

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

MARCELO CORRÊA DA SILVA

**ESTUDO DA IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE DISPOSIÇÃO
DE REJEITO DESAGUADO DE MINERAÇÃO DE BAUXITA
LATERÍTICA**

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2020

MARCELO CORRÊA DA SILVA

**ESTUDO DA IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE DISPOSIÇÃO
DE REJEITO DESAGUADO DE MINERAÇÃO DE BAUXITA
LATERÍTICA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Eduardo Antônio Gomes Marques.

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2020

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa

T

S586e
2020
Silva, Marcelo Corrêa da, 1977-
Estudo da implementação de um sistema de disposição de
rejeito desaguado de mineração de bauxita laterítica / Marcelo
Corrêa da Silva. – Viçosa, MG, 2020.
185 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexos.

Orientador: Eduardo Antônio Gomes Marques.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.159-162.

1. Barragens de rejeito. 2. Filtros e filtração. 3. Prensagem.
4. Bauxita - Minas e mineração. I. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22 ed. 627.8

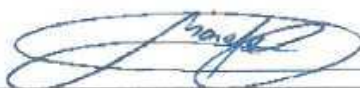
MARCELO CORRÊA DA SILVA

**ESTUDO DA IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE DISPOSIÇÃO
DE REJEITO DESAGUADO DE MINERAÇÃO DE BAUXITA
LATERÍTICA**

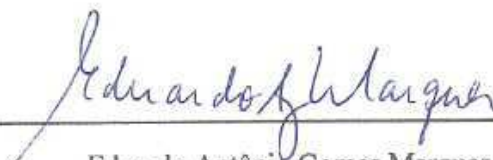
Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 14 de fevereiro de 2020.

Assentimento:



Marcelo Corrêa da Silva
Autor



Eduardo Antônio Gomes Marques
Orientador

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho foi um grande desafio pessoal, que não seria superado sem a ajuda de tantas pessoas e empresas que contribuíram de forma altruísta.

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

Agradeço aos meus orientadores, Eduardo Marques e Claudio Henrique por compartilharem seus conhecimentos. Sem eles os maiores desafios gerados pela distância, não seriam superados

Agradeço aos membros da banca, os professores Roberto Ferraz, Cibele Cláuver e Adonai Fineza, pelas contribuições essenciais na finalização deste trabalho.

Agradeço aos profissionais Luan e Eron da Outotec pela inestimável contribuição na realização dos testes. Agradeço ao profissional José Roberto e demais colaboradores da AC Parceria pela ajuda na realização de diversos trabalhos necessários a essa tese. Agradeço a ajuda do Paulo Abrão e Felipe da Geoconsultoria, Yanto, Vinícius e Francisco da MRN, Caio Deursen da Nexa, e Rodrigo Rodrigues da Pimenta de Ávila.

Agradeço ao laboratorista Dedé e aos estagiários Jefferson Alves e Rafael Corrêa, pelo comprometimento na realização dos trabalhos no laboratório de engenharia civil da UFV.

Agradeço ao professor Heraldo Pitanga pelo esforço extra me oferecendo sua disciplina em horário compatível com minha disponibilidade. Agradeço aos professores Dario Cardoso e Maria Lúcia Calijuri pelas contribuições nesse desafio.

RESUMO

SILVA, Marcelo Corrêa, D.Sc. Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2020. **Estudo da implementação de um sistema de disposição de rejeito desaguado de mineração de bauxita laterítica.** Orientador: Eduardo Antônio Gomes Marques.

Esse trabalho é um estudo de caso de uma mineradora de bauxita laterítica, no qual verificou-se as condições para que um filtro prensa (FP) de paredes horizontais deságue a polpa de rejeito até que se forme uma torta com teores de umidade próximos da umidade ótima de compactação. Além disso foi desenvolvido uma seção conceitual do depósito *dry stack*, levando em consideração as condições construtivas no período seco e chuvoso, e também a necessidade de um plano de emergência para estabilizar o depósito no caso de um desequilíbrio do balanço de massa. Com os ensaios realizados com FP se constatou que pode ser possível a formação de uma torta de rejeito com teor de umidade próximo de 26%, sendo esse valor inferior à umidade ótima de compactação do rejeito, que é de 31,4%. Por isso é possível calibrar o tempo de operação do FP para que forneça torta próxima da umidade ótima de compactação, reduzindo-se a necessidade de correção de umidade na construção do depósito *dry stack*. A capacidade de filtragem (base seca) resultante nos testes atingiu valores entre 17,4 e 23,1 kg/m²h. A análise de estabilidade realizada numa seção conceitual de projeto, resultou em um fator de segurança para o depósito *dry stack* igual a 2.0, indicando segurança no equilíbrio estrutural. As análises de estabilidade do aterro de emergência, utilizando parâmetros geotécnicos da zona seca, resultaram em fatores de segurança de 2.9 e 2.0, respectivamente, para as alturas do aterro de emergência de 6 m e 12 m. No comparativo direto entre o depósito *dry stack* e os reservatórios de secagem, típicos do empreendimento, constatou-se que para uma capacidade de armazenamento de 25.460.590 toneladas de rejeito (base seca), equivalente a 11,8 anos de vida útil, o depósito *dry stack* ocupa uma área de 476.624 m² (47,7ha), que é 9,3 vezes menor que a área ocupada por 8 reservatórios típicos do empreendimento, necessários para atender os mesmos 11,8 anos de vida útil.

Palavras-chave: Filtro prensa. *Dry stack*. Rejeito de bauxita

ABSTRACT

SILVA, Marcelo Corrêa, D.Sc. Universidade Federal de Viçosa, February, 2020. **Study on the implementation of a side bauxite mining disable disposal disposal system.** Advisor: Eduardo Antônio Gomes Marques.

This work is a case study of a lateritic bauxite mining company, in which the conditions were verified for a filter press (FP) with horizontal walls to drain the waste pulp until a pie is formed with moisture levels close to moisture optimal compaction. In addition, a conceptual section of the dry stack deposit was developed, taking into account the construction conditions in the dry and rainy season, and also the need for an emergency plan to stabilize the deposit in the event of an imbalance in the mass balance. With the tests carried out with FP it was found that it may be possible to form a tailings cake with moisture content close to 26%, this value being lower than the optimum moisture content of the tailings compaction, which is 31.4%. That is why it is possible to calibrate the operating time of the FP so that it provides pie close to the optimum compaction humidity, reducing the need for moisture correction in the construction of the dry stack deposit. The filtering capacity (dry basis) resulting in the tests reached values between 17.4 and 23.1 kg / m²h. The stability analysis carried out in a conceptual design section, resulted in a safety factor for the dry stack deposit equal to 2.0, indicating safety in the structural balance. The analyzes of the stability of the emergency landfill, using geotechnical parameters of the dry zone, resulted in safety factors of 2.9 and 2.0, respectively, for the heights of the emergency landfill of 6 m and 12 m. In the direct comparison between the dry stack deposit and the drying reservoirs, typical of the project, it was found that for a storage capacity of 25,460,590 tons of tailings (dry basis), equivalent to 11.8 years of useful life, the dry stack deposit occupies an area of 476,624 m² (47.7ha), which is 9.3 times smaller than the area occupied by 8 typical reservoirs of the enterprise, necessary to serve the same 11.8 years of useful life.

Keywords: Filter press. Dry stack. Bauxite tailings

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2. 1 - Distribuição mundial dos depósitos de bauxita	24
Figura 2. 2 - Produção mundial de bauxita.....	25
Figura 2. 3 - Fluxograma do beneficiamento de bauxita laterítica representativo do empreendimento estudado	266
Figura 2. 4 -Britagem e transporte da bauxita	28
Figura 2. 5 - Planta de beneficiamento de bauxita	28
Figura 2. 6 - Tambor lavador (<i>scrubber</i>) e <i>trommel</i>	29
Figura 2. 7 -Bauxita lavada grosseira	29
Figura 2. 8 Bauxita lavada fina.....	30
Figura 2. 9- Densidade de lama versus resistência não drenada	32
Figura 2. 10 - Métodos de alteamento de barragem	34
Figura 2. 11 - Exemplo esquemático do sistema de armazenamento de rejeito com reservatórios de lançamento contínuo, dimensionado para clarificar o efluente em função do tempo de sedimentação.....	35
Figura 2. 12 - Exemplo esquemático do sistema de armazenamento de rejeito com reservatórios de secagem.....	37
Figura 2. 13 - Reservatório de rejeito do empreendimento de estudo, com detalhe do espigote de lançamento de rejeito	39
Figura 2. 14 - Distribuição espacial do aterro do depósito a seco, de modo que a zona seca (zona estrutural) estabilize o aterro da zona úmida	43
Figura 2. 15 - Detalhes dos principais componentes do depósito a seco.....	44
Figura 2. 16 - Classificação do rejeito pelo grau de desaguamento	47
Figura 2. 17 - Exemplo esquemático do sistema de armazenamento de rejeito pelo método de disposição a seco (<i>dry stack</i>)	47
Figura 2. 18 - Taxa unitária de filtragem, em função da umidade da torta, das lamas para filtro de prensa horizontal, prensa vertical e hiperbárico	53
Figura 2. 19 - Filtro de disco convencional Modelo VSF 120/10	54
Figura 2. 20 - Representação esquemática de um filtro de disco convencional.....	54
Figura 2. 21 - Filtro horizontal de correia	55
Figura 2. 22 - Exemplo de filtro tambor.....	56
Figura 2. 23 - Tendências no uso de rejeitos desaguados na mineração	58
Figura 2. 24 - Filtro prensa de placas horizontais.....	59
Figura 2. 25 - Ciclo de um filtro de pressão vertical	60
Figura 2. 26 - Ciclo de um filtro de pressão vertical	61
Figura 2. 27 - Ciclo de operação dos filtros prensa com placas tipo câmara	62

Figura 2. 28 - Ciclo de operação dos filtros prensa com placas tipo diafragma.....	63
Figura 3. 1 - Depósito de areia representativo da jazida local.....	68
Figura 3. 2 - À esquerda o ponto de coleta do rejeito, e à direita a torre de sustentação da tubulação adutora que transporta a polpa de rejeito da planta de beneficiamento para os reservatórios de armazenamento	69
Figura 3. 3 - Armazenamento de 500 litros de rejeito para decantar os sólidos, retirar a água e preencher com mais polpa de rejeito, a fim de formar um volume mais denso e transportar para o laboratório de análises na fundação Gorceix em Ouro Preto – MG.....	70
Figura 3. 4 - Processo de retirada de água do rejeito (após decantação) para aumentar a quantidade de sólidos a serem transportados da mineradora para o laboratório de pesquisa...	70
Figura 3. 5 -Reservatório de rejeito adensado utilizado para coleta de material.....	71
Figura 3. 6 - Espessador dinâmico de bancada - THI 94 mm	76
Figura 3. 7 - Filtro de teste do tipo prensa horizontal com diafragma	77
Figura 3. 8 - Croquis com a sequência de funcionamento dos testes no filtro prensa horizontal do tipo diafragma.....	82
Figura 3. 9 -Consideração do projeto conceitual, em que as pilhas de estéril são regularizadas com trator de esteira até formar uma camada de fundação plana, com 20 metros de espessura	86
Figura 3. 10 - Croqui apresentando o aterro de emergência construído no período chuvoso em situações em que a zona úmida supera a cota da zona seca	89
Figura 4. 1- Agitação mecânica da polpa para homogeneização (foto da esquerda), e medições estimadas do teor de sólidos (foto da direita).....	103
Figura 4. 2 - Equipamento para deságue da polpa por pressão (foto da esquerda), e a torta de rejeito após deságue (foto da direita).....	104
Figura 4. 3 - Rejeito de polpa após agitação na proveta (foto da esquerda), e a separação entre <i>underflow</i> e <i>overflow</i> ao fim da sedimentação (foto da direita).....	104
Figura 4. 4 - Execução do teste dinâmico de espessamento.	108
Figura 4. 5 - Uso do viscosímetro para determinação da tensão de cisalhamento do <i>underflow</i>	109
Figura 4. 6 - Seção conceitual do deposito <i>dry stack</i>	118
Figura 4. 7 - Detalhes da seção conceitual do deposito <i>dry stack</i>	118
Figura 4. 8 - Planta do projeto conceitual do deposito <i>dry stack</i>	119
Figura 4. 9 - Resultado da análise de estabilidade.....	121
Figura 4. 10 - Representação de uma situação quando a zona úmida está no limite de ocupação, e não é gerado material para zona seca devido ao período chuvoso	124
Figura 4. 11 - Construção de aterro de emergência com 6 metros de altura em relação à crista do último dique de separação entre zona seca e zona úmida.....	125
Figura 4. 12 -Construção de um segundo aterro de emergência com 6 metros de altura em relação à crista do primeiro aterro de emergência.	126

Figura 4. 13 - Análise de estabilidade para montante para o aterro de emergência de 6 m de altura, apoiado sobre a zona úmida	127
Figura 4. 14 - Análise de estabilidade para jusante para o aterro de emergência de 6 m de altura, após incremento da zona úmida	127
Figura 4. 15 - Análise de estabilidade para montante para alteamento de mais 6 metros no aterro de emergência, apoiado sobre a zona úmida.....	128
Figura 4. 16 - Análise de estabilidade para jusante para alteamento de mais 6 metros no aterro de emergência, após incremento da zona úmida	128
Figura 4. 17 - Execução do ensaio de compressão não confinada	132
Gráfico 4. 1 - Resultado da curva de compactação média, que foi a referência nesse trabalho.	100
Gráfico 4. 2 - Resultados dos testes de tempo de sedimentação por tipo e concentração de floculantes.....	106
Gráfico 4. 3 - Gráficos com parâmetros totais e efetivos obtidos para diferentes umidades do rejeito compactado.....	114
Gráfico 4. 4 -Hietograma de precipitação mínima, média e máxima mensal. Fonte: Relatório interno do empreendimento	117
Gráfico 4. 5 -Ensaio de compressão axial não confinada com as variações no teor de cimento	134
Gráfico 4. 6 - Evolução da média das resistências a compressão axial não confinada para mistura 1a:6,8r mais 4% de cimento em função ao tempo de descanso antes da compactação. Teor de umidade de 29,9%.....	137
Gráfico 4. 7 - Média dos resultados da compressão axial não confinada para mistura 1a:6,8r mais 4% de cimento em relação à massa seca, com tempo de cura de 7 e 28 dias. Teor de umidade de 29,9%	138
Gráfico 4. 8 -Média dos resultados da compressão axial não confinada para misturas com 4% de cimento e 28 dias de cura, e com variação no teor de areia.....	140
Gráfico 4. 9 - Média dos resultados da compressão axial não confinada para misturas com diferente teor de areia e diferentes umidades de compactação, para 4% de cimento e 28 dias de cura.....	141
Gráfico 4. 10 - Teor de Sólidos (TS) vs Peso Específico Seco (γ_d) para polpa de rejeito, em que foi utilizada a linha de tendência para se obter o γ_d para o TS de 34,1%.....	148
Gráfico 4. 11 - Susceptibilidade a liquefação proposto por Seed at al (2003). O ponto vermelho representa o rejeito com LL = 55% e IP = 26%	155
Gráfico 4. 12 - Susceptibilidade a liquefação proposto por Bray e Sancio (2006). O ponto vermelho representa o rejeito compactado na umidade ótima de 31,4% (zona seca), e o ponto azul representa a compactação com 39,4% (limite para zona úmida).....	156
Gráfico A. 1 - Resultado da curva de compactação do primeiro ensaio	163
Gráfico A. 2 - Resultado da curva de compactação do segundo ensaio.....	163

Gráfico A. 3 - Resultado da curva de compactação do terceiro ensaio.....	164
Gráfico A. 4 - Resultado da curva de compactação da mistura 1a:6,8r	164
Gráfico A. 5 - Resultado da curva de compactação da mistura 1a:6,8r + 4% cimento.....	165
Gráfico A. 6 - Resultado da curva de compactação da mistura 1a:4,3r + 4% cimento.....	165
Gráfico B. 1 - Granulometria da Amostra 1 de areia.....	166
Gráfico B. 2 - Granulometria da Amostra 2 de areia.....	166
Gráfico C. 1 - Trajetória de tensões efetivas para o ensaio CID (Rejeito W% ótima + 6%) .	167
Gráfico C. 2 - Tensão x Deformação no ensaio CID (Rejeito W% ótima + 6%)	167
Gráfico C. 3 - Deformação axial x deformação volumétrica no ensaio CID (Rejeito W% ótima + 6%)	168
Gráfico C. 4 - Envoltória de Mohr-Coulomb no ensaio CID (Rejeito W% ótima + 6%).....	168
Gráfico C. 5 - Poropressão x deformação volumétrica no ensaio CID (Rejeito W% ótima + 6%)	169
Gráfico C. 6 - Trajetória de tensões totais para o ensaio CIU (Rejeito W% ótima + 6%).....	169
Gráfico C. 7 -Trajetória de tensões efetivas para o ensaio CIU (Rejeito W% ótima + 6%) ..	170
Gráfico C. 8 - Tensão x Deformação no ensaio CIU (Rejeito W% ótima + 6%)	170
Gráfico C. 9 - Envoltória de Mohr-Coulomb no ensaio CIU (Rejeito W% ótima + 6%).....	171
Gráfico C. 10 - Poropressão x deformação volumétrica no ensaio CIU (Rejeito W% ótima + 6%)	171
Gráfico C. 11 - Trajetória de tensões totais para o ensaio CIU (Rejeito W% ótima).....	172
Gráfico C. 12 - Trajetória de tensões efetivas para o ensaio CIU (Rejeito W% ótima).....	172
Gráfico C. 13 - Tensão x Deformação no ensaio CIU (Rejeito W% ótima).....	173
Gráfico C. 14 - Envoltória de Mohr-Coulomb no ensaio CIU (Rejeito W% ótima).....	173
Gráfico C. 15 - Poropressão x deformação volumétrica no ensaio CIU (Rejeito W% ótima)	174
Gráfico C. 16 - Trajetória de tensões totais para o ensaio CIU (Rejeito W% ótima + 4%)...	175
Gráfico C. 17 - Trajetória de tensões efetivas para o ensaio CIU (Rejeito W% ótima + 4%)	175
Gráfico C. 18 - Tensão x Deformação no ensaio CIU (Rejeito W% ótima + 4%)	176
Gráfico C. 19 - Envoltória de Mohr-Coulomb no ensaio CIU (Rejeito W% ótima + 4%)....	176
Gráfico C. 20 - Poropressão x deformação volumétrica no ensaio CIU (Rejeito W% ótima + 4%)	177
Gráfico D. 1 - Compressão axial não confinada para 1% de cimento na mistura 1a:6,8r. Teor de umidade de 30,8%.....	178

Gráfico D. 2 - Compressão axial não confinada para 2% de cimento na mistura 1a:6,8r. Teor de umidade de 30,5%.....	178
Gráfico D. 3 - Compressão axial não confinada para 4% de cimento na mistura 1a:6,8r. Teor de umidade de 29,9%.....	179
Gráfico D. 4 - Compressão axial não confinada para mistura 1a:6,8r sem adição de cimento. Teor de umidade de 31,14%.....	179
Gráfico D. 5 - Compressão axial não confinada para mistura 1a:6,8r mais 4% de cimento em relação à massa seca, sem tempo de descanso para compactação Teor de umidade de 29,9%.	180
Gráfico D. 6 - Compressão axial não confinada para mistura 1a:6,8r mais 4% de cimento em relação à massa seca, com tempo de descanso de 1 hora para compactação. Teor de umidade de 29,9%.....	180
Gráfico D. 7 - Compressão axial não confinada para mistura 1a:6,8r mais 4% de cimento em relação à massa seca, com tempo de descanso de 2 hora para compactação. Teor de umidade de 29,9%.....	181
Gráfico D. 8- Compressão axial não confinada para mistura 1a:6,8r mais 4% de cimento em relação à massa seca, com tempo de descanso de 4 hora para compactação. Teor de umidade de 29,9%.....	181
Gráfico D. 9 - Compressão axial não confinada para mistura 1a:6,8r mais 4% de cimento em relação à massa seca, com tempo de cura de 7 e 28 dias. Teor de umidade de 29,9%.	182
Gráfico D. 10 - Compressão axial não confinada para misturas com variação no teor de areia, com 4% de cimento e 28 dias de cura.	183
Gráfico D. 11 - Compressão axial não confinada para mistura 1:4,3 + 4% cimento (28 dias de cura), compactadas na umidade ótima (23,4%) e na umidade de campo (27,9%).....	184
Gráfico D. 12 - Compressão axial não confinada para mistura 1:6,8 + 4% cimento (28 dias de cura), compactadas na umidade ótima (27,4%) e na umidade de campo (29,9%).....	184
Gráfico D. 13 - Compressão axial não confinada para o rejeito compactado com umidades próximas da umidade ótima de compactação.....	185
Quadro 2. 1 - Variáveis que afetam a velocidade de filtragem relativas ao sólido, torta/filtrado, polpa e ao tipo de equipamento.....	51
Quadro 2. 2 - Mecanismos de filtragem e os principais fornecedores	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 - Histórico de teores de sólidos dragados do reservatório de rejeito diluído, entre 2017 e 2018	40
Tabela 2. 2 - Análise numérica: Variação do Teor de Sólidos (TS) após 34 dias de secagem	40
Tabela 2. 3 - Componentes básicos do cimento Portland.....	64
Tabela 3. 1 - Volumes da câmara do filtro prensa de laboratório	78
Tabela 3. 2 - Opções de pano de filtro.....	79
Tabela 3. 3 - Bateria de ensaios triaxiais para simulação da <i>dry stack</i>	87
Tabela 3. 4 - Variação dos ensaios de compressão axial não confinada	92
Tabela 4. 1 Médias mensais dos teores químicos.....	96
Tabela 4. 2 - Composição química do rejeito.....	96
Tabela 4. 3 - Médias mensais da granulometria do rejeito.....	97
Tabela 4. 4 - Granulometria do rejeito obtido por <i>cyclosize</i>	98
Tabela 4. 5 - Resultados de granulometria para comparativo	99
Tabela 4. 6 - Resumo da granulometria do rejeito	99
Tabela 4. 7 -Resumo da granulometria da areia	101
Tabela 4. 8 - Valores médios mensais de teor de sólidos produzidos no rejeito.....	102
Tabela 4. 9 - Quantidade de água para diluir o teor de sólidos da polpa com 7,3%	107
Tabela 4. 10 - Parâmetros e resultados do ensaio dinâmico de espessamento	109
Tabela 4. 11 - Diâmetro teórico do espessador e balanço de massa de água horário.....	111
Tabela 4. 12 - Resultados dos testes com filtro prensa.....	112
Tabela 4. 13 - Resultados dos ensaios triaxiais realizados	114
Tabela 4. 14 - Parâmetros geotécnicos das fundações.....	116
Tabela 4. 15 - Parâmetros geotécnicos considerados para análise	120
Tabela 4. 16 - Resultado da média dos teores de umidade obtidos para um depósito de areia	129
Tabela 4. 17 - Resultado das misturas de rejeito e areia.....	130

Tabela 4. 18 - Resultado das misturas de rejeito e areia.....	131
Tabela 4. 19 - Resultados dos ensaios para determinação do ganho de resistência na mistura tipo 1 (1:6,8) em função da variação do teor de cimento, para tempo de cura de 7 dias.	133
Tabela 4. 20 - Resultados dos ensaios para determinação do ganho de resistência na mistura (1a:6,8r) com 4% de cimento em função da variação de tempo de espera para compactação.	136
Tabela 4. 21 - Resultados dos ensaios para determinação da variação da resistência em função do tempo de cura, para 4% de cimento em relação a massa seca.....	138
Tabela 4. 22 - Resultados dos ensaios para determinação da variação da resistência em função da porcentagem de areia na mistura, para o tempo de cura de 28 dias.....	139
Tabela 4. 23 - Resultados dos ensaios para comparativo de resultados para misturas compactadas na umidade de campo e na umidade ótima, para 4% de cimento e 28 dias de cura	141
Tabela 4. 24 - Resultados dos ensaios realizados em rejeito puro compactado com umidades próximas da ótima de compactação.....	142
Tabela 4. 25 - Comparativo de resultados para os diferentes ensaios e materiais.....	143
Tabela 4. 26 - Variação da umidade da mistura em função da umidade da areia	144
Tabela 4. 27 - Variação da proporção da mistura em função da umidade da areia.....	145
Tabela 4. 28 - Consumo de areia e cimento para cada metro cúbico do aterro de emergência	147
Tabela 4. 29 - Premissas para o reservatório de secagem	149
Tabela 4. 30 - Premissas para o reservatório dry stack	150
Tabela 4. 31 - Valores obtidos para o reservatório de secagem	152
Tabela 4. 32 -Valores obtidos para o reservatório <i>dry stack</i>	153

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Considerações Iniciais	17
1.2 Objetivo.....	19
1.2.1 Objetivos específicos	20
2 ABORDAGEM TEÓRICA.....	21
2.1 Bauxita	21
2.1.1 Bauxita laterítica.....	21
2.1.2 Distribuição geográfica e estratigráfica das bauxitas.....	23
2.2 Processo de beneficiamento da bauxita	26
2.2.1 Beneficiamento no empreendimento de estudo.....	26
2.3 Formas de disposição de rejeitos finos.....	31
2.3.1 Barragens tradicionais	322
2.3.2 Operação de reservatórios de lançamento convencional	344
2.3.3. Operação de reservatório de secagem e armazenamento de polpa de rejeito.....	36
2.3.4 Reservatórios do empreendimento de estudo.....	37
2.3.5. Sistemas alternativos de disposição de sedimentos.....	40
2.3.5.1 Operação de depósito de disposição a seco (<i>dry stack</i>) de rejeito	46
2.4 Sistemas de filtragens de resíduos de mineração	49
2.4.1 Filtros à vácuo	53
2.4.2 Filtro prensa	57
2.4.2.1 Filtro prensa vertical	58
2.4.2.2 Filtro prensa horizontal.....	60
2.5 Mistura de Solo-Cimento	64
2.5.1 O cimento.....	64
2.5.2. Reações nas misturas solo-cimento	66
3 MATERIAIS E MÉTODOS	68
3.1 Materiais	68
3.1.1 Coleta de rejeito na planta de beneficiamento	69
3.1.2 Coleta de rejeito no reservatório de secagem.....	70

3.2. Metodologia	72
3.2.1 Eficiência do filtro prensa horizontal na transformação de lama de processo de mineração de bauxita.....	72
3.2.1.1 Caracterização da polpa de rejeito.....	72
3.2.1.2 Ensaio de espessamento	73
3.2.1.3 Ensaio de filtragem	76
3.2.2 Seção de projeto conceitual de depósito de rejeito de mineração de bauxita com disposição a seco.....	82
3.2.2.1 Teores de umidade do rejeito para simulações do depósito <i>dry stack</i>	82
3.2.2.2 Análise granulométrica e peso específico dos grãos	83
3.2.2.3 Limites de Atterberg.....	85
3.2.2.4 Ensaio de compactação	86
3.2.2.5 Definição do projeto conceitual de depósito <i>dry stack</i>	86
3.2.2.6 Determinação da envoltória de ruptura do depósito <i>dry stack</i>	87
3.2.3 Estabilização da zona úmida com aterro de emergência	88
3.2.3.1 Análise de estabilidade do aterro de emergência	89
3.2.3.2 Teores de umidade utilizados na mistura de rejeito com areia para simular condições de execução do plano de emergência	90
3.2.3.3 Porcentagens de areia na mistura com rejeito	91
3.2.3.4 Porcentagens de cimento na mistura para aterro de emergência	91
3.2.3.5 Ensaio de compressão não confinada.....	92
3.2.4 Análise comparativa entre um reservatório de polpa e um depósito do tipo <i>dry stack</i> para armazenamento de rejeito fino de bauxita	94
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	95
4.1. Caracterização dos materiais de estudo.....	95
4.1.1 Caracterização do rejeito de bauxita laterítica	95
4.1.1.1 Teores químicos.....	95
4.1.1.2 Granulometria.....	97
4.1.1.3 Limites de Atterberg.....	99
4.1.1.4 Densidade dos grãos do rejeito	99
4.1.1.5. Curva de compactação do rejeito	100
4.1.2. Caracterização da areia local.....	100
4.1.2.1. Granulometria da areia.....	101

4.1.3 Cimento utilizado.....	101
4.2 Resultados do ensaio de espessamento dinâmico	102
4.2.1 Resultados da determinação do tipo e teor de floculante.....	102
4.2.2 Resultados do teste de diluição ótima	106
4.2.3 Resultados dos testes dinâmicos de espessamento	107
4.3 Testes com filtro prensa horizontal.....	112
4.4 Resultados da seção de projeto do depósito dry stack.....	114
4.4.1 Parâmetros geotécnicos do rejeito de bauxita laterítica.....	114
4.4.2. Parâmetros geotécnicos da fundação	116
4.4.3 Seção de projeto conceitual do depósito de disposição a seco (dry stack)	116
4.4.4 Critérios construtivos do depósito de disposição a seco (<i>dry stack</i>).....	121
4.5 Resultados da definição da geometria do aterro de emergência	123
4.5.1 Parâmetros geotécnicos	123
4.5.2. Seção de projeto conceitual do aterro de emergência.....	124
4.5.3 Teor de umidade da areia	129
4.5.4 Porcentagem de areia na mistura com rejeito.....	130
4.5.5 Compressão axial não confinada	131
4.5.5.1 Variação da resistência em função do teor de cimento para mistura 1a:6,8r.	132
4.5.5.2 Variação da resistência em função do tempo de descanso da mistura antes da compactação	135
4.5.5.3 Variação da resistência em função do tempo de cura	137
4.5.5.4 Variação da resistência em função da porcentagem de areia na mistura	139
4.5.5.5 Variação da resistência em função dos parâmetros ótimos de compactação das misturas.....	140
4.5.5.6 Variação da resistência da mistura em comparação com o rejeito compactado na umidade ótima.....	142
4.5.5.7 Influência da umidade da areia nos resultados.....	143
4.5.6 Critérios construtivos do aterro de emergência.....	145
4.6 Análise comparativa entre depósito de disposição a seco e reservatório de rejeito adensado	147
4.6.1 Comparativo da capacidade de armazenamento de rejeito e tempo de formação dos depósitos.....	150
4.6.2 Comparativo quanto à operação dos depósitos.....	153

4.6.3. Comparativo quanto à segurança e impactos dos depósitos.....	154
5 CONCLUSÕES.....	157
REFERÊNCIAS	159
ANEXOS	163
ANEXO A – Resultados os ensaios de compactação	163
ANEXO B- Curvas granulométricas da areia	166
ANEXO C - Resultados gráficos dos ensaios triaxiais no rejeito compactado	167
ANEXO D - Resultados gráficos dos ensaios de compressão não confinada	178

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A utilização de recursos minerais foi fundamental para o desenvolvimento socioeconômico da humanidade ao longo da história, e ainda tem sido de grande importância estratégica no planejamento presente e futuro da sociedade. O início do fluxo produtivo de bens materiais essenciais para manutenção das atividades humanas se dá no processo extrativista de recursos minerais que, após transformados mediante processos tecnológicos, servem ao homem na forma de produtos úteis ao conforto e indispensáveis ao desenvolvimento.

A cadeia produtiva da mineração gera empregos diretos e indiretos para diversas áreas do conhecimento, assim como a produção dos inúmeros produtos que necessitam do minério como base material. Os municípios no entorno das minas se beneficiam economicamente através da geração de emprego, aumento da geração de recursos de impostos, aquecimento do comércio e, costumeiramente, da valorização imobiliária.

Do ferro ao ouro, do carvão ao urânio, é inevitável a relação de dependência do homem moderno com a mineração. Mas essa relação, quando balizada por princípios unicamente econômicos, pode desenvolver impactos negativos ao meio ambiente e ao próprio ser humano, conforme destacado por Viana (2012). A inevitável alteração do ambiente ocorrida em função da retirada da cobertura vegetal, e a movimentação de grandes volumes de solos, rochas e minérios, gera grande quantidade de sedimentos, e esse é comumente o impacto ambiental visual mais significativo na mineração. Quando descontrolada, a geração de sedimentos de mineração polui e assoreia rios e lagos, alterando fisicamente e quimicamente o meio ambiente.

Em verdade, entre outros recursos naturais, renováveis ou não, os bens minerais constituem um dos principais sustentáculos da prosperidade que caracteriza a sociedade atual. Entretanto, como toda moeda tem duas faces, assim também ocorre na indústria extrativista mineral (VIANA, 2012, p.32).

A maneira usual de se controlar o assoreamento de corpos hídricos, desencadeados pela geração de sedimentos da mineração, é através do gerenciamento logístico de barragens de controle de sedimentos, e também através da recuperação das áreas degradadas ou do controle da ação erosiva das águas nas faces dos taludes e demais estruturas da mina, reduzindo a erosão do terreno exposto às intempéries.

O aporte de sedimentos na mineração ocorre através da geração de rejeito do minério nas plantas de beneficiamento, ou através da erosão de taludes da mina, pilhas de estéreis, estradas de acesso e pátios de minério.

Nesse trabalho o foco é a disposição de rejeitos de mineração em barragens e depósitos, deixando de lado os estudos relativos à recuperação de áreas degradadas para controle de sedimentos. O modelo consagrado e amplamente utilizado no mundo para controle desses sedimentos são as tradicionais barragens de controle de sedimentos.

Nessas, um reservatório é dimensionado para o rejeito gerado, ou dimensionado para receber os sedimentos erosivos da área de mina e pilhas de minério e estéril. Nesse sistema é formado uma bacia de inundação na qual esses sedimentos vão decantando no fundo do reservatório, e a água acumulada vai saindo através de extravasores.

Essas barragens, muitas vezes, precisam alagar grandes áreas e, geralmente, possuem baixa, ou nenhuma, eficiência no controle da qualidade da água. Em decorrência disso os corpos hídricos a jusante sofrem alterações que podem ser negativamente significativas. Outro problema é o fato de que no caso de colapsos estruturais, um acidente com barragens possui grande potencial devastador, atingindo áreas que podem estar a centenas de quilômetros do reservatório, dependendo do tamanho do reservatório.

A crescente cobrança com a preservação do meio ambiente, reforçada com casos recentes de acidentes ambientais de grande repercussão, como os casos de rompimento de barragem em Mariana e Brumadinho, aumenta a preocupação das empresas de mineração em manter sua rotina produtiva dentro dos padrões exigíveis de segurança ambiental. Por isso, o estudo de alternativas técnicas que venham a contribuir com melhorias, no tocante a segurança estrutural e ambiental de reservatórios de acumulação de sedimentos, são de grande valia ao setor minerário.

Nesse contexto, dentre as alternativas tecnológicas disponíveis, vem sendo, aos poucos, implementado no setor minerário o sistema de Filtro Prensa (FP) como alternativa às tradicionais barragens de disposição de rejeitos de mineração. Nesse sistema a lama que seria acumulada em reservatórios (diques ou barragens) passa por um processo de filtragem e prensagem que separa a maior parte da água do material resultante desse processo. Desta maneira a polpa de água e sedimentos aumenta significativamente o teor de sólidos, permitindo que o material seja armazenado em depósitos construídos com equipamentos tradicionais de terraplenagem.

Essa tese é um estudo de caso de uma mineradora de bauxita laterítica, que, comprometida com o desenvolvimento tecnológico de suas operações, e buscando formas de

melhorar ainda mais o armazenamento seguro de sedimentos, permitiu e apoia a realização desse trabalho. Mas, por motivos de proteção estratégica de sua logística operacional e planos de desenvolvimento, o nome e localização do empreendimento não foram divulgados.

Nesse empreendimento de estudo, a forma de controlar os volumes de rejeito gerados na mineração de bauxita é através da construção de reservatórios para armazenar toda a polpa descartada da planta de beneficiamento. Essa polpa possui baixo teor de sólidos, em função da quantidade de água usada nos processos de lavagem e ciclonagem para separar o minério do rejeito. Por isso os reservatórios normalmente utilizados precisam ter espaço suficiente para armazenar essa polpa lançada na forma líquida (para somente depois ocorrer o adensamento mediante secagem), sendo necessário a ocupação de grandes áreas para suprir a demanda diária de rejeitos gerados.

O sistema de filtro prensa desponta como uma alternativa ao tradicional método de armazenamento de rejeitos, indicando, a princípio, maiores potenciais de segurança estrutural e ambiental. Esse método é um avanço para as atividades minerárias e os resultados acerca da eficiência de prensagem e segurança de depósitos ainda são pouco conhecidos no meio técnico. A extração de bauxita laterítica é a principal fonte mineral de alumínio do mundo. Portanto as conclusões desse trabalho, podem servir de referência para outras unidades minerárias de bauxita laterítica.

Espera-se verificar a hipótese de que o FP testado produza rejeito de bauxita laterítica com teor de umidade próximo da umidade ótima de compactação, e também verificar as vantagens do depósito *dry stack* num comparativo direto com as barragens de rejeito adensado utilizados na mineradora de estudo. Outra hipótese a ser verificada é a possibilidade de utilização de uma mistura de rejeito, areia e cimento como aterro de emergência a ser construído em períodos chuvosos no caso de desequilíbrio do balanço de massa do depósito *dry stack*, e também verificar as possibilidades de utilização dessa mistura como camada de base em vias de acesso na mineração.

1.2 Objetivo

Avaliar a técnica da construção de depósitos com disposição à seco (*dry stack*) de rejeito de bauxita laterítica, verificando as possibilidades construtivas de utilização desse rejeito como aterro de emergência necessário para estabilizar a zona úmida em períodos chuvosos.

1.2.1 Objetivos específicos

Nesse trabalho os objetivos específicos são:

- Avaliar o tratamento necessário a ser feito na polpa de rejeito de mineração de bauxita laterítica, para otimizar a eficiência do espessamento dessa polpa que deverá ser direcionada para um sistema de filtro prensa.
- Avaliar a eficiência de utilização de filtro prensa horizontal para a polpa espessada de rejeito de mineração de bauxita laterítica.
- Fazer um projeto conceitual do depósito *dry stack*, com vida útil de 10 anos, baseado nas informações de produção do empreendimento de estudo, e nas características do rejeito de bauxita laterítica.
- Incluir na seção de projeto conceitual do depósito *dry stack* o estudo de um aterro de emergência a ser utilizado para contornar situações problemáticas em função de possíveis desequilíbrios no balanço de massa planejado.
- Avaliar vantagens e desvantagens na implantação do sistema de disposição de rejeito à seco (*dry stack*) no comparativo técnico com os usuais reservatórios de rejeito adensado de bauxita laterítica.

2 ABORDAGEM TEÓRICA

Apresenta-se aqui as revisões da literatura de assuntos necessários para uma conceituação teórica acerca do trabalho de tese. Conforme descrito nos objetivos do trabalho, a pesquisa visa definir a viabilidade técnica da implantação de um sistema de filtro prensa para controle de rejeitos de mineração de bauxita laterítica. Portanto, nesse capítulo apresentam-se abordagens teóricas sobre os conceitos de mineração de bauxita, formas de disposição de rejeito fino, tipos de filtros de deságue de rejeito em polpa, e estabilização estrutural por misturas de solo-cimento.

2.1 Bauxita

A bauxita é utilizada na fabricação de alumínio metal e ligas metálicas associadas a elementos como cobre e titânio. Cerca de 94% da produção mundial de bauxita é absorvida pela produção de alumínio, e paralelo a isso existem outras utilizações da bauxita como a fabricação de abrasivos, produtos químicos, materiais refratários e cimentos aluminosos (KOTSCHOUBEY, 1988).

O alumínio metal tem grande utilização na indústria elétrica, construção de veículos, indústria naval e aeroespacial. Na construção civil sua utilização compete igualmente com o ferro e a madeira. Também possui amplas aplicações no domínio de embalagens (competindo com aço, vidro, papel e plástico), e aplicações nos bens de consumo duráveis (utensílios e aparelhos variados) e equipamentos agrícolas e industriais (KOTSCHOUBEY, 1988).

Desde o início do século passado a produção mundial do alumínio teve grande ascensão, passando de aproximadamente 1 milhão de toneladas em 1917 para 88 milhões de toneladas em 1979 (RAMOS, 1982). Em 2018 a produção de bauxita foi estimada em 342 milhões de toneladas.

2.1.1 Bauxita laterítica

Segundo Kotschoubey (1988), a classificação de depósitos de bauxita é algo muito discutido desde os anos 20, e ainda não se chegou a um consenso sobre os critérios a serem adotados na distinção entre os diferentes tipos de ocorrências. Em 1926, Harrassowitz propôs dois grupos fundamentais: as bauxitas sobre rochas carbonáticas e as bauxitas sobre rochas

silicáticas. Em 1951, Vadasz, que deu ênfase à carstificação na formação de depósitos, introduziu a terminologia “bauxita laterítica” e “bauxita de carst”. Kotschoubey (1988) afirma que diversos autores usaram diferentes critérios para classificação de depósitos, como a geomorfologia (Hose, 1960), o tipo de substrato ou *bedrock* (Valeton, 1972), a forma dos corpos mineralizados e as suas relações com as rochas associadas/encaixantes (Patterson, 1967), ou a altitude na qual ocorreu a bauxitização (Grubb, 1971). Bushinsky (1971) e Sapozhnikov (1975) classificaram os depósitos com base em fatores genéticos.

O antigo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), atual Agência Nacional de Mineração (ANM) na publicação dos Principais Depósitos Mineraiis do Brasil (1988) adotou a classificação de depósitos definidos por Bardossy (1982), pois os autores consideraram sendo mais clara por não considerar o ambiente tectônico na formação. Bardossy (1982) dividiu a classificação em dois grupos fundamentais, os depósitos sobre rochas carbonáticas e os depósitos sobre rochas alumino-silicáticas, sendo esse último tipo subdividido em depósitos lateríticos e depósitos sedimentares. Kotschoubey (1988) esclarece que os três tipos de classificações adotadas pelo DNPM (atual ANM) podem ocorrer simultaneamente através de associações em diferentes regiões do mundo, e que outras classificações possíveis dos depósitos de bauxita devem ser consideradas sem rigor excessivo, em virtude da grande variedade de pontos de vista pelos quais estas formações podem ser analisadas.

A bauxita laterítica é encontrada em depósitos gerados diretamente por ações intempétricas em condições tropicais úmidas de rochas alumino-silicáticas, e preservados *in situ*. De acordo com Kotschoubey (1988) as alterações geoquímicas podem ser simples ou polifásicas envolvendo além da ferralitização e a aluminização, o retrabalhamento mecânico (transporte dentro dos limites do depósito) dos produtos da fragmentação física ou química. Nos casos de maior complexidade, várias fases de alteração química podem ter se alternado com as fases de desmantelamento da crosta laterítica, ou de deposição de sedimentos.

Para Bardossy (1982), cerca de 96% das bauxitas lateríticas encontram-se nas plataformas continentais, enquanto 3% ocorrem em zonas orogênicas. Isso porque a gênese e a preservação de tais depósitos exigiu estabilidade crustal com rebaixamento muito lento do nível da base. A evolução desses depósitos foi controlada, principalmente, pelo clima local e condições de drenagem. A maioria desses depósitos formou-se sobre vastas superfícies aplainadas após longo tempo de exposição ao intemperismo. A formação de depósitos bauxíticos em regiões acidentadas ocorrem em condições climáticas excepcionais atuando sobre rochas de composição química particularmente favorável.

A composição mineralógica é variável em decorrência da idade da bauxita, sendo que nos depósitos mais recentes o minério é essencialmente gibbsítico, com eventual presença de boemita subordinada a áreas restritas, como zonas coluvionares e margens de platôs. Já nos depósitos antigos a boemita é mais abundante, podendo ser em alguns casos o único hidróxido de alumínio presente. A caolinita e a haloisita são os argilominerais mais comuns, e a goethita, hematita, maghemita e a magnetita reliquiar são os minerais de ferro comuns nos depósitos lateríticos. O titânio ocorre principalmente sob a forma de anatásio, sendo menos frequentes o rutilo e a titanomagnetita. Em bauxitas formadas a partir de sedimentos areno-argilosos ou rochas ígneas ou metamórficas de composição ácida, encontra-se em quantidades pequenas grãos de quartzo reliquiares. Em situações em que a bauxita é recoberta por materiais de origem orgânica (lignito e carvão), condições redutoras formam siderita e pirita que podem cristalizar fissuras preenchidas ou aparecer na forma de concreções. Minerais do grupo da caolinita, e pontualmente a chamosita e clorita, podem resultar de processos de silificação secundária da bauxita (KOTSCHOUBEY, 1988).

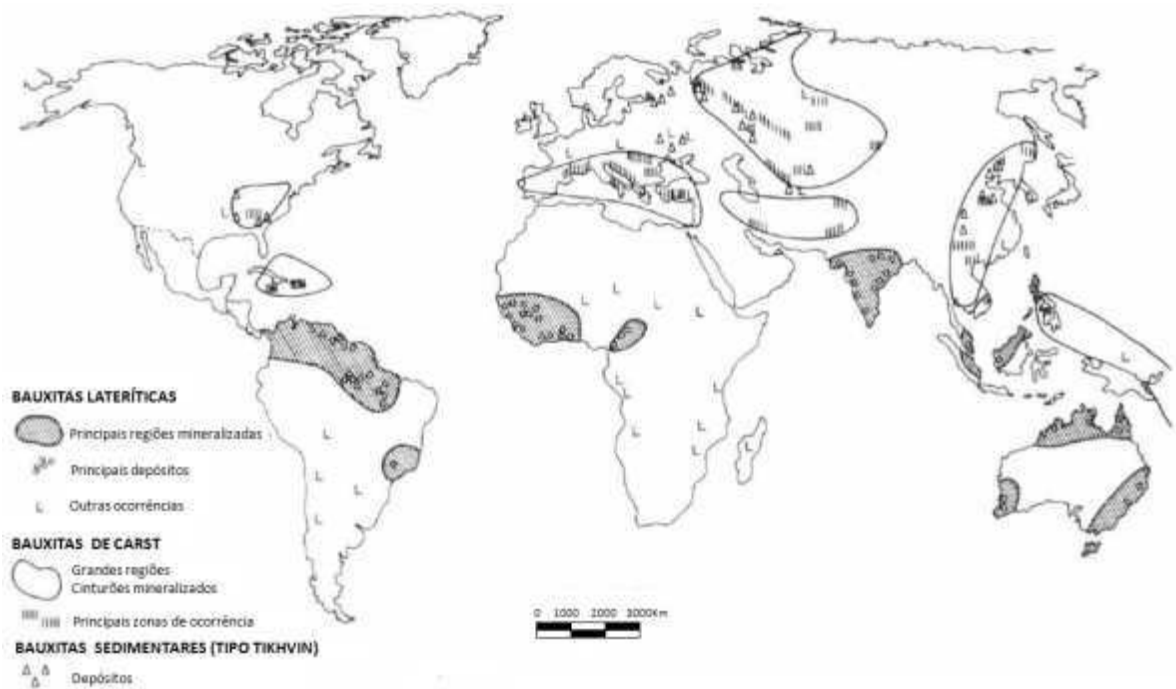
Conforme descrito por Kotschoubey (1988), a rocha matriz tem grande influência na composição química da bauxita, assim como o horizonte considerado e os fenômenos epigenéticos. A bauxita boemítica é mais rica em alumínio que a gibbsita, e em rochas máficas as bauxitas são mais ricas em ferro, exceto quando ocorre, em condições ácidas e/ou redutoras, a lixiviação epigenética do ferro.

2.1.2 Distribuição geográfica e estratigráfica das bauxitas

As variações climáticas globais e regionais são importantes na distribuição temporal dos depósitos, e claramente houve períodos específicos que favoreceram a gênese da bauxita, podendo-se citar o Carbonífero, o Cretáceo, o Eoceno e o Mioplioceno, conforme descrito por Mc Farlene (1982). Mas como ação também influente no atual quadro observado, tem-se a ação do transporte erosivo ao longo do tempo geológico. Desta forma, muitos depósitos antigos, que por consequência, sofreram mais tempo de ação erosiva, acabaram perdendo volumes praticamente impossíveis de se avaliar. São exemplos os depósitos ocorridos no Paleozóico que foram subtraídos sem deixar sinais, e em menor escala os depósitos do Mesozóico. Outro fator relevante no fluxo temporal da gênese da bauxita pode ser observado no intervalo do Proterozóico até o Neogeno em função do provável aumento progressivo das atividades biológicas e microbiológicas (MC FARLENE, 1982).

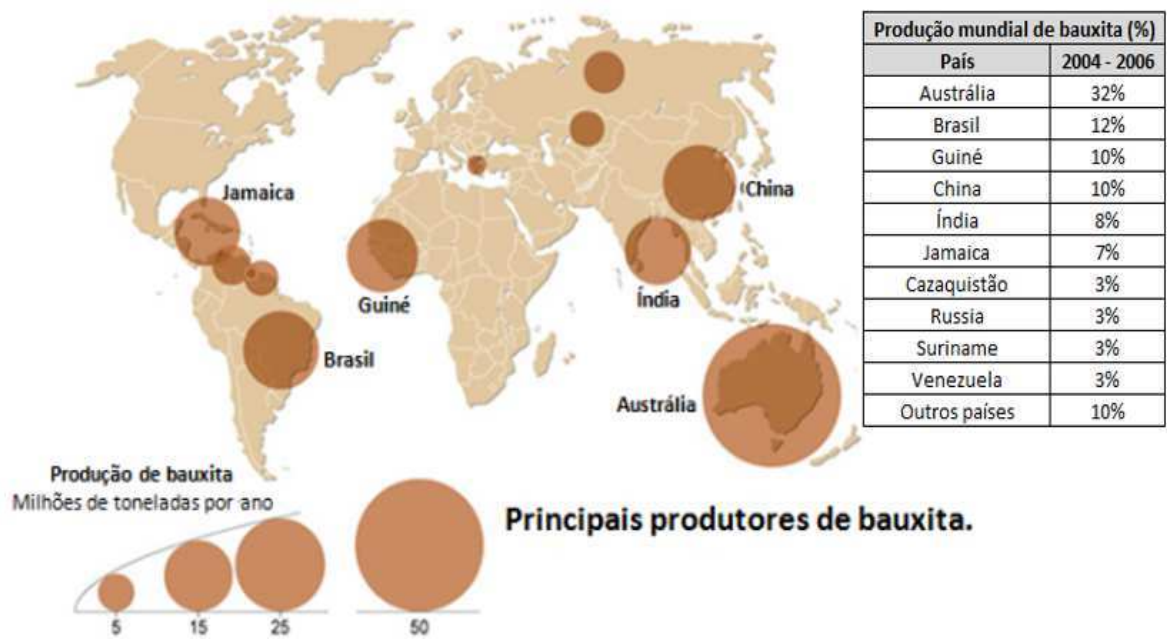
Na Figura 2.1, apresenta-se a distribuição dos depósitos de bauxita pelo globo. Relativo aos depósitos de bauxita laterítica, pode-se mencionar que esses se encontram quase que unicamente na faixa intertropical, constituindo as jazidas mais ricas e produtivas do mundo. Já as formações sobre rochas carbonáticas se localizam em grande parte fora da faixa intertropical (Kotschoubey, 1988). Os depósitos de bauxita sedimentar sobre substratos alumino-silicáticos, na sua forma mais típica, são encontrados essencialmente na Rússia e na China, com ocorrências menos significativas nos Estados Unidos e nas Coreias, sendo que no geral esse tipo de formação representa uma fração modesta das reservas mundiais (Bardossy, 1982). Na Figura 2.2 é apresentada uma estimativa da produção anual de bauxita no mundo.

Figura 2. 1 - Distribuição mundial dos depósitos de bauxita



Fonte: Adaptado por Bardossy, 1982, p. 4.

Figura 2. 2 - Produção mundial de bauxita



Fonte: Adaptado da US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 2006, p. 8.

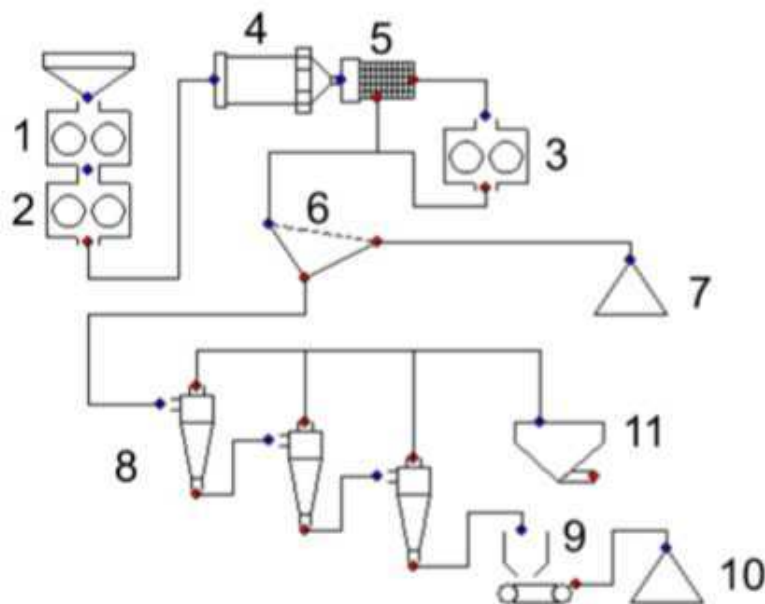
2.2 Processo de beneficiamento da bauxita

Nas minas de bauxita do Brasil o material lavrado é transportado para as plantas de beneficiamento onde no final do processo é realizada a separação do produto mineral e o rejeito. O processo de beneficiamento se inicia com as etapas de britagem, que são normalmente divididas em primária e secundária, podendo em alguns casos chegar na etapa de britagem terciária. O material britado, após passar por *scrubbers* ou tambores de lavagem, entra nas etapas de peneiramento que faz a separação do produto grosseiro (minério de bauxita beneficiada pronta para estoque) do produto fino que continua no processo de ciclonagem (que faz a separação do minério do rejeito), ou será descartado como rejeito.

2.2.1 Beneficiamento no empreendimento de estudo

A mina de bauxita laterítica objeto desse estudo possui um processo de beneficiamento cujas etapas seguem o fluxograma (Figura 2.3) descrito por Deursen (2016). Em que nessa figura estão ilustrados os britadores primário (1), secundário (2) e terciário (3), o *scrubber* (4) e respectivo *trommel* (5), a etapa de peneiramento (6), o produto grosseiro (7), a etapa de ciclonagem (8) e filtragem (9), e o produto fino (10). Já o *overflow* (11) dos ciclones segue para o sistema de rejeito.

Figura 2.3 - Fluxograma do beneficiamento de bauxita laterítica representativo do empreendimento estudado



Fonte: Deursen, 2016, 26.

Os objetivos de cada equipamento citado estão descritos a seguir:

- **Britador primário e secundário:** Através de ação mecânica, esses equipamentos tem a função de fragmentar blocos de bauxita (rocha alterada), facilitando o transporte do mineral pelas correias transportadoras que direcionam para o *scrubber*. O britador primário tritura o material que chega diretamente da mina, formando fragmentos de aproximadamente 20 cm de diâmetro. O britador secundário recebe esses fragmentos e os tritura formando fragmentos de 10 cm aproximadamente.

- **Britador terciário:** Tritura mecanicamente a bauxita, formando fragmentos de diâmetro máximo de 5 cm. Esse equipamento recebe os fragmentos maiores que o *scrubber* não conseguiu desagregar, e o *trommel* não liberou para a etapa de peneiramento.

- **Scrubber:** Objetiva desagregar os torroes de minério e argila, através de lavagem e fricção, fazendo com que as argilas sejam removidas por ficarem em suspensão na fase líquida. A ação do *scrubber* é dar mobilidade entre a argila e os fragmentos mais grosseiros ricos em gibbsita, de forma que estes possam ser separados nas operações seguintes (peneiramento ou ciclonagem).

