



**Manoela Cristina do Amaral Neves**

**Caracterização geotécnica e avaliação  
do comportamento de um resíduo  
filtrado da produção de alumina (lama  
vermelha) estocado na forma de aterro  
densificado**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Júnior

Rio de Janeiro

Outubro 2017



**Manoela Cristina do Amaral Neves**

**Caracterização geotécnica e avaliação do comportamento  
de um resíduo filtrado da produção de alumina (lama  
vermelha) estocado na forma de aterro densificado.**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada  
pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Júnior**

Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental– PUC-Rio

**Prof<sup>a</sup>. Raquel Quadros Velloso**

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental– PUC-Rio

**Dr. Leandro de Moura Costa Filho**

LPS – Consultoria & Engenharia Ltda

**Prof. Márcio da Silveira Carvalho**

Coordenador Setorial do

Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 16 de outubro de 2017

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

### **Manoela Cristina do Amaral Neves**

Graduada em Engenharia Civil pela Universidade Católica de Petrópolis em 2011. Ingressou no Mestrado na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em agosto de 2014, desenvolvendo a dissertação na linha de pesquisa de Geotecnia Experimental Aplicada a Mineração.

#### Ficha Catalográfica

Neves, Manoela Cristina do Amaral

Caracterização geotécnica e avaliação do comportamento de um resíduo filtrado da produção de alumina (lama vermelha) estocado na forma de aterro densificado / Manoela Cristina do Amaral Neves; orientador: Eurípedes do Amaral Vargas Júnior. – 2017.

155 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2017.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Lama vermelha. 3. Filtro prensa. 4. Caracterização geotécnica. 5. Aterro experimental. I. Vargas Júnior, Eurípedes A. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Aos meus pais Angela Cristina e José Hilton,  
que me proporcionaram as melhores condições de estudo desde cedo  
para que hoje eu pudesse alcançar meus objetivos.

## Agradecimentos

Ao meu orientador, Vargas, por me receber na PUC, e tornar possível a realização do meu mestrado.

Ao Leandro de Moura, pela orientação, por compartilhar seu notório conhecimento e experiência no assunto, pelo apoio, incentivo e contribuição para o desenvolvimento deste trabalho.

À Hydro - Alunorte, em especial, ao Ronaldo Pantoja e Paschoal Cataldi por concederem a autorização da utilização dos dados para esta pesquisa.

Aos meus ex-colegas de trabalho da LPS Consultoria e Engenharia e amigos, Bernardino, Jeffson, Rogério e Adriano pelo constante incentivo, compreensão e conhecimentos compartilhados.

Às minhas meninas: Minha mãe Angela, e minhas irmãs Marcela e Maísa por terem me apoiado incondicionalmente. Sem vocês nada disso seria possível. Muito obrigada pela paciência e incentivo. Amo vocês!!!

Aos funcionários dos Laboratórios da Geomecânica, Valdir e Marcos, e da Hydro, Wibssen e Ederson, por me ajudarem e me aturarem durante o período de trabalhos em Barcarena- P.A. Sei que não foi fácil, foram dias de muito trabalho pesado, mas que no final tudo terminou com sucesso. Obrigada por tudo!

Aos amigos que a PUC me deu, Mariana Vela, Felipe Rosa, Camilinha, Beatriz, Mauro e Rodrigo. Em especial a Mieka Arao (Mia), ganhei mais do que uma colega de mestrado, ganhei uma grande amiga para a vida toda. Obrigada pelas parcerias nos estudos, nos trabalhos e toda a ajuda nesses 36 longos meses de Mestrado.

Aos meus amigos de longa data que estão sempre por perto, mesmo estando longe: Maria Coeli - minha terapeuta e amiga; Márcio Cordero – BFF de todas as horas; Neuza Castro, Tânia e Alexandre Carlos – amigos que a natação me deu e me apoiaram em uma fase difícil durante esses 36 meses; Thiago Peixoto – não me deixou desistir da matéria de mecânica dos solos no início de mestrado; Patrícia Ottero e Mário Marques – me acolheram no início da mudança de cidade, bem no final do mestrado. À todos vocês meus sinceros muito obrigada!

Aos meus ex-colegas de trabalho da Intertechne Consultores e amigos, Marcelo Miqueletto, Fernando Marques, Celso Cardoso, Livia, Lúcia e Robertinha pela oportunidade de iniciar meu mestrado em paralelo com o trabalho. Não foi fácil coincidir o tempo das aulas de mestrado com os horários de trabalho, mas sobrevivi. Muito Obrigada!

Aos professores da PUC Rio com quem eu tive o prazer de ser aluna durante o Mestrado e a Graduação, em especial à Michéle, minha professora desde a graduação que virou uma grande amiga.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Civil, em especial à Rita, que sempre com boa vontade nos ajuda a resolver todos os problemas burocráticos.

Aos meus amigos de Minas, que me apoiaram na fase final da dissertação, sem me deixar desanimar e muito menos desistir: Marlucy – foi essencial na reta final, me recebeu com carinho em Belo Horizonte e me fez sentir em casa; Rodrigo França – uma pessoa que conquistou a minha confiança e admiração, sempre disposto a ouvir meus desabafos e minhas “pitangas”, me aconselhando e orientando da melhor forma possível, nem que seja para dar um “puxão de orelha”, além de me ensinar a ter paciência e ser paciente. Foi o meu pilar profissionalmente, me fazendo ter equilíbrio e amadurecimento, além de muito trabalho e bastante aprendizado. Enfim, muito obrigada a vocês dois pelo carinho, paciência, conselhos e palavras amigas nos momentos em que eu pensava em desistir. “Uai, conhecer ocês foi bem bom, sô!!!”

À CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

## Resumo

Neves, Manoela Cristina do Amaral; Vargas Júnior, Eurípedes do Amaral. **Caracterização geotécnica e avaliação do comportamento de um resíduo filtrado da produção de alumina (lama vermelha) estocado na forma de aterro densificado.** Rio de Janeiro, 2017. 155p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Tendo em vista a diminuição dos impactos ambientais e a necessidade em aproveitar ao máximo as áreas disponíveis para disposição de resíduos, as mineradoras e indústrias de beneficiamento de minério tem investido em técnicas inovadoras procurando a melhoria do comportamento do resíduo gerado. Este estudo experimental relata o comportamento de um resíduo da produção de alumina desaguado por filtro prensa e, também, seu comportamento geotécnico quando estocado de forma densificada. Este trabalho utilizou o Filtro Prensa, que é um dispositivo que retém a parte sólida formando tortas compactas e com elevado teor de sólidos e grau de saturação. Foram feitos estudos das características e do comportamento do resíduo filtrado para encontrar a melhor e mais segura forma de disposição, buscando o melhor aproveitamento das áreas disponíveis. Foi realizado um aterro experimental com o resíduo do filtro prensa com o intuito de estocar o material, colhendo amostras e, assim, testando as condições de compactação em cada camada executada. O Aterro experimental foi dividido em 3 pistas, a pista 1 com 5 camadas de 30 cm, a pista 2 com 4 camadas de 40 cm e a pista 3 com 4 camadas de 50 cm de espessura. As camadas tiveram diferentes combinações de números de passadas e de umidade em relação a umidade ótima. Foram realizados ensaios de laboratório (Caracterização, Compactação Proctor Normal, Triaxial CIU/UU/PN, Adensamento e Permeabilidade) em amostras deformadas do resíduo, coletadas na saída do filtro prensa, e em amostras indeformadas obtidas nas áreas do aterro experimental observou-se que o teor de umidade obtido no resíduo na saída do filtro prensa é menor em 2% ao teor de umidade ótimo do material, sendo favorável para promover sua compactação na disposição. Quando compactado, o resíduo apresenta baixa permeabilidade, da ordem de  $10^{-6}$  a  $10^{-8}$  m/s, sendo estes resultados obtidos em corpos de prova moldados variando-se o grau de compactação entre 85% a 100% e o teor de umidade variando -2% a +6% em

relação a umidade ótima. Também foram avaliados os parâmetros de resistência por meio de ensaios triaxiais UU (não adensados e não drenados) em amostras não saturadas. Através dos resultados obtidos em campo observou-se que em todos os casos, há sempre um crescimento de peso específico seco e grau de compactação (GC) com o número de passadas. A umidade de 4% acima da ótima é o limite para se ter GC aceitável, para qualquer espessura de camada dentro desta faixa de umidade ( -1,0 a +4,0% ) o número mínimo de 8 passadas.

### **Palavras-chave**

Lama vermelha; filtro prensa; caracterização geotécnica; aterro experimental.

## Abstract

Neves, Manoela Cristina do Amaral; Vargas Júnior, Eurípedes do Amaral (Advisor). **Geotechnical characterization and evaluation of the behavior of a filtered residue from the production of alumina (red mud) stored as densified landfill**. Rio de Janeiro, 2017. 155p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Considering the reduction of environmental impacts and the need to make the best use of available waste disposal areas, mining beneficiation industries have invested in innovative techniques to improve the behavior of the waste generated. This experimental study reports the behavior of a residue from the production of alumina dewatered by filter press and also its geotechnical behavior when densified. This work used the Filter Press, which is a device that retains the solid part forming compact and high percentage of solids and saturation degree. Studies of the characteristics and behavior of the filtered residue were made to find the best and most safe form of disposal, seeking the best use of available areas. An experimental landfill with the press filter residue was carried out in order to store the material, collecting samples and, therefore, testing the compaction conditions in each layer performed. The experimental landfill was divided into 3 lanes, lane 1 with 5 layers of 30 cm, lane 2 with 4 layers of 40 cm and lane 3 with 4 layers of 50 cm of thickness. The layers had different combinations of numbers of passes and humidity relative to optimal humidity. Laboratory tests (Characterization, Compaction, CIU / UU / PN Triaxial, oedometer and Permeability) were carried out on deformed samples of the residue, collected at the exit of the filter press, and in undisturbed samples obtained in the areas of the experimental landfill it was observed that the moisture content obtained in the residue at the exit of the filter press is 2% lower than the optimum moisture content of the material, being favorable to promote its compaction in the arrangement. When compacted, the residue presents low permeability, in the order of  $10^{-6}$  to  $10^{-8}$  m / s, these results being obtained in molded test bodies varying the degree of compaction between 85% and 100% and the moisture content Varying -2% to + 6% in relation to the optimal humidity. Resistance parameters were also assessed by UU triaxial tests (non-densified and non-drained) in unsaturated samples. Through the results showed in

the field in all cases a growth of specific dry weight and degree of compaction (GC) with the number of passes. The humidity of 4% above the optimum is the limit to have acceptable GC, for any layer thickness within this humidity range (-1.0 to +4.0%) the minimum number of 8 passes.

## **Keywords**

Red mud; press filter; geotechnical characterization; experimental landfill.

# Sumário

1 Introdução	23
1.1. Objetivos da Pesquisa	25
1.2. Estrutura do Trabalho	25
2 Revisão Bibliográfica	27
2.1. Alumínio	27
2.2. Processo de Produção do Alumínio	28
2.3. Bauxita	29
2.4. Processo de Refino da Bauxita	29
2.5. Lama Vermelha: Produção, Disposição e Aplicações Alternativas	31
2.5.1. Composição Química	32
2.5.2. Produção Mundial	32
2.5.3. Toxicidade da Lama Vermelha	33
2.5.4. Métodos de Disposição Final da Lama Vermelha	33
2.5.4.1. Métodos úmidos	34
2.5.4.2. Métodos secos ou semi-secos	34
2.5.5. Deságue da Lama Vermelha	36
2.5.6. Problemas Decorrentes da Disposição da Lama Vermelha	37
2.5.7. Aplicações Alternativas para a Lama Vermelha	39
2.5.8. Propostas de Aplicações para a Lama Vermelha no Brasil	41
2.6. Rejeitos/ Resíduos filtrados	42
2.7. Filtros Sob Pressão	44
2.7.1. Condicionantes dos Sistemas de Disposição de Rejeitos/Resíduos Filtrados	46
2.7.1.1. Vantagens e Desvantagens da Tecnologia de Filtragem de Rejeitos/Resíduos	47
2.8. Solos Compactados	48
2.9. Considerações Finais	52
3 Programa Experimental	53

3.1. Projeto do Aterro Experimental	54
3.1.1. Recursos Necessários	57
3.2. Programação dos Ensaios Realizados	57
3.2.1. Amostras Deformadas	57
3.2.2. Amostras Indeformadas	60
3.2.3. Procedimento dos Ensaios Realizados dentro da Área Teste	63
3.2.3.1. Ensaios de Caracterização, Densidade Aparente e Compactação dentro da Área Teste.	63
3.2.4. Procedimento dos Ensaios Realizados no Laboratório	64
3.2.4.1. Ensaios de Caracterização Completa	64
3.2.4.2. Compactação Proctor Normal	65
3.2.4.3. Ensaios de Adensamento com Medida de Permeabilidade	66
3.2.4.4. Ensaios Triaxiais CIU	67
3.2.4.5. Ensaios Triaxiais UU	69
3.2.4.6. Ensaios Triaxiais PN (Pressão Neutra)	71
3.2.4.7. Ensaios de Permeabilidade com Carga Variável	73
3.3. Execução das Pistas Experimentais	74
3.3.1. Pista 1	74
3.3.1.1. Metodologia de Execução	74
3.3.1.2. Ensaios de Controle Realizados Dentro da Área Teste	76
3.3.2. Pista 2	77
3.3.2.1. Metodologia de Execução	77
3.3.2.2. Ensaios de Controle Realizados Dentro da Área Teste	80
3.3.3. Pista 3	80
3.3.3.1. Metodologia de Execução	80
3.3.3.2. Ensaios de Controle Realizados Dentro da Área Teste	83
4 Apresentação, Análise e Discussão dos Resultados de Campo e Laboratório.	84
4.1. Ensaios Realizados no Laboratório da Área Teste	84
4.1.1. Ensaios de Caracterização	84
4.1.2. Ensaios de Compactação Proctor Normal	85
4.1.3. Ensaios de Controle Tecnológico de Compactação (Teor de	

