O ângulo de repouso do rejeito foi aferido com auxílio das régua linimétricas.

### **5.5.1 Ângulo de repouso do rejeito na disposição**

A disposição da camada de selagem do *Pond* 02 foi realizada no dia 30/08/2021 em um processo de enchimento de 1h10min, apresentando um teor de sólidos médio de 24,3%.

Após a disposição, foi aferida uma camada de 0,23m de espessura na régua instalada a 5,0m da parede de espigotamento e 0,15m na régua próxima ao extravasor, posicionada a 15,5m de distância da primeira régua, resultando em um ângulo de repouso de aproximadamente 1% ao final do processo de disposição.

Devido ao atraso na instalação da passarela de amostragem, a disposição da camada de selagem do *Pond* 01 foi realizada no dia 18/09/2021 em um processo de 1h00min, apresentando um teor de sólidos médio de 21,7%.

Foi medida uma espessura de 0,29m de espessura na régua próxima aos espigotes e 0,16m na régua próxima ao extravasor, posicionada a 15,5m de distância da primeira régua, resultando em um ângulo de repouso de aproximadamente 0,8% ao final do processo de disposição.

### **5.5.2 Ângulo de repouso após período de secagem**

O período de secagem da camada disposta no *Pond* 02 foi de 11 dias, atingindo teor de sólidos médio de 47,0%. Observou-se uma variação vertical na régua próxima ao espigote de 0,12 m, isto é, apresentando uma espessura de 0,11m e uma variação de 0,07 m na régua próxima ao extravasor, atingindo uma elevação de 0,09m.

O período de secagem adotado no *Pond* 01 foi de 17 dias, apresentando teor de sólido médio de 53,7%. A régua instalada próxima à parede de espigotamento



apresentou espessura de 0,14m e a régua próxima ao extravasor atingiu altura de 0,07 m, representando recalque de 0,15m e 0,09m respectivamente.

Sendo assim, após o processo de secagem, o rejeito disposto nos *Pond* 02 e *Pond* 01 apresentaram ângulo de repouso de aproximadamente 0,4%.

## **5.6 Monitoramento da Curva de Secagem**

Os resultados do monitoramento das curvas de secagem dos ensaios em campo estão separados em período de verão 2021 e inverno 2022.

### **5.6.1 Período de Verão 2021**

O período de verão foi composto pelas disposições das camadas de selagem, dois ciclos de disposições e secagem de camadas com 0,50 m no *pond* 02 e um ciclo de disposição e secagem de camadas com 0,80 m no *pond* 01.

Devido ao atraso na construção da passarela de amostragem do *pond* 01, não foi possível executar ciclos de disposições simultâneas nos reservatórios, além de restringir a somente uma disposição no *pond* 01 no período dos testes de verão.

#### **5.6.1.1 Primeira Camada de 0,50m – Pond 02**

A disposição da primeira camada de 0,5 m do Pond 02 foi realizada no dia 10/09/2021, sobre a camada de selagem que apresentava 47% de teor de sólidos.

O material foi disposto com teor de sólidos médio de 20,4% em 4h30min, resultando em uma camada de 0,5 m de espessura. O monitoramento de ganho de teor de sólidos foi realizado por 47 dias até a data 27/10/2021.

Os dados de monitoramento dos teores de sólidos médios da primeira camada do *Pond* 02 estão apresentados na Figura 5.20.

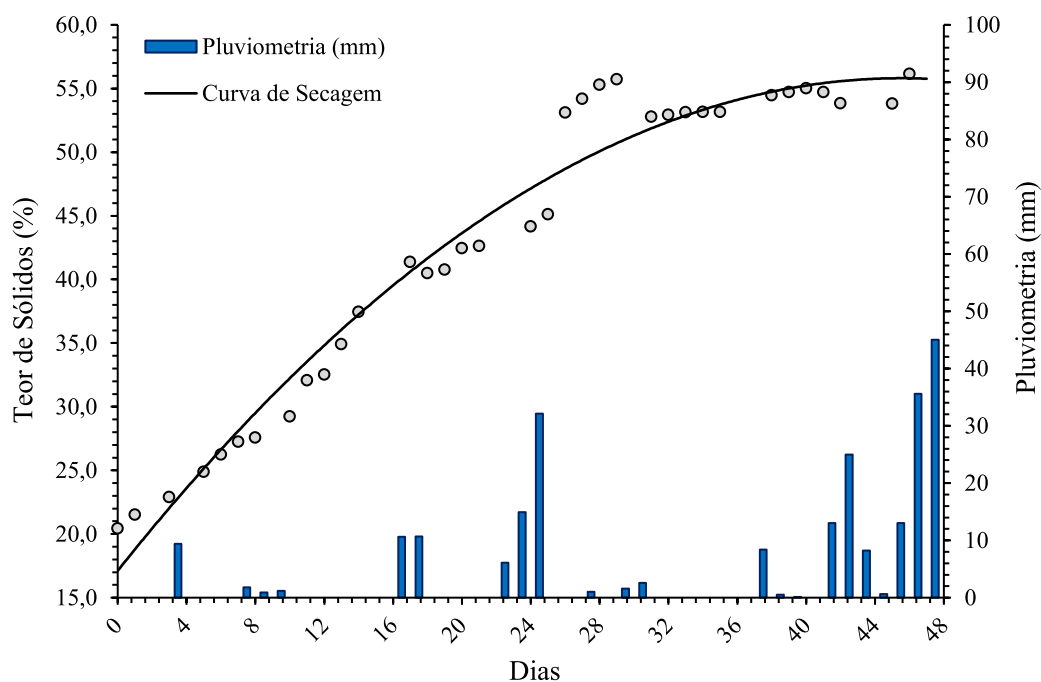


Figura 5.20. *Pond 02* - Monitoramento da 1ª camada de 0,50 m.

A primeira camada de 0,50 m no *Pond 02* atingiu 54,4% de teor de sólidos nos 47 dias de processo de secagem.

No período de monitoramento, foi observada uma taxa de evaporação acumulada de 261,8 mm, referente a uma média de evaporação diária de 5,6 mm e índice pluviométrico acumulado de 242,3 mm equivalente à precipitação média diária de 5,2 mm.

A partir da segunda semana, a consistência do rejeito possibilitou a utilização do amostrador tipo pistão estacionário para realização das amostragens. No período compreendido entre os dias 26 e 29, a fração da camada de selagem na amostra do pistão estacionário não foi descartada, o que explica o aumento substancial da média de teor de sólidos da camada monitorada ilustrado na Figura 5.20.

#### 5.6.1.2 Segunda Camada de 0,50m – Pond 02

A disposição da segunda camada do *Pond 02* foi realizada no dia 28/10/2021, sobre a primeira camada de rejeito que apresentava 54,4% de teor de sólidos.

O material foi disposto com teor de sólidos médio de 21,0% em 4h00min, resultando em uma camada de aproximadamente 0,50 m de espessura. O monitoramento de ganho de teor de sólidos foi realizado por 50 dias até 17/12/2021.

Os dados de monitoramento dos teores de sólidos médios da segunda camada do *Pond 02* estão ilustrados na Figura 5.21.

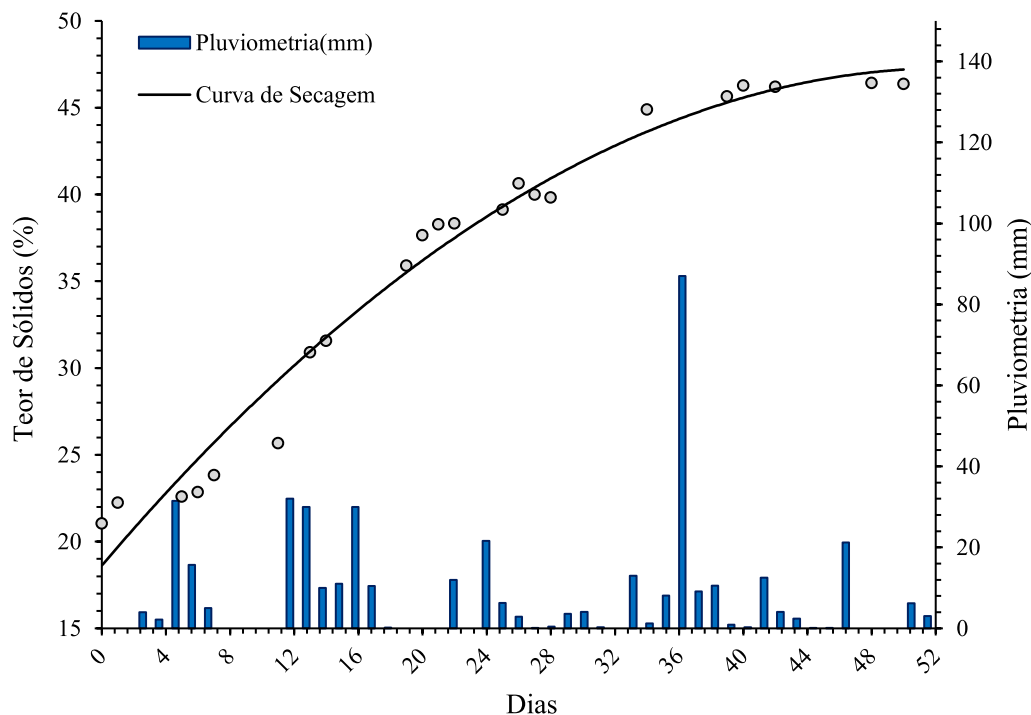


Figura 5.21. *Pond 02* - Monitoramento da 2ª camada de 0,50 m.

A segunda camada de rejeito do *Pond 02* atingiu 46,4% de teor de sólidos nos 50 dias de processo de secagem.

No período de monitoramento, foi observada uma taxa de evaporação acumulada de 240,3 mm, referente a uma média de evaporação diária de 4,8 mm e índice pluviométrico acumulado de 413,2 mm, isto é, uma precipitação média diária de 8,3mm.

### 5.6.1.3 Primeira Camada de 0,80m – Pond 01

A disposição da primeira camada de 0,80 m do *Pond* 01 foi realizada no dia 08/10/2021, sobre a camada de selagem que apresentava 54,2% de teor de sólidos.

O material foi disposto com teor de sólidos médio de 22,9% em 5h00min, resultando em uma camada de 0,80 m de espessura. O monitoramento de ganho de teor de sólidos foi realizado por 70 dias até a data 17/12/2021.

Os dados de monitoramento dos teores de sólidos médios da primeira camada do *Pond* 01 estão dispostos na Figura 5.22.

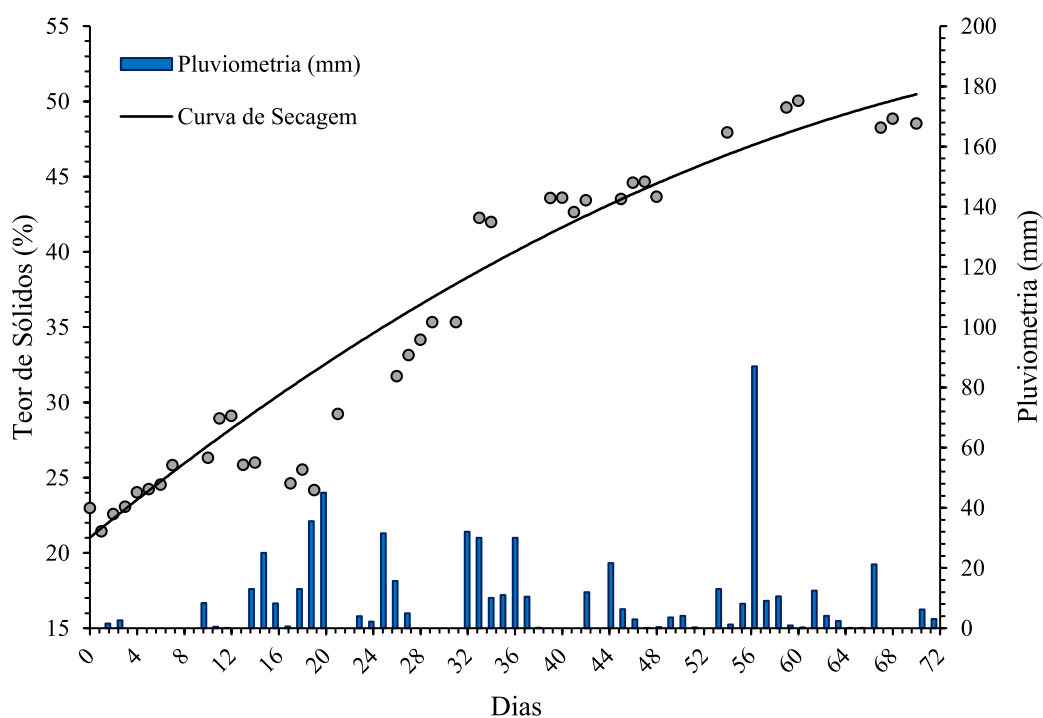


Figura 5.22. *Pond* 01 - Monitoramento da 1ª camada de 0,80 m

A primeira camada do *Pond* 01 atingiu 48,2% de teor de sólidos nos 70 dias de processo de secagem.

No período de monitoramento, foi observada uma taxa de evaporação acumulada de 338,4mm, referente a uma média de evaporação diária de 4,8 mm e índice pluviométrico acumulado de 566,8mm, isto é, uma precipitação média diária de 8,1 mm.

Conforme citado no item 3.6.2.2, enquanto o rejeito apresenta consistência de polpa, utiliza-se o amostrador tipo caneco para coletar o material e aferir o teor de sólidos. Mesmo com o dispositivo de tampa e vedação no amostrador, foi inevitável a contaminação da amostra com a água sobrenadante no período de alta incidência pluviométrica. Este problema operacional pode ser observado entre os dias 14 a 32, apresentando teores de sólidos médios abaixo do esperado.

#### 5.6.1.4 Comparação Entre as Camadas – Período de Verão 2021

As curvas de secagem da primeira e segunda camada de 0,50 m disposta no *Pond* 02 e da primeira camada de 0,80 m disposta no *Pond* 01 estão apresentadas na Figura 5.23.

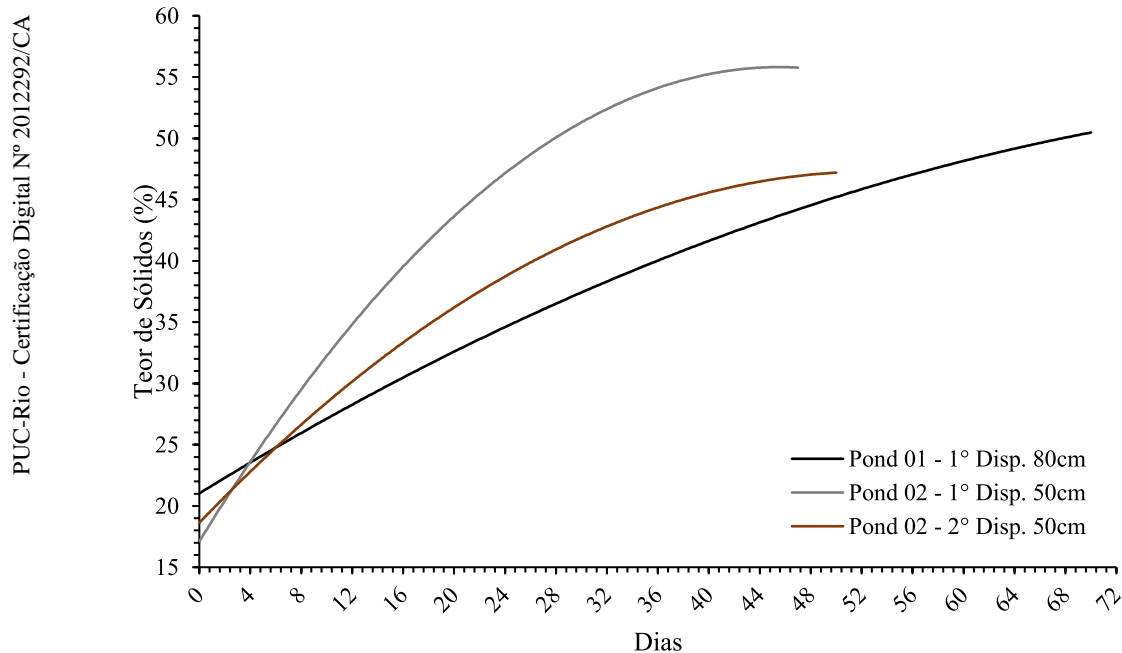


Figura 5.23. Comparação entre curvas de secagem – Período de Verão.

Para facilitar a comparação do desempenho de secagem de cada camada do período de verão 2021, foi adotado o período de monitoramento climático de 47 dias, equivalente ao tempo de ensaio da primeira camada de 0,50 m.

As características do rejeito no período de monitoramento e as condições climáticas médias diárias estão apresentadas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4. Resumo do monitoramento do período de 47 dias de testes – Verão 2021.

Camada	Teor de Sólido Final (%)	Pluviometria Média Diária (mm)	Taxa de Evaporação Média Diária (mm)
1° Disp. 50cm	56,1	5,2	5,6
2° Disp. 50cm	46,4	8,6	4,9
1° Disp. 80cm	44,7	8,1	5,0

Vale ressaltar que as camadas foram dispostas em períodos diferentes e, por consequência, estiveram submetidas a condições climáticas distintas.

### 5.6.2 Período de Inverno 2022

O período de inverno amazônico (maior incidência pluviométrica) foi composto por dois ciclos de disposições e secagem para cada *pond*. As camadas foram dispostas simultaneamente, possibilitando a exclusão da variável climática e facilitando a comparação das curvas de secagem das camadas de 0,50 m e 0,80 m.

#### 5.6.2.1 Primeira camada – 0,80 m e 0,50 m

A disposição da primeira camada foi realizada no dia 10/01/2022, com o rejeito apresentando teor de sólidos médio de 20,4% para os *pond's* 01 (0,80 m) e 02 (0,50 m). O monitoramento do ganho de teor de sólidos foi realizado por 71 dias até a data 22/03/2022.

Os dados do monitoramento dos teores de sólidos médios da primeira camada dos *pond's* 01 e 02 estão apresentados na Figura 5.24.