- **Trommel:** Com um sistema rotativo de seleção granulométrica, que direciona para o britador terciário os fragmentos maiores passaram na malha direcionada para o processo de peneiramento.

- **Peneiras:** Através de agitação e lavagem, faz a separação do produto mineral grosseiro (cerca de 1/4 polegadas) do material fino que será direcionado para o processo de ciclonagem.

- **Ciclones:** Tem o objetivo de separar os argilominerais das frações mais finas de bauxita, tendo condições de lidar com grandes volumes de polpa. Diferente do processo de peneiramento, que usam barreiras físicas para separar os diferentes tamanhos de grãos, os ciclones utilizam a força centrífuga gerada pela rotação que separa as diferentes granulometrias em função das diferentes massas. As partículas grossas perto do núcleo são empurradas para fora, enquanto partículas finas perto da parede são forçadas em direção ao centro.

- **Filtros:** Tem a função de fazer o deságue da polpa de minério com fração mais fina, direcionando a água para a saída de polpa de rejeito (*overflow* dos ciclones), e o minério desaguado para a pilha de armazenagem.

Na Figura 2.4 são ilustrados os britadores utilizados. De acordo com Deursen (2016) após a britagem secundária a bauxita é transportada por correia até o prédio de beneficiamento (Figura 2.5) e lançada em um dos nove silos que alimentam um *scrubber* onde a bauxita é desagregada com adição de água. E na saída do *scrubber* há um *trommel*, ilustrado na Figura 2.6.

Figura 2. 4 -Britagem e transporte da bauxita



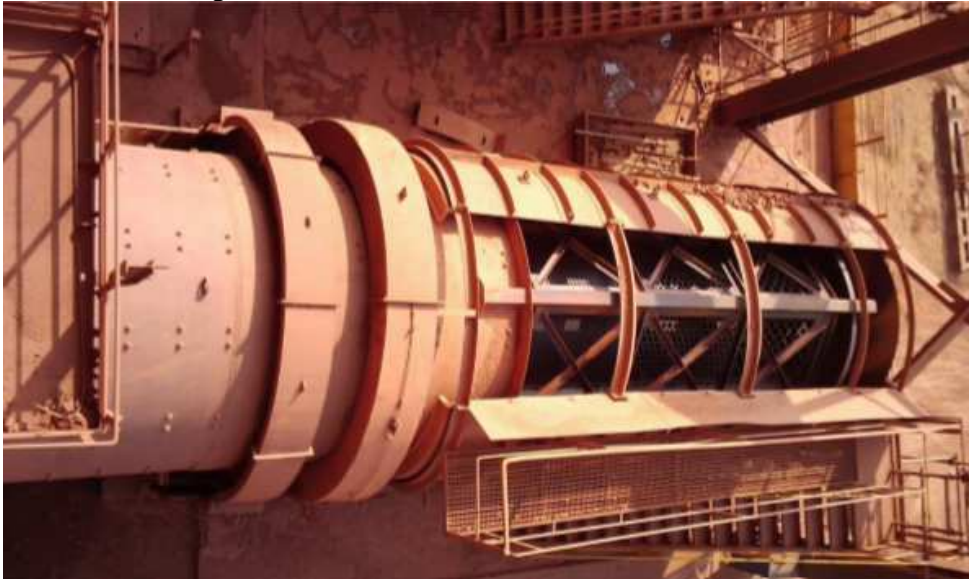
Fonte: Deursen, 2016, p. 24.

Figura 2. 5 - Planta de beneficiamento de bauxita



Fonte: Deursen, 2016,p.24.

Figura 2. 6 - Tambor lavador (*scrubber*) e *trommel*.



Fonte: Deursen, 2016, p.24.

Deursen (2016) também cita que a fração retida no *trommel* é encaminhada para britagem terciária enquanto que a fração passante, junto com o produto da britagem, é encaminhada ao peneiramento, sendo que o material retido no peneiramento já é o produto do beneficiamento (Figura 2.7). Além disso, a fração passante no peneiramento entra na etapa de ciclonagem, em que a fração mais fina da bauxita é separada dos argilominerais e desaguada em filtros correia (Figura 2.8).

Figura 2. 7 -Bauxita lavada grosseira



Fonte: Deursen, 2016, p.25.

Figura 2. 8 Bauxita lavada fina



Fonte: Deursen, 2016, p. 26.

No final do processo, a polpa contendo o rejeito da bauxita é disposta em reservatórios de secagem, conforme apresentado no item 2.3.1.3 - Reservatórios do empreendimento de estudo.

2.3 Formas de disposição de rejeitos finos

As atividades de mineração envolvendo escavações, aberturas de estradas e construção de pilhas de estéril e minério aumentam as dimensões de áreas expostas sem cobertura vegetal dentro do empreendimento, e favorecem o desenvolvimento de processos erosivos e seus consequentes impactos. Além desses sedimentos transportados pela erosão, impulsionada principalmente pelas chuvas, faz parte das operações minerárias de beneficiamento de bauxita a geração de sedimentos oriundos do descarte no processo. Essa massa sedimentar é chamada de rejeito de mineração.

Nesse trabalho se discute o rejeito fino de mineração de bauxita laterítica, e formas de controle. É fundamental ressaltar a crescente dificuldade de armazenamento de rejeitos de mineração. Guimarães (2011), em seu trabalho de deságue de rejeito de minério de ferro, menciona tais dificuldades:

O aumento do volume de rejeitos gerados nas atividades mineradoras, impulsionado pela exploração crescente de jazidas com mais baixo teor metálico, tem acentuado a necessidade de barragens cada vez maiores para a contenção dos rejeitos. (GUIMARÃES, 2011, p. 8).

As tradicionais barragens de disposição de rejeitos são as estruturas que frequentemente são utilizadas para armazenar os rejeitos de beneficiamento de minério na forma de lama. Estas estruturas, portanto, estão operando na maioria dos empreendimentos minerários, e são atualmente planejadas para a maioria dos projetos de disposição de sedimentos. Entretanto os históricos de acidentes ambientais envolvendo esse tipo de estruturas, o rigor da legislação ambiental, e a crescente pressão da opinião pública, fez aumentar nas últimas décadas a preocupação do setor minerário em buscar alternativas que minimizem os impactos ambientais, conforme descrito a seguir por CASTILHO (2017).

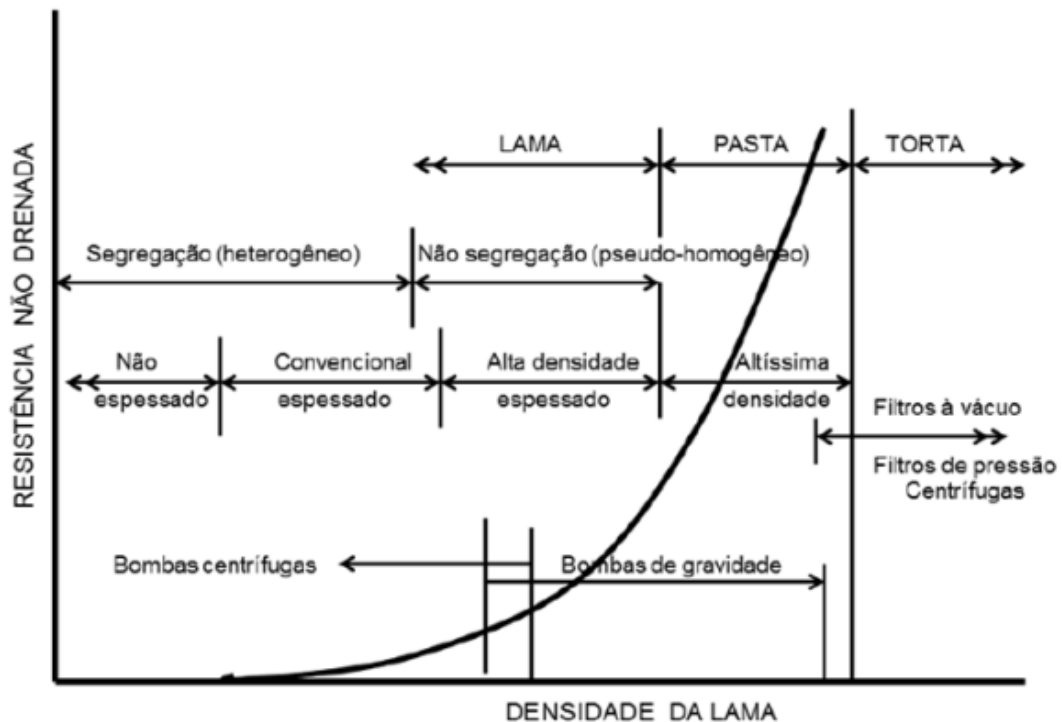
O objetivo final de uma mineração é extrair, produzir e vender um bem mineral de interesse econômico, respeitando as leis vigentes e minimizando os impactos sócio-ambientais. É justamente na esfera sócio-ambiental que se encontram hoje alguns dos maiores desafios a uma empresa de mineração (CASTILHO, 2017, p. 15).

À luz dessa questão, com os avanços na tecnologia de desaguamento nas últimas décadas, a lama passou a ser apenas mais um dos possíveis estados do rejeito (DAVIES, 2011). Conforme descrito por Nery (2013), os rejeitos também podem ser dispostos na forma de polpa

de alta densidade (teor de sólidos entre 57% e 68%), pastas minerais (com teor de sólidos entre 60% e 70%), ou tortas (teor de sólidos entre 75% e 85%).

Diferentes densidades que um rejeito fino pode apresentar podem ser visualizadas na Figura 2.9. Nesse gráfico, idealizado pela ICOLD (*International Commission on Large Dams*) em 2002, apresenta-se uma relação idealizada entre densidade e resistência não drenada, em que verifica-se que quanto mais denso for o material maior é sua resistência, sendo essa, portanto, inversamente proporcional ao índice de vazios. No mesmo gráfico também são apresentados os diferentes meios de transporte da lama (bombas de gravidade ou centrífugas) selecionados de acordo com a consistência, e também a utilização de filtros a vácuo e centrífugas, utilizados para densificação do rejeito fino.

Figura 2. 9- Densidade de lama versus resistência não drenada



Fonte: Adaptado de ICOL, 2002, p.6.

2.3.1 Barragens tradicionais

Na mineração, no tocante ao controle de rejeitos, as barragens tradicionais são estruturas construídas com a finalidade de formar reservatórios que contenham o aporte dos rejeitos, gerados no processo de beneficiamento do minério. É dado aqui o adjetivo de

“tradicional”, pois tais estruturas são os sistemas usualmente utilizados na mineração para controle dos impactos ambientais na geração de rejeitos e demais sedimentos de mina.

Tais reservatórios podem ser construídos através da escavação de terreno favorável à isso (método menos usual), ou através da construção de barragens em locais onde é favorável a formação de lagos de acumulação do rejeito. Castilho (2017) destaca que nesses tipos de reservatórios ocorre a separação de fases do rejeito com a sedimentação do material sólido que se acumula no fundo, resultando num sobrenadante aquoso que pode ser recirculado para a fábrica.

Tais barragens de rejeitos, começaram a ser usadas no Brasil há cerca de 300 anos atrás, na Mina da Passagem, em Mariana (MG), antes da corrida do ouro (Ávila, 2012). Porém, barragens antigas, a exemplo daquelas do início do século XIX, eram construídas transversalmente aos cursos d'água sem o uso de técnicas apuradas de engenharia e, por isso, eram pouco estáveis na ocorrência de chuvas mais fortes. Conforme mencionado por Mello e Piassentin (2011), somente a partir da década de 40, com a utilização de técnicas de compactação e a maior facilidade de utilização de equipamentos de terraplanagem em minas a céu aberto, é que se tornou possível a construção de barragens de rejeito com maior grau de segurança.

É usual que os reservatórios de disposição de rejeitos sejam formados inicialmente por um dique de partida, e ao longo do tempo de operação da mina são realizadas obras de alteamento para atender ao planejamento de projeto. Tais alteamentos podem ocorrer através de três métodos distintos: Alteamento de jusante, alteamento de montante, e alteamento de linha de centro. A Figura 2.10 apresenta detalhes esquemáticos dos três métodos de alteamento. Sendo que:

- a) **Alteamento de jusante:** É o método que oferece maior segurança estrutural, pois não existe a necessidade dos aterros dos alteamentos ficarem sobre a massa de rejeito e, também a carga sobre o dique de partida é menor, gerando com isso menores riscos de deformações ou rupturas no aterro pré-existente. Além disso, esse método possibilita uma maior facilidade de construção do sistema de drenagem interna, permitindo bom controle da linha de saturação na estrutura. Entretanto, esse método exige maiores volumes de aterro, maior área impactada na construção e, portanto, maiores custos.
- b) **Alteamento de linha de centro:** Nesse método é necessário menor volume de aterro, o que o torna mais econômico num comparativo com o método de alteamento de jusante. Também permite boas condições para construção dos drenos internos. Porém, em função da carga dos alteamentos se concentrar diretamente sobre o dique de partida,

podem ocorrer maiores riscos de deformações e fissuras nessa estrutura, podendo ocasionar erosões internas (*piping*) que podem desenvolver processos de ruptura.

- c) **Alteamento de montante:** É o método mais rápido e barato de ser executado. Entretanto é o que envolve maiores riscos de ruptura devido à alta concentração de carga sobre o rejeito existente no reservatório. Existem, nesse método, maiores dificuldades de construção de um sistema de drenagem interna que controle com eficiência os níveis de saturação do aterro. Em função dessas problemáticas o fator de segurança estrutural tende a ser menor e, por isso, a elevação dos alteamentos tende a ser limitada.

Figura 2. 10 - Métodos de alteamento de barragem



Fonte: Adaptado por Lima, 2006, p.21.

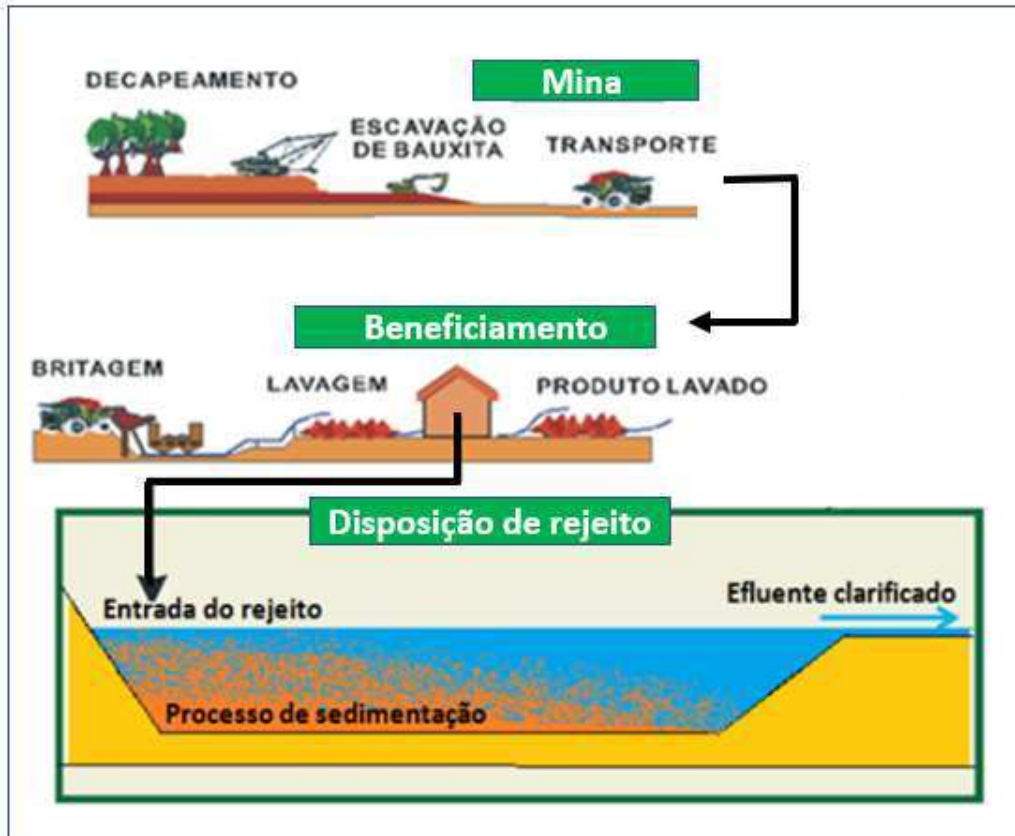
2.3.2 Operação de reservatórios de lançamento convencional

Reservatórios de lançamento convencional operam segundo o método de lançamento contínuo, ou seja, o rejeito é lançado ininterruptamente e, por isso, precisam ser dimensionados para atender grandes volumes. Como o lançamento é ininterrupto, existe a necessidade de uso contínuo de sistemas extravasores e, em função da capacidade de armazenamento, o efluente pode sair diariamente do sistema. Por isso, para atender as exigências sobre o controle de qualidade do efluente, nesse tipo de reservatório exige-se maiores trabalhos de tratamento diário do efluente.

Para rejeitos considerados inertes, como é o caso da mineradora de bauxita laterítica na qual desenvolveu-se o presente estudo, o tratamento sobre o efluente consiste principalmente na redução de turbidez e teores de sólidos para limites aceitáveis pela legislação. Isso pode ser feito adicionando floculantes para acelerar a sedimentação dentro do reservatório, ou em estruturas auxiliares a jusante desse. O mais convencional é deixar os sistemas de extravasores

numa extremidade oposta ao ponto de lançamento de polpa, para que ao longo do percurso os sólidos sejam sedimentados, e a água clarificada saia pelo extravasor (ver Figura 2.11 como exemplo). O transporte do rejeito se dá por bombeamento direto da planta de lavagem para o reservatório.

Figura 2. 11 - Exemplo esquemático do sistema de armazenamento de rejeito com reservatórios de lançamento contínuo, dimensionado para clarificar o efluente em função do tempo de sedimentação



Fonte: O autor.

Nesse método de disposição os rejeitos são encontrados na forma de lama fluida, possuindo teores de sólidos variando de 20% à 25% (conforme indicado por Lima, 2006). Entretanto, para rejeitos de granulometria muito fina, em que é utilizada a centrifugação para separação de minério de bauxita e rejeito, os valores mínimos do teor de sólidos podem chegar a 5%. Devido à esses baixos valores nos teores de sólidos, esse também é conhecido como método úmido, no qual o transporte do rejeito pode ser realizado por bombeamento ou por gravidade. Para esses baixos teores de sólidos é indicado que na operação do reservatório sejam realizados ciclos de enchimento e secagem, conforme apresentado no detalhamento da estrutura a seguir.

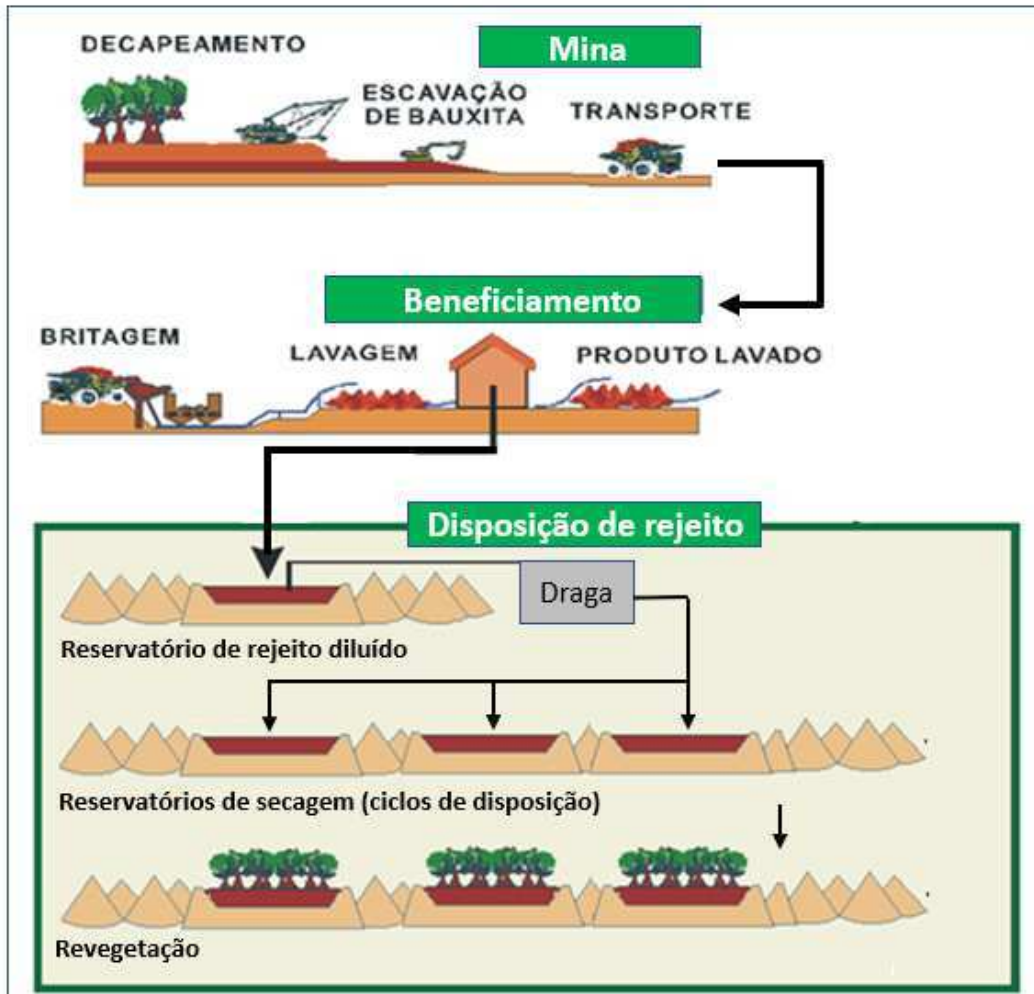
2.3.3. Operação de reservatório de secagem e armazenamento de polpa de rejeito

Esses reservatórios são também chamados de reservatório de rejeito adensado. Consistem numa estrutura dimensionada para receber rejeito na forma de polpa líquida para fazer ciclos de enchimento e secagem. Assim, o reservatório vai sendo preenchido de forma gradual, enchendo aos poucos e deixando evaporar a água até que reste uma torta de rejeito com elevados teores de sólidos. Depois o reservatório novamente recebe o lançamento de polpa gradualmente, até que se interrompa o enchimento e o novo volume de polpa é deixado para secar. O ciclo se repete até que a capacidade de armazenamento do reservatório seja alcançada.

Geralmente esse tipo de reservatório está associado a outras estruturas para que o processo de aumento do teor de sólidos por evaporação se dê de forma eficiente. Uma estrutura auxiliar, comumente utilizada quando a polpa possui muito baixo teor de sólidos, são os reservatórios de rejeito diluído. Esses recebem a polpa líquida de rejeito, que sai diretamente da planta de lavagem da bauxita, e possuem volume de armazenamento calculado, de modo que os sólidos, por sedimentação, se acumulem no fundo, formando uma polpa de maior densidade. Então, com o uso de dragas e sistemas de bombeamento, essa polpa densificada é transportada para a disposição final nos reservatórios de secagem. Essa é uma maneira de se reduzir o tempo de secagem para que se atinja uma torta com altos teores de sólidos.

Porém, nesse tipo de sistema de armazenamento de rejeito, é necessário a operação conjunta de outros reservatórios de rejeito adensado, para que, enquanto um recebe o rejeito dragado do fundo do reservatório de rejeito diluído, um ou mais reservatórios de secagem entram na fase de evaporação do rejeito armazenado. Um exemplo esquemático desse tipo de sistema pode ser visto na Figura 2.12.

Figura 2. 12 - Exemplo esquemático do sistema de armazenamento de rejeito com reservatórios de secagem.



Fonte: O autor.

Nesse tipo de sistema os extravasores são construídos com placas moveis (*stop logs*) para controlar as alturas das camadas para secagem.

2.3.4 Reservatórios do empreendimento de estudo

O empreendimento mineralógico estudado opera com reservatórios de secagem e armazenamento de rejeito, conforme apresentado no item anterior, e seguindo as orientações de projeto:

- Disposição de rejeito em ciclos de lançamento (enchimento) e secagem (período de espera).
- Lançamento de rejeito em camadas de 0,50 m de espessura.

- Lançamento com rodízio entre reservatórios de disposição final, de maneira a promover a secagem.
- Tempo de secagem de 30 dias.
- Paredes do reservatório construídos com estéril de mina (argila amarela).

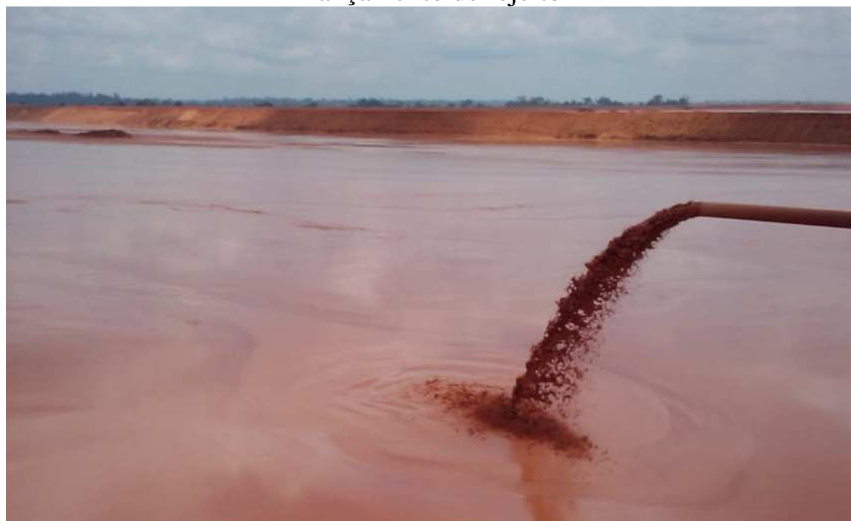
As paredes dos reservatórios eram construídas diretamente sobre as pilhas de estéril de mina, depositadas sobre o fundo de áreas de mineração desativadas. Mas a partir de 2018, todo estéril sob o offset das paredes dos reservatórios de secagem passou a ser retirado, e por isso as paredes desses estão sendo construídas diretamente sobre o fundo de mina.

O material denominado pilha de estéril, é formado basicamente por argila amarela que foi retirada sobre o corpo mineralizado de bauxita e depositado sobre o fundo de mina exaurida. Eventualmente, nesses depósitos de estéril encontram-se misturados com porções de laterita, argila variegada, solo orgânico e material vegetal em decomposição. Mas para os fins deste trabalho, a camada de estéril foi considerada formada apenas pela argila amarela.

A camada de argila variegada é a camada que ocorre abaixo da camada mineralizada de bauxita, portando, nas minas exauridas, essa camada passa a ser superficial e atua como fundação dos depósitos de estéril.

O rejeito gerado no processo de beneficiamento da bauxita laterítica é enviado da planta de lavagem para o reservatório de rejeito diluído, que tem cerca de 100 ha de área útil. O teor de sólidos lançado é da ordem de 7,3% e a geração anual de rejeito é estimada em 29.557.520,5 t/ano de polpa. Nesse reservatório o rejeito sedimenta, acumulando no fundo. Desta forma, são operadas dragas que bombeiam o rejeito sedimentado para os reservatórios de secagem de rejeito. O transporte dessa polpa se dá através de tubulações de 24", que faz a distribuição nos reservatórios. A Figura 2.13 apresenta um dos reservatórios do empreendimento.

Figura 2. 13 - Reservatório de rejeito do empreendimento de estudo, com detalhe do espigote de lançamento de rejeito



Fonte: Deursen, 2016, p.27.

É válido mencionar que esse sistema de disposição de rejeito foi projetado considerando que o bombeamento do rejeito para os reservatórios de secagem, ocorresse com teor de sólidos igual a 40% e seguindo especificações de altura de camada e tempo de secagem, supracitados, de tal forma que ao fim do período sem lançamento o teor de sólidos final alcance 80%.

Porém, conforme levantamento de dados realizados no empreendimento (Tabela 2.1) a média do teor de sólidos da polpa de rejeito dragada, entre janeiro de 2017 e junho de 2018 foi de 17,76%. Mas de acordo com relatório técnico ¹ do empreendimento, entre 2005 e 2006 o teor de sólidos dragado ficava entre 25% e 30%. Ou seja, os dados mais atuais indicam que os teores de sólidos dragados estão inferiores aos valores atingidos a mais de 10 anos atrás. Por isso o empreendimento vem investindo no sistema de dragas e tem a meta de aumentar o teor de sólidos da polpa dragada. Afinal, quanto maior o teor de sólido dragado menor o tempo de secagem para se atingir valores mais elevados de teor de sólidos nos reservatórios de rejeito adensado.

¹ Relatório técnico não disponível para consulta pública.

Tabela 2. 1 - Histórico de teores de sólidos dragados do reservatório de rejeito diluído, entre 2017 e 2018

Dados	HISTÓRICO 2017 (%)											
	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	Out	nov	dez
% sólidos Draga 1	14,43	17,69	16,87	16,23	19,13	18,25	20,00	17,62	18,94	17,45	17,34	17,75
% sólidos Draga 2	15,60	13,40	14,66	16,02	15,38	14,93	17,21	18,64	19,61	17,37	15,75	15,80

	HISTÓRICO 2018 (%)					
	jan	fev	mar	abr	mai	jun
% sólidos Draga 1	15,29	18,63	19,39	20,87	21,21	20,63
% sólidos Draga 2	15,05	18,22	20,86	21,80	20,88	20,50

Média entre dragas	Média Geral
18,21%	17,76%
17,32%	

Fonte: O autor.

Por isso, em 2008 o empreendimento desse estudo realizou análises numéricas simulando as condições de secagem para camadas de polpa de rejeito lançadas com teores de sólidos com 25% e 40%. Sendo que o valor de 25% representa um valor possível de ser atingido e o valor de 40% representa o valor ideal, considerado em projeto, mas que se mostrou inviável de ser atingido. A Tabela 2.2, apresenta o resultado dessas análises numéricas, em que o rejeito lançado com 25% de sólidos, com uma altura de camada de 50 cm, após 34 dias de secagem, a altura da camada reduz para 34,16 cm, e o teor de sólidos no topo dessa camada e na base, ficam respectivamente com 33,51% e 34,70%. No caso de rejeito lançado com 40% de sólidos, com uma altura de camada de 50 cm, após 34 dias de secagem, a altura da camada reduz para 42,00 cm e o teor de sólidos no topo dessa camada e na base, ficam respectivamente com 45,95% e 45,81%.

Tabela 2. 2 - Análise numérica: Variação do Teor de Sólidos (TS) após 34 dias de secagem

Altura lançada (cm)	Altura após ressecamento de 34 dias (cm)	TS inicial (%)	TS final no topo da camada ressecada (%)	TS final na base da camada ressecada (%)
50,00	34,16	25	33,51	34,70
50,00	42,00	40	45,95	45,81

Fonte: Relatórios internos do empreendimento

2.3.5. Sistemas alternativos de disposição de sedimentos

Desenvolvidos em virtude do aumento do rigor da legislação ambiental e conscientização da opinião pública nas últimas décadas, os sistemas alternativos de disposição de sedimentos ganham cada vez mais espaço no setor minerário e despontam como solução

para aumentar o fator de segurança estrutural e reduzir o potencial de dano ambiental. São chamados aqui de “alternativos” pois são estruturas com metodologias construtivas que se diferenciam das consagradas e muito difundidas barragens de disposição de sedimentos. A diferença consiste basicamente na existência de processos implementados com o objetivo de aumentar o teor de sólidos. Por isso, tais sistemas são classificados como métodos de disposição a seco, ou semi-secos. Entre esses apresentam-se a seguir os métodos de empilhamento a seco (*dry stacking*), e o de disposição a seco (*dry stack*). Mas, além desses métodos, conforme citado por Nery (2013, p. 7), pode-se considerar os métodos de disposição de lama espessada, e o método de disposição em pasta.

[...]o método de disposição de lama espessada (TTD – “*Tailing Tickened Discharge*”), descrito por Lima (2006), em que o rejeito é espessado até um teor de sólidos de cerca de 40% e é descarregado na área de disposição a partir de uma posição mais elevada, de forma a obter a máxima superfície exposta para evaporação. Para mais informações sobre este método, recomenda-se consultar McPhail et al (2004), Spiers (2010). Outro método é o de disposição em pasta, em que o rejeito é processado em uma mistura densa e viscosa que, diferente da lama fluida, não segrega ao ser transportado. Segundo Lima (2006), este método é utilizado para preenchimento de minas subterrâneas. Maiores detalhes sobre este método podem ser consultados em Fitton & Seddon (2013), Cavalcante e Palkovits (2013), Newman et al (2001), Biesinger & Slottee (2011), Nery(2013).

i) Empilhamento a seco (*dry stacking*)

Para execução de depósitos construídos pelo método *dry stacking* o rejeito oriundo de plantas de beneficiamento passa por um processo de filtragem realizado em filtro tambor, para que ocorra o aumento do teor de sólidos (espessamento). De acordo com a descrição de Ávila (2012) o teor de sólidos do rejeito nesse processo varia em torno de 55% a 60%, sendo que após esse processo de espessamento esse resíduo é transportado para o depósito onde são realizados ciclos de disposição e secagem. Esses ciclos e a formação do depósito são descritos por Nery (2013), a seguir.

O resíduo é disposto em finas camadas, alternando-se as frentes de lançamento, de forma a permitir um período de espera para que ocorra a evaporação da água presente no resíduo, que alcança a superfície por capilaridade. A disposição resulta em uma pilha com talude de cerca de 2% a 5% de inclinação, dependendo da reologia do resíduo e do teor de sólidos no lançamento (NERY, 2013, p. 11).

Esse método foi aplicado no Brasil em rejeitos de refinarias de alumínio e, também, conforme mencionado por Nery (2013), em rejeitos de cobre no Chile. O mais comum para controlar e remover a água de chuva do sistema é a utilização de diques calculados para armazenar cheias, e gradativamente extravasar a água através de meio filtrante, retendo os finos do resíduo.

Nery (2013) ainda reforça o conceito de que para acelerar o processo de adensamento do resíduo no depósito devem ser utilizados drenos internos sobre a camada impermeabilizada, com o intuito de direcionar a fase aquosa do resíduo para estações de bombeamento que podem direcionar a água para sistemas de tratamento antes de ser devolvida ao meio ambiente.

ii) Disposição a seco (*dry stack*)

Nesse sistema o rejeito é armazenado em estado não saturado, com teor de umidade que pode chegar próximo aos teores de umidade ótimos de compactação. Por isso os depósitos construídos com a aplicação dessa metodologia podem ser erguidos com utilização de equipamentos convencionais de terraplanagem. Atingir tal nível de desaguamento do rejeito só foi possível com o desenvolvimento de tecnologias de filtros a vácuo ou filtros a pressão.

Os maiores valores de teor de sólidos conseguidos não permitem que o transporte do rejeito seja realizado por bombeamento, portanto são necessários caminhões ou correias transportadoras para levar o resíduo do sistema de filtragem até o depósito.

No método “*dry stack*” não existe a necessidade do ciclo de secagem do rejeito, pois os rejeitos são espalhados e compactados para formar uma pilha densa e estável, sendo ainda excluída a necessidade de barragens de retenção para controle do rejeito. (ROSEMONT COPPER COMPANY, 2018).

Porém, nesse tipo de depósito, em que é fundamental o controle de compactação para viabilizar a estrutura, um dos grandes desafios é manter a rotina de construção do depósito em períodos chuvosos, uma vez que o aumento do teor de umidade em função das chuvas pode comprometer a estabilidade dos taludes, caso sejam compactados fora dos padrões técnicos definidos em projetos, e também comprometer a operacionalidade na logística de armazenamento. Por isso, nesses depósitos, é preciso prever critérios construtivos relacionados à períodos chuvosos. Nery, em sua publicação de 2013 apresenta a solução utilizada para tratar desse problema sazonal.

Uma solução para este problema é projetar o sistema de disposição com zoneamento, no qual pode-se dispor o rejeito com as condições ótimas especificadas para a compactação formando uma espécie de bacia e, no seu interior, depositar o rejeito no período chuvoso, quando não se espera obter as condições desejadas, sendo que esta zona interior não terá influência na estabilidade global da pilha (NERY, 2013, p.12).

Por isso, em função de períodos chuvosos, os depósitos de rejeito a seco precisam ser divididos em duas porções construtivas: Zona seca e zona úmida.

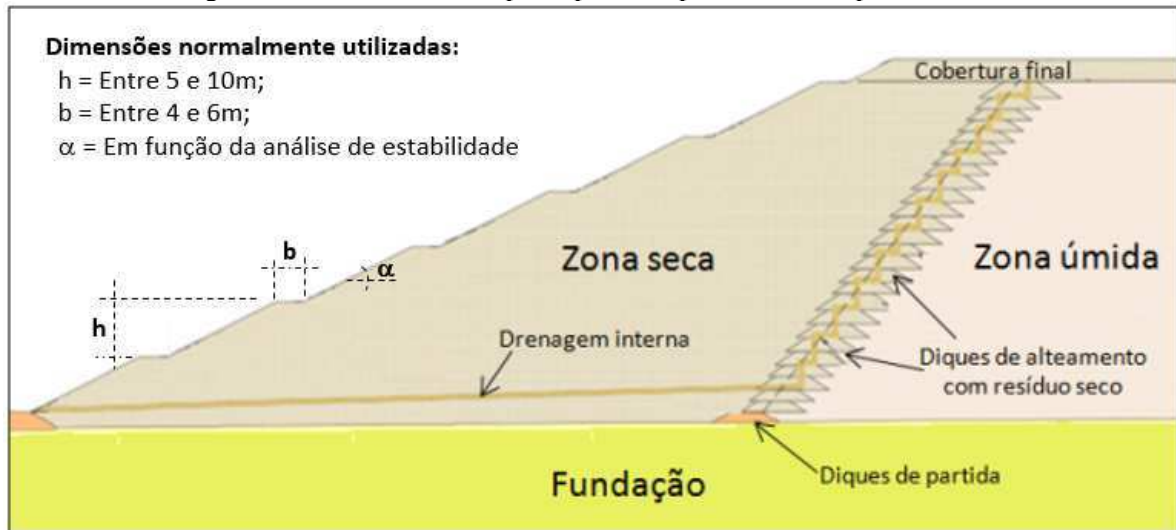
Destinada para disposição do rejeito nos períodos chuvosos, a zona úmida é usada para armazenar toda a massa com teores de umidade elevados, e por isso esse aterro apresenta maiores dificuldades de compactação, sendo impróprio para se manter equilibrado com taludes mais íngremes. Já a zona seca é destinada para o armazenamento da massa compactada em períodos secos, tendo por isso maior resistência estrutural, pois fica sendo possível a compactação do rejeito com teores mais próximos da umidade ótima. Desta maneira, conforme pode ser visto na Figura 2.14, o depósito é planejado para que a zona seca (também chamada de zona estrutural) atue na contenção da zona úmida. Na Figura 2.15 são apresentados os principais componentes do depósito de rejeito a seco, onde é destacada a necessidade de drenagem interna para escoar o excesso de umidade da zona úmida, e dique de separação entre a zona seca e úmida, construídos com resíduo (rejeito) seco. Inicialmente é construído um dique de partida separando a zona seca da zona úmida, e posteriormente, conforme avança a elevação do depósito, são construídos novos diques de separação entre as zonas seca e úmida (diques de alteamento). Ao final da obra é realizada a camada de cobertura feita com rejeito seco para posterior cobertura vegetal. Ressalta-se que o termo rejeito seco, não significa ausência de água, mas sim um rejeito próximo da umidade ótima de compactação, possível de ser executado apenas no período de estiagem de chuvas (período seco).

Figura 2. 14 - Distribuição espacial do aterro do depósito a seco, de modo que a zona seca (zona estrutural) estabilize o aterro da zona úmida



Fonte: O autor.

Figura 2. 15 - Detalhes dos principais componentes do depósito a seco



Fonte: O autor.

Para que funcione a premissa de que a zona seca atue no equilíbrio da zona úmida, é fundamental que o crescimento da zona seca condicione o crescimento da zona úmida. Ou seja, para que a zona úmida permaneça confinada, os diques de alçamento da zona seca devem ficar sempre numa cota mais elevada que o ponto de contato com a zona úmida.

Por isso, no planejamento de disposição de rejeito ao longo da vida útil do depósito é necessário fazer um balanço de massa, que consiste na estimativa volumétrica de formação mensal do depósito, podendo ser refinado para estimativas semanais ou diárias. Para fazer esse balanço de massa são necessárias principalmente duas informações: as estimativas de produção de rejeito, e o resultado de análises estatísticas que forneçam uma previsão pluviométrica para os anos de vida útil do depósito. Sendo que essa última pode ser obtida com base no histórico pluviométrico local.

Então com base no balanço de massa se pode elaborar um projeto que prevê o crescimento da zona seca de modo a confinar o crescimento da zona úmida. Assim pode ser tabelado o crescimento mensal da zona seca (que se intensifica nos meses com mais períodos de estiagem) e da zona úmida (que se intensifica nos meses com mais períodos chuvosos). Desta maneira, seguindo também os critérios de projeto, o sucesso construtivo do depósito fica assegurado desde que o balanço de massa ocorra como o previsto.

Entretanto, podem ocorrer adversidades que prejudiquem a logística prevista para o balanço de massa, fazendo com que o aterro da zona úmida cresça para cotas superiores ao aterro da zona seca. Essas adversidades podem se dar das seguintes maneiras:

- Ocorrência de períodos chuvosos com índices pluviométricos superiores aos estimados com base na série histórica de chuvas.
- Problemas técnicos ocorridos no período de estiagem, prejudicando o transporte de rejeito para a zona seca, atrasando por isso a construção do aterro de confinamento da zona úmida. Esses problemas podem ocorrer nas correias transportadoras, nos acessos de caminhões, ou mesmo no filtro prensa.
- Embargos jurídicos na operação do empreendimento, ocorridos no período de estiagem de chuvas, também prejudicando o crescimento da zona seca.

Esses são exemplos de situações de extrema gravidade para o projeto do depósito, pois se a zona úmida crescer sem o confinamento da zona seca, todo planejamento financeiro e técnico pode ser perdido. Por isso é fundamental que além da zona seca e úmida exista também uma área destinada para o armazenamento provisório de rejeito com umidade superior ao máximo definido para zona úmida (que é o limite de trabalhabilidade²). Essa área pode ser chamada de reservatório de emergência, e deve armazenar o rejeito até o próximo período de estiagem, quando o mesmo deverá ser transferido zona seca ou úmida (dependendo de sua umidade). Assim, o reservatório de emergência será utilizado apenas para situações em que o rejeito esteja tão úmido, que não seja possível compactá-lo na zona úmida. Ou seja, o reservatório de emergência será utilizado eventualmente, e por isso não possui volume suficiente para atender maiores desequilíbrios no balanço de massa. Construir um reservatório de emergência que tenha volume suficiente para receber todo volume da zona úmida no caso de um grave desequilíbrio do balanço de massa pode ser inviável economicamente e demandará maior espaço para implantação do projeto, que poderá acarretar no fim de uma das vantagens construtivas do depósito de rejeito a seco, que é a utilização de menores áreas, num comparativo com as tradicionais barragens de rejeito.

Desta forma, considerando que pode ser inviável a construção de uma grande célula de emergência, ou considerando que a célula de emergência existente já esteja ocupada, um desequilíbrio na estimativa do balanço de massa pode levar o empreendimento a tomar uma das duas opções que provocariam grande prejuízo financeiro:

Primeira opção: Como o aterro da zona úmida tem limitações estruturais para ser erguido sem confinamento, o volume excedente desse rejeito teria que ser espalhado sobre a área destinada para zona seca. Isso resultaria na necessidade de uma revisão emergencial do

² Nesse trabalho o limite de trabalhabilidade está definido como $W_{ot} + 8\%$ (ver item 4.4.4)

projeto, acarretando na redução significativa da vida útil do depósito. Podendo, por isso, inviabilizar toda a logística prevista para geração de rejeitos do empreendimento.

Segunda opção: Paralisar a produção da refinaria ou da mineração até que se reestabeleçam as condições de formação da zona seca confinando a zona úmida. Porém, dependendo do período chuvoso isso poderia levar meses.

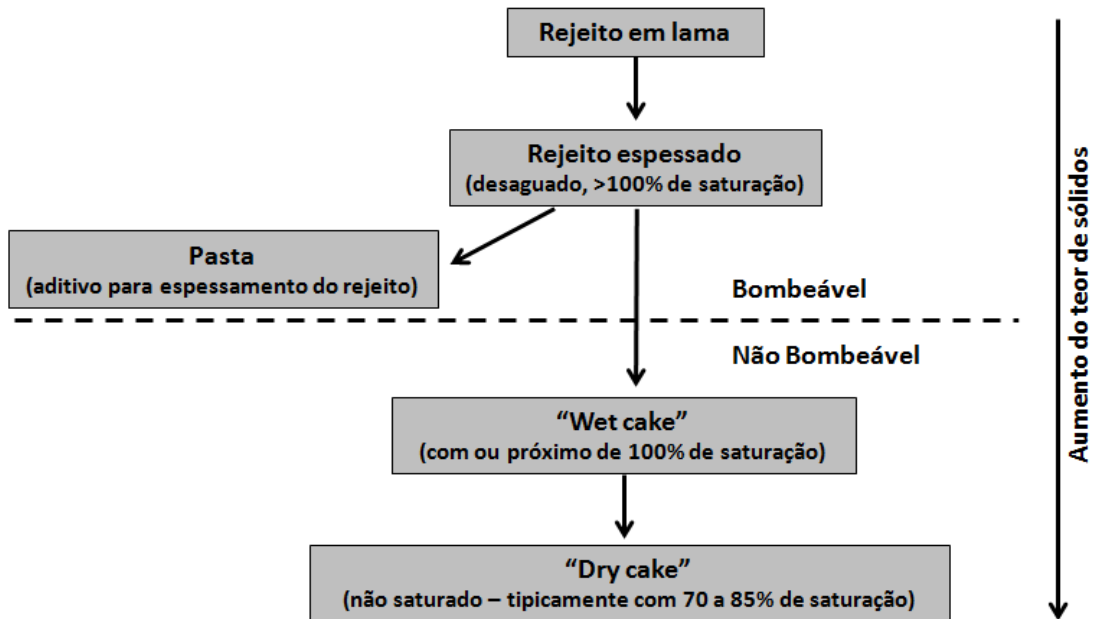
À luz desse problema, o trabalho aqui se concentra no estudo de um depósito de rejeito de bauxita laterítica, do tipo *dry stack*, com base nos resultados de testes de filtro prensa e avaliações sobre o comportamento estrutural do depósito considerando tais adversidades construtivas. Por isso, para efeito de contribuição técnica, estudou-se um plano de emergência que visa controlar os impactos negativos gerados por um possível desequilíbrio no balanço de massa. Esse plano consistirá no reforço estrutural da zona úmida, através de misturas de rejeito com areia e cimento, criando assim um aterro de emergência para ser construído em períodos chuvosos, substituindo provisoriamente o confinamento que deveria ser gerado pela zona seca.

2.3.5.1 Operação de depósito de disposição a seco (*dry stack*) de rejeito

Nesse sistema o rejeito é disposto em estado não saturado, com teor de umidade que pode chegar próximo aos teores de umidade ótimos de compactação. Por isso os depósitos construídos com a aplicação dessa metodologia, podem ser erguidos com utilização de equipamentos convencionais de terraplanagem. Para que se atinja tal nível de desaguamento do rejeito é necessário o uso de tecnologias de filtros a vácuo ou filtros a pressão. O filtro prensa é mais indicado para rejeitos mais finos, como o da mineração de bauxita.

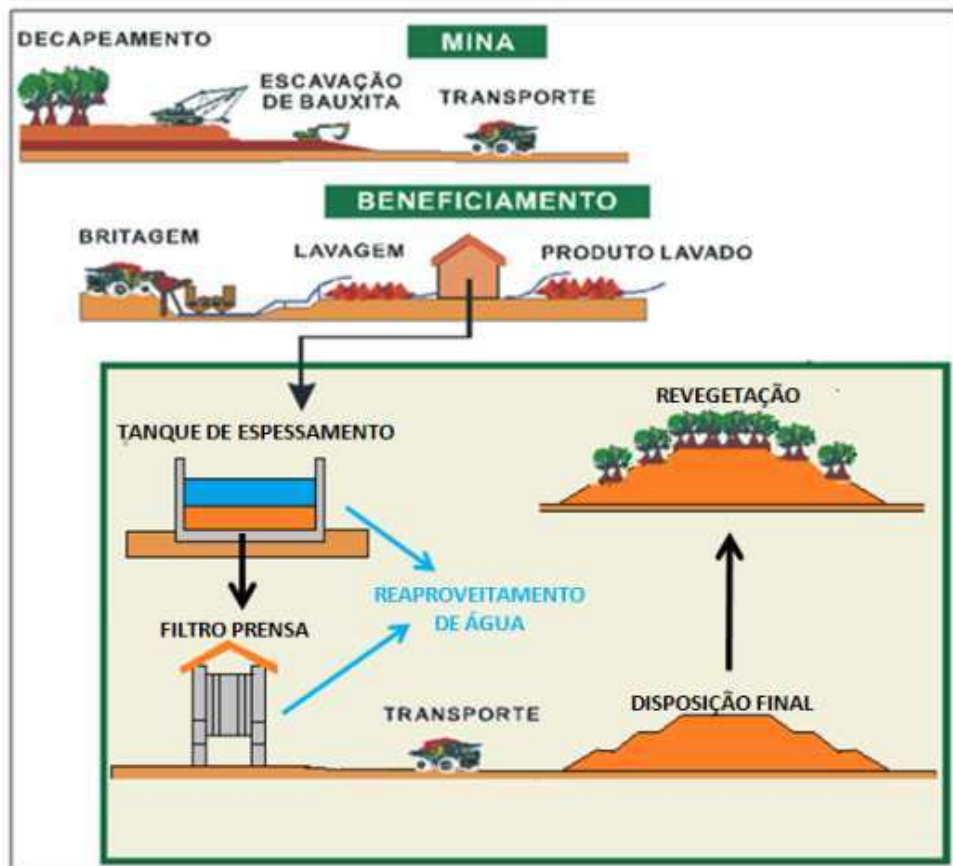
A Figura 2.16 apresenta a classificação do rejeito em função do desaguamento e as condições de transporte, e a Figura 2.17 um exemplo esquemático da disposição a seco.

Figura 2. 16 - Classificação do rejeito pelo grau de desaguamento



Fonte: Adaptado de Davies,2011, p.34.

Figura 2. 17 - Exemplo esquemático do sistema de armazenamento de rejeito pelo método de disposição a seco (*dry stack*)



Fonte: O autor.

O sistema de disposição a seco (*dry stack*) apresenta vantagens significativas do ponto de vista ambiental e estrutural, e foi esse o método estudado nesse trabalho para ser aplicado como sistema alternativo de disposição de rejeitos de mineração de bauxita laterítica. O sistema de filtragem utilizado nos testes foi do tipo prensa, que está descrito nos itens a seguir.

2.4 Sistemas de filtrações de resíduos de mineração

São sistemas com tecnologia desenvolvida para separar parte do volume de água dos sólidos residuais de mineração, aumentando os teores de sólidos nas massas de rejeito. Tais sistemas são utilizados no controle de geração de rejeitos de plantas de beneficiamento, mas podem também serem utilizados na minimização de problemas gerados pelo aporte de sedimentos erosivos de mineração, apesar de não ser ainda comum para esse princípio. Nery (2013), conforme apresentado a seguir, deu a seguinte definição para filtração.

Define-se filtração como uma operação unitária de separação dos sólidos contidos em uma suspensão aquosa mediante a passagem da polpa através de um meio filtrante, que retém as partículas sólidas e permite a passagem do líquido. O líquido que atravessa o meio filtrante é denominado filtrado e os sólidos retidos constituem a “torta” (NERY, 2013, p.14).

O processo de filtração, além de auxiliar na formação de depósitos com menor volume, permite a reutilização da água englobada na polpa do resíduo de mineração, o que é algo muito útil para plantas industriais que demandam muita água, ou em regiões desérticas, onde a economia de água é uma necessidade maior. Guimarães (2011) exemplifica a necessidade de utilização da filtração em minerações no deserto do Atacama, no norte do Chile, em função da escassez de água na região.

Conforme mencionado por Valadão (2008), a teoria clássica de filtração considera o fluxo de líquido através de um meio poroso não compressível, descrito por uma relação empírica conhecida como Lei de Darcy.

$$Q = \frac{K \cdot \Delta P \cdot A}{\mu \cdot L} = \frac{\Delta P \cdot A}{\mu \cdot R} \quad (2.1)$$

Em que,

Q = vazão volumétrica do filtrado (volume do filtrado / tempo)

K = permeabilidade do leito

ΔP = diferencial de pressão através da torta e do meio filtrante

A = área transversal ao fluxo (área filtrante)

μ = viscosidade do filtrado

L = espessura do meio filtrante + torta

R = L/K = resistência oferecida ao leito de filtrado

A equação (2.1), atribuída à Darcy, apresenta a quantidade de filtrado que atravessa a torta por unidade de tempo. Quanto maior a área filtrante (A) maior será a quantidade de água

filtrada por intervalo de operação do sistema. Assim como quanto maior a pressão (ΔP) conferida à torta, maior será a vazão de filtrado e quanto maior a espessura do conjunto entre meio filtrante e torta (L), maior será a resistência à filtração (R) e, portanto, menor será a vazão (Q). Desta forma é invariável que as características de projeto de dimensionamento do filtro (A , L e ΔP) são diretamente relacionadas à capacidade de desaguamento do filtrado e devem atender aos volumes de produção do empreendimento minerário. Porém, algumas características relacionadas à própria polpa também influenciam a vazão de filtração. Dentre essas, a viscosidade do filtrado (μ), que é função das características químicas e de temperatura do meio aquoso, e a permeabilidade do meio poroso (K) que está intimamente relacionada à granulometria da torta e a superfície específica dos grãos. Entretanto, a equação (2.1) não apresenta uma relação entre a permeabilidade e a superfície específica, mas a equação (2.2), apresentada por Kozeny (1927 apud Cupertino, 2005) e modificada por Carman (1937 apud Cupertino, 2005) faz essa associação considerando escoamento laminar e torta não compressível.

$$K = \frac{\rho_s \cdot \varepsilon^3}{K_c \cdot (1 - \varepsilon)^2 \cdot SE^2} \quad (2.2)$$

Em que,

K = coeficiente de filtração (permeabilidade do leito)

ρ_s = massa específica dos sólidos

ε = índice de vazios do leito

K_c = constante de Kozeny que depende da granulometria, forma e porosidade

SE = área superficial específica

Conforme apresentado por Nery (2013), é observado na equação (2.2) há diminuição do fluxo do material filtrado com o aumento da superfície específica, ou seja, polpas que contenham partículas muito finas são menos permeáveis, sendo que a superfície específica é inversamente proporcional ao tamanho das partículas.

Guimarães (2011) fez várias considerações sobre as variáveis que influenciam na capacidade de filtração dos sistemas e as resumiu no Quadro 2.1.

Quadro 2. 1 - Variáveis que afetam a velocidade de filtração relativas ao sólido, torta/filtrado, polpa e ao tipo de equipamento

Sólido	Torta/filtrado	Polpa	Equipamento
<ul style="list-style-type: none"> • área superficial específica • distribuição granulométrica • forma geométrica • propriedades de superfície • massa específica 	<ul style="list-style-type: none"> • espessura da torta • porosidade do leito • permeabilidade do leito • viscosidade do filtrado 	<ul style="list-style-type: none"> • taxa de alimentação • porcentagem de sólidos • temperatura • viscosidade • pH • adição de reagentes auxiliares • presença de sais dissolvidos 	<ul style="list-style-type: none"> • ciclo • nível de vácuo e/ou sopro e/ou pressão • meio filtrante • geometria dos componentes • nível de agitação

Fonte: Guimarães, 2011, p.17.