Umidade, Peso Específico e Grau de Compactação)	86
4.1.3.1. Pista 1	86
4.1.3.1.1. Comentários Pista 1 – 0,30m	89
4.1.3.2. Pista 2	90
4.1.3.2.1. Comentários Pista 2 – 0,40 m	93
4.1.3.3. Pista 3	94
4.1.3.3.1. Comentários Pista 3 – 0,50 m	97
4.1.4. Conclusão dos Resultados	98
4.1.4.1. Geral	98
4.1.4.2. Aterros	99
4.2. Ensaios Realizados no Laboratório Fora da Área Teste	100
4.2.1. Ensaios de Caracterização	102
4.2.1.1. Granulometria	104
4.2.1.2. Limites de Atterberg	105
4.2.1.3. Densidade Específica Real dos Grãos	106
4.2.1.4. Peso Específico Total	107
4.2.1.5. Índice de Vazios	107
4.2.1.6. Umidade Natural	107
4.2.1.7. Resumo dos Ensaios de Caracterização	108
4.2.2. Ensaios de Compactação Proctor Normal	109
4.2.2.1. Peso Específico Seco Máximo	110
4.2.2.2. Umidade Ótima	110
4.2.2.3. Resumo dos Ensaios de Compactação	111
4.2.3. Ensaios de Adensamento com Medida de Permeabilidade	113
4.2.3.1. Material Bem Compactado – Blocos 1, 3 e 12	115
4.2.3.2. Material Mediamente Compactado – Blocos 9 e 11	115
4.2.3.3. Material Pouco Compactado – Blocos 2 e 7	115
4.2.3.4. Resumo dos Ensaios de Adensamento	116
4.2.4. Permeabilidade com Carga Variável	117
4.2.4.1. Resumo dos Ensaios de Permeabilidade	118
4.2.5. Ensaios Triaxial CIU sat	120
4.2.5.1. Parâmetros Efetivos de Resistência	122
4.2.6. Ensaios Triaxial UU unsat	123

4.2.6.1. Resumo dos Ensaio UU unsat	125
4.2.7. Ensaio Triaxial PN	126
4.2.7.1. Resumo dos Ensaio PN	129
4.3. Análises Numéricas via Teoria do Equilíbrio Limite	130
4.3.1. Parâmetros Geotécnicos	130
4.3.2. Metodologia de Análise	131
4.3.3. Resultados das Análises	134
5 Conclusões	143
5.1. Sugestão para Trabalhos Futuros	144
6 Referências bibliográficas	148

## Lista de figuras

Figura 2-1: Fluxograma e Esquema do Processo Bayer (Adaptado de WAO, 2003).....	31
Figura 2-2: Lagoa de disposição de lama vermelha da -Ilha de São Luís – Maranhão (Fonte: Alumar – 2001). .....	31
Figura 2-3 – Princípio de filtragem (Fonte: UFOP, 2004 – Espessamento e Filtragem).....	43
Figura 2-4 – Mecanismos de filtragem e os principais fornecedores (Adaptado de Guimarães, 2011).....	43
Figura 2-5 – Resumo das principais unidades de rejeito filtrado do mundo (adaptado de Ulrich e Coffin, 2013 – publicado no Paste 2013).....	44
Figura 2-6 – Tipos de filtros sob pressão .....	45
Figura 2-7 – Filtro prensa de placas verticais – 1000 mm x 1000 mm e tortas com espessura de 30 mm. (Fonte: <a href="http://www.grabe.com.br/filtroprensa">http://www.grabe.com.br/filtroprensa</a> ) .....	45
Figura 2-8 – Empilhamento a seco de rejeitos usando o transporte de caminhão. (Fonte: <a href="http://www.tailings.info">http://www.tailings.info</a> ) .....	47
Figura 2-9 – Influência da energia de compactação de um mesmo solo (modificado de DNIT,2006).....	50
Figura 2-10 – Estrutura de solos compactados (adaptado de Lambe, 1958).....	51
Figura 3-1 – Vistas da Pista 01 com camadas de 0,30 m de espessura, Pista 02 com camadas de 0,40 m de espessura e Pista 03 com camadas d e 0,50 m de espessura. ....	55
Figura 3-2 – Condições previstas para testes no aterro experimental .....	56
Figura 3-3 – Detalhes da coleta e separação das amostras deformadas do resíduo lançado pelos caminhões nas pistas do aterro experimental para ensaios de granulometria e limites.....	58
Figura 3-4 – Detalhes da execução dos ensaio de Limite de Liquidez e Plasticidade. ....	59

Figura 3-5 – Detalhe da cravação e coleta de cilindros para execução de controle de peso específico e ensaio de compactação Proctor Normal. ....	59
Figura 3-6 – Detalhes da marcação e escavação para retirada do bloco indeformado.....	62
Figura 3-7 – Detalhes da retirada de blocos indeformados nas dimensões 30x30cm e envolto com filme plástico.....	62
Figura 3-8 – Detalhe do bloco indeformado envolto com pano e parafina derretida antes de coloca-lo dentro da caixa para transporte com serragem.....	63
Figura 3-9 – Resíduo em forma de torta compactada e granular lançado na pista.....	75
Figura 3-10 – Detalhes da camada de 0,30 cm de espessura, com a umidade de chegada do filtro prensa ~27%, em tratamento para variação da umidade com o auxílio do caminhão pipa e da Patrol para a realização da compactação e coleta de cilindros para controle de peso específico. ....	76
Figura 3-11 – Detalhes da coleta de cilindros para controle de peso específico e teor de umidade ,topografia determinando cotas no aterro experimental com camada de 0,40 cm de espessura, tratamento da camada com o auxílio do trator agrícola com discos (Girico) para variação da umidade acima da umidade do resíduo da chegada do filtro. ....	79
Figura 3-12 – Limite de trafegabilidade para camada de 0,40m – 6% acima da umidade do filtro .....	79
Figura 3-13 – Detalhes do resíduo lançado no aterro experimental antes da compactação em forma de tortas compactadas, verificação do teor de umidade via método da frigideira, compactação na camada de 0,50m de espessura e teor de umidade do resíduo de 6% acima da umidade ótima. ....	82
Figura 3-14 – Limite de trafegabilidade na camada de 0,50m é de 7% acima da umidade ótima.....	82
Figura 4-1 – Umidade Ótima (%) x $\gamma$ seco máximo (g/cm <sup>3</sup> ).....	86
Figura 4-2 – Pista 1 – 4,6,8 e 10 passadas – Umidade (%) x $\gamma$ seco (g/cm <sup>3</sup> ).....	88
Figura 4-3 – Pista 1 – Umidade (%) x $\gamma$ seco (g/cm <sup>3</sup> ) .....	89

## Lista de tabelas

Tabela 3-1 – Quantidade de ensaios realizados no laboratório dentro da área teste .....	58
Tabela 3-2 – Programação de ensaios de laboratório nas amostras retiradas do Aterro Experimental com resíduo do Filtro Prensa compactado .....	61
Tabela 4-1 – Resultado dos ensaios de granulometria .....	85
Tabela 4-2 – Resultado dos ensaios de caracterização .....	85
Tabela 4-3 – Resultado dos ensaios proctor normal .....	85
Tabela 4-4 – Pista 1 – Camada 1 – Controle de Compactação .....	87
Tabela 4-5 – Pista 1 – Camada 2 – Controle de Compactação .....	87
Tabela 4-6 – Pista 1 – Camada 3 – Controle de Compactação .....	87
Tabela 4-7 – Pista 1 – Camada 4 – Controle de Compactação .....	87
Tabela 4-8 – Pista 1 – Camada 5 – Controle de Compactação .....	87
Tabela 4-9 – Pista 2 – Camada 1 – Controle de Compactação .....	90
Tabela 4-10 – Pista 2 – Camada 2 – Controle de Compactação .....	90
Tabela 4-11 – Pista 2 – Camada 3 – Controle de Compactação .....	90
Tabela 4-12 – Pista 2 – Camada 4 – Controle de Compactação .....	91
Tabela 4-13 – Pista 3 – Camada 1 – Controle de Compactação .....	94
Tabela 4-14 – Pista 3 – Camada 2 – Controle de Compactação .....	94
Tabela 4-15 – Pista 3 – Camada 3 – Controle de Compactação .....	95
Tabela 4-16 – Pista 3 – Camada 4 – Controle de Compactação .....	95
Tabela 4-17 – Resumo dos ensaios executados nas amostras deformadas e indeformadas do aterro experimental .....	101
Tabela 4-18 – Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização executados nas amostras coletadas do aterro experimental .....	103
Tabela 4-19 – Resultado dos ensaios de caracterização realizado nos blocos coletados .....	108
Tabela 4-20 – Comparação do ensaios de caracterização realizado no resíduo de bauxita densificado. ....	109

Tabela 4-21: Resultado dos ensaios de compactação Proctor Normal realizado nos blocos coletados. ....	110
Tabela 4-22 – Resumo das condições de compactação de cada bloco referente aos ensaios de compactação Proctor Normal. ....	111
Tabela 4-23 – Resultado dos ensaios de compactação Proctor Normal. ....	111
Tabela 4-24 – Comparação do ensaios de compactação realizado no resíduo de bauxita densificado. ....	112
Tabela 4-25 – Resumo do ensaios de adensamento oedométrico com medida de permeabilidade ....	114
Tabela 4-26 – Comparação dos ensaios de adensamento realizado no resíduo de bauxita densificado. ....	117
Tabela 4-27 – Resumo dos ensaios de permeabilidade com carga variável.....	118
Tabela 4-28 – Comparação dos ensaios de permeabilidade realizado no resíduo de bauxita densificado. ....	119
Tabela 4-29 – Ensaios Triaxiais CIUsat na condição de ruptura. ....	120
Tabela 4-30 – Parâmetros Efetivos de Resistência ao Cisalhamento – Blocos Isolados.....	122
Tabela 4-31 – Ensaios Triaxiais UU não saturados.....	124
Tabela 4-32 – Parâmetros de Resistência em termos de Tensões Totais .....	125
Tabela 4-33 – Valores de $u/s_1$ na faixa de interesse: $\sigma_h/\sigma_v=0,5$ .....	127
Tabela 4-34 – Valores de $u/\sigma_1$ na faixa de interesse: $\sigma_h/\sigma_v=0,6$ .....	127
Tabela 4-35 – Valores de Ruptura nas amostras indeformadas ensaiadas. ....	128
Tabela 4-36: Valores de Ruptura nas amostras indeformadas ensaiadas. ....	132
Tabela 4-37 – Fatores de segurança análise de construção. ....	133
Tabela 5-1 – Resumo dos valores obtidos da caracterização da lama vermelha.....	143

## Lista de Abreviações

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- CIU – “Consolidated Undrained” ou seja adensado e não drenado
- DRS – Depósito de Resíduos Sólidos
- FP - Filtro Prensa
- FT - Filtro Tambor
- GC - Grau de compactação
- IP - Índice de plasticidade
- LL - Limite de liquidez
- LP - Limite de plasticidade
- NBR - Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas
- PN – Pressão Neutra
- PUC - Pontifícia Universidade Católica
- Ru – Razão de Poropressão
- TS - Teor de sólidos
- TTD - “Tailing Thickened Discharge” ou seja disposição de rejeito espessado
- UU - “Unconsolidated Undrained” ou seja não adensado e não drenado
- VEA - Valor de entrada de ar
- Vv - Volume de Vazios

## Lista de Símbolos

### Letras Latinas

A - área transversal ao fluxo (área filtrante)

a - uma aproximação do valor de entrada de ar

av - coeficiente de compressibilidade

Ab - albita

B - parâmetro de poropressão = relação entre a poropressão e a tensão principal maior

c - coesão em termos de tensões totais

c' - coesão em termos de tensões efetivas

Cc - Índice de compressão

Cr - Índice de recompressão

CR -  $Cc/(1+e_i)$

Ct - caulinita

C<sub>v</sub> - coeficiente de adensamento

e - número natural, 2,71828...

e - índice de vazios

ef - índice de vazios final do corpo de prova

ei - índice de vazios inicial do corpo de prova

Hf - altura final do corpo de prova

Hi - altura inicial do corpo de prova

K - coeficiente de filtragem ou permeabilidade do leito

k - coeficiente de permeabilidade

Kc - constante de Kozeny que depende da granulometria, forma e porosidade

L - espessura do meio filtrante + torta

m - um parâmetro que está relacionado com o teor de umidade residual

mv - coeficiente de compressibilidade volumétrica

Mv - muscovita

$n$  - um parâmetro que controla a inclinação no ponto de inflexão na curva característica do solo

PN - pressão neutra

Q - fluxo do filtrado

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

$ru$  - coeficiente de geração de poropressão

S - grau de saturação

Sad. - sucção de adsorção

Sc - sucção capilar

Sd - sodalita

SE - área superficial específica

Sm - sucção matricial

Som - sucção osmótica

Sr - saturação residual

St - sucção total

$u_1$  - poropressão gerada

$u_a$  - pressão de ar

$u_w$  - pressão de água

w - umidade gravimétrica

$w_f$  - teor de umidade final do corpo de prova

$w_i$  - teor de umidade inicial do corpo de prova

$w_h$  - umidade higroscópica

wót - umidade ótima obtida do ensaio de compactação na energia Proctor Normal

### **Letras Gregas**

$\mu$  - viscosidade do filtrado

$\theta$  - umidade volumétrica

$\rho_s$  - massa específica dos sólidos

$\varepsilon$  - índice de vazios do leito

$\psi$  - sucção do solo

$\psi_r$  - sucção correspondente ao teor de umidade residual,  $\theta_r$

$\theta_r$  - teor de umidade volumétrica residual

$\sigma_3$  - tensão normal principal menor

- $\sigma_3'$  - tensão normal confinante efetiva
- $\sigma_1$  - tensão normal principal maior
- $\sigma'_v$  - tensão normal efetiva vertical
- $\sigma'_h$  - tensão normal efetiva horizontal
- $\sigma'_p$  - tensão normal de pré-adensamento
- $\gamma_s$  - peso específico dos grãos
- $\gamma$  - peso específico natural
- $\gamma_d$  - peso específico seco
- $\phi$  - ângulo de atrito em termos de tensões totais
- $\phi'$  - ângulo de atrito em termos de tensões efetivas

# 1 Introdução

Visando a diminuição dos impactos ambientais gerados pelo aumento da geração de resíduos industriais causados pelo crescimento da exploração e beneficiamento do minério, os órgãos ambientais estão cada vez mais exigentes em relação a liberação para autorização de áreas para o destino final de resíduos gerados pela atividades minerais e industriais. Devido a esse motivo, cada vez mais mineradoras e indústrias de beneficiamento de minério tem investido em técnicas inovadoras procurando a melhor forma de gerar esse resíduo de forma menos agressiva ao meio ambiente.

Na indústria de alumina, não há estéril no processo como ocorre na extração mineral, o rejeito gerado que é conhecido como lama vermelha (*red mud*) é designado no meio técnico como um subproduto industrial, ou seja, um resíduo da produção de alumina.

No processo de produção de alumina, a matéria prima é a bauxita, a técnica mais utilizada no Brasil para disposição é a via úmida, na qual o resíduo gerado é diluído em água para as áreas de armazenamento com baixos teores de sólidos. Um impacto causado por esse método no ambiente é que ele gera volumes altos no seu processo resultando em depósitos de baixa densidade e baixa capacidade de suporte, gerando sistemas mais susceptíveis a problemas de segurança geotécnica e ambiental.