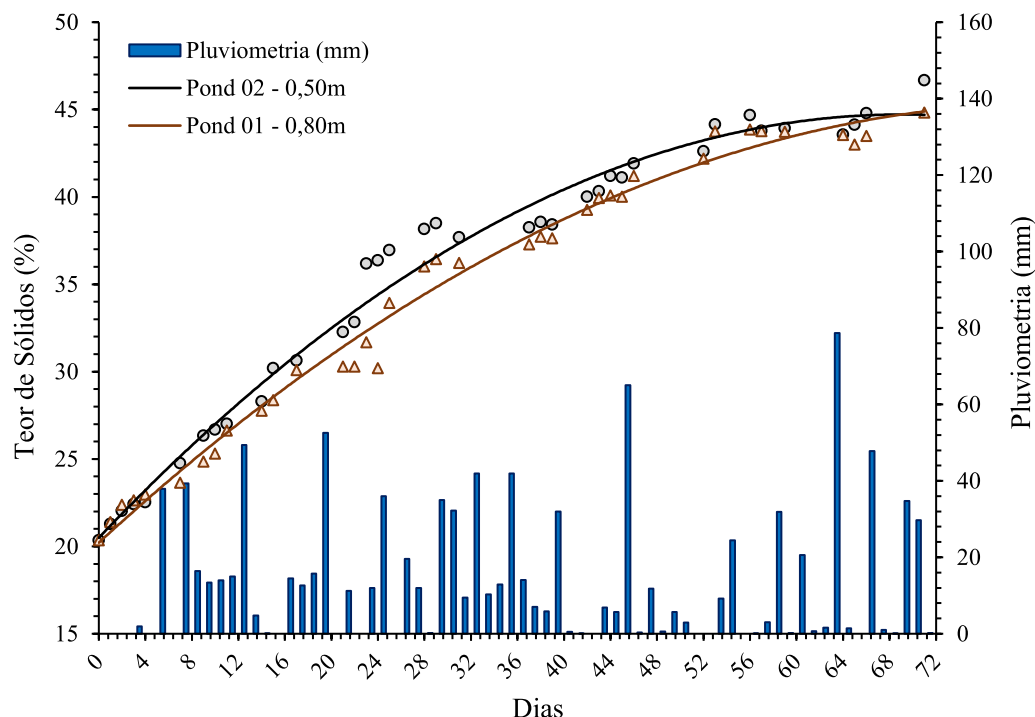


Figura 5.24. Monitoramento da 1ª camada – Ponda 01 e Ponda 02.

As primeiras camadas do período de inverno 2022 dispostas nos *pond's* 01 e 02 atingiram aproximadamente 45,0% de teor de sólidos nos 71 dias de processo de ressecamento.

No período de monitoramento, foi observada uma taxa de evaporação acumulada de 289,4 mm, resultando em uma média de evaporação diária de 4,1 mm e índice pluviométrico acumulado de 1006,1 mm, equivalente à precipitação média diária de 14,2 mm.

É possível notar um ganho acelerado no teor de sólidos para a camada de 0,50m, quando comparado com a camada de 0,80m. A diferença entre os valores amostrados passa a ficar menor a partir do dia 30, quando os materiais de ambos os reservatórios apresentavam aproximadamente 35% de teor de sólidos e passaram a serem amostrados com o amostrador pistão estacionário

#### 5.6.2.2 Segunda camada – 0,80 m e 0,50 m

A disposição da segunda camada foi realizada no dia 23/03/2022, sobre a primeira camada de rejeito que apresentava uma média de aproximadamente 45,0% de teor de sólidos.

O material foi disposto com teor de sólidos médio de 20,7% em 5h00min para os *ponds* 01 e 02. O monitoramento do ganho de teor de sólidos foi realizado por 63 dias até 25/05/2022.

Os dados de monitoramento dos teores de sólidos médios da segunda camada dos *ponds* 01 e 02 estão ilustrados na Figura 5.25.

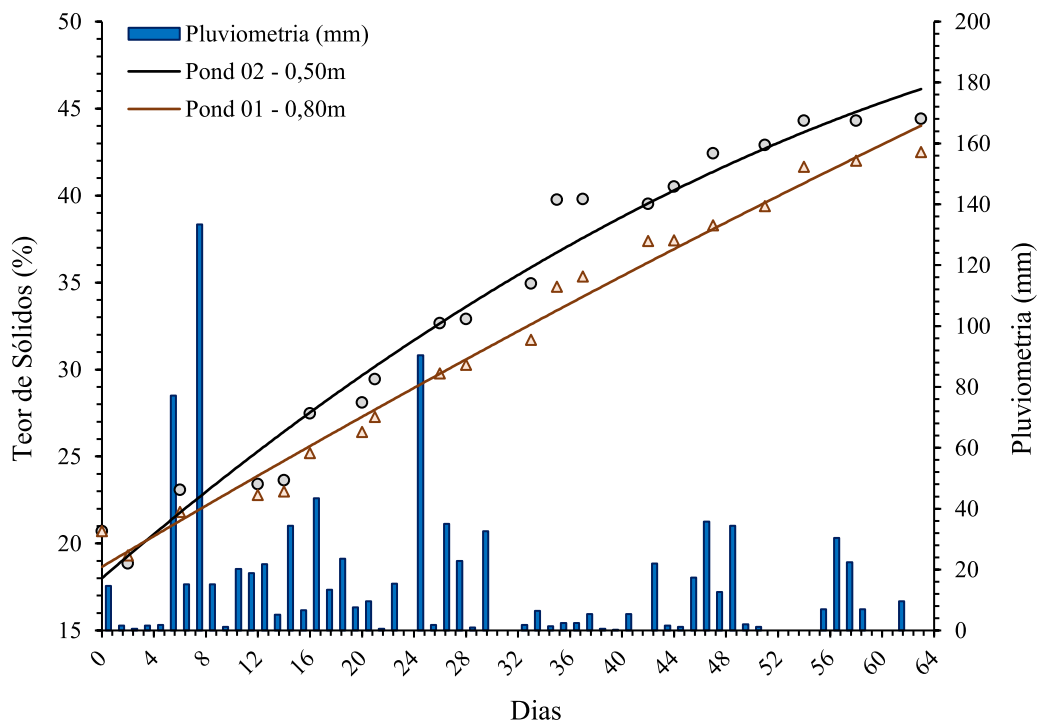


Figura 5.25. Monitoramento da 2ª camada – Pond 01 e Pond 02.

As segundas camadas de rejeito dos Pond 01 e Pond 02 atingiram 42,5% e 44,4%, respectivamente, em 63 dias de testes de secagem.

No período de monitoramento, foi observada uma taxa de evaporação acumulada de 251,6 mm, referente a uma média de evaporação diária de 4,0 mm e índice pluviométrico acumulado de 897,2 mm, isto é, uma precipitação média diária de 14,2 mm.

Para a segunda camada, a média de teor de sólidos amostrada na camada de 0,50 m manteve-se maior quando comparada com as amostras da camada de 0,80 m, mesmo após a mudança da metodologia de amostragem do amostrador copo para pistão estacionário.

### 5.6.2.3 Comparação entre 1° e 2° camada 0,50 m x 0,80 m

As curvas de secagem das primeira e segunda camadas de 0,80 m e 0,50 m então apresentadas na Figura 5.26.

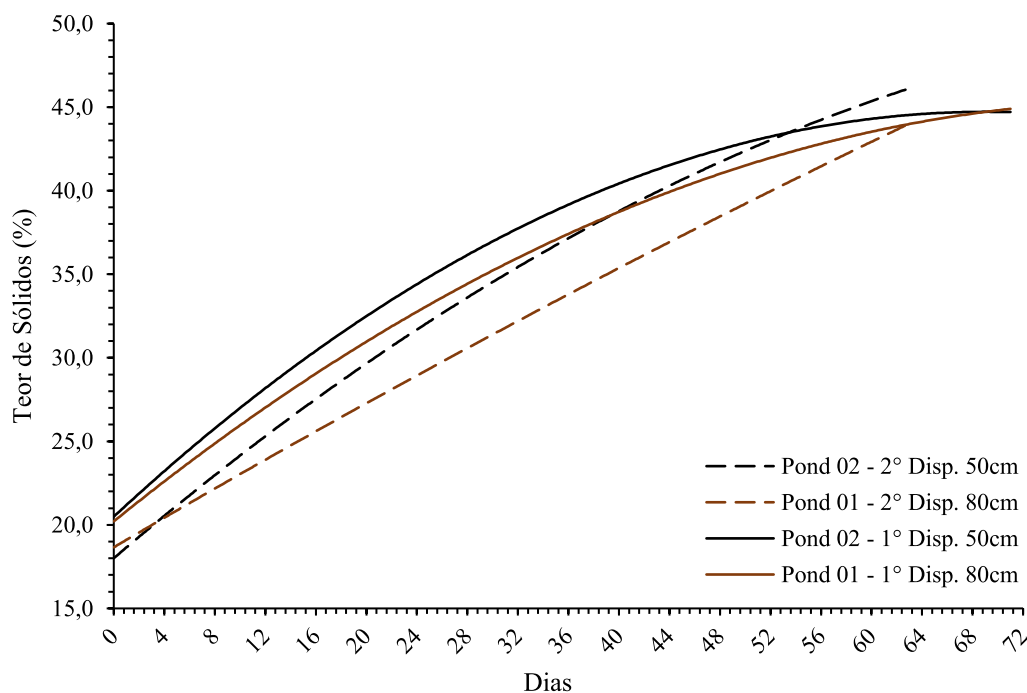


Figura 5.26. Comparação entre curvas de secagem – Período de Inverno.

Para facilitar a comparação do desempenho de secagem de cada camada do período de inverno 2022, foi adotado o período de monitoramento climático de 63 dias, equivalente ao tempo de ensaios da segunda camada.

O teor de sólidos do rejeito no período de monitoramento e as condições climáticas médias diárias estão apresentadas na Tabela 5.5.

Tabela 5.5. Resumo do monitoramento do período de 63 dias de testes – Inverno 2022.

Camada	Teor de Sólido Final (%)	Pluviometria Média Diária (mm)	Taxa de Evaporação Média Diária (mm)
1° 80 cm	43,5	14,1	4,1
1° 50cm	43,6		
2° 80cm	42,5	14,2	4,0
2° 50cm	44,4		

## 5.7 Perfil de Teor de Sólidos

O perfil de teor de sólidos foi determinado ao final do período de secagem das duas camadas monitoradas no período dos testes de inverno de 2022.

Amostras das camadas foram obtidas através do amostrador pistão estacionário, possibilitando a determinação do perfil de rejeito. As amostras foram seccionadas em 5cm para realização dos ensaios e construção do perfil de teor de sólidos.

### 5.7.1 Primeira Camada de Inverno – 80 e 50 cm

No dia 23 de março de 2022, ao final do período de secagem da primeira camada de rejeito disposta com 80 e 50 cm, foram realizadas 4 amostragens na região central de cada *pond* piloto para determinação dos perfis de teor de sólidos.

Os perfis de teor de sólidos da primeira camada disposta no inverno de 2022 estão apresentados na Figura 5.27.

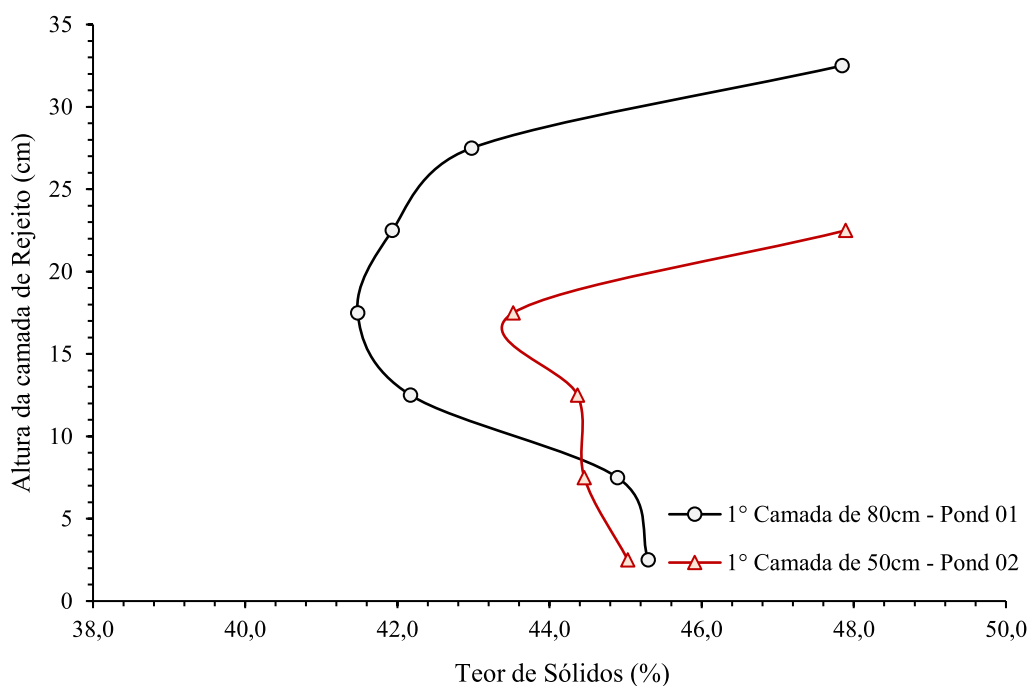


Figura 5.27. Perfil de teor de sólidos - 1ª Camada de inverno 2022.

Como já exposto no item 5.8.1, as camadas previamente dispostas com aproximadamente 80 e 50cm encontravam-se ao final do período de secagem com 35 e 21cm, respectivamente.

Pode-se observar um comportamento similar do perfil de teor de sólidos para as camadas de 80 e 50 cm. Ambos os perfis apresentam teores de sólidos máximos na porção superior do material amostrado, diminuindo gradualmente até uma porção intermediária da camada onde inicia-se o aumento de sua consistência até a interface com a fundação do reservatório.

Os teores de sólidos máximos na camada superficial do perfil de rejeito se dão pela potencialização da evaporação devido à total exposição à incidência solar, uma vez que há completa drenagem da água sobrenadante do reservatório pelo sistema de extravasamento. Desta forma, os efeitos de ressecamento devidos à evaporação iniciam-se quando a taxa de adensamento por peso próprio se iguala à taxa de evaporação.

O elevado teor de sólidos na interface com a base do reservatório e sua gradual diminuição até determinada elevação ocorre pelo efeito do adensamento por peso próprio do material, corroborando com maior teor de sólidos obtido na base do

reservatório na camada de 80cm quando comparado com a de 50 cm. O perfil de rejeito começa a apresentar aumento do teor de sólidos nas elevações onde inicia-se a influência do efeito de ressecamento devido a evaporação.

Considerando o material saturado e peso específico dos grãos constante, pode-se construir um perfil de índice de vazios x altura da camada do perfil de rejeito.

O perfil de índice de vazios está ilustrado na Figura 5.28.

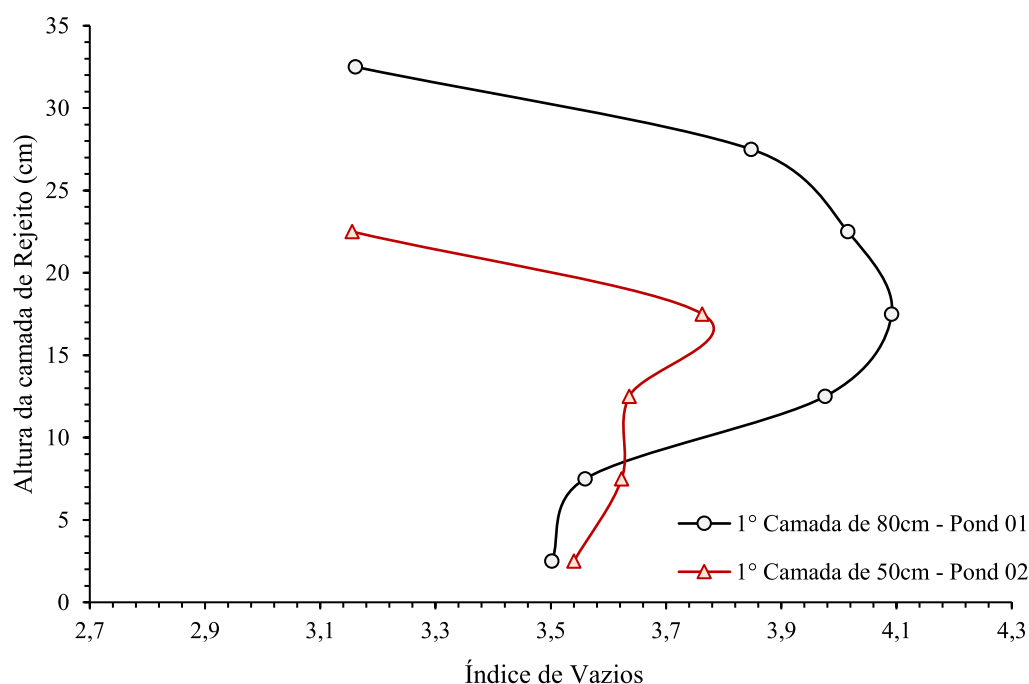


Figura 5.28. Perfil de índice de vazios - 1ª Camada de inverno 2022.

É observado o aumento de índice de vazios da interface com a fundação até determinado ponto onde inicia-se a redução até o menor índice de vazios no topo da camada amostrada.

### 5.7.2 Segunda Camada de Inverno – 80 cm e 50 cm

No dia 25 de maio de 2022, ao final do período de secagem da segunda camada de rejeito disposta de 80 e 50 cm, foram realizadas 4 amostragens na região central de cada *pond* piloto para determinação dos perfis de teor de sólidos.



A construção do perfil de teor de sólidos dos reservatórios contemplou a amostragem da segunda e da primeira camada, previamente disposta e amostrada.

Os perfis de teor de sólidos dos reservatórios após período de secagem da segunda camada de 80 e 50 cm do período de inverno de 2022 estão apresentados na Figura 5.29.