Nery (2013) cita Guimarães (2011) que apresenta as seguintes observações sobre as variáveis apresentadas:

- A taxa de filtração³ aumenta com a diminuição do ciclo de filtração⁴, porém pode ocasionar a elevação da umidade da torta, ou a obtenção de tortas extremamente finas, que poderão prejudicar a descarga do filtro;

- O aumento da temperatura da polpa promove a redução da viscosidade do filtrado, o que favorece a filtração. Porém, esta operação (através da aplicação de vapor super aquecido) não é usual em operações industriais por ser excessivamente dispendiosa;

- Quanto maior a concentração de sólidos das polpas, melhor a filtração. A maioria dos filtros requer uma concentração de sólidos mínima na sua alimentação (30% a 45%)⁵ para garantir o seu desempenho (principalmente os filtros que operam a vácuo). Por isto é usual o adensamento da polpa por espessadores, ciclones ou outro equipamento antes da filtração;

- Partículas com distribuição granulométrica grossa formam tortas com interstícios maiores, fazendo com que o líquido atravessasse o meio filtrante com maior facilidade, aumentando a velocidade de filtração e reduzindo a umidade da torta;

- O pH da polpa está relacionado ao estado de dispersão/agregação das partículas, sendo que quanto mais elevado o pH, maior o estado de dispersão dos sólidos na polpa. Sendo maior a dispersão, menor o fluxo de fluido filtrado e maior a umidade da torta. O estado de agregação das partículas é menor;

³ Massa de filtrado por unidade de tempo.

⁴ Tempo de operação do filtro para receber o rejeito e descarregar o rejeito filtrado.

⁵ O filtro prensa testado nesse trabalho apresentou torta com umidade satisfatória para alimentação com polpas de 14,7% a 17,5% de teor de sólidos.

- Para reduzir a tensão superficial do líquido e conseqüentemente auxiliar na passagem do fluxo, são utilizados reagentes auxiliares de filtração;

- As lamas apresentam um efeito negativo na filtração uma vez que elas tendem a “cegar” o meio filtrante. Dessa forma, com o objetivo de reduzir o efeito das lamas e aumentar a taxa de filtração, algumas vezes são adicionados coagulantes e floculantes nos tanques.

Guimarães (2011) explica que a filtração do rejeito é feita pela aplicação de uma força sobre as partículas através de um meio poroso, que pode ser feita por gravidade, centrifugação, pressão ou vácuo. Nery (2013) explica que as configurações mais comuns em plantas de filtração são os tambores, placas empilhadas horizontalmente ou verticalmente e correias horizontais, sendo que a filtração por pressão pode ser realizada em um espectro mais amplo de materiais, embora a filtração a vácuo por correia seja provavelmente o mais lógico para larga escala de operação. O Quadro 2.2, elaborado por Guimarães (2011) apresenta informações sobre alguns sistemas de filtração.

Quadro 2. 2 - Mecanismos de filtração e os principais fornecedores

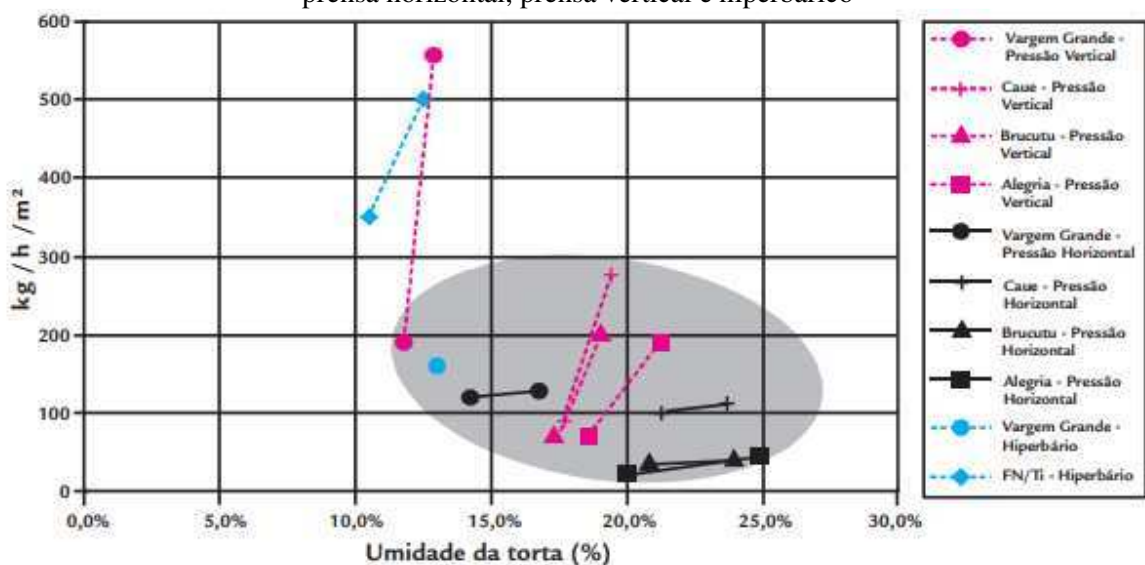
Tipos	Características	Modelo de Filtros	Principais Fornecedores
Filtração a vácuo	Criada uma pressão negativa debaixo do meio filtrante	Filtro tambor, de disco convencional, filtro horizontal de mesa e filtro horizontal de correia	Andritz, FL Smidth, Larox, Delkor, Gaudfrin
Filtração sob pressão	Uma pressão positiva é aplicada na polpa	Filtro prensa horizontal, filtro prensa vertical	Andritz, GEA (Westfalia), Alfa Laval
Filtração centrífuga	Utiliza força centrífuga para forçar a passagem do líquido	Centrífugas verticais e Decanters	Andritz, GEA (Westfalia), Alfa Laval
Filtração hiperbárica	Em que se combinam vácuo e pressão	Filtro de disco encapsulado ou hiperbárico	Andritz, Bokela, Gaudfrin
Filtração capilar	Utiliza a ação de capilares de meios cerâmicos porosos para efetuar o desaguamento	Ceramec	Larox

Fonte: Guimarães, 2011, p,18.

Nos itens a seguir estão apresentadas informações sobre os principais tipos de filtros, por serem os mais usuais nas plantas de beneficiamento. Estão destacados os do tipo: filtros de disco (à vácuo), filtros horizontais de correia (à vácuo), filtros de tambores rotativos (à vácuo), e filtros prensa (à pressão). Entretanto foi dado mais ênfase aos filtros do tipo prensa, pois conforme concluído nos trabalhos de Guimarães (2011), que comparou diversos tipos de filtros,

a filtragem de lamas só foi possível quando submetida à tecnologia de filtragem por pressão e filtragem hiperbárica. Portanto, estando disponível para esse trabalho apenas os testes com filtro prensa, esse foi o tipo do equipamento testado na verificação de eficiência na filtragem de rejeito de mineração de bauxita laterítica, objetivo dessa pesquisa. A Figura 2.18 apresenta um gráfico comparativo entre os equipamentos utilizados por Guimarães (2011), indicando a relação entre taxa unitária de filtragem e umidade da torta.

Figura 2. 18 - Taxa unitária de filtragem, em função da umidade da torta, das lamas para filtro de prensa horizontal, prensa vertical e hiperbárico



Fonte: Guimarães, 2011, p.83.

2.4.1 Filtros à vácuo

Os filtros do tipo a vácuo funcionam com uso de forças subatmosféricas (pressão negativa) através de bombas a vácuo em meio filtrante, que promovem a sucção da água. Os filtros a vácuo podem ser do tipo disco, tambor ou horizontais de correia.

• Filtros de disco

Possuem discos paralelos na vertical ligados à tecidos filtrantes que, por ação de rotação e bombas de vácuo, retiram a água da polpa. A torta formada é retirada com uso de ar comprimido injetado no tecido filtrante, através do mesmo duto em que, no processo de secagem, é aplicado o vácuo. De acordo com Nery (2013) o principal diferencial dos filtros de discos em relação aos demais é a sua maior área de filtragem num comparativo com a área

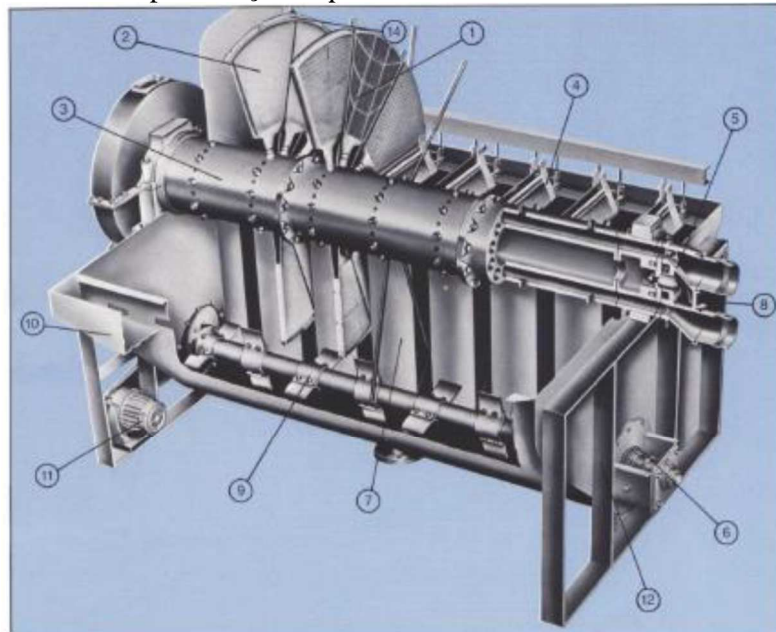
ocupada pelo próprio equipamento. A Figura 2.19 apresenta um filtro a disco convencional, e a Figura 2.20 um modelo esquemático desse equipamento apresentado por Aramante (2002).

Figura 2. 19 - Filtro de disco convencional Modelo VSF 120/10



Fonte: Guimarães, 2011, p.33.

Figura 2. 20 - Representação esquemática de um filtro de disco convencional



1- setor
2- elemento filtrante
3- barril central
4- defletor
5- válvula de vácuo
6- selagem da agitação
7- chute de descarga

8- entrada do ar do sopro
9- sistema de agitação
10- coleta de overflow
11- motorização do agitador
12- tanque: estrutura externa
13- alimentação: distribuidor
14- tirantes

Fonte: Amarante, 2002, p. 31.

- **Filtros horizontais de correia**

É um tipo de filtro usado em rejeitos com granulometria mais grosseira, com uso limitado para granulometrias mais finas. Nesse tipo de equipamento (que se assemelha a uma correia transportadora) a polpa é descarregada diretamente sobre o tecido filtrante (conectado à esteira), e o desague acontece através da ação de vácuo na parte inferior da esteira. Portanto a polpa entra numa extremidade da esteira filtrante, e é descarregada na outra extremidade com a umidade reduzida. Por isso esse equipamento não é normalmente utilizado para granulometrias finas, pois nessa condição seria necessário uma maior extensão da esteira para que se aumentasse o tempo de atuação do vácuo sobre a polpa. A Figura 2.21 apresenta uma imagem desse tipo de equipamento. Nery (2013) ainda menciona que uma série de sprays (jatos) de água são instalados na parte inferior da correia com o objetivo de limpar o meio filtrante.

Figura 2. 21 - Filtro horizontal de correia



Fonte: Guimarães, 2011, p.33.

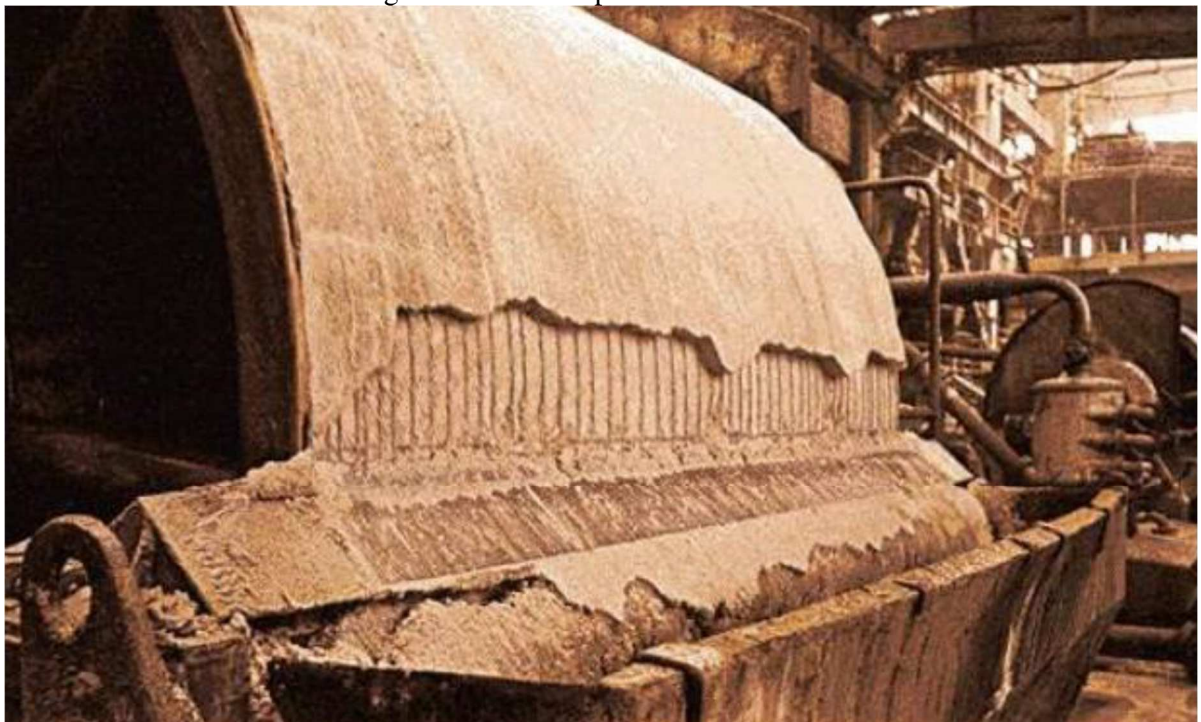
- **Filtros de tambores rotativos**

De acordo com Bánvölgyi e Huan (2009), o primeiro filtro à vácuo em tamanho industrial colocado em operação foi do tipo tambor, na Alemanha, por volta do ano de 1960. O funcionamento do filtro tambor rotativo se dá através um tambor horizontal no qual fica o meio filtrante, e que rotaciona quando parcialmente inserido num reservatório contendo a polpa de rejeito. Dentro desse tambor ocorrem as pressões negativas que succionam o filtrado, deixando

nas paredes externas do tambor (manta de filtração) a torta de rejeito. De acordo com Nery (2013), após a filtração, a torta formada pode ser removida por raspadores, rolos, cintas de descarte, fios de descarte ou jatos de água ou ar. Sendo que jatos de água ou ar podem também ser usados junto com outro tipo de removedor de torta para auxiliar a remoção. Na Figura 2.22 pode ser visto um exemplar de filtro tambor rotativo. Conforme explicado por Nery (2013), os filtros de tambor rotativos são normalmente utilizados para as seguintes situações:

- Para polpas com sólidos que não tendem a sedimentar rapidamente e permanecerão em suspensão uniforme sob agitação delicada;
- Para tortas que não requerem períodos de secagem longos para alcançar valores assintóticos de umidade;
- Quando um único estágio de lavagem for suficiente para remover os contaminantes residuais da torta ou produzir a recuperação máxima de filtrado;
- Para filtrado que não requer uma separação afiada entre o filtrado matriz e o filtrado da lavagem.

Figura 2. 22 - Exemplo de filtro tambor



Fonte: Nery, 2013, p.23.

2.4.2 Filtro prensa

Os filtros do tipo pressão, também denominados de filtros prensa utilizam pressões positivas para expulsar a água da poupa de rejeito através do meio filtrante. Esse tipo possui a vantagem de se conseguir tortas mais secas do que nos filtros do tipo a vácuo, além de também serem indicados para polpas mais finas, apresentando bom desempenho na filtragem de lamas.

Avery e Wilson (2013) citam que os filtros prensa também oferecem eficiência na recuperação da soda ocorrida na lama vermelha, gerada em refinarias de alumina. Outro exemplo de recuperação de componentes químicos na indústria, é a recuperação de carbonato, que está sendo realizada pela Companhia Brasileira de Alumínio, utilizando o filtro prensa sendo alimentado com água retirada da barragem de rejeito. O carbonato reaproveitado volta para o processo industrial.

Segundo Luz, Sampaio e Almeida (2004), os filtros prensa são compostos por placas separadas, e entre elas um meio filtrante. O conjunto de quadros é alimentado com polpa de rejeito, formando um tipo de torta junto ao meio filtrante, que escoar pelas ranhuras até chegar à porção externa do filtro. Quando os espaços oferecidos pelos quadros estiverem totalmente ocupados, está concluída a filtração.

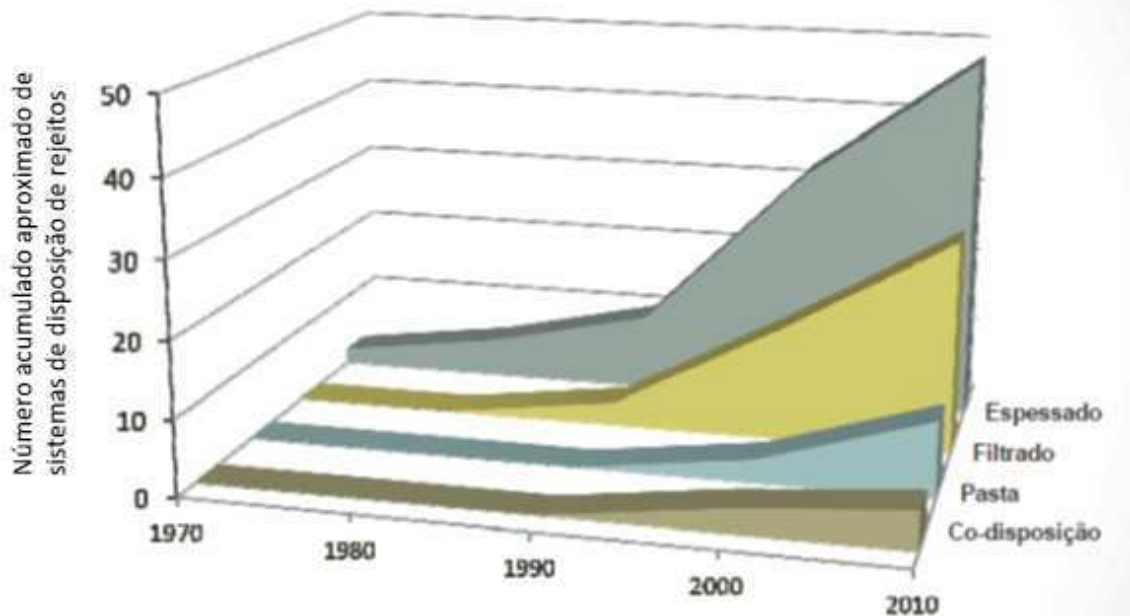
De acordo com o tipo de placas que possuem, os filtros sob pressão podem ser classificados como horizontais (placas verticais do tipo câmara ou diafragma) ou verticais (placas horizontais).

Em função da grande retirada de água que se pode conseguir com os filtros prensa, a torta gerada não apresenta condições de ser transportada por bombeamento, conforme detalhado graficamente na Figura 2.16. Portanto passa a ser necessário o transporte da torta de rejeito por caminhões ou correia transportadora, levando esse material das plantas de beneficiamento até os depósitos.

A utilização das técnicas de filtragem por prensagem tem sido cada vez mais utilizada nos empreendimentos minerários, em decorrência da sua maior capacidade em atingir maiores teores de sólidos no rejeito filtrado, quando comparado com outras técnicas. Por isso é uma alternativa tecnológica para disposição a seco de rejeitos. Tal afirmativa foi apresentada por Davies (2011), e reforçada por Silva (2016). A Figura 2.23 mostra uma estimativa, de 2011, quanto ao número de instalações de rejeitos espessados em atividade no mundo.

Davies (2011) menciona que a técnica de filtragem de rejeitos está se tornando cada vez mais comum em muitas minas no mundo. De acordo com o autor, existem mais pilhas de rejeitos filtrados dispostos em superfície do que disposição de rejeitos em forma de pasta. (SILVA, 2016).

Figura 2. 23 - Tendências no uso de rejeitos desagüados na mineração



Fonte: Adaptado de Davies, 2011, p.15.

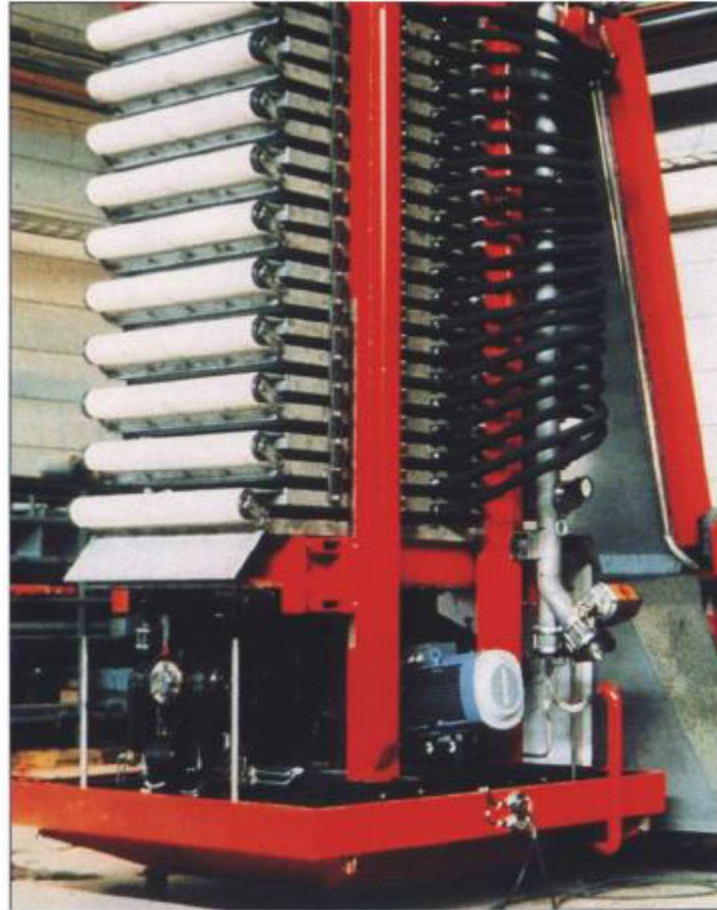
No Brasil a tecnologia de filtros do tipo prensa tem sido principalmente utilizada no tratamento de resíduos provenientes de plantas industriais de beneficiamento de bauxita, na fabricação de alumina. São exemplos de empresas no Brasil que geram esses resíduos, a CBA – Companhia Brasileira de Alumínio, localizada no estado de São Paulo, e a Hydro Alunorte, localizada no estado do Pará. Entretanto, apesar do Brasil ter uma das maiores reservas de bauxita do mundo e ser o segundo maior produtor desse mineral, pouco se estudou sobre a viabilidade de utilização de filtros prensa em áreas de mineração, para controlar a disposição de rejeito de bauxita. Sendo que o rejeito de bauxita na área de mineração é diferente do rejeito industrial gerado pelo beneficiamento de bauxita.

2.4.2.1 Filtro prensa vertical

O filtro prensa de placas horizontais, conforme descrito por Valadão (2008), também denominado filtro prensa vertical (Figura 2.24) é uma tecnologia recente de filtragem, cuja configuração vertical (em função das placas horizontais) economiza área ocupada no piso. As

tortas geradas podem atingir valores mais baixos de umidade num comparativo com outras tecnologias de filtração, e baixo custo de operação, apesar dos maiores custos de investimentos.

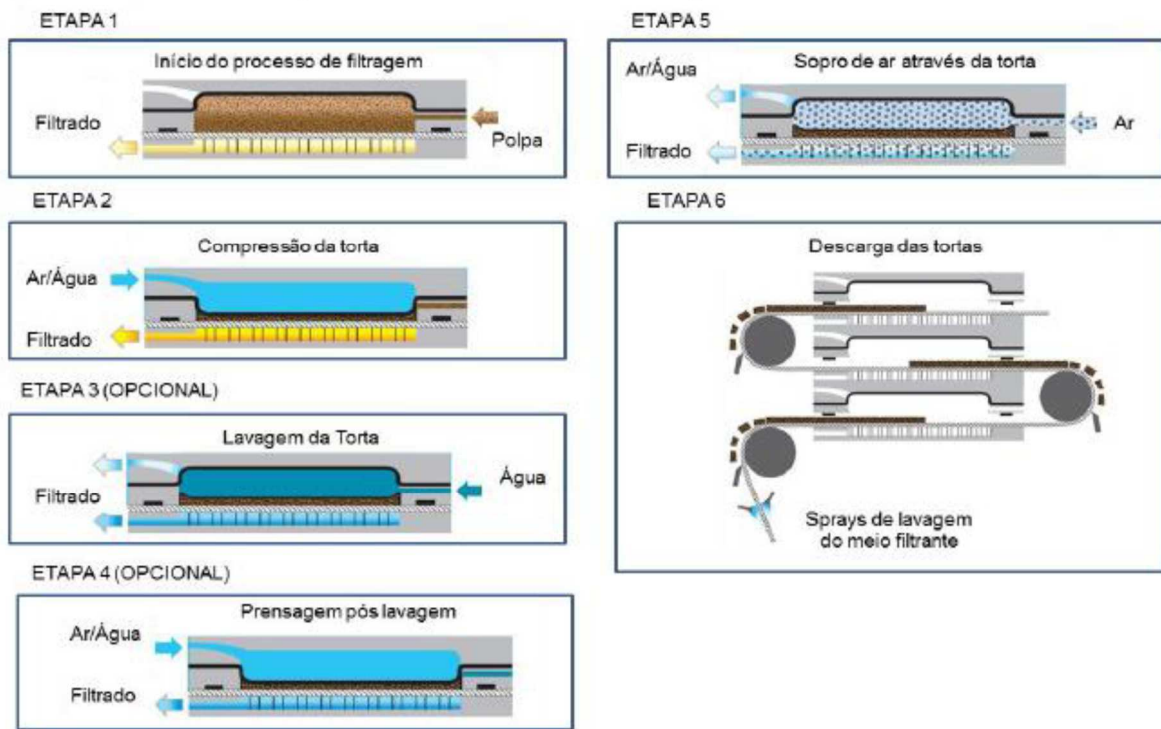
Figura 2. 24 - Filtro prensa de placas horizontais



Fonte: Amarante, 2002, p.23.

O ciclo de filtração de um filtro de pressão vertical convencional consiste nas etapas mostradas na Figura 2.25 e descritas a seguir, conforme apresentado por Guimarães (2011) e Silva (2016):

Figura 2. 25 - Ciclo de um filtro de pressão vertical



Fonte: Silva, 2016, p.39.

Etapa 1: A polpa é bombeada para dentro de todas as câmaras simultaneamente e tortas são formadas e ao mesmo tempo o filtrado começa a fluir.

Etapa 2: Água ou ar altamente pressurizado preenche os diafragmas em todas as câmaras, comprimindo as tortas.

Etapa 3: Água de lavagem é bombeada para o interior de todas as câmaras, se a lavagem da torta é realizada.

Etapa 4: Após a lavagem da torta, água ou ar altamente pressurizado preenchem novamente todos os diafragmas para máxima recuperação do filtrado.

Etapa 5: Ar comprimido é insuflado através das tortas, reduzindo ainda mais a umidade.

Etapa 6: Todas as placas do filtro abrem-se automaticamente e a esteira filtrante move-se para frente proporcionando descarga total das tortas. O meio filtrante é, em seguida, lavado (GUIMARÃES, 2011, p.38).

2.4.2.2 Filtro prensa horizontal

De acordo com Guimarães (2011) os filtros prensa horizontais possuem basicamente o mesmo princípio de funcionamento, diferenciando-se de acordo com características de cada fabricante. Ainda, podem ser construídos com dispositivos auxiliares que permitem automação integral, tornando mínima a intervenção do operador.

A Figura 2.26 apresenta um filtro prensa horizontal (placas verticais revestidas com meio filtrante). Trata-se de um equipamento constituído de um número muito grande de placas, que possuem câmaras entre elas.

Figura 2. 26 - Ciclo de um filtro de pressão vertical

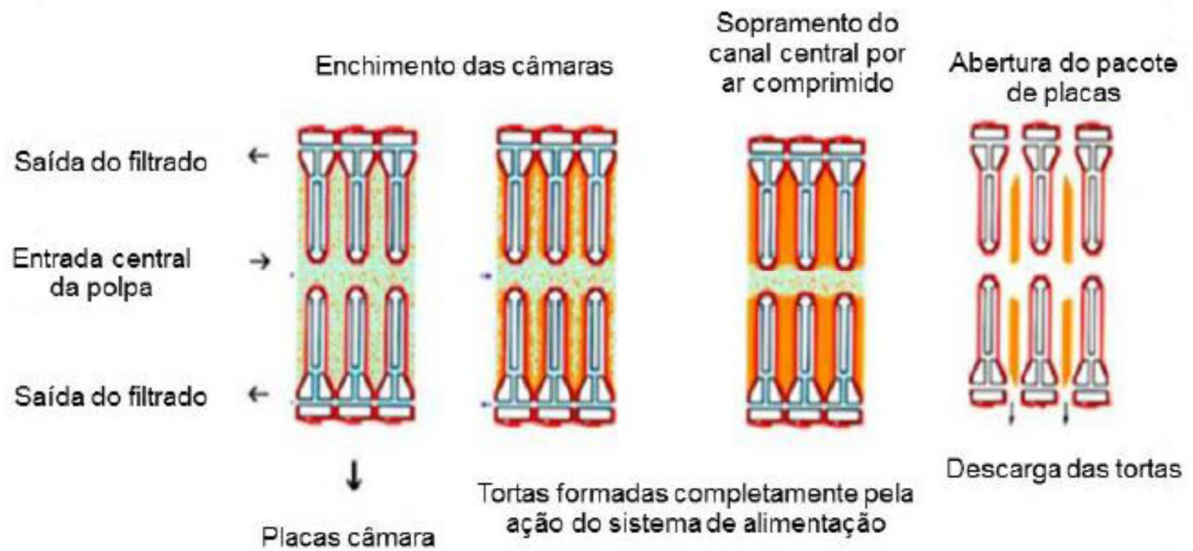


Fonte: Silva, 2016, p.33.

Os filtros prensa horizontais podem possuir placas do tipo câmara ou placas do tipo diafragma.

• **Filtro prensa horizontal com placas tipo câmara:** Filtros desse tipo possuem ciclo de operação que podem ser divididos em três etapas básicas: enchimento, aplicação de pressão para filtração, e descarga das tortas. Conforme mencionado por Silva (2016) e Guimarães (2011), o enchimento das câmaras com a polpa ocorre através do sistema de alimentação até formação completa das tortas. A pressão de alimentação é mantida por um tempo preestabelecido no sentido de extrair o maior volume de filtrado. A pressão obriga o filtrado a atravessar o meio filtrante que escoam pelas ranhuras das placas e é conduzido para fora do filtro. Após desligamento, se procede à expulsão do canal central através da injeção de ar comprimido. Segue-se à lavagem da torta (quando aplicável). Em seguida o filtro é aberto e a torta descarregada (Figura 2.27).

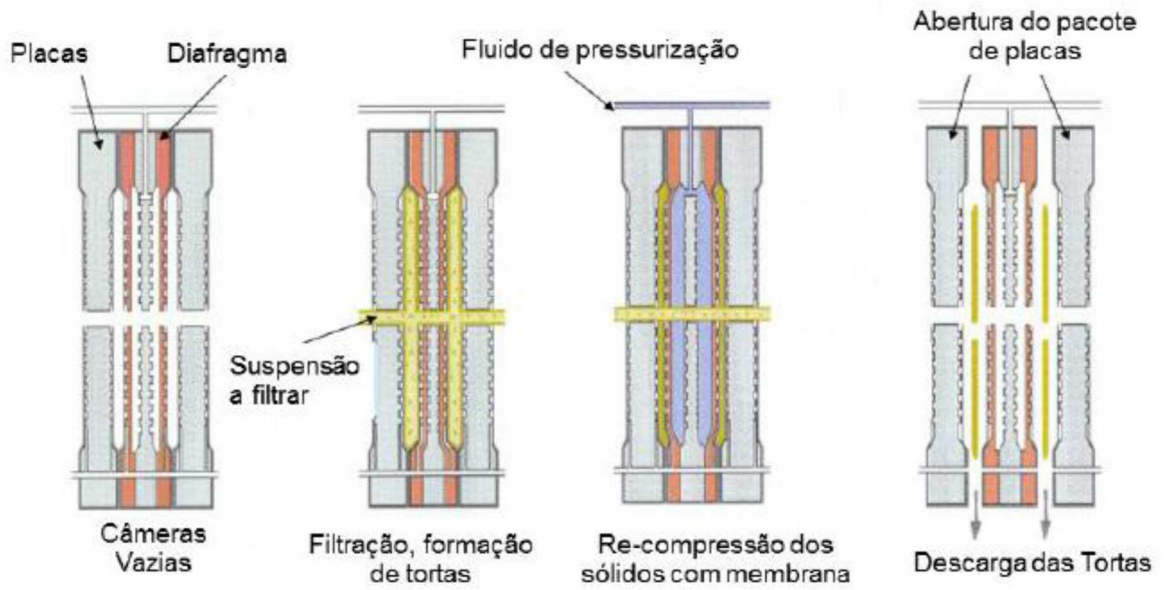
Figura 2. 27 - Ciclo de operação dos filtros prensa com placas tipo câmara



Fonte: Guimarães, 2011, p.38.

• **Filtro prensa horizontal com placas tipo diafragma:** De acordo com Silva (2016) e também Guimarães (2011) o filtro prensa com placas tipo diafragma é composto por diversas placas individuais intercaladas entre câmara e diafragma, sendo que as placas diafragma são revestidas por um diafragma elástico. Desta maneira é formando um pacote de placas que recebe o nome de “misto”, sendo que após o enchimento das câmaras com a polpa, as bombas de alimentação são desligadas e os diafragmas são pressurizados hidráulicamente a fim de extrair mais filtrado de forma progressiva. Com a elevação da pressão de pressurização a vazão de filtrado continua, sem que ocorra alimentação de polpa ao filtro prensa. Com o sistema diafragma, o processo de separação sólido - líquido habitualmente reduz o tempo de filtragem. A descarga das tortas ocorrem após a despressurização dos diafragmas. (Figura 2.28).

Figura 2. 28 - Ciclo de operação dos filtros prensa com placas tipo diafragma



Fonte: Apresentado por Silva, 2013 adaptado de Andritz, 2013, p.34.

2.5 Mistura de Solo-Cimento

Misturas de solo-cimento são utilizadas para melhorar as condições mecânicas dos solos, para fins de uso na construção civil. É uma técnica consagrada de estabilização química do solo, onde é utilizado como agente cimentante o cimento Portland.

O efeito produzido pelo cimento pode atuar de forma diferente num comparativo entre solos granulares e solos coesivos, conforme mencionado por Portelinha (2008). Nos solos granulares o cimento atua principalmente na ligação de contatos intergranulares, gerando aumento de resistência mecânica. Nos solos coesivos as partículas de cimento funcionam como núcleos rodeados por frações argilosas e coloidais, formando floculações oriundas dos fenômenos de cimentação.

2.5.1 O cimento

O processo de fabricação do cimento Portland consiste, resumidamente, em moer a matéria prima, misturá-la em determinadas proporções e submetê-la à queima em forno rotativo a elevadas temperaturas (Portelinha, 2008). Segundo Neville (1997) esse material pode posteriormente receber outras adições, como escória de alto forno, cinzas volantes, sílicas ativas, entre outras.

Portelinha (2008) comenta que a composição química específica e propriedades físicas de cimento possuem uma série de compostos anidros, em que se destacam:

- silicato tricálcico, ou alita ($3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$);
- silicato dicálcico, ou belita ($2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$);
- aluminato tricálcico ($3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$);
- ferroaluminato tetracálcico, ou ferrita ($4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$)

A composição potencial em faixas aproximadas dos componentes do cimento Portland, apresentada por Metha e Monteiro (1994), pode ser observada na Tabela 2.3.

Tabela 2. 3 - Componentes básicos do cimento Portland

Componentes	Proporção (%)
$3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	35 a 65
$2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	10 a 40
$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	0 a 15
$4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	5 a 15

Fonte: Metha e Monteiro, 1994, p.8.

O conhecimento dos produtos formados pela hidratação do cimento, bem como dos diversos fatores (calor liberado e velocidade) que consistem essa reação, é de grande importância para o uso prático do cimento Portland. De fato, por se tratar de um componente do solo-cimento, é preciso compreender algumas características tecnológicas desse material (PORTELINHA, 2008).

A seguir, estão apresentadas, segundo Metha e Monteiro (1994), as propriedades dos principais componentes do cimento em hidratação.

- $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ – reage nos primeiros minutos e ocasiona elevado calor de hidratação, bem como propicia pouco desenvolvimento de resistência e forte retração;

- $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ – responsável pelo desenvolvimento de resistência nas idades iniciais e propicia alto desprendimento de calor e libera cerca de 40% em massa de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$);

- $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ – proporciona o desenvolvimento de resistência em idades mais avançadas com baixa liberação de calor e produz cerca de 18% em massa de hidróxido de cálcio;

- $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ – desenvolvimento lento e pequeno de resistência mecânica e boa resistência ao ataque por sulfatos.

Conforme mencionado por Portelinha (2008), o processo de hidratação do cimento é composto por interações complexas, representadas por várias reações químicas que ocorrem de forma simultânea, e interferem umas sobre as outras. Esse autor destacou ainda que o comportamento da hidratação é função da área específica dos grãos, temperatura, quantidade de água disponível e procedimentos de mistura.

As informações a seguir se referem às principais fases sólidas ocorridas na pasta de cimento, conforme explicado por Metha e Monteiro (1994).

- a fase silicato de cálcio hidratado ($\text{CaO}.\text{SiO}_2.\text{H}_2\text{O}$), produzido pela hidratação do $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ e do $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$, que constitui, em geral, de 50% a 60% do volume de sólidos da pasta e é responsável pela resistência mecânica e, conseqüentemente, pela durabilidade da matriz de concretos e argamassas.

- a fase hidróxido de cálcio, também liberado na hidratação do $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ e $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$, representando de 20% a 25% do volume de sólidos da pasta, porém, sua presença tem efeitos desfavoráveis à durabilidade, devido à sua solubilidade.

- os sulfoaluminatos de cálcio, resultantes da hidratação do $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ e do $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ na presença do sulfato de cálcio (gipsita) ou gesso. Ocupa de 15% a 20% do referido volume e tem papel menor na estrutura/propriedade; grãos de clínquer não hidratado.

2.5.2. Reações nas misturas solo-cimento

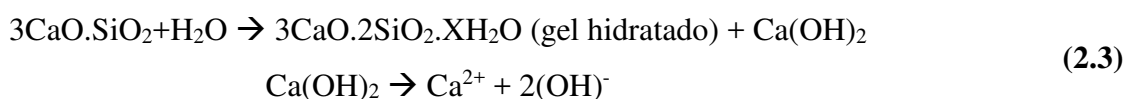
Solos estabilizados com cimento apresentam modificações nas propriedades dos minerais argilosos, que podem se dar em curto prazo e longo prazo.

Os efeitos de curto prazo podem predominar no início da estabilização, com as reações dos constituintes anidros do cimento, que, segundo Portelinha (2008), quando em presença suficiente de água, hidratam e endurecem devido à processos químicos complexos. Segundo Moh (1962), durante a hidratação dos constituintes anidros há liberação da cal (hidróxido de cal) que reage com os componentes químicos da parte do solo não inerte, ocorrendo alteração do pH e dos componentes químicos formados na hidratação do cimento.

O hidróxido de cálcio, proveniente da hidratação do clínquer do cimento Portland, tem sobre os solos argilosos um efeito rápido e bem definido, constatado pelas modificações que ocorrem nos solos estabilizados com uso da cal. Essa melhoria ocasionada pode ser justificada pela ocorrência de fenômenos de troca catiônica, carbonatação, formação de cristais de hidróxido de cálcio e/ou a floculação (PORTELHINHA, 2008).

Os efeitos de longo prazo na mistura de solo-cimento ocorrem após a estabilização, que é o resultado do desenvolvimento das reações químicas do cimento hidratado, a partir das quais ocorrem a aderência entre a superfície dos grãos de cimento e as partículas do solo.

De acordo com Portelinha (2008) uma mistura de solo-cimento apresenta reações que podem ser representadas pela Equação 2.3, que define o envolvimento do constituinte de maior atuação no cimento, o silicato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$):



Conforme definido por Ferraz (1994), o silicato de cálcio hidratado ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{XH}_2\text{O}$) é um produto final da hidratação do $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ e do $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$. Em contato com soluções pozolânicas, cujos produtos endurecem em uma velocidade bem mais lenta, o silicato originado do $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ permanece estável.

Apesar de nos solos argilosos ocorrer a formação de dois tipos de compostos cimentantes, observa-se que solos de características arenosas respondem melhor à estabilização com cimento (PORTELHINHA, 2008, p.61).

Para Ferraz (1994), a atuação do cimento em solos com características mais argilosas produz menor estabilização na mistura, pois os minerais argilosos ao reagirem com a cal

formada na hidratação dos compostos do cimento, geram a queda do pH, afetando a hidratação e o endurecimento do cimento. Portelilha (2008) menciona que na mistura solo-cimento, a cimentação deve-se principalmente ao endurecimento das partículas de cimento Portland, resultante de sua hidratação, e também em função do endurecimento dos produtos da reação pozolânica, que ocorre entre a cal e as partículas do solo. Sendo que na resistência final da mistura, as contribuições do endurecimento gerado pela hidratação do cimento são as mais importantes.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo estão apresentados os materiais e métodos utilizados para atingir os objetivos propostos para execução do trabalho.

3.1 Materiais

Os materiais utilizados nesse trabalho são o rejeito de bauxita laterítica resultante do processo de lavagem da mineradora, a areia quartzosa disponível nas jazidas do empreendimento, e cimento CII-32-E da empresa Lafarge Holcim.

O rejeito utilizado para os ensaios de espessamento e deságue em filtro prensa foi coletado diretamente da planta de beneficiamento da bauxita. Já o rejeito coletado para ensaios geotécnicos necessários ao projeto conceitual do depósito de disposição a seco foi coletado no interior de um reservatório de secagem e adensamento de rejeito dentro do empreendimento. Detalhes sobre as coletas estão apresentados a seguir.

A areia foi coletada num depósito de obras dentro do empreendimento minerário, e é representativa da jazida local (Figura 3.1).

Figura 3. 1 - Depósito de areia representativo da jazida local



Fonte: O autor.

3.1.1 Coleta de rejeito na planta de beneficiamento

O rejeito coletado para realização dos ensaios de espessamento e deságue de polpa foi retirado diretamente da planta de beneficiamento de bauxita, nas condições normais de operação do empreendimento minerário. Para isso, com a permissão da gerencia industrial da planta de beneficiamento de bauxita, foi aberta uma válvula que projetou a polpa diretamente das linhas adutoras de lançamento para tambores de coleta. A Figura 3.2 apresenta a coleta da polpa de rejeito, diretamente da adutora de distribuição para os reservatórios de rejeito. A Figura 3.3 mostra o armazenamento da polpa coletada em tambores. Para aumentar o teor de sólidos da polpa, com a finalidade de reduzir os volumes a serem transportados para o laboratório onde realizou-se os ensaios, realizaram-se trabalhos de retirada de água da polpa, conforme mostrado na Figura 3.4.

Figura 3. 2 - À esquerda o ponto de coleta do rejeito, e à direita a torre de sustentação da tubulação adutora que transporta a polpa de rejeito da planta de beneficiamento para os reservatórios de armazenamento



Fonte: O autor.

Figura 3. 3 - Armazenamento de 500 litros de rejeito para decantar os sólidos, retirar a água e preencher com mais polpa de rejeito



Fonte: O autor.

Figura 3. 4 - Processo de retirada de água do rejeito (após decantação)



Fonte: O autor.

3.1.2 Coleta de rejeito no reservatório de secagem

A escolha de coletar o rejeito diretamente do reservatório para os ensaios geotécnicos simulando as condições do depósito do tipo *dry stack*, foi porque era preciso uma maior quantidade de massa seca para realização de todos os ensaios necessários. A coleta direta da linha adutora demoraria a formar quantidade de sólidos suficientes, além de causar

interferências na rotina da planta de beneficiamento. Afinal o rejeito coletado diretamente nas linhas adutoras da planta de beneficiamento vem com teor de sólidos muito baixo e por isso requer maiores compartimentos de armazenagem para posterior retirada de água e aumento do teor de sólidos. A Figura 3.5 mostra o reservatório no qual coletou-se as amostras de rejeito.

Figura 3. 5 - Reservatório de rejeito adensado utilizado para coleta de material.



Fonte: O autor.

3.2. Metodologia

A apresentação das metodologias está dividida em quatro tópicos, sendo cada um detalhado para atingir um objetivo. Assim, estão apresentadas as metodologias para:

- Avaliar o tratamento necessário a ser feito na polpa de rejeito de mineração de bauxita laterítica para otimizar a eficiência do espessamento dessa polpa que deverá ser direcionada para um sistema de filtro prensa.
- Avaliar a eficiência de utilização de filtro prensa horizontal para a polpa espessada de rejeito de mineração de bauxita laterítica.
- Incluir na seção de projeto conceitual do depósito *dry stack* o estudo de um aterro de emergência a ser utilizado para contornar situações problemáticas em função de possíveis desequilíbrios no balanço de massa planejado.
- Avaliar vantagens e desvantagens na implantação do sistema de disposição de rejeito à seco (*dry stack*) no comparativo técnico com os usuais reservatórios de rejeito adensado de bauxita laterítica.

3.2.1 Eficiência do filtro prensa horizontal na transformação de lama de processo de mineração de bauxita

A sistemática para avaliação da eficiência do filtro prensa horizontal envolve sobretudo a preparação da polpa de alimentação, pois polpas muito diluídas tendem a aumentar o tempo necessário para formação da torta de rejeito. Por isso também foi apresentada a metodologia para teste de espessamento dinâmico da polpa de rejeito. Assim, nesse tópico estão apresentadas as metodologias para:

- caracterização do rejeito;
- realização do ensaio de espessamento;
- realização do ensaio de deságue de polpa por filtro prensa horizontal.

3.2.1.1 Caracterização da polpa de rejeito

Para caracterizar a polpa de rejeito que sai da planta de beneficiamento considerou-se as médias dos resultados dos ensaios realizados entre janeiro de 2017 e março de 2018 no laboratório da mineradora. Calculou-se estas médias com base nos resultados diários dos ensaios físicos para determinação do teor de sólidos, e porcentagens de sólidos retidos nas

peneiras #150, #270 e #400, e ensaios químicos para determinação dos teores de Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 e TiO_2 na polpa.

Além desses testes, que são padrão na planta de beneficiamento da mineradora, foi também realizada a determinação da granulometria do rejeito por cicloclassificação (*cyclosize*).

3.2.1.2 Ensaio de espessamento

A função do processo de espessamento é aumentar o teor de sólidos da polpa de rejeito, permitindo assim um deságue mais eficaz no filtro prensa.

A metodologia para definição do teor de sólidos de abastecimento do filtro prensa consiste nas seguintes etapas: a) Determinação do tipo e teor de floculante; b) Determinação da diluição ótima; c) Teste dinâmico de espessamento.

a) Determinação do tipo e teor de floculante

O menor tempo de sedimentação dos sólidos na polpa de rejeito está diretamente ligado à eficiência do processo de espessamento. O uso de floculantes na polpa de rejeito acelera a completa sedimentação, favorecendo a formação de um *underflow* (polpa sedimentada) mais denso em menos tempo, com um *overflow* (camada de água sobre o *underflow*) mais clarificado. Diferentes tipos de floculantes podem gerar diferentes tempos de sedimentação na polpa, com diferentes resultados de clarificação do *overflow*. Por isso selecionou-se 4 tipos de floculantes para testar sua eficiência na sedimentação da polpa. Os floculantes selecionados são:

- Kemira: A-130 V
- SNF do Brasil: 934 SH
- Solenis: 2515 TR
- Solenis: 2640 Z

Diluiu-se todos os floculantes testados na proporção de 0,25g por litro de água e, a partir dessa concentração, calculou-se os teores de floculante utilizados nos testes. Os procedimentos para determinação do teor e tipo de floculante utilizados nos testes de espessamento de polpa seguiram a seguinte rotina:

- Preparação da polpa com agitação mecânica para homogeneização.
- Enchimento de uma proveta graduada com 500 ml de polpa.

- Mistura de floculante na polpa, para medição do tempo de sedimentação dos flocos formados, usando como referência o tempo que a superfície do *underflow* leva para atravessar as graduações da proveta entre 450 ml e 350 ml.

- O primeiro teste é realizado misturando na polpa uma quantidade de floculante referente a 45g por tonelada de massa sólida de rejeito. Depois são realizados ensaios utilizando mais 5 incrementos de 15g por tonelada de massa seca de rejeito. Desta forma, para cada floculante testado experimentou-se os seguintes teores na mistura com rejeito: 45 g/t, 60 g/t, 75g/t, 90 g/t, 105 g/t e 120 g/t.

- Com base na velocidade de sedimentação do *underflow* e qualidade de clarificação do *overflow*, selecionou-se o tipo e teor de floculante.

b) Determinação da diluição ótima

Esse teste é necessário para determinar qual o teor de sólidos ótimo para reduzir o tempo de sedimentação das partículas sólidas da polpa de rejeito e, conseqüentemente, aumentar a velocidade de formação do *underflow*.

Em polpas com teores de sólidos acima do teor ótimo acontece o fenômeno de sedimentação retardada, pois os flocos colidem uns nos outros com mais frequência, interferindo assim na livre trajetória de sedimentação. Já em polpas com teores de sólidos abaixo do teor ótimo há menor volume de sólidos para uma mais rápida formação de *underflow*.

Na determinação da diluição ótima, a polpa é preparada com a quantidade predefinida de floculante, agitada em proveta, e colocada para sedimentar.

Durante a sedimentação é calculado o tempo de deslocamento da superfície que separa o *overflow* do *underflow*, até a formação final da polpa espessada no fundo da proveta. Conforme essa superfície desce na proveta ocorre de forma proporcional o aumento do teor de sólidos. Então medindo-se a velocidade de descida dessa superfície e calculando o aumento do teor de sólidos, é possível verificar uma relação entre o teor de sólidos e a velocidade de decantação.

Maiores detalhes sobre essa metodologia não poderão ser divulgados ao público, por ser tratar de propriedade intelectual não autorizada para publicação.

c) Testes Dinâmicos de Espessamento

O teste dinâmico consiste numa simulação de um espessador, em que no teste de bancada são realizados ensaios com variações na taxa unitária de alimentação (t/m^2h), para que possa ser avaliada a influência dessa taxa na qualidade do *underflow* e *overflow*.

Os procedimentos para realização dos testes dinâmicos de espessamento seguiram a seguinte rotina:

- Preparação, diluição e homogeneização da polpa com teor de sólidos obtido no ensaio de determinação da diluição ótima.
- Calibração da bomba de alimentação de polpa de rejeito para as taxas de alimentação de 0,04 t/m²h, 0,07 t/m²h e 0,10 t/m²h (tonelada seca por metro quadrado por hora). Estimou-se o valor dessas taxas para execução do ensaio, porém, depois de determinado o valor real do teor de sólidos da polpa utilizada nos testes, essas taxas tiveram os valores corrigidos.
- Calibração da bomba dosadora de floculante para alimentar o sistema com o teor de floculante selecionado.
- Após iniciado o ensaio de espessamento com as devidas calibrações das bombas, é monitorada a formação do *underflow* até que esse atinja dentro do espessador de bancada um volume aproximado de 2000 ml. Após o *underflow* atingir esse volume, o tempo de duração é anotado, e o *underflow* e *overflow* são coletados para os seguintes testes:

- i) Determinação do teor de sólidos do *underflow* formado.
- ii) Determinação da tensão cisalhante do *underflow* (informação que contribui para o dimensionamento das pás de circulação de polpa nos espessadores).
- iii) Determinação da turbidez do *overflow*.

Na Figura 3.6 é apresentado o espessador dinâmico de bancada, com diâmetro interno de 94 mm, utilizado na pesquisa. Uma das bombas alimenta o sistema com a vazão programada de rejeito, e a outra vai dosando o floculante que entra no sistema em dois diferentes pontos da mangueira condutora de rejeito, para que ocorra uma mistura mais homogênea. Então o rejeito já misturado com floculante entra pelo topo do espessador e é direcionado para o poço de alimentação (*feed well*), onde ocorre a separação entre sólidos floculados e líquido, e estes são direcionados para o fundo do espessador. A superfície do *overflow* é definida pela tubulação de saída no topo do espessador, e no fundo desse equipamento fica girando o raspador (*rake*), que é o responsável pela acomodação do *underflow* e direcionamento para o ponto de captação da bomba de sucção do *underflow*.

Figura 3. 6 - Espessador dinâmico de bancada - THI 94 mm



Fonte: O autor.

3.2.1.3 Ensaio de filtração

Realizou-se os ensaios de filtração num filtro prensa horizontal com placas do tipo diafragma, utilizando uma membrana do tipo LTOOX. A Figura 3.7 mostra o equipamento utilizado nos testes, no qual se procura descobrir a adequação do equipamento para uma filtração de polpa de rejeito de bauxita laterítica, e os parâmetros operacionais para esta pasta.

Figura 3. 7 - Filtro de teste do tipo prensa horizontal com diafragma



Fonte: O autor.

O equipamento possui as seguintes características técnicas:

- As dimensões principais são 1500 x 870 x 1300 mm (L x L x A);
- O peso do filtro de laboratório é de 520 kg;
- Área de filtração de 0,27 m² (área de face 0,135 m²);
- Filtragem em dois sentidos (1 câmara);
- Pressão operacional máxima para a unidade é de 16 bar;
- As placas de prensagem são feitas de AISI316L;
- Tubulação e válvulas são feitas de AISI316;
- O pacote da placa do filtro e a caixa da torta do filtro são feitos de polipropileno;
- Diafragma pressionado e vedação de borracha;
- A unidade hidráulica operada manualmente faz o fechamento do filtro. A pressão de operação máxima é igual a 700 bar;
- Opções de espessura da câmara: 25, 40 ou 50 mm;
- Volumes da câmara (ver Tabela 3.1).

Tabela 3. 1 - Volumes da câmara do filtro prensa de laboratório

Opções de câmara	Volume da membrana de placa	Volume da placa final	Volume total
25 mm	2,89 L	0	2,89 L
40 mm	2,89 L	1,88 L	4,77 L
50 mm	2,89 L	3,24 L	6,13 L

Fonte: O autor.

Os componentes do filtro prensa utilizados na pesquisa são os seguintes:

- Unidade hidráulica (dispositivo de fechamento), Enerpac Corp. (www.enerpac.com)
 - bomba hidráulica P392;
 - cilindro hidráulico RC504;
 - casa HC7203;
 - calibre G2535;
 - válvula de controle de pressão V-82a.

- Booster de ar, SC Hydraulic Engineering Corp. (www.schydraulic.com)
 - impulsionador de ar AB-4;
 - operado a ar;
 - tem relação 4: 1, irá aumentar a pressão quatro vezes a pressão da linha;
 - a pressão máxima de operação é de 16 bar.

- Reguladores, Festo Oy (www.festo.com)
 - regulador principal LFR-1/2-D-5M-MIDI;
 - pressionando o regulador de ar LR-1/4-D-MINI.

- Medidor de fluxo de ar, Kytölä Oy (www.kytola.com)
 - medidor de vazão de ar VLK-0A13.