Segundo Davies (2011), a quantidade de água e/ou fluidos que é perdida nos vazios dos resíduos estocados, pois escoam ou evaporam das barragens, é algo a ser cada vez mais visualizado como crítico pelos órgãos regulatórios e pelos olhos da população, que insistem na avaliação de alternativas viáveis para qualquer proposta de desenvolvimento da mineração.

Visando a alteração deste cenário, a tendência nos dias de hoje é a disposição do resíduo com teores de sólidos mais altos, o que é possibilitado pela utilização de técnicas como a disposição da lama espessada em pasta e a filtragem do resíduo (Lima, 2006).

Um método aplicado atualmente para a disposição do resíduo da produção de alumina (lama vermelha/*red mud*) é a disposição conhecida como empilhamento a seco ou “dry stacking”, em que o resíduo é filtrado por filtros tambor até um teor de sólidos (ou “porcentagem de sólidos”, termo utilizado na mineração) de aproximadamente 60%, sendo transportado até o local de disposição por caminhões ou por bombas de deslocamento positivo, descarregando o resíduo a partir de um ponto mais alto, formando uma pilha (Nery, 2013). Neste caso, a disposição é considerada segura, em que o resíduo pode ser obtido com características que torna possível a disposição como material “não-perigoso” (Bánvölgyi e Huan, 2009).

Uma vez que a filtragem do resíduo resulta em um menor grau de saturação, então se torna possível trabalhá-lo com equipamentos de terraplenagem, espalhando-o e compactando-o em camadas, como um aterro usual de solo compactado, com significativa resistência ao cisalhamento (Ávila, 2012). Ávila et al. (2012) apresentaram ensaios de laboratório em um resíduo da produção de alumina realizados em corpos de prova moldados com teores de umidade próximos ao obtido com filtro prensa, e graus de compactação de 85%, 90% e 100%.

A aplicação da tecnologia de filtragem para desaguamento do resíduo antes da disposição tem sido considerada e aplicada para o resíduo da produção de alumina (Collini, D. et al., 2011; Bach, M. E Weston V., 2011). Uma alternativa de filtragem é a utilização de filtros tipo prensa, cujo funcionamento consiste no bombeamento sob alta pressão de soluções com resíduos por elementos filtrantes permeáveis, que permitem apenas a passagem da água, sendo a parte sólida retida nas placas filtrantes formando tortas compactas e com elevado teor de sólidos (de 75% a 85%) e grau de saturação de aproximadamente 80%. (Nery, 2013). A filtragem por pressão, comparada com outros tipos de equipamentos para desaguamento do resíduo, está sendo atualmente avaliada pelas indústrias (Hond e Brouwer, 2011), entretanto, é necessário estudar as características e o comportamento do resíduo filtrado para poder analisar a melhor e mais segura forma de disposição para este tipo de resíduo (Nery, 2013).

Embora as tortas apresentem uma alta densidade quando elas saem das câmaras do filtro prensa, elas se quebram em pedaços menores, formando uma pilha de material solto, cuja densidade não é elevada. Sendo assim, para ter um

ganho de volume na disposição, é necessário compactar o material, o que resulta em aumento da resistência, redução da compressibilidade e diminuição da permeabilidade, possibilitando projetos de pilhas de disposição com maiores alturas e inclinações de taludes (Nery, 2013).

### **1.1. Objetivos da Pesquisa**

A pesquisa realizada para o desenvolvimento deste trabalho consistiu na realização de testes de compactação deste resíduo em campo, de onde foram coletadas amostras deformadas e indeformadas para a realização de ensaios de laboratório com o intuito de obter as seguintes informações:

- Verificar o comportamento do resíduo filtrado quando estocado na forma de aterro densificado;
- Verificar a trabalhabilidade do resíduo filtrado em condições meteorológicas distintas, simulando épocas de chuvas através de simulações por meio da variação da umidade do resíduo;
- Definir em princípio as características de espessura de camada e número de passadas requeridas para atendimento das condições de compactação preconizadas no projeto de conformação da cobertura;
- Avaliar a produtividade e adequabilidade dos equipamentos propostos para execução dos aterros;
- Realização de ensaios especiais geomecânicos de laboratório executados em amostras indeformadas de resíduo compactado coletadas na área teste.

### **1.2. Estrutura do Trabalho**

Esta dissertação está organizada em 5 capítulos assim distribuídos:

a) Capítulo 1: Introdução

São apresentados as considerações gerais, os objetivos e a organização da dissertação.

#### b) Capítulo 2: Revisão Bibliográfica

Apresenta-se a revisão da literatura sobre os assuntos que serão abordados durante o trabalho como os conceitos gerais sobre a geração de resíduo na produção de alumina e os métodos utilizados para a sua disposição. Também é descrito os tipos de filtros utilizados para o desaguamento de rejeitos finos, antes da disposição. Além disto, é feita uma breve explanação sobre o comportamento geotécnico de solos compactados e confinados em forma de aterro.

#### c) Capítulo 3: Programa Experimental

Apresentação do procedimento experimental utilizado na pesquisa, descrevendo a metodologia e execução para construção das três pistas de aterro experimental, assim como a coleta de amostras indeformadas e deformadas deste resíduo, a lista de ensaios de laboratório conduzidos nas amostras, bem como os procedimentos para a realização destes ensaios.

#### d) Capítulo 4: Resultados e Discussões

São apresentados os resultados obtidos da caracterização do material, dos quais estão em forma de tabelas e gráficos, assim como é feita a interpretação e análise dos mesmos, caracterizando geotecnicamente o material estudado e descrevendo seu comportamento quando compactado.

#### e) Capítulo 5: Considerações Finais

As conclusões obtidas são apresentadas baseadas nos resultados dos ensaios e análises efetuadas, além das recomendações para trabalhos futuros.

## 2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são apresentados os estudos existentes a respeito dos assuntos principais para o melhor entendimento deste trabalho, de forma a contextualizar o desenvolvimento da pesquisa. Serão apresentadas as características principais e o histórico do alumínio, assim como o cenário da utilização deste metal. Além de um breve resumo dos tipos de filtros utilizados para possibilitar a aplicação deste resíduo na forma de aterro compactado.

### 2.1. Alumínio

Segundo os dados fornecidos pela Associação Brasileira de Alumínio, a ABAL, o alumínio é um dos metais mais utilizados no mundo, possui uso crescente e supera o consumo mundial dos demais metais não ferrosos. O alumínio tem 50% da sua produção localizada em países que compõem o grupo dos BRICS (Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul), sendo que o Brasil ocupa o sexto lugar em produção de alumínio primário e é responsável por 5% da produção mundial, correspondente a 38 milhões de toneladas em 2007 (Brasil, 2010).

A matéria-prima para a produção do metal é a bauxita e, no país, sua extração se concentra, como no caso do ferro, nos estados de Minas Gerais e Pará (Neves e Silva, 2007). A produção bruta do minério duplicou entre 1996 e 2008, passando de 16,6 milhões de toneladas para 35,4 milhões de toneladas segundo os registros do Anuário Mineral Brasileiro (DNPM, 1997; 1998; 1999; 2000; 2001; 2002; 2003; 2004; 2005; 2006; 2007; 2008).

Esta tendência também se refletiu no aumento do consumo nacional per capita nos últimos 10 anos. Considerando um cenário conservador, acredita-se que o uso do metal dobre até 2030, passando de 5 kg por habitante, em 2007, para 10 kg (Quaresma, 2009a). Praticamente toda a bauxita produzida no país (98%) é

utilizada na fabricação de alumina, e o restante é destinado às indústrias de refratários e de produtos químicos.

## **2.2. Processo de Produção do Alumínio**

A produção de alumínio começa com a matéria-prima bauxita, uma rocha que geralmente é encontrada próxima à linha do Equador e que é lavrada a poucos metros abaixo do solo. A bauxita é transportada da mina para a usina, onde é lavada para eliminar a argila e britada, antes de ser transportada para o refino. A alumina, ou óxido de alumínio, é extraída da bauxita por meio de refinamento. A alumina é obtida a partir da dissolução da bauxita em uma solução aquecida de soda cáustica e cal. A solução de alumina é aquecida e filtrada e a alumina remanescente é seca até se transformar em um pó branco, a alumina pura (Norsk Hydro ASA, 2016).

De acordo com a Norsk Hydro ASA (2016) o processamento se inicia na fábrica de alumínio, onde a alumina refinada é transformada em alumínio. Para o processo de refinamento são necessárias três matérias-primas para se produzir o alumínio: óxido de alumínio, eletricidade e carbono. Numa cuba, a eletricidade circula entre um polo negativo (cátodo) e um polo positivo (ânodo), ambos feitos de carbono. O anodo reage com o oxigênio da alumina e forma gás carbônico (CO<sub>2</sub>). Deste processo resulta o alumínio líquido, que pode, então, ser retirado da cuba.

O alumínio líquido é fundido em lingotes de extrusão, lingotes de laminagem ou ligas de fundição, dependendo do uso que se vai dar ao alumínio, que pode ser transformado em diferentes produtos.

A técnica de extrusão oferece possibilidades quase ilimitadas de formato e uma ampla variedade de possibilidades de aplicação. No processo de extrusão, o lingote de alumínio é aquecido e forçado a fluir através de um molde, chamado matriz.

Como o alumínio é um metal muito flexível, na técnica de laminagem, uma folha semiacabada pode ser laminada de 60 cm até 2-6 mm e a folha de alumínio, como produto final, pode chegar a uma espessura de 0,006 mm - e ainda assim não permitir que a luz penetre ou que o sabor e o aroma escapem. Os lingotes de

laminagem são utilizados para a fabricação de produtos laminados semiacabados, tais como placas, tiras e folhas.

As ligas de alumínio primário para fundição são fundidas em diferentes formatos e a sua composição pode ser diferenciada, para melhor se adequar ao uso que terá. O metal é derretido novamente e transformado em produtos como aros de roda ou outras peças automotivas.

### **2.3. Bauxita**

A bauxita é um mineral heterogêneo, composto principalmente de óxidos de alumínio hidratados, e várias misturas de sílica, óxido de ferro, dióxido de titânio, silicato de alumínio e outras impurezas em quantidades menores. Os principais óxidos de alumínio achados em proporções variadas na bauxita são gibsite e os isômeros boemita e diásporo. A bauxita é classificada tipicamente de acordo com a sua aplicação comercial: abrasivos, cimento, produtos químicos, metalúrgicos e material refratário, entre outros. (Norsk Hydro ASA, 2016).

A maior parte da extração mundial de bauxita (aproximadamente 85%) é usada como matéria-prima para a fabricação de alumina, por lixiviação química, método conhecido como processo "Bayer". Subsequentemente, a maioria da alumina produzida deste processo de refinamento é, por sua vez, empregada como matéria-prima para a produção de alumínio metálico, pela redução eletrolítica da alumina em um banho de criolita natural ou sintética fundida ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) ou  $\text{AlF}_3$ , método este, conhecido como processo Hall-Héroult. A Bauxita é a matéria-prima mais usada na produção de alumina em escala comercial.

### **2.4. Processo de Refino da Bauxita**

A lama vermelha, resíduo da indústria de beneficiamento do alumínio, é gerada a partir do refino da bauxita para produção de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) através do processo Bayer. Em 1888, Karl Josef Bayer desenvolveu e patenteou o processo hoje internacionalmente conhecido como "Processo Bayer" (Hind et al., 1999).

O processo Bayer é utilizado para o refino da bauxita (denominada assim devido à primeira mineração comercial ter corrido no distrito de Les Baux,

França) na produção de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). O processo Bayer representa um marco na história da metalurgia, sendo considerado, ao lado do processo de cianetação para tratamento de ouro e prata, o marco do nascimento da hidrometalurgia moderna (Habashi, 2005).

Anteriormente ao surgimento do processo Bayer, o beneficiamento da bauxita era realizado através do processo Le Chatelier, desenvolvido cerca de 30 anos antes por Louis Le Chatelier. Esse método consiste no aquecimento da bauxita com  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  a  $1200^\circ\text{C}$ , remoção dos aluminatos formados com água, precipitação do  $\text{Al}(\text{OH})_3$  através da ação do  $\text{CO}_2$  e, finalmente, o  $\text{Al}(\text{OH})_3$  formado é filtrado, seco e limpo.

O processo Le Chatelier foi substituído pelo processo Bayer, devido à drástica redução no custo de produção da  $\text{Al}_2\text{O}_3$  que este proporcionou. O processo Bayer é utilizado até hoje praticamente sem mudanças significativas, somente com a substituição do  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  pelo  $\text{NaOH}$  e pela utilização de pressão durante a digestão (Hind et al., 1999).

A literatura diverge quanto aos estágios que compõem o processo Bayer. Alguns autores preferem colocar a digestão e a clarificação em um único estágio, outros acrescentam uma etapa de classificação (Hind et al., 1999; Tan & Khoo, 2005; WAO, 2003). O processo Bayer foi originalmente desenvolvido para atender uma demanda da indústria têxtil, que utiliza o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  como fixador para o tingimento do algodão. Porém somente com a sua associação ao processo eletrolítico de obtenção do alumínio metálico, processo Hall-Heroult (1886), ganhou importância na metalurgia.

Entretanto, desconsiderando as peculiaridades de cada planta, a produção de alumina através do processo Bayer pode ser esquematicamente apresentada conforme a Figura 2-1, cujos estágios são detalhados a seguir:

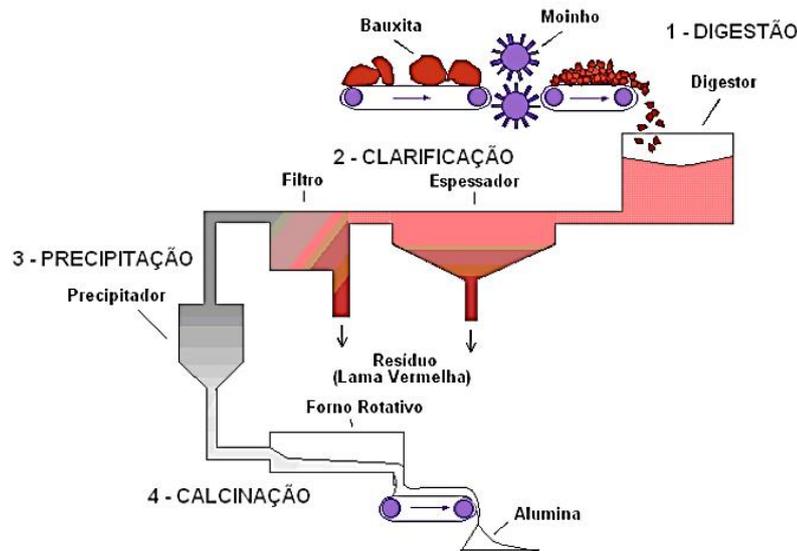


Figura 2-1: Fluxograma e Esquema do Processo Bayer (Adaptado de WAO, 2003).