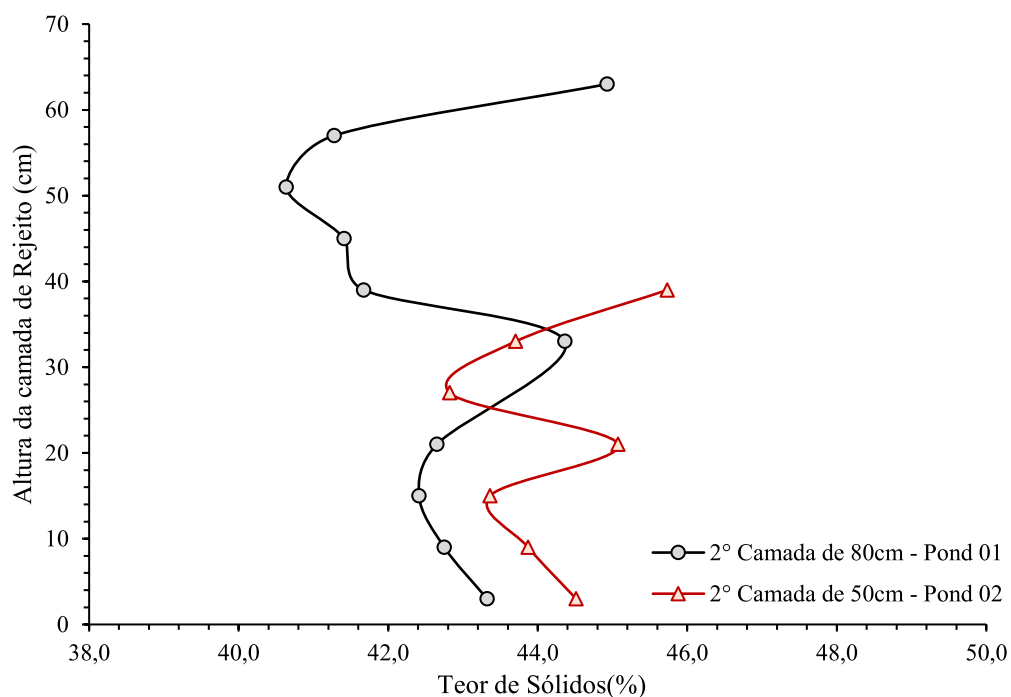


Figura 5.29. Perfil de teor de sólidos - 2ª Camada de inverno 2022.

De posse do perfil de teor de sólidos é possível observar a similaridade no padrão de ressecamento do rejeito para segundas camadas, apresentando pico de teor de sólidos na porção superior da amostra, exposta à irradiação solar, progressiva diminuição até determinado ponto e posterior aumento até a interface com a primeira camada devido ao adensamento por peso próprio.

A diferenciação entre as camadas pode ser feita tátil-visualmente com a amostra do rejeito, conforme apresentado na Figura 5.30.

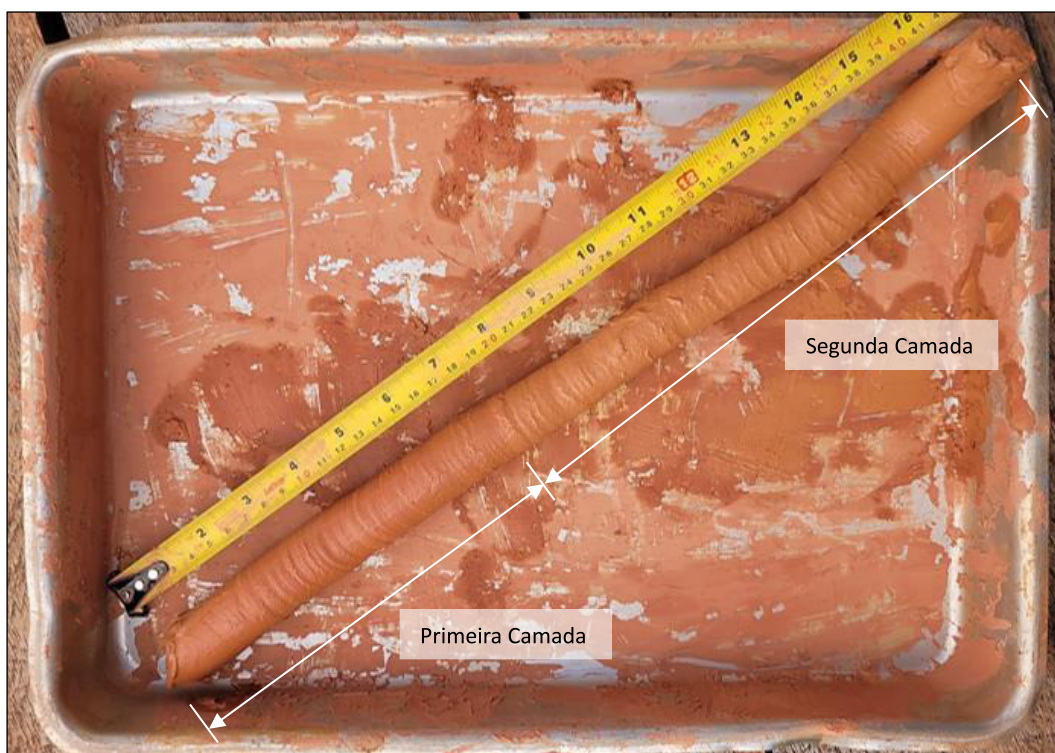


Figura 5.30. Amostra de rejeito ao final do período de ressecamento da 2ª camada de 50cm.

A primeira camada apresenta coloração mais avermelhada e maior consistência, sofrendo pouca variação diametral no momento de extrusão do pistão estacionário. Corroborando com o perfil de teor de sólidos, a segunda camada apresentou menor consistência principalmente na porção intermediária.

Há uma separação bem definida no contato do topo da primeira camada com o início da segunda camada, apresentando baixa agregação entre as camadas.

### 5.7.3 Comparação entre Perfil da Primeira e Segunda Camada

Os perfis de teores de sólidos determinados após o período de secagem da primeira e da segunda camada de 80cm e 50cm estão apresentados nas Figura 5.31 e Figura 5.32, respectivamente.

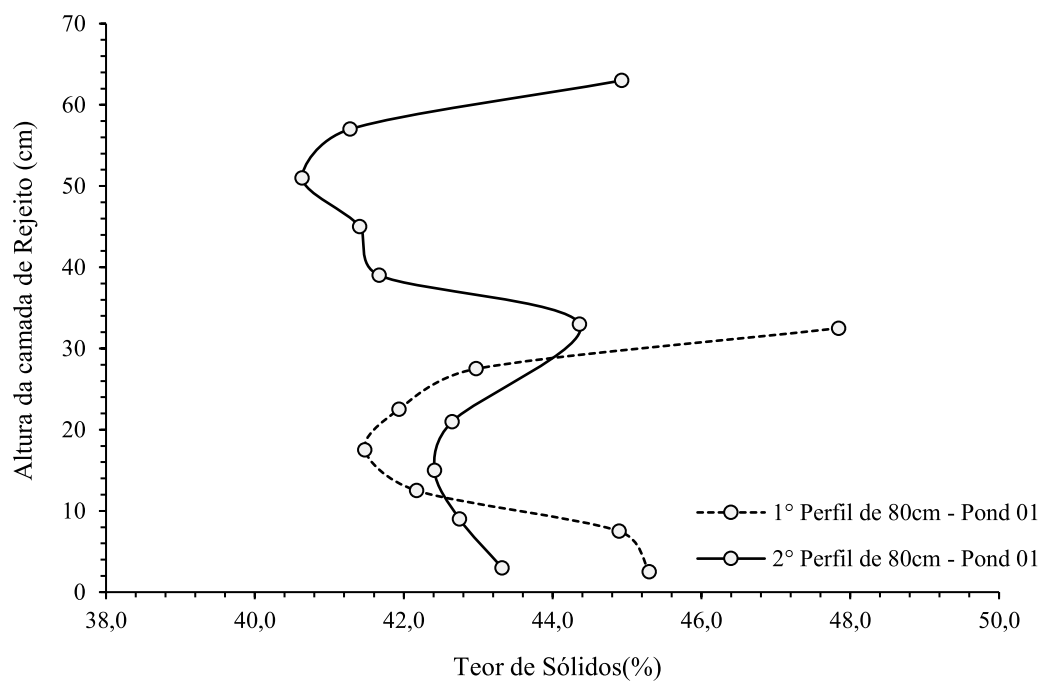


Figura 5.31. Perfil de teor de sólidos camada de 80cm – *Pond* 01.

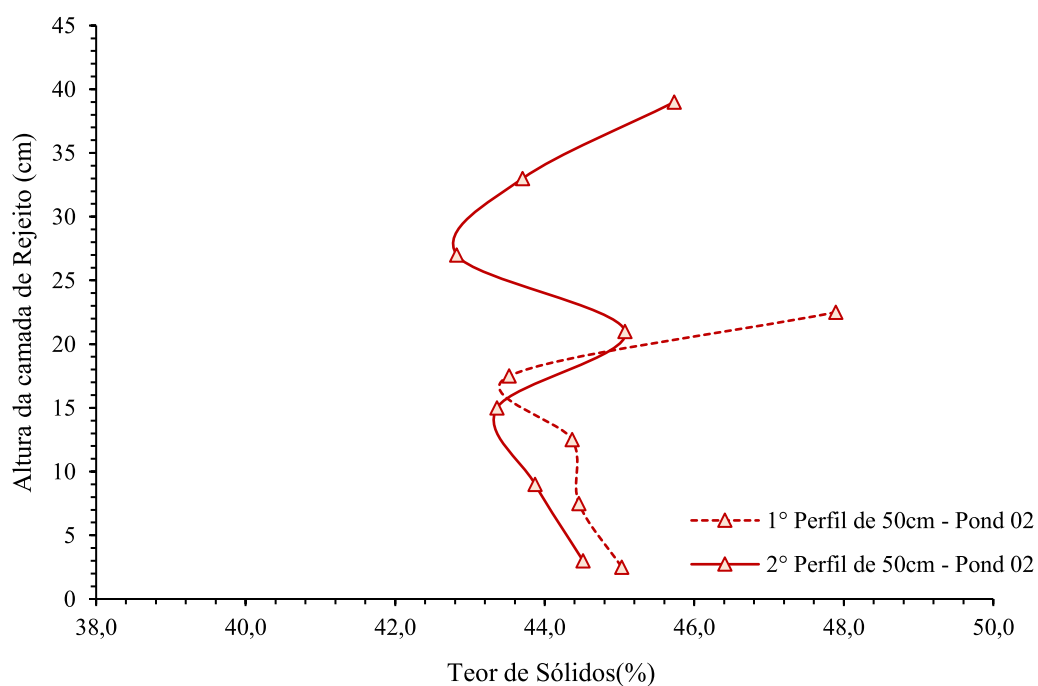


Figura 5.32. Perfil de teor de sólidos camada de 50cm – *Pond* 02.

É possível notar a diminuição da amplitude de teor de sólidos da primeira camada do segundo perfil de rejeito para ambas amostras, representando uma maior

homogeneidade das propriedades mecânicas e hidráulicas do material em profundidade, uma vez que as relações constitutivas do rejeito são em função ao índice de vazios e, para um material saturado, o índice de vazios tem uma relação direta com o teor de sólidos.

Diferentemente do esperado, mesmo com a sobrecarga da disposição da segunda camada, a média de teor de sólidos da primeira camada (na segunda amostragem) diminuiu no segundo perfil. A diminuição do teor de sólidos da primeira camada na segunda amostragem precisam ser melhor avaliadas, podendo ser um comportamento anômalo de ganho de umidade do material ou reflexo de possível contaminação das amostras pela água aprisionada nas trincas do rejeito.

## **5.8 Instrumentação e Monitoramento**

Os resultados das instrumentações e monitoramento dos recalques e piezometria ao longo dos testes de secagem de rejeito estão apresentados a seguir.

### **5.8.1 Réguas Linimétricas**

Além do monitoramento da camada no processo de enchimento do reservatório, as réguas linimétricas possibilitaram o acompanhamento dos recalques devido ao processo de sedimentação, adensamento e ressecamento do rejeito ao longo dos testes de secagem.

#### **5.8.1.1 Recalques *Pond 02* (0,50 m) – Verão 2021**

O ciclo de enchimento e ressecamento monitorado para a primeira e segunda camadas de 0,50 m do *Pond 02* no período de verão de 2021 está apresentado na Figura 5.33.

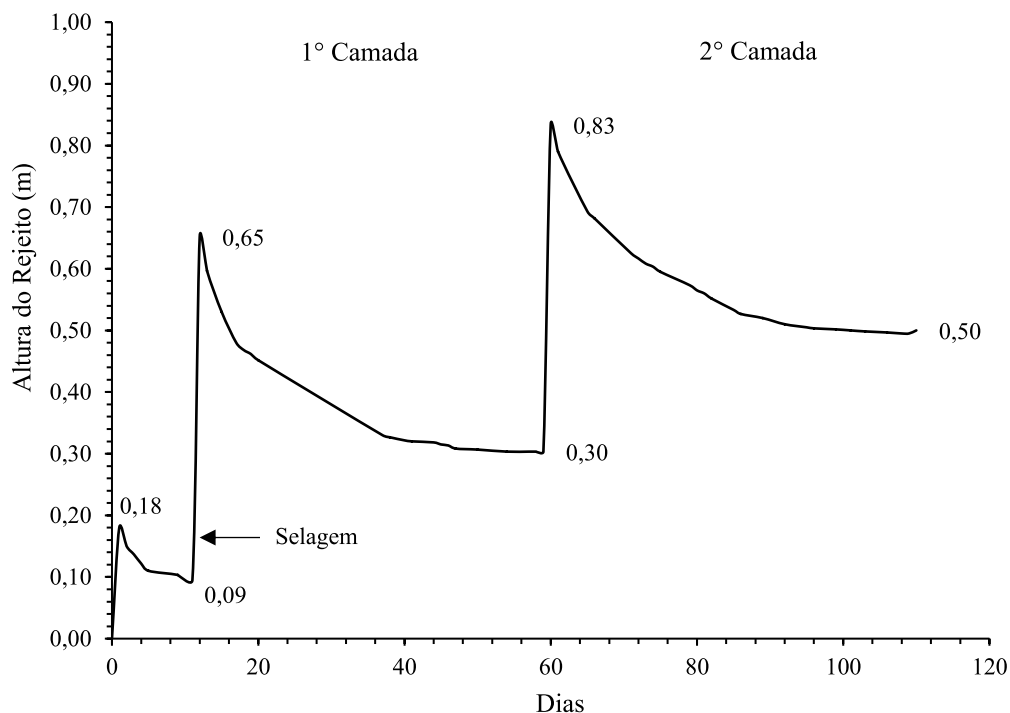


Figura 5.33. Ciclos de enchimento e secagem verão 2021 – *Pond 02*.

O período de monitoramento dos recalques do *Pond 02* para os testes de verão de 2021 foi de 110 dias, iniciando em 30/08/2021 com a disposição da camada de selagem e finalizando após o período de secagem da segunda camada em 17/12/2021.

Pode-se observar que o rejeito atingiu uma elevação média de 0,18 m no final da disposição da camada de selagem e chegando a 0,09 m no final do processo de secagem.

A primeira camada de rejeito apresentou uma altura média de 0,56 m sobre a camada de selagem de 0,09 m, atingindo a elevação de 0,65 m. No final do processo de secagem, a primeira camada mais a camada de selagem apresentavam uma elevação de 0,30 m, representando um recalque de 0,35 m.

A segunda camada apresentou uma espessura média de 0,53 m disposta sobre 0,30 m do conjunto ressecado de camada de selagem mais a primeira camada. Após o período de secagem, o rejeito contido no *Pond 02* apresentou 0,50m de altura, representando um recalque total de 0,33 m.

Aplicando o método das bissetrizes para determinar o ponto crítico das camadas de 0,50 m, pode-se estimar o final do processo de sedimentação e início do processo de compressão e ressecamento de aproximadamente 11 dias e para segunda camada foram necessários 14 dias para atingir o ponto crítico.

O maior tempo necessário para atingir o ponto crítico da segunda camada pode ser explicado devido à maior concentração de sólidos média ao longo da disposição quando comparado com o teor de sólidos da disposição da primeira camada.

#### 5.8.1.2 Recalque *Pond* 01 (0,80 m) – Verão 2021

O monitoramento dos recalques da camada de selagem e da primeira camada de 0,80 m de rejeito no período de verão 2021 do *Pond* 01 está ilustrado na Figura 5.34.

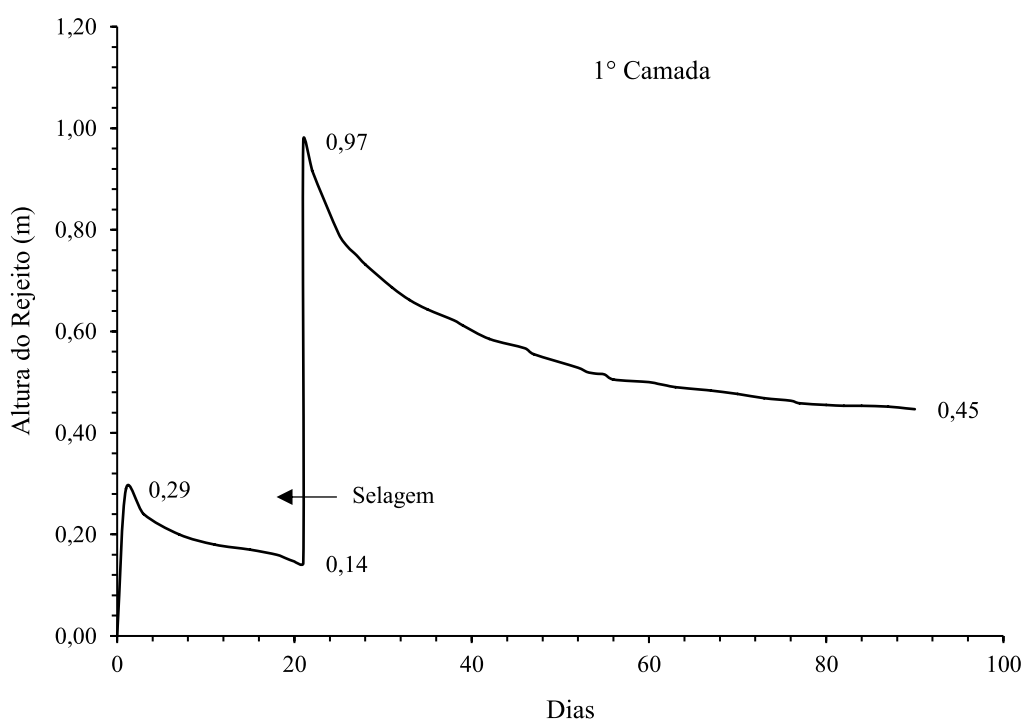


Figura 5.34. Ciclos de enchimento e secagem verão 2021 – *Pond* 01.

Devido ao início tardio dos testes no *Pond* 01, não foi possível realizar a segunda disposição no período de verão 2021. O período de monitoramento dos recalques do *Pond* 01 para os testes de verão de 2021 foi de 90 dias, iniciando em 19/09/2021

com a disposição da camada de selagem e finalizando após o período de secagem da primeira camada em 17/12/2021.

A camada de selagem atingiu uma elevação média de 0,29 m no final de sua disposição e chegou a 0,14 m ao final do período de secagem.

A primeira camada de rejeito disposto no *Pond* 01 atingiu uma espessura média de 0,83 m sobre a camada de selagem de 0,14 m, apresentando uma altura total ao final do enchimento do reservatório de 0,97 m. Ao final do processo de secagem, o rejeito composto por camada de selagem mais a primeira camada apresentou uma elevação de 0,45 m, representando um recalque total de 0,52 m.