Realizando os testes de deságue de polpa de rejeito no filtro prensa, os resultados obtidos ao final da bateria de ensaios são:

- a duração total do tempo de ciclo incluindo as fases individuais [min];
- capacidade de filtragem [l / m^2h ou kg / m^2h d.s.];
- umidade residual na torta [%];

- sólidos no filtrado [mg / L];
- quantidade de líquido de lavagem necessário [L / kg de líquido de lavagem por conteúdo de sólidos secos na torta, L / L de líquido de lavagem por volume de alimentação];
- o resultado para a torta lavada;
- consumo de ar [$\text{m}^3 / \text{m}^2\text{min}$];
- escolha da membrana de filtro.

O equipamento utilizado nos testes de deságue da polpa possui área de filtração de $0,27 \text{ m}^2$ (área de face $0,135 \text{ m}^2$), com filtragem em dois sentidos (1 câmara), tendo uma pressão operacional máxima para a unidade de 16 bar. O pacote da placa do filtro e a caixa de torta do filtro são feitos de polipropileno com vedação de borracha.

Definidos os objetivos do teste, as condições relativas à alimentação devem ser definidas e registradas claramente antes de iniciar o procedimento de ensaio, a saber: a estrutura química do rejeito, a densidade, temperatura e pH da polpa de alimentação e o tamanho de partículas. Essas variáveis devem ser mantidas durante o teste, e quaisquer alterações devem ser registradas na folha de dados.

Os resultados-alvo da filtração de teste, basicamente são:

- a mais baixa umidade possível da torta;
- o filtrado mais claro possível;
- o resultado mais econômico da lavagem de tortas;
- o melhor tipo de filtro.

Os fatores que afetam a escolha do tecido do filtro são:

- temperatura da alimentação;
- pH;
- distribuição granulométrica;
- os requisitos de conteúdo de sólidos para o filtrado.

Os tipos de tecidos e suas especificações de utilização estão apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Opções de pano de filtro

Tipo de Pano	S1107-L2K2	S1123-L2K2	S1114-L2K2
pH	0 a 14	0 a 14	0 a 14
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	0 a 80	0 a 80	0 a 80
Permeabilidade ao ar com 200 Pa ($\text{m}^3/\text{m}^2\text{min}$)	2,1	0,3	6,5

Fonte: O autor.

O tamanho do tecido de filtração para a unidade utilizado nesse trabalho é de 570 x 620 mm (L x L). Os tecidos são marcados com letra M (para placa de membrana) e E (para placa final).

Se partículas muito pequenas estiverem presentes em uma alimentação ou se for necessário um filtrado muito limpo, um tecido de filtro de menor abertura deve ser escolhido. Caso contrário, a escolha do tecido de filtro é feita de acordo com as limitações de temperatura e pH.

Na preparação da polpa deve haver alimentação suficiente para o procedimento de teste (deve-se evitar o despulpamento, porque as características de filtração da alimentação podem mudar). A quantidade de polpa necessária para um teste completo depende do conteúdo de alimentação e de suas características de filtração. O objetivo é fazer todos os testes necessários para otimizar os tempos de bombeamento, prensagem e secagem ao ar. O tempo de lavagem e os resultados são otimizados nos testes em que a lavagem da torta é necessária.

Para preparar o filtro de teste para operação esse deve ser colocado sobre uma base adequada para tornar as condições de trabalho agradáveis. Também deverá haver espaço de trabalho suficiente ao redor do equipamento. A pressão de ar deve ser ligada com valor igual ou superior a 5 bar. Se a lavagem da torta estiver incluída no teste, deve ser preparado um recipiente de líquido de lavagem, de onde esse possa ser bombeado e medido. É preciso que seja certificado que a pasta esteja bem misturada, homogênea e representativa. Para garantir isso, a mesma deve ser bem misturada em um tanque e a polpa recirculada constantemente antes do teste.

São necessários os seguintes acessórios para os testes de filtração:

- um recipiente para recolher o filtrado e / ou o filtrado da lavagem;
- termômetro 0-100 °C;
- Indicador de pH ou papéis de pH;
- medidor de condutividade;
- escala para medir o peso da torta e do filtrado;
- cronômetro;
- calculadora;
- sacos de amostras e garrafas;
- conjunto de medição de umidade ou forno e balança de precisão;
- escala de densidade de alimentação ou vidro de medição de 1000 ml;
- marcador;
- folhas de dados e um caderno.

O esquema de funcionamento do filtro prensa horizontal do tipo diafragma, utilizado nesse trabalho, pode ser verificado na sequência de etapas apresentadas a seguir, e ilustradas nos croquis da Figura 3.8.

Etapa 1: O Filtro prensa é alimentado com a polpa de rejeito no teor de sólidos pré-determinado, até preencher todas as câmaras do equipamento.

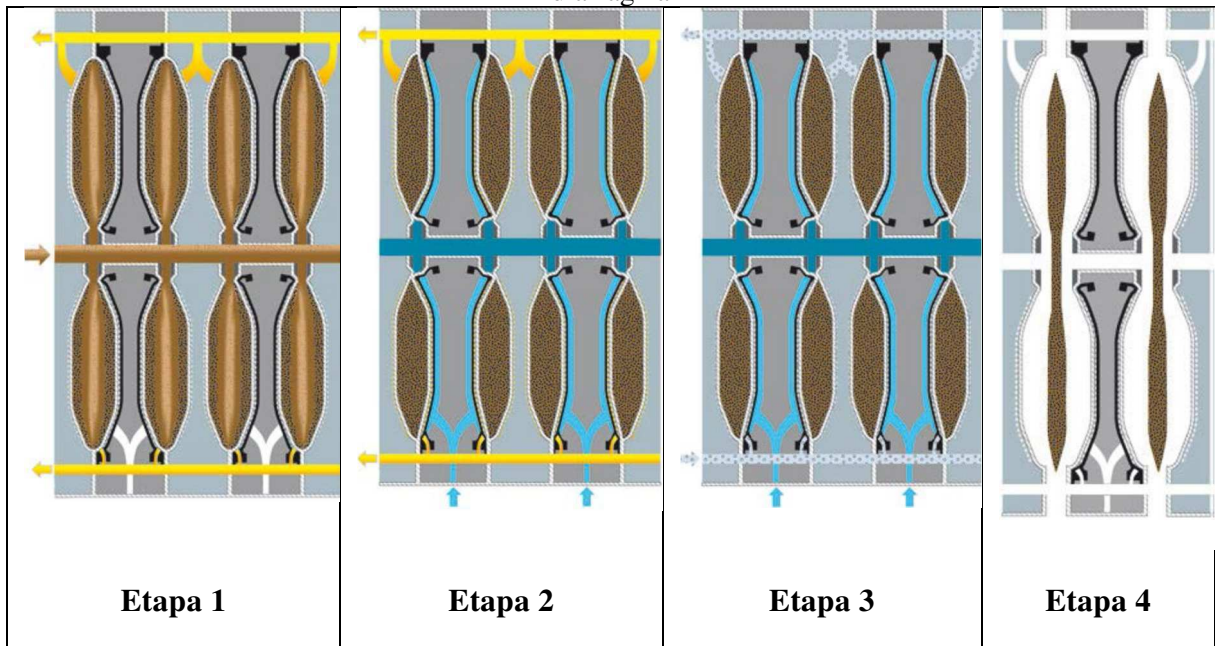
Etapa 2: O booster de ar começa a bombear o ar atrás do diafragma, com a pressão ajustada até o nível desejado (com pressão máxima de 16 bar), forçando o filtrado a fluir pelo tecido filtrante. Este é drenado para fora do sistema e coletado para verificação do teor de sólidos e clarificação. Quando o fluxo do filtrado parar, deve ser fechada a válvula de pressão de ar.

Etapa 3: Deve ser fechada a válvula de filtração e aberta a válvula de secagem a ar, mantendo a pressão do diafragma, porém com a válvula de pressão de ar fechada. Assim o ar começa a entrar pelo lado da membrana e fluir através da torta, saindo pelo tecido filtrante e forçando a saída de mais filtrado, reduzindo assim o teor de umidade da torta. Quando o fluxo do filtrado parar, devem ser fechadas as válvulas de secagem a ar e filtração.

Etapa 4: Abertura da válvula de liberação de pressão, permitindo que a pressão saia da unidade hidráulica. Antes de abrir o filtro todos os manômetros devem ser verificados para certificar que não haja pressão na lateral da embalagem da placa. A câmara deve ser aberta para retirada da torta, que deverá ter espessura e peso conhecidos para análises mais aprofundadas.

Após realização dos testes o tecido filtrante deve ser limpo para o próximo teste. O nível de facilidade de limpeza do tecido deve ser verificado para fins de entendimento das aplicações práticas em nível industrial.

Figura 3. 8 - Croquis com a sequência de funcionamento dos testes no filtro prensa horizontal do tipo diafragma



Fonte: O autor.

3.2.2 Seção de projeto conceitual de depósito de rejeito de mineração de bauxita com disposição a seco

Neste item apresentam-se as metodologias para determinação da seção de projeto do depósito de disposição à seco. Inicialmente caracteriza-se o rejeito nas condições após deságue no filtro prensa, e realizam-se os ensaios geotécnicos simulando as condições previstas para o rejeito estocado na zona seca e zona úmida do depósito (*dry stack*).

3.2.2.1 Teores de umidade do rejeito para simulações do depósito *dry stack*

Para simular condições de campo a serem avaliadas nos ensaios de laboratório dessa pesquisa, realizou-se ensaios no rejeito em diferentes teores de umidade. Escolheu-se esses teores de umidade testados, tendo como base a experiência construtiva do depósito *dry stack* executado na Hydro Alunorte. Com base nessa referência construtiva, realizou-se testes no rejeito com os seguintes teores de umidade:

- Rejeito na umidade ótima de compactação (W_{ot}) na energia Proctor normal, para obter dados referentes ao máximo peso específico seco aparente que poderá ocorrer na zona seca, em condições adequadas de compactação.

- Rejeito na umidade ótima mais 4% de umidade ($W_{ot+4\%}$), para testar as propriedades mecânicas na umidade de transição entre zona seca e zona úmida. Uma vez que esse teor de umidade foi definido como o máximo teor de umidade aceito na zona seca, para estudos preliminares de projeto.

- Rejeito na umidade ótima mais 6% de umidade ($W_{ot+6\%}$), para testar as propriedades mecânicas do rejeito compactado na zona úmida. Esse teor de umidade foi selecionado em função das limitações de confecção de corpos de prova com umidades superiores a essa. O valor de 6% representa a média entre os valores de 4% e 8% de umidade acima da umidade ótima, tendo em vista que umidades perto de 8% dificultam as operações de disposição e compactação na zona úmida, e por isso esse passa a ser o limite de transição entre a zona úmida e a célula de emergência.

Esses valores estimados são um ponto de partida para o trabalho proposto e definidos com base em experiências de campo do autor e em projetos da projetista consultada. Cabe ressaltar que os reais teores de umidade limites para seleção de áreas de disposição de rejeito só podem ser definidos, de forma prática, mediante a realização de pistas experimentais construídas com os equipamentos de terraplanagem selecionados para construção do depósito de rejeito.

As variações de umidade do rejeito mencionadas acima servem para caracterizar o comportamento estrutural do depósito em condições normais de operação.

3.2.2.2 Análise granulométrica e peso específico dos grãos

Determinou-se os pesos específicos dos grãos seguindo o procedimento apresentado na NBR 6508 (ABNT, 1984_d).

A análise granulométrica do rejeito foi obtida mediante pesquisa em relatórios técnicos do empreendimento, realizados de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 1984_a), e também através da realização de ensaios de granulometria por cicloclassificação.

A sequência dos procedimentos para realizar os ensaios de cicloclassificação está apresentada a seguir:

1. Determinar a umidade da amostra e anotar na “Planilha de teste Cyclosizer”, caso necessário.
2. Pesar com precisão o equivalente a cerca de 50g de amostra seca e transferir para um béquer de vidro;
3. Preparar uma polpa de diluição de cerca 50% de sólidos em peso e agitar com o bastão de vidro;

4. Retirar o dispositivo de armazenamento de polpa do cyclosizer e abri-lo completamente.
5. Adicionar a polpa no dispositivo e com o auxílio da piceta lavar o resto do material do béquer, assegurando que o mesmo seja todo transferido para dentro do dispositivo.
6. Completar o volume do dispositivo com água.
7. Fechar a válvula do dispositivo de forma que toda a polpa fique confinada dentro do mesmo.
8. Fixar o dispositivo ao cicloclassificador.
9. Ligar a chave geral do cicloclassificador.
10. Abrir o registro da alimentação da água do cyclosizer.
11. Conferir se o reservatório de água está cheio.
12. Conferir se todos os ciclones estão fechados.
13. Ligar o cyclosizer colocando a chave na posição LIG.
14. Abrir o registro de vazão do cicloclassificador até aproximadamente 800l/h.
15. Esperar que água circule em todos os ciclones.
16. Retirar todo o ar aprisionado nos ciclones, abrindo-os até que todas as bolhas sejam retiradas. Isso deve ser feito ciclone por ciclone e logo que as bolhas saírem os mesmos deverão ser novamente fechados;
17. Abrir a válvula de retenção do reservatório de polpa, até que a água turve nos ciclones e então fecha-la.
18. Se for o caso de coletar o overflow para análise, recolher em um balde, transferindo-o para a bombona com o auxílio da bomba.
19. Repetir o passo 17 até que a água no reservatório clareie o que indica o final da distribuição.
20. Programar o temporizador fixado no cicloclassificador para 10 min. Colocando a chave na posição TEMP.
21. Reduzir a vazão para aproximadamente 700l/h.
22. No último minuto pegar a “Planilha Teste Cyclosizer” e anotar as condições do teste (temperatura e tempo de elutriação) que são obtidos nos instrumentos do painel do equipamento.
23. Quando terminar o tempo de 10 min de elutriação uma sirene irá tocar indicando o final do mesmo.
24. Determinar a umidade da amostra e anotar na “Planilha de teste Cyclosizer”, caso necessário.
25. Pesar com precisão o equivalente a cerca de 50g de amostra seca e transferir para um béquer de vidro;
26. Preparar uma polpa de diluição de cerca 50% de sólidos em peso e agitar com o bastão de vidro;
27. Retirar o dispositivo de armazenamento de polpa do cyclosizer e abri-lo completamente.
28. Adicionar a polpa no dispositivo e com o auxílio da piceta lavar o resto do material do béquer, assegurando que o mesmo seja todo transferido para dentro do dispositivo.
29. Completar o volume do dispositivo com água.
30. Fechar a válvula do dispositivo de forma que toda a polpa fique confinada dentro do mesmo.
31. Fixar o dispositivo ao cicloclassificador.
32. Ligar a chave geral do cicloclassificador.
33. Abrir o registro da alimentação da água do cyclosizer.
34. Conferir se o reservatório de água está cheio.
35. Conferir se todos os ciclones estão fechados.
36. Ligar o cyclosizer colocando a chave na posição LIG.
37. Abrir o registro de vazão do cicloclassificador até aproximadamente 800l/h.

38. Esperar que água circule em todos os ciclones.
39. Retirar todo o ar aprisionado nos ciclones, abrindo-os até que todas as bolhas sejam retiradas. Isso deve ser feito ciclone por ciclone e logo que as bolhas saírem os mesmos deverão ser novamente fechados;
40. Abrir a válvula de retenção do reservatório de polpa, até que a água turve nos ciclones e então fecha-la.
41. Se for o caso de coletar o overflow para análise, recolher em um balde, transferindo-o para a bombona com o auxílio da bomba.
42. Repetir o passo 17 até que a água no reservatório clareie o que indica o final da distribuição.
43. Programar o temporizador fixado no cicloclassificador para 10 min. Colocando a chave na posição TEMP.
44. Reduzir a vazão para aproximadamente 700l/h.
45. No último minuto pegar a “Planilha Teste Cyclosizer” e anotar as condições do teste (temperatura e tempo de elutriação) que são obtidos nos instrumentos do painel do equipamento.
46. Quando terminar o tempo de 10 min de elutriação uma sirene irá tocar indicando o final do mesmo.
47. Desligar o temporizador e colocar a chave novamente na posição LIG.
48. Passar a vazão para 800l/h.
49. Coletar o underflow de cada ciclone começando da direita para a esquerda em bandejas separadas que devem conter a identificação da amostra e o ciclone pertencente.
50. Após a coleta, fechar o registro de vazão do cicloclassificador e desliga-lo, colocando a chave na posição DESL.
51. Abrir todos os ciclones para esgotamento da água.
52. Fechar todos os registros.
53. Desligar a chave geral;
54. Tirar o reservatório de polpa e esgotar a água contida no mesmo.
55. Após tirar a água do reservatório fixá-lo novamente ao cicloclassificador;
56. Deixar decantar o material das bandejas, verter o excesso de água, tomando cuidado para não perder material.
57. Esperar o overflow decantar, sinfonar a água.
58. Filtrar o overflow e colocar em uma bandeja.
59. Colocar as bandejas em estufa para secar.
60. Registrar os resultados na “Planilha de teste de Cyclosizer”(RG.020).

3.2.2.3 Limites de Atterberg

Determinaram-se os limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP) de acordo com as normas NBR 6459 (ABNT, 1984_b) e NBR 7180m (ABNT, 1984_c), respectivamente.

3.2.2.4 Ensaios de compactação

Realizaram-se ensaios de compactação na energia do ensaio Proctor normal, conforme descrito na NBR 7182 (ABNT, 1986_b), para determinação do peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e da umidade ótima (W_{ot}) do rejeito.

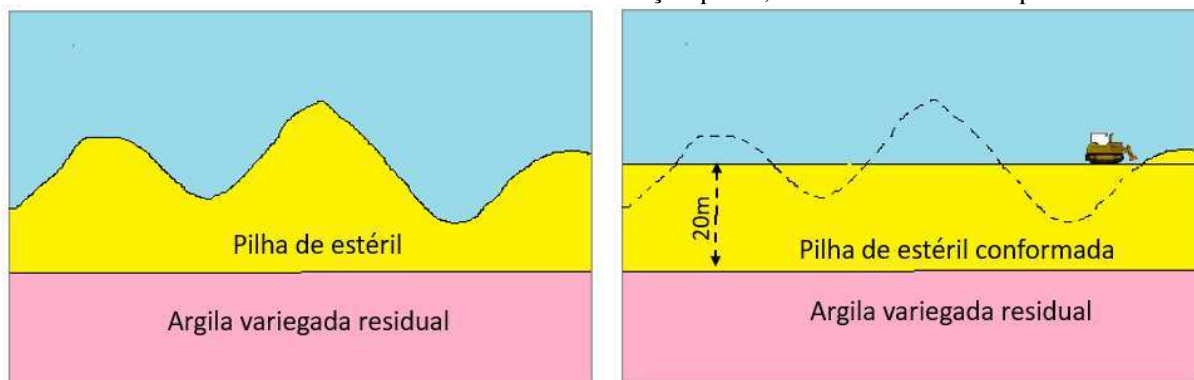
3.2.2.5 Definição do projeto conceitual de depósito *dry stack*

O projeto conceitual definido nesse trabalho deverá atender a produção de rejeito do empreendimento de estudo por 10 anos. A seção geométrica do depósito foi dividida em zona seca e zona úmida, de modo a atender ao balanço de massa estabelecido em função do histórico de chuvas na região. A altura máxima do depósito foi de 70 m, e a altura e largura das bancadas foram definidas de modo a atender as análises de estabilidade da seção.

Para as fundações desse depósito foi considerado que o mesmo será construído sobre pilhas de estéril, depositadas sobre o fundo da área de lavra do empreendimento. Essa é uma consideração realista ao empreendimento, pois os atuais reservatórios de secagem são construídos sobre esse tipo de fundação. A espessura da camada de estéril foi considerada nesse trabalho tendo 20 metros de toda extensão do depósito *dry stack*, admitindo-se que antes da execução desse, as pilhas de estéril sob o offset do projeto serão regularizadas com trator de esteira, cortando picos de pilha e aterrando depressões, deixando plano toda camada do estéril.

A Figura 3.9 apresenta, como exemplo, a consideração do preparo de fundação para construção do depósito *dry stack* sobre uma camada de 20 m de estéril.

Figura 3.9 -Consideração do projeto conceitual, em que as pilhas de estéril são regularizadas com trator de esteira até formar uma camada de fundação plana, com 20 metros de espessura



Fonte: O autor.

Esse projeto conceitual do depósito *dry stack* embasará o comparativo dessa estrutura com os tradicionais reservatórios de secagem, utilizados no empreendimento.

A análise de estabilidade da seção foi realizada mediante análises bidimensionais de equilíbrio limite com o software Slide da Rocscience. O fator de segurança (FS) mínimo aceitável foi de 1,5 para condições drenadas.

3.2.2.6 Determinação da envoltória de ruptura do depósito *dry stack*

Os parâmetros geotécnicos do depósito foram obtidos a partir de ensaios triaxiais realizados nesse trabalho, em que para a zona seca considerou-se a média dos parâmetros obtidos para os ensaios com o rejeito compactado na energia Proctor normal, na umidade ótima, e também com umidade 4% acima dessa ótima. Para a zona úmida considerou-se os parâmetros para uma umidade 6% acima da umidade ótima, na mesma energia de compactação, conforme explicado no item 3.2.2.1.

Realizou-se ensaios triaxiais do tipo adensado não drenado (CIU) em corpos de provas compactados em laboratório com a intenção de simular as condições de campo dos materiais do depósito. Por isso confeccionou-se os corpos de prova segundo os critérios de umidade definidos no item 3.2.2.1. Executou-se esses ensaios com 4 níveis de tensões de adensamento, com valores de 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa e 600 kPa. O resumo de ensaios está apresentado na Tabela 3.3.

Tabela 3. 3 - Bateria de ensaios triaxiais para simulação da *dry stack*

Ensaio	Triaxial – 4 níveis de tensões: 100, 200, 400 e 600 kPa	Objetivo
1	CIU – Rejeito Wot%	Simular as condições da zona seca
2	CIU – Rejeito Wot + 4%	
3	CIU – Rejeito Wot + 6%	Simular as condições da zona úmida

Fonte: O autor.

Os parâmetros geotécnicos de fundação (camada de estéril e camada de argila variegada) foram obtidos no levantamento de dados disponíveis em relatórios técnicos disponibilizados pelo empreendimento, cujo os resultados estão apresentados no Capítulo 4.

3.2.3 Estabilização da zona úmida com aterro de emergência

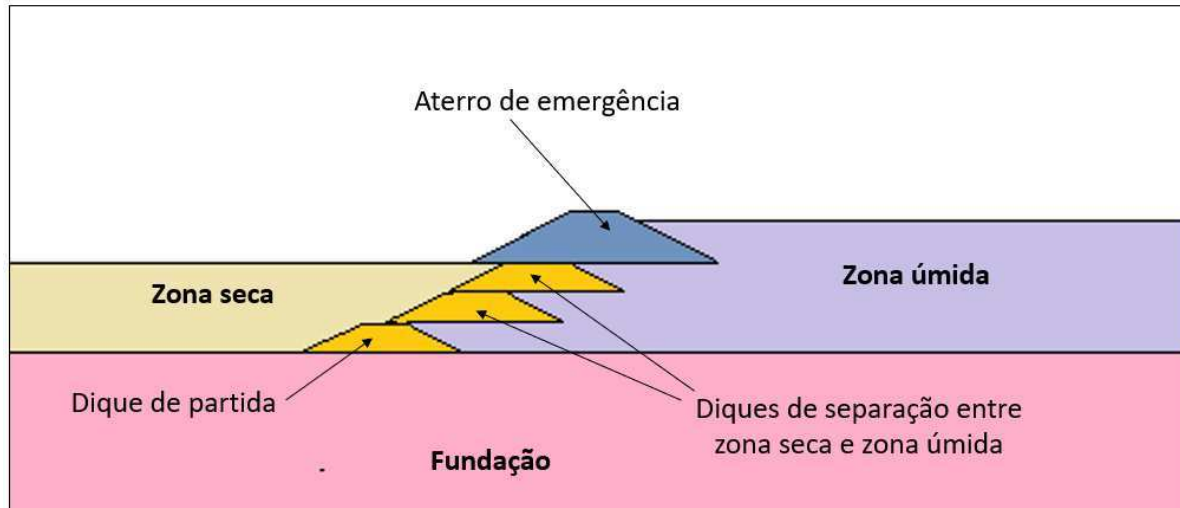
Os projetos de mineração são realizados de maneira que exista equilíbrio entre os condicionantes técnicos e econômicos, buscando planejamento estratégico para controlar todas as dificuldades em atingir os seus objetivos. A execução de um projeto de depósito de disposição a seco envolve variáveis operacionais e climáticas que, se não forem consideradas, podem levar ao fracasso do investimento. Essas variáveis operacionais que podem comprometer a logística de construção do depósito relacionam-se a problemas de transporte do rejeito ou problemas de produção na planta industrial. Entretanto, essas condições adversas não foram tratadas nesse trabalho, pois envolvem questões técnicas de outras estruturas minerárias, no campo da engenharia mecânica, que fogem do escopo proposto. A prevenção quanto ao resultado dessas adversidades na construção desse depósito, todavia, é parte desse trabalho.

Durante a fase construtiva do depósito (*dry stack*), em condições normais de operação, o aterro da zona seca deve estar sempre numa cota superior ao aterro da zona úmida para que haja o equilíbrio estrutural. Porém, descontroles no balanço de massa, podem fazer com que a disposição prevista na zona seca não seja suficiente para conter o crescimento da zona úmida, acarretando assim na possibilidade de redução significativa da vida útil do depósito, ou mesmo na paralisação da planta de beneficiamento de bauxita.

Para o empreendimento de estudo, o plano de emergência será a construção, no período chuvoso, de um aterro compactado feito da mistura de rejeito, areia e cimento, cujo o objetivo é o de confinar o aterro da zona úmida, enquanto não chega o período de estiagem para construção do aterro da zona seca. Entretanto, nos dias de estiagem dentro do período chuvoso, quando possível, o aterro de emergência poderá ser construído com o rejeito puro, próximo da umidade ótima de compactação. Por tanto o aterro de emergência poderá ser constituído numa parte com mistura de rejeito úmido, areia e cimento (nos dias de maior umidade no rejeito) e outra parte com rejeito puro (nos dias mais secos quando for possível chegar próximo da umidade ótima de compactação).

O aterro de emergência definido nesse trabalho, foi projetado em forma de barramento na transição entre a zona seca e a zona úmida, conforme exemplifica o croqui da Figura 3.10.

Figura 3. 10 - Croqui apresentando o aterro de emergência construído no período chuvoso em situações em que a zona úmida supera a cota da zona seca



Fonte: O autor.

As metodologias para determinação desse plano de emergência estão apresentadas nos itens a seguir e seguem a seguinte lógica:

- análises de estabilidade considerando-se para o aterro de emergência os mesmos parâmetros geotécnicos encontrados para o rejeito na zona seca;
- definição os teores de umidade utilizados na mistura de rejeito e areia;
- definição das porcentagens de areia e cimento na mistura do aterro de emergência e;
- ensaios de compressão não confinada nas misturas para que se verifique as condições dessas se igualarem à resistência do rejeito representativo da zona seca.

3.2.3.1 Análise de estabilidade do aterro de emergência

Com base nos parâmetros geotécnicos obtidos conforme metodologia do item 3.2.2.6 realizou-se análises de estabilidade pelo método do equilíbrio limite utilizando o software Slide, da Rocscience, com o objetivo de se definir a geometria desse aterro de emergência para conter o aterro da zona úmida, com fator de segurança (FS) mínimo de 1,3. Para o aterro de emergência foram utilizados os parâmetros geotécnicos obtidos para o rejeito compactado na umidade ótima de compactação, pois esse material possui a resistência mínima esperada para esse aterro. Afinal é possível planejar a construção do aterro de emergência de modo a se utilizar nos dias de estiagem o rejeito na umidade ótima de compactação. Então esse aterro poderá ser construído com uma mescla de rejeito na umidade ótima (nos dias de estiagem) e mistura de rejeito úmido, areia e cimento (nos dias mais úmidos).

A utilização de um FS mínimo de 1,3 para o aterro de emergência, enquanto que para o depósito o FS mínimo foi de 1,5, deve-se ao fato de que o aterro de emergência é considerado uma obra de contenção provisória, realizada na transição entre a área destinada para zona seca e a área destinada para zona úmida, e portanto será posteriormente equilibrado pelo aterro da zona seca, conforme geometria definida para a seção de projeto conceitual.

Foram realizadas simulações avaliando a estabilidade do aterro de emergência tanto para montante quanto para jusante, e também após construção do aterro sobre a zona úmida (antes do carregamento do material da zona úmida), e também após o carregamento do material da zona úmida. Foram também avaliadas diferentes alturas do aterro de emergência.

3.2.3.2 Teores de umidade utilizados na mistura de rejeito com areia para simular condições de execução do plano de emergência

Para testar materiais a serem usados num plano de ação necessário para mitigar essas diversidades operacionais descritas anteriormente foi proposta uma mistura de rejeito com areia, com a adição de diferentes teores de cimento, para que sejam estudadas as possibilidades de reforço estrutural da zona úmida através do melhoramento do solo, com a diminuição da plasticidade e aumento da resistência. O teor de umidade da mistura (rejeito e areia) realizado nesse trabalho foi definido de modo a representar em laboratório as condições esperadas nos trabalhos de campo durante a execução desse plano de emergência.

A) Teor de umidade do rejeito para mistura

Os problemas de desequilíbrio no balanço de massa só ocorrem em períodos chuvosos, em que o volume da zona seca estimado para os meses seguintes não seja capaz de confinar o volume da zona úmida acima do previsto para o mesmo período. Por isso, nesse trabalho, o rejeito a ser misturado na areia para posterior adição de cimento, deverá estar nas condições esperadas em campo para o rejeito durante as épocas chuvosas.

Por isso, para representar a massa de rejeito a ser utilizada na mistura para o plano de emergência de contenção da zona úmida, foi definida a utilização do teor de umidade referente ao limite de transição ($W_{ot + 4\%}$) entre zona seca e úmida.

B) Teor de umidade da areia

O teor de umidade da areia que foi utilizada nas misturas com rejeito e cimento para simulação do aterro de emergência do depósito, foi encontrado com base na média de 10 valores obtidos em diferentes porções de um depósito representativo da areia encontrada próximo ao empreendimento de estudo. A coleta da areia foi realizada no mês de janeiro de 2018, que é um mês representativo do período chuvoso.

C) Teor de umidade da mistura (rejeito e areia)

É o valor resultante da mistura realizada com base nas massas úmidas de rejeito e areia, considerando as proporções a serem definidas conforme item a seguir.

3.2.3.3 Porcentagens de areia na mistura com rejeito

Para definir a porcentagem de areia no aterro do plano de emergência realizou-se análises táteis visuais em misturas de rejeito e areia, nas seguintes porcentagens de areia: 5%, 10%, 15% e 20%. As relações entre massas secas das misturas realizadas estão apresentadas no capítulo de resultados e discussões, na Tabela 4.16 (página 132).

Essas proporções testadas na mistura realizaram-se com base nas suas massas úmidas, sendo que o rejeito deverá estar com a umidade no ramo úmido ($W\%_{\text{ótimo}} + 4\%$) e a areia na umidade de campo, conforme definido no item 3.2.3.2.

Com base nos resultados foi selecionada a porcentagem de areia que servirá como ponto de partida para avaliações estruturais da mistura de areia, cimento e rejeito. Nessa seleção foi levado em consideração o menor volume de areia capaz de gerar uma redução significativa da plasticidade da mistura. Portanto não foi realizado nesse trabalho um estudo da porcentagem ótima de areia a ser utilizada nessa mistura, e nem uma avaliação econômica. Tais trabalhos deverão ser realizados no caso da elaboração de um projeto detalhado do depósito a seco.

3.2.3.4 Porcentagens de cimento na mistura para aterro de emergência

O objetivo da utilização de cimento na mistura (rejeito e areia) preparada para o aterro de emergência deve-se ao acréscimo de resistência que esse agente é capaz de proporcionar. Certamente, quanto maior a porcentagem de cimento, maior será a resistência da mistura. Entretanto, os custos de se misturar cimento em material de aterro podem inviabilizar sua utilização, e por isso foi testado nesse trabalho o uso de baixas porcentagens de cimento para verificação do incremento de resistência na mistura. As porcentagens selecionadas para os

testes de compressão não confinada são de 1%, 2% e 4% de cimento em relação à massa seca da mistura.

3.2.3.5 Ensaio de compressão não confinada

Com a intenção de conhecer a resistência mecânica à compressão axial não confinada da mistura (rejeito mais areia) com adição de cimento, realizou-se os ensaios apresentados na Tabela 3.4. Como a possível necessidade de um plano de emergência só ocorreria no período de formação da zona úmida, todas as misturas definidas para os ensaios foram realizadas com o rejeito na umidade de transição entre zona seca e zona úmida ($W_{ot} + 4\%$), acrescido de frações de areia regional e cimento. A exceção foi na realização do ensaio em que se pretende testar a resistência da mistura quando compactada nos parâmetros ótimos de compactação (Proctor Normal), e também os ensaios no rejeito puro compactado próximo da umidade ótima para que sirva de comparação.

Tabela 3. 4 - Variação dos ensaios de compressão axial não confinada

Ensaio (3 repetições)	Compressão Axial Não Confinada
1	Rejeito na $W\%$ (ótima + 4%) + areia* + 0% cimento
2	Rejeito na $W\%$ (ótima + 4%) + areia* + 1% cimento - 7 dias de cura
3	Rejeito na $W\%$ (ótima + 4%) + areia* + 2% cimento - 7 dias de cura
4	Rejeito na $W\%$ (ótima + 4%) + areia* + 4% cimento - 7 dias de cura
5	Rejeito na $W\%$ (ótima + 4%) + areia* + cimento** - 7 dias de cura 1 horas de descanso
6	Rejeito na $W\%$ (ótima + 4%) + areia* + cimento** - 7 dias de cura 2 horas de descanso
7	Rejeito na $W\%$ (ótima + 4%) + areia* + cimento** - 7 dias de cura 4 horas de descanso
8	Rejeito na $W\%$ (ótima + 4%) + areia* + cimento** - 28 dias de cura
9	Rejeito + areia* + cimento** - 28 dias de cura – na umidade ótima de compactação para essa mistura.
10	Rejeito na umidade ótima de compactação

Notas: *Porcentagem de areia definida conforme item 3.2.3.3

** Porcentagem de cimento definida conforme avaliação de resultados dos ensaios de 2 a 4.

Fonte: O autor.

Os motivos para escolha das misturas nos corpos de prova de cada ensaio, são apresentadas a seguir.

Para os ensaios 1, 2, 3 e 4, a intenção é verificar o ganho de resistência na mistura de rejeito e areia com variações nos teores de cimento, para o tempo de cura de 7 dias. A escolha de se definir o tempo de cura de 7 dias para esses ensaios se deve a possibilidade de que em 7 dias após a compactação do aterro de emergência a zona úmida já possa estar exercendo tensões a montante desse. A quantidade de areia nessas misturas foi definida conforme item 3.2.3.3.

Nos ensaios 5, 6 e 7, pretendeu-se verificar a variação na resistência de uma mistura de rejeito, areia e cimento, em função do tempo de espera para compactação após realizada a mistura. O teor de cimento foi definido após verificação dos resultados dos ensaios 2, 3 e 4, e a quantidade de areia nessas misturas foi definida conforme item 3.2.3.3.

O ensaio 8 foi realizado para verificar o incremento de resistência para 28 dias de cura quando comparado com um dos resultados obtidos nos ensaios 2, 3 e 4 (7 dias de cura), em função da definição do teor de cimento a ser testado no comparativo.

O ensaio 9 pretendeu averiguar a resistência obtida numa situação ideal de construção, em que o aterro emergencial seria compactado na umidade ótima da mistura (rejeito, areia e cimento) para o tempo de cura de 28 dias.

O ensaio 10 foi realizado para se verificar a resistência do rejeito compactado na umidade ótima de compactação, para que sirva como base comparativa sobre o ganho de resistência nas misturas testadas nos ensaios anteriores. Pois nas análises de estabilidade do aterro de emergência utilizou-se os parâmetros geotécnicos do aterro da zona seca, e por isso espera-se encontrar uma mistura de rejeito úmido, areia e cimento que pelo menos atinja a resistência do rejeito compactado na umidade ótima.

De acordo com a norma NBR 7182 (ABNT, 1986b), compactaram-se os corpos-de-prova na energia Proctor normal por processo dinâmico em três camadas iguais, aplicando-se 26 golpes com soquete de massa igual 2,500 kg e altura de queda igual a 30,5 cm em cada camada, e utilizando-se o molde cilíndrico de 10,00 cm de diâmetro e 12,73 cm de altura (volume aproximado de 1000 cm³).

Os ensaios de compressão não confinada seguiram as recomendações na DNER-ME-201 (DNER, 1994a), que define o método realizar ensaio de compressão axial de corpos de provas cilíndricos de solo cimento, moldados conforme definição do método de ensaio DNER-ME-202 (DNER, 1994b).

O resultado para cada ensaio foi obtido através da média de resultados de três repetições, e para aceitação dos corpos-de-prova nessas repetições fixaram-se os seguintes limites em sua preparação (DNER, 1994_b): peso específico aparente seco $\pm 0,30 \text{ kN/m}^3$, e teor de umidade de $\pm 0,5\%$.

3.2.4 Análise comparativa entre um reservatório de polpa e um depósito do tipo *dry stack* para armazenamento de rejeito fino de bauxita

Normalmente a construção de reservatórios de disposição de rejeito de mineração de bauxita, ocupa grandes áreas no empreendimento. Como alternativa para armazenar o rejeito ocupando menores áreas tem sido utilizado o método de disposição a seco (*dry stack*), formando depósitos de rejeito com teor de sólidos alto o suficiente para que se atinjam umidades próximas da umidade ótima de compactação. Entretanto as diferenças entre um reservatório de polpa e um depósito de disposição a seco vão além dos espaços ocupados para cada estrutura de armazenamento. A construção dos sistemas e a operação são bastante distintas, e essa distinção deve ser apurada para que se defina qual o método de armazenamento de rejeito será o mais indicado para cada empreendimento.

O empreendimento minerário de estudo armazena o rejeito em reservatório de lançamento e secagem para adensamento. Com base nos resultados desse trabalho sobre a seção de projeto conceitual do depósito de disposição a seco, foi aqui apresentada a metodologia para o comparativo entre esse depósito e os reservatórios utilizados de rejeito adensado.

A sequência metodológica para o desenvolvimento dessa comparação consiste em:

- pesquisa de relatórios técnicos para utilização de resultados de estudos realizados no empreendimento, sobre a produção de rejeito e características geotécnicas do rejeito adensado nos reservatórios;
- pesquisa de relatórios técnicos para utilização de resultados de estudos realizados no empreendimento, sobre as seções de reservatórios projetados para armazenamento de rejeito adensado, para identificação da geometria de projeto e segurança estrutural;
- comparativo da capacidade de armazenamento de sólidos do rejeito, com base nas seções de projeto e;
- descrever as vantagens e desvantagens de cada um desses métodos de armazenamento de rejeito.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados de acordo com as metodologias apresentadas no capítulo 3.

4.1. Caracterização dos materiais de estudo

Os resultados dos ensaios realizados, e a caracterização dos materiais estão apresentados nessa seção.

4.1.1 Caracterização do rejeito de bauxita laterítica

Aqui apresenta-se o resultado das caracterizações do rejeito com base nos ensaios realizados, e também baseando-se em resultados de relatórios técnicos disponíveis no empreendimento.

4.1.1.1 Teores químicos

Para determinação dos valores médios de Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 e TiO_2 no rejeito foi obtida a média mensal desses teores com base na planilha de resultados dos ensaios diários fornecidos pela mineradora. A Tabela 4.1 mostra os valores médios mensais e o resultado médio geral para o período de amostragem. Além desses resultados de rotina diária, na Tabela 4.2 podem ser conhecidos outros teores químicos componentes do rejeito e que não são monitorados nos ensaios de rotina.

Tabela 4. 1 Médias mensais dos teores químicos

Mês	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
jan/17	11,03	23,98	21,62	3,36
fev/17	10,56	23,29	21,07	3,47
mar/17	10,73	25,12	21,10	3,49
abr/17	9,29	28,22	18,96	3,07
mai/17	8,94	28,60	16,11	3,12
jun/17	10,42	29,25	16,21	3,37
jul/17	9,34	27,76	17,99	3,32
ago/17	9,61	25,75	20,32	3,18
set/17	11,04	24,04	20,82	3,37
out/17	10,99	23,55	21,30	3,35
nov/17	11,67	23,70	21,92	3,53
dez/17	10,30	25,64	18,57	3,41
jan/18	11,35	24,10	21,07	3,15
fev/18	10,87	23,83	20,67	3,17
mar/18	11,07	22,48	21,36	3,50
Média geral	10,48	25,29	19,94	3,32

Fonte: O autor.

Tabela 4. 2 - Composição química do rejeito

AMOSTRA	TEOR (%)
SiO ₂ Total	26,07
Fe ₂ O ₃	16,70
TiO ₂	3,62
*PPC (Matéria Orgânica)	16,76
Al ₂ O ₃ Total	36,56
MgO	0,01
P ₂ O ₅	0,03
V ₂ O ₅	0,05
Cr ₂ O ₃	0,03
CuO	0,01
ZrO ₂	0,16
Total	100,00

Nota - *PPC: Perda por Calcinação.

Fonte: O autor.

Conforme registros em relatórios técnicos pertencentes ao empreendimento de estudo, com base na classificação de resíduos expressa na NBR 10.004 (ABNT, 2004), esse rejeito é classificado como Classe II B – Inerte, ou seja, não apresenta nenhum de seus constituintes, quando submetidos à solubilização, em concentrações superiores aos padrões estabelecidos por norma específica.

4.1.1.2 Granulometria

Para determinação dos valores médios da granulometria do rejeito foi obtida a média mensal desses teores com base na planilha de resultados dos ensaios diários fornecidos pela mineradora. A Tabela 4.3 mostra os valores médios mensais e o resultado médio geral da amostragem realizado entre janeiro de 2017 e março de 2018.

Tabela 4. 3 - Médias mensais da granulometria do rejeito

Mês	% Retida Acumulada			
	+ 150 #	+ 270 #	+ 400 #	- 400 #
jan/17	1,06	1,13	5,01	94,99
fev/17	0,88	0,96	4,60	95,40
mar/17	1,11	1,16	4,24	95,76
abr/17	0,40	0,46	3,95	96,05
mai/17	0,63	0,75	4,13	95,87
jun/17	0,45	0,51	3,71	96,29
jul/17	0,69	0,76	4,16	95,84
ago/17	0,78	0,85	4,45	95,55
set/17	1,28	1,42	5,28	94,72
out/17	0,76	0,90	3,45	96,55
nov/17	0,95	1,05	4,76	95,24
dez/17	0,56	0,61	4,49	95,51
jan/18	0,74	0,83	4,44	95,56
fev/18	0,63	0,69	3,82	96,18
mar/18	0,42	0,45	3,18	96,82
Média geral	0,76	0,84	4,25	94,15

Fonte: O autor.

Para determinação das faixas granulométricas com utilização de aberturas de peneiras menores do que as utilizadas na rotina laboratorial da planta de beneficiamento, foi realizado ensaio de granulometria por meio de cicloclassificador (*cyclosize*), na polpa coletada para os ensaios de filtragem e espessamento. Conforme distribuição granulométrica apresentada na Tabela 4.4, o rejeito pode ser classificado como uma argila silto arenosa, com 98% - 100% passante na peneira 200# (0,075mm) e mais de 90% do material passante na peneira 400# (0,038mm).

Tabela 4. 4 - Granulometria do rejeito obtido por *cyclosize*

Abertura (#)	Abertura (□m)	Retido simples (%)	Retido acumulado (%)
4#	4750	0,0%	0,0%
6#	3350	0,0%	0,0%
8#	2360	0,0%	0,0%
10#	1700	0,0%	0,0%
14#	1000	0,0%	0,0%
20#	850	0,0%	0,0%
28#	600	0,0%	0,0%
35#	500	0,0%	0,0%
48#	300	0,0%	0,0%
65#	212	0,0%	0,0%
100#	150	1,5%	1,5%
150#	105	0,7%	2,2%
200#	74	1,5%	3,7%
270#	53	0,9%	4,7%
325#	44	0,6%	5,3%
C1	40	2,7%	8,0%
C2	25	1,7%	9,7%
C3	19	3,2%	12,9%
C4	8	3,8%	16,7%
C5	5	3,3%	20,0%
-C5	-5	80%	100%

Fonte: Autor.

Para se comparar o resultado da granulometria encontrada pelo método *cyclosize* com a média dos resultados de rotina apresentados na Tabela 4.3, foi levado em consideração que nas faixas granulométricas do equipamento cycloclassificador não havia a peneira #400 de 37 μm . Por isso, para efeito de comparação das porcentagens retidas, foi considerado o resultado retido na peneira de 40 μm (C1), apresentado na Tabela 4.4.

A Tabela 4.5 mostra esse comparativo lado a lado, em que se pode averiguar que as amostras coletadas e ensaiadas são representativas da polpa de rejeito gerada diariamente pela planta de beneficiamento. Apesar dos sólidos retidos nas peneiras #400/C1 ter sido 36,5% menor na polpa coletada, a porcentagem de sólidos que passaram nas peneiras #400/C1 foi apenas 1,6% maior nessa polpa de rejeito. A Tabela 4.6 apresenta o resumo da distribuição granulométrica entre as amostragens.

Tabela 4. 5 - Resultados de granulometria para comparativo

Amostra	#150	#270	#400/C1	#-400/C1
Granulometria média (entre jan17 e mar18)	0,76	0,84	4,25 (#400)	94,15 (-#400)
Granulometria da polpa coletada	0,7	0,9	2,7 (C1)	95,7 (-C1)

Fonte: O autor.

Tabela 4. 6 - Resumo da granulometria do rejeito

Distribuição granulométrica	Porcentagens (%)	
	Media entre jan17 e mar18	Polpa coletada
Pedregulho (>4,8mm)	0,00	0,00
Areia Grossa (4,8 – 2,0mm)	0,00	0,00
Areia Média (2,0 – 0,42mm)	0,00	0,00
Areia Fina (0,42 – 0,074mm)	0,76	3,7
Silte + Argila (<0,074mm)	99,24	96,3
Total	100,00	100,00

Fonte: O autor.

4.1.1.3 Limites de Atterberg

Os limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP) determinados de acordo com as normas NBR 6459 (ABNT, 1984_b) e NBR 7180 (ABNT, 1984_c), respectivamente, são:

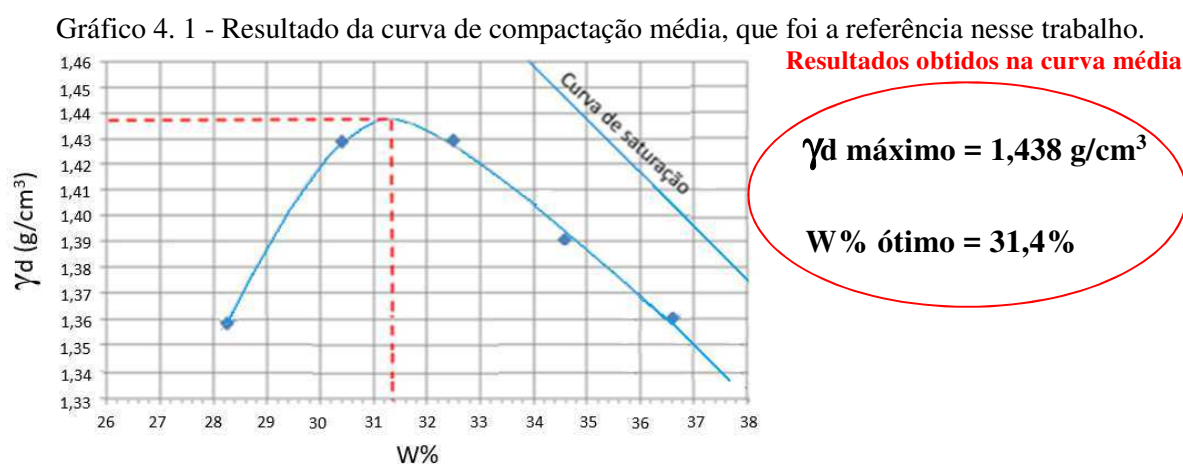
- Limite de Liquidez: 55%
- Limite de Plasticidade: 29%
- Índice de Plasticidade: 26%

4.1.1.4 Densidade dos grãos do rejeito

Com base em relatórios técnicos do empreendimento, a densidade dos sólidos média do rejeito é de 2,89 g/cm³.

4.1.1.5. Curva de compactação do rejeito

Realizou-se três ensaios de compactação do rejeito para obtenção da curva de compactação média (apresentada no Gráfico 4.1). Os pontos dessa curva obtiveram-se através da média de cada ponto correspondente nas três curvas de compactação, então plotou-se no gráfico os cinco pontos médios. No Anexo A, nos gráficos A1, A2 e A3 são apresentadas as curvas de compactação obtidas nos três ensaios realizados.



Fonte: O autor.

Como referência esse trabalho preferiu-se adotar a curva média de compactação, pois a mesma foi necessária ao longo do trabalho para determinação da evolução da massa específica seca em função da umidade. Mas vale ressaltar que os parâmetros ótimos obtidos nessa curva de compactação média (Gráfico 4.1) são muito próximos da média dos valores ótimos, obtidos em cada ensaio de compactação apresentados no Anexo A, sendo que a média desses resultados ficou em 31,33% para o teor de umidade ótimo e 1,440 g/cm³ para a massa específica seca.

4.1.2. Caracterização da areia local

Os resultados das análises para caracterizar a areia utilizada nas misturas com rejeito e cimento, estão apresentados a seguir.

4.1.2.1. Granulometria da areia

Realizou-se dois ensaios de granulometria na areia. A Tabela 4.7 mostra o resumo dos resultados. No Anexo B são apresentadas as curvas granulométricas.

Tabela 4. 7 -Resumo da granulometria da areia

Distribuição granulométrica	Porcentagens (%)	
	Amostra 1	Amostra 2
Pedregulho (>4,8mm)	0,00	0,20
Areia Grossa (4,8 – 2,0mm)	0,30	0,10
Areia Média (2,0 – 0,42mm)	23,45	22,24
Areia Fina (0,42 – 0,074mm)	76,15	76,85
Silte + Argila (<0,074mm)	0,10	0,60
Total	100,00	100,00

Fonte: O autor.

4.1.3 Cimento utilizado

O cimento utilizado foi o CPII-32-E da empresa Lafarge Holcim.

4.2 Resultados do ensaio de espessamento dinâmico

Nessa subseção são apresentados os resultados de todos os testes para a determinação do teor de sólidos alcançado pelo rejeito de bauxita laterítica, mediante uso de espessador dinâmico, para a finalidade de alimentar o filtro prensa horizontal nas condições mais indicadas para o deságue e formação da torta de rejeito.

4.2.1 Resultados da determinação do tipo e teor de floculante

A polpa de rejeito armazenada para esse trabalho estava com uma concentração estimada em 23% de teor de sólidos. O primeiro passo foi diluir a polpa armazenada para que ficasse com um teor de sólidos próximo a 7,3%, para os testes iniciais, pois esse é o teor de sólidos médio da polpa de rejeito produzida pelo empreendimento (Tabela 4.8). Na Figura 4.1 apresenta-se a homogeneização da polpa e a realização dos testes para estimar o teor de sólidos.

Tabela 4. 8 - Valores médios mensais de teor de sólidos produzidos no rejeito

Valores médios obtidos para cada mês (%)													
2017												2018	
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev
7,0	6,9	7,2	7,3	7,5	9,0	9,2	8,3	6,8	5,5	6,9	7,5	6,6	6,3
Valor médio geral: 7,3													

Fonte: O autor.

Após atingido um teor de sólidos 7,3% foi realizado o primeiro teste para determinação do floculante ideal, porém ficou evidente que nessa concentração a sedimentação ficou lenta, sendo difícil perceber a descida da superfície que separa o *underflow* do *overflow*. O motivo disso se deve ao efeito de sedimentação retardada, que ocorre quando a velocidade de sedimentação é retardada em função da colisão de partículas sólidas. Uma maneira de diminuir o efeito dessas colisões é diluindo a polpa de modo que as partículas sólidas tenham uma trajetória mais livre em direção ao fundo. Por isso, a polpa foi diluída para um valor estimado de 3,5% de teor de sólidos, e nos ensaios iniciais já foi perceptível a maior velocidade de sedimentação. Mas após ensaio de determinação de peso de sólidos seco em estufa, o teor de sólidos real foi constatado como sendo de 4,03%.

Então, para todos floculantes testados foi utilizada a mesma concentração de sólidos na polpa (4,03%), sendo que o critério para definição dessa diluição foi com base na sensibilidade visual, ao se perceber que essa diluição acelerou consideravelmente a

sedimentação. Então, para fins comparativos, em que as variáveis são o tipo e a concentração de floclantes, esse teor de sólidos de 4,03% é satisfatório para realização da análise. A determinação da diluição ótima está apresentada no item 4.2.2, e foi realizada para o floclante selecionado.

A Figura 4.2 mostra imagens do equipamento de deságue de polpa por pressão para formação de torta de rejeito, para fins de medição do peso de sólidos após 12 horas em estufa a 105°.

Figura 4. 1- Agitação mecânica da polpa para homogeneização (foto da esquerda), e medições estimadas do teor de sólidos (foto da direita)



Fonte: O autor

Figura 4. 2 - Equipamento para deságue da polpa por pressão (foto da esquerda), e a torta de rejeito após deságue (foto da direita)



Fonte: O autor

A Figura 4.3 mostra a proveta com polpa no valor real de 4,03% de teor de sólidos, logo após a agitação para mistura de flocculante, e o resultado ao termino da sedimentação, em que pode ser visto a formação do *underflow* e *overflow*.

Figura 4. 3 - Rejeito de polpa após agitação na proveta (foto da esquerda), e a separação entre *underflow* e *overflow* ao fim da sedimentação (foto da direita)



Fonte: O autor.

Realizou-se os testes medindo-se com cronômetro a velocidade de sedimentação, e verificando visualmente a qualidade do clarificado (*overflow*). Com base nos testes realizados, verificou-se que:

- O floculante do tipo **934 SH**, apresentou a maior velocidade de sedimentação. Porém, com esse floculante notou-se que alguns flocos demoraram mais para sedimentar, prejudicando assim a clarificação do *overflow*.

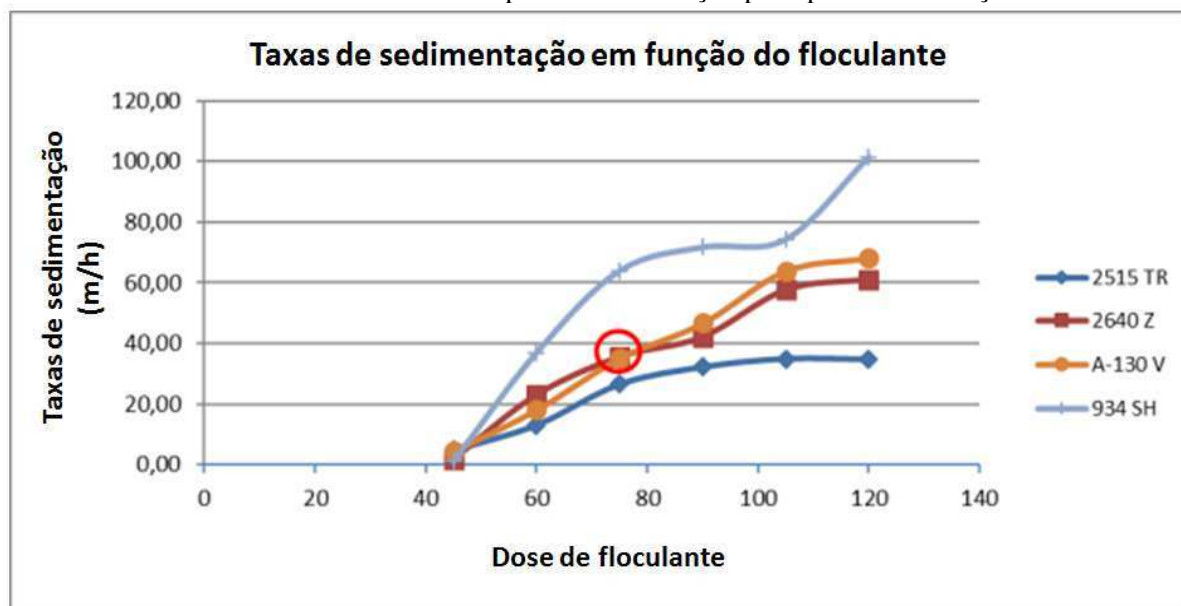
- O floculante do tipo **2515 TR**, apresentou a menor velocidade de sedimentação, apesar de ter gerado um *overflow* bem clarificado.