As principais técnicas adotadas para o deságue da lama vermelha serão descritas mais adiante.

## 2.5. Lama Vermelha: Produção, Disposição e Aplicações Alternativas.

A lama vermelha (*red mud*) é a denominação genérica para o resíduo insolúvel gerado durante a etapa de clarificação do processo Bayer, sendo normalmente disposta em lagoas projetadas especialmente para este fim, conforme ilustrado na Figura 2-2.



Figura 2-2: Lagoa de disposição de lama vermelha da -Ilha de São Luís – Maranhão (Fonte: Alumar – 2001).

### **2.5.1. Composição Química**

A composição química da lama vermelha varia extensamente e depende da natureza da bauxita e da técnica empregada no processo Bayer em cada planta industrial. Normalmente, a lama vermelha retém todo o ferro, titânio e sílica presentes na bauxita, além do alumínio que não foi extraído durante o refino, combinado com o sódio sob a forma de um silicato hidratado de alumínio e sódio de natureza zeolítica (Reese & Cundiff, 1955; McConchie et al., 2002).

### **2.5.2. Produção Mundial**

A qualidade da jazida de bauxita utilizada influencia diretamente na quantidade de lama vermelha gerada, bem como o teor de sólidos com que esta é lançada, que está diretamente ligado ao tipo de disposição adotada. Métodos conhecidos como disposição seca produzem uma menor quantidade de lama vermelha que os de disposição úmida. Levando-se em consideração estes parâmetros, pode-se afirmar que não existe uma proporção exata entre a quantidade de alumina produzida e a quantidade de lama vermelha gerada.

Esta questão acaba se refletindo na falta de consenso na literatura sobre a quantidade de lama vermelha gerada anualmente no mundo. O fato é que a quantidade de lama vermelha gerada anualmente é gigantesca e que um resíduo gerado na ordem de milhões de toneladas representa um sério problema ambiental.

No Brasil, dados publicados sobre a geração de lama vermelha são praticamente inexistentes. Apesar de o país ser o terceiro maior produtor mundial e contar com grandes empresas atuando na produção de alumina, como: o Consórcio de Alumínio do Maranhão (Alumar), localizada em São Luís (MA), com capacidade anual de produção de 1,325 milhões de toneladas; a Alumina do norte do Brasil S/A (Alunorte), localizada em Barcarena (PA), com capacidade anual de produção de 4,4 milhões de toneladas, sendo a maior produtora mundial de alumina; a Companhia Brasileira do Alumínio (CBA), na região de Sorocaba (SP), com capacidade anual de produção de 500 mil toneladas; a Alcoa, com unidades localizadas em Saramenha (MG) e Poços de Caldas (MG), com 140 mil

toneladas e 300 mil toneladas de produção anual, respectivamente (Bermann, 2002; Minérios, 2006).

A estimativa feita a partir da capacidade nominal atualmente instalada, apesar de ter um caráter meramente ilustrativo, alerta para a dimensão do problema ambiental que a lama vermelha representa para o Brasil.

### **2.5.3. Toxicidade da Lama Vermelha**

A literatura apresenta controvérsia quanto à toxicidade da lama vermelha. A lama vermelha não é particularmente tóxica (Nunn, 1998), inclusive a Environmental Protection Agency (EPA) não classifica a lama vermelha como um rejeito perigoso (EPA, 2005). Entretanto, Hind et al. (1999), consideram-na tóxica, na medida em que podem constituir um perigo para as populações vizinhas, devido à presença de elevados valores de cálcio e hidróxido de sódio, composto químico esse altamente corrosivo. Outros relatos encontrados na literatura apontam para os riscos ao meio ambiente associados a lama vermelha, em função de sua elevada alcalinidade e capacidade de troca iônica (Li, 2001; Collazo et al., 2005).

Diante do exposto, pode-se considerar que a lama vermelha representa um passivo ambiental importante para a indústria de beneficiamento de alumínio, devido aos riscos de contaminação do meio ambiente e aos custos associados ao seu manejo e disposição, os quais representam uma grande parte dos custos de produção da alumina. Como constatação, a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, cita entre as atividades industriais mais poluentes a indústria de metais não-ferrosos e dentre estes, a do alumínio (Donaire, 1995).

### **2.5.4. Métodos de Disposição Final da Lama Vermelha**

A lama vermelha faz parte de um grupo de rejeitos conhecidos como “tailings”, resultantes do processamento de minérios pela indústria extrativista mineral. Estes resíduos são solos que continham o mineral de interesse ou resultam da moagem de rochas. Dependendo do processo de extração, podem ser

adicionadas substâncias químicas como, por exemplo, a soda cáustica empregada no refino da alumina. Os “tailings” caracterizam-se por serem lamas formadas por partículas muito finas (Fahey et al., 2002; Vick, 1983).

#### **2.5.4.1. Métodos úmidos**

Os métodos convencionais de disposição de lamas, ou métodos úmidos, são assim denominados devido à grande quantidade de água de processo que segue com o material sólido para disposição. Os métodos úmidos aplicáveis à lama vermelha consistem em grandes diques onde a lama vermelha é disposta com baixo teor de sólidos. A separação de fases ocorre no local de disposição, onde o material sólido sedimenta e surge um sobrenadante alcalino. A operação é simples e barata, consistindo na sedimentação natural da fase sólida e na recirculação do sobrenadante para a fábrica. Porém o potencial de impacto sobre o meio ambiente é alto. A área de disposição final necessária é grande, 100 a 200 acres em média. Os custos associados são altos, devido à necessidade de impermeabilização da área antes da disposição, feita normalmente através de membranas plásticas ou da aplicação de camada de material impermeável, devido aos riscos de contaminação do solo e do lençol freático, entre outros componentes. A vida útil da área de disposição é curta, normalmente entre 4 a 7 anos, e a reabilitação da área é um processo lento (Kirkpatrick, 1996; Nguyen e Boger, 1998; Jamaican Bauxite Case, 2006). Os riscos com relação ao rompimento dos diques também estão presentes e representam um motivo de preocupação para a população vizinha (Hind et al., 1999; Fahey et al., 2002, Sofrá e Boger, 2002; Li, 2004).

#### **2.5.4.2. Métodos secos ou semi-secos**

Modernamente os métodos conhecidos como métodos secos ou semi-secos de disposição tendem a serem aplicados com mais frequência. Estes métodos surgiram a partir dos avanços ocorridos nas técnicas de deságue dos “tailings”. Os métodos secos de disposição apresentam as seguintes vantagens sobre os métodos úmidos: melhor manuseio, maior segurança, geração de um menor volume de lama, menor área ocupada e reabilitação mais fácil da área (Nguyen e Boger,

1998; Hind et al., 1999; Sofrá e Boger, 2002; Fourie, 2002; Agrawal et al., 2004). Nestes métodos a lama é disposta com um teor de sólido mais elevado, resultando em uma textura pastosa.

- Método “dry-stacking”

Dentre os métodos de disposição a seco, o mais comumente aplicado à lama vermelha é o “dry-stacking”. Este método consiste na disposição progressiva da lama vermelha. A área de disposição é dividida em leitos de secagem, onde a lama vermelha é descarregada até atingir uma determinada altura, passando-se a seguir para o leito de secagem livre e assim por diante. Quando todos os leitos de secagem estiverem ocupados repete-se o ciclo, depositando uma nova camada de lama vermelha no leito de secagem inicial. O “dry-stacking” permite a diminuição da umidade através da evaporação e da drenagem (Sofrá e Boger, 2002; Nunn 1998).

- Método secagem solar

Uma variante do “dry-stacking” é a secagem solar. Essa técnica é particularmente aplicável para áreas onde a taxa de evaporação é elevada. A secagem solar utiliza leitos de secagem com baixa profundidade (100 mm) para facilitar a evaporação (Nunn, 1998).

- Método “Thickened tailing disposal”

Outro método utilizado é a disposição de “tailing” espessado (*Thickened tailing disposal*). Neste método a lama vermelha é disposta no ponto central da área de disposição, formando um monte cônico. A geometria cônica elimina a necessidade de barragens ou diques, há um aumento na estabilidade do depósito, facilitando a reintegração da área ao meio ambiente (Sofrá e Boger, 2002; Nguyen e Boger, 1998).

- Transporte da lama vermelha por bombeamento

Normalmente “tailings”, como a lama vermelha, são transportados através de bombeamento. Em várias plantas industriais é comum o bombeamento da lama vermelha por distâncias de 3 a 6 km até os locais de disposição (Oeberg e

Steinlechner, 1996; Purnell, 2004). Suspensões de material mineral com elevada concentração, como a lama vermelha, são geralmente fluidos não-newtonianos (Sofra e Boger, 2002). Estudos reológicos revelaram que a lama vermelha é fortemente tixotrópica e pseudoplástica (Sofra e Boger, 2002; Nguyen e Boger, 1998). Portanto, dois fatores que devem ser levados em consideração durante o deságue da lama vermelha são a viscosidade da lama vermelha e a distância a ser vencida. Para “tailings” altamente espessados é preferível a utilização de tratores e vagões no transporte.

- Método “off-shore disposal”

O método de disposição conhecido como “off-shore disposal” consiste no lançamento da lama vermelha em um corpo hídrico receptor, rio ou oceano. Este tipo de disposição final foi praticamente abandonado. Das 84 plantas de beneficiamento de alumina existentes no mundo, somente 7 ainda utilizam este tipo de disposição devido à escassez de área para disposição final, persistindo em países como Japão e Itália (Vick, 1983; Agrawal et al., 2004, Hyun et al., 2005).

### **2.5.5. Deságue da Lama Vermelha**

A principal função do deságue é recuperar parte do NaOH presente na lama vermelha. O deságue também possibilita a redução da quantidade de material encaminhado para descarte.

Segundo Nunn (1998), a utilização de espessadores foi o primeiro processo de deságue aplicado à lama vermelha. Os espessadores foram amplamente aplicados durante as décadas de 1950 e 1960 e ainda hoje são utilizados. A eficiência dos espessadores na concentração de sólidos é de 20 a 30%. Subsequentemente, a utilização de filtros rotatórios a vácuo prevaleceu como etapa final do deságue antes da disposição final. A eficiência destes filtros é função da filtrabilidade da lama vermelha produzida na refinaria, alcançando valores entre 40 e 50% de teor de sólidos.

Mais recentemente foram desenvolvidos os espessadores de alta performance. Essa tecnologia envolve a adição de flocculantes, alcançando taxas de concentração de sólidos mais elevadas e apresentando eficiência ente 28 e

55%. Outra tecnologia que apresenta boas perspectivas de aplicação no deságue da lama vermelha são os filtros hiperbáricos, que alcançaram em testes, em escala piloto, taxas de 70 a 80 % de teor de sólidos (Nunn, 1998). Apesar das boas indicações, a literatura não registra aplicações de filtros hiperbáricos em escala real, possivelmente devido a dificuldades operacionais.

Nunn (1998) analisou os fatores econômicos mais importantes relacionados às tecnologias de deságue descritas e observou que a eficiência na recuperação de NaOH é diretamente proporcional ao consumo de energia. É importante ressaltar que o custo da energia é um atributo da localidade onde se encontra instalada a indústria, envolvendo questões que vão além do custo da energia propriamente dita. Foi também observado que os filtros hiperbáricos apresentam menor perda de NaOH e menor custo operacional e, por outro lado, que os espessadores de alta performance utilizam menos mão-de-obra e têm menor custo de capital. Por fim, é válido salientar que, além dos fatores econômicos diretos, outros fatores como manutenção da boa imagem da empresa, bem como, o afastamento de riscos de multas pelos órgãos ambientais podem influenciar na escolha da tecnologia a ser adotada.

#### **2.5.6. Problemas Decorrentes da Disposição da Lama Vermelha**

Como a maioria dos rejeitos, no passado a lama vermelha era simplesmente descartada em algum corpo hídrico receptor, como mares e rios (Kirkpatrick, 1996; Wills, 1997). A disposição não adequada da lama vermelha pode acarretar em problemas como: i) Contaminação da água de superfície e subterrânea por NaOH, ferro, alumínio ou outro agente químico; ii) Contato direto com animais, plantas e seres humanos; iii) O vento pode carrear pó dos depósitos de lama vermelha seca, formando nuvens de poeira alcalina; iv) Impacto visual sobre uma extensa área. Alguns casos de acidentes ambientais provocados pela disposição inadequada da lama vermelha em vários países são relatados na literatura. Problemas relacionados com o encerramento das atividades sem a adequada proteção do meio ambiente também são reportados.

Na antiga Iugoslávia, Salopek e Strazisar (1992) relatam que durante o funcionamento das instalações em Kidricevo, onde se utilizava barragens como

meio de disposição, formando lagoas de lama vermelha, foram registradas concentrações de  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nas águas residuárias, além de poluição sistemática das águas subterrâneas com variação de pH entre 11,5 e 8 e condutividade elétrica a distâncias de até 2 km das lagoas. Ocorrências semelhantes foram observadas em outras localidades, como Podgorica, e Mostar, inclusive com a contaminação do aquífero que abastecia a população local. Nas instalações de Obrovac, a água residuária com a ajuda dos fortes ventos da região, principalmente no inverno e primavera, forma gotículas que se espalham por quilômetros, formando uma chuva caustica, que atinge não somente partes da fábrica, como instalações vizinhas. Houve ressecamento total da vegetação em uma área de 500 m<sup>2</sup> em redor da lagoa e comprometimento parcial por vários quilômetros. Após o encerramento das atividades das instalações de Mostar houve ressecamento da lagoa de disposição o que causou o carreamento das partículas finas e formando nuvens de poeira, gerando problemas especialmente para os fazendeiros vizinhos.

Na Hungria, o rompimento de um reservatório de lama vermelha da usina Ajkai Timfoldgyar Zrt, pertencente a empresa MAL Zrt, acarretou no vazamento de aproximadamente 700 mil m<sup>3</sup> do resíduo. A lama vermelha, que se espalhou por uma vasta área, atingiu a cidade de Kolontar e outras duas cidades, além do rio Danúbio – um dos cursos d'água mais importantes da Europa – matando todos os nutrientes e organismos vivos necessários à qualidade do solo. Foi decretado estado de emergência nos três condados atingidos e a estimativa é que aproximadamente 2 mil acres de terra vegetal terão que ser substituídos para atendimento a produção agrícola nas áreas atingidas pelo desastre.