De posse da curva de recalque, é possível estimar o final do processo de sedimentação e início da zona de compressão e processo de ressecamento em 14 dias após a disposição da primeira camada.

#### 5.8.1.3 Recalques *Pond* 02 (0,50 m) – Inverno 2022

O ciclo de enchimento e ressecamento monitorado para a primeira e segunda camadas de 0,50 m do *Pond* 02 no período de inverno de 2022 está apresentado na Figura 5.35.

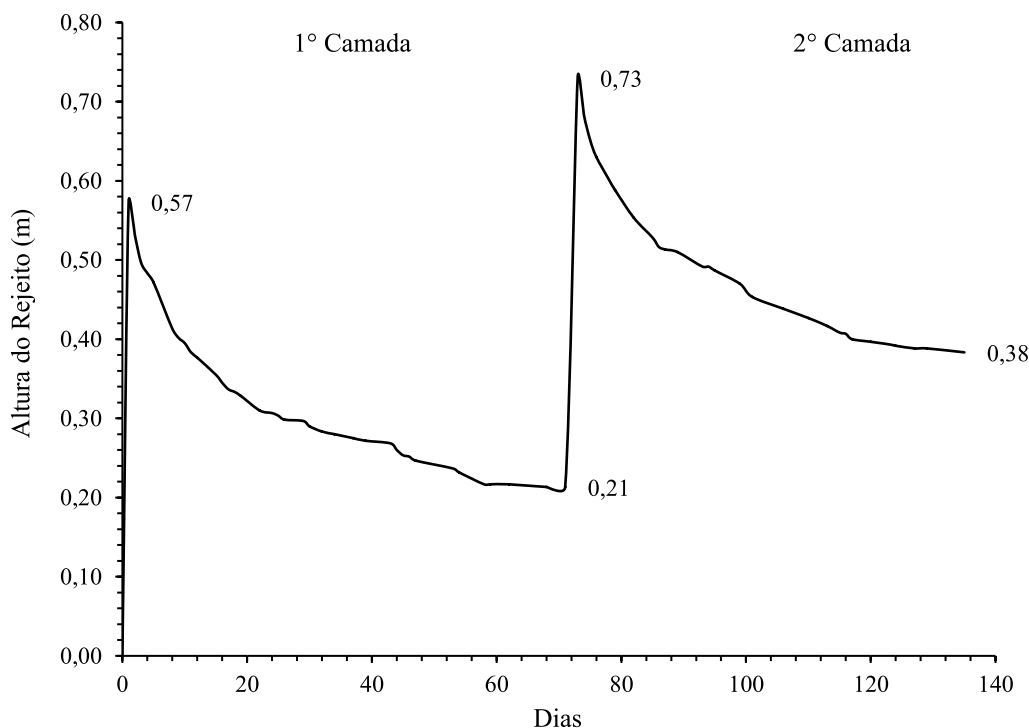


Figura 5.35. Ciclos de enchimento e secagem inverno 2022 – *Pond* 02



O período de monitoramento dos recalques do *Pond* 02 para os testes de inverno de 2022 foi de 135 dias, iniciando em 10/01/2022 com a disposição da primeira camada e finalizando após o período de secagem da segunda camada em 24/05/2022.

Para os testes de inverno, não foi disposta uma camada prévia de selagem, sendo assim, a primeira camada lançada sobre a fundação dos *Pond* 02 atingiu elevação média de 0,57 m. No final do processo de secagem, a primeira camada apresentou elevação de 0,21 m, representando um recalque de 0,36 m.

A segunda camada apresentou espessura média de 0,52 m disposta sobre a primeira camada, resultando em uma altura total de rejeito de 0,73 m. Ao final do período de secagem da segunda camada, o rejeito se encontrava na elevação 0,38 m, representando um recalque total de 0,35 m.

Aplicando o método das bissetrizes para determinar o ponto crítico, pode-se estimar o final do processo de sedimentação e início do processo de compressão e ressecamento de aproximadamente 14 dias tanto para a primeira camada quanto para a segunda camada.

#### **5.8.1.4 Recalque Pond 01 (0,80 m) – Inverno 2022**

O monitoramento dos recalques da primeira e segunda camadas de 0,80 m de rejeito no período de inverno 2022 do *Pond* 01 está ilustrada na Figura 5.36.

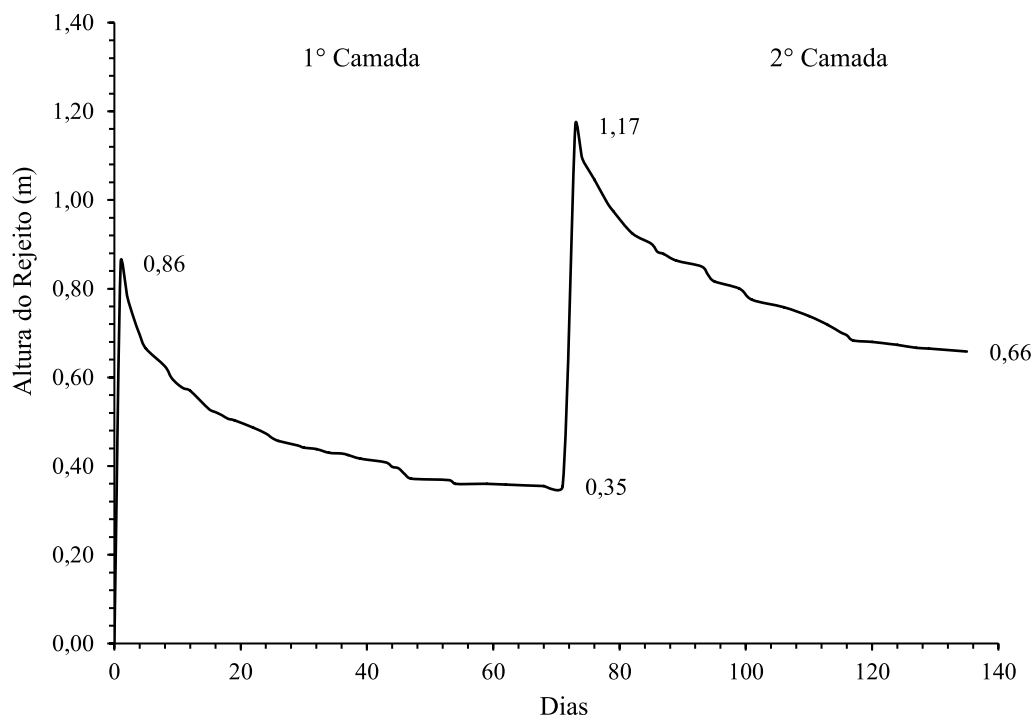


Figura 5.36. Ciclos de enchimento e secagem inverno 2022 – *Pond* 01.

O período de monitoramento dos recalques do *Pond* 01 para os testes de inverno de 2022 foi de 135 dias, iniciando em 10/01/2022 com a disposição da primeira camada e finalizando após o período de secagem da segunda camada em 24/05/2022.

Para os testes de inverno, não foi disposto uma camada prévia de selagem, sendo assim, a primeira camada lançada sobre a fundação dos *Pond* 01 atingiu elevação média de 0,86m. No final do processo de secagem, a primeira camada apresentou elevação de 0,35m, representando um recalque de 0,51m.

A segunda disposição de rejeito atingiu altura média de 1,17m somando a primeira camada, resultando em uma altura total de rejeito de 0,73m (camada final menos a camada ao. Ao final do processo de secagem, o rejeito composto pela primeira e segunda camada apresentou elevação de 0,66m, representando um recalque total de 0,51m (partindo de 1,17 para 0,66).

De posse da curva de recalque, é possível estimar o final do processo de sedimentação e início da zona de compressão e processo de ressecamento de 13 dias após a disposição da primeira camada e 14 dias para segunda camada.

## 5.8.2 Placa de Recalque

Em complemento das aferições dos recalques totais monitorados pelas réguas linimétricas, as placas de recalques instaladas nos reservatórios possibilitaram a distinção dos recalques associados à primeira camada ao longo dos testes de ressecamento da segunda camada.

As placas de recalque foram instaladas nos *Pond 01* e *Pond 02* sobre a primeira camada de rejeito nos testes de inverno de 2022.

### 5.8.2.1 Leitura da Placa de Recalque – *Pond 02* (0,50 m)

O monitoramento dos recalques da primeira camada de 0,50 m no período de inverno 2022 do *Pond 02* está apresentada na Figura 5.37.

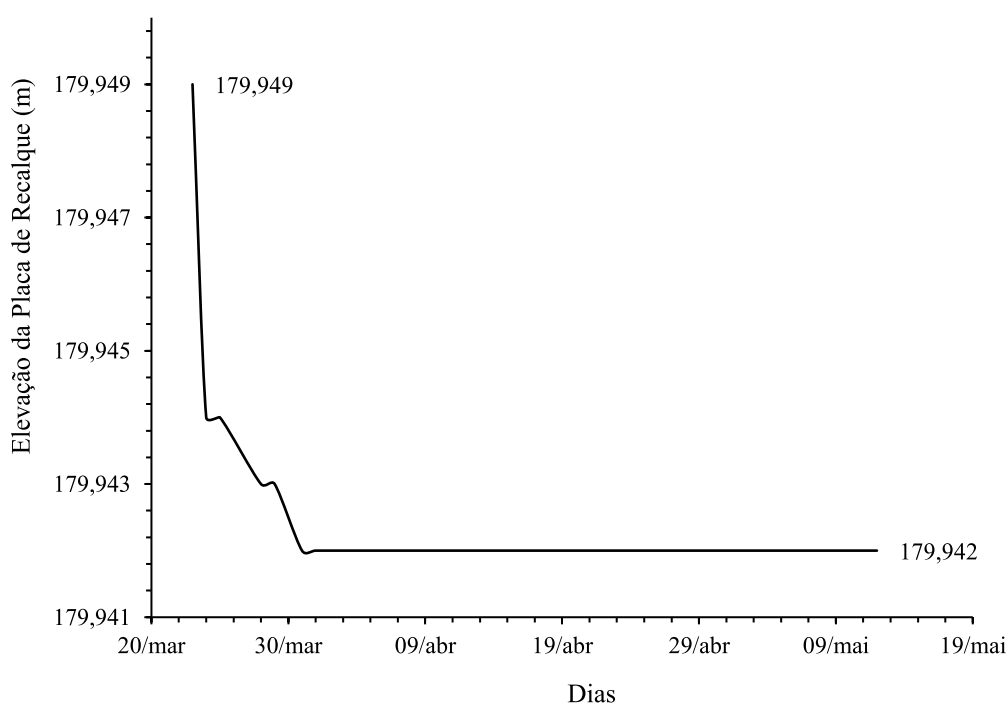


Figura 5.37. Leituras da placa de recalque – *Pond 02*.

A placa de recalque foi instalada no dia da disposição da segunda camada de rejeito do *Pond 02*, apresentando leitura zero na elevação 179,949 m. Após 50 dias de

monitoramento, pode-se observar um recalque de 7 mm da primeira camada devido ao acréscimo de tensão da sobrecarga de 0,50 m de rejeito da segunda camada.

De posse dos resultados, pode-se discriminar os valores dos recalques totais apresentados no item 5.8.1. Ao final do teste de inverno, a primeira camada disposta no *Pond* 02 apresentou um recalque acumulado de 0,37 m e a segunda camada apresentou um recalque total de 0,34 m.

#### 5.8.2.2 Leituras da Placa de Recalque – *Pond* 01 (0,80m)

A Figura 5.38 ilustra o monitoramento dos recalques da primeira camada de 0,80 m no período de inverno 2022 do *Pond* 01.

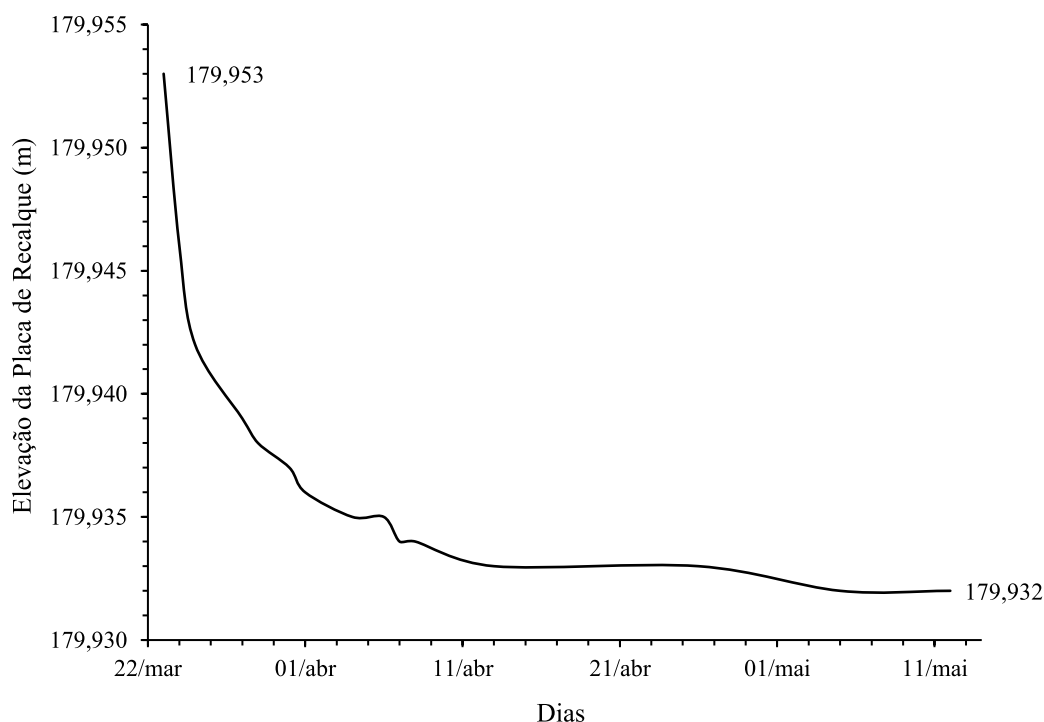


Figura 5.38. Leituras da placa de recalque – *Pond* 01.

A placa de recalque foi instalada no dia da disposição da segunda camada de rejeito do *Pond* 01 na elevação 179,953 m. Após 50 dias de monitoramento, foi observado um recalque de 21 mm da primeira camada devido ao acréscimo de tensão da sobrecarga de 0,80 m de rejeito da segunda camada.

De posse dos resultados, foi possível discriminar os valores dos recalques totais apresentados no item 5.8.1. Ao final do teste de inverno, a primeira camada disposta no *Pond* 01 apresentou um recalque acumulado de 0,53 m e a segunda camada apresentou um recalque total de 0,49 m.

### **5.8.3 Piezometria**

O monitoramento piezométrico teve como objetivo subsidiar informações sobre a influência da infiltração de água ao longo dos testes, além de acompanhar o comportamento da dissipação de poropressões nas camadas de rejeito.

#### **5.8.3.1 Monitoramento Piezométrico da Fundação**

Os piezômetros elétricos do tipo corda vibrante instalados na fundação do reservatório tiveram o objetivo de monitorar a influência do fluxo das águas de infiltração, seja ela pelo processo de desaguamento do rejeito ou por incidência pluviométrica.

Como citado no item 3.5.2, o piezômetro PZE-02 foi instalado 3,0m abaixo do nível do terreno do *Pond* 01 e o piezômetro PZE-03 na parede de divisa dos reservatórios, posicionado na elevação de fundo dos ponds.

Os dados de leitura do piezômetro PZE-02 estão apresentados na Figura 5.39.

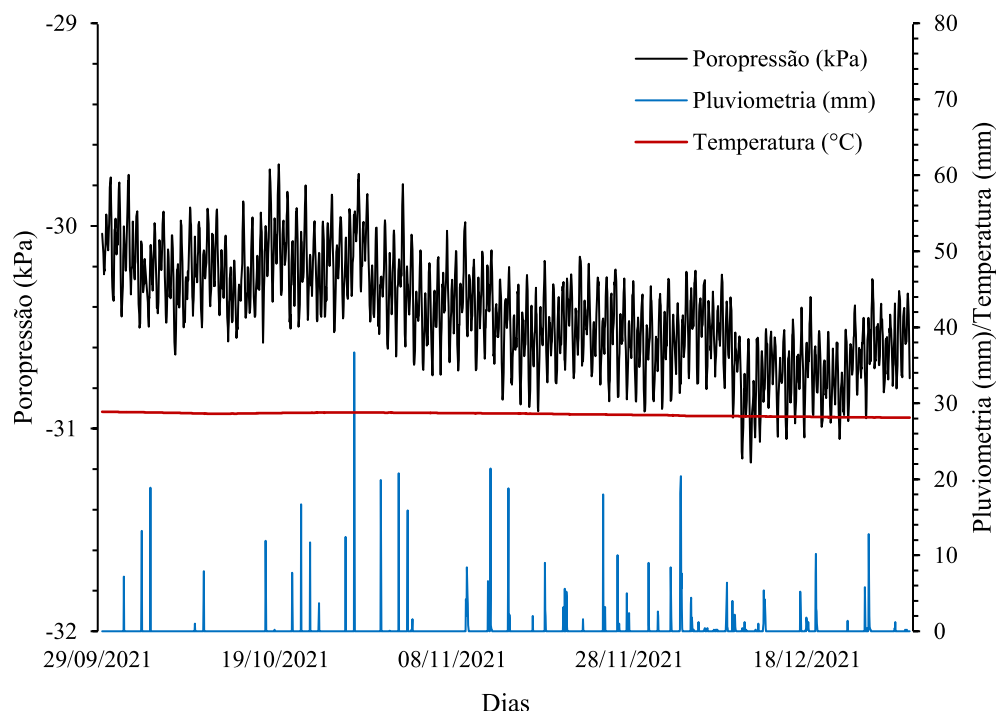


Figura 5.39. Gráfico de leitura PZE-02.

O PZE-02 apresentou leituras do período de 29/09/2021 até 29/12/2021, quando teve seu cabo rompido pelo processo de escavação do rejeito dos testes de verão de 2021 para início dos testes de inverno 2022 em janeiro.

O piezômetro apresentou leituras negativas ao longo de todo seu funcionamento, indicando que a infiltração da água proveniente do desaguamento do rejeito e de incidência pluviométrica não foram suficientes para saturar o material de fundação a aproximadamente 3,0m de profundidade.

Vale ressaltar que os piezômetros elétricos tipo standard instalado na área teste não são calibrados para trabalharem em condições não saturadas. Sendo assim, as leituras de poropressões negativas não podem ser interpretadas como indicativas da sucção no ponto instalado.