- Os floculantes do tipo **A-130V** e **2640Z**, apresentaram velocidade de sedimentação semelhantes, tendo o **2640Z** uma velocidade de sedimentação um pouco maior para menores concentrações, e o **A-130V** tendo a velocidade de sedimentação um pouco maior para maiores concentrações. Porém de maneira geral o **A-130V** apresentou melhor clarificação do *overflow*.

Por isso, foi selecionado para os testes dinâmicos de espessamento o floculante do tipo **A-130 V**, na proporção de 75 g/t. Pois esse floculante foi o segundo que forneceu maior velocidade de sedimentação e apresentou boa clarificação da água. O motivo da escolha da proporção de 75 g/t foi por ter apresentado uma taxa de sedimentação satisfatória, já na segunda maior concentração testada. Como a utilização de floculantes envolvem custos, descartou-se nesse trabalho os testes envolvendo maiores concentrações.

Os resultados podem ser vistos no Gráfico 4.2, em que no eixo das abscissas estão plotados as proporções dos floculantes em relação à massa de sólidos (gramas de floculante por toneladas de massa sólida), e no eixo das ordenadas a velocidade de sedimentação.

Gráfico 4. 2 - Resultados dos testes de tempo de sedimentação por tipo e concentração de flocculantes.



Fonte: O autor.

4.2.2 Resultados do teste de diluição ótima

Utilizando o flocculante A-130V na concentração de 75 g/t, foi realizado um procedimento desenvolvido pelo laboratório que contribuiu com as análises para determinação da diluição ótima. E por motivos de proteção intelectual, esse procedimento não foi liberado para apresentação no presente trabalho.

Mediram-se as velocidades de sedimentação em função da concentração de sólidos, e os resultados mostraram que a diluição ótima ficou entre 2% e 4% de sólidos na polpa do rejeito. Portanto para uma maior eficiência do processo de espessamento da polpa que irá alimentar o filtro prensa é necessário que a polpa de rejeito que sai da planta de beneficiamento com teor de sólidos médio de 7,3%, seja diluída para um valor dentro da faixa de 2% a 4% de sólidos.

Segundo dados de planejamento da mineradora é estimado uma produção anual de rejeito na base seca de 2.157.699 toneladas. Baseado no teor de sólidos calculado em 7,3%, encontrado no item 4.2.1, a produção de polpa de rejeito (base úmida) é de 29.557.520,5 toneladas por ano, ou 3.374,1 toneladas por hora. Então a quantidade de água necessária, a cada hora, para que ocorra essa diluição da polpa, dentro dos limites estabelecidos para diluição ótima, estão apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4. 9 - Quantidade de água para diluir o teor de sólidos da polpa com 7,3%

Teor de sólidos após diluição	Quantidade de água utilizada	
	Litros por hora	Litros por ano
2%	$8,94 \times 10^6$ litros	$7,83 \times 10^{10}$ litros
3%	$4,83 \times 10^6$ litros	$4,24 \times 10^{10}$ litros
4%	$2,78 \times 10^6$ litros	$2,44 \times 10^{10}$ litros

Fonte: O autor

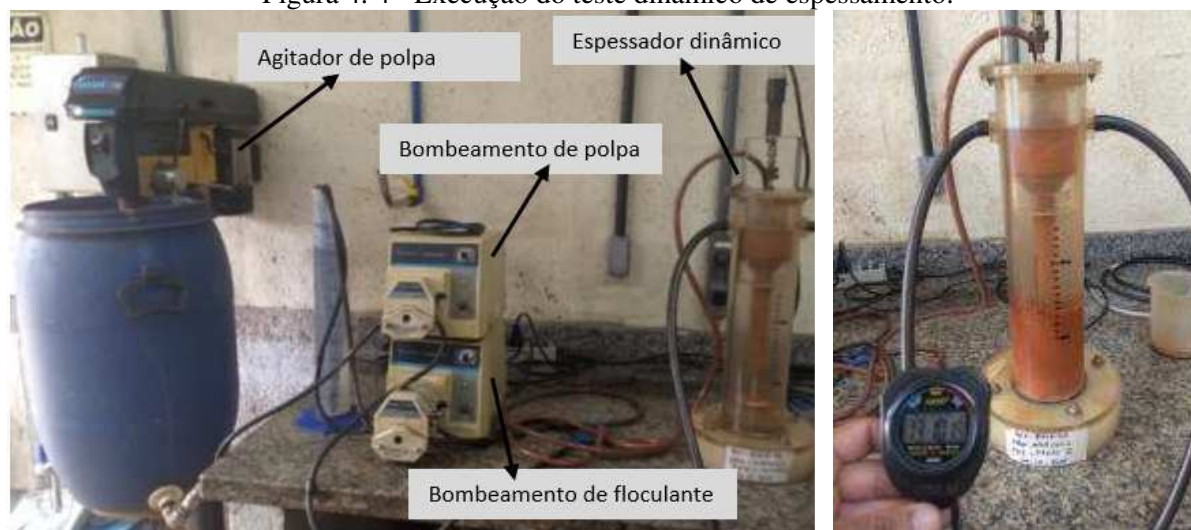
É indicado que o equipamento de espessamento seja alimentado com polpa de rejeito com 4% de sólidos. Aumentar a diluição para que se atinjam menores porcentagens de sólidos antes do espessamento, aumentaria significativamente a quantidade necessária de água, indo para $4,83 \times 10^6$ litros de água por hora, para que se atinja um teor de sólidos de 3% e $8,94 \times 10^6$ litros de água por hora para que se atinja um teor de sólidos de 2%.

4.2.3 Resultados dos testes dinâmicos de espessamento

Realizou-se 3 ensaios de espessamento, com variações de taxas de alimentação estimadas inicialmente em 0,04 t/m²h, 0,07 t/m²h e 0,10 t/m²h (tonelada seca por metro quadrado por hora), e a dosagem de floculante de 75g/t (gramas por tonelada seca). Porém após determinação real do teor de sólidos da polpa, no valor de 4,03%, obtido após a realização dos ensaios, corrigiu-se esses valores. Então os valores reais das taxas de alimentação de polpa são 0,0537 t/m²h, 0,0948 t/m²h e 0,1324 t/m²h, e a dosagem de floculante foi de 65,1g/t.

Na Figura 4.4 apresenta-se o espessador dinâmico de bancada utilizado na execução do ensaio, na qual é ilustrado na esquerda a montagem do equipamento, ainda no início do ensaio, com uma das bombas transmitindo a polpa de rejeito do tambor para o espessador, e a outra bomba realizando a dosagem do floculante a 75g/t (75 gramas por tonelada de rejeito seco). A foto da direita mostra a formação do *underflow* no fundo do espessador, que após preencher 2000 ml, foi coletado para avaliação.

Figura 4. 4 - Execução do teste dinâmico de espessamento.



Fonte: O autor.

Ao término de cada um dos 3 ensaios, nos quais foi variado apenas a taxa de alimentação, o *underflow* foi coletado para determinação da tensão de cisalhamento no viscosímetro (Figura 4.5), e o *overflow* foi coletado para análise de turbidez.

Os parâmetros utilizados e os resultados obtidos são mostrados na Tabela 4.10. Foi verificado que a diminuição da taxa de alimentação resulta em maior percentual de sólidos no *underflow*. Pois a menor taxa significa que uma menor quantidade de polpa é descarregada por metro quadrado. Assim o espessador enche de forma mais lenta, dando mais tempo para as partículas sólidas sedimentarem, acumulando no *underflow*.

Foi verificado, para as amostras testadas, que o aumento no teor de sólidos de 1,6% a 3,7%, que representam variações totais entre 8,4% e 19,4%, gerou aumentos na tensão cisalhante variando entre 35,6% e 110,1%.

Figura 4. 5 - Uso do viscosímetro para determinação da tensão de cisalhamento do *underflow*.

Fonte: O autor.

Tabela 4. 10 - Parâmetros e resultados do ensaio dinâmico de espessamento

TESTE	ALIMENTAÇÃO			FLOCULANTE		UNDERFLOW		OVERFLOW
	SÓLIDOS (%)	TAXA (t/m ² h)	pH	TIPO	DOSAGEM (g/t)	SÓLIDOS (%)	TENSÃO DE CISALHAMENTO (Pa)	TURBIDEZ (NTU)
1	4,03	0,0537	7,26	A-130 V	65,1	22,8	26,16	29,6
2	4,03	0,0948	7,26	A-130 V	65,1	20,7	16,88	12,7
3	4,03	0,1324	7,26	A-130 V	65,1	19,1	12,45	12,9

Fonte: O autor.

Uma estrutura de espessamento alimentada com a polpa estudada na diluição próxima da ótima pode gerar um *underflow* com teores de sólidos entre 19,1% e 22,8% para taxas de alimentação variando entre 0,0537 e 0,1324 t/m²h. O *overflow* resultante apresentou turbidez variando entre 12,9 e 29,6 NTU para o floculante do tipo **A-130 V** da empresa Kemira, na proporção de 65,1 g/t. Esse *overflow* obtido em cada teste apresentou resultados de turbidez inferiores a 100 NTU, o que indica boa clarificação independente da taxa unitária de alimentação.

Segundo dados de planejamento da mineradora é estimado uma produção anual de rejeito na base seca de 2.157.699 toneladas. Baseado na estimativa de teor de sólidos de 7,3%, encontrado no item 4.2.1, a produção de polpa de rejeito anual é de 29.557.520,5 toneladas. Calculando a produção em toneladas por hora, tem-se 3.374,1 toneladas de polpa de rejeito, e 246,3 toneladas de rejeito sólido.

Com base nas taxas de alimentação apresentadas na Tabela 4.10 pode-se calcular a área necessária do espessador para suprir a produção horária de sólidos. E, em função dos teores de sólidos do *underflow*, pode-se estimar a quantidade de água que poderá ser reaproveitada no empreendimento após o espessamento da polpa.

Na Tabela 4.11 são apresentados os diâmetros teóricos do espessador calculados para cada taxa de alimentação. Porém o diâmetro apresentado nessa tabela foi definido através de um cálculo simples e são válidos apenas como referência e se comparados uns com os outros. Quando se reduz a taxa de alimentação do bombeamento de polpa do espaçador de bancada, o diâmetro teórico do espessador é aumentado para que a relação entre toneladas de rejeito por área, a cada hora, seja mantida. Ou seja, no experimento de laboratório a taxa é controlada variando-se a vazão de polpa, sendo que é constante o diâmetro do espessador de bancada. Já numa situação de campo, onde a vazão da polpa não depende do projeto do espessador (depende da produção), a maneira de se conseguir diminuir a taxa (t/m^2h) de descarregamento de polpa é aumentando o diâmetro do espessador.

Também é apresentado na Tabela 4.11, a quantidade de água necessária por hora, para ser acrescentada ao sistema de modo a diluir a polpa com 7,03% para 4,03% de sólidos. Essa quantidade de água para cada taxa testada é constante, pois as variáveis no teste são a taxa de alimentação e o diâmetro teórico do espessador. E como é constante a vazão média de polpa que entra no espessador com 7,03% de sólidos, é constante a vazão de água para diluir essa polpa até 4,03% de sólidos.

Já os valores de água reaproveitável no espessador (Tabela 4.11) é variável conforme varia a taxa de alimentação, pois a quantidade de água reaproveitável é função do teor de sólidos atingido no *underflow*. Assim, as menores taxas de alimentação tendem a gerar um maior volume aproveitável de água, pois conforme mostrado na Tabela 4.9 o teor de sólidos aumenta conforme diminuiu a taxa de alimentação.

Tabela 4. 11 - Diâmetro teórico do espessador e balanço de massa de água horário.

TESTE	TAXA (t/m²h)	DIÂMETRO DO ESPESSADOR (m)	ÁGUA ADICIONADA NO ESPESSADOR (t/h)	ÁGUA REAPROVEITADA NO ESPESSADOR (t/h)
1	0,0537	77	2737,6	5031,4
2	0,0948	58	2737,6	4921,8
3	0,1324	49	2737,6	4822,1

Fonte: O autor.

O atual reservatório de diluição atuante no empreendimento possui 100 ha (1.000.000 m²) e produz através de dragagem uma média de 17,76% de sólidos (apesar de ter um esforço para tentar atingir 25% de sólidos). Um reservatório circular de espessamento dinâmico, com base nos valores teóricos obtidos, pode ter 77m de diâmetro (4.654m²) e gerar uma polpa com 22,8% de sólidos. Ou seja, esse espessador dinâmico teórico, ocupa uma área quase 215 vezes menor e é capaz de gerar um teor de sólidos maior que os valores atuais atingidos no empreendimento.

4.3 Testes com filtro prensa horizontal

Os resultados dos testes do filtro prensa horizontal com rejeito de bauxita laterítica estão apresentados na Tabela 4.12. Ao todo realizou-se três testes nos quais se variou o teor de sólidos, o tempo de bombeamento e o tempo de secagem das tortas. Nos testes mantiveram-se constantes as pressões de bombeamento, prensagem e secagem.

Tabela 4. 12 - Resultados dos testes com filtro prensa

Teste			1	2	3
Alimentação	Sólidos calculados	%	14,709	17,456	17,542
	pH	-	6,5	6,5	6,5
Câmara		mm	25	25	25
Tempo	Bombeamento	min	12	9	7,5
	Prensagem	min	4	4	4
	Secagem	min	5	3	3
Pressões	Bombeamento	bar	8	8	8
	Prensagem	bar	12	12	12
	Secagem	bar	8	8	8
Torta	Umidade residual	%	26,15	26,64	26,51
	Espessura	mm	11,6	13,3	12,3
Capacidade de filtração (base seca)		kg/m ² h	17,4	23,1	23,1

Fonte: O autor.

Com base nos resultados dos ensaios de espessamento tentou-se usar nos testes com filtro prensa horizontal a polpa de rejeito com valores próximos a 22,8% de teor de sólidos, que foi o máximo atingido nos ensaios. Afinal quanto maior o teor de sólidos da polpa que sai do tanque de espessamento, maior é o reaproveitamento de água e menor tende a ser o tempo do filtro prensa para gerar a torta de rejeito com valores próximos da umidade ótima de compactação. Entretanto, nos testes realizados não foi possível atingir os teores de sólidos na ordem de 22,8% devido a limitações de tempo e recipientes para secar maiores volumes da polpa. Foi cogitada a hipótese de adicionar sólidos na polpa para se atingir o teor desejado, mas isso poderia descaracterizar a amostra e mascarar resultados.

A capacidade de filtração conseguida nos Testes 2 e 3, quando comparado com o Teste 1, confirma a maior eficiência de filtração para polpas com maior teor de sólidos, sendo que o Teste 1 atingiu a capacidade de filtração de 17,4 kg/m²h para um teor de sólidos de 14,7%, e os Testes 2 e 3 atingiram a capacidade de filtração de 23,1 kg/m²h para um teor de sólidos aproximado de 17,5%.

No Teste 3 foi possível verificar que a pequena redução no tempo de bombeamento, comparado ao Teste 2, resultou em capacidade de filtração igual apesar da menor espessura de torta.

A umidade residual de torta obtida no Teste 1 (26,15%) pode ser considerada a mínima, já que foi obtida com espessura de torta relativamente fina e maior tempo de secagem. Durante a execução dos testes foi possível notar que a secagem perde muita eficiência após 3 minutos de operação.

O tempo de operação do filtro prensa para se atingir a máxima capacidade de filtração, obtido nos testes (23,1 kg/m²h), tende a ser menor caso se utilize uma polpa de rejeito com 22,8% de teor de sólidos, que foi o máximo obtido nos testes de espessamento.

4.4 Resultados da seção de projeto do depósito dry stack

Para definição da seção de projeto do depósito de disposição a seco (*dry stack*) realizou-se ensaios triaxiais e análises de estabilidade cujos resultados estão apresentados nos itens a seguir.

4.4.1 Parâmetros geotécnicos do rejeito de bauxita laterítica

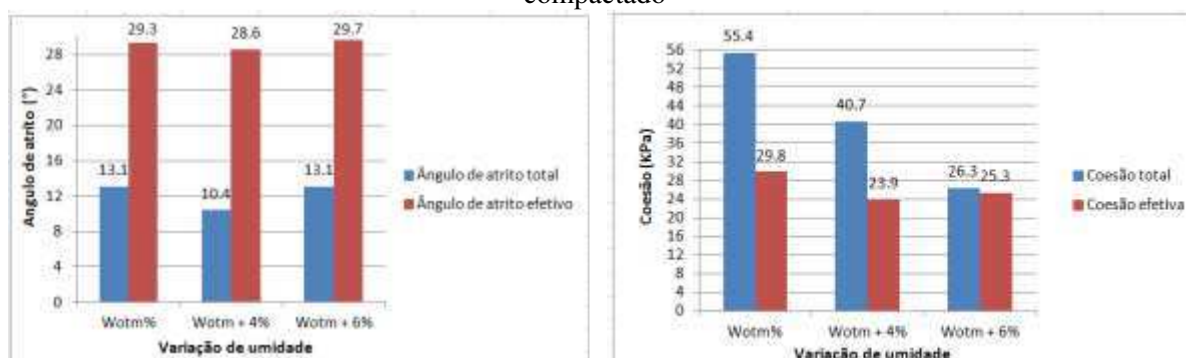
Neste item apresentam-se os resultados dos ensaios triaxiais realizados (Tabela 4.13). O Gráfico 4.3 apresenta os gráficos dos parâmetros geotécnicos efetivos e totais obtidos para diferentes umidades do rejeito compactado. Para que se obtenham parâmetros conservadores adotou-se os ensaios CIU (adensado não drenado).

Tabela 4. 13 - Resultados dos ensaios triaxiais realizados

Tipo		Resultado
Zona Seca	CIU - Rejeito com W = 31,4% (Wot)	$\phi' = 29,3^\circ$; $c' = 29,8$ kPa $\phi = 13,1^\circ$; $c = 55,4$ kPa
	CIU - Rejeito com W = 35,4% (Wot + 4%)	$\phi' = 28,6^\circ$; $c' = 23,9$ kPa $\phi = 10,4^\circ$; $c = 40,7$ kPa
Zona Úmida	CIU - Rejeito com W = 37,4% (Wot + 6%)	$\phi' = 29,7^\circ$; $c' = 25,3$ kPa $\phi = 13,1^\circ$; $c = 26,3$ kPa

Fonte: O autor.

Gráfico 4. 3 - Gráficos com parâmetros totais e efetivos obtidos para diferentes umidades do rejeito compactado



Fonte: O autor

Os resultados demonstraram baixa variação no ângulo de atrito, sendo que a umidade Wot+6% apresentou os maiores valores, tanto nos parâmetros efetivos, quanto nos parâmetros totais. Já no comparativo da coesão, para os parâmetros totais, foi verificado o decréscimo da coesão com o aumento da umidade. Porém, para os parâmetros efetivos, apesar da coesão ser maior na umidade ótima (Wot), a coesão na umidade Wot+6% ainda ficou um pouco maior que a coesão para umidade Wot+4%. No Anexo C são apresentados, para cada ensaio, a representação gráfica da trajetória de tensões totais, trajetória de tensões efetivas, envoltória de Mohr-Coulomb, tensão x deformação e poropressão x deformação.

Esses altos valores dos parâmetros geotécnicos para umidade de Wot+6% no comparativo com as umidades menores, quando se esperava uma redução nesses parâmetros, pode ter ocorrido em função das possibilidades apresentadas a seguir.

A primeira possibilidade, se deve às características do rejeito. Conforme apresentado no item 4.1.1.3, o limite de liquidez do rejeito é de 54,5%, ou seja, a umidade de 37,4% (Wot+6%) ainda está bem abaixo desse limite. E conforme constatado em laboratório, mesmo o rejeito apresentando umidade próxima ou acima do limite de liquidez, é perceptível uma certa dificuldade em se separar manualmente um torrão desse material. Experimentos de campo realizadas pelo autor, quando o rejeito foi escavado com escavadeira e depositado no chão, demonstraram que, mesmo este tendo a umidade superior aos 50%, foi perceptível um elevado ângulo de repouso. Isso confirma que pequenas variações na umidade não são suficientes para gerar significativas variações nos parâmetros geotécnicos.

A segunda possibilidade, e que pode ter agido em conjunto com a primeira, se deve às dificuldades de confecção dos corpos de prova. Pois na fase de umidificação, o rejeito fica com grumos que dificultam a homogeneização, e isso pode afetar no comparativo entre os corpos de prova.

Por isso, para um melhor entendimento da variação dos parâmetros geotécnicos com a umidade do rejeito, é recomendável a realização de outras baterias de ensaios triaxiais, com corpos de prova, principalmente, obtidos a partir de blocos indeformados retirados de pistas experimentais, construídas com os mesmos equipamentos planejados para execução do depósito.

4.4.2. Parâmetros geotécnicos da fundação

Obtiveram-se os dados da fundação em relatórios técnicos disponibilizados para consulta no empreendimento, sendo que os parâmetros geotécnicos estão apresentados no Tabela 4.14.

Tabela 4. 14 - Parâmetros geotécnicos das fundações

Material de Fundação	γ_{nat} (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Pilha de estéril	17,7	13	32
Argila Variegada	18,4	20	29

Fonte: Relatórios internos do empreendimento⁶.

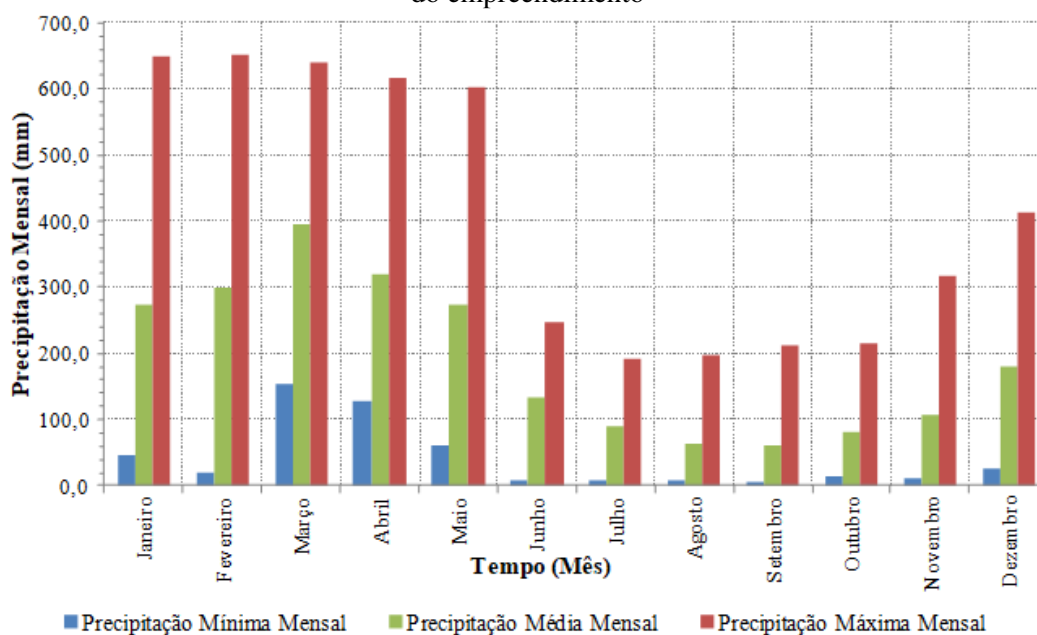
4.4.3 Seção de projeto conceitual do depósito de disposição a seco (dry stack)

Com base nos resultados dos ensaios triaxiais realizados no rejeito compactado e nos parâmetros das fundações obtidos em relatórios técnicos, nesse tópico apresenta-se o resultado da análise de estabilidade para se encontrar o fator de segurança da geometria definida para o depósito *dry stack*.

Além disso, considera-se, para essa seção de projeto conceitual, que o balanço de massa é de 50% de material propicio a ser depositado na zona seca e 50% do material a ser depositado na zona úmida. Essa é uma estimativa apenas conceitual, mas embasada no fato da região norte ter bem definido um período de seis meses com bastante chuva, e seis meses mais secos. Isso pode ser observado no Gráfico 4.4, onde é nítido que, de dezembro a maio, a ocorrência de chuvas é bem maior do que de junho a novembro.

⁶ Relatórios internos não disponibilizado ao público

Gráfico 4. 4 -Hietograma de precipitação mínima, média e máxima mensal. Fonte: Relatório interno ⁷ do empreendimento



Fonte: O autor.

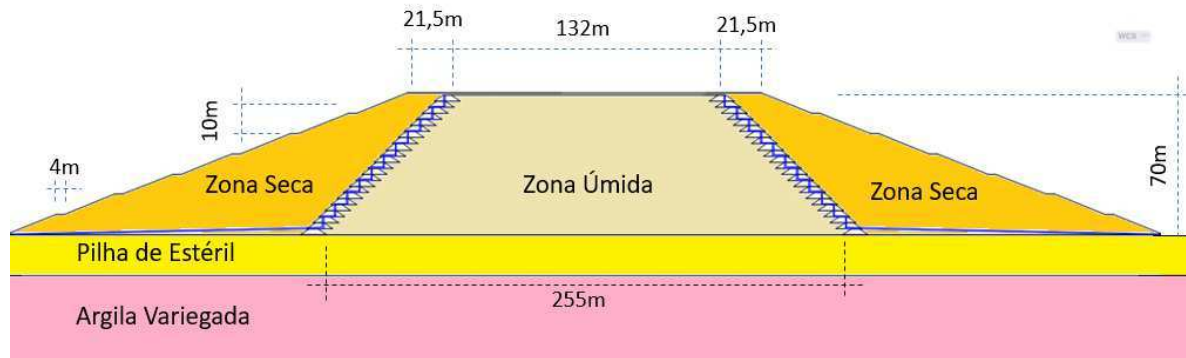
As Figura 4.6 e Figura 4.7 apresentam a geometria definida para a seção conceitual do depósito *dry stack*, que tem altura de bancada de 10 m, bermas de 4 m, inclinação de talude de 22° (proporção de 1 na vertical para 2,5 na horizontal – 1:2,5), ficando com ângulo geral de talude com 19°, e altura final do depósito com 70 m.

Os diques de separação entre zona seca e zona úmida estão projetados para ter altura de 3 m, taludes de 34° (1:1,5), largura de crista com 4 m, e largura de base com 13 m. Devem ser construídos com material da zona seca, de modo a formar um ângulo de separação constante entre zona seca e zona úmida com de 45° (1:1).

A Figura 4.8 apresenta o projeto conceitual em planta do depósito *dry stack*, considerando-se plano todo o terreno de fundação. A distância horizontal definida em 275 m foi calculada para que o depósito tivesse uma vida útil de 10 anos. Nesse projeto conceitual não estão definidas as estradas de acesso.

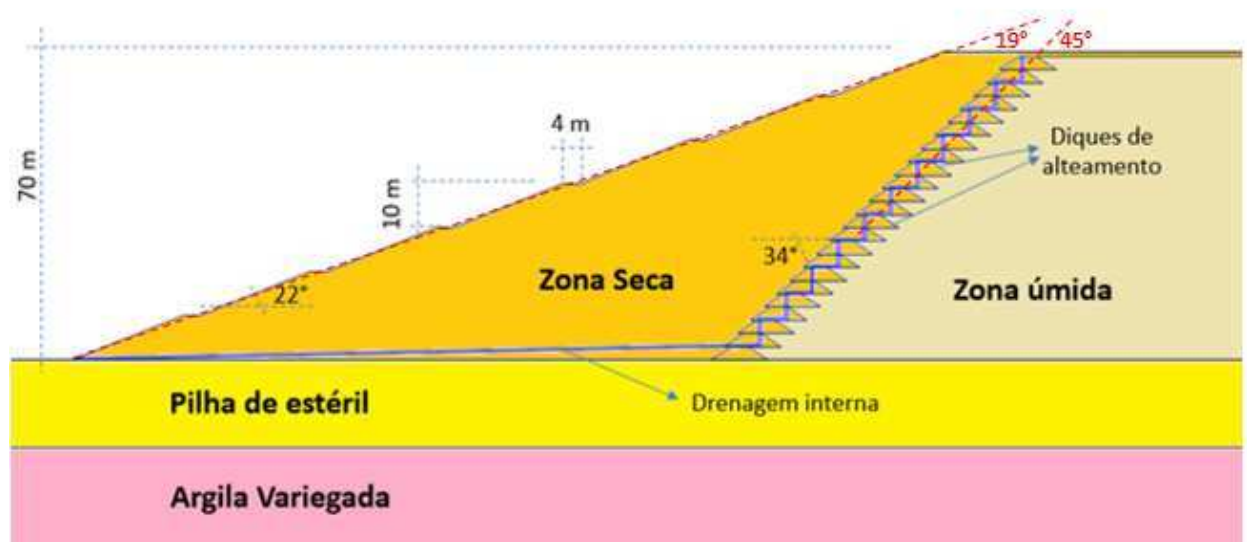
⁷ Relatório interno não disponível para consulta pública.

Figura 4. 6 - Seção conceitual do depósito *dry stack*.



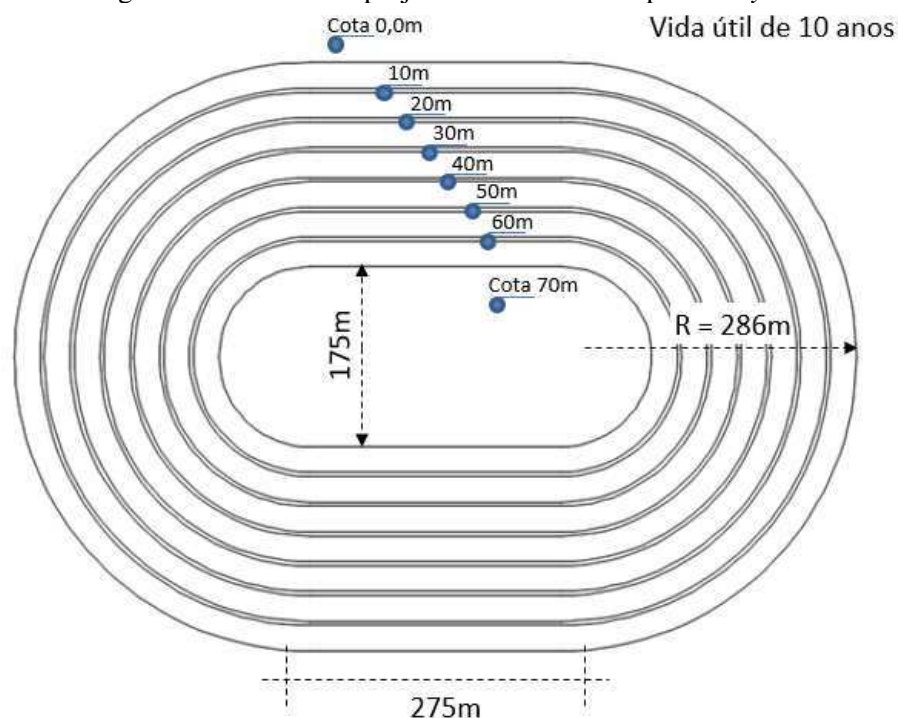
Fonte: O autor.

Figura 4. 7 - Detalhes da seção conceitual do depósito *dry stack*



Fonte: O autor.

Figura 4. 8 - Planta do projeto conceitual do deposito *dry stack*.



Fonte: O autor.

A capacidade de armazenamento do depósito *dry stack*, com base no projeto conceitual, é de 21.576.771 toneladas de rejeito seco, de modo a ter uma vida útil de 10 anos, possuindo para isso um volume de 7.629.693 m³ para zona seca, e 8.039.035 m³ para zona úmida, ocupando assim uma área de 415.313 m².

No Brasil, existem duas normas para estabelecer condições de projeto de estruturas de mineração, NBR 13028 (ABNT, 2017a) para barragens e NBR 13029 (ABNT, 2017b) para pilhas de estéril. E em 2019 a Agência Nacional de Mineração (ANM) publicou a Resolução 13, que estabelece critérios mais restritivos para construção de barragens de rejeito.

A NBR 13028 (ABNT, 2017a) - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água, faz a seguinte recomendação para fatores de segurança mínimos, em termos de tensões efetivas:

- a) Ruptura geral do talude de jusante:
 - Superfície freática normal: fator de segurança mínimo 1,50;
 - Superfície freática crítica: fator de segurança mínimo 1,30;
- b) Ruptura geral do talude de montante:
 - Nível normal de operação da lâmina d'água normal: fator de segurança mínimo 1,50;

- Rebaixamento rápido da lâmina d'água, quando houver: fator de segurança mínimo 1,10;
- c) Ruptura do talude entre bermas: fator de segurança mínimo 1,50.

A pilha de resíduos do tipo *dry stack* não se enquadra no tipo de estrutura, tanto para pilha de estéril quanto para barragem. Uma pilha de estéril, em geral, é bastante heterogênea e não tem um rigoroso controle de compactação. Uma barragem de rejeitos está associada à formação de um reservatório de rejeitos saturados não consolidados. O depósito *dry stack* é construído, por sua vez, com resíduo, se não homogêneo, com baixa variabilidade quando comparado a uma pilha de estéril. Não haverá formação de reservatório de rejeito saturado com elevado índice de vazios.

Assim posto, como não existe uma norma brasileira específica para determinação de fatores de segurança mínimos para depósitos *dry stack*, considera-se um fator de segurança mínimo operacional de 1,5. Pois, sendo conservador na segurança do depósito, esse é o fator de segurança mínimo estabelecido para barragens em condições drenadas, conforme definido na NBR 13028 (ABNT, 2017). Na Tabela 4.15 são apresentados os parâmetros geotécnicos efetivos utilizados na análise de estabilidade.

Tabela 4. 15 - Parâmetros geotécnicos considerados para análise

Material	γ_{nat} (kN/m ³)	Coesão	Angulo de atrito
Zona Seca	18,9	$c' = 26,8$ kPa	$\phi' = 28,9^\circ$
Zona Úmida	18,4	$c = 26,3$ kPa	$\phi = 13,1^\circ$
Pilha de estéril	17,7	$c' = 13$ kPa	$\phi' = 32^\circ$
Argila Variiegada	18,4	$c' = 20$ kPa	$\phi' = 29^\circ$

Fonte: O autor.

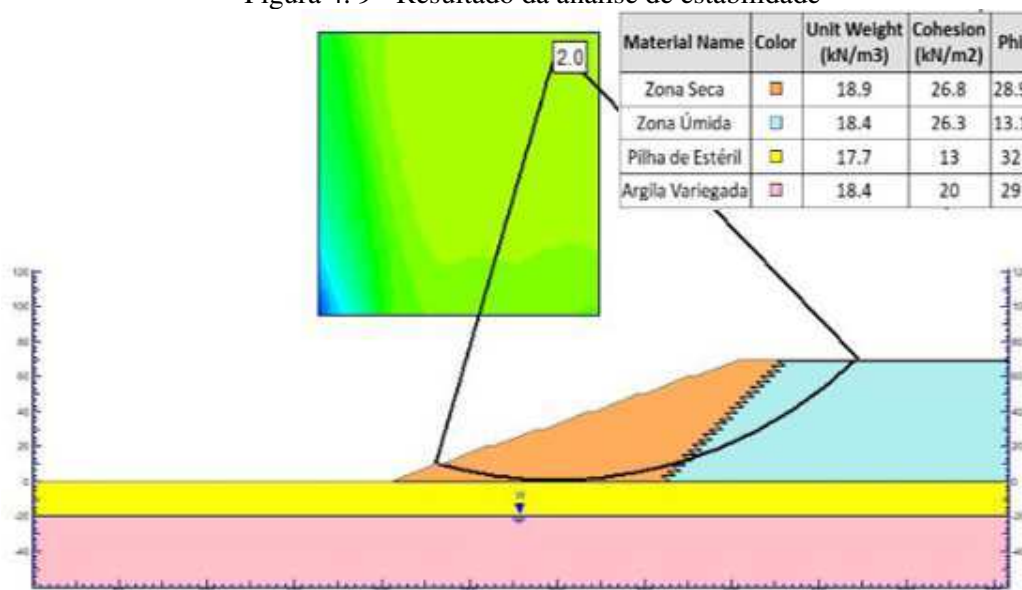
Sendo que para zona seca, na Tabela 4.15, os valores considerados para c' e ϕ' (em termos de tensões efetivas) são referentes a média dos valores obtidos para as umidades de 31,4% e 35,4%, apresentados na Tabela 4.13, e o peso específico natural foi obtido com base nos valores da curva de compactação (Gráfico 4.1), considerando a umidade de 33,4% (média entre 31,4% e 35,4%).

Para zona úmida, os parâmetros geotécnicos utilizados na análise de estabilidade estão em termos de tensões totais. O peso específico natural foi obtido com base nos valores da curva de compactação (Gráfico 4.1), considerando a umidade de 37,4%.

Além disso, obtiveram-se os parâmetros geotécnicos das fundações (pilha de estéril e argila variegada) em relatórios técnicos conforme descrito no item 4.4.2. O nível de água (NA) foi considerado no contato entre a argila variegada e as pilhas de estéril, conforme indicam os relatórios técnicos do empreendimento.

A análise de estabilidade realizada, com base no método de equilíbrio limite, indicou que a seção conceitual apresentada possui um fator de segurança de 2.0. A Figura 4.9 apresenta o resultado da análise de estabilidade.

Figura 4.9 - Resultado da análise de estabilidade



Fonte: O autor.

A geometria proposta para a seção conceitual é considerada segura, uma vez que o fator de segurança encontrado é superior ao mínimo proposto na análise que é de 1,5.

4.4.4 Critérios construtivos do depósito de disposição a seco (*dry stack*)

Antes de iniciar a construção do depósito, é necessária a realização do projeto a nível executivo, que deverá ser realizado quando forem conhecidos os parâmetros de deformabilidade do rejeito, e também o desenvolvimento das poropressões ao longo da construção do depósito. Nesse projeto executivo deverá estar detalhado os dispositivos de drenagem interna e externa, e a sequência construtiva do depósito. Além disso, deverá ser aprofundado o estudo estatístico de chuvas, para que seja planejado com maior precisão o balanço de massa entre zona seca e zona úmida.

Do ponto de vista da terraplanagem, a construção do depósito *dry stack* se dá através da disposição do rejeito que sai do filtro prensa, utilizando para isso equipamentos convencionais de terraplanagem. Como o valor do teor de umidade mínimo que sai do Filtro prensa está estimado em 26,15% (conforme apresentado no item 4.3), e é abaixo do teor de umidade ótimo do rejeito (31,4%, conforme apresentado em 4.1.1.5), é possível calibrar o tempo de ciclo do filtro prensa de modo que o rejeito saia com teor de umidade mais próximo da umidade ótima de compactação. Por isso, foi planejado que a faixa de umidade da zona seca esteja entre 31,4% (Wot) e 35,4% (Wot+4%). Mas, eventualmente, caso o teor de umidade do rejeito esteja abaixo do teor de umidade ótima, e caso não tenham no momento caminhões pipa para controle de umidade, é aceitável a disposição desse rejeito desde que o grau de compactação não seja inferior a 96%.

A disposição na zona úmida deve ocorrer quando o rejeito esteja com umidade igual ou maior que 35,4%, até o limite de trabalhabilidade dos equipamentos de terraplanagem, sendo que neste trabalho tal limite está estimado em 39,4% (Wot+8%). Para teores de umidade acima desse limite de trabalhabilidade, o rejeito deve ser disposto temporariamente no reservatório de emergência, e posteriormente ser retirado, num período de estiagem, e disposto na zona úmida ou zona seca (a depender da umidade em que esteja).

Os equipamentos para compactação da zona seca pode ser o rolo pé de carneiro ou trator de esteira. Sendo mais indicado o rolo pé de carneiro para compactar os taludes externos, os deixando com maior resistência à erosões. E para compactação da zona úmida é indicado o uso de trator com esteiras alargadas, para reduzir as pressões de contato com o rejeito, facilitando o desenvolvimento das atividades de compactação.

Além disso, é fundamental que sejam realizadas pistas experimentais, para testes com os equipamentos selecionados, de modo a se concluir sobre a eficiência de compactação, e limites de trabalhabilidade com o rejeito úmido. Sendo que no desenvolvimento de tais pistas deve ser planejado a retirada de blocos indeformados para realização de ensaios laboratoriais complementares.

4.5 Resultados da definição da geometria do aterro de emergência

Neste item estão apresentados os resultados necessários para o estudo do aterro de emergência, que tem a finalidade de estabilizar a zona úmida em situações de desequilíbrio do balanço de massa, quando o material destinado para zona seca não é suficiente para isso. Os ensaios realizados visam simular as condições de campo do aterro de emergência para que se obtenham os parâmetros geotécnicos que basearam as análises de estabilidade.

Inicialmente estão apresentados e discutidos os parâmetros geotécnicos utilizados e as análises de estabilidade. Depois os resultados da definição das porcentagens de areia e cimento escolhidas nas misturas, e os teores de umidade dos corpos de prova. E por fim os resultados obtidos nos ensaios de compressão simples de modo a verificar o incremento de resistência na mistura de rejeito úmido, areia e cimento, em relação ao rejeito compactado na umidade ótima.

4.5.1 Parâmetros geotécnicos

Para análise de estabilidade, considera-se para o material constituinte do aterro de emergência, os mesmos parâmetros geotécnicos encontrados para o material da zona seca. O motivo dessa escolha se deve ao fato de ser conveniente considerar, no mínimo, a resistência do material da zona seca para o aterro de emergência. Isso porque, mesmo nos períodos chuvosos, ocorrem intervalos de estiagem de chuvas, e é quando passa a ser possível obter material para zona seca. Assim, o aterro de emergência deve ser dimensionado considerando a utilização de material da zona seca, e as misturas de rejeito úmido, areia e cimento devem pelo menos gerar uma resistência igual ao material compactado da zona seca.

Por isso, os parâmetros geotécnicos considerados para o aterro de emergência foram os mesmos apresentados na Tabela 4.15, para a zona seca, sendo eles:

$$\gamma_{\text{nat}} = 18,9 \text{ kN/m}^3$$

$$c' = 26,8 \text{ kPa}$$

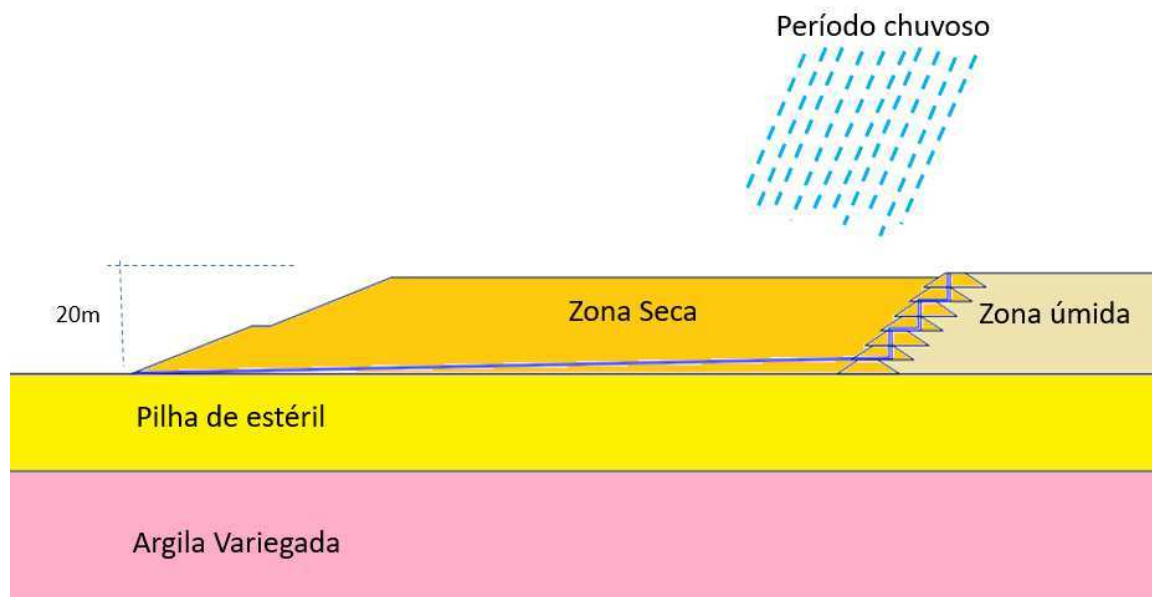
$$\phi' = 28,9^\circ$$

4.5.2. Seção de projeto conceitual do aterro de emergência

Com base nos resultados considerados para os parâmetros geotécnicos do aterro de emergência, e do depósito *dry stack* realizou-se análises de estabilidade para determinar a segurança da geometria proposta para o aterro de emergência.

O aterro de emergência passará a ser necessário quando, em função de desequilíbrios no balanço de massa, a zona úmida esteja próxima da capacidade máxima de ocupação e não seja possível obter material suficiente para zona seca estabilizar a zona úmida, por causa da alta intensidade de chuvas (normalmente ocorrido entre dezembro e maio). A Figura 4.10 exemplifica uma situação dessas.

Figura 4. 10 - Representação de uma situação quando a zona úmida está no limite de ocupação, e não é gerado material para zona seca devido ao período chuvoso



Fonte: O autor.

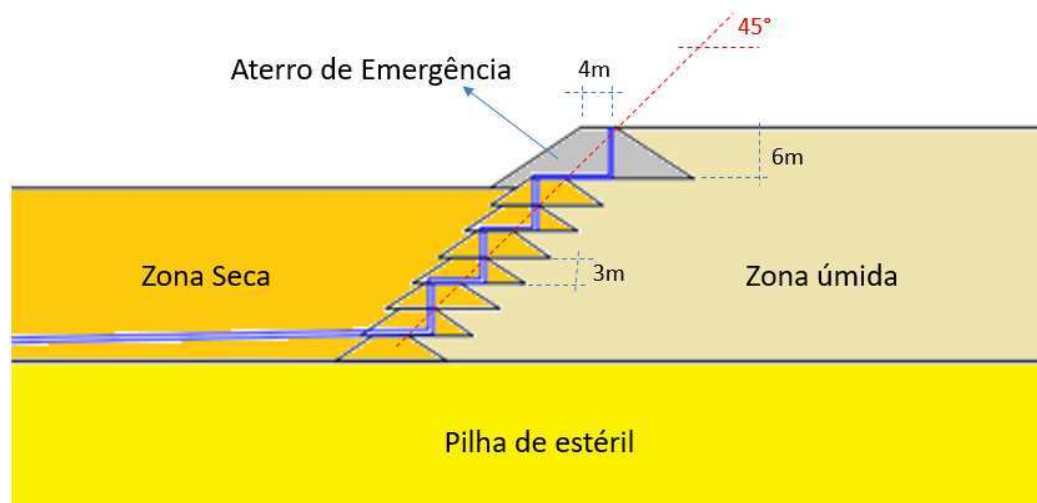
O aterro de emergência proposto, que é uma mistura do rejeito úmido (35,4%) mais uma porcentagem de areia e cimento, nesse trabalho está com taludes com 34° (1:1,5) e crista com largura de 4 metros. A altura desse aterro deve ser função da quantidade de material da zona úmida a ser contida, que deve ser calculada levando em consideração o volume ainda livre dentro da zona úmida, e também o tempo para término do período chuvoso.

É fundamental que a localização do aterro de emergência seja posicionada de modo que o alinhamento entre os diques de separação da zona seca e zona úmida (diques de alteamento), permaneça conforme definido em projeto. Por isso, nesse trabalho, o

posicionamento do aterro de emergência possui crista do talude voltado para zona úmida, seguindo o alinhamento das cristas dos diques de alteamento, que fazem um ângulo de 45° .

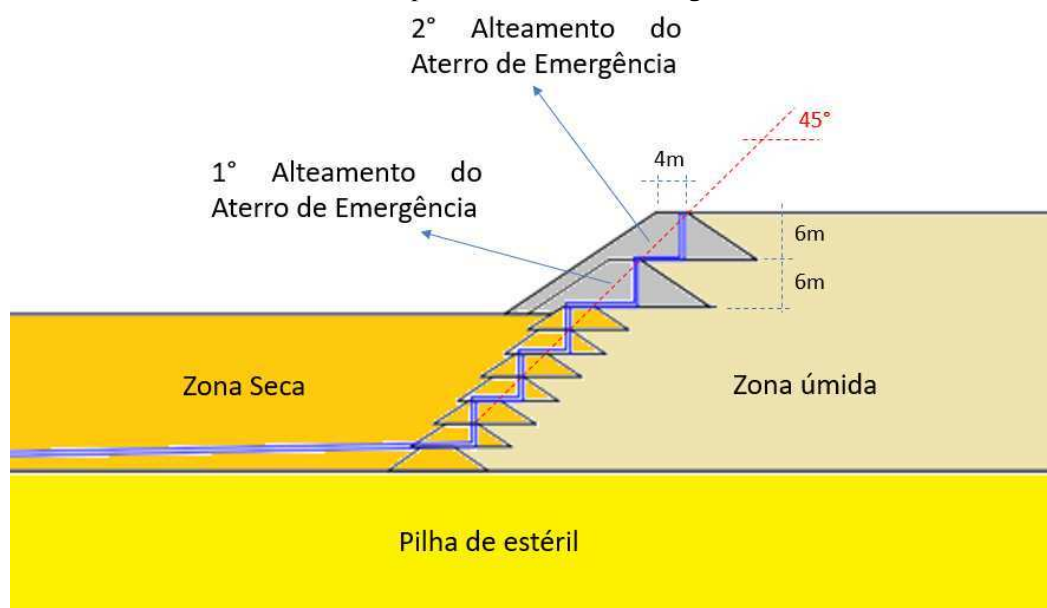
Foi considerado, nesse trabalho, a construção de um primeiro aterro de emergência de 6 metros de altura em relação à crista do último dique de alteamento (Figura 4.11). E caso não seja suficiente para conter todo volume gerado na zona úmida, dentro do período chuvoso, foi considerada a construção de um segundo aterro de emergência com 6 metros em relação a crista do primeiro aterro de emergência (Figura 4.12). Não se considerou mais alteamentos do aterro de emergência, além do segundo, porque subir muito o nível da zona úmida além do nível da zona seca, implica em maior necessidade de material da zona seca para reequilibrar as massas do depósito. Ou seja, quanto mais alto o aterro de emergência, mais material da zona seca é necessário para reequilibrar o depósito, de modo a tornar desnecessário a construção de mais aterros de emergência nos próximos períodos chuvosos. Em outras palavras, o aterro de emergência permite que o topo da zona úmida fique numa cota superior ou topo da zona seca. E quanto mais alto for o aterro de emergência, mais alto é o topo da zona úmida em relação ao topo da zona seca, e por isso, mais difícil será reestabelecer as condições normais de operação do depósito (cota da zona seca, superior à cota da zona úmida).

Figura 4. 11 - Construção de aterro de emergência com 6 metros de altura em relação à crista do último dique de separação entre zona seca e zona úmida



Fonte: O autor.

Figura 4. 12 -Construção de um segundo aterro de emergência com 6 metros de altura em relação à crista do primeiro aterro de emergência.

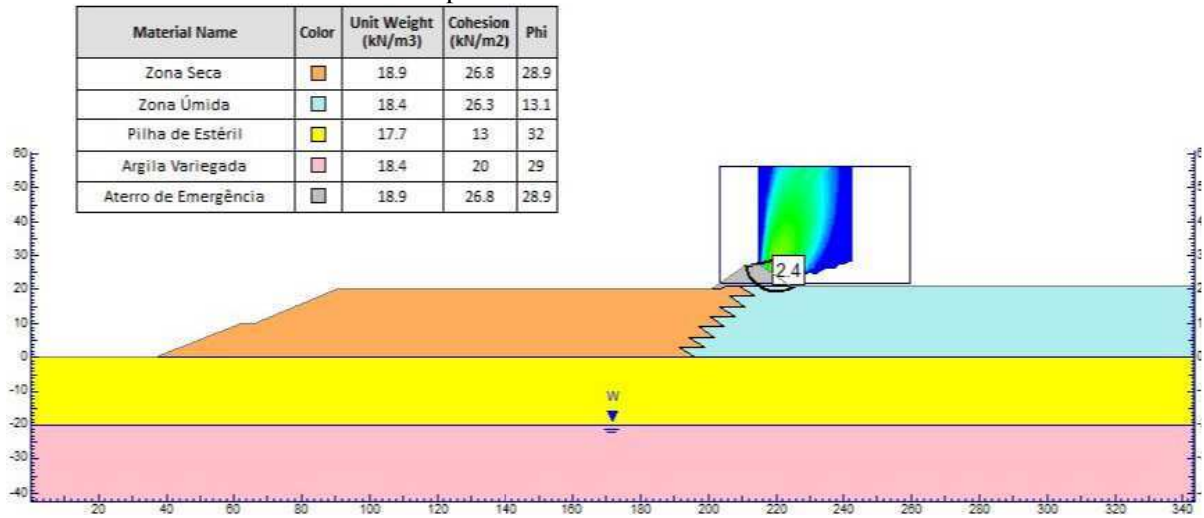


Fonte: O autor.

Os resultados das análises de estabilidade estão apresentados da Figura 4.13, à 4.16, para as duas situações construtivas do aterro de emergência.

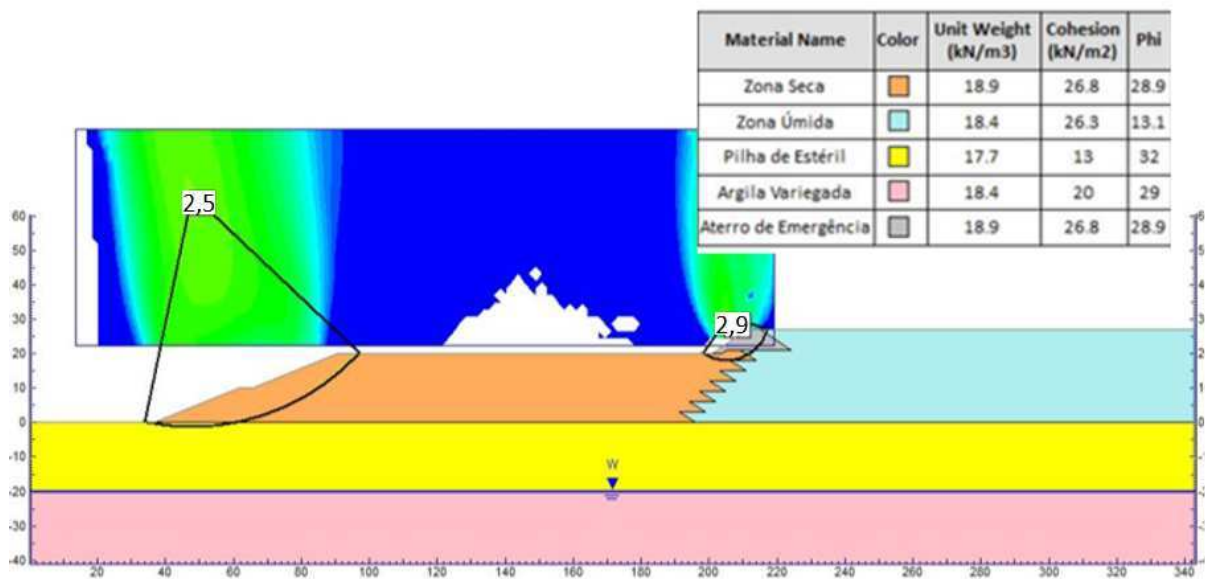
Na Figura 4.13 pode ser visto o resultado da análise que demonstra a estabilidade do aterro de emergência apoiado parcialmente sobre a zona úmida, em que o fator de segurança calculado para montante ficou com valor de 2,4. Na Figura 4.14, o resultado de FS igual a 2,9 na análise de estabilidade para jusante, após o incremento da zona úmida, mostra a estabilidade da estrutura. Também na Figura 4.14, pode ser verificado o valor do fator de segurança com valor de 2,5 para o talude da zona seca, na situação hipotética representada nas análises.