No Brasil, em 2003, houve no município de Barcarena (PA) um vazamento de lama vermelha, atingindo as nascentes do rio Murucupi. Da nascente a foz do rio houve mudança na tonalidade das águas, com o aumento nos teores de alumínio e sódio e possível contaminação do aquífero (De Jesus et al., 2004). Em São Paulo (SP) ocorreu um vazamento, em 2004, de cerca de 900.000 litros de lama vermelha, atingindo o córrego do Bugre, rio Varzão e Pirajibu, na bacia do Rio Sorocaba. Como consequência, houve alteração da qualidade das águas tornando-as impróprias (ofensivas à saúde), além de provocar danos à fauna (mortalidade de peixes) e à vegetação (CETESB, 2004; Rondon, 2004). Em janeiro de 2007 o rompimento de um dique pertencente a mineradora Rio Pomba

Cataguases ocasionou o vazamento de aproximadamente 2 milhões de m<sup>3</sup> de lama vermelha que atingiu o rio Muriaé, provocando danos ambientais em cidades mineiras, como Mirai e Muriaé, e também do Rio de Janeiro, como Laje do Muriaé, Italva e Cardoso Moreira, deixando grande número de famílias desabrigadas, com dois bilhões de litros de resíduo contaminados de bauxita.

Na Jamaica, a não utilização de técnicas adequadas de disposição da lama vermelha resultou na contaminação de aproximadamente 200 milhões de m<sup>3</sup> de águas subterrâneas (Fernandez, 2005). Também ocorreu a contaminação de águas superficiais, a disposição de lama vermelha em lagoas na localidade de Mont Diablo acarretou na contaminação das águas do lago Moneague, as quais se tornaram impróprias, devido ao elevado pH. Este tipo de impacto afeta o turismo, outra atividade econômica muito importante da ilha (Jamaican Tourism Impacts, 2006). A população da Jamaica apresenta uma pré-disposição genética para a hipertensão, a qual pode ser agravada pelos altos níveis de sódio devido à contaminação da água subterrânea (Jamaican Bauxite Case, 2006).

### **2.5.7. Aplicações Alternativas para a Lama Vermelha**

Durante muito tempo a lama vermelha foi considerada um resíduo inaproveitável para a indústria do alumínio (Chaves, 1962). Entretanto, os custos econômicos e os riscos ambientais associados à disposição da lama vermelha têm motivado companhias e pesquisadores na busca por alternativas ambientalmente mais seguras, que possibilitem a redução do volume de resíduo encaminhado para a disposição final.

Pesquisas têm sido desenvolvidas visando à recuperação de ferro, titânio e outros metais. Porém, até o momento, nenhum processo apresentado na literatura se mostrou economicamente viável (Pradhan et al., 1996; Slavo et al., 2000a; Hind et al., 1999; Piga et al., 1995; Marabini et al., 1998).

As aplicações para a construção civil são variadas. A Kaiser Aluminium & Chemical Company utilizou a lama vermelha como material para recobrimento de aterros e pavimentação (Kirkpatrick, 1996). A utilização da lama vermelha como insumo para produção de cimentos especiais, também foi pesquisada, mas esta

aplicação encontra problemas devido à alcalinidade da lama vermelha (Shimano e Koga, 1979; Singh et al., 1997; Tsakiridis et al., 2004; Pan et al., 2003).

A lama vermelha também encontra aplicações na indústria cerâmica (Slavo et al., 2000a; Slavo et al., 2000b). Yalçın e Sevinç (2000) propuseram a produção de revestimentos cerâmicos (porcelanas, vítricos e eletroporcelanas) usando a lama vermelha. Outros pesquisadores propõem a utilização da lama vermelha na confecção de tijolos, telhas, isolantes, etc. (Nakamura et al., 1969; Kara, 2005; Singh & Garg, 2005).

Outras aplicações para a lama vermelha estão no tratamento de superfícies: proteção do aço contra corrosão (Collazo et al., 2005; Díaz et al., 2004) e na melhoria das características termoplásticas de polímeros (Park e Jun, 2005).

Na agricultura é utilizada como corretivo para solos ácidos, enriquecimento de solos pobres em ferro (Hind et al., 1999), no aumento da retenção de fósforo pelo solo (Summers et al., 2002) e na imobilização de metais pesados em solos contaminados (Ciccu et al., 2003; Lombi et al., 2002).

No campo do meio ambiente a lama vermelha é bastante utilizada principalmente na remediação de áreas contaminadas e no tratamento de efluentes líquidos, tendo sido utilizada com sucesso no tratamento de águas ácidas de minas (Fahey et al., 2002; Doye e Duchesne, 2003), assim como na remediação de solos contaminados por metais pesados, fósforo e nitrogênio (Santora et al., 2006; Phillips, 1998).

Na indústria química, as utilizações da lama vermelha tem se baseado em sua ação como catalisador em várias aplicações como a remoção de enxofre em querosene (Singh et al., 1993), hidrogenação do antraceno (Alvarez et al., 1999; Llano et al., 1994), degradação de compostos orgânicos voláteis (COV) (Halász et al., 2005), degradação de cloreto de polivinila (PVC) em óleos combustíveis (Yanik et al., 2001), degradação de organoclorados (Ordóñez et al., 2002). As propriedades de adsorção da lama vermelha são aproveitadas no tratamento de efluentes, sendo neste caso, necessário ativa-la. Sua ativação pode ser feita. Sua ativação pode ser feita através de tratamento térmico por calcinação em temperaturas próximas a 400 °C, o que resulta em um aumento de 3 a 4 vezes em sua área superficial (Sujana et al., 1996). Essa temperatura é relativamente baixa quando comparada à necessária para a ativação (esfoliação) de outros materiais como, por exemplo, a vermiculita, que sofre expansão somente na faixa de 800 a

1000 °C (França et al., 2002). A lama vermelha também pode ser ativada através de tratamento químico com ácidos (Alvarez et al., 1999; Apak et al., 1998b) ou com águas ricas em íons de  $Mg^{2+}$ , como a água do mar ou águas de salinas (Brunori et al., 2005).

A lama vermelha tem sido aplicada em processos de adsorção para vários tipos de adsorbatos, em efluentes sintéticos e reais, como metais pesados Cu(II), Pb(II), Cd (II), Cr(V) e ânions como fósforo ( $PO_4^{3-}$ ) e arsênico (As) e pigmentos têxteis (Genç et al., 2003; Genç-Fuhrman et al., 2005; Genç-Fuhrman et al., 2004; Apak et al., 1998a; Apak et al., 1998b; Gupta et al., 2001; Silva Filho et al., 2005; Wang et al., 2005; Altundogan et al., 2002; Çengeloglu et al., 2002; Komnitas et al., 2004; Brunori et al., 2005; Akay et al.; 1998; Koumanova et al., 1997; Namasivayam e Arasi, 1997) No tratamento de esgotos domésticos, tanto para a remoção de fósforo e formas de nitrogênio ( $NH_4^-$  e  $NO_3^-$ ) como para a remoção de vírus e bactérias (Lopez et al., 1997; Ho et al., 1991). De Souza (2000) e De Souza et al. (2001) utilizaram a lama vermelha para a adsorção e clarificação de chorume, obtendo uma redução na carga orgânica de 56,67 % e 60 % de remoção de cor.

Alguns produtos desenvolvidos a partir da lama vermelha para o tratamento de matrizes ambientais receberam denominação comercial e alguns foram patenteados. A Kaiser Aluminium & Chemical Company desenvolveu um adsorvente denominado de Cajunite® (Kirkpatrick, 1996). A Virotec International Ltd. (Austrália) desenvolveu um processo em que se obtém um adsorvente a partir da lama vermelha neutralizada com água do mar, que patenteou como Basecon® e o produto obtido como Bauxsol (Brunori et al., 2005; McConchie et al., 2002). A Alcoa conjuntamente com o Departamento de Agricultura do Oeste da Austrália desenvolveram o Alkaloam®, para uso agrícola (Summers et al., 2002).

## **2.5.8.**

### **Propostas de Aplicações para a Lama Vermelha no Brasil**

As linhas de pesquisa desenvolvidas na UFPE (Universidade Federal de Pernambuco) envolvem principalmente o Departamento de Engenharia Química e o Departamento de Engenharia Civil, estão centradas em uma visão holística da

problemática ambiental, buscando através da valoração ambiental da lama vermelha, alternativas técnica e economicamente viáveis para a indústria brasileira e em especial para o setor produtivo pernambucano. Dentre os projetos, destacam-se:

- Tratamento de efluentes oleosos: Tem por objetivo desenvolver um processo de tratamento, em nível de polimento de efluentes oleosos, tais como águas de produção e efluentes de laminação, através de adsorção em lama vermelha. Objetivo final desta linha de pesquisa é desenvolver um reator para a adsorção de hidrocarbonetos, metais pesados e outros elementos indesejáveis, tais como o enxofre, em um leito de lama vermelha.

- Tratamento de efluentes têxteis: Estuda o desenvolvimento de um reator para a remoção de corantes presentes em efluentes de indústrias têxteis. Estudos realizados até o momento apresentaram uma remoção de 70 % em média do corante Remazol Black B (Silva Filho et al., 2005).

- Processos de oxidação avançada, reagente Fenton e catalise heterogênea: Pretende investigar as possibilidades de utilização da lama vermelha em processos oxidativos avançados (POAs), como fonte de íons de ferro e de  $TiO_2$ . Esses processos de tratamento são considerados como métodos promissores para a remediação de solos e águas residuárias contendo poluentes orgânicos não-biodegradáveis (Rodriguez, 2003).

Resultados iniciais obtidos na remoção do corante Remazol Black B, em média 97%, demonstram ser promissora a utilização da lama vermelha como fonte de íons de ferro para o reagente Fenton (Silva Filho et al., 2006).

## **2.6. Rejeitos/ Resíduos filtrados**

A filtragem pode ser definida 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 (Guimarães, 2011). Uma operação típica de filtragem está representada Figura 2-3.

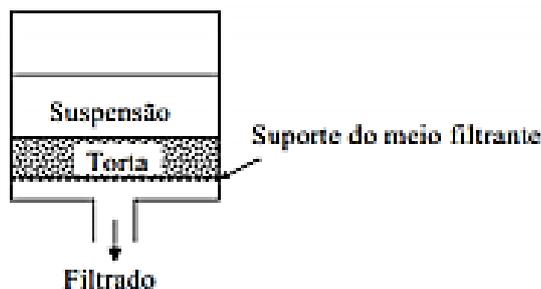


Figura 2-3 – Princípio de filtragem (Fonte: UFOP, 2004 – Espessamento e Filtragem)

Os rejeitos filtrados podem ser filtrados a úmido, denominados de “wet cake” ou filtrados a seco “dry cake”. O rejeito filtrado a úmido apresenta grau de saturação próxima de 100%. O rejeito filtrado a seco apresenta de 70 a 85% de grau de saturação (Davies, 2011). Para que ocorra a filtragem é necessária a existência de uma força incidente sobre as partículas através de um meio poroso e pode ser conseguida através de: gravidade, vácuo, pressão ou centrifugação, conforme mostrado na Figura 2-4

TIPOS	CARACTERÍSTICAS	MODELOS DE FILTROS	PRINCIPAIS FORNECEDORES
FILTRAGEM 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, Ft. SMIDTH, LAROX, DELKOR, GAUDFRIN
FILTRAGEM SOB PRESSÃO	UMA PRESSÃO POSITIVA É APLICADA NA POLPA	FILTRO PRENSA HORIZONTAL, FILTRO PRENSA VERTICAL	ANDRITZ, Ft. SMIDT H(PNEUMAPRESS), LAROX
FILTRAGEM CENTRÍFUGA	UTILIZA A FORÇA CENTRIFUGA PARA FORÇAR A PASSAGEM DO LÍQUIDO	CENTRÍFUGAS VERTICAIS E DECANTERS	ANDRITZ, GEA (WESTFALIA), ALFA LAVAL
FILTRAGEM HIPERBÁSICA	EM QUE SE COMBINAM VÁCUO E PRESSÃO	FILTRO DE DISCO ENCAPSULADO OU HIPERBÁSCO	ANDRITZ, BOKELA, GAUDFRIN
FILTRAGEM CAPILAR	UTILIZA A AÇÃO DE CAPILARES DE MEIOS CERÂMICOS POROSOS PARA EFETUAR O DESAGUAMENTO	CERAMEC	LAROX

Figura 2-4 – Mecanismos de filtragem e os principais fornecedores (Adaptado de Guimarães, 2011)

A filtragem de rejeitos é uma prática usual nas minerações do deserto de Atacama, na região norte do Chile, para reduzir as perdas de água devido à sua escassez na região (Guimarães, 2011).

Apesar da disposição de rejeito filtrado apresentar custo elevado associado à planta de desaguamento e ao transporte e disposição final, deve-se ter em mente a amortização destes custos na fase de desativação do empreendimento devido à facilidade de recuperação dessas áreas. A Figura 2-5 apresenta um resumo das principais unidades de rejeito filtrado existentes no mundo.

Mina	Localização	Tipo de Minério	Produção (em toneladas por dia)
Alcoa	Austrália	Alumina	35.500
Chingola	Zâmbia	Cobre	24.000
La Coipa	Chile	Ouro e prata	16.000
Mantos de Oro	Chile	Ouro e prata	15.000
Vaal Reef	África do Sul	Ouro e urânio	10.000
Randfontein Estates	África do Sul	Ouro e urânio	10.000
Lihir Island	Nova Guiné	Ouro	7.500
El Sauzal	México	Prata e ouro	5.300
Gecamines	Zaire	Cobre	5.000
Nabalco	Austrália	Alumina	5.000
Mantos Blanco	Chile	Cobre	4.000
Alamo Dorado	México	Prata e ouro	3.500
Pogo	Estados Unidos	Ouro	2.500
Raglan	Canadá	Zinco	2.000
Greens Creek	Estados Unidos	Ouro, prata e zinco	1.500
Eskay Creek	Canadá	Cobre	300
Nixon Fork	Estados Unidos	Ouro	150

Figura 2-5 – Resumo das principais unidades de rejeito filtrado do mundo (adaptado de Ulrich e Coffin, 2013 – publicado no Paste 2013)

## 2.7. Filtros Sob Pressão

A filtragem sob pressão é caracterizada pela aplicação de uma pressão positiva (e não o vácuo) na polpa e por possuir um ciclo descontínuo, isto é, sua operação é conduzida em batelada. Uma das principais vantagens da filtragem sob

pressão é a produção de tortas com menor taxa de umidade, em comparação com outras tecnologias de filtragem (Guimarães, 2011).

De acordo com o tipo de placas que possuem os filtros sob pressão podem ser classificados como horizontais ou verticais como mostra a Figura 2-6 a seguir.