A temperatura aferida pelo instrumento a uma profundidade de aproximadamente 3,0m da superfície apresentou uma média de 28,5°C, não sendo observada influência de condições climáticas externas ou em função dos ciclos de disposições ao longo dos testes.

O monitoramento do piezômetro PZE-03 está disposto na Figura 5.40.

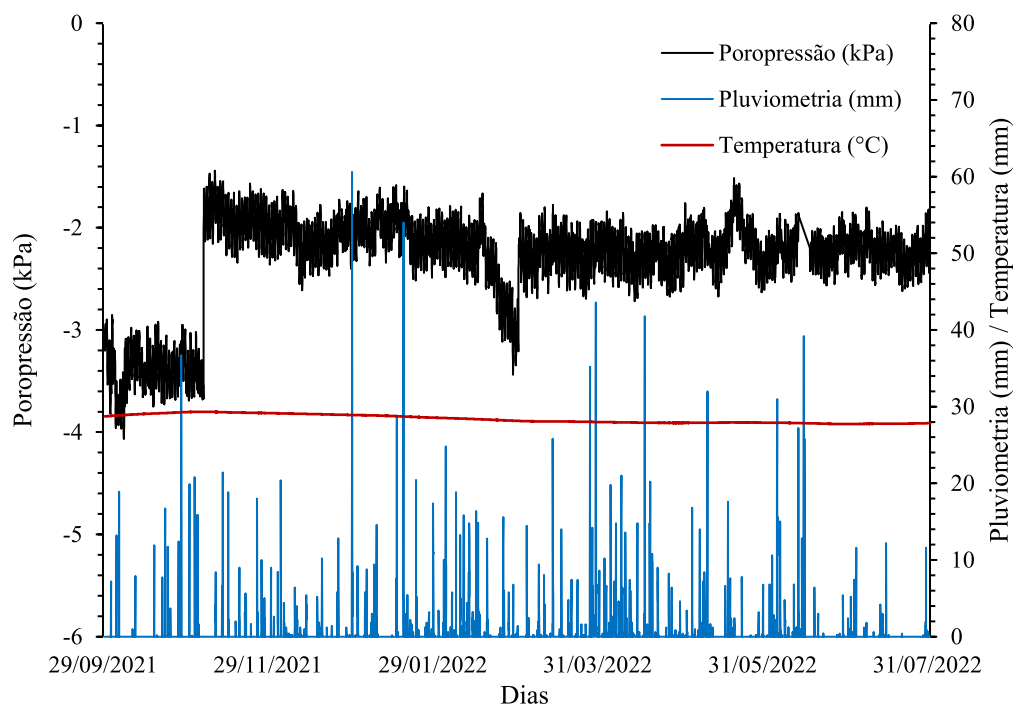


Figura 5.40. Gráfico de leitura PZE-03.

O PZE-03 apresentou leituras ao longo de todo período dos testes de secagem de rejeito, iniciando em 29/09/2021 a 01/08/2022.

Como observado nas leituras do PZE-02, o PZE-03 apresentou leituras negativas ao longo do monitoramento, indicando que, mesmo no nível da fundação dos reservatórios, a infiltração de água não foi o suficiente para criar uma zona de saturação na parede dos reservatórios.

A temperatura medida pelo instrumento na parede de divisa dos reservatórios apresentou uma média de 29,1°C. O instrumento apresentou aumento da temperatura do início de sua instalação até novembro, onde começou a apresentar uma diminuição gradual da temperatura até o mês de junho.

O comportamento da variação da temperatura do solo segue a tendência da variação da temperatura ambiente, mesmo que em ordens de grandeza diferentes.



### 5.8.3.2 Monitoramento Piezométrico do Rejeito

Os piezômetros elétricos tipo corda vibrante instalados no rejeito tiveram o objetivo de monitorar o comportamento da poropressão ao longo do processo de ressecamento e a resposta da piezometria após novos ciclos de disposições.

Como explanado no item 3.5.2, o piezômetro PZE-01 foi instalado no verão de 2021, sobre a camada de selagem do *Pond* 02, monitorando a piezometria do rejeito ao longo da primeira camada de 50cm e a resposta piezométrica após a sobrecarga gerada devido à disposição da segunda camada de 50cm.

Os dados de leitura do piezômetro PZE-01 estão ilustrados na Figura 5.41.

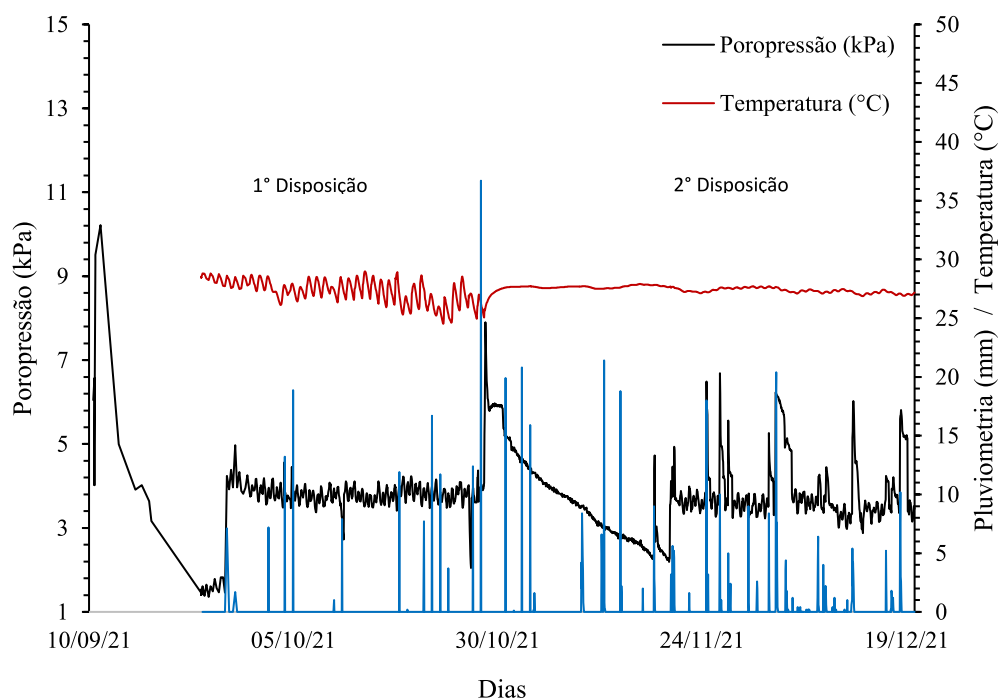


Figura 5.41. Gráficos de leituras PZE-01.

O PZE-01 foi instalado ao longo da disposição da primeira camada no dia 10/09/2021. A aquisição de dados ocorria diariamente via leituras manuais até a data 23/09/2021, quando foi instalado um *datalogger* na área teste, automatizando as leituras.

Pode-se observar o aumento de poropressões devido ao enchimento do reservatório, atingindo até aproximadamente 10,0 kPa. Ao longo do processo de ressecamento, pode ser observada a dissipação da poropressão, atingindo aproximadamente 1,5 kPa.

No dia 26/09/2021, observou-se um aumento repentino da piezometria, apresentando leitura média de 4 kPa. A variação das leituras coincidiu com a primeira precipitação após a disposição da primeira camada de rejeito no *Pond* 02.

Neste período, já era possível observar trincas no reservatório, conforme ilustrado na Figura 5.42, registrada no dia 24/09/2021.

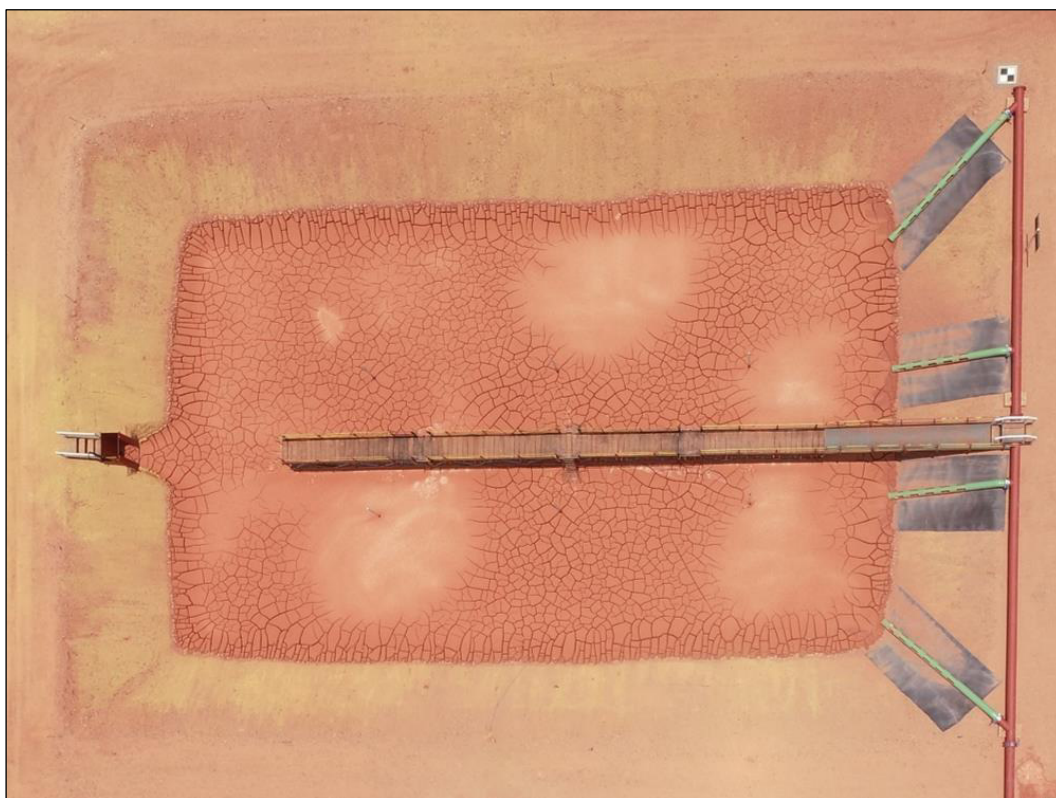


Figura 5.42. Imagem aérea do *Pond* 02 – 24/09/2021

Sendo assim, a elevação da poropressão pode estar relacionado com o aprisionamento de água nas trincas devido à incidência pluviométrica.

No dia 28/10/2021, uma nova camada de rejeito foi disposta sobre a primeira camada instrumentada. No dia do enchimento, o piezômetro apresentou leituras de

aproximadamente 8 kPa, apresentando o mesmo comportamento de dissipação como observado na primeira disposição, conforme ilustrado na Figura 5.41.

Ao longo do ressecamento da segunda camada, mesmo com elevado índice pluviométrico, não foram observadas interferências do comportamento no processo de dissipação de piezometria do rejeito. Este comportamento confirma que, mesmo apresentado consistência de polpa, isto é, baixos teores de sólidos, a incidência pluviométrica não é suficiente para “reempolpamento” do rejeito, diminuindo o teor de sólidos com a incorporação de água ou influenciando no processo de adensamento por peso próprio.

No dia 18/11/2021, foi observado o início da propagação das trincas e, por consequência, resposta de piezometria com a pluviometria incidida.

Em relação a temperatura do rejeito, pode-se observar na Figura 5.41, um aumento da amplitude térmica ao longo do processo de ressecamento, aproximando-se cada vez mais da amplitude térmica ambiente. Após a disposição da segunda camada, pode-se observar a estabilização da temperatura em aproximadamente 27°C.

Para o monitoramento das poropressões das camadas de 80cm no *Pond* 01, instalou-se o PZE-04 sobre a primeira camada disposta, aferindo o acréscimo e posterior dissipação das poropressões da segunda camada dos testes de inverno de 2022.

O monitoramento do PZE-04 está apresentado na Figura 5.43.

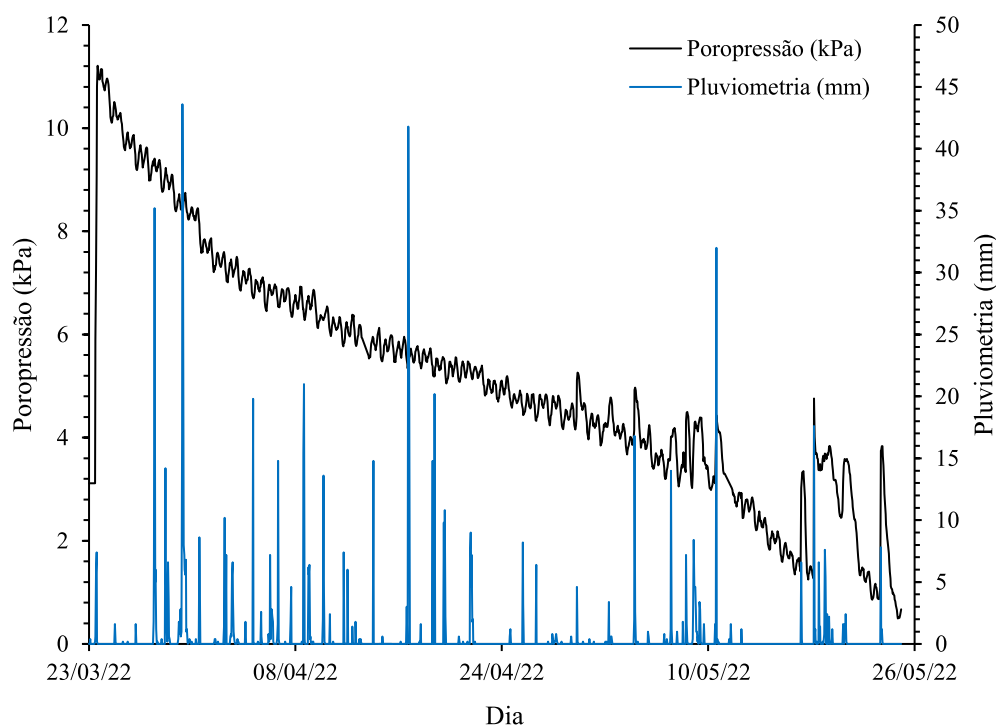


Figura 5.43. Gráfico de leituras PZE-04.

Conforme observado, o PZE-04 exibiu o mesmo comportamento observado no PZE-01, apresentando o aumento de poropressão no enchimento do reservatório e posterior dissipação.

Como esperado, foi observada a resposta das leituras para incidência pluviométricas no período de propagação das trincas, próximo do dia 29/04/2022.

Ao final do período de monitoramento dos testes de secagem, foram observadas leituras de poropressões inferiores a 1kPa.

Devido a problemas na instalação do instrumento, não foi possível captar as leituras de temperatura do rejeito ao longo do período dos testes.

## 5.9 Morfologia e Desenvolvimento das Trincas

A morfologia e formação de trincas ao longo do processo de ressecamento foram acompanhadas ao longo dos testes de verão de 2021 e inverno de 2022 realizados nos *ponds* piloto.

O início do ressecamento e de formação de trincas pôde ser observado no perímetro externo dos reservatórios nos primeiros dias após a disposição do rejeito devido a menor espessura da camada de rejeito depositada no paramento do talude de montante dos reservatórios. Entretanto, devido à variação da espessura da camada e do comportamento de ressecamento anômalo, essa formação prematura de trincas não foi abordada no presente trabalho.

Ao longo dos testes de secagem pode-se observar o início de formação de trincas nas réguas linimétricas instaladas no meio dos reservatórios, conforme ilustrado na Figura 5.44.



Figura 5.44. Formação das trincas nas réguas linimétricas.

A formação e desenvolvimento das trincas originárias das réguas foram observadas em todos os ciclos de disposições nos testes de ressecamento, sendo nomeadas como trincas primárias.

O acúmulo de tensões nas quinas das réguas poderia explicar a propagação antecipada das trincas. Porém, esse fenômeno deve ser mais bem estudado para uma melhor definição.

Com o avanço do processo de secagem do rejeito, foi possível notar o início da formação de famílias de trincas perpendiculares às trincas primárias, formando feições poligonais. Essa família de descontinuidades foi intitulada de trincas secundárias.

O início das trincas secundárias relaciona-se com a diminuição da taxa de variação vertical da camada de rejeito, podendo associar sua formação com a fase de transição do adensamento unidimensional para adensamento tridimensional.

Em todos os testes de ressecamento foi observado o início das trincas secundárias quando o rejeito apresentava teores de sólidos médio de aproximadamente 35%, independentemente da espessura inicial da camada disposta.

Logo após o aparecimento das primeiras trincas secundárias, iniciava-se a formação de uma terceira família de trincas, originadas perpendicularmente às trincas secundárias. A propagação das trincas terciárias resultava na fase final do processo de ressecamento, formando o mosaico final das trincas.

O início e desenvolvimento das trincas e formação do mosaico de descontinuidades pode ser observado da Figura 5.45 à Figura 5.47.



Figura 5.45. Início das trincas primárias: 15 dias após o lançamento da 1ª camada de 50cm do período de inverno 2022





Figura 5.46. Propagação das trincas primárias e formação das trincas secundárias e terciárias: 40 dias após o lançamento da 1ª camada de 50cm do período de inverno 2022.



Figura 5.47. Formação do mosaico de trincas: 65 dias após o lançamento da 1ª camada de 50cm do período de inverno 2022.



### 5.9.1 Propagação das Trincas

O monitoramento da propagação horizontal (abertura) e vertical (profundidade) das trincas iniciou-se no dia 10/11/2021, 33 dias após a disposição da primeira camada de 80cm do *Pond* 01, se estendendo por 36 dias até a data 16/12/2021.

Cinco trincas foram monitoradas para definição do comportamento de desenvolvimento e propagação das trincas, sendo uma trica primária (T1), duas trincas secundárias (T2 e T3) e duas trincas terciárias (T4 e T5), conforme exposto no item 3.7.

O desenvolvimento e propagação das famílias de trincas monitoradas pode ser observado na Figura 5.48.