Figura 4. 13 - Análise de estabilidade para montante para o aterro de emergência de 6 m de altura, apoiado sobre a zona úmida



Fonte: O autor.

Figura 4. 14 - Análise de estabilidade para jusante para o aterro de emergência de 6 m de altura, após incremento da zona úmida

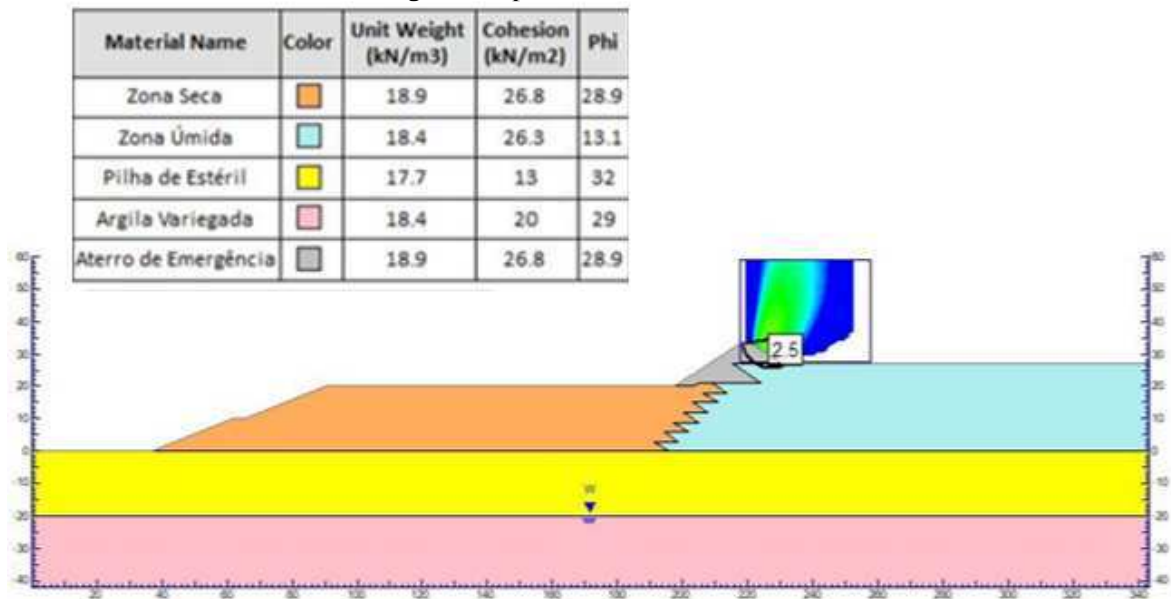


Fonte: O autor.

A zona úmida sendo estabilizada pelo aterro de emergência é uma situação transitória que deve ser corrigida com o alteamento da zona seca, até superar a cota de topo da zona úmida. Por isso, não é recomendado realizar alteamentos no aterro de emergência, pois quanto mais alto ele for, mais difícil será o empreendimento gerar material suficiente para a zona seca

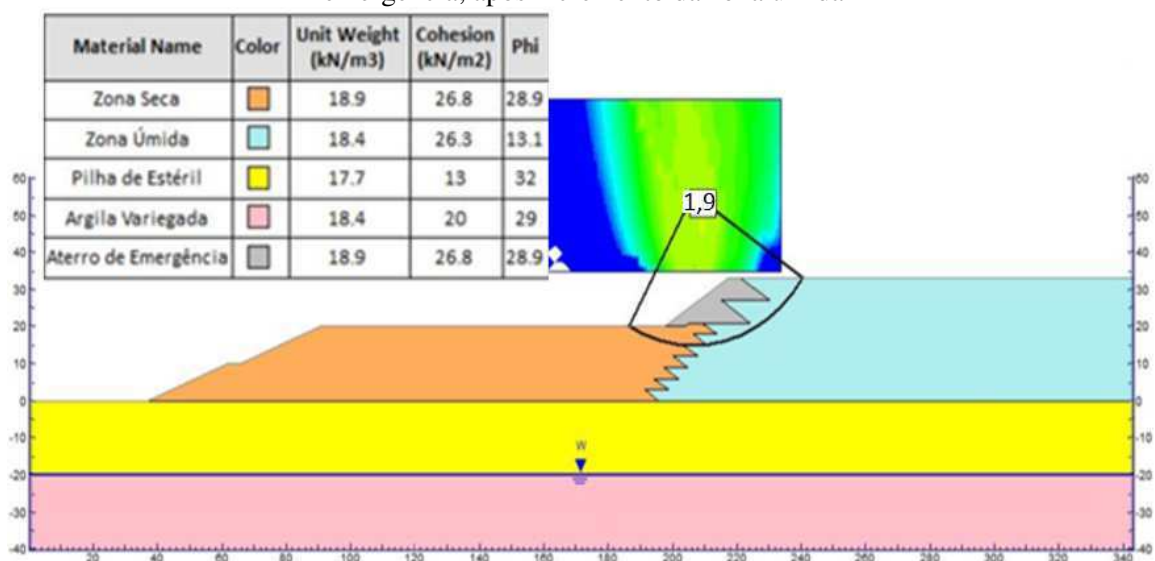
superar a cota da zona úmida. Porém, caso seja necessário mais um alteamento do aterro de emergência, nas figuras 4.21 e 4.22 pode ser visto que o aterro se mantém estável com fatores de segurança de 2,5 para análise de montante (após construção do aterro), e 1,9 para análise de jusante (após novo incremento da zona úmida).

Figura 4. 15 - Análise de estabilidade para montante para alteamento de mais 6 metros no aterro de emergência, apoiado sobre a zona úmida.



Fonte: O autor.

Figura 4. 16 - Análise de estabilidade para jusante para alteamento de mais 6 metros no aterro de emergência, após incremento da zona úmida



Fonte: O autor.

Todos os resultados das análises de estabilidade mostram que o aterro de emergência pode atingir os fatores de segurança encontrados, desde que as misturas de rejeito úmido, areia e cimento atinjam pelo menos os parâmetros geotécnicos encontrados para zona seca. Entretanto é recomendado a realização de ensaios triaxiais nas misturas de rejeito úmido, areia e cimento, para que se obtenham resultados mais realistas quanto a segurança desse aterro.

4.5.3 Teor de umidade da areia

O teor de umidade médio da areia, para ser considerado na mistura do aterro de emergência, foi obtido com base em 10 amostras retiradas em diferentes pontos de um depósito de areia, em janeiro de 2018. O teor de umidade médio obtido foi de 2,23%, conforme registrado na Tabela 4.16.

Tabela 4. 16 - Resultado da média dos teores de umidade obtidos para um depósito de areia

Determinação do teor médio do depósito de areia										
Amostras	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
W%	0,43%	1,42%	1,20%	1,83%	2,31%	5,04%	2,20%	4,61%	0,12%	3,14%
W% médio: 2,23%										

Fonte: O autor.

O valor médio obtido é baixo para uma pilha de areia num período chuvoso. O motivo disso é porque a coleta foi realizada num dia em que chovia na região do empreendimento, mas o local onde estava a pilha de areia teve baixa intensidade pluviométrica. Além disso, realizou-se as coletas aprofundando-se pouco em relação a superfície da pilha, por não haver equipamentos de escavação disponíveis no momento. E como a evaporação é rápida na areia, essa superfície secou em relação ao núcleo da pilha.

Porém, utilizar a areia com um teor de umidade inferior ao encontrado após as chuvas, pode ser considerado adequado em certos casos pois:

- O aterro de emergência só pode ser executado nas horas de estiagem dentro do período chuvoso, pois as atividades de terraplanagem durante chuvas geram riscos operacionais e por isso o setor de segurança do trabalho não permite a continuidade dos trabalhos.
- A areia perde umidade com rapidez, e as atividades de escavação, carregamento, transporte, descarregamento e espalhamento, aceleram a evaporação, principalmente em

dias de estiagem mais quentes, diferente do rejeito que apresenta perda de umidade mais lenta em função das maiores quantidades de argila e silte.

Além do mais, como é utilizada uma menor proporção de areia em relação ao rejeito, é pouco significativa a influência da umidade da areia nos resultados das proporções mássicas finais da mistura, conforme demonstrado no item 4.5.7.

4.5.4 Porcentagem de areia na mistura com rejeito

Realizou-se misturas de rejeito e areia variando as proporções de areia em 5%, 10% e 15% em relação à massa úmida. Sendo que, conforme definido, na mistura o rejeito deveria estar com umidade 4% acima da umidade ótima, para simular a condição do rejeito no limite de transição de disposição da zona seca para a zona úmida. Portanto, sendo a umidade ótima do rejeito encontrada em 31,4%, a umidade do rejeito na mistura com areia é de 35,4%. Portanto as umidades e proporções resultantes das misturas podem ser vistas na Tabela 4.17.

Tabela 4. 17 - Resultado das misturas de rejeito (com $w = 35,4\%$) e areia (com $w = 2,23\%$)

Porcentagens na mistura em relação a massa úmida	Proporções em relação a massa úmida	Teor de umidade resultante da mistura	Proporções em relação a massa seca
95% rejeito e 5% areia	19 rejeito : 1 areia	33,24%	14,3 rejeito : 1 areia
90% rejeito e 10% areia	9 rejeito : 1 areia	31,14%	6,8 rejeito : 1 areia
85% rejeito e 15% areia	5,7 rejeito : 1 areia	29,06%	4,3 rejeito : 1 areia
80% rejeito e 20% areia	8 rejeito : 2 areia	27,15%	3 rejeito : 1 areia

Fonte: O autor.

Foi realizada uma análise tátil visual nas misturas e optou-se no presente trabalho em estudar a mistura que leva 10% de areia (em relação a massa úmida), pois a mistura com 5% de areia não apresentou mudanças significativas na plasticidade, e conforme definido na metodologia (item 3.2.3.3) a menor porcentagem de areia que apresentou essa significativa redução foi a de 10%. Mas para fins de estudo comparativo, também realizou-se testes com a mistura que leva 15% de areia em relação à massa úmida.

A distribuição granulométrica do dois tipos de misturas de rejeito com areia, utilizadas nesse trabalho, esta apresentada na Tabela 4.18, em que a granulometria da areia pura foi obtida

através da média dos resultados apresentados na Tabela 4.7, e a granulometria do rejeito puro foi obtida na média dos resultados apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4. 18 - Resultado das misturas de rejeito e areia

Distribuição granulométrica	Porcentagens (%)			
	Areia (a)	Rejeito (r)	Mistura 1a:6,8r (em relação a massa seca)	Mistura 1a:4,3r (em relação a massa seca)
Pedregulho (>4,8mm)	0,1	0	0,01	0,02
Areia Grossa (4,8 – 2,0mm)	0,2	0	0,03	0,04
Areia Média (2,0 – 0,42mm)	22,84	0	2,95	4,34
Areia Fina (0,42 – 0,074mm)	76,5	7,4	16,15	20,34
Silte + Argila (<0,074mm)	0,35	92,6	80,81	75,19
Total	100	100	100	100

Fonte: O autor.

4.5.5 Compressão axial não confinada

Realizou-se ensaios de compressão não confinada, seguindo as especificações da metodologia de ensaio DNER-ME-201 (DNER,1994a). Os resultados das baterias de ensaios realizados então apresentados nos itens a seguir.

A Figura 4.17 mostra um exemplo da execução do ensaio de compressão não confinada, nos momentos antes e depois de rompido um corpo de prova.

Figura 4. 17 - Execução do ensaio de compressão não confinada



Fonte: O autor.

4.5.5.1 Variação da resistência em função do teor de cimento para mistura 1a:6,8r

Para se avaliar o ganho de resistência na mistura tipo 1 (1 parte de areia para 6,8 partes de rejeito, em relação a massa seca – 1a:6,8r) acrescida com diferentes porcentagens de cimento, realizou-se os ensaios apresentados na Tabela 4.19. Nesses ensaios foi variada a porcentagem de cimento em relação a massa seca da mistura tipo 1 em 4% (ensaios A1, A2 e A3), em 2% (ensaios A4, A5 e A6) e em 1% (ensaios A7, A8 e A9). Também realizou-se ensaios nessa mesma mistura (1a:6,8r) sem o acréscimo de cimento (ensaios A10, A11, A12 e A13). Esses ensaios foram realizados com tempo de cura de 7 dias.

Tabela 4. 19 - Resultados dos ensaios para determinação do ganho de resistência na mistura tipo 1 (1:6,8) em função da variação do teor de cimento, para tempo de cura de 7 dias.

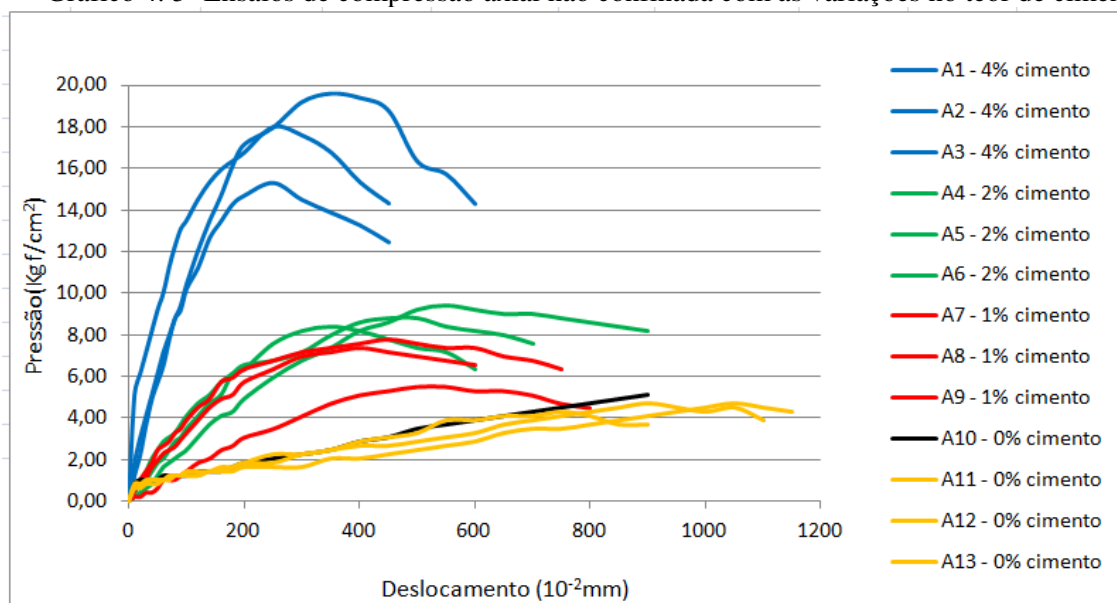
Ensaio	Proporção Areia : Rejeito (em relação a massa seca)	% cimento em relação a massa seca da mistura	Teor de umidade resultante	Resistência a compressão não confinada	Resistência média
A1	1:6,8	4%	29,9%	15,31 kgf/cm ²	17,63 kgf/cm ²
A2	1:6,8	4%	29,9%	17,97 kgf/cm ²	
A3	1:6,8	4%	29,9%	19,60 kgf/cm ²	
A4	1:6,8	2%	30,5%	8,37 kgf/cm ²	8,85 kgf/cm ²
A5	1:6,8	2%	30,5%	8,78 kgf/cm ²	
A6	1:6,8	2%	30,5%	9,39 kgf/cm ²	
A7	1:6,8	1%	30,8%	7,76 kgf/cm ²	6,87 kgf/cm ²
A8	1:6,8	1%	30,8%	7,35 kgf/cm ²	
A9	1:6,8	1%	30,8%	5,51 kgf/cm ²	
A10	1:6,8	0%	31,14%	Não atingiu a ruptura*	
A11	1:6,8	0%	31,14%	4,70 kgf/cm ²	4,56 kgf/cm ²
A12	1:6,8	0%	31,14%	4,70 kgf/cm ²	
A13	1:6,8	0%	31,14%	4,29 kgf/cm ²	

*Não atingiu a ruptura pois o ensaio atingiu o limite de deslocamento do equipamento.

Fonte: O autor.

No Gráfico 4.5 é mostrado o comparativo com todos os resultados dos ensaios realizados para cada teor de cimento na mistura 1a:6,8r. No Anexo D, os gráficos D1, D2, D3 e D4 apresentam os resultados obtidos para 1%, 2%, 4% e 0% de cimento respectivamente. Nesses gráficos, no eixo das abscissas se encontram os valores do deslocamento da prensa e, no eixo das ordenadas, a pressão atuante nos corpos de prova em função das deformações impostas pelo deslocamento.

Gráfico 4. 5 -Ensaio de compressão axial não confinada com as variações no teor de cimento



Fonte: O autor.

Ao se comparar os resultados das resistências apresentadas na Tabela 4.19, verifica-se que ocorre variabilidade de resultados, mesmo para os corpos de prova com o mesmo teor de cimento. Analisando a variação de resultados entre os ensaios A1, A2 e A3 (maior teor de cimento entre os ensaios) com os ensaios A11, A12 e A13 (sem utilização de cimento), fica evidenciada a influência do cimento na variação de resultados. Os demais ensaios, apresentados nos próximos tópicos, executados com 4% de cimento, também apresentaram variações nos resultados. Essa influência do cimento pode ser resultado das seguintes condições:

- Dificuldade de homogeneização do cimento na mistura, pois o rejeito umedecido tende a formar grumos (torrões de material argiloso). Em função da quantidade, tamanho e distribuição desses grumos, a perfeita homogeneização do cimento com a mistura de rejeito e areia, fica prejudicada. Afinal o cimento entra em reação com a superfície dos grumos, sendo que no interior fica uma massa fragilizada.
- Diferença entre o intervalo de tempo entre a homogeneização da mistura e a compactação dos corpos de prova, resultam em diferentes resistências a compressão, conforme apresentado no item 4.5.3.2.

Mas, apesar das variações de resultados para os mesmos teores de cimento, ao se avaliar as médias dos resultados para os diferentes teores de cimento, é verificada a tendência de aumento da resistência em função do teor de cimento.

Assim, analisando esses valores médios, verificou-se que as resistências apresentadas, demonstram que o acréscimo de 1% de cimento na mistura 1a:6,8r gera um ganho de resistência de 2,31 kgf/cm² o que equivale a um aumento de 50,7% na resistência, em relação à média das misturas sem cimento. Quando adicionados 2% de cimento na mistura a resistência média sobe em 4,29 kgf/cm², que é o equivalente a um acréscimo de 94,1% na resistência em relação à média das misturas sem cimento. E, quando adicionados 4% de cimento na mistura, a resistência média sobe em 13,07 kgf/cm², que é o equivalente a um acréscimo de 286,6% na média das resistências em relação à mistura sem cimento.

O ensaio A10 não atingiu a ruptura pois a prensa utilizada atingiu a deslocamento máximo com 9 mm. Então a prensa foi ajustada para maiores deslocamentos, possibilitando a ruptura nos ensaios A11, A12 e A13, que apresentaram uma ruptura média de 4,56 kgf/cm².

Para fins de referência, conforme definido na especificação de serviço DNER-ES-305 (DNER, 1997) para utilização de misturas de solo-cimento em pavimento, não devem ser utilizadas misturas nas camadas de base quando a resistência à compressão axial não confinada for inferior a 21 kgf/cm². Apesar do desempenho estrutural esperado para base de pavimentos não ter uma relação direta com o esperado no desempenho estrutural de aterros, o valor de 21 kgf/cm² é uma boa referência a se atingir. Até porque é válido considerar a possibilidade de se utilizar a mistura de rejeito, areia e cimento em obras de pavimentação em acessos construídos sobre o próprio depósito *dry stack*, ou em outras vias de acesso do empreendimento.

Por isso, realizou-se mais testes com o objetivo de verificar a possibilidade de aumentar a resistência da mistura rejeito, areia e cimento. Esses testes complementares estão apresentados nos itens a seguir.

4.5.5.2 Variação da resistência em função do tempo de descanso da mistura antes da compactação

Com o objetivo de se verificar as variações da resistência à compressão simples em função do tempo de preparação da mistura (1a:6,8r mais 4% de cimento) antes da compactação, realizou-se ensaios sem tempo de espera para compactação (0 horas de descanso), 1 hora, 2 horas e 4 horas de descanso. A Tabela 4.20 apresenta os resultados dos ensaios realizados com ruptura após 7 dias de cura. No Anexo D, os gráficos de D.5 a D.8 representam esses ensaios.

Tabela 4. 20 - Resultados dos ensaios para determinação do ganho de resistência na mistura (1a:6,8r) com 4% de cimento em função da variação de tempo de espera para compactação.

Ensaio	Proporção Areia : Rejeito (em relação a massa seca)	Tempo de espera antes da compactação	Teor de umidade resultante	Resistência a compressão não confinada	Resistência média
A14	1:6,8	0 horas	29,9%	19,19 kgf/cm ²	16,20 kgf/cm ²
A15	1:6,8	0 horas	29,9%	12,66 kgf/cm ²	
A16	1:6,8	0 horas	29,9%	16,74 kgf/cm ²	
A17	1:6,8	1 hora	29,9%	25,52 kgf/cm ²	25,73 kgf/cm ²
A18	1:6,8	1 hora	29,9%	26,95 kgf/cm ²	
A19	1:6,8	1 hora	29,9%	24,71 kgf/cm ²	
A20	1:6,8	2 horas	29,9%	21,65 kgf/cm ²	26,34 kgf/cm ²
A21	1:6,8	2 horas	29,9%	28,18 kgf/cm ²	
A22	1:6,8	2 horas	29,9%	29,20 kgf/cm ²	
A23	1:6,8	4 horas	29,9%	24,91 kgf/cm ²	24,78 kgf/cm ²
A24	1:6,8	4 horas	29,9%	21,85 kgf/cm ²	
A25	1:6,8	4 horas	29,9%	24,78 kgf/cm ²	

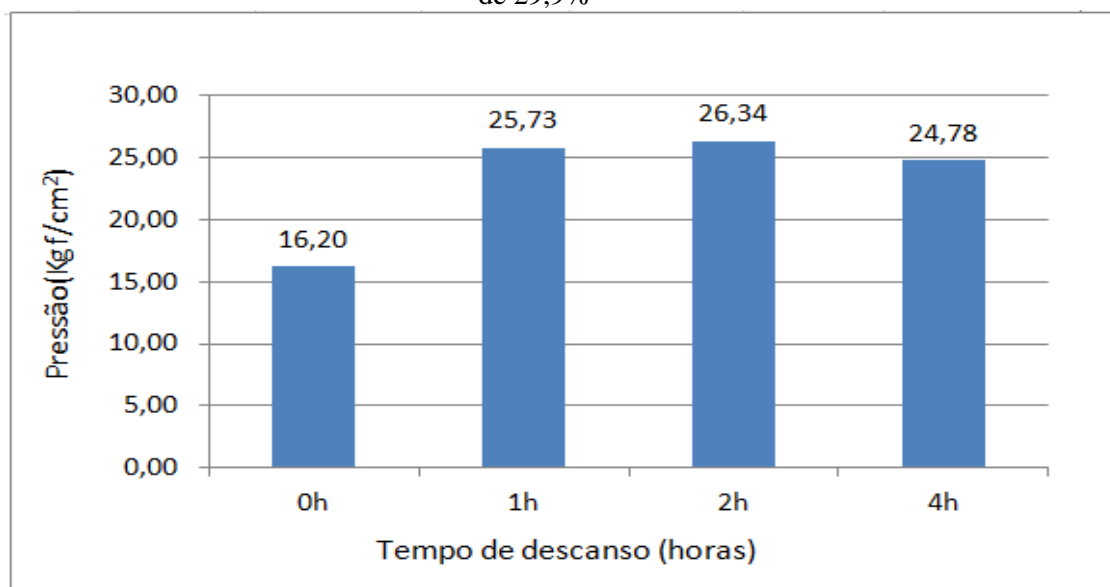
Fonte: O autor.

O teor de umidade apresentado na Tabela 4.20 é o valor resultante da mistura de rejeito com 35,4% de umidade, areia com 2,23% de umidade, na proporção de 1a:6,8r, acrescida com 4% de cimento em relação a massa seca.

Os ensaios realizados nos corpos de prova sem tempo de descanso antes da compactação apresentaram um valor médio de 16,20 kgf/cm² para o valor de ruptura. Esse valor foi apenas 1,43 kgf/cm² menor que a média encontrada nos ensaios A1, A2 e A3 que foi de 17,63 kgf/cm². Essa é uma diferença de apenas 8,1% entre a média dos resultados dos primeiros ensaios realizados no dia 21/11/2018 (A1, A2 e A3) e esses ensaios realizados no dia 19/03/2019 (A14, A15 e A16).

Com base nos resultados das resistências para os corpos de provas compactados após 1 hora, 2 horas e 4 horas de descanso pode ser observado que não houve ganho significativo de resistência após 1 hora de descanso, conforme pode ser visto no Gráfico 4.6. Com 1 hora de descanso o ganho de resistência foi de 58,8% em relação à média dos ensaios sem tempo de descanso, que equivale a um acréscimo de 9,53 kgf/cm². E para 2 horas e 4 horas de descanso a variação da resistência foi de mais 2,4% e menos 3,7%, respectivamente, em relação à média dos ensaios com 1 hora de descanso.

Gráfico 4. 6 - Evolução da média das resistências a compressão axial não confinada para mistura 1a:6,8r mais 4% de cimento em função ao tempo de descanso antes da compactação. Teor de umidade de 29,9%



Fonte: O autor.

4.5.5.3 Variação da resistência em função do tempo de cura

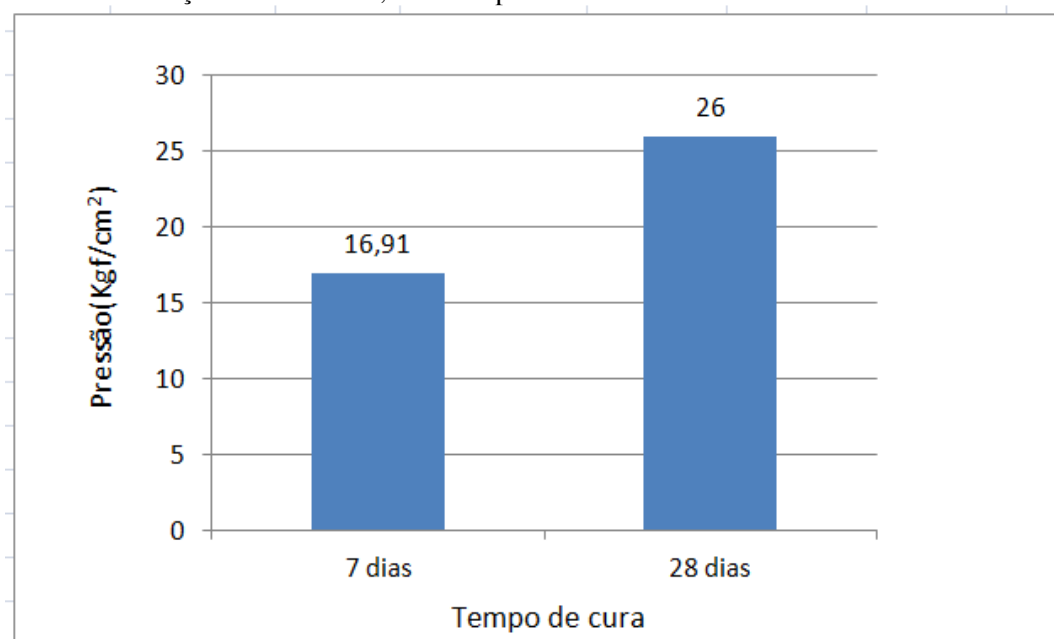
Para avaliar a variação da resistência da mistura (1a:6,8r mais 4% de cimento) com o tempo de cura realizou-se ensaios com tempo de 28 dias de cura (ensaios A35, A36 e A37), e comparados com os ensaios realizados com 7 dias de cura (ensaios A1, A2, A3, A14, A15 e A16). Executou-se todos ensaios em corpos de prova moldados na umidade representativa de campo de 29,9%. A Tabela 4.21 apresenta as informações da bateria de ensaios realizada. O Gráfico 4.7 mostra o comparativo da média dos resultados para esses tempos de cura. No Anexo D, o Gráfico D.9 apresenta o gráfico com o comparativo dos ensaios realizados com 7 e 28 dias de cura.

Tabela 4. 21 - Resultados dos ensaios para determinação da variação da resistência em função do tempo de cura, para 4% de cimento em relação a massa seca

Ensaio	Proporção Areia : Rejeito (em relação a massa seca)	Tempo de cura	Teor de umidade resultante	Resistência a compressão não confinada	Resistência média
A1	1:6,8	7 dias	29,9%	15,31 kgf/cm ²	17,63 kgf/cm ²
A2	1:6,8	7 dias	29,9%	17,97 kgf/cm ²	
A3	1:6,8	7 dias	29,9%	19,60 kgf/cm ²	
A14	1:6,8	7 dias	29,9%	19,19 kgf/cm ²	16,20 kgf/cm ²
A15	1:6,8	7 dias	29,9%	12,66 kgf/cm ²	
A16	1:6,8	7 dias	29,9%	16,74 kgf/cm ²	
A35	1:6,8	28 dias	29,9%	25,52 kgf/cm ²	26 kgf/cm ²
A36	1:6,8	28 dias	29,9%	26,75 kgf/cm ²	
A37	1:6,8	28 dias	29,9%	25,73 kgf/cm ²	

Fonte: O autor.

Gráfico 4. 7 - Média dos resultados da compressão axial não confinada para mistura 1a:6,8r mais 4% de cimento em relação à massa seca, com tempo de cura de 7 e 28 dias. Teor de umidade de 29,9%



Fonte: O autor.

Os resultados demonstram que a resistência aumentou com o tempo de cura, passando de 16,91 kgf/cm² para 7 dias de cura, para 26 kgf/cm² para 28 dias de cura. Um aumento equivalente a 53,8%. Sendo que 16,91 kgf/cm² é a média entre os resultados de 17,63 kgf/cm² e 16,20 kgf/cm².

A importância em se conhecer a influência do tempo de cura na resistência da mistura compactada, é porque o aterro de emergência pode ser construído de forma planejada, sendo que sua necessidade pode ser prevista com meses de antecedência. Assim, caso seja verificado

a necessidade de aumentar a resistência do aterro de emergência antes de carregá-lo com o material disposto na da zona úmida, é possível planejar sua construção de modo que seja permitido um tempo de cura de 28 dias antes desse carregamento. Além disso, como existe a possibilidade de ser oportuno a utilização da mistura de rejeito, areia e cimento na construção de acessos de serviço, o tempo de cura de 28 dias permitirá a utilização desse material como camada de base, por atingir resistência superior a 21 kgf/cm², conforme definido na especificação de serviço DNER-ES-305/97 (DNER, 1997).

4.5.5.4 Variação da resistência em função da porcentagem de areia na mistura

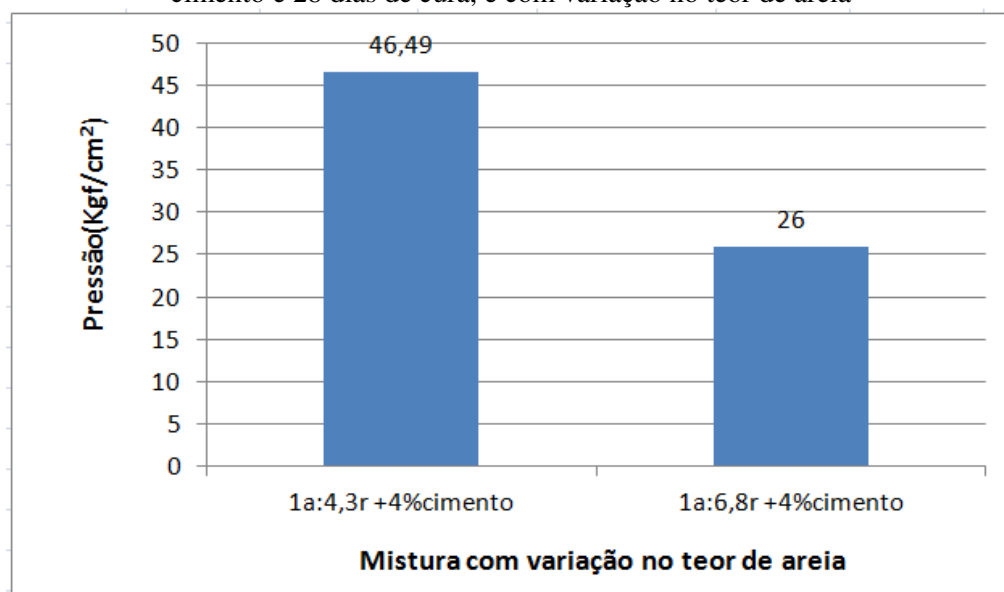
Para se averiguar a variação da resistência influenciada pela porcentagem de areia, realizou-se ensaios com a mistura do tipo 1a:4,3r mais 4% de cimento que é representativa da mistura de 15% de areia com 85% de rejeito, em relação às massas úmidas (ensaios A32, A33 e A34). Comparou-se esses resultados com a mistura 1a:6,8r mais 4% de cimento que é representativa da mistura de 10% de areia com 90% de rejeito, em relação às massas úmidas (ensaios A35, A36 e A37). A Tabela 4.22 apresenta a bateria de ensaios realizados para as diferentes porcentagens de areia, e o Gráfico 4.8 mostra o comparativo da média desses resultados. No Anexo D, o Gráfico D.10 apresenta o comparativo dos ensaios.

Tabela 4. 22 - Resultados dos ensaios para determinação da variação da resistência em função da porcentagem de areia na mistura, para o tempo de cura de 28 dias (sem tempo de espera).

Ensaio	Proporção Areia : Rejeito (em relação a massa seca)	% cimento em relação a massa seca da mistura	Teor de umidade resultante	Resistência a compressão não confinada	Resistência média
A32	1:4,3	4%	27,9%	46,15 kgf/cm ²	46,49 kgf/cm ²
A33	1:4,3	4%	27,9%	49,82 kgf/cm ²	
A34	1:4,3	4%	27,9%	43,49 kgf/cm ²	
A35	1:6,8	4%	29,9%	25,52 kgf/cm ²	26 kgf/cm ²
A36	1:6,8	4%	29,9%	26,75 kgf/cm ²	
A37	1:6,8	4%	29,9%	25,73 kgf/cm ²	

Fonte: O autor.

Gráfico 4. 8 -Média dos resultados da compressão axial não confinada para misturas com 4% de cimento e 28 dias de cura, e com variação no teor de areia



Fonte: O autor.

Os resultados mostram que a rigidez aumentou com a maior porcentagem de areia na mistura com 4% de cimento em relação a massa seca e tempo de cura de 28 dias. A resistência média passou de 26 kgf/cm² para relação de 1a:6,8r (mistura base seca) para 46,49 kgf/cm² para relação de 1a:4,3r (mistura base seca). Um aumento equivalente a 78,8%.

4.5.5.5 Variação da resistência em função dos parâmetros ótimos de compactação das misturas

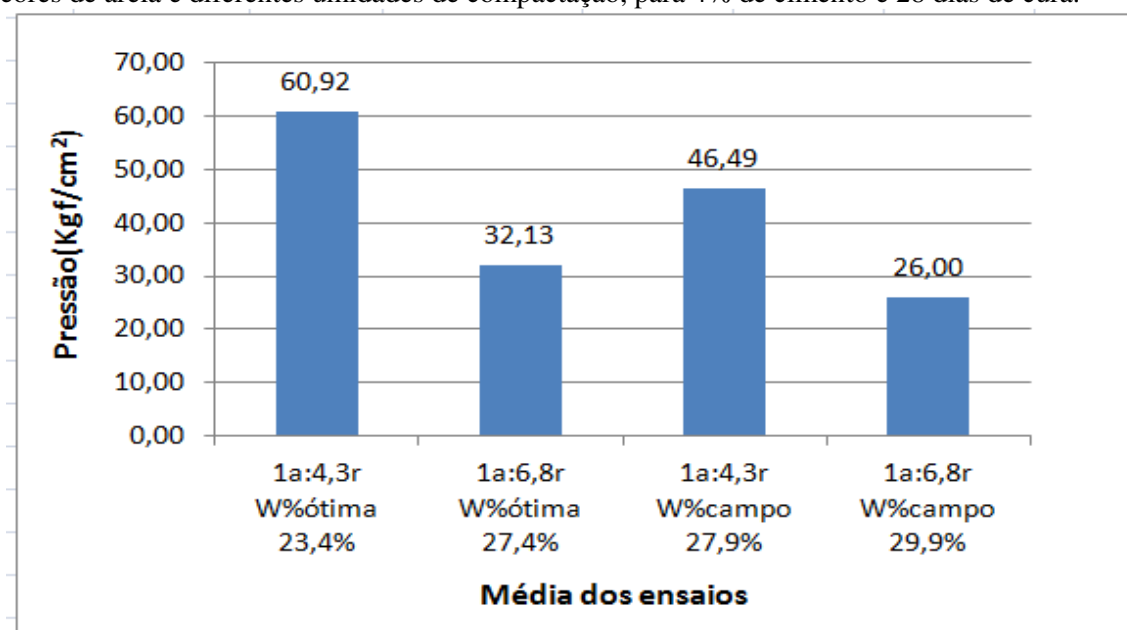
Com objetivo de verificar a variação da resistência à compressão axial não confinada para corpos de prova moldados na umidade ótima de compactação (Proctor Normal), quando comparada com a umidade de campo para formação do aterro de emergência realizaram-se ensaios com teores de umidade mostrados na Tabela 4.23, na qual são apresentados também os resultados da bateria de ensaios, e o Gráfico 4.9 a média dos resultados. No Anexo D, o Gráfico D.11 apresenta os ensaios nas misturas do tipo 1:4,3 + 4% cimento (28 dias de cura), e o Gráfico D.12 apresenta os ensaios nas misturas do tipo 1:6,8 + 4% cimento (28 dias de cura).

Tabela 4. 23 - Resultados dos ensaios para comparativo de resultados para misturas compactadas na umidade de campo e na umidade ótima, para 4% de cimento e 28 dias de cura

Ensaio	Proporção Areia : Rejeito (em relação a massa seca)	% cimento em relação a massa seca da mistura	Teor de umidade	Resistência a compressão não confinada	Resistência média
A26	1:4,3	4%	W%ótima = 23,4%	59,42 kgf/cm ²	60,92 kgf/cm ²
A27	1:4,3	4%	W%ótima = 23,4%	67,39 kgf/cm ²	
A28	1:4,3	4%	W%ótima = 23,4%	55,95 kgf/cm ²	
A29	1:6,8	4%	W%ótima = 27,4%	35,53 kgf/cm ²	32,13 kgf/cm ²
A30	1:6,8	4%	W%ótima = 27,4%	32,47 kgf/cm ²	
A31	1:6,8	4%	W%ótima = 27,4%	28,38 kgf/cm ²	
A32	1:4,3	4%	W%campo = 27,9%	46,15 kgf/cm ²	46,49 kgf/cm ²
A33	1:4,3	4%	W%campo = 27,9%	49,82 kgf/cm ²	
A34	1:4,3	4%	W%campo = 27,9%	43,49 kgf/cm ²	
A35	1:6,8	4%	W%campo = 29,9%	25,52 kgf/cm ²	26 kgf/cm ²
A36	1:6,8	4%	W%campo = 29,9%	26,75 kgf/cm ²	
A37	1:6,8	4%	W%campo = 29,9%	25,73 kgf/cm ²	

Fonte: O autor.

Gráfico 4. 9 - Média dos resultados da compressão axial não confinada para misturas com diferentes teores de areia e diferentes umidades de compactação, para 4% de cimento e 28 dias de cura.



Fonte: O autor.

Os resultados mostram que a resistência para os dois tipos de mistura em que se variou o teor de areia, aumenta para os corpos de prova compactados na umidade ótima de compactação. Para a mistura 1a:4,3r (4% cimento, 28 dias de cura) a resistência média aumentou em 14,43 kgf/cm² quando compactado na umidade ótima (23,4%) em relação à umidade de campo (27,9%), o que equivale a um acréscimo de 31% na resistência. E na mistura 1a:6,8r (4% cimento, 28 dias de cura) a resistência média aumentou em 6,13 kgf/cm² quando

compactado na umidade ótima (27,4%) em relação à umidade de campo (29,9%), o que equivale a um acréscimo de 23,6% na resistência.

4.5.5.6 Variação da resistência da mistura em comparação com o rejeito compactado na umidade ótima

Realizou-se uma verificação comparando o resultado das resistências encontradas nos itens anteriores para as misturas testadas para o aterro de emergência, com o resultado de resistência a compressão não confinada do rejeito compactado com umidades próximas da umidade ótima.

Para isso foram selecionados ensaios realizados em corpos de prova com umidades próximas a umidade ótima de compactação do rejeito (31,4%), cujo resultado encontra-se na Tabela 4.24, e o resultados dos ensaios realizados encontram-se no Gráfico D13 do Anexo D.

Tabela 4. 24 - Resultados dos ensaios realizados em rejeito puro compactado com umidades próximas da ótima de compactação

Ensaio	Teor de umidade	Resistência a compressão não confinada	Resistência média
A38	30,8%	5,51 kgf/cm ²	5,82 kgf/cm ²
A39	31,4%	6,33 kgf/cm ²	
A40	30,4%	5,31 kgf/cm ²	
A41	31,8%	6,13 kgf/cm ²	

Fonte: O autor.

A Tabela 4.25 apresenta os resultados médios dos ensaios realizados em que pode ser verificado que todas as misturas de rejeito úmido, areia e cimento apresentaram resistências médias superiores ao rejeito puro compactado próximo da umidade ótima de compactação. E conforme aumenta o teor de cimento, o tempo de cura e o teor de areia, maior é a resistência, principalmente se o material homogeneizado ficar 1 hora de repouso antes da compactação.

Entretanto, as misturas de rejeito úmido e areia na proporção de 1a:6,8r (sem adição de cimento) não atingiram resistência superior ao rejeito puro compactado próximo da umidade ótima de compactação. Apesar de ser esperado que a areia misturada em material fino forneça um incremento de resistência, isso não ocorreu nesse caso pois essa mistura apresentou umidade resultante de 31,14%, sendo que a umidade ótima encontrada para essa mistura foi de 27,2%. Ou seja, enquanto o rejeito puro foi compactado próximo da umidade ótima de compactação (31,4%), essa mistura de rejeito e areia foi compactada em quase 4% acima da umidade ótima.

Tabela 4. 25 - Comparativo de resultados para os diferentes ensaios e materiais

Variação de materiais	Resistências médias (kgf/cm ²)	Teor de umidade	Ensaio realizados	Tempo de espera*
Rejeito próximo da umidade ótima	5,82	entre 30,4% e 31,8%	A38, A39, A40 e A41	0 horas
1a:6,8r	4,56	31,14%	A11, A12 e A13	0 horas
1a:6,8r + 1% cimento 7 dias de cura	6,87	30,80%	A7, A8 e A9	0 horas
1a:6,8r + 2% cimento 7 dias de cura	8,85	30,50%	A4, A5 e A6	0 horas
1a:6,8r + 4% cimento 7 dias de cura	16,92	29,90%	A1, A2, A3, A14, A15 e A16	0 horas
1a:6,8r + 4% cimento 7 dias de cura	25,73	29,90%	A17, A18 e A19	1 hora
1a:6,8r + 4% cimento 7 dias de cura	26,34	29,90%	A20, A21 e A22	2 hora
1a:6,8r + 4% cimento 7 dias de cura	24,78	29,90%	A23, A24 e A25	4 hora
1a:6,8r + 4% cimento 28 dias de cura	26,00	29,90%	A35, A36 e A37	0 horas
1a:4,3r + 4% cimento 28 dias de cura	46,49	27,90%	A32, A33 e A34	0 horas
1a:6,8r + 4% cimento 28 dias de cura, na umidade ótima	32,13	27,40%	A32, A33 e A34	0 horas
1a:4,3r + 4% cimento 28 dias de cura, na umidade ótima	60,92	23,40%	A32, A33 e A34	0 horas

Fonte: O autor.

4.5.5.7 Influência da umidade da areia nos resultados

Conforme descrito no item 4.5.2 a umidade média da areia encontrada na coleta realizada em janeiro de 2018 não representa a umidade típica do depósito de areia em períodos chuvosos. Afinal no dia coleta, apesar de estar chovendo no empreendimento, no local do depósito de areia, que ficava próximo ao laboratório de obras, acerca de 30 km do empreendimento, não choveu significativamente. Porém o resultado dessa média de umidade induziu a confecção dos corpos de prova, sendo utilizado areia com 2,23% de umidade, na mistura com rejeito e cimento.

Para verificar a influência do teor de umidade da areia nas misturas realizadas, foi realizado um comparativo entre resultado mássico da umidade da areia utilizada no trabalho (2,23%) com a umidade de 10%. Sendo que esse valor de 10%, utilizado para fins comparativos, representa uma umidade possível de ocorrer nas pilhas de areia em períodos chuvosos, mas submetidas às operações de carregamento, transporte, descarregamento e espalhamento em dias de estiagem.

Conforme demonstrado na Tabela 4.26, a alteração da umidade da areia não afeta significativamente a umidade da mistura de rejeito, areia e cimento. Isso porque a proporção de areia em relação a massa de rejeito é pequena, principalmente para a mistura na proporção 1a:6,8r, que foi a principal proporção a ser testada nesse trabalho.

Passar a umidade da areia de 2,23% para 10% representa um aumento percentual de 348,43%. Entretanto a variação de umidade na mistura tem um aumento proporcional muito menor conforme pode ser verificado na Tabela 4.26. Para a mistura de 1 parte de areia para 9 partes de rejeito (1a:9r), utilizando 1%, 2% e 4% de cimento, o aumento de umidade das misturas quando utilizada areia com 10% de umidade, variou apenas entre 3,85% e 3,87%. Já para mistura de 1 parte de areia para 5,7 partes de rejeito (1a:5,7r), utilizando 4% de cimento, o aumento de umidade da mistura quando utilizada areia com 10% de umidade, foi de 5,97%.

Tabela 4. 26 - Variação da umidade da mistura em função da umidade da areia

Mistura de rejeito e areia em relação a massa úmida*	% cimento**	W% resultante da mistura	
		W% areia = 2,23%	W% areia = 10%
1a:9r	4	29,90%	31,05%
1a:9r	2	30,52%	31,70%
1a:9r	1	30,83%	32,02%
1a:5,7r	4	27,98%	29,65%

* Rejeito com W% = 35,4%, e areia nas umidades da tabela.

** Em relação a massa seca

Fonte: O autor.

A Tabela 4.27 apresenta a variação da proporção de rejeito e areia (em relação a massa seca) em função da variação da umidade da areia. Como as misturas são realizadas utilizando partes com rejeito úmido e partes com areia úmida, quanto maior a umidade da areia, menor é a massa de areia seca na mistura. Por isso, no comparativo entre as umidades da areia (2,23% e 10%) a proporção de massa seca de rejeito sobe de 6,8 para 7,3 na mistura 1a:9r, e sobe de 4,3 para 4,6 na mistura 1a:5,7r. Isso dá respectivamente um aumento proporcional de rejeito seco de 7,35% e 6,98%.

Tabela 4. 27 - Variação da proporção da mistura em função da umidade da areia

Mistura de rejeito e areia em relação a massa úmida*	% cimento**	Proporção resultante em relação a massa seca	
		W% areia = 2,23%	W% areia = 10%
1a:9r	4	1a:6,8r	1a:7,3r
1a:9r	2	1a:6,8r	1a:7,3r
1a:9r	1	1a:6,8r	1a:7,3r
1a:5,7r	4	1a:4,3r	1a:4,6r

* Rejeito com W% = 35,4%, e areia nas umidades da tabela.

** Em relação a massa seca

Fonte: O autor.

Entretanto, apesar da variação nos resultados mássicos da mistura serem inferiores à variação proporcional da umidade da areia, é recomendado realizar os ensaios triaxiais com a umidade mais próxima das condições reais de campo para o período chuvoso. Para os resultados de compressão axial não confinada realizados, a tendência seria uma redução nos resultados de resistência se fossem utilizadas nas misturas a areia com umidade de 10%. Isso pode ser afirmado pelos seguintes motivos:

- O aumento de massa seca de rejeito em relação a massa seca de areia tende a reduzir a resistência, como constatado no item 4.5.3.4.
- O aumento de umidade da mistura tende a reduzir a resistência pois as misturas estão no ramo úmido.

4.5.6 Critérios construtivos do aterro de emergência

O aterro de emergência deverá ser construído, preferencialmente, nos dias de estiagem dentro do período chuvoso. É recomendado a realização de ensaios em uma maior variedade de misturas de rejeito úmido, areia e cimento, além da execução de pistas experimentais para definir a eficiência da compactação e homogeneidade da mistura.

O ideal é que o rejeito úmido seja misturado com areia e cimento através de usinas dimensionadas para esse fim, pois é o método mais eficiente para homogeneizar a mistura, e os custos de aquisição dos equipamentos não são muito altos, por serem comumente usados para realizar misturas de materiais asfálticos.

Mas caso a mistura seja realizada diretamente no depósito, através de equipamentos de terraplanagem, é recomendado que em primeiro lugar seja realizada a mistura de areia com o rejeito úmido. A quantidade de areia deve ser calculada em função do volume da camada de aterro de emergência a ser construída, e essa quantidade deve ser distribuída ao longo da camada, através da deposição de vários montes de areia. É recomendado que esses montes de

areia depositados sobre a camada de rejeito úmido sejam espalhados com o uso de motoniveladora. A mistura de homogeneização da areia com o rejeito úmido pode ser realizada com a mesma motoniveladora ou com utilização de trator de pneu rebocando grade escarificadora. Deve ser avaliada, através de pistas experimentais, a eficiência de homogeneização com os equipamentos de terraplanagem utilizados, e também deve ser avaliado o distanciamento mais eficiente entre os montes de deposição da areia.

Após devidamente homogeneizados a areia e o rejeito úmido, deverá ser misturado o cimento nas proporções definidas em projeto. Caso não seja realizada em usina essa mistura, o mais indicado é a utilização de uma pá carregadeira, ou retroescavadeira, para transportar o cimento em suas pás, enquanto funcionários utilizando ferramentas manuais vão espalhando de forma uniforme o cimento sobre a superfície da camada. Após lançado todo cimento sobre essa camada, a mistura deve ser realizada com motoniveladora, ou preferencialmente com trator de pneu rebocando grade escarificadora, até que a mistura fique homogênea.

Após homogeneizada a mistura de rejeito úmido, areia e cimento, a camada do aterro de emergência poderá ser imediatamente compactada com rolo pé de carneiro (preferencialmente). Mas, conforme mostrado no item 4.5.3.3, se for possível aguardar, é melhor realizar a compactação 1 hora após o incremento de cimento na mistura, pois a resistência do aterro de emergência será maior.

O consumo de areia e cimento para mistura do aterro de emergência, é função da proporção selecionada e do volume projetado do aterro de emergência. A Tabela 4.28 apresenta o consumo desses materiais em função do volume do aterro de emergência, sendo que a proporção selecionada deve ser aquela capaz de aumentar os parâmetros geotécnicos para valores de no mínimo iguais aos parâmetros geotécnicos do material da zona seca, conforme mencionado no item anterior. Sendo que, em se tratando de pequenas proporções de cimento, esse componente não é capaz de mudar consideravelmente o peso específico da mistura compactada de areia e rejeito. A Tabela 4.28 foi calculada levando-se em consideração os pesos específicos encontrados na execução dos ensaios de compressão simples apresentados nesse capítulo.

Tabela 4. 28 - Consumo de areia e cimento para cada metro cúbico do aterro de emergência

Mistura	Peso específico natural (t/m ³)	Massa por m ³ de aterro de emergência (kg)	Massa de areia por m ³ (kg)	Massa de cimento por m ³ (kg)
1a:4,3r + 1%cimento	1,84	1840,0	273,2	18,4
1a:4,3r + 2%cimento	1,84	1840,0	270,5	36,8
1a:4,3r + 4%cimento	1,84	1840,0	265,0	73,6
1a:6,8r + 1%cimento	1,90	1900,0	188,1	19,0
1a:6,8r + 2%cimento	1,90	1900,0	186,2	38,0
1a:6,8r + 4%cimento	1,90	1900,0	182,4	76,0

Fonte: O autor.

4.6 Análise comparativa entre depósito de disposição a seco e reservatório de rejeito adensado

Uma maneira de se confirmar a viabilidade do uso do sistema de disposição a seco no empreendimento de estudo é comparar esse método com o método utilizado atualmente.

a) Premissas utilizadas no comparativo, para o método de disposição em reservatório de secagem:

- A geração de polpa é considerada de 29.557.520,5 t/ano, conforme apresentado no item 2.3.1.3.

- Considera-se que o rejeito dragado e lançado nos reservatórios de secagem terá o teor de sólidos de 25%, por ser esse um valor possível de ser atingido, conforme explicado no item 2.3.1.3.

- Para camada disposta de rejeito no reservatório de secagem, considera-se a espessura de lançamento de 50 cm, e tempo de secagem de 34 dias. Após a secagem a altura da camada fica com 34,16 cm, conforme apresentado na Tabela 2.2.

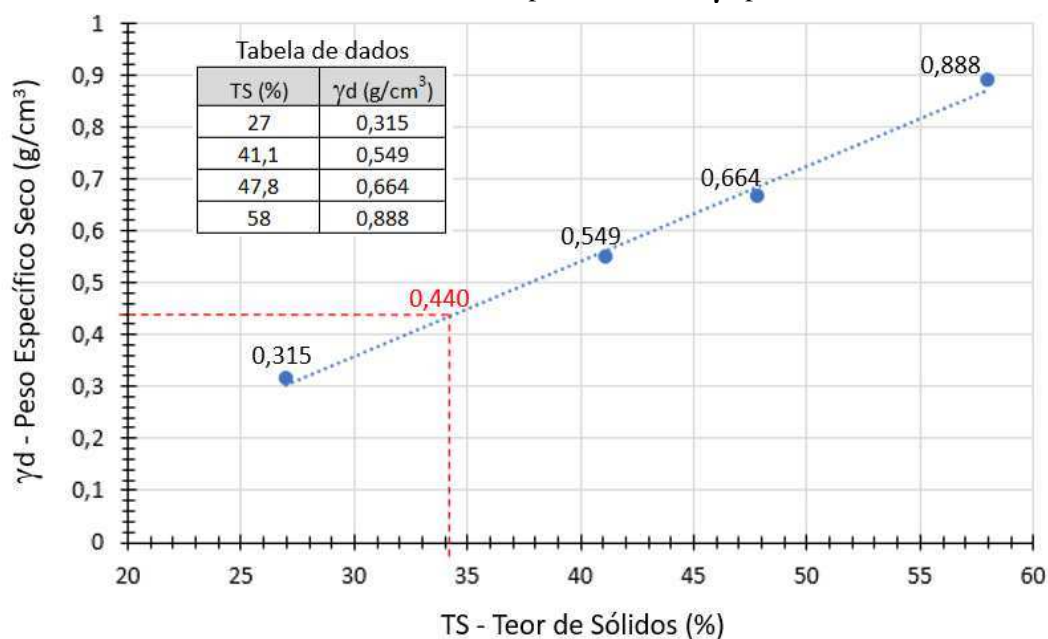
- O teor de sólidos do rejeito na camada disposta do reservatório de secagem, após 34 dias de secagem, é a média entre os valores de topo e base nessa camada (33,51% e 34,70%), conforme apresentados na Tabela 2.2. Que dá o valor médio de 34,1%.