Filtros sob pressão	Filtro prensa horizontal	Placas verticais tipo câmara
		Placas verticais tipo diafragma
	Filtro prensa vertical	Placas horizontais

Figura 2-6 – Tipos de filtros sob pressão

### **Filtro prensa horizontal (Filtro prensa de placas verticais)**

A Figura 2-7 apresenta um filtro prensa de placas verticais, denominado também de filtro prensa horizontal. Ele é constituído de um número muito grande de placas. Cada placa possui um recesso nos dois lados, que juntamente com a placa vizinha forma uma câmara. Estas placas são revestidas pelo meio filtrante.

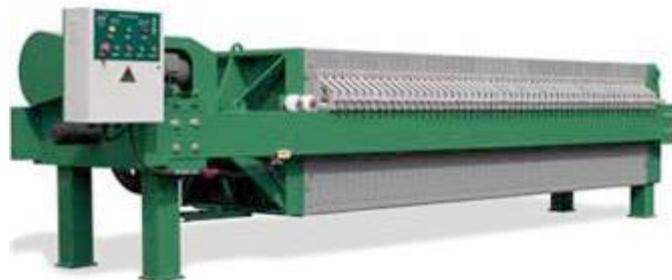


Figura 2-7 – Filtro prensa de placas verticais – 1000 mm x 1000 mm e tortas com espessura de 30 mm. (Fonte: <http://www.grabe.com.br/filtroprensa>)

Os filtros prensas horizontais possuem basicamente o mesmo princípio de funcionamento, diferenciando-se de acordo com as características de cada fabricante. Podem ser construídos com dispositivos auxiliares para permitir total automação, requerendo mínima intervenção do operador. É uma tecnologia apropriada para filtragem de lamas (Guimarães, 2011).

Vantagens do filtro prensa: Os fabricantes destacam as vantagens do filtro prensa (Fonte: [www.meiofiltrante.com.br](http://www.meiofiltrante.com.br)):

- O particulado é removido em forma de tortas compactas e consistentes, o que facilita o manuseio e transporte;
- As altas pressões de filtração compactam o material retido, reduzindo

consideravelmente o volume final, o que proporciona grande economia tanto na armazenagem quanto no transporte e no descarte do material, principalmente em se tratando de materiais não reaproveitáveis (efluentes industriais, entre outros); • Com seu princípio de funcionamento, é um dos processos de filtração que permite a maior desidratação do material retido, gerando tortas com concentração de até 70% de sólidos, aproximadamente; • O filtrado é extraído com baixo índice de impurezas, podendo ser inclusive reaproveitado em alguns casos; • Seu manuseio é relativamente simples, dispensando a necessidade de mão-de-obra especializada; • Diminuição sensível no consumo de energia, ar comprimido e produtos químicos; • Menor custo de transporte e armazenagem; • O equipamento normalmente apresenta grande robustez construtiva, baixo índice de manutenção e longa vida útil, fazendo com que o custo operacional e o de manutenção sejam baixos.

Desvantagens do filtro prensa: Messano (2010) cita as desvantagens do filtro prensa: • A filtração deve ser interrompida, quando os quadros estiverem cheios de torta; • O custo de mão de obra de operação, montagem e desmontagem é elevado; • A lavagem da torta, além de ser imperfeita, pode durar várias horas e será tanto mais demorada quanto mais densa for a torta.

### **2.7.1. Condicionantes dos Sistemas de Disposição de Rejeitos / Resíduos Filtrados**

Segundo Lara et al (2013), a adoção de uma estrutura de rejeito filtrado deve levar em conta os custos de operação e fechamento, além dos custos de eventuais estruturas anexas: dique de contenção de sedimentos, barragens para armazenamento de água, dentre outras. Essa instalação deve ainda ser sustentável e ambientalmente amigável, com uma operação simples e flexível, apta a aceitar mudanças na filosofia de operação da mina.

Os subitens a seguir apresentam os principais aspectos que devem ser considerados para o desenvolvimento do projeto e durante a construção da estrutura de contenção, assim como as principais vantagens e desvantagens dessa tecnologia.

### 2.7.1.1. Vantagens e Desvantagens da Tecnologia de Filtragem de Rejeitos/Resíduos

Segundo Nery (2013), o método de disposição de resíduos filtrados tem como principais vantagens:

- Maior estabilidade da pilha;
- Alta densidade do resíduo disposto, ou seja, maior quantidade de sólidos por unidade de volume, aumentando a capacidade do depósito;
- Maior recuperação de água do processo;
- Menor potencial de risco;
- Melhores condições para fechamento (menor custo e menor período de monitoramento).

Davies e Rice (2001) também consideram que as instalações de rejeito filtrado são mais fáceis de fechar e reabilitar. Requerem um espaço menor em comparação com outras opções de armazenamento de rejeitos de superfície, podem ser utilizados em ambientes agressivos (por exemplo, terreno ondulado e íngremes) e gerar melhor aceitabilidade pública do armazenamento dos rejeitos, conforme apresentado na Figura 2-8.



Figura 2-8 – Empilhamento a seco de rejeitos usando o transporte de caminhão. (Fonte: <http://www.tailings.info>)

Lupo e Hall (2010) listam as desvantagens da tecnologia de filtragem de rejeitos:

- Custo elevado de aquisição dos filtros;

- Custos operacionais e de manutenção dos filtros também elevados;
- O rejeito filtrado deve ser transportado até o local de descarte;
- O rejeito após filtragem deve ser compactado para a construção de geometrias empilháveis.

Nery (2013) ressalta que, um dos maiores desafios para a disposição do resíduo seco deve-se às variações das condições climáticas, como, por exemplo, períodos de chuvas intensas durante o ano, que podem causar impactos na obtenção da compactação desejada para o rejeito. 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.

Outra preocupação com relação à aplicação deste método de disposição é com a geração de poeira (emissão de particulados) durante a operação, principalmente em ambientes áridos. O fechamento progressivo é uma solução viável para este problema.

## **2.8. Solos Compactados**

Após a filtragem pelo filtro prensa, as tortas de resíduo formadas, com alta densidade, são descarregadas das câmeras filtrantes e, ao caírem, se quebram em pedaços, formando uma pilha de material solto, de baixo peso específico, da ordem de 13 a 15 kN/m<sup>3</sup>. Para se conseguir uma maior densidade na disposição deste material, de forma a ocupar menores volumes, bem como ter uma maior resistência da pilha, deve-se promover a compactação do resíduo, como em uma obra de terraplenagem. Sendo assim, é importante conhecer o comportamento geotécnico deste resíduo quando compactado.

O fenômeno da compactação de um solo consiste, basicamente, na redução de seu índice de vazios, obtida pela ação de uma força mecânica. É comum associar esta redução à ocorrência de variação na fase gasosa do solo (Crispim, 2007). A compactação visa aumentar o contato entre os grãos e tornar o aterro

mais homogêneo, buscando a melhoria das características do solo, como o aumento da resistência ao cisalhamento, redução da deformabilidade e da permeabilidade. Para tanto, é necessário especificar qual é a redução do índice de vazios necessária para cada caso e definir a melhor maneira de obtê-la no campo.

A compactação se dá pela expulsão do ar dos vazios do solo, mantendo-se constante as quantidades de partículas e de água no solo. Como já é bem sabido, quando se compacta o solo com baixa umidade, o atrito entre as partículas é muito alto e se torna difícil conseguir uma redução significativa dos vazios. No caso de umidades um pouco mais elevadas, a água provoca certo efeito de lubrificação entre as partículas do solo, fazendo-as deslizar entre si, acomodando-se em um arranjo mais compacto. Para umidades mais elevadas, a compactação passa a ser mais difícil, pois o grau de saturação já é mais elevado, estando o ar ocluso, dificultando sua expulsão. Existe, portanto, para uma determinada energia de compactação aplicada, um teor de umidade denominado umidade ótima que conduz a uma massa específica seca máxima do solo (Pinto, 2006). Toda energia aplicada ao solo durante a compactação é gasta em reduzir o volume do solo ou em induzir deformações angulares à estrutura do solo. Sendo assim, após atingir a densidade máxima para uma determinada energia de compactação e teor de umidade, qualquer acréscimo de energia (por exemplo: aumento do número de passadas do rolo no campo) será empregado apenas para deformar a estrutura do material, tornando a estrutura do solo cada vez mais alinhada.

A técnica da compactação surgiu com os estudos do engenheiro norte-americano Ralph R. Proctor, publicados na década de 1930. E diversos fatores influenciam na compactação do solo:

- Tipo de solo;
- Teor de água para se atingir a umidade ótima;
- Energia de compactação;
- Número de passadas do rolo compactador;
- Espessura da camada;
- Método de aplicação da energia necessária;
- Tipo de equipamento utilizado na compactação;
- Velocidade da compactação

Com o emprego de diferentes energias de compactação em um mesmo solo, observa-se que, com o aumento da energia, tem-se uma diminuição do teor de umidade ótima e um aumento da densidade aparente seca máxima, como pode ser visualizado na Figura 2-9. A estrutura do solo obtida com a compactação depende da energia aplicada e da umidade do solo, como ilustrado na Figura 2-10. Quando o solo é compactado em umidade baixa (ramo seco da curva de compactação), a atração face-aresta das partículas não é vencida pela energia aplicada, e o solo fica com a estrutura denominada floculada. Para umidades maiores (ramo úmido da curva de compactação) a compactação promove a orientação das partículas, posicionando-as paralelamente, em uma estrutura denominada dispersa. Para a mesma umidade, quanto maior a energia de compactação, maior o grau de dispersão.

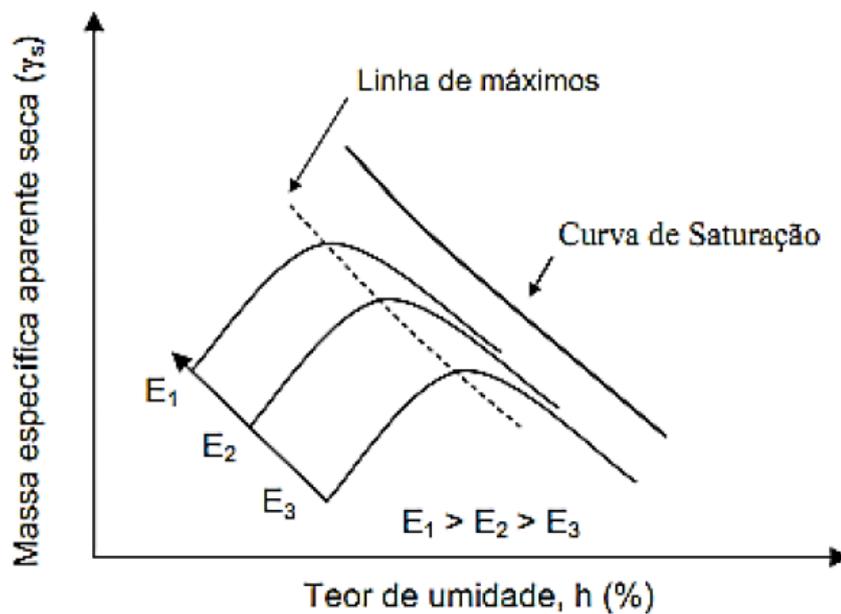


Figura 2-9 – Influência da energia de compactação de um mesmo solo (modificado de DNIT,2006)

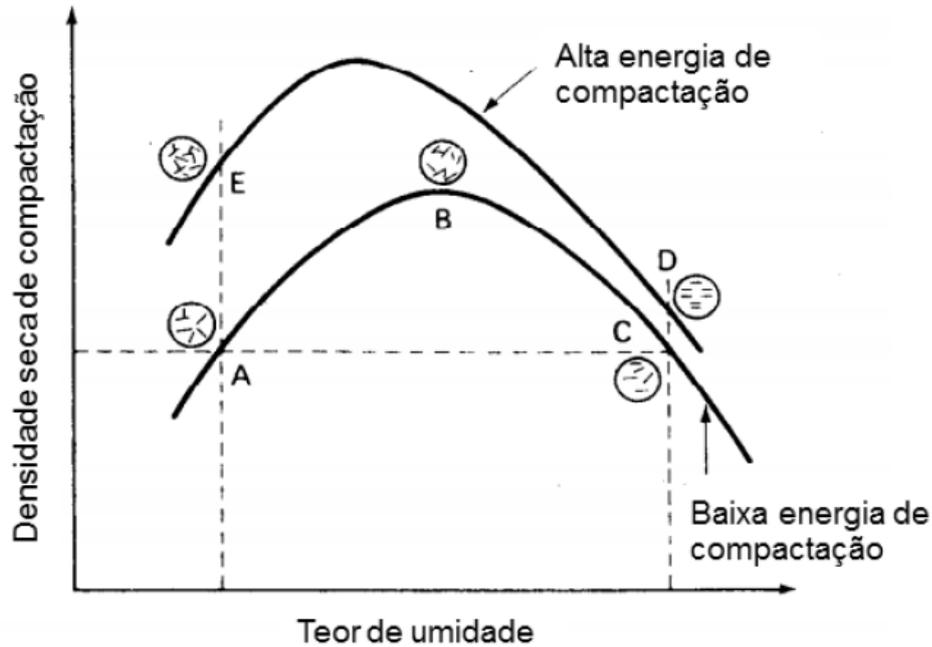


Figura 2-10 – Estrutura de solos compactados (adaptado de Lambe, 1958)

Segundo Oliveira (2004), as variações da estrutura do solo com o incremento do teor de umidade dependem do tipo de solo. Seed e Chan (1959), apud Oliveira (2004), sugerem cinco tipos de classificação dos solos em função do tipo de estrutura de poros resultante da compactação:

- Classe 1 – Solos que apresentam tendência a dispersar apenas por incremento da umidade.
- Classe 2 – Solos que apresentam tendência a floccular, de forma que um aumento na umidade não produz aumento da dispersão. A combinação do aumento de umidade com um método de compactação que produz grandes deformações cisalhantes podem produzir uma estrutura dispersa.
- Classe 3 – Solos onde a tendência a floccular é tão grande que só um aumento de umidade e utilização de um método de compactação com grandes deformações cisalhantes produzem uma estrutura dispersa.
- Classe 4 – Solos que tendem a dispersar mesmo quando moldados no ramo seco, com o método de compactação induzindo ou não deformações cisalhantes.

- Classe 5 – Solos que apresentam pronunciado incremento na dispersão quando compactado no ramo úmido, mas tal fato é mascarado por outros fatores de forma a não se perceber as variações estruturais ocorridas.