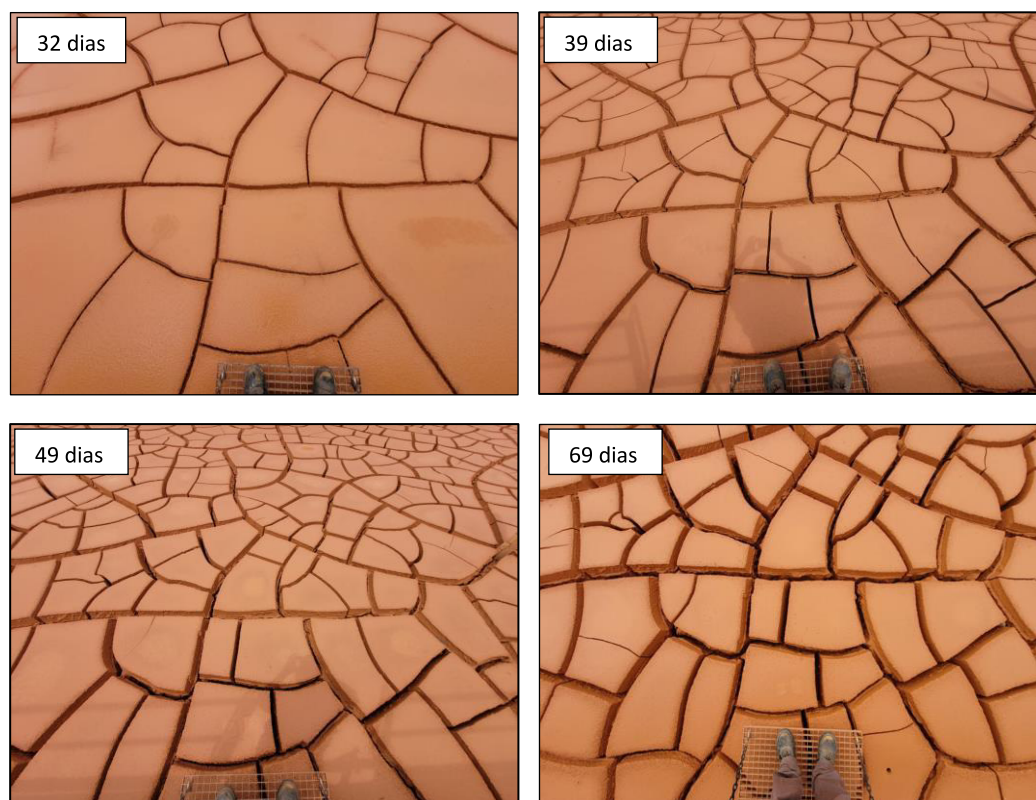


Figura 5.48. Desenvolvimento e propagação das trincas monitoradas.

A Figura 5.49 apresenta a relação da abertura das trincas em função do tempo de secagem.

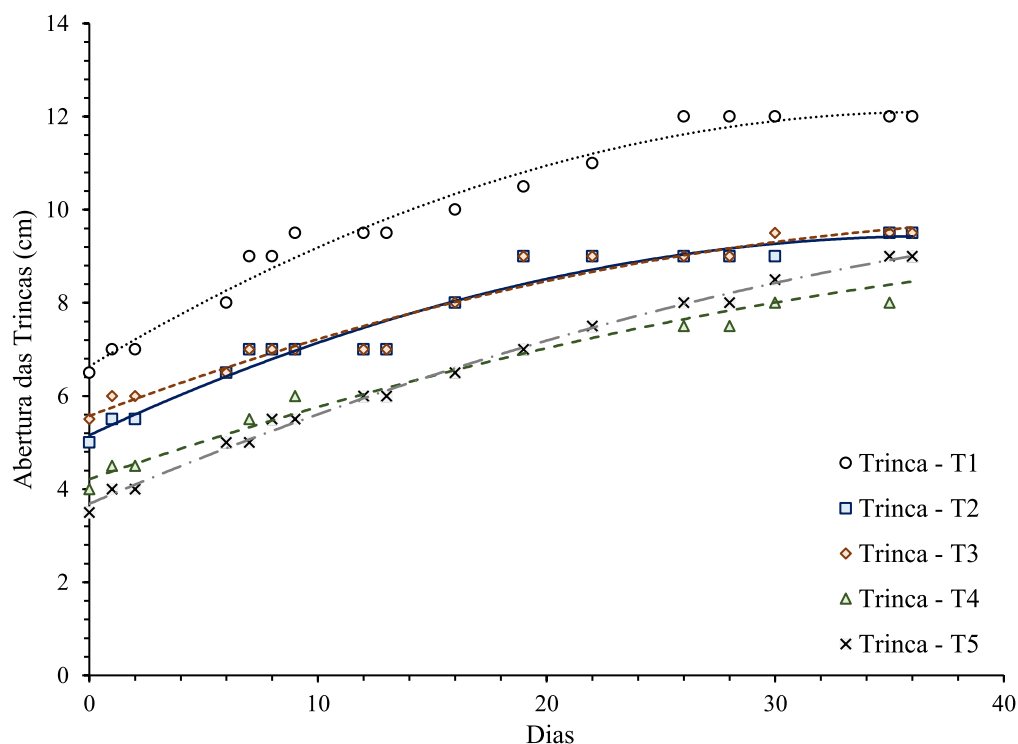


Figura 5.49. Evolução da abertura das trincas.

Pode-se observar um aumento contínuo em todas as trincas monitoradas, porém apresentando tendência de diminuição da taxa de aumento da abertura ao longo do tempo. O processo de abertura das trincas não apresentou reversibilidade, mesmo após incidência pluviométrica.

A trinca primária T1 apresentou maiores aberturas quando comparada com as trincas secundárias e terciárias ao longo de todo o período de monitoramento. É notória a similaridade do desenvolvimento das aberturas das trincas secundárias (T2 e T3) e das trincas terciárias (T4 e T5) entre si.

As trincas terciárias tenderam a diminuir a diferença do desenvolvimento das trincas secundárias no final do período de monitoramento, apresentando diferenças de aberturas menores quando comparado com o início do monitoramento.

A relação entre abertura e profundidade das trincas monitoradas está apresentada na Figura 5.50.

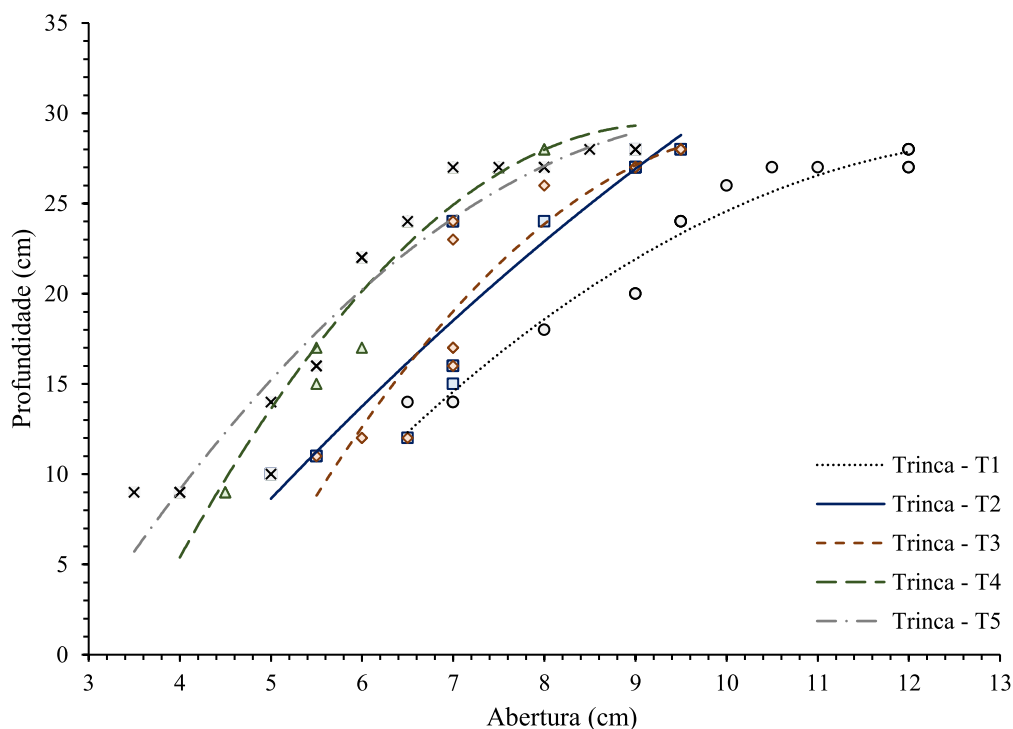


Figura 5.50. Relação abertura x profundidade das trincas.

Diferentemente do exposto por Yassoglou et al. (1994), não foi observada uma linearidade na relação abertura da trinca x profundidade. A relação abertura da trinca com a profundidade apresenta um comportamento em parábola, onde o acréscimo de abertura aumenta com a propagação vertical da trinca. Também pode ser notada a peculiaridade da relação de abertura com a profundidade para cada família de trinca.

É observado a semelhança na relação abertura x profundidade das trincas secundárias e terciárias ao longo do período de monitoramento. A trinca primária T1 apresenta características e comportamento distinto das demais trincas no início de seu desenvolvimento e ao longo de sua propagação.

O comportamento da trinca T1, junto às réguas, deve ser melhor estudado para uma compreensão mais assertiva do motivo de seu comportamento anômalo.

### 5.9.2 Proporção de Áreas das Trincas

A determinação da proporção de áreas das trincas teve como objetivo aferir a relação de trincas por metro quadrado dos *ponds* piloto ao final de cada ciclo de

secagem nas duas camadas monitoradas no período de inverno de 2022, possibilitando uma estimativa mais realista do volume útil do reservatório.

### 5.9.2.1 Primeira camada de 0,80 m – *Pond 01*

A ortofoto da primeira camada de 0,80 m disposta no *Pond 01* e o detalhamento do mosaico das trincas quando o rejeito apresentava 45,8% de teor de sólidos estão apresentados nas Figura 5.51 e Figura 5.52, respectivamente.

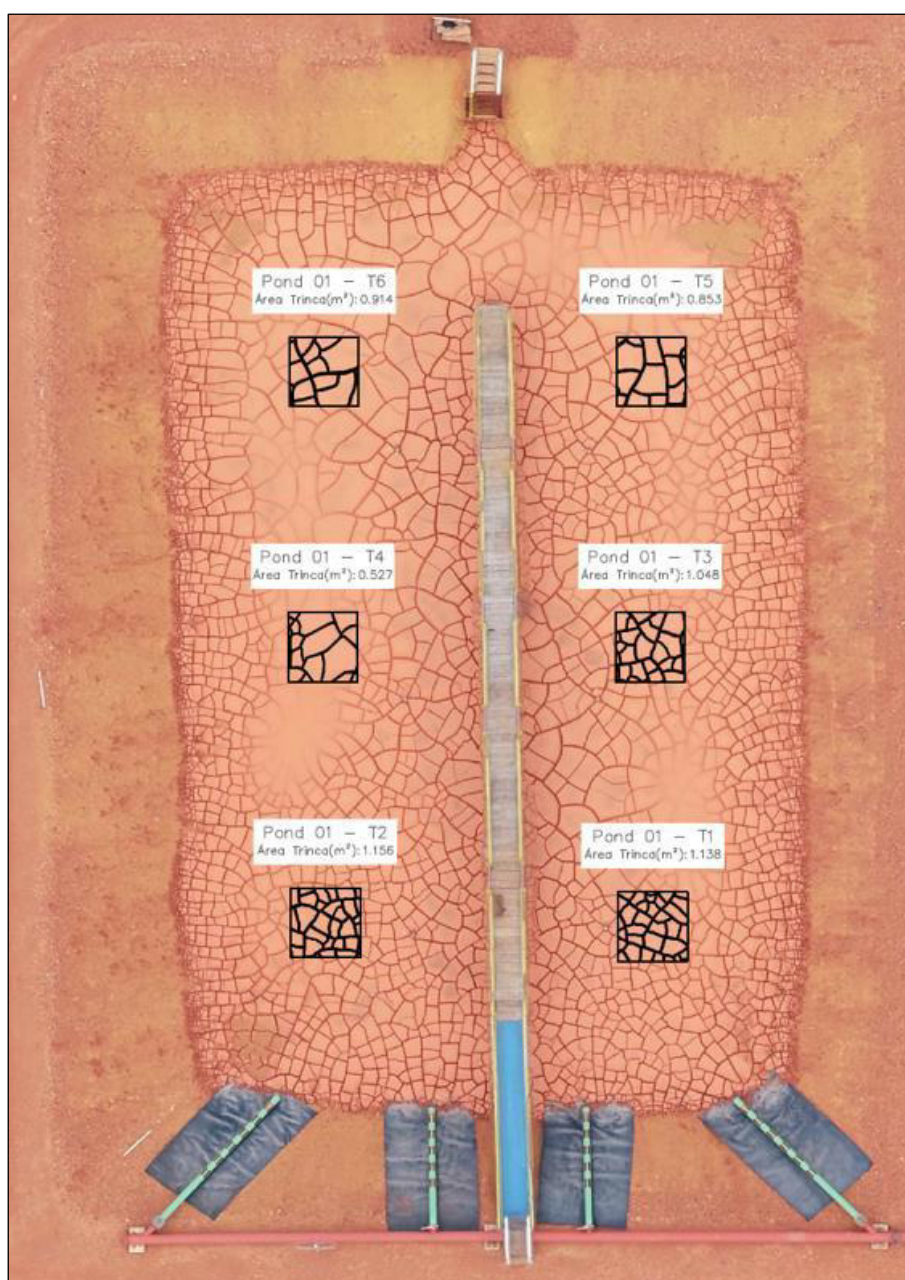


Figura 5.51. Ortofoto 1º camada de 0,80 m – *Pond 01*.

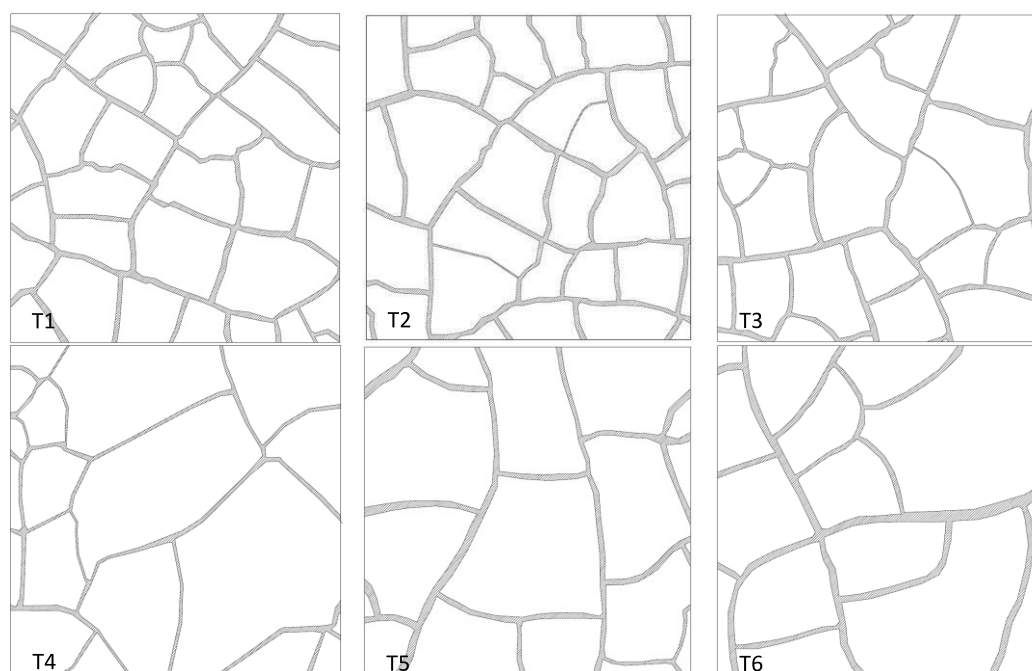


Figura 5.52. Mosaico de trincas da 1ª camada de 0,80 m – *Pond 01*

A área das trincas e sua respectiva porcentagem em relação à área das regiões em estudo estão apresentadas na Tabela 5.6.

Tabela 5.6. Área de Trincas 1ª camada de 0,80 m – *Pond 01*.

Áreas de Estudo	Área das Trincas (m <sup>2</sup> )	Porcentagem de Trinca por Área (%)
T1	1,138	12,6%
T2	1,156	12,8%
T3	1,048	11,6%
T4	0,527	5,9%
T5	0,853	9,5%
T6	0,914	10,2%
<b>Média</b>	<b>0,939</b>	<b>10,4%</b>

A primeira camada de 0,80 m do *Pond 01* nos testes de inverno apresentou uma porcentagem média de trincas de 10,4%. É nítida a maior porcentagem de trincas por área analisada na região próxima aos espigotes. A área T4, localizada no centro



do reservatório destoou das demais, apresentando uma porcentagem de trincas de 5,9%, inferior ao esperado.

### 5.9.2.2 Primeira camada de 0,50 m – *Pond 02*

A ortofoto da primeira camada de 0,50 m disposta no *Pond 02* e o detalhamento do mosaico das trincas quando o rejeito apresentava 46,7% de teor de sólidos estão apresentados nas Figura 5.53 e Figura 5.54, respectivamente.

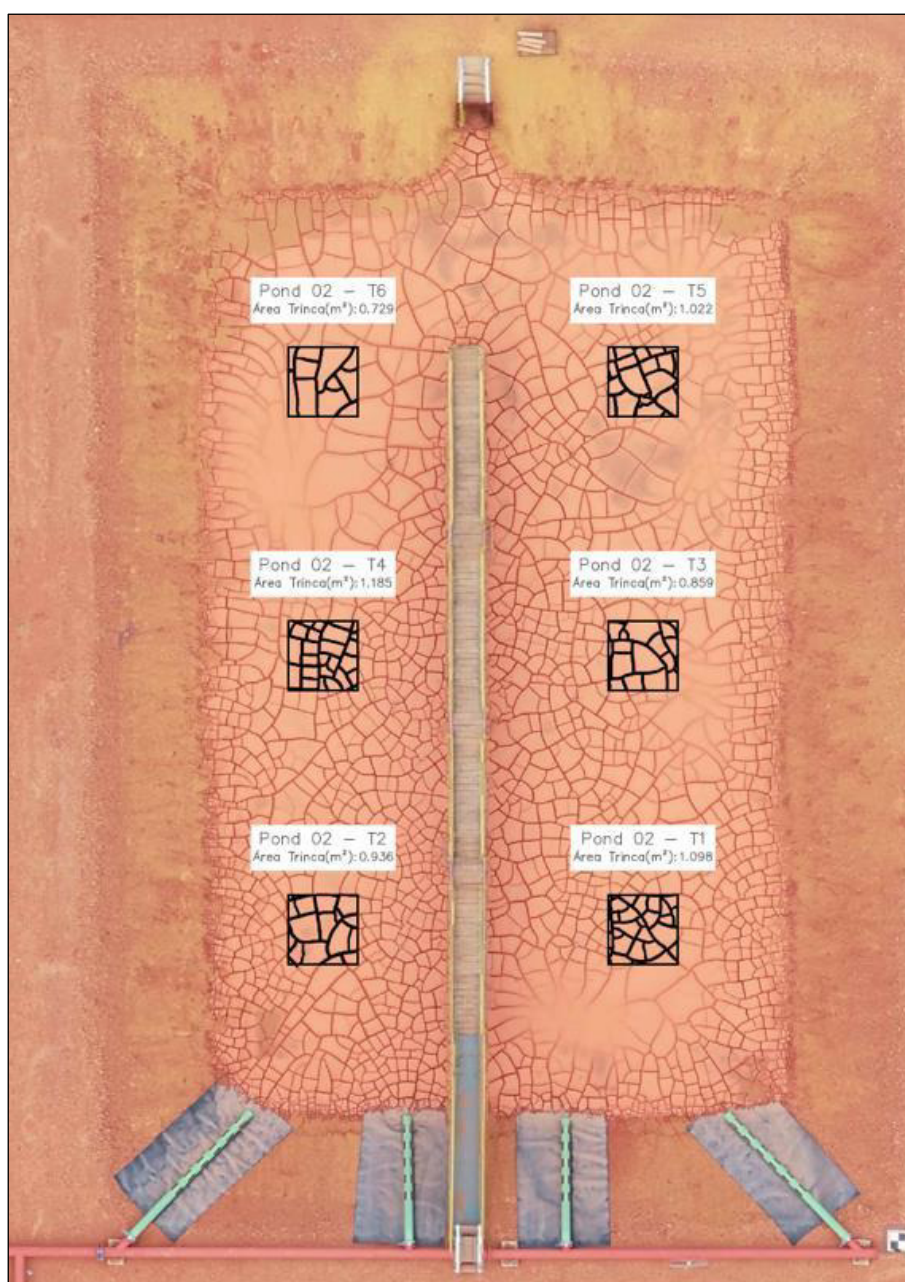


Figura 5.53. Ortofoto 1ª camada de 0,50 m – *Pond 02*.