- O valor do peso específico seco (γ_d) da polpa de rejeito com 34,1% foi obtido através da linha de tendência apresentada no Gráfico 4.10, e que dá o valor de 0,440 g/cm³.

- Não foi considerado a influência do adensamento na sobreposição de camadas, sendo que no comparativo, também não foi considerado o efeito do adensamento nas camadas dispostas no depósito *dry stack*. • Nesse comparativo considerou-se para o volume de armazenamento do reservatório a média obtida em função da capacidade de armazenamento

de 11 reservatórios existentes no empreendimento, cujos valores apresentam-se em relatório técnico do empreendimento. Também considerou-se a média das áreas de ocupação desses reservatórios. Assim, considerou-se a capacidade de armazenamento de 7.233.503 m³, ocupando uma área de 553.418 m² (55,3 ha).

Gráfico 4. 10 - Teor de Sólidos (TS) vs Peso Específico Seco (γ_d) para polpa de rejeito, em que foi utilizada a linha de tendência para se obter o γ_d para o TS de 34,1%.



Fonte: Adaptado de relatórios internos⁸ do empreendimento.

A Tabela 4.29 apresenta o resumo das premissas estabelecidas para o reservatório de secagem, para fazer o comparativo com o reservatório *dry stack*.

⁸ Relatórios internos não disponíveis para consulta pública

Tabela 4. 29 - Premissas para o reservatório de secagem

Premissas para disposição em reservatório de secagem (R.S)		
Geração de Polpa	29557220,5	t/ano
Teor de sólidos do rejeito dragado (expectativa do empreendimento)	25	%
Espessura de camada lançada no R.S.	50	cm
Tempo de secagem da camada lançada	34	dias
Espessura da camada após secagem	34,16	cm
Teor de sólidos médio na camada seca	34,1	%
γ_d da camada seca	0,44	g/cm ³
Capacidade média de armazenamento	7233503,0	m ³
Área média de armazenamento	553418,0	m ²

Fonte: O autor.

b) Premissas utilizadas no comparativo, para o método de disposição a seco (*dry stack*):

- Na geração de polpa também considerou-se 29.557.520,5 t/ano, conforme apresentado no item 2.3.1.3.

- No balanço de massa, considerou-se a geração de 50% do rejeito a ser depositado na zona seca e 50% a ser depositado na zona úmida, conforme definido no item 4.4.3.

- O γ_d para zona seca e para zona úmida foram respectivamente, 1,414 g/cm³ e 1,342 g/cm³. Obtiveram-se esses valores com base na curva de compactação apresentada no Gráfico 4.1. Sendo que o γ_d da zona seca foi obtido através da média entre os teores de umidade de 31,4% e 35,4%, que dá 33,4%. O γ_d da zona úmida foi obtido através da média entre os teores de umidade de 35,4% e 39,4%, que resulta em 37,4%. A escolha desses teores de umidade para representar o depósito *dry stack* está definida no item 3.2.2.1.

- Não se considerou a influência do adensamento na sobreposição de camadas, sendo que no comparativo, também não considerou-se o efeito do adensamento nas camadas dispostas no reservatório de secagem.

- Calculou-se o volume de armazenamento em função das áreas obtidas nas seções conceituais multiplicado pela unidade de metro linear.

A Tabela 4.30 apresenta o resumo das premissas estabelecidas para o reservatório *dry stack*, para fazer o comparativo com o reservatório de secagem.

Tabela 4. 30 - Premissas para o reservatório dry stack

Premissas para disposição em reservatório <i>dry stack</i>		
Geração de Polpa	29557220,5	t/ano
γ_d da zona seca	1,414	g/cm ³
γ_d da zona úmida	1,342	g/cm ³
Ocupação da zona seca em massa	50	%
Ocupação da zona úmida em massa	50	%

Fonte: O autor.

4.6.1 Comparativo da capacidade de armazenamento de rejeito e tempo de formação dos depósitos

Conforme apresentado no item 4.4.3, esse depósito *dry stack*, é capaz de armazenar 21.576.771 toneladas de rejeito seco (equivalente a uma vida útil de 10 anos), ocupando para isso uma área de 415.313 m².

Já o reservatório de secagem, conforme apresentado anteriormente, possui uma capacidade média de armazenamento de 7.233.503 m³. Considerando que para o teor de sólidos de 34,1% o γ_d é de 0,440 t/m³, a massa seca média de rejeito armazenada nesse reservatório é de 3.182.741 toneladas.

Entretanto, os reservatórios de secagem são enchidos por etapas. Sendo que, conforme modelagem numérica verificada em relatório técnico⁹, após o enchimento de 50 cm começa a fase de secagem que dura 34 dias, gerando uma camada de 34,16 cm com teor de sólidos médio de 34,1 %. Considerando a área média de 553.418 m² é o γ_d de 0,440 t/m³ para esse teor de sólidos após secagem, o reservatório leva 14,1 dias para formar uma camada com 83.181 toneladas de rejeito (base seca).

Considerando que após os 14,1 dias de enchimento do reservatório de secagem, o reservatório ficará sem receber rejeito por 34 dias durante a fase de secagem, para atender à produção anual de polpa de rejeito, deverão trabalhar em conjunto um total de 4 reservatórios para que cada um possa ficar pelo menos 34 dias sem receber rejeito. Desta forma a área total ocupada por esses 4 reservatórios, de acordo com a estimativa média, é de 2.213.672 m², e o volume de armazenamento deles é de 12.730.965 toneladas de rejeito (base seca).

⁹ Relatório técnico do empreendimento, não disponível para consulta pública.

A vida útil desses 4 reservatórios, que devem trabalhar em conjunto, é de 5,9 anos, uma vez que a geração anual de rejeito (base seca) é de 2.157.677 t/ano. Por tanto, seriam necessários 8 reservatórios para atingir uma vida útil de 11,8 anos, totalizando uma área de 4.427.344 m².

Assim sendo, para que o depósito *dry stack* projetado conceitualmente, tenha a uma vida útil de 11,8 anos (capacidade de armazenamento de 25.461.931 toneladas de rejeito seco), ele ocuparia uma área de 476.624 m². Ou seja, para atender a produção de polpa de rejeito, pelo mesmo tempo de vida útil (11,8 anos), o depósito *dry stack* ocuparia uma área 9,3 vezes menor que os 8 reservatórios com dimensões estimadas, o que equivale a 10,8% da área desses.

Mas, vale ressaltar que na prática essa diferença de área ocupada ainda é maior, pois no cálculo da área média do reservatório de secagem, não foi considerada a área ocupada pelo barramento, que é construído com solo argiloso, sendo que a dimensão em planta desses barramentos depende diretamente do relevo do local. Por isso, com base nos dados desse estudo, o projeto conceitual do depósito *dry stack* ocuparia uma área inferior à 10,8% da área ocupada pelos 8 reservatórios de secagem.

A Tabela 4.31 apresenta os valores do reservatório de secagem, para o comparativo, e a Tabela 4.32 os valores para o reservatório *dry stack*.

Tabela 4. 31 - Valores obtidos para o reservatório de secagem

RESERVATÓRIO DE SECAGEM		
Geração de polpa	29.557.220,5	t/ano
Geração diária de polpa	80.978,7	t/dia
Geração diária rejeito seco	5.911,4	t/dia
Volume de armazenamento médio	7.233.503	m ³
Área média	553.418	m ²
Teor de sólidos após 34 dias	34,1	%
γ_d considerado após 34 dias de secagem	0,44	t/m ³
Armazenamento de sólidos total	3.182.741,3	t
Volume por camada de 34,16 cm	189.047,6	m ³
Armazenamento de sólidos por camada	83.180,9	t
Tempo de enchimento da camada	14,1	dias
Área total de 4 reservatórios	2.213.672	m ²
Armazenamento de 4 reservatórios	12.730.965,3	t
Vida útil de 4 reservatórios	5,9	anos
Vida útil de 8 reservatórios	11,8	anos
Área total de 8 reservatórios	4.427.344	m ²
Armazenamento de 8 reservatórios	25.461.930,6	t

Fonte: O autor.

Tabela 4. 32 -Valores obtidos para o reservatório *dry stack*

DRY STACK		
Geração de polpa	29.557.220,5	t/ano
Geração de sólidos	2.157.677,1	t/ano
γ_d zona seca	1,414	t/m ³
γ_d zona úmida	1,342	t/m ³
Geração de sólidos em 10 anos	21.576.771,0	t
Volume zona seca - 10 anos	7.629.692,7	m ³
Volume zona úmida - 10 anos	8.039.035,4	m ³
Volume total <i>dry stack</i> - 10 anos	15.668.728,1	m ³
Área do deposito 10 anos	415.313,3	m ²
Geração de sólidos em 11,8 anos	25.460.589,74	t
Volume zona seca - 11,8 anos	9.003.037,4	m ³
Volume zona úmida - 11,8 anos	9.486.061,8	m ³
Volume total <i>dry stack</i> - 11,8 anos	18.489.099,1	m ³
Área do deposito 11,8 anos	476.624,3	m ²

Fonte: O autor.

4.6.2 Comparativo quanto à operação dos depósitos

A principal diferença operacional entre o deposito *dry stack* e o reservatório de secagem consiste nos métodos de transporte e disposição do rejeito.

No que se refere ao transporte de rejeito, no deposito *dry stack*, esse se dá entre a saída do Filtro Prensa e o local de disposição, e é realizado por correias transportadoras ou caminhões basculantes, pois é transportado rejeito com teores de umidade que podem chegar próximos da umidade ótima de compactação.

Já no reservatório de secagem, o transporte da polpa de rejeito se dá por bombeamento através de tubulações adutoras. A operação do transporte de rejeito envolve menores custos, e menos mão de obra, quando é possível bombear o rejeito, conforme é feito nesse tipo de reservatório.

Quanto aos métodos de disposição de rejeito, no depósito *dry stack* esse é realizado com equipamentos de terraplanagem e com controle tecnológico de compactação. Esse tipo de operação requer um maior número de pessoas envolvidas (tanto na manutenção, segurança, transporte e controle de qualidade), e acompanhamento ininterrupto do controle de compactação. Enquanto que no reservatório de secagem a disposição ocorre com lançamento e

secagem da polpa de rejeito, sem a necessidade ininterrupta de controle de densidade do rejeito disposto. Apesar da logística de rodízios sistemáticos entre reservatórios de secagem exigir o acompanhamento de equipe especializada, ainda sim, a quantidade de pessoas envolvidas é bem menor do que o necessário para cuidar da logística de transporte e disposição do tipo *dry stack*.

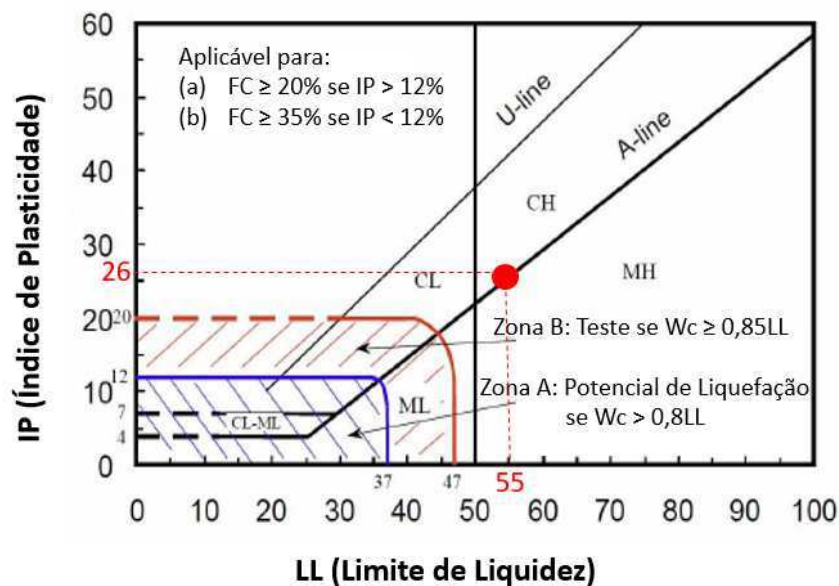
4.6.3. Comparativo quanto à segurança e impactos dos depósitos

O depósito *dry stack* apresentou fator de segurança igual a 2.0, enquanto que os reservatórios de secagem do empreendimento algumas vezes apresentam seções com fator de segurança próximos a 1.5 para condições drenadas, o que implica algumas vezes na construção de bermas de reforço estrutural no talude de jusante. Com base nisso, afirma-se que o depósito *dry stack* apresenta maior equilíbrio estático do que os reservatórios de secagem.

Para avaliar o potencial de liquefação do depósito *dry stack*, foram utilizados os métodos de Seed et al (2003) e Bray e Sancio (2006), que correlacionam os limites de Atterberg com a suscetibilidade à liquefação.

Segundo Green e Ziotopoulou (2015), o método de Seed et al (2003) é baseado em dados observacionais pós-terremoto em conjunto com testes laboratoriais subsequentes. Nesse método, a suscetibilidade à liquefação é dada em função dos valores de limite de liquidez (LL) e índice de plasticidade (IP). Tendo o rejeito desse estudo um LL = 55% e IP = 26%, lançando esses dados no Gráfico 4.11 que foi proposto por Seed et al (2003), é visto que o rejeito não é susceptível à liquefação, pois o cruzamento desses valores coincide fora das zonas A e B.

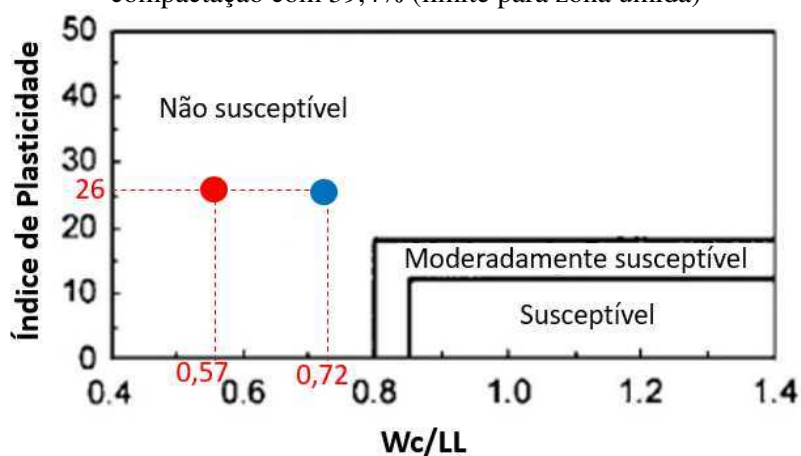
Gráfico 4. 11 - Susceptibilidade a liquefação proposto por Seed at al (2003). O ponto vermelho representa o rejeito com $LL = 55\%$ e $IP = 26\%$



Fonte: Adaptado de Seed et al, 2003.

Entretanto, apesar do rejeito estar enquadrado no caso (a) do Gráfico 4.11, em que FC (conteúdo de finos) é maior que 20% e IP é maior que 12%, Green e Ziotopoulou (2015) recomenda que o método de Bray e Sancio (2006) é o mais indicado para definir a susceptibilidade a liquefação de solos com alto teor de finos, onde FC é maior que FC_L . Sendo que FC_L é o conteúdo limite de finos, que define uma proporção limite de finos que quando superada ($FC > FC_L$), os grãos grossos ficam flutuando nos grãos finos, e isso modifica o comportamento mecânico do solo. O Gráfico 4.12, proposto por Bray e Sancio (2006), confirma que o rejeito desse estudo não é susceptível à liquefação, pois lançando no gráfico o valor do IP (26%) e da umidade de campo (W_c) dividida pelo LL (55%), os pontos referentes ao intervalo de umidade de compactação do depósito *dry stack*, de 31,4% ($W_c/LL = 0,57$) e 39,4% ($W_c/LL = 0,72$), ficaram dentro da zona não susceptível à liquefação.

Gráfico 4. 12 - Susceptibilidade a liquefação proposto por Bray e Sancio (2006). O ponto vermelho representa o rejeito compactado na umidade ótima de 31,4% (zona seca), e o ponto azul representa a compactação com 39,4% (limite para zona úmida)



Fonte: Adaptado de Bray e Sancio, 2006.

Pode ser verificado no Gráfico 4.12 que conforme aumenta a umidade de campo, aumenta a razão Wc/LL . Entretanto, em função do IP do rejeito (26%), para qualquer valor de umidade de campo, os pontos sempre cairão, dentro do gráfico, na zona não susceptível à liquefação. Isso reforça o entendimento de que o depósito *dry stack* construído com o rejeito do empreendimento de estudo, não apresentará problemas de ruptura por liquefação.

Além do mais, o monitoramento periódico de segurança é mais simples e eficaz quando realizado num único depósito *dry stack*, quando comparado aos trabalhos necessários para monitorar a segurança de 8 reservatórios de secagem típicos do empreendimento de estudo, pois um maior número de estruturas para inspecionar implica em mais instrumentos, mais seções geotécnicas e um maior tempo de trabalho.

Quanto ao potencial de dano no caso de rupturas dessas estruturas, o depósito *dry stack*, no caso de um colapso estrutural tende a gerar impactos ambientais e riscos à segurança apenas de forma localizada. Pois um escorregamento de talude, mesmo no caso de uma ruptura global, não gera um deslocamento de massa que se distancie do corpo do depósito. Já uma ruptura num dos reservatórios de secagem, que, além do rejeito com menor densidade, armazena também água livre. Então, nesse caso, numa ruptura global de talude, a massa de rejeito deslocada pode atingir grandes distâncias, principalmente caindo sobre córregos ou rios.

5 CONCLUSÕES

Apesar da significativa quantidade de água consumida para diluir a polpa de entrada no espessador, ao final do processo de formação do *underflow* todo volume formado no *overflow* poderá ser reutilizado para diluir a polpa, e ainda restará entre $2,08 \times 10^6$ e $2,3 \times 10^6$ litros de água por hora, que poderá ser aproveitada em outras áreas do empreendimento, ou ser descartada no meio ambiente, uma vez que a turbidez apresentada em todas as taxas de alimentação testadas são menores que 100 NTU. Isso equivale a uma porcentagem média de aproveitamento de água no espessador de 70,02%.

Os testes com filtro prensa horizontal demonstram que para os teores de sólidos utilizados na polpa de rejeito (entre 14,7% e 17,5%) o filtro prensa horizontal é capaz de gerar uma torta com teor de umidade inferior à umidade ótima de compactação do rejeito, que é de 31,4%, pois nos três testes realizados as umidades encontradas ficaram pouco acima de 26%. Isso significa que é possível calibrar o tempo de operação do filtro prensa para que se consiga uma torta de rejeito saindo na umidade ótima de compactação (31,4%), sendo essa a situação ideal para a formação de um depósito do tipo *dry stack*.

Considerando que a umidade mínima da torta após desaguar no filtro prensa é de 26,15%, e o teor de sólidos máximo que sai do espessador é de 22,8%, a quantidade de água que pode ser reaproveitada nesse filtro prensa é de $7,7 \times 10^5$ litros por hora. E isso equivale a 24,62% da água gerada para formar a polpa de rejeito que sai da planta de beneficiamento.

O total de água que pode ser reaproveitada pelo empreendimento quando somados os aproveitamentos que podem ocorrer no espessador dinâmico e no filtro prensa, chegam a 94,64% de toda água necessária na planta de beneficiamento para formar a polpa de rejeito com 7,03% de teor de sólidos.

O depósito *dry stack* projetado ocupa uma área, pelo menos, 9,3 vezes menor do que os reservatórios de secagem necessários para atender uma vida útil de 11,8 anos. Essa diferença tende a ser maior se fossem consideradas as áreas de ocupação dos barramentos dos reservatórios de secagem, e também, se nesse comparativo fosse utilizado o teor de sólidos atual que chega nesses reservatórios (17,76%), pois utilizou-se o teor de sólidos idealizado no empreendimento (25%).

O projeto conceitual realizado para o depósito *dry stack* pode ser considerado seguro pois a seção tem um fator de segurança de 2.0.

Os fatores de segurança para o aterro de emergência com 6 m de altura, e para 12 m de altura, após carregados pela disposição na zona úmida, são respectivamente 2,9 e 1,8, considerando que a mistura de rejeito úmido, areia e cimento, atinja pelo menos os parâmetros geotécnicos encontrados para zona seca. Isso indica boa segurança, sendo que o mínimo aceitável nesse trabalho para o aterro de emergência é um fator de segurança de 1.3. O aterro de emergência apoiado parcialmente sobre a zona úmida, também é estável.

Para trabalhos futuros, para que o projeto do depósito *dry stack* evolua para os níveis básico e executivo, será necessário:

- Definir os parâmetros de deformabilidade, a partir da realização de análises de tensão deformação, e consideração do efeito do adensamento sobre a vida útil do depósito.
- Estudar a evolução das poro-pressões durante as fases construtivas do depósito, e definir a influência dessas na estabilidade.
- Dimensionamento do balanço de massa, através de estudos estatísticos aprofundados para definir o histórico de chuvas.
- Dimensionamento dos dispositivos de drenagem superficial definitivos nos taludes, e os provisórios, necessários para operação do depósito durante a fase construtiva, de modo a retirar a água das plataformas de rejeito.
- Dimensionamento dos dispositivos de drenagem interna, considerando, inclusive, o efeito do adensamento na deformação das seções longitudinais e transversais dos drenos internos.
- Sequenciamento construtivo, considerando acessos de serviço, construção de drenagens internas e externas, e balanço de massa.

É recomendada a execução de pistas experimentais para que seja possível a retirada de blocos indeformados, possibilitando a execução de ensaios triaxiais complementares.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Principais depósitos minerais do Brasil**: 1988

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Resolução 13**: 2019

ANDRITZ. 7th Annual Grand Junction - Water and conference. **Dewatering Technologies comparison**: 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181/84**: Solo – Análise Granulométrica - Procedimento. Rio de Janeiro, RJ, 13 p, 1984_a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459/84**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, RJ, 6 p, 1984_b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180/84**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, RJ, 3 p, 1984_c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508/84**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, RJ, 8 p, 1984_d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo: ensaio de compactação: Procedimento. Rio de Janeiro, RJ, 10 p, 1986_b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, RJ, 71 p, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13028**: Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água - Requisitos. Rio de Janeiro, RJ, 16 p, 2017_a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13029**: Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha. Rio de Janeiro, RJ, 7 p, 2017_b.

AMARANTE, S.C. **Filtragem de Minérios de Ferro – Comparação entre Métodos de Filtragem de Laboratório: Testes de Folha e de Funil de Büchner**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2002.

AVERY, Q. e WILSON, K. **Red Mud Pressure Filtration for the Alumina Refinery's Bauxite Residue Tailings Disposal, Proceedings of the 16th International Seminar on Paste and Thickened Tailings** – Paste 2013, Belo Horizonte – MG, Brasil, 2013.

ÁVILA, J. P. **Barragem de Rejeito**. Rio de Janeiro: 2012.

BÁNVOLGYI, G. e HUAN, T. M. **De-watering disposal and utilization of red mud: state of the art and emerging technologies**, 2009.

BARDOSSY, G. **Karst Bauxites. Bauxite Deposits on Carbonate Rocks.** Amsterdam: 1982.

BIESINGER, M; SLOTTTE, S. **Tailings paste disposal – more than water resobery.** **International Mining Supplement, Paste – Tailing Management,** 2011.

BRAY, J.D., e SANCIO, R.B. Assessment of the liquefaction susceptibility of fine-grained soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.** 2006

BUSHINSKY, G. I. **Geology of Bauxites.** Izd. Nedra. Moscow: 1971.

CARMAN, P. C. Trans. Inst. Chem. Engrs., London, 15, 160, apud CUPERTINO, D. F. **Caracterização de propriedades do meio poroso em solo arenoso através de permo-porosímetro a gás.** 2005. Monografia (Curso de graduação em Geologia) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 2005.

CASTILHO, B. M. **Análise dos gatilhos de liquefação dinâmica e modelagem numérica da barragem do germano – UFOP:** 2017.

CAVALCANTE, P. R. B; PALKOVITS, F. **Paste fill – a safety solution for pillar mining.** **Proceedings of the 16th International Seminar on Paste and Thickened Tailings.** Belo Horizonte, 2013.

DAVIES, M.P. **Filtered Dry Stacked Tailings – The Fundamentals.** In **Proceedings Tailings and Mine Waste.** Vancouver, BC, Canadá, 2011. Disponível em <http://www.infomine.com/publications/docs/davies2011.pdf>.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ES 305:** Pavimentação – base de solo-cimento: Especificação de Serviço. Rio de janeiro, RJ, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 201:** Solo-cimento: compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos: Método de ensaio. Rio de janeiro, RJ, 4p, 1994a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 202:** Solo-cimento: moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos: Método de ensaio. Rio de janeiro, RJ, 4p, 1994b.

DEURSEN, C. M. V. **Métodos de desaguamento e disposição de rejeito da bauxita: estudo de caso e avaliação econômica.** 2016. Dissertação (Mestrado em Ciência dos solos) - Departamento de Solos, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 2016.

FERRAZ, R. L. **Contribuição ao estudo de estabilização de solos para fins rodoviários e habitacionais.** 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 1994.

FITTON, T. G; SEDDON, K, D. **Paste and thickened tailings – myth busting and clarification.** **Proceedings of the 16th International Seminar on Paste and Thickened Tailings.** Belo Horizonte, MG. 2013.

GOMES, R.C. **Estabilidade de Taludes em Solos**. Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, Ouro Preto, MG. 2003.

GREEN, R. A. e ZIOTOPOULOU, K. **Overview of screening criteria for liquefaction triggering susceptibility. Proceedings of the Tenth Pacific Conference on Earthquake Engineering -Building an Earthquake-Resilient Pacific**. Sydney, Australia, 2015.

GRUBB, P.L.C. **Hight level and low level bauxitization: a criteriom for classification**: 1971.

GUIMARÃES, N. C. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas**. 2011.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas – Tecnologia Mineral) – Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. 2011.

HOSE, H. R. The Genesis of Bauxites, the ores of Aluminnium. In: **Intern. Geol. Congress**, Copenhagen: 1960

ICOLD, **International Commission on Large Dams**, Belo Horizonte, CD-ROM: 2002.

KOTSCHOUBEY, B. **Principais Depósitos Minerais do Brasil – Departamento Nacional de Produção Mineral**. Brasília: 1988.

KOZENY, J. Stz. ber. Akad. Wiss. Wien, Abt. Ila, 136, 271. apud CUPERTINO, D. F. **Caracterização de propriedades do meio poroso em solo arenoso através de permo-porosímetro a gás**.2005. Monografia (Curso de graduação em Geologia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 2005.

LIMA, M. K. L. **Retroanálise da formação de um depósito de rejeitos finos de mineração construído pelo método subaéreo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Geotecnia) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2006.

LUZ, A. B; SAMPAIO, J. A; ALMEIDA, L.M. **Tratamento de Minério**. 4º edição Revisada, Rio de Janeiro, 2004.

Mc FARLANE, M. J. **The Temporal Distribution of Bauxitisation and its Genetic Implications**. In: **II Intern. Sem. On Lateritisation Processes**. São Paulo, IAG/USP: 1982.

MCPHAIL, G; NOBLE, A; PAPAGEORGIOU, G; WILKINSON, D. Development and implementation of thickened tailings discharge at Osborne Mine. **International Seminar on Paste and Thickened Tailings**. Quensland, Australia, 2004.

MEHTA, P.K. e MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estruturas, propriedades e materiais**. Pini, São Paulo, 1994.

MELLO, F. M; PIASENTIN, C. **A História das Barragens no Brasil**. Rio de Janeiro, CBDB: 2011.

MOH, Z. C. **Soil stabilization with cement and sodium additives**. **Journal of the Mechanics and Foundations Division**, 1962

NERY, K D. **Caracterização geotécnica e avaliação da compactação de um resíduo da produção de alumina (lama vermelha) desaguado por filtro prensa**. 2013. Dissertação (Mestrado em Geotécnica) – Departamento de solos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. 2013.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Pini, São Paulo, 1997.

NEWMAN, P; WHITE, R; CADDEN, A. **Paste – the future of tailings disposal? Golder Associates**, 2001.

PATTERSON, S. H. Bauxite Reserves and Potential Aluminium. **Resources of the World**. U.S. Geol. Bull. Washington: 1967.

PORTELINHA, F. H. M. **Efeitos da cal e do cimento na modificação dos solos para fins rodoviários: mecanismos de reação, parâmetros de caracterização geotécnica e resistência mecânica**. 2008. Dissertação (Mestrado em Solos) – Departamento de solos. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2008.

RAMOS, C. R. **Perfil Analítico do Alumínio – Departamento Nacional de Produção Mineral/MME**. Brasília: 1982.

ROSEMONT COPPER COMPANY. Filtered Tailings Dry Stacks Current State of Practice – Final Report. **AMEC Earth & Environmental**, Inc. 2008.

SAPOZHNIKOV, D. G. Genetic Classification of the Bauxite Deposits of the USSR. In: **Problems of Bauxite Genesis**. Izd. Nauka Moscow: 1975.

SEED, R B., CETIN, K.O., MOSS, R.E.S., KAMMERER, A., WU, J., PESTANA, J., RIEMER, M., SANCIO, R.B., BRAY, J.D., KAYEN, R.E., FARIS, A. **Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework**. Keynote presentation, 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar, Long Beach, CA, 2003.

SILVA, S.A.. **Critérios de projeto de sistemas de disposição em pilhas de resíduos de alumina desaguados por filtro prensa**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) - Departamento de Solos. Universidade Federal de Ouro Preto.

SPIERS, J. **Rheological and geotechnical characteristics**. Methods for treatment of mine tailings: 2010.

US Geological Survey, **Mineral Commodity Summaries**, 2006.

VALADÃO, G. E. S. **Separação Sólido-Líquido**. 2008. Monografia (Engenharia Agrícola) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. 2008.

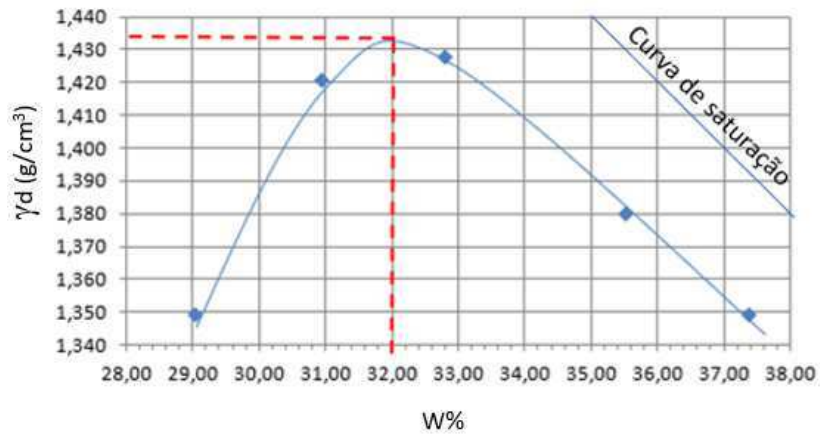
VALETON, I. **Bauxites – Development in Soil Science** Vol. I Elsevier. Amsterdam: 1972.

VIANA, M. B. **Avaliando Minas. Índice de Sustentabilidade da Mineração (ISM)**. Brasília: 2012.

ANEXOS

ANEXO A – Resultados os ensaios de compactação

Gráfico A. 1 - Resultado da curva de compactação do primeiro ensaio

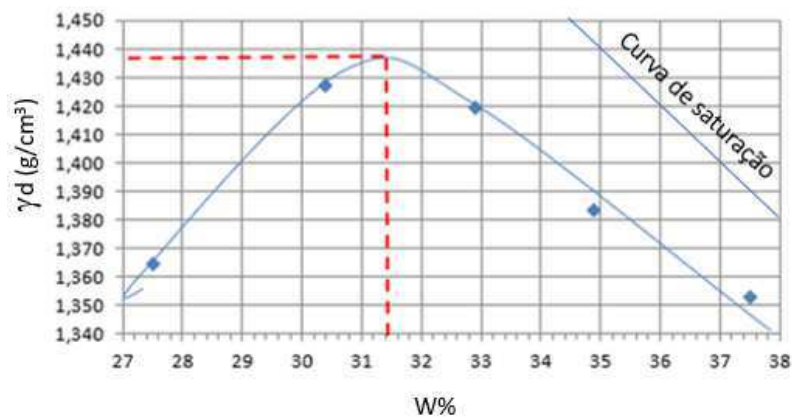


γ_d máximo = 1,434
g/cm³

W% ótimo = 32%

Fonte: O autor.

Gráfico A. 2 - Resultado da curva de compactação do segundo ensaio

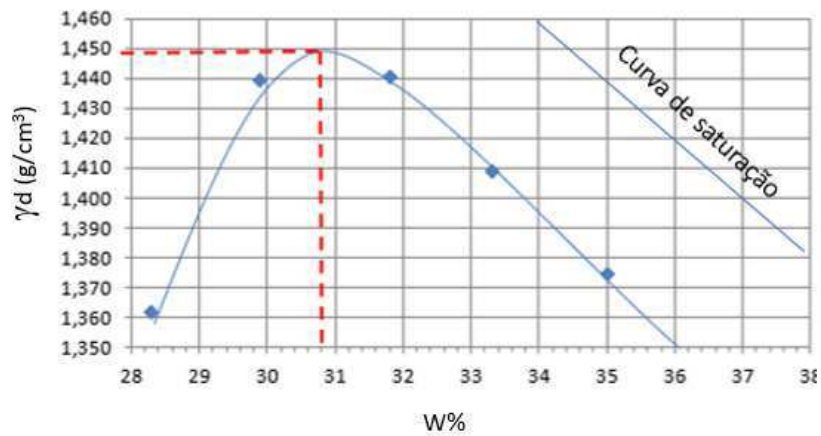


γ_d máximo = 1,437 g/cm³

W% ótimo = 31,4%

Fonte: O autor.

Gráfico A. 3 - Resultado da curva de compactação do terceiro ensaio

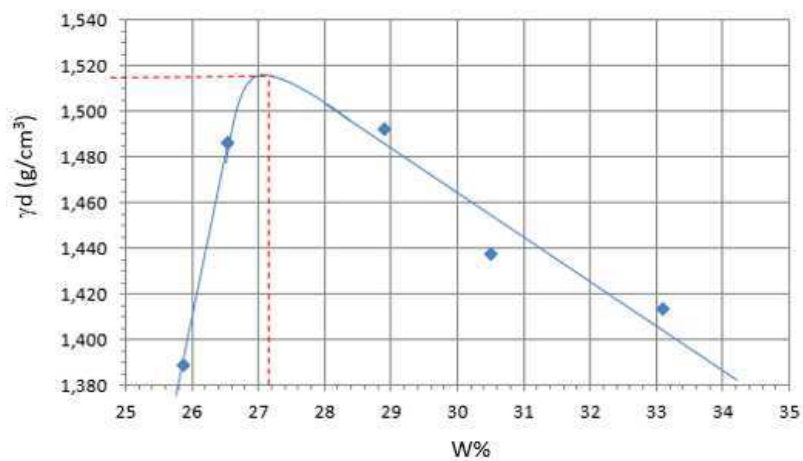


γ_d máximo = 1,449 g/cm³

W% ótimo = 30,8%

Fonte: O autor.

Gráfico A. 4 - Resultado da curva de compactação da mistura 1a:6,8r

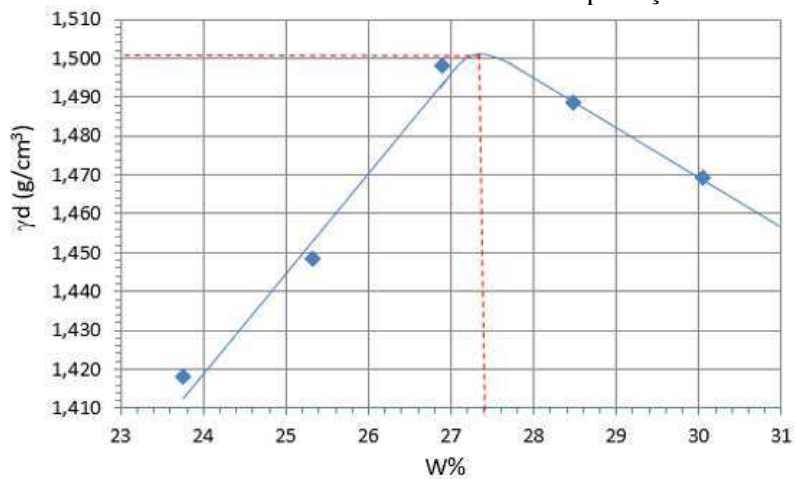


γ_d máximo = 1,515 g/cm³

W% ótimo = 27,2%

Fonte: O autor.

Gráfico A. 5 - Resultado da curva de compactação da mistura 1a:6,8r + 4% cimento



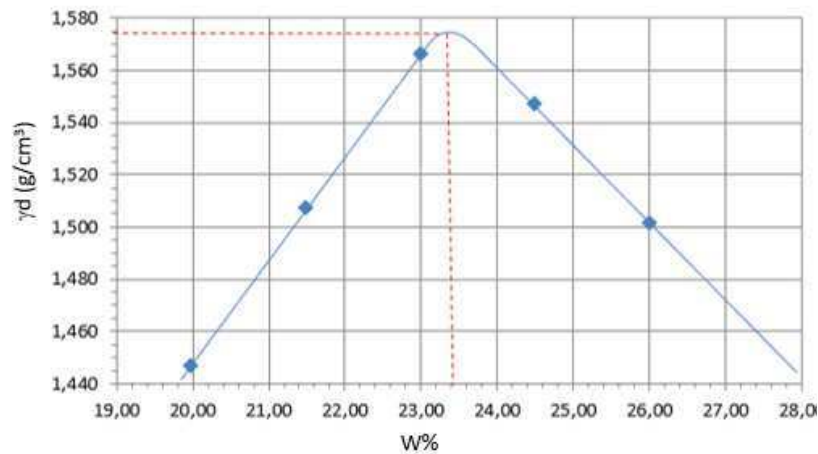
γ_d máximo = 1,501 g/cm³

W% ótimo = 27,4%

Fonte: O autor.

Gráfico A. 6 - Resultado da curva de compactação da mistura 1a:4,3r + 4% cimento

Fo



γ_d máximo = 1,575 g/cm³

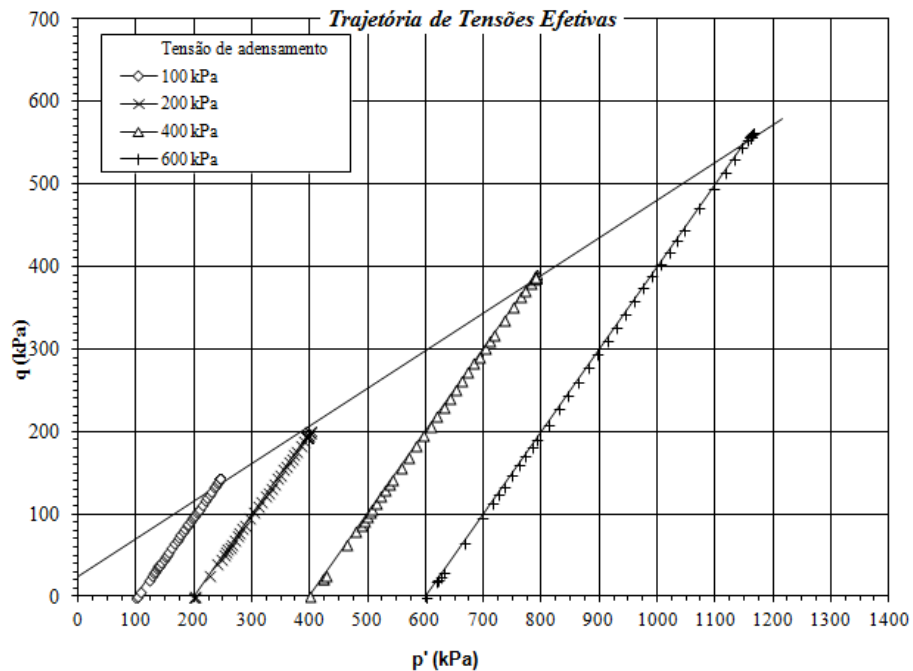
W% ótimo = 23,4%

Fonte: O autor.

ANEXO C - Resultados gráficos dos ensaios triaxiais no rejeito compactado

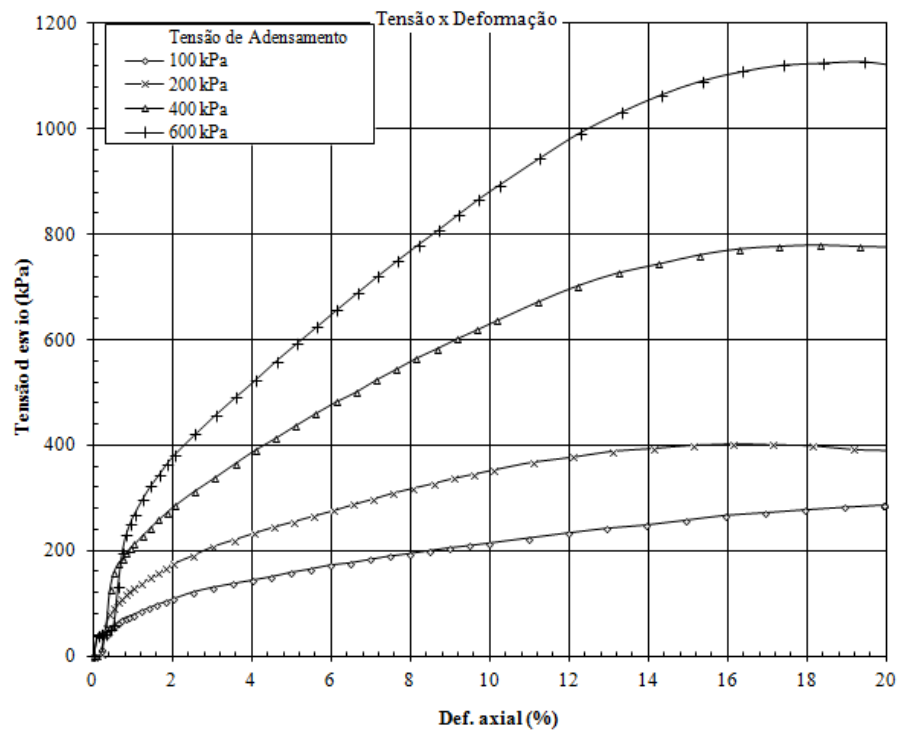
Ensaio CID (Rejeito W% ótima + 6%)

Gráfico C. 1 - Trajetória de tensões efetivas para o ensaio CID (Rejeito W% ótima + 6%)



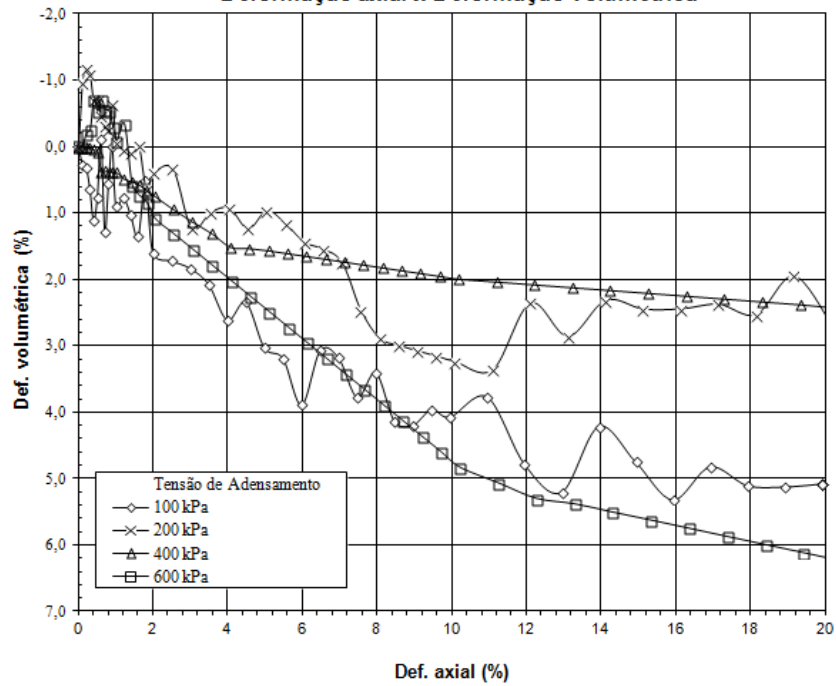
Fonte: O autor.

Gráfico C. 2 - Tensão x Deformação no ensaio CID (Rejeito W% ótima + 6%)



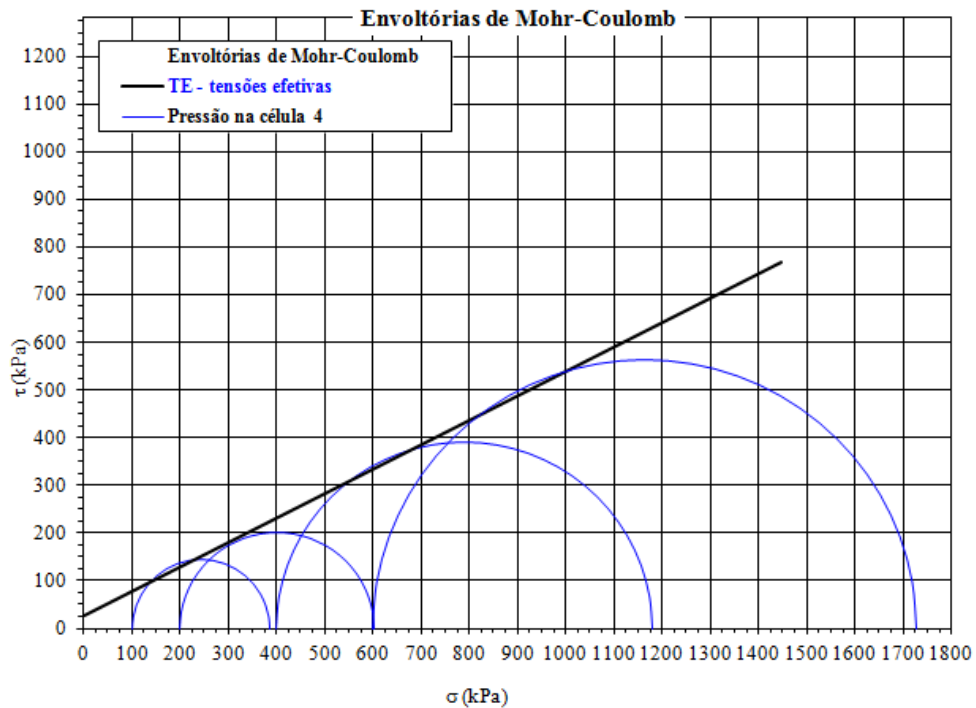
Fonte: O autor.

Gráfico C. 3 - Deformação axial x deformação volumétrica no ensaio CID (Rejeito W% ótima + 6%)
Deformação axial x Deformação volumétrica



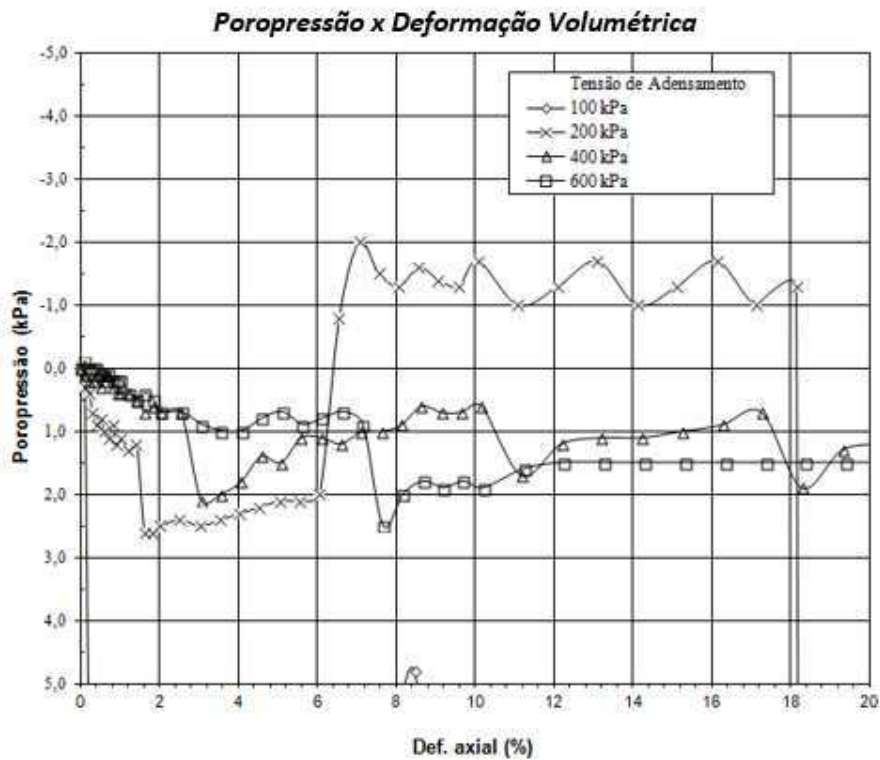
Fonte: O autor.

Gráfico C. 4 - Envoltória de Mohr-Coulomb no ensaio CID (Rejeito W% ótima + 6%)



Fonte: O autor.

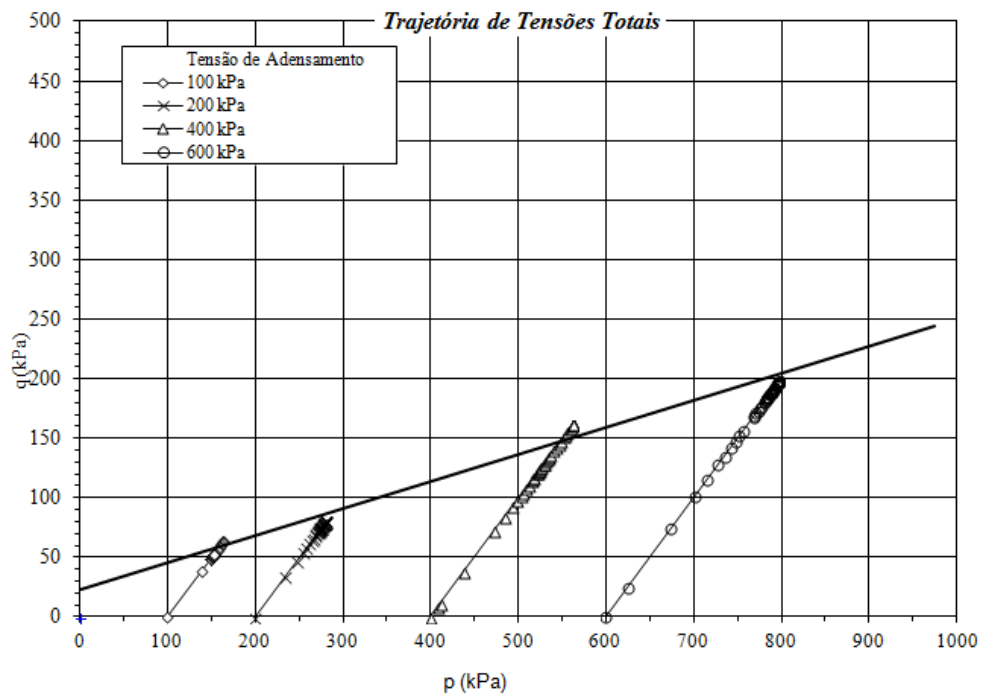
Gráfico C. 5 - Poropressão x deformação volumétrica no ensaio CID (Rejeito W% ótima + 6%)



Fonte: O autor.

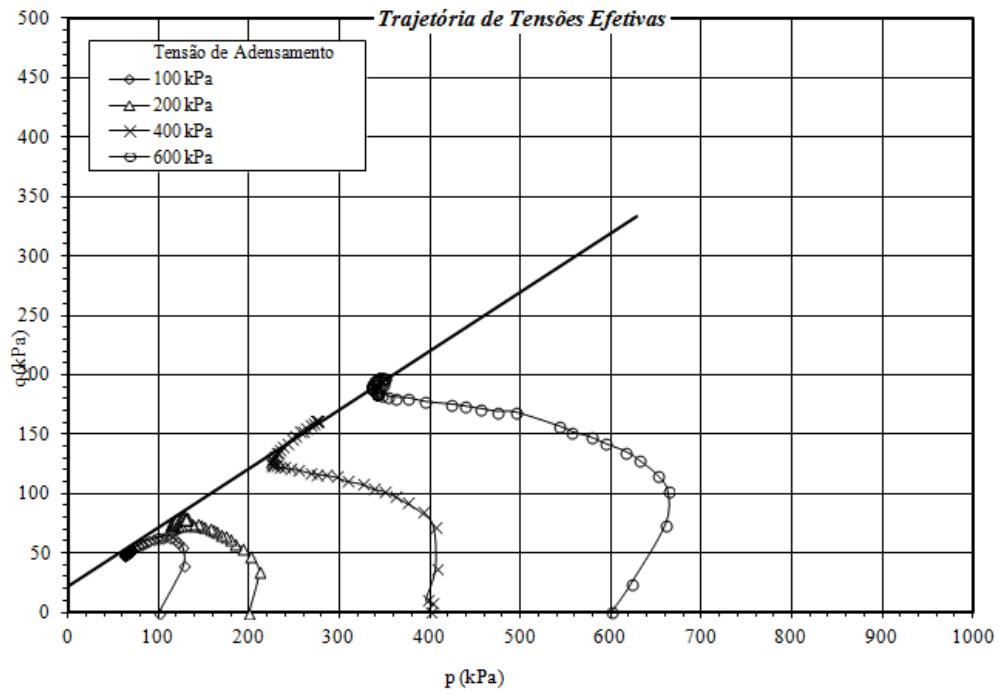
Ensaio CIU (Rejeito W% ótima + 6%)

Gráfico C. 6 - Trajetória de tensões totais para o ensaio CIU (Rejeito W% ótima + 6%)



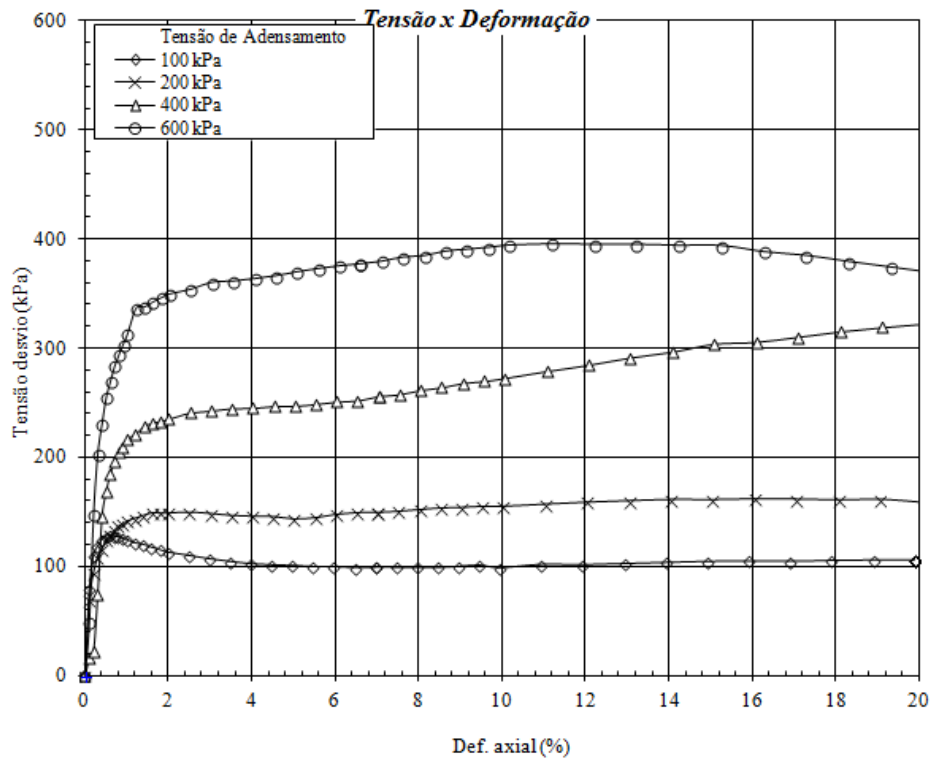
Fonte: O autor.