Para uma mesma energia de compactação, o tipo de solo tem influência na curva de compactação. Os solos argilosos apresentam umidades ótimas mais elevadas e massas específicas aparentes secas máximas menores que os solos siltosos e arenosos. A compactação do solo pode ser feita por 4 diferentes processos, os quais podem ser reproduzidos em laboratório:

- Compactação dinâmica ou por impacto: caracterizada pela ação de queda livre de um soquete sobre a camada de solo;
- Compactação estática: onde se exerce uma pressão constante sobre o solo, a uma velocidade baixa;
- Compactação por amassamento (pisoteamento): a aplicação da pressão no solo é feita por meio de um pistão com mola, iniciando-se a compactação pela parte inferior da camada, simulando o que acontece em campo com o rolo pé-de-carneiro;
- Compactação por vibração: impondo-se, ou não, uma sobrecarga sobre a camada de solo e aplicando-se vibração.

## **2.9. Considerações Finais**

Os custos com a disposição e o gerenciamento da lama vermelha representam grande parte dos valores gastos na produção da alumina. Os valores ambientais associados à disposição da lama vermelha também são altos. Apesar dos avanços tecnológicos obtidos nos últimos anos, a disposição da lama vermelha ainda é um grande problema para a indústria de beneficiamento do alumínio. Portanto, a busca por novas tecnologias, que visem o aproveitamento da lama vermelha representando alternativas capazes de senão solucionar, pelo menos amenizar o problema é fundamental para o Brasil, sexto maior produtor mundial de alumina, e, portanto um dos maiores geradores de lama vermelha no mundo.

### 3 Programa Experimental

O programa experimental estabelecido nesta pesquisa tem como principal objetivo analisar o comportamento do resíduo proveniente do filtro prensa em condição de aterro densificado. Para isso, foram estudadas diversas espessuras de camadas em diferentes números de passadas e grau de compactação e umidade.

Este capítulo tem como finalidade apresentar a metodologia e execução para construção das três pistas de aterro experimental, assim como a coleta de amostras indeformadas e deformadas deste resíduo, a lista de ensaios de laboratório conduzidos nas amostras, bem como os procedimentos para a realização destes ensaios.

As principais atividades foram desenvolvidas pela autora desta dissertação quando prestava serviços na empresa LPS Consultoria e Engenharia acompanhando a execução do aterro experimental com resíduo Filtro Prensa densificado do Depósito de Resíduos Sólidos – DRS1 de propriedade da Hydro Alunorte - Rodovia - PA - 481- Km 12 – Barcarena - PA, no período de 24 de outubro a 19 de novembro de 2016.

Os testes no aterro experimental tiveram por finalidade as seguintes informações:

- Verificar o comportamento do resíduo filtrado quando estocado na forma de aterro densificado;
- Verificar a trabalhabilidade do resíduo filtrado, em condições meteorológicas distintas;
- Definir em princípio as características de espessura de camada e número de passadas requeridas para atendimento das condições de compactação preconizadas no projeto de conformação da cobertura para reabilitação do DRS-1;
- Avaliar a produtividade e adequabilidade dos equipamentos propostos para execução dos aterros

- Obtenção de amostras indeformadas de resíduo compactado no campo para realização de ensaios geomecânicos de laboratório;
- A análise dos resultados foi utilizada para ajustes no processo executivo da disposição de resíduo proveniente de filtro prensa e definição de suas propriedades geomecânicas.

O Aterro Experimental foi construído em pistas com camadas soltas de 0,30 m, 0,40 m e 0,50 m de espessura com o material disposto na umidade característica do resíduo filtrado, e com acréscimos de 2%, 4% e 6% de umidade, com controle de compactação, de teor de umidade, de número de passadas, tipo de equipamentos, produtividades, dentre outros.

### **3.1. Projeto do Aterro Experimental**

O projeto do aterro experimental considerou a sua construção sobre a superfície do resíduo do DRS 1, em área atualmente contemplada no estudo de disposição inicial de resíduo de filtro prensa.

A área foi escolhida de forma a não interferir na sequência e arranjo definidos no Projeto de disposição de resíduo de filtro prensa no DRS 1, para que os serviços de execução do aterro experimental não ocasionem paradas nas frentes de serviço de disposição de resíduo nesta área (aba Sul do DRS1).

Na Figura 3-1 apresentam vistas das áreas aonde foram executadas as pistas do aterro experimental.



Figura 3-1 – Vistas da Pista 01 com camadas de 0,30 m de espessura, Pista 02 com camadas de 0,40 m de espessura e Pista 03 com camadas de 0,50 m de espessura.

Os aterros foram executados de forma que sua trabalhabilidade e comportamento durante a compactação fossem testados e aferidos e as condições de compactação obtidas em cada camada executadas fossem determinadas. A compactação e densificação dos aterros foram executadas apenas com trator de esteiras. As camadas tiveram diferentes combinações de números de passadas e umidade, para que fosse avaliada a forma mais adequada de disposição final de resíduo filtrado. Área total do topo: 30m x 30m  $\approx$  900m<sup>2</sup>, taludes externos: 1V:2H e área de base: 38mx38m = 1.444m<sup>2</sup>.

As condições a serem testadas com a execução do aterro experimental estão simplificadas na Figura 3-2:



### **3.1.1. Recursos Necessários**

A mão de obra utilizada para execução dos serviços e acompanhamento consistiu de equipe de construção (operadores de máquinas, encarregado, engenheiro de campo); equipe de topografia; equipe de acompanhamento tecnológico de campo (laboratorista de solos, servente).

A quantidade de equipamentos para a execução dos serviços de terraplenagem consistiu de: Caminhões basculante; 01 Trator de esteira tipo D-6; 01 caminhão irrigadeira (Pipa); 01 trator de pneus com grades (Girico); 01 Rolo Compactador Liso.

## **3.2. Programação dos Ensaios Realizados**

### **3.2.1. Amostras Deformadas**

Amostras deformadas são aquelas extraídas por raspagem ou escavação, o que implica na destruição da estrutura e na alteração das condições de compacidade ou consistência naturais destas. No caso de coleta de amostras deformadas, foram ser observados os seguintes critérios, além do preconizado pela norma ABNT NBR 9604:

Os ensaios realizados nas amostras deformadas foram de caracterização e controle de compactação (teor de umidade, peso específico e grau de compactação) executada no laboratório dentro da área teste.

A Tabela 3-1 resume a quantidade de ensaios de caracterização geotécnica do resíduo e de controle de compactação executados durante a execução dos aterros experimentais.

Tabela 3-1 – Quantidade de ensaios realizados no laboratório dentro da área teste

Descrição	E=0.30m	E=0.40m	E=0.50m
Caracterização completa	3	3	3
Compactação Proctor Normal	3	3	3
Grau de Compactação (Método Hilf)	20	32	32
Peso específico total	100	160	160
Teor de umidade	100	160	160

Na Figura 3-3 à Figura 3-5 apresentam alguns registros dos ensaios de caracterização e controle de compactação realizados no campo e laboratório dentro da área teste durante a fase de execução do aterro experimental.



Figura 3-3 – Detalhes da coleta e separação das amostras deformadas do resíduo lançado pelos caminhões nas pistas do aterro experimental para ensaios de granulometria e limites.



Figura 3-4 – Detalhes da execução dos ensaio de Limite de Liquidez e Plasticidade.



Figura 3-5 – Detalhe da cravação e coleta de cilindros para execução de controle de peso específico e ensaio de compactação Proctor Normal.

### 3.2.2. Amostras Indeformadas

Amostras indeformadas são aquelas extraídas com o mínimo de perturbação possível, de modo a preservar suas estruturas, a umidade, compactidade e consistência naturais, sendo elas coletadas, por exemplo, em poços, trincheiras ou com auxílio dos equipamentos de sondagem com os devidos amostradores. No caso de coleta de amostras indeformadas, foram observados os seguintes critérios, além do preconizado pela norma ABNT NBR 9604:

Os ensaios geomecânicos de laboratório foram executados em amostras do resíduo compactado, coletadas nas diferentes camadas dos aterros experimentais.

A retirada das amostras indeformadas em bloco para a execução dos ensaios de caracterização, compactação, permeabilidade e resistência, ocorreu após a aplicação de todas as passadas do trator de esteiras.

Após execução da última camada de cada espessura de todas as pistas, foram retirados no total 12 (doze) blocos indeformados de 30cm x 30cm de dimensão.

As amostras foram cuidadosamente retiradas e imediatamente protegidas contra perda de umidade. A Figura 3-6 à Figura 3-8 apresentam as etapas de retirada dos blocos indeformados.

O armazenamento das amostras foi realizado em local fresco e protegido até o seu envio para o laboratório da Geomecânica no Rio de Janeiro.

A Tabela 3-2 a seguir apresenta a relação de ensaios especiais a serem realizados em laboratório, sobre as amostras indeformadas coletadas nos Aterros Experimentais.

As investigações de laboratório compreenderam a execução de ensaios de caracterização completa, compactação Proctor normal, adensamento oedométrico com medida de permeabilidade, triaxiais CIU saturado, triaxiais UU não saturado, triaxiais PN e ensaios de permeabilidade com carga variável.

Tabela 3-2 – Programação de ensaios de laboratório nas amostras retiradas do Aterro Experimental com resíduo do Filtro Prensa compactado

AMOSTRAS INDEFORMADAS ATERRO EXPERIMENTAL											
Nº Bloco	e (cm)	COTA	UMIDADE	POSIÇÃO	CARACTERIZAÇÃO COMPLETA	COMPACTAÇÃO PN	ADENSAMENTO C/ PERMEABILIDADE	TRIAxIAL CIU	TRIAxIAL UU	TRIAxIAL UU PN	PERMEABILIDADE
1	30	37,028	6% ~ 35	no meio da camada	x	x	x	x	x	xx	x
2	30	36,17	natural ~27.5	no meio da camada	x	x	x	x	x	xx	x
3	30	36,768	ótima ~29	no meio da camada	x	x	x	x	x	xx	x
4	40	37,182	2% ~31	base da camada	x	x					
5	40	36,367	2% ~31	base da camada	x	x					
6	40	36,349	2% ~31	base da camada	x	x					
7	40	35,942	natural ~27.5	base da camada	x	x	x	x	x	x	x
8	40	36,405	ótima ~29	base da camada	x	x		x	x	x	
9	40	36,119	ótima ~29	base da camada	x	x	x			x	x
10	50	36,66	ótima ~29	base da camada	x	x	x			x	
11	50	36,932	2% ~31	base da camada	x	x	x	x	x	x	x
12	50	36,522	ótima ~29	base da camada	x	x					
13*	50	36,415	natural ~27.5	base da camada	<b>Blocos Manoela</b>						
14*	50	36,768	2% ~31	base da camada							
Triaxial CIU - Ensaio consiste de 4 CPs											
Triaxial UU - Ensaio consiste de 3 CPs											
Triaxial UU - PN Nos blocos 1.2.3 realizar 2 ensaios, com k=0.6 e k=0.5											



Figura 3-6 – Detalhes da marcação e escavação para retirada do bloco indeformado



Figura 3-7 – Detalhes da retirada de blocos indeformados nas dimensões 30x30cm e envolto com filme plástico.



Figura 3-8 – Detalhe do bloco indeformado envolto com pano e parafina derretida antes de coloca-lo dentro da caixa para transporte com serragem

### **3.2.3. Procedimento dos Ensaio Realizados dentro da Área Teste**

Ressalta-se que o material ensaiado foi obtido das amostras compactadas de resíduo proveniente do filtro prensa, amostras deformadas armazenada em saco plástico de no máximo 15 Kg.

#### **3.2.3.1. Ensaio de Caracterização, Densidade Aparente e Compactação dentro da Área Teste.**

Para a caracterização geotécnica dos materiais da área em estudo foram realizados os ensaios de caracterização pertinentes a cada material (granulometria completa, limites de Atterberg e teor de umidade natural, densidade dos grãos). Os ensaios de densidade aparente foram realizados pelo método da balança hidrostática em corpos de prova talhados das amostras indeformadas. Os ensaios de compactação na energia Proctor Normal foram

executados nas amostras deformadas coletadas nas mesmas áreas de coleta dos blocos indeformados em sacos de 15 Kg cada.

Os ensaios realizados seguiram como base as normas da ABNT descritas abaixo em sua última versão:

- Preparação de amostra e teor de umidade natural – ABNT NBR 6457
- Granulometria completa – ABNT NBR 7181
- Massa específica dos grãos – ABNT NBR 6508
- Limites de liquidez – ABNT NBR 6459
- Limites de plasticidade – ABNT NBR 7180
- Densidade aparente (balança hidrostática) – ABNT NBR 10838
- Compactação Proctor Normal – ABNT NBR 7182

### **3.2.4. Procedimento dos Ensaios Realizados no Laboratório**

Ressalta-se que o material ensaiado foi obtido das amostras compactadas de resíduo proveniente do filtro prensa, coletas em blocos indeformados com dimensões de 30 cm x 30 cm x 30 cm ou de coleta de amostras deformadas coletadas na mesma área do bloco indeformado e armazenada em saco plástico de no máximo 15 Kg.

#### **3.2.4.1. Ensaios de Caracterização Completa**

Foram realizados 12 ensaios de caracterização completa, compreendendo ensaios de determinação de teor de umidade e peso específico, classificação tátil visual, granulometria por peneiramento e sedimentação, determinação de massa específica dos grãos e as determinações dos limites de liquidez e plasticidade.

Estes ensaios seguiram os métodos preconizados pelas normas e procedimentos internos relacionados a seguir:

- PES.187 – Classificação Tátil-Visual de Amostras de Solo, Geomecânica S/A;

- NBR 6457 – Amostras de Solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização, ABNT;
- NBR 6459 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez, ABNT;
- NBR 6502 – Rochas e Solos – Terminologia, ABNT;
- NBR 6508 – Grãos de Solo que passam na Peneira de 4,8mm – Determinação da Massa Específica, ABNT;
- NBR 7180 – Solo – Determinação de Limite de Plasticidade, ABNT;
- NBR 7181 – Solo – Análise Granulométrica, ABNT.

#### **3.2.4.2. Compactação Proctor Normal**

O objetivo do ensaio é a determinação experimental da curva de compactação, massa específica aparente seca versus o teor de umidade, e conseqüentemente, a obtenção gráfica dos valores de densidade máxima e umidade ótima, correspondentes ao ponto de inflexão desta curva.

O ensaio consistiu basicamente, na preparação do corpo-de-prova em um molde cilíndrico de 15cm de diâmetro, onde o solo foi compactado em camadas, através da aplicação de sucessivos impactos de um soquete padronizado (4,5 kg), seguida da determinação da densidade e teor de umidade para esse corpo-de-prova.

O número de camadas e número de golpes são função da energia de compactação aplicada, neste caso, energia de compactação Proctor Normal.

Foram realizados 12 ensaios de compactação em amostras deformadas para determinação da curva de compactação, massa aparente específica seca máxima e o teor de umidade ótima.