Figura 5.54. Mosaico de trincas da 1ª camada de 0,50 m – Pond 02.

A área das trincas e sua respectiva porcentagem em relação à área das regiões em estudo estão apresentadas na Tabela 5.7.

Tabela 5.7. Área de Trincas 1ª camada de 0,50 m – Pond 02.

Áreas de Estudo	Área das Trincas (m <sup>2</sup> )	Porcentagem de Trinca por Área (%)
T1	1,098	12,2%
T2	0,936	10,4%
T3	0,859	9,5%
T4	1,185	13,2%
T5	1,022	11,4%
T6	0,729	8,1%
<b>Média</b>	<b>0,972</b>	<b>10,8%</b>

A primeira camada de 0,50 m do Pond 02 nos testes de inverno apresentou uma porcentagem média de trincas de 10,8%.



### 5.9.2.3 Segunda camada de 0,80 m – *Pond 01*

A ortofoto da segunda camada de 0,80 m disposta no *Pond 01* e o detalhamento do mosaico das trincas quando o rejeito apresentava 42,5% de teor de sólidos estão apresentadas nas Figura 5.55 e Figura 5.56, respectivamente.

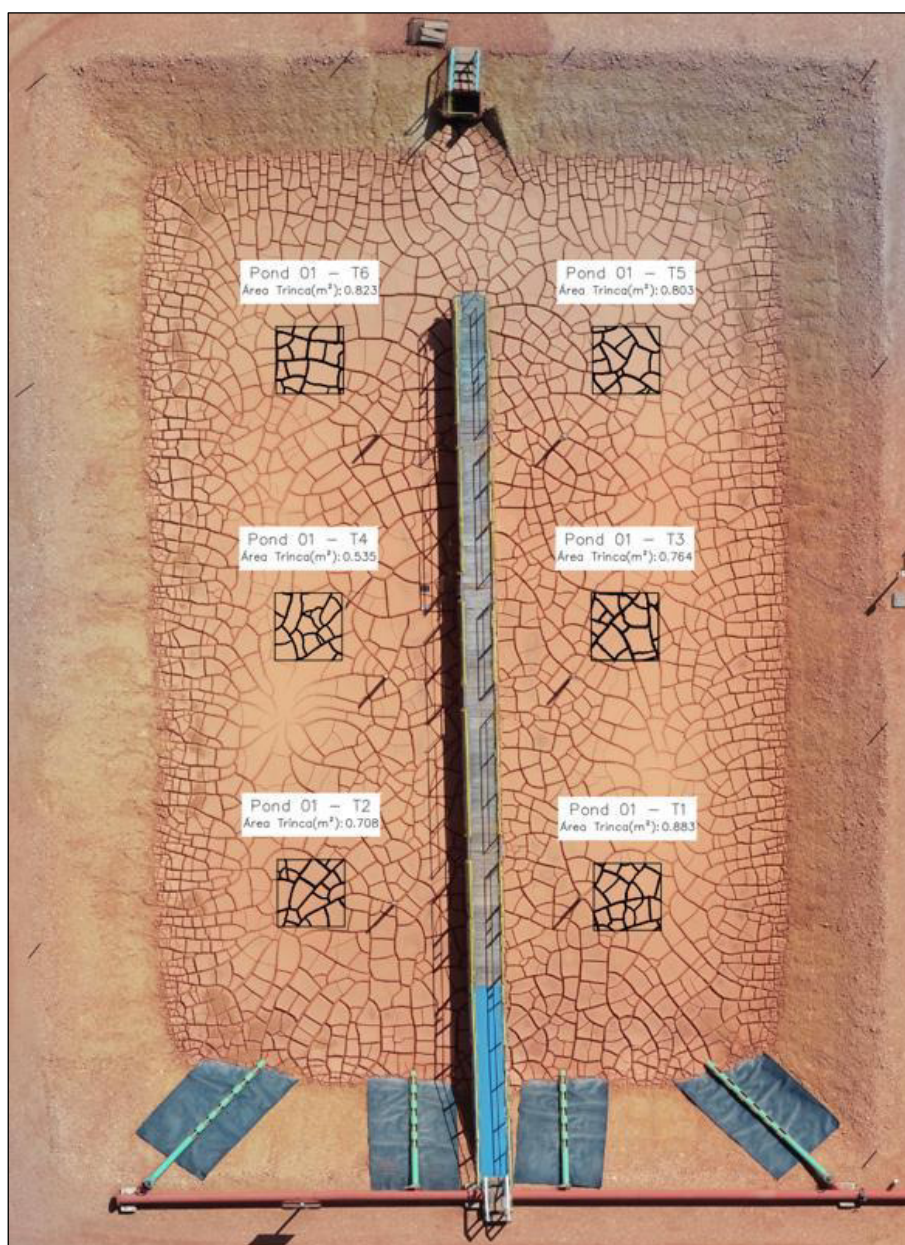


Figura 5.55. Ortofoto 2ª camada de 0,80 m – *Pond 01*.

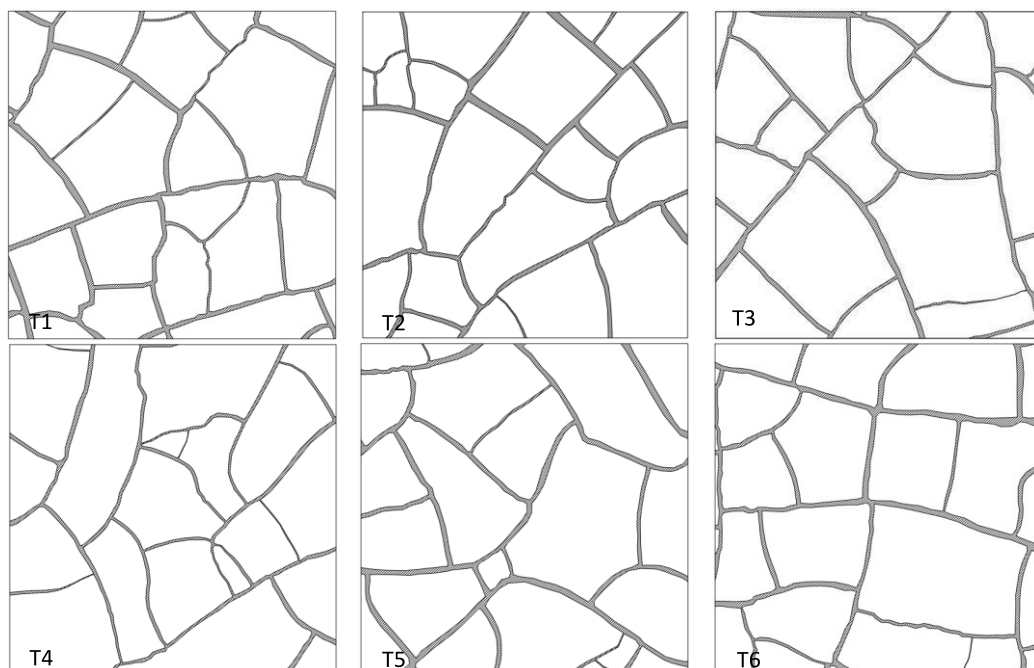


Figura 5.56. Mosaico de trincas da 2ª camada de 0,80 m – Pond 01.

A área das trincas e sua respectiva porcentagem em relação à área das regiões em estudo estão apresentadas na Tabela 5.8.

Tabela 5.8. Área de Trincas 2ª camada de 0,80 m – Pond 01.

Áreas de Estudo	Área das Trincas (m²)	Porcentagem de Trinca por Área (%)
T1	0,883	9,8%
T2	0,708	7,9%
T3	0,764	8,5%
T4	0,535	5,9%
T5	0,803	8,9%
T6	0,823	9,1%
<b>Média</b>	<b>0,753</b>	<b>8,4%</b>

A segunda camada de 0,80 m do Pond 01 nos testes de inverno de 2022 apresentou uma porcentagem média de trincas de 8,4%. Devido à menor concentração de sólidos média apresentada ao final do ciclo de secagem, era esperada uma densidade de trincas menor que da primeira camada. As áreas de trincas apresentaram

aderência com a primeira camada, tendo a zona T1 a maior porcentagem de trincas por área e a região T4 a menor porcentagem de trincas por área.

#### 5.9.2.4 Segunda camada de 0,50 m – *Pond 02*

A ortofoto da segunda camada de 0,50 m disposta no *Pond 02* e o detalhamento do mosaico das trincas quando o rejeito apresentava 44,4% de teor de sólidos estão apresentadas nas Figura 5.57 e Figura 5.58, respectivamente.

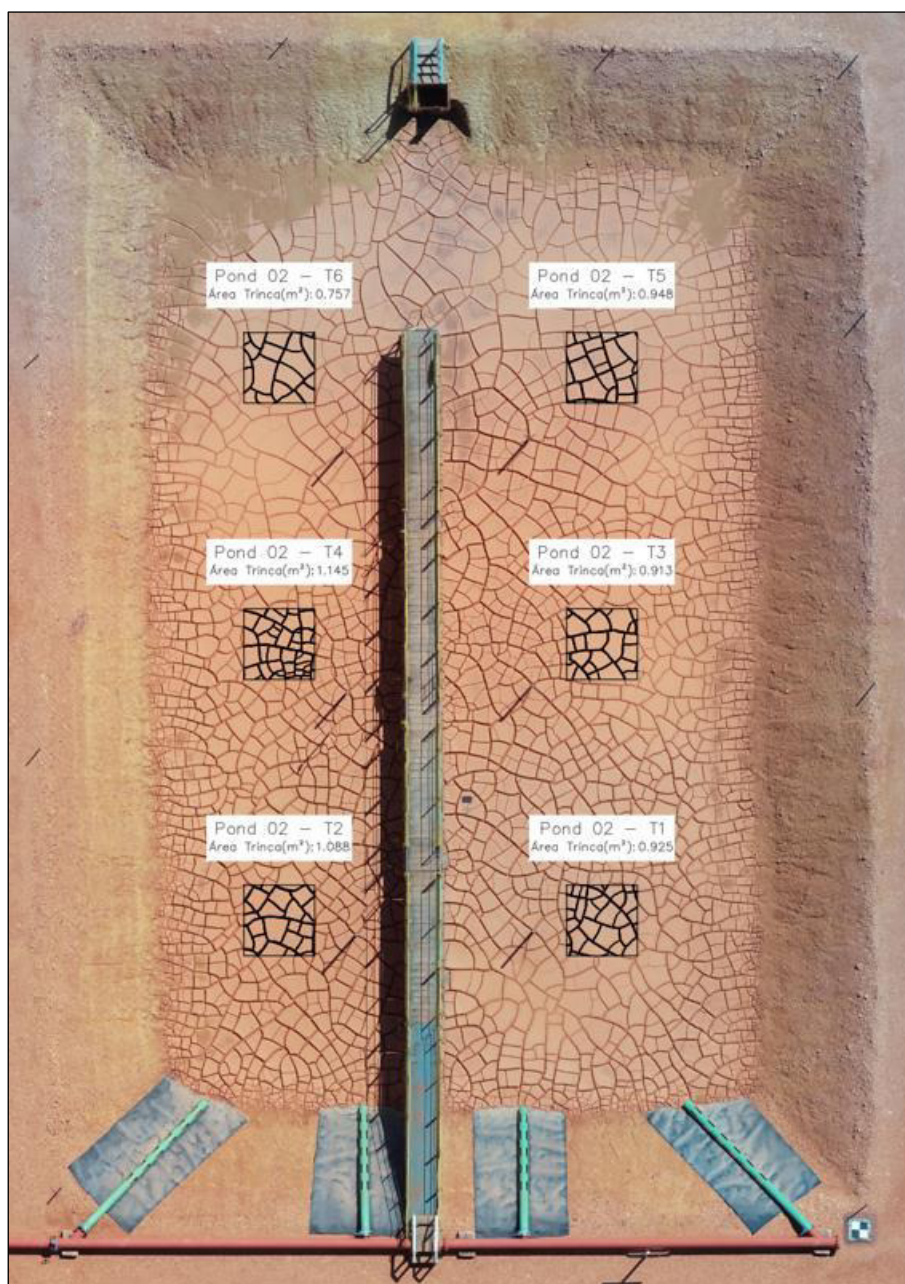


Figura 5.57. Ortofoto 2ª camada de 0,50 m – *Pond 02*.



Figura 5.58. Mosaico de trincas da 2ª camada de 0,50 m – Pond 02.

A área das trincas e sua respectiva porcentagem em relação à área das regiões em estudo estão apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9. Área de Trincas 2ª camada de 0,50 m – Pond 02.

Áreas de Estudo	Área das Trincas (m <sup>2</sup> )	Porcentagem de Trinca por Área (%)
T1	0,925	10,3%
T2	1,088	12,1%
T3	0,913	10,1%
T4	1,145	12,7%
T5	0,948	10,5%
T6	0,757	8,4%
<b>Média</b>	<b>0,963</b>	<b>10,7%</b>

A segunda camada de 0,50 m do Pond 02 nos testes de inverno de 2022 apresentou uma porcentagem média de trincas de 10,7%. Devido à proximidade do teor de sólidos médio apresentado ao final do ciclo de secagem, era esperada uma densidade de trincas próxima ao observado na primeira disposição. As áreas de



trincas apresentaram aderência com a primeira camada, tendo a zona T4 a maior porcentagem de trincas por área e a região T6 a menor porcentagem de trincas.

## 5.10 Propriedades Constitutivas

As propriedades constitutivas apresentadas têm como objetivo atender o modelo de ressecamento proposto por Abu-Hejleh e Znidarcic (1995).

### 5.10.1 Compressibilidade e Permeabilidade – $e_x \sigma'_v$ e $k_x e$

As propriedades constitutivas de compressibilidade ( $e_x \sigma'_v$ ) e permeabilidade ( $e_x k$ ) do resíduo proveniente da lavagem de bauxita foram apresentadas no item 4.8 do presente trabalho, sendo definido a partir de ensaios de laboratório de adensamento induzido por força percolação (HCT).

As funções constitutivas de compressibilidade e permeabilidade obtidas nos ensaios de HCT performados no rejeito da MRN estão dispostos na Tabela 5.10.

Tabela 5.10. Funções constitutivas de compressibilidade e permeabilidade.

Ensaio	Teor de Sólidos (%)	Função de Compressibilidade	Função de Permeabilidade
HCT-01	20,4	$e = 12,462(\sigma' + 1,726)^{-0,461}$	$k = 6,892E^{-10}e^{3,136}$
HCT-02	20,4	$e = 13,242(\sigma' + 1,968)^{-0,461}$	$k = 6,704E^{-10}e^{2,898}$
HCT-03	21,5	$e = 5,725(\sigma' + 0,140)^{-0,267}$	$k = 1,729E^{-09}e^{2,739}$

### 5.10.2 Função de Abertura e Propagação das Trincas (*Cracking Function*)

A função de abertura e propagação das trincas para o rejeito de bauxita da MRN foi baseada no monitoramento de 5 famílias de trincas, conforme explicitado no item 3.7.1, estando apresentada na Figura 5.59.

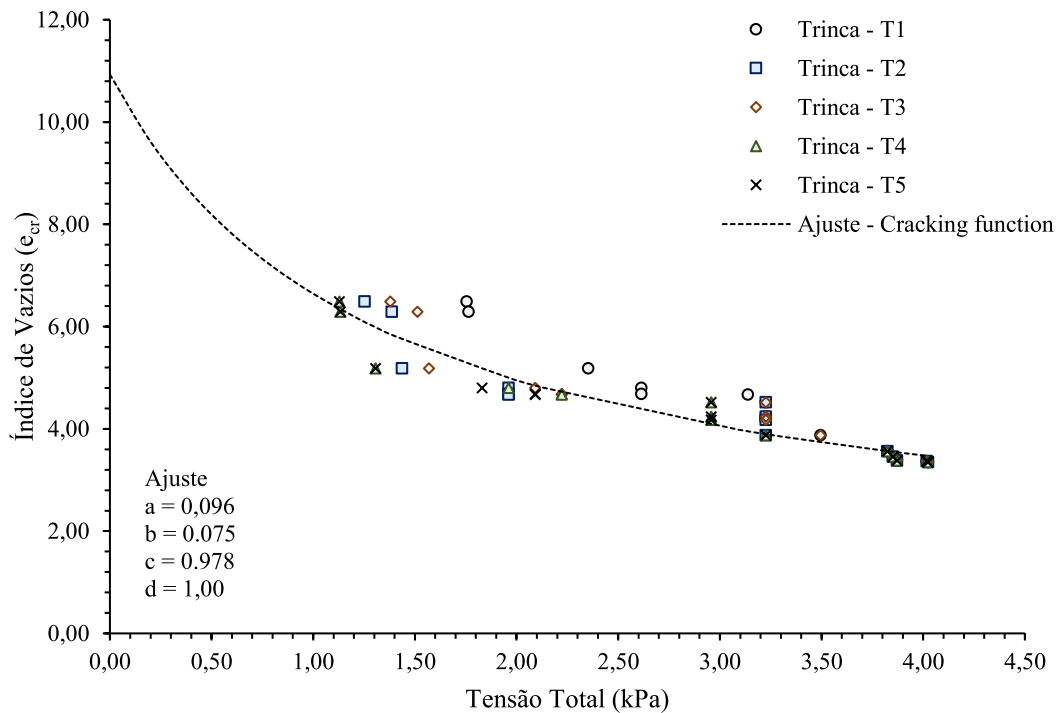


Figura 5.59. Função de abertura e propagação das trinças.