Gráfico C. 7 - Trajetória de tensões efetivas para o ensaio CIU (Rejeito W% ótima + 6%)



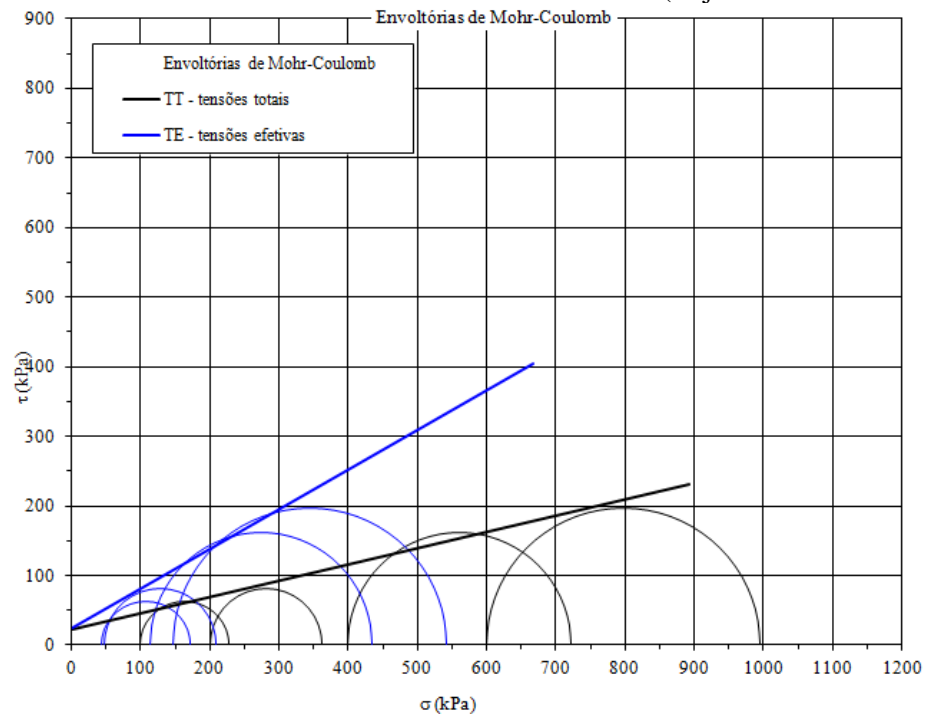
Fonte: O autor.

Gráfico C. 8 - Tensão x Deformação no ensaio CIU (Rejeito W% ótima + 6%)



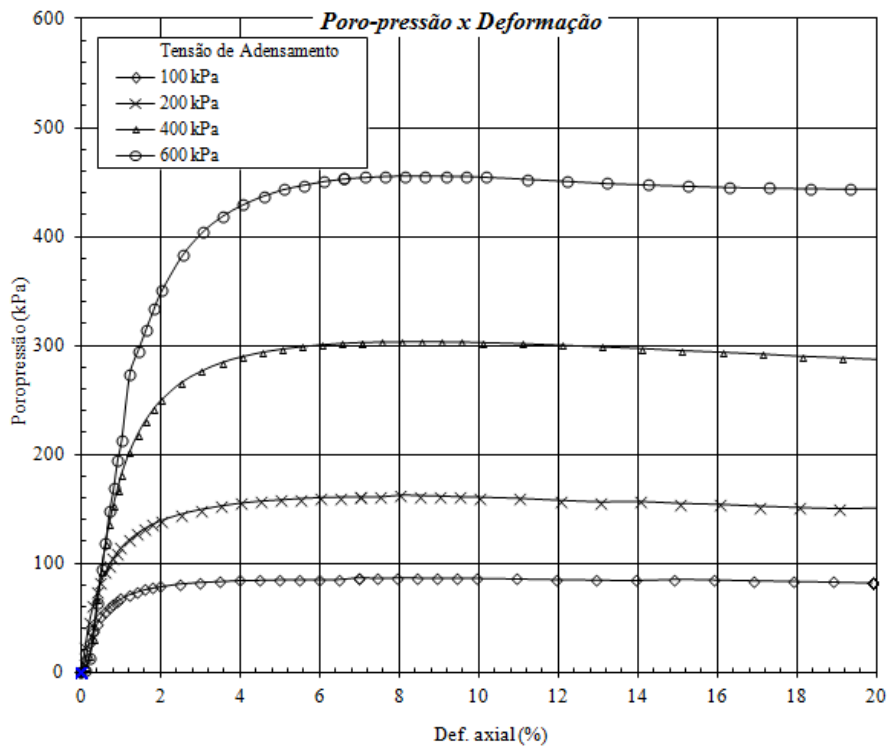
Fonte: O autor.

Gráfico C. 9 - Envoltória de Mohr-Coulomb no ensaio CIU (Rejeito W% ótima + 6%)



Fonte: O autor.

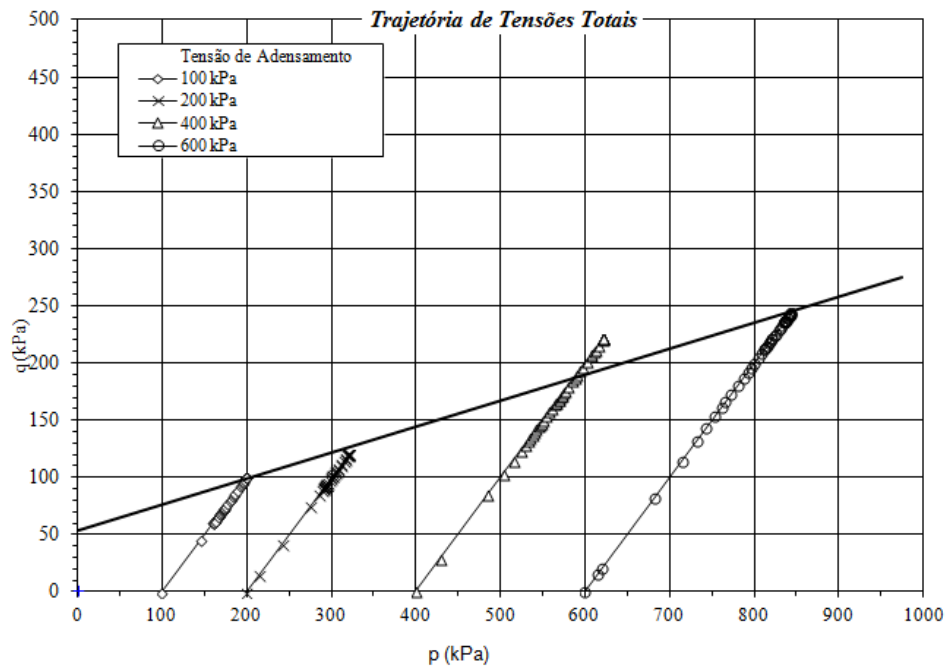
Gráfico C. 10 - Poropressão x deformação volumétrica no ensaio CIU (Rejeito W% ótima + 6%)



Fonte: O autor.

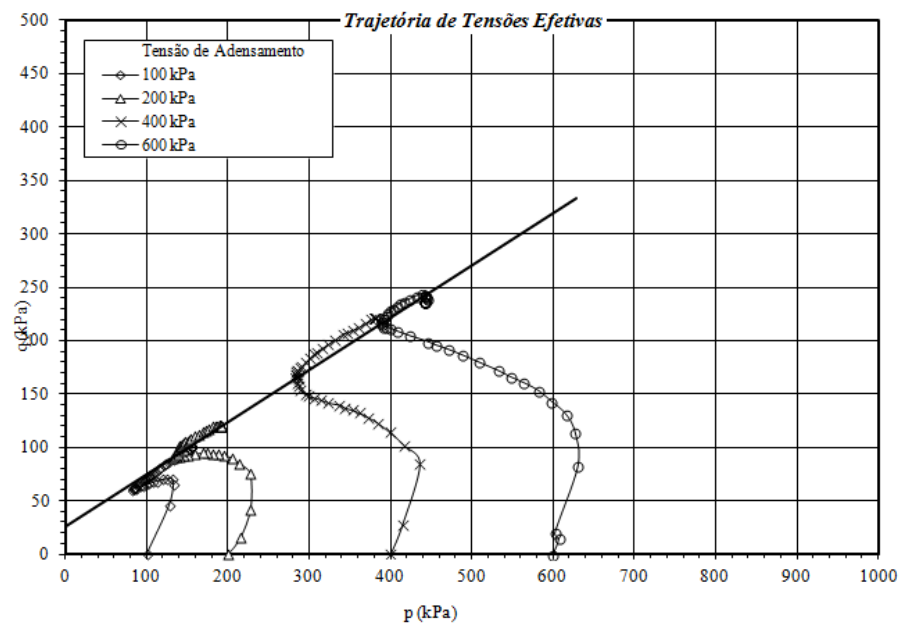
Ensaio CIU (Rejeito W% ótima)

Gráfico C. 11 - Trajetória de tensões totais para o ensaio CIU (Rejeito W% ótima)



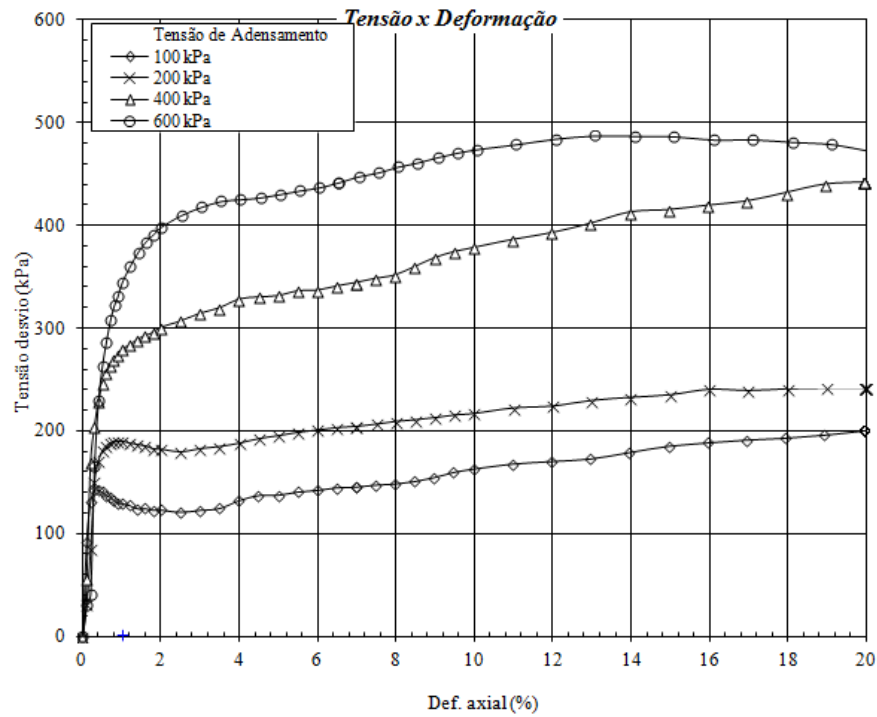
Fonte: O autor.

Gráfico C. 12 - Trajetória de tensões efetivas para o ensaio CIU (Rejeito W% ótima)



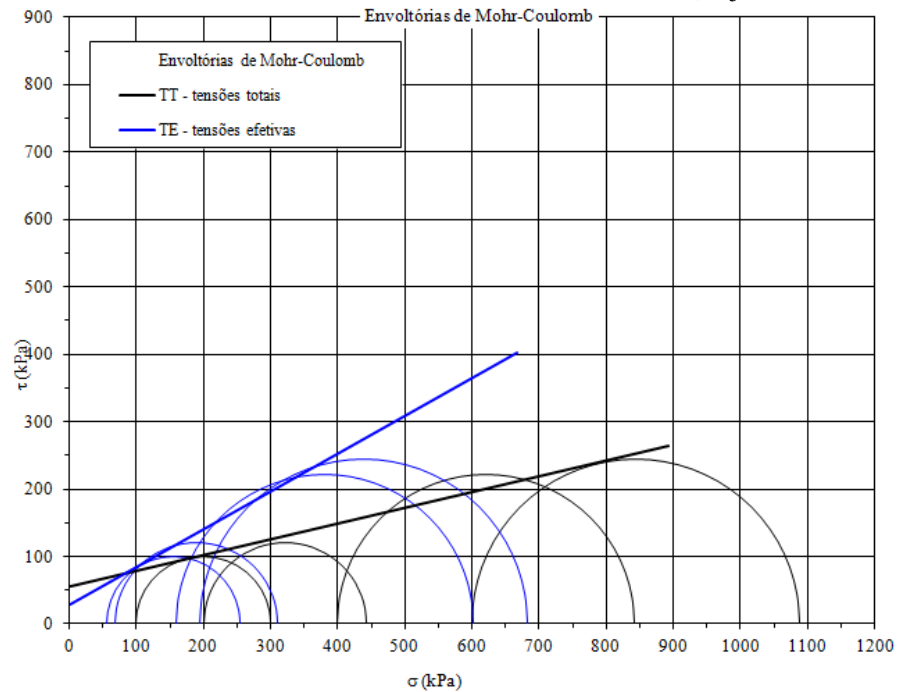
Fonte: O autor.

Gráfico C. 13 - Tensão x Deformação no ensaio CIU (Rejeito W% ótima)



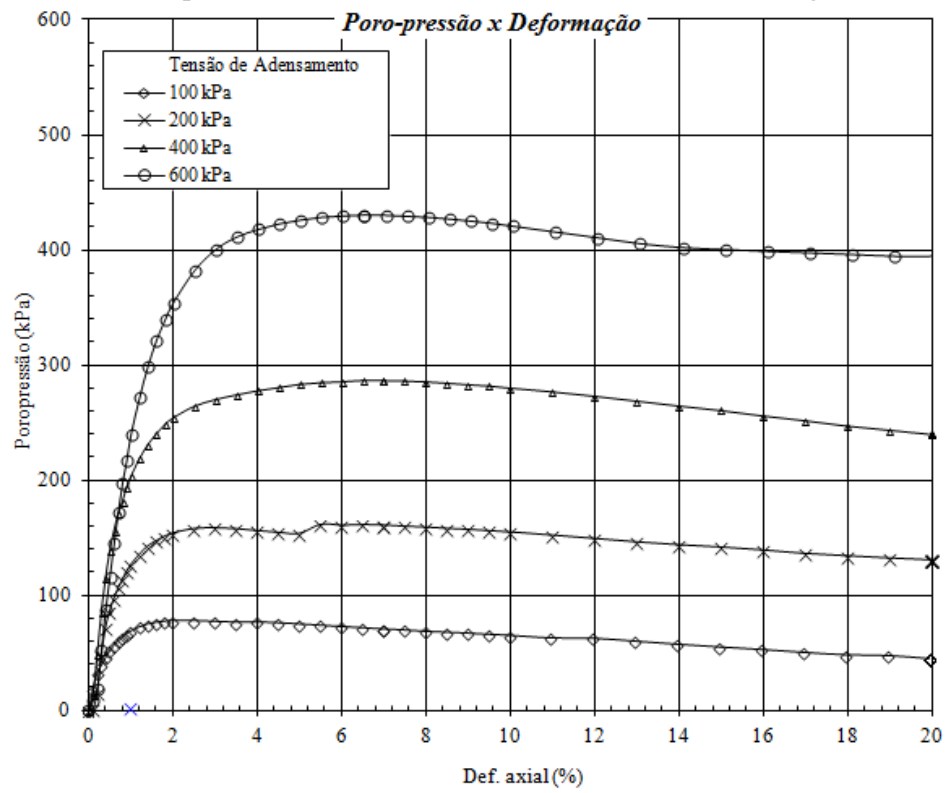
Fonte: O autor.

Gráfico C. 14 - Envoltória de Mohr-Coulomb no ensaio CIU (Rejeito W% ótima)



Fonte: O autor.

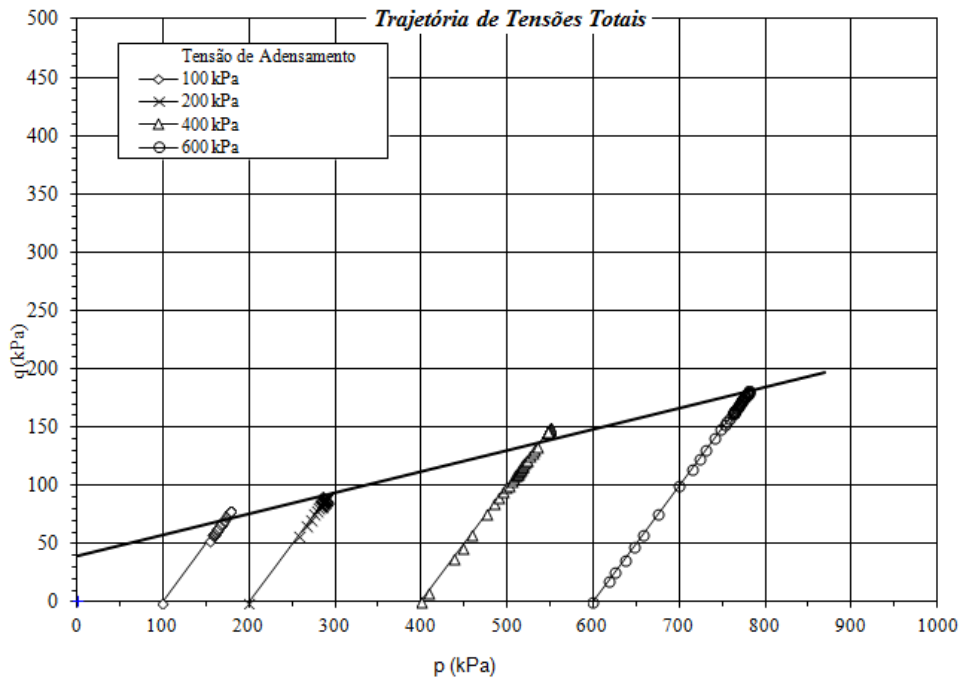
Gráfico C. 15 - Poropressão x deformação volumétrica no ensaio CIU (Rejeito W% ótima)



Fonte: O autor.

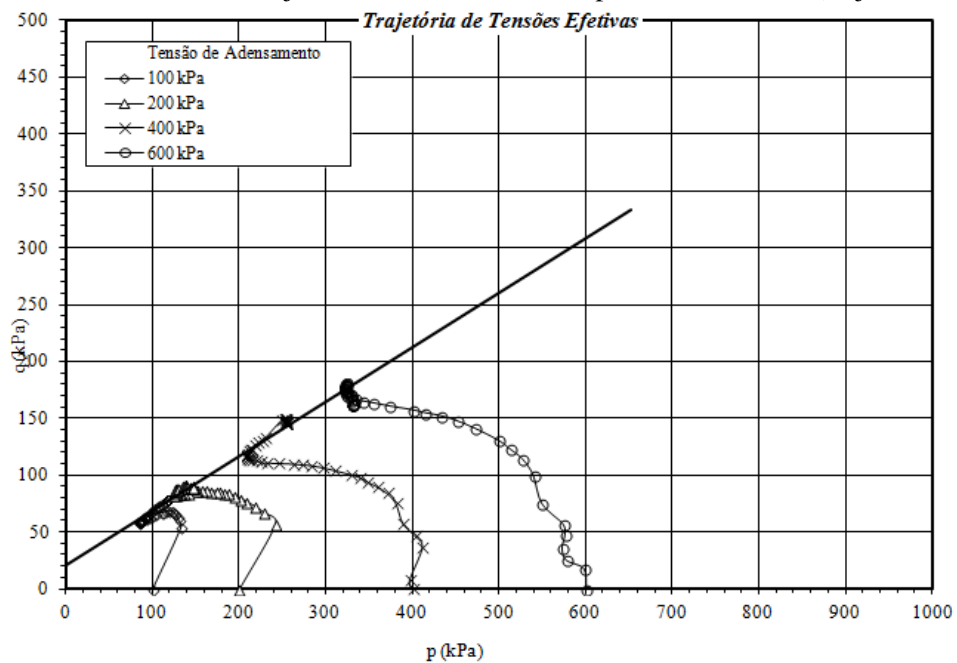
Ensaio CIU (Rejeito W% ótima + 4%)

Gráfico C. 16 - Trajetória de tensões totais para o ensaio CIU (Rejeito W% ótima + 4%)



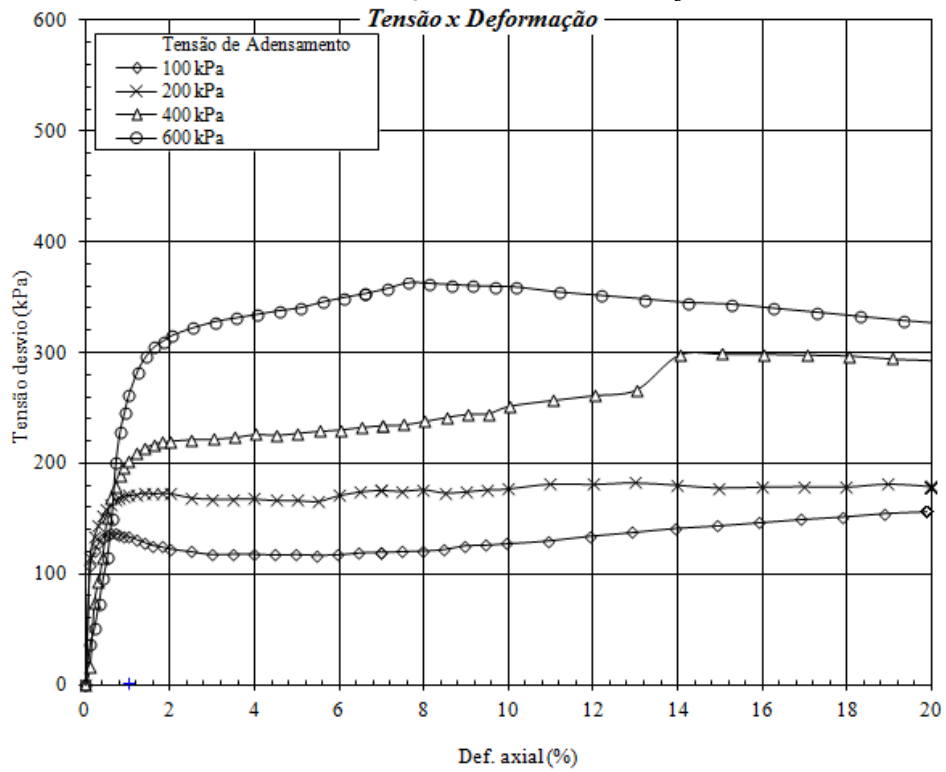
Fonte: O autor.

Gráfico C. 17 - Trajetória de tensões efetivas para o ensaio CIU (Rejeito W% ótima + 4%)



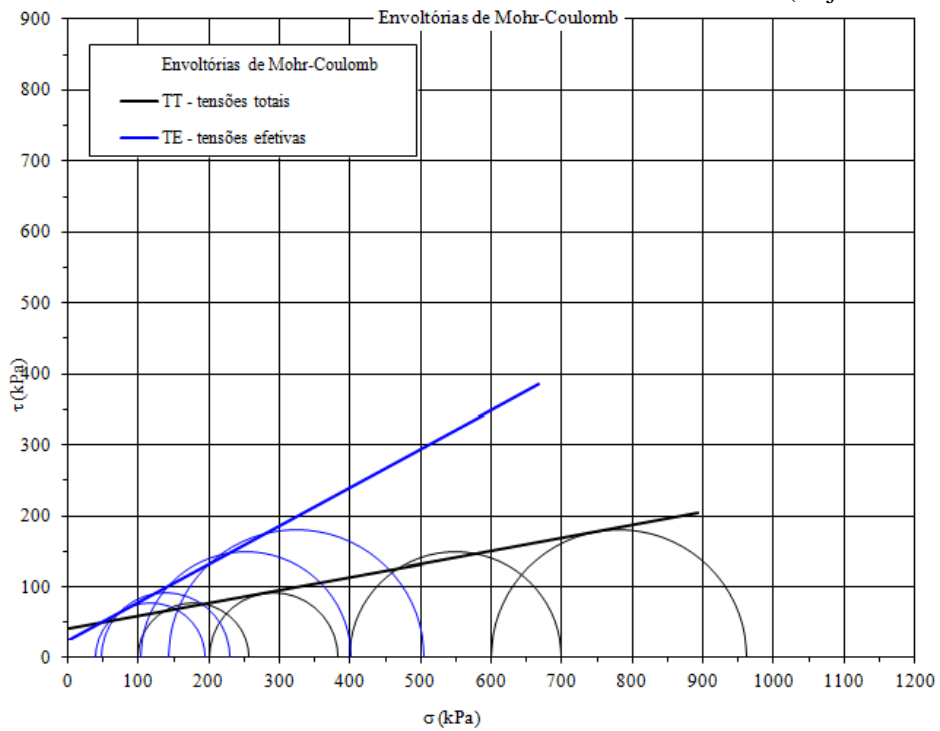
Fonte: O autor.

Gráfico C. 18 - Tensão x Deformação no ensaio CIU (Rejeito W% ótima + 4%)



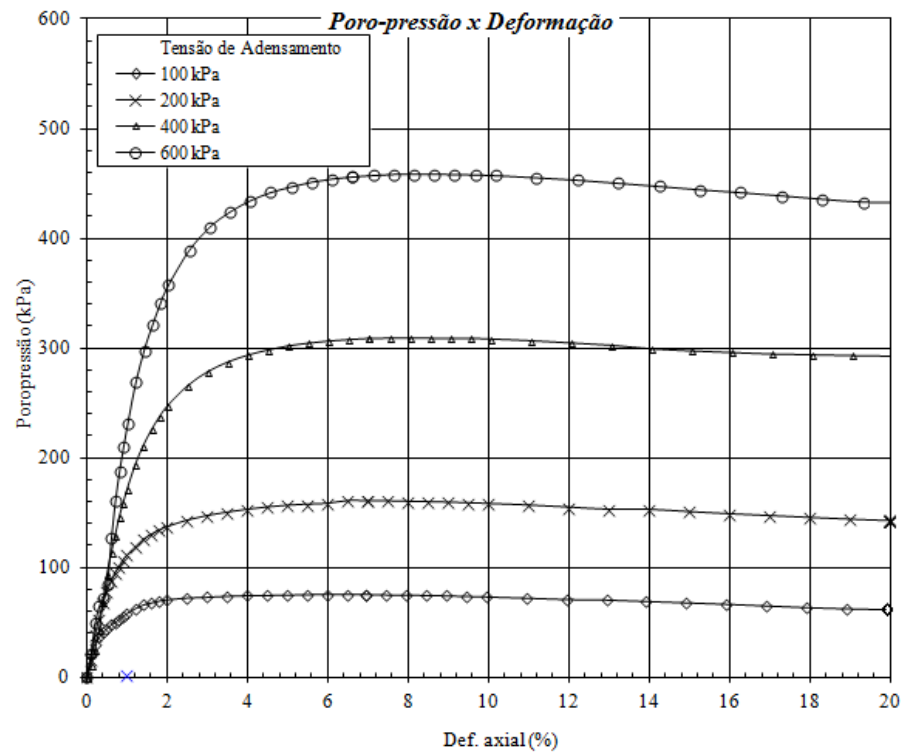
Fonte: O autor.

Gráfico C. 19 - Envoltória de Mohr-Coulomb no ensaio CIU (Rejeito W% ótima + 4%)



Fonte: O autor.

Gráfico C. 20 - Poropressão x deformação volumétrica no ensaio CIU (Rejeito W% ótima + 4%)

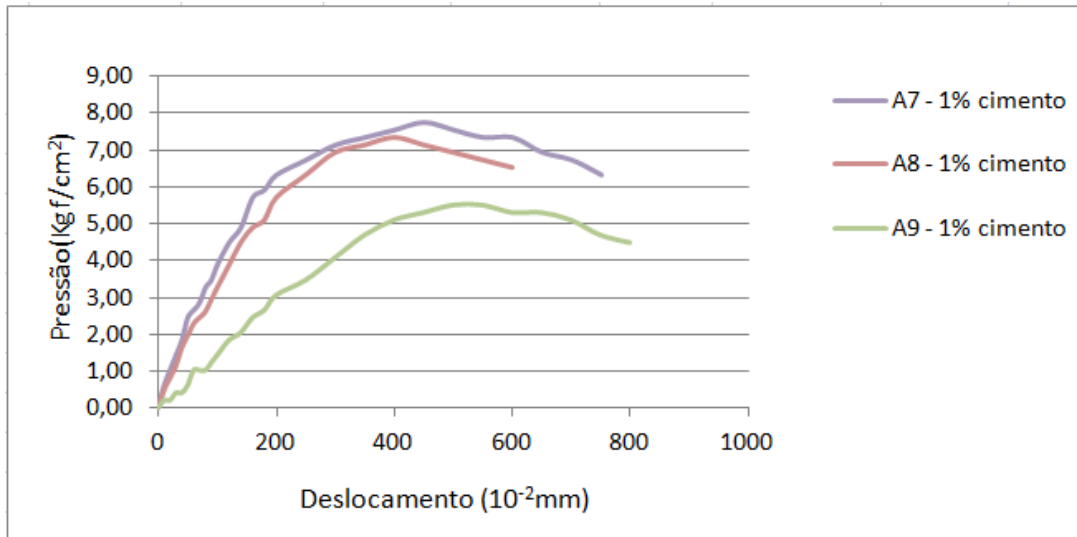


Fonte: O autor.

ANEXO D - Resultados gráficos dos ensaios de compressão não confinada

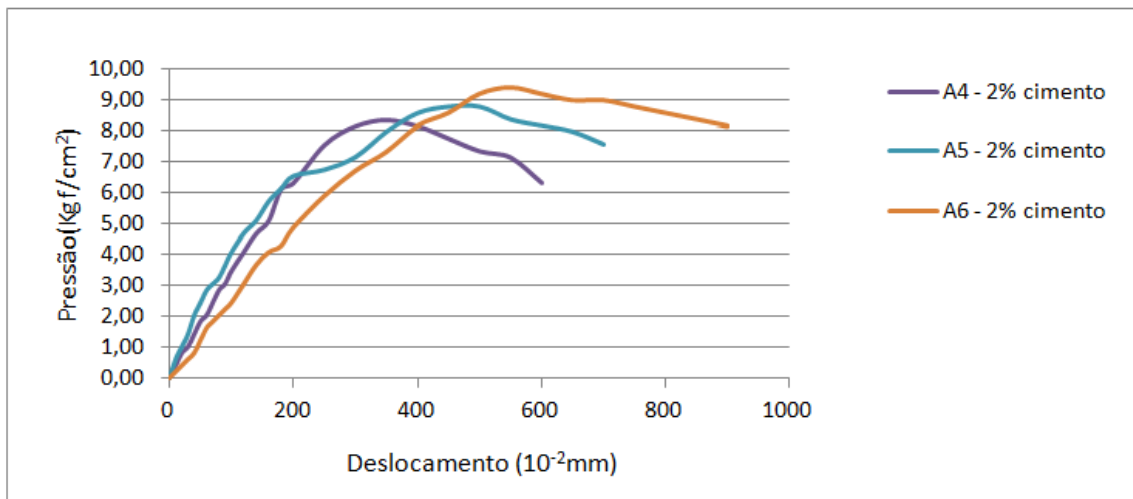
Variação da resistência em função do teor de cimento para mistura 1a:6,8r

Gráfico D. 1 - Compressão axial não confinada para 1% de cimento na mistura 1a:6,8r. Teor de umidade de 30,8%



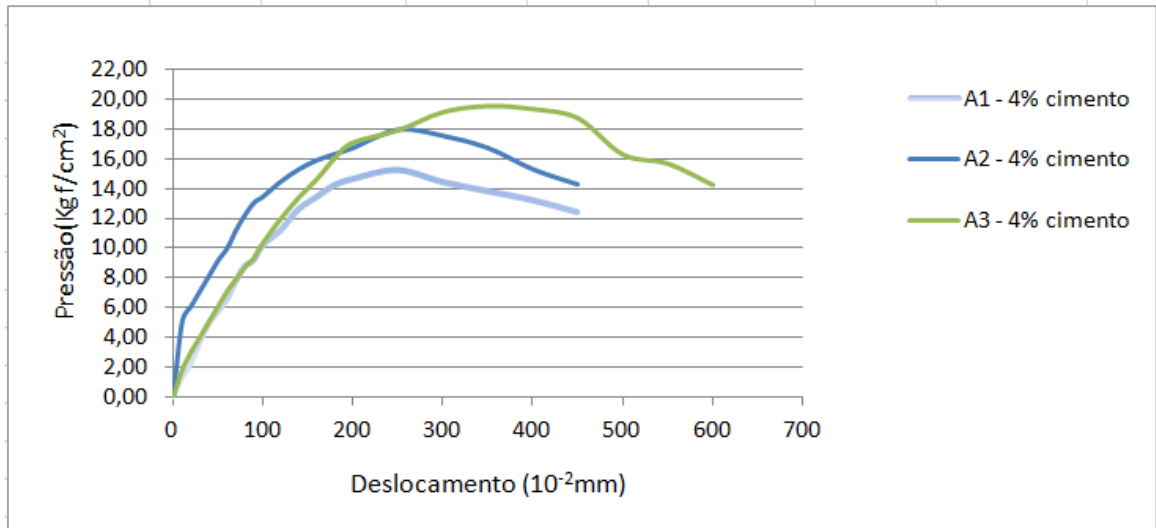
Fonte: O autor.

Gráfico D. 2 - Compressão axial não confinada para 2% de cimento na mistura 1a:6,8r. Teor de umidade de 30,5%.



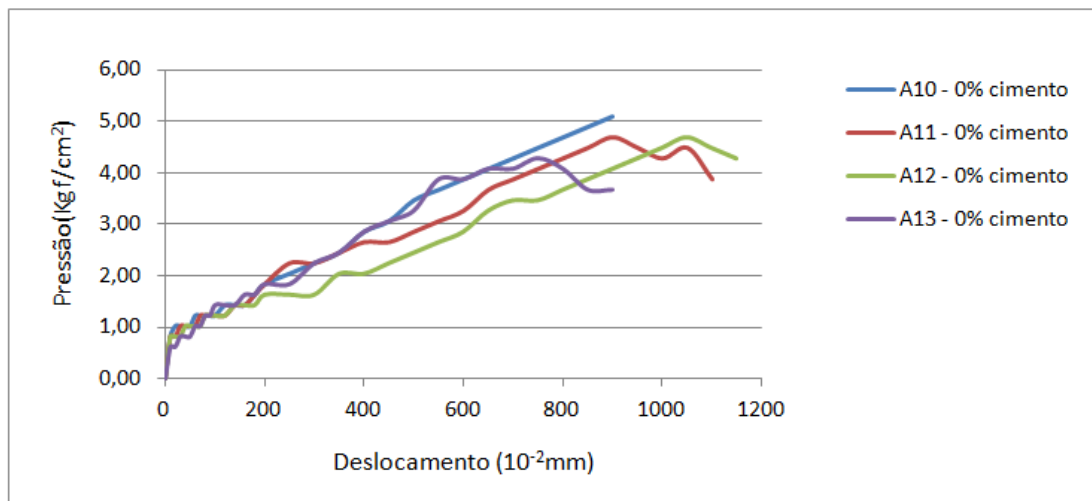
Fonte: O autor.

Gráfico D. 3 - Compressão axial não confinada para 4% de cimento na mistura 1a:6,8r. Teor de umidade de 29,9%



Fonte: O autor.

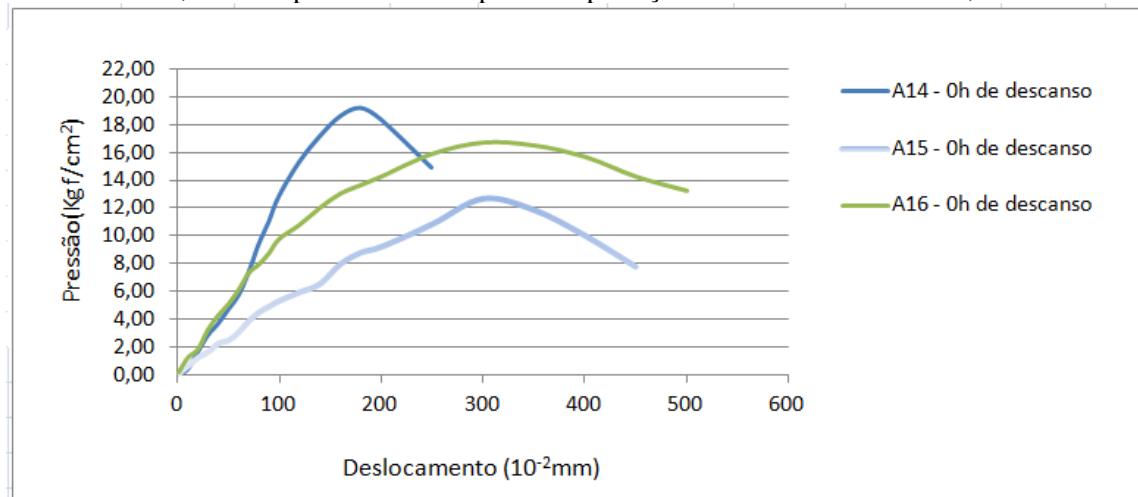
Gráfico D. 4 - Compressão axial não confinada para mistura 1a:6,8r sem adição de cimento. Teor de umidade de 31,14%



Fonte: O autor.

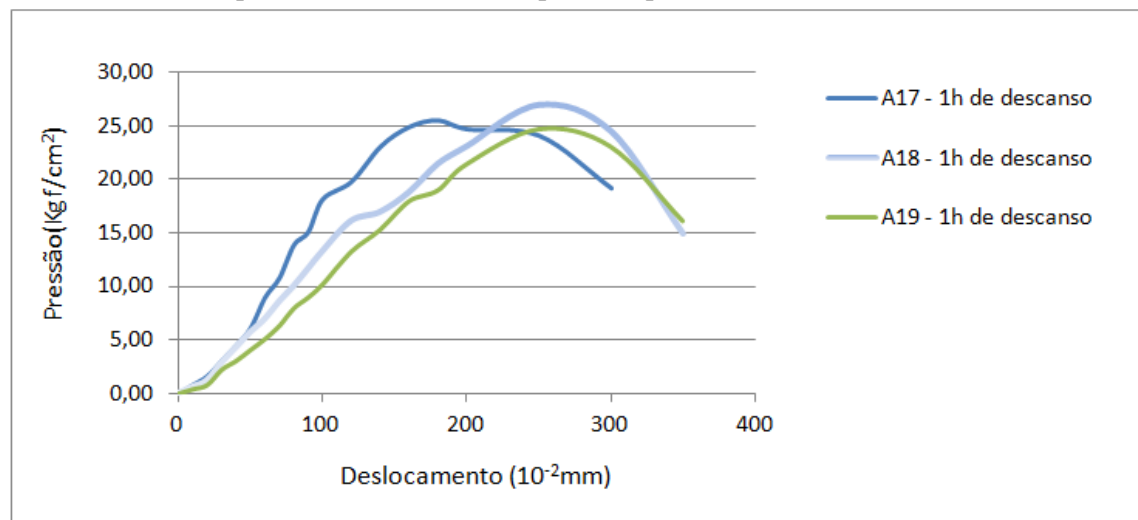
Variação da resistência em função do tempo de descanso da mistura antes da compactação

Gráfico D. 5 - Compressão axial não confinada para mistura 1a:6,8r mais 4% de cimento em relação à massa seca, sem tempo de descanso para compactação Teor de umidade de 29,9%.



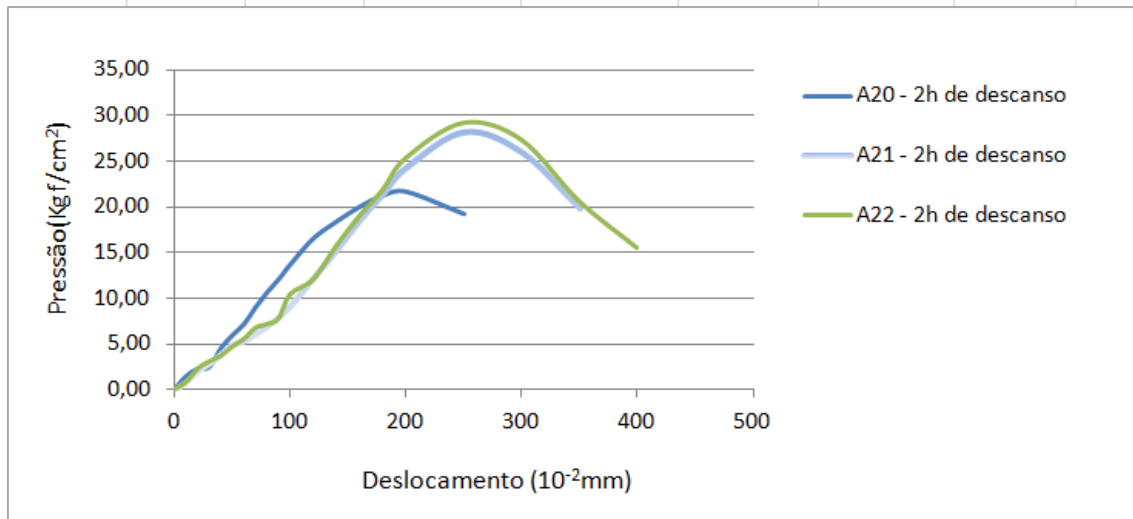
Fonte: O autor.

Gráfico D. 6 - Compressão axial não confinada para mistura 1a:6,8r mais 4% de cimento em relação à massa seca, com tempo de descanso de 1 hora para compactação. Teor de umidade de 29,9%



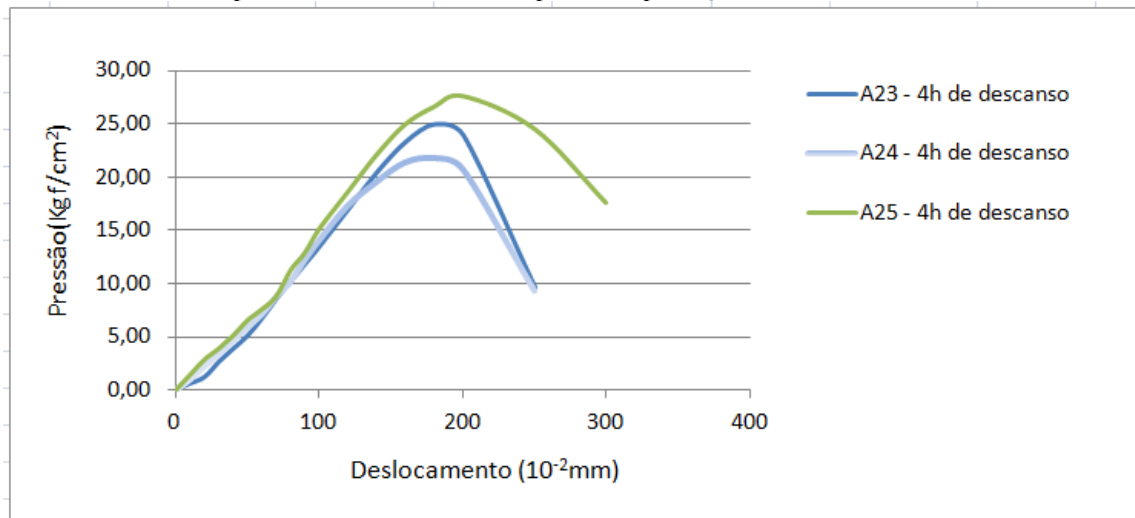
Fonte: O autor.

Gráfico D. 7 - Compressão axial não confinada para mistura 1a:6,8r mais 4% de cimento em relação à massa seca, com tempo de descanso de 2 hora para compactação. Teor de umidade de 29,9%



Fonte: O autor.

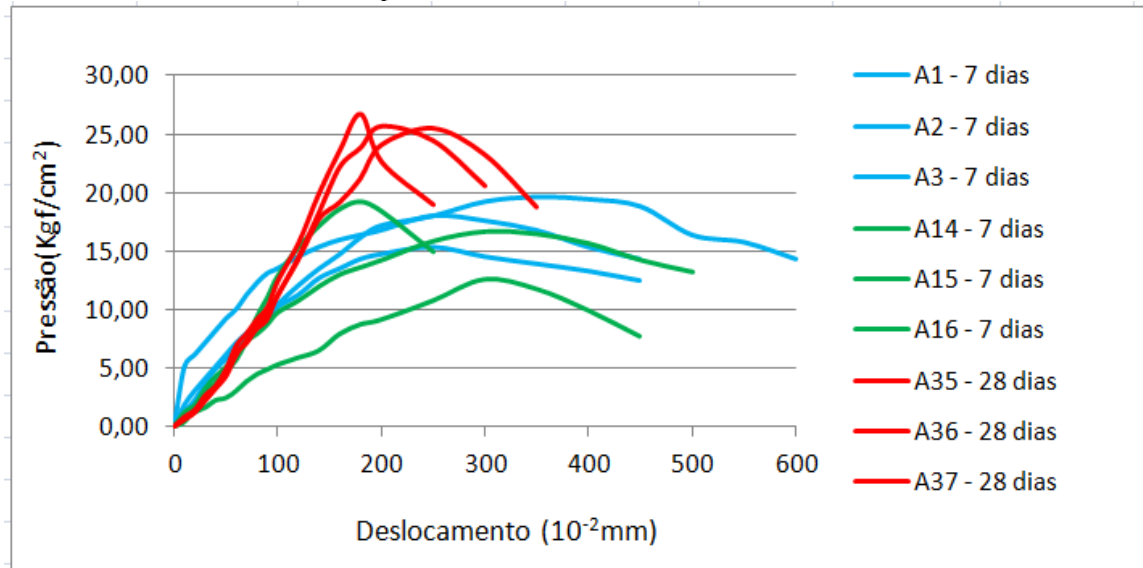
Gráfico D. 8- Compressão axial não confinada para mistura 1a:6,8r mais 4% de cimento em relação à massa seca, com tempo de descanso de 4 hora para compactação. Teor de umidade de 29,9%



Fonte: O autor.

Varição da resistência em função do tempo de cura

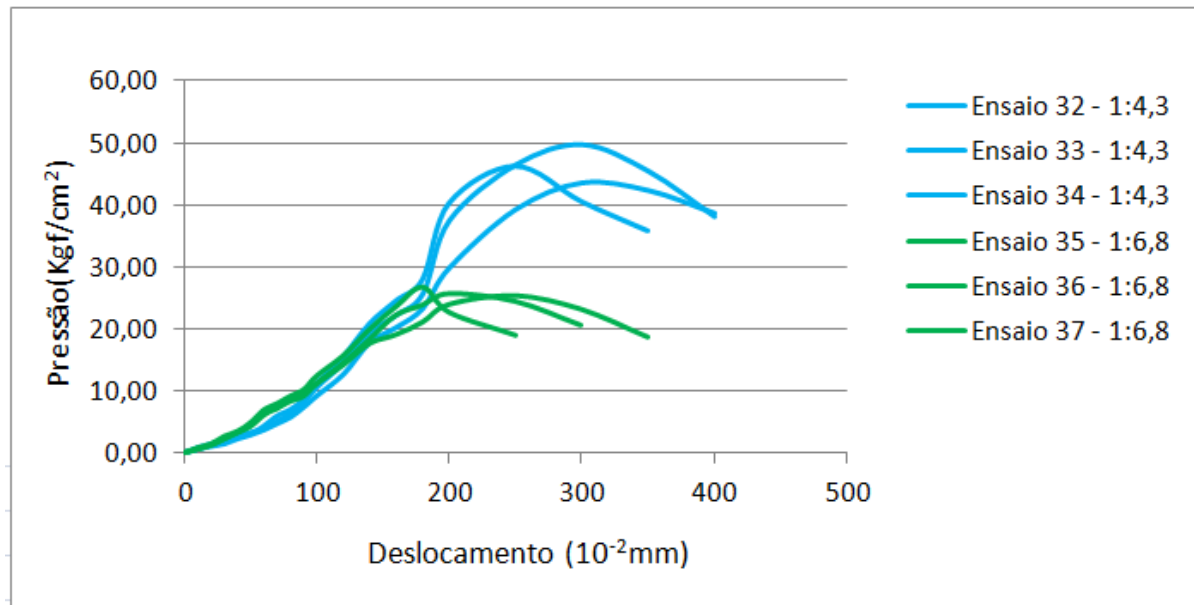
Gráfico D. 9 - Compressão axial não confinada para mistura 1a:6,8r mais 4% de cimento em relação à massa seca, com tempo de cura de 7 e 28 dias. Teor de umidade de 29,9%.



Fonte: O autor.

Varição da resistência em função da porcentagem de areia na mistura

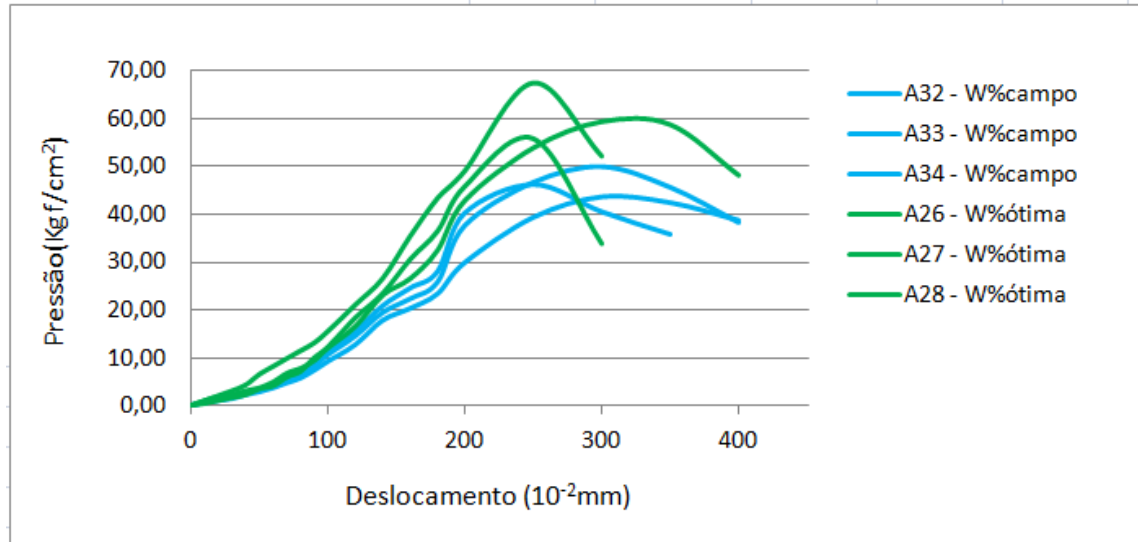
Gráfico D. 10 - Compressão axial não confinada para misturas com variação no teor de areia, com 4% de cimento e 28 dias de cura.



Fonte: O autor.

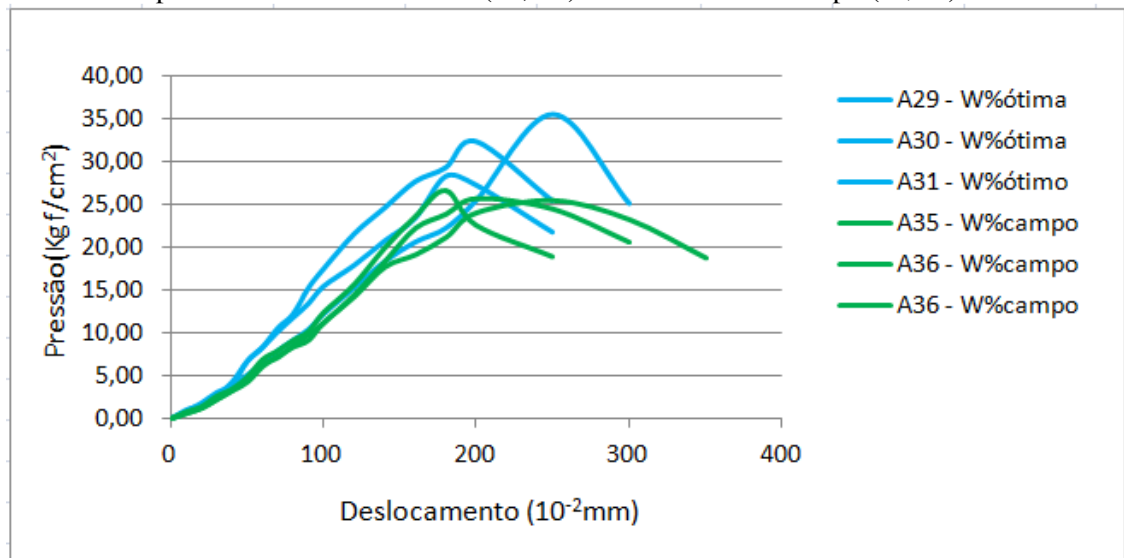
Varição da resistência em função dos parâmetros ótimos de compactação das misturas

Gráfico D. 11 - Compressão axial não confinada para mistura 1:4,3 + 4% cimento (28 dias de cura), compactadas na umidade ótima (23,4%) e na umidade de campo (27,9%)



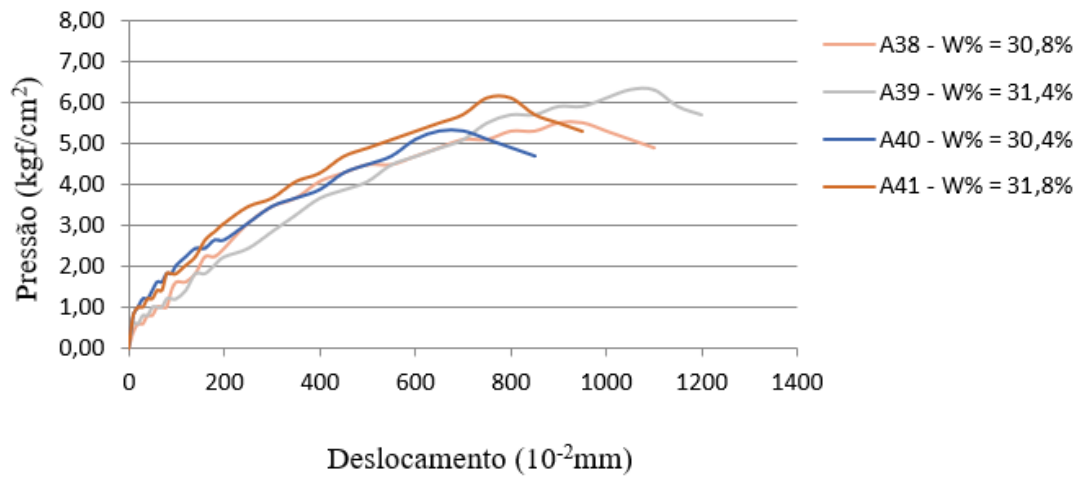
Fonte: O autor.

Gráfico D. 12 - Compressão axial não confinada para mistura 1:6,8 + 4% cimento (28 dias de cura), compactadas na umidade ótima (27,4%) e na umidade de campo (29,9%).



Fonte: O autor.

Gráfico D. 13 - Compressão axial não confinada para o rejeito compactado com umidades próximas da umidade ótima de compactação.



Fonte: O autor.