Os parâmetros obtidos através do ajuste da *cracking function* foram  $a=0,096$ ,  $b=0,075$ ,  $c=0,978$  e  $d=1,000$ , apresentando um  $R^2 = 0,89$  para o ajuste da curva.

Pode-se observar que, em média, a trinca primária T1 apresentou maiores índices de vazios para a mesma tensão total, quando comparada com as trinças primárias e secundárias. Porém, essa tendência não comprometeu o ajuste da função de abertura e propagação das trinças do rejeito da MRN.

### 5.11 Influência da Formação de Crosta no Processo de Ressecamento do Rejeito

Para o monitoramento e estudo qualitativo da influência da formação de crosta no rejeito ao longo do processo de ressecamento, foram instalados três materiais com diferentes permeabilidades sobre o rejeito, sendo uma geomembrana o material com baixa permeabilidade, geotêxtil não tecido como material de permeabilidade média e tela de mosquiteiro representando um material de alta permeabilidade.

O experimento foi monitorado por 35 dias, quando os materiais foram removidos e analisada a influência da variação da permeabilidade do material abaixo da crosta do rejeito.

A região onde foram instalados os materiais para o estudo da respectiva influência no processo de ressecamento do rejeito está ilustrada da Figura 5.60 à Figura 5.63.



Figura 5.60. Região após remoção dos materiais instalados assentes ao rejeito.





Figura 5.61. Geomembrana após período de ressecamento.



Figura 5.62. Geotêxtil após período de ressecamento.



Figura 5.63. Mosquiteiro após período de ressecamento.

Ao longo do monitoramento do teste, foi possível notar uma expressiva redução de recalque na região coberta pela geomembrana, uma pequena redução na região que foi utilizado geotêxtil e diferença irrisória onde foi instalado a tela de mosquiteiro.

Mesmo de forma qualitativa, pode-se fazer uma analogia do experimento com a diminuição do índice de vazios da camada superficial até a formação de uma crosta não saturada no processo de ressecamento do rejeito.

## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA O DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA**

A principal meta desta pesquisa foi contribuir com o conhecimento do comportamento do rejeito proveniente da lavagem de bauxita dispostos em sistemas de contenção, propondo ensaios em laboratório e metodologias para monitoramento de campo simulando as etapas de sedimentação, adensamento por peso próprio e ressecamento do material. Procurou-se implementar metodologias de monitoramento que, mesmo simples, fornecessem informações significativas para a melhoria do conhecimento do processo de ressecamento do material disposto em reservatórios.

Neste capítulo são apresentadas algumas observações sobre o desempenho e validade dos ensaios realizados, bem como algumas melhorias e sugestões para complementar o desenvolvimento da pesquisa.

### **6.1 Ensaio de Laboratório**

- Os ensaios de sedimentação em coluna apresentam bons resultados para determinação da velocidade de sedimentação e variação da interface sólido-líquido de polpa. Entretanto o material e dimensões da coluna apresentam significativa influência nos resultados, sendo importante uma boa especificação dos materiais para se atingir o objetivo do teste;
- A concentração inicial da polpa do material influencia diretamente na velocidade de sedimentação e espessura final dos sólidos;
- A existência de drenagem de fundo e sua permeabilidade influencia drasticamente no comportamento do material, sendo observados ganhos nas etapas de sedimentação e adensamento por peso próprio;
- Mesmo apresentando ganho inexpressivos no incremento da concentração de sólidos ao final do processo de ressecamento, rejeitos dispostos com maiores concentração de sólidos apresentam vantagens na otimização do volume útil dos reservatórios e no tempo de ciclo de disposição;

## 6.2 Reservatórios Experimentais

- O sistema de espigotamento proposto com a utilização de válvulas borboletas e espigotes tipo flauta apresentaram resultados satisfatórios, possibilitando a uma disposição de maneira mais ordenada e de projeção homogênea;
- Após a adequação do *stop-log* com a utilização de cunha e fita elástica, o sistema de extravasamento atendeu às expectativas, contendo o rejeito e possibilitando o controle das vazões de extravasamento;
- Conforme já explanado, o medidor de vazão não atuou da forma prevista em projeto, não sendo possível estimar a infiltração por balanço hídrico;

## 6.3 Monitoramento de Campo

- A amostragem utilizando o amostrador tipo “caneco” é uma boa metodologia para definição da concentração de sólidos de um determinado ponto de interesse, não podendo ser utilizado para representação da média de teor de sólidos do perfil de uma camada;
- O amostrador pistão estacionário é uma boa metodologia para amostragens representativas para determinação do teor de sólidos médio de uma camada, além da possibilidade a segmentação das amostragens e construção do perfil de teor de sólidos de determinada camada;
- As réguas linimétricas apresentaram resultados bastante satisfatórios no que tange o acompanhamento dos recalques, determinação do ângulo de repouso e construção da curva de enchimento do reservatório;
- Com o monitoramento da piezometria, pôde-se concluir que a contribuição da infiltração de águas de chuva e do desaguamento do rejeito não foram suficientes para saturar a fundação dos reservatórios experimentais;
- A incidência pluviométrica não foi suficiente para reempolpar o rejeito, não interferindo na dissipação do excesso de poropressão do material ao longo do período de sedimentação e adensamento por peso próprio;

- As condições climáticas influenciam diretamente na taxa de ganho de teor de sólidos do material quando apresenta consistência de pasta;
- A concentração de sólidos média final das camadas de 80 cm apresentou-se ligeiramente menores quando comparadas com as camadas de 50 cm tanto na primeira camada quanto na segunda camada;
- O *range* da variação do perfil de teor de sólidos da camada de 80 cm apresentou-se ser maior quando comparado com a camada de 50 cm;
- O ponto de transição da consistência de polpa para pasta, isto é, transição dos adensamentos unidimensionais para tridimensionais e início da formação de trincas para o rejeito de bauxita da MRN pode ser estimado quando o mesmo apresenta concentração de sólidos de aproximadamente 35%;
- As trincas secundárias e primárias apresentam desenvolvimento e propagação bem semelhantes entre si;
- A metodologia do monitoramento de campo para determinação da *cracking function* se apresentou satisfatória;
- O monitoramento da proporção de trincas por área de reservatório via ortofotos é uma boa metodologia para definição de volume de trincas e refinamento dos volumes úteis dos reservatórios;
- A obtenção da função de abertura e propagação das trincas (*cracking function*) por ensaios e observações de campo se mostrou satisfatória, permitindo a obtenção das relações constitutivas necessárias para utilização do modelo de ressecamento proposto por Abu-Hejleh & Znidarcic (1995);
- Mesmo de forma qualitativa, foi possível ver a influência no abatimento do rejeito quando se tem materiais com diferentes permeabilidades sobre o rejeito, podem correlacionar com a formação de uma crosta. Quanto mais impermeável, menor a variação volumétrica do rejeito;

#### 6.4 Sugestões

- Estudar o comportamento da curva de secagem do material após a disposição de mais camadas, comparando as camadas de 50 cm e 80 cm;
- Estudar o comportamento do perfil de sólidos após a disposição de mais camadas de rejeito;
- Realizar aerolevanteamento topográficos periódicos ao longo do processo de ressecamento, possibilitando o acompanhamento da variação volumétrica total do reservatório, bem como acompanhamento da formação e propagação das trincas ao longo dos processos de disposição;
- Desenvolver metodologia que possibilite o revolvimento da parte superior da camada, proporcionando maior área superficial para evaporação e amolgando a crosta no topo da camada de rejeito.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (2012). NBR 16097: Solo – Determinação do teor de umidade – Métodos expeditos de ensaio. Rio de Janeiro, p 13, 2016.

ABNT (2016a). NBR 7181: Solo – Analise granulométrica. Procedimento. Rio de Janeiro, p 13, 2016.

ABNT (2016b). NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, p 6, 2016.

ABNT (2016c). NBR 67180: Solo – Determinação do limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, p 3, 2016.

Abu-Hejleh, A.N. & Zinidarcic, D. (1992). User manual for program SICT. Departament of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, 101 p., Boulder, Colorado.

Abu-Hejleh, A.N. & Znidarcic, D. (1995). Desiccation Theory for Soft Cohesive Soils. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 121(6), 493-502.

ALLBROOK, R.F. (1992). Shrinkage of some New Zealand soils and its implications for soil physics. Aust. J. Soil Res., p. 111-118, 1992.

ALMEIDA, F. E. (2004). Análise numérica do processo de ressecamento de um rejeito fino da mineração de ferro. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004

ANB (2021). Anuário Mineral Brasileiro. Agência Nacional de Mineração – ANM, 2021.

ÁVILA, J.P., COSTA, L.H.D., SOARES, R. (1995). Deposição de rejeito fino pelo método de secagem. III Simp. Barrag. Reje. de Res. – REGEO – Anais, Ouro Preto, MG, p. 97-108. 1995.

ASTM – American Society for Testing Materials. ASTM D 854 – 02 – Standard Test Methods For. Specific Gravity Of Soil Solids Bu Water Pycnometer. In: Annual Book of ASTM Standards, 2002.

BRUNAUER, EMMETT AND TELLER B.E.T. (1938). J. Am. Chem. Soc., 60:309, 1938.

BRETAS, V., AGRIPINO, L., SILVA, M., FILHO, M., SILVA, P, CASTILHO, B. & AMORIN, D. (2021). Geotechnical and rheological characterization of bauxite mining tailings. Anais 7<sup>th</sup> International Conference on Tailings Management, p.228-238, 2021.

BROMWELL, L.G. & OXFORD, T.P. (1977) . Waste Clay dewatering and disposal. Geotech. Pract. For Disposal of Solid Wast Material. ASCE. 1977.

BRONSWIJK, J.J.B. (1988). Modelling of water balance, cracking and subsidence of clay soils. Journal of Hydrology, p. 199-212, 1988.

CARGILL, K.W. (1985). Mathematical model of consolidation desiccation process in dredged material. Technical Report, US Army Eng. Waterways Experiments Station, Vicksburg, Miss., 1985.

CHANDLER, J.L. (1988). Solar drying of red mud – light Metals, Phoenix, Arizona, USA, 1988, p.55-60.

COOLING, D.J. (1985). Finite strain consolidation of red mud residue from the alumina refining industry. West. Australian Institute of Tech.

COSTA, L.H.D., ÁVILA, J.P., SOARES, R. (1999). Deposição de rejeito fino pelo método de secagem. III Simp. Barrag. Reje. de Res. – REGEO – Anais, Ouro Preto, MG, p. 97-108. 1999.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. (1977). Crop water requirements. Rome: FAO, 1977. 179p. Irrigation and Drainage Paper, 24, 2<sup>a</sup> ed. Rome, 1977. 144p.

DPI (2003). Management of tailings storage facilities – environmental Guidelines. Department of Primary Industries, Victoria – Minerals & Petroleum Division, 2003.

GIBSON, R.E., ENGLAND, G.L. & HUSSEY, M.J.L. (1967). The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: I. Finite nonlinear consolidation of thin homogeneous layers. *Géotechnique*, v. 17, nº 3, p.261-273, 1967.

HARDY, A.W.D & ENGELS, J.M. (2007). Methods for the disposal and storage of mine tailings. Land Contamination & Reclamation. EPP Publication Ltd., 2007.

KNIGHT, R.B. & HAILE, J.P. (1983) Sub Aerial Tailings Deposition. In 7<sup>th</sup> PAN AM. SOIL MEC. CONF., Proc., Vancouver, Canada, vol2, 1983

KRIZEK, B.R.J., CASTELEITO, M. & EDIL, T.B. (1977). Desiccation and consolidation of dredged materials. *Journal of the geotechnical Engineering Division*, p. 1399-1418, 1977.

KYNCH, G. J. A (1952). Theory of sedimentation. Transactions of the Faraday Society, v. 48, p 166-176, 1952.

LAMBE, R.P. & WHITMAN, R.V. (1969). Soil mechanics. Wiley & Sons, New York, 1969.

LI, L. Y. & RUTHERFORD, G. K. (1996). Effect of bauxite properties on settling of red mud – Intern. Journal of Mineral Processing, 48, Elsevier, p.p. 169 – 182, 1996.

LIMA, L. M. K. (2006). Retroaálise da formação de um depósito de rejeitos finos de mineração construído pelo método subaéreo. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

MELLO, L.G., CARDOSO, W.S. & CARRIER, W.D. (1987). Deposição dos rejeitos de lavagem de bauxita de trombetas nas próprias áreas anteriormente lavradas. Anais do Simpósio de Barragens de Rejeito e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, Rio de Janeiro, Vol. 1, p. 112-132, 1987.

MORRIS, P.H., GRAHAM, J., WILLIAMS, D.J. (1992). Cracking in Drying Soils. Canadian Geotechnical Journal, p. 263-277, 1992.

NORMAN, D. K. & RAFORTH, R. L. (1998). Innovations and trends in reclamation of metal mine tailings in Washington. Washington Geology, v. 26, nº 2/3, p. 29-42. 1998.

OLIVEIRA FILHO, W.L. (1998). Verification of a Desiccation Theory for Soft Soils. Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, Boulder. Dissertação de doutorado, 1998.

PEDROSA, G.J. (2012). Modelação física da disposição de rejeitos de bauxite por meio de diques-testes. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil - Universidade Federal de Ouro Preto, p. 138, Ouro Preto, 2012.

RAO, K.S.S. & SATYADAS, G.C. (1985). Measurement of volumetric and linear shrinkage on black cotton soil. Geotechnical Testing Journal, ASTM, 66-70, 1989.

SILVA, D. R. (2003). Estudo do processo de ressecamento de um rejeito fino de minério de ferro em área teste. 141p., Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

SILVA, W. R. (2008). Nova metodologia para determinação de propriedades de sedimentação e adensamento de rejeitos de mineração. 2008. 136f. Tese (doutorado), Universidade Federal de Viçosa, UFV, Viçosa, 2008.

SILVA, M.C. (2020). Estudo da implementação de um Sistema de disposição de rejeito desaguado de mineração de bauxita laterítica. Tese de doutorado, Universidade Federal de Viçosa, UFV, p. 185, Viçosa, 2020.

SWARBRICK, G.E. & FELL, R. (1991). Prediction of the improvement of tailings properties by desiccation. In IX CONG. Pan American de MSFE, Chile, 1991, p.995-1007, 1991.

ULRICH, B., EAST, D.R., GORMAN, J. (2000). Subaerial tailings deposition – Design, construction and operation for facility closure and declamation. In: Tailings and Mine Waste, Balkema, Rotterdam, p. 27-37., 2000.

VICK, S.G. (1990). Planning, design and analysis of tailings dams. 2<sup>nd</sup> ed. BiTech, Vancouver, 1990.

VILLAR, L. F. S. (1990). Análise do Comportamento de Resíduos Industriais de Bauxita: Desenvolvimento de Facilidades Experimentais de Campo e Laboratório. 1990, Dissertação de Mestrado – DEC – PUC-Rio, 1990.

VILLAR, L.F.S. (2002). Estudo do adensamento e ressecamento de resíduo de mineração e processamento de bauxita. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, p. 461, Rio de Janeiro, 2002.

TARIQ, A.U.R. & DURNFORD, D.S. (1993). Soil volumetric shrinkage measurements: a simple method. Soil Science, p. 325-330, 1993.

YASSOGLOU, N., KOSMAS, C.S., MOUSTAKAS, N., TZIANIS, E. and DANALATOS, N.G. (1994). Cracking in recente aluvial soils as related to easily determined soil Properties. Elsevier Science Publisher B.V., Geoderma, p. 239-298, 1994.

YAO, T. C. & ZNIDARCIC, D. (1997). Modelling of soil evaporation from waste disposal site. In Join CSCE – ASCE National Conference on Environmental Engineering, Montreal, p. 281-288, 1997.

WILLIAMS, D.J., PRICE, G., LI, H. (2011). Assessing the flowability of bauxite tailings at east weipa, Queensland. Anais Paste, Autralian center for geomechanics, Perth, p. 367-280, 2011.



## APÊNDICE A

Ensaio de sedimentação em coluna para diferentes teores de sólidos ( $\Psi$ ).

Tempo (min)	Teste em Proveta 2L - Convencional			Coluna de Grandes Dimensões	
	$\Psi$ (%) 18,7	$\Psi$ (%) 20,6	$\Psi$ (%) 21,7	$\Psi$ (%) 19,8	$\Psi$ (%) 22,2
0	40	40	40	40	40
2	40	40	40	40	40
4	40	40	40	40	40
6	40	40	40	40	40
8	40	40	40	40	40
10	40	40	40	40	40
15	40	40	40	40	40
20	40	40	40	40	40
30	40	40	40	40	40
60	40	40	40	39,9	40
120	39,9	40	40	39,9	40
180	39,8	40	40	39,9	40
240	39,7	39,9	39,9	39,8	39,9
300	39,7	39,9	39,8	39,7	39,8
360	39,7	39,9	39,8	39,6	39,7
420	39,6	39,9	39,8	-	-
480	39,6	39,8	39,7	-	-
540	39,5	39,8	39,7	-	-
600	39,5	39,8	39,7	-	-
1440	39,2	39,6	39,6	39	39,4
1620	-	-	-	38,8	39,3
2880	38,8	39,3	39,5	38,4	39
4320	38,4	39	39,3	37,7	38,4
5760	38	38,8	39,1	37,1	38,1
7200	37,6	38,5	38,9	36,4	37,7
8640	37,4	38,2	38,8	35,5	37,2
10080	37,2	38	38,7	35,1	36,8
11520	37	37,9	38,6	34,6	36,5
12960	36,9	37,8	38,4	34,4	36,3
14400	36,8	37,7	38,3	34,1	36
15840	36,7	37,6	38,2	33,9	35,7
17280	36,6	37,6	38,1	33,7	35,5
18720	36,6	37,5	38	33,6	35,4
20160	36,5	37,5	38	33,5	35,2
21600	36,5	37,5	38	-	-
23040	36,5	37,5	38	33,2	34,8
24480	36,5	37,5	38	-	-
27360	-	-	-	33	34,6