Este ensaio seguiu os métodos preconizados pelas normas e procedimento interno a seguir:

- NBR 6457 – Amostras de Solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização, ABNT;
- NBR 7182 – Solo – Ensaio de Compactação, ABNT;

- PES-233- Coleta e preparação das amostras de solo para execução de ensaios de Compactação e CBR.

### 3.2.4.3.

#### **Ensaio de Adensamento com Medida de Permeabilidade**

Este tipo de ensaio tem por finalidade fornecer parâmetros que caracterizem a compressibilidade dos solos quando sujeitos a determinados carregamentos.

Foram executados 7 ensaios de adensamento oedométrico com medidas de permeabilidade em corpos de prova, com 3 cm de altura e 10 cm de diâmetro, moldados a partir das amostras indeformadas retiradas do aterro experimental de resíduo filtro prensa.

Os corpos-de-prova foram inundados e submetidos a um ciclo de carregamento axial, nas pressões de 10; 20; 50; 100; 200; 400 e 800 kPa seguido de três estágios de descarregamento 400; 100 e 20 kPa. Cada carga foi aplicada durante pelo menos 24 horas. Os corpos de prova foram inundados na pressão de 50 kPa.

Foram também realizados ensaios de permeabilidade com carga variável com tensões de 50 (após estabilização); 100; 200 e 400 kPa. Para realização do ensaio as prensas foram travadas e o ensaio de permeabilidade realizado durante 24h.

Para cada estágio são apresentadas as curvas do logaritmo do tempo versus deslocamento vertical e raiz quadrada do tempo versus deslocamento vertical. Com base nos gráficos e a partir do método de Taylor foi calculado o coeficiente de adensamento ( $c_v$ ), a permeabilidade teórica vertical do solo ( $k$ ), o coeficiente de compressibilidade ( $a_v$ ), e o coeficiente de variação volumétrica ( $m_v$ ). A partir do ensaio de permeabilidade foi calculada a permeabilidade normalizada para a temperatura de 20° ( $k_{20}$ ).

Como resultados, para cada ensaio, foram determinados os índices de recompressão  $C_r$ , compressão  $C_c$  e expansão  $C_e$ , e os seguintes gráficos:

- Logaritmo da tensão vertical efetiva ( $\log \sigma'_{vo}$ ) versus índice de vazios ( $e$ ),

- Logaritmo da tensão vertical efetiva ( $\log \sigma'_v$ ) versus coeficiente de adensamento ( $c_v$ ),
- Logaritmo da permeabilidade ( $\log k$ ) versus índice de vazios ( $e$ ).

Estes ensaios seguiram o método preconizado pela norma abaixo:

- NBR 12007 – Solo – Ensaio de Adensamento Unidimensional, ABNT.

Os equipamentos e procedimentos de preparação das amostras, execução do ensaio e apresentação dos resultados estavam de acordo com o preconizado em Manual of Laboratory Soil Testing, Vol 2, K.Head (1980) .

#### **3.2.4.4. Ensaio Triaxiais CIU**

O ensaio de compressão triaxial CIU tem por objetivo a determinação de parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos em termos de tensões efetivas e de tensões totais.

Os ensaios CIU são adensados isotropicamente e cisalhados não - drenados, com medida de poro-pressão durante o cisalhamento. Foram realizados em amostras indeformadas retiradas dos aterros teste de resíduo filtrado, saturadas previamente. A saturação das amostras foi realizada por percolação e contra pressão.

Os equipamentos e procedimentos de preparação das amostras, execução do ensaio e apresentação dos resultados estavam de acordo com o preconizado em “Head, K.H. – Manual of Soil Laboratory Testing - cap. XIII (Pentec Press, London, 1982)”

Finalizada a fase de montagem, saturação do corpo de prova e aplicação da tensão confinante correspondente ao ensaio, procedeu-se a fase de adensamento, permitindo-se drenagem no topo e/ou base, mantendo-se o valor final da contrapressão utilizada na fase de saturação. Iniciado o processo de adensamento, foram feitas leituras de variação volumétrica nos tempos de 0,5; 1,0; 2,0, 4,0; 8,0; 15,0; 30,0 minutos, 4 hora, 8 horas e 24 horas, até que as leituras se estabilizem.

Com base nos dados obtidos nesta fase, fez-se uma estimativa do coeficiente de adensamento ( $c_v$ ), utilizando-se a expressão:

$$C_v = (h_1) \times 2 / a \times t_{100}$$

Onde:

$h_1$  = metade da altura do corpo de prova

$t_{100}$  = tempo correspondente a 100% de adensamento obtido da curva de variação volumétrica x Vt.

Coef.  $a= 4$  em ensaios sem papel filtro lateral

Coef.  $a= 100$  em ensaios com papel filtro lateral.

Com o valor de  $C_v$ , fez-se uma previsão de tempo de ruptura do corpo de prova e da velocidade de deformação, conforme Head, K.H. – “Manual of Soil Laboratory Testing - cap. XIII” (Pentec Press, London, 1982), admitindo-se 90% de equalização da poropressão e que a ruptura se dará para 5% de deformação.

Definida a velocidade de deformação procedeu-se a ruptura por cisalhamento fazendo-se leituras de carga, deformação axial e leituras de variação volumétrica nas buretas ligadas ao topo e a base do corpo de prova, até aproximadamente 15% de deformação específica.

Finalizando o ensaio, fez-se um croqui com as principais medidas do corpo de prova e mediu-se o ângulo da superfície de ruptura, para então realizar 3 determinações de umidade, cuja média representará a umidade final do corpo de prova.

Foram determinadas 6 envoltórias de ensaios triaxiais adensados isotropicamente não drenados, com medidas de poropressão, determinadas em corpo-de-prova, de 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro, moldados sobre amostras indeformadas (blocos). Cada envoltória foi definida por 4 ensaios com as amostras adensadas nas tensões confinantes efetivas  $\sigma'_c$  de 50, 100, 200 e 400 kPa, perfazendo um total de 24 ensaios.

Os corpo-de-prova foram saturados por contra-pressão, sendo considerado o material saturado para valores de B maiores ou iguais a 0,95.

Os equipamentos e procedimentos de preparação das amostras, execução do ensaio e apresentação dos resultados estavam de acordo com o preconizado em

Manual of Laboratory Soil Testing, Vol 2, K.Head (1980).

Na apresentação dos resultados dos ensaios constam os seguintes itens:

- Descrição da amostra;
- Características do corpo de prova antes e após o ensaio:
  - dimensão e peso do corpo de prova
  - peso específico aparente natural
  - teor de umidade natural
  - densidade real dos grãos
  - grau de saturação
- Croquis do corpo de prova rompido;
- Quadro resumo dos parâmetros de resistência;
- Folhas de leitura e quadro resumo dos cálculos das fases de saturação, adensamento (CIU) e cisalhamento;
- Curvas de adensamento e respectivas variações totais de volumes ( $\overline{CIU}$ );
- Diagramas ( $\overline{CIU}$ ):
  - Tensão desviatória x deformação axial específica (deslocamentos  $(\sigma_1 - \sigma_3) \times \epsilon_a$  (%));
  - Variação de poropressão x deformação axial específica ( $\delta u \times \epsilon_a$  (%));
  - Relação de tensões principais efetivas x deformação axial efetiva  $\sigma_1 / \sigma_3 \times \epsilon_a$  (%);
  - Caminho de tensões totais e efetivas ( $p \times q$  e  $p' \times q$ );
  - Tensão Cisalhante x Tensão Normal.

### 3.2.4.5. Ensaio Triaxiais UU

Os ensaios triaxiais não-adensados e não-drenados (UU) têm por objetivo a determinação da resistência ao cisalhamento não-drenada de amostras compactadas em laboratório de resíduo filtrado, proveniente do filtro prensa piloto.

Os ensaios foram realizados em corpos-de-prova com dimensões aproximadas de 10 cm de altura e diâmetro em torno de 5 cm, talhados a partir dos

blocos indeformados.

Foram determinadas 6 envoltórias de Triaxial UU, cada envoltória foi definida por 3 ensaios, com amostras indeformadas sob as tensões confinantes de 50, 150 e 300kPa, totalizando 18 ensaios.

Durante o cisalhamento foram medidas poro-pressões permitindo a determinação da resistência em tensões efetivas.

Os equipamentos e procedimentos de preparação das amostras, execução do ensaio e apresentação dos resultados estavam de acordo com o preconizado em Head, K.H. – “Manual of Soil Laboratory Testing cap. XIII” (Pentec Press, London, 1982).

Na apresentação dos resultados dos ensaios constam os seguintes itens:

- Descrição da amostra;
- Características do corpo de prova antes e após o ensaio:
  - dimensão e peso do corpo de prova
  - peso específico aparente natural
  - teor de umidade natural
  - densidade real dos grãos
  - grau de saturação
- Croquis do corpo de prova rompido;
- Folhas de leitura e quadro resumo dos cálculos das fases de saturação e cisalhamento;
- Quadro resumo dos parâmetros de resistência;

Diagramas:

- Tensão desviatória x deformação axial específica (deslocamentos  $(\sigma_1 - \sigma_3) \times \epsilon_a$  (%))
- variação de poropressão x deformação axial específica ( $\delta u \times \epsilon_a$  (%))
- relação de tensões principais efetivas x deformação axial efetiva  $\sigma_1 / \sigma_3 \times \epsilon_a$  (%)
- caminho de tensões totais e efetivas ( $p \times q$  e  $p' \times q$ )
- tensão cisalhante x tensão normal

### 3.2.4.6. Ensaio Triaxiais PN (Pressão Neutra)

A poropressão construtiva, que se desenvolve durante a construção de um aterro compactado, é de difícil avaliação, devido à natureza acoplada dos fenômenos que ocorrem nesta fase da obra (tensão-deformação e adensamento). Segundo Ávila (1980), para solos não saturados, o efeito da umidade de compactação é mais importante do que o da trajetória de tensões. Sendo assim, no caso da disposição do resíduo de alumina compactado desaguado por filtro prensa, objeto de estudo desta pesquisa, deve-se dar atenção especial na previsão das poropressões geradas durante a construção da pilha. Portanto, para a análise da geração de poropressão no resíduo não saturado quando compactado para formar a pilha de deposição foi utilizado nesta pesquisa o ensaio triaxial PN (pressão neutra). Este tipo de ensaio é empregado principalmente para análise de projetos de barragens durante a fase de construção (Ligocki, 2003).

Este ensaio consiste em solicitar o corpo de prova por acréscimo das tensões confinante e axial, segundo uma relação constante  $\sigma_3/\sigma_1$  (Pereira e Assis, 2005). Segundo Lacerda e Mahler (1973), esta relação geralmente varia entre 0,4 a 0,7 (sendo os maiores valores para regiões localizadas no centro da barragem). O objetivo principal do ensaio PN é observar o desenvolvimento de poropressões devido a este tipo de solicitação, que é considerada como representativa da solicitação de campo durante a fase de construção do aterro. A relação entre a poropressão e a tensão confinante é o parâmetro de Skempton (1954) e que é utilizado no cálculo da estabilidade de taludes. E a relação entre a poropressão e a tensão total vertical, que a tensão principal maior no ensaio triaxial, é o parâmetro de poropressão  $R_u$ , também muito utilizado em cálculos de estabilidade de taludes.

Os ensaios triaxiais tipo PN devem ser realizados na umidade de compactação (grau de saturação) das condições de campo. Na consolidação inicial de um aterro ocorre a presença de ar na estrutura do solo, existindo uma poropressão negativa devido a sucção. Porém, com a compactação das camadas superiores, que ocorre como um carregamento não drenado há geração de variações positivas da poropressão, aumentando-a devido ao confinamento da

água dentro da estrutura do solo. Alguns exemplos de projetos de barragens que utilizaram este tipo de ensaio são Ilha Solteira (Paraná) e Serra da Mesa (Goiás).

Os ensaios triaxiais PN têm por objetivo a determinação das poro-pressões durante a aplicação de carregamento simultâneo da tensão confinante  $\sigma_h$  e da tensão axial  $\sigma_v$  sob condições não-drenadas, utilizando a relação  $\sigma_h / \sigma_v$  igual a 0,6 para simular a construção rápida, sem que se tenha tempo para a dissipação das poro-pressões.

Os ensaios foram realizados sobre amostras indeformadas retiradas dos aterros teste de resíduo filtrado. Os ensaios foram realizados em prensa triaxial do tipo Bishop-Wesley, em corpos-de-prova moldados a partir de blocos indeformados, com diâmetro em torno de 4 cm e altura de aproximadamente 8 cm. Durante a execução do ensaio não é permitida qualquer drenagem do corpo de prova observando-se o desenvolvimento de poro pressões na medida em que são aplicados simultaneamente acréscimos de tensão axial e tensão confinante.

A seguinte sequência foi seguida para execução dos ensaios:

- Montagem do corpo de prova, moldado na condição prevista, na câmara triaxial e aplicação de tensão confinante de 12 kPa;
- Após estabilização das poro-pressões medidas, aplicação de acréscimo de tensão axial de 8 kPa, atingindo a tensão axial aplicada de 20 kPa;
- Aplicação simultânea de incrementos de tensão axial de 20 kPa e de tensão confinante de 12 kPa, isto é, mantendo a relação  $\sigma_h / \sigma_v$  igual a 0,6;
- Após a aplicação de cada incremento, deverão ser efetuadas leituras de poro-pressão até a sua estabilização, caracterizada por variação na leitura inferior a 2 kPa em leituras espaçadas de 15 min.
- Após atingir a estabilização sob a tensão axial de 200 kPa, o ensaio deverá ser prosseguido aumentando-se apenas a tensão axial, sob a velocidade de deformação constante, e mantendo a tensão confinante constante, até atingir a ruptura. Nesta fase do ensaio, as poro-pressões deverão ser medidas tal como nos ensaios CIU. A

velocidade de deformação a ser utilizada deverá ser igual à dos ensaios triaxiais CIU.

Na apresentação dos resultados dos ensaios constam os seguintes itens:

- Tabela com valores medidos de poro-pressão em cada incremento de tensões;
- Resultados da fase de cisalhamento até a ruptura;
- Gráfico poro-pressão estabilizada ( $u$ ) versus tensão axial ( $\sigma_v$ ) ao final de cada incremento;
- Gráfico  $u/\sigma_v$  versus  $\sigma_v$  ao final de cada incremento.

#### **3.2.4.7.**

#### **Ensaio de Permeabilidade com Carga Variável**

Os ensaios de permeabilidade foram realizados a carga variável para solos finos. Os ensaios de permeabilidade a carga variável foram realizados com fluxo perpendicular às camadas compactadas em cilindro Proctor.

Os ensaios foram realizados com corpos-de-prova com dimensões aproximadas de 5 cm de diâmetro e 10 a 12 cm de altura, talhados a partir dos blocos indeformados.

O corpo de prova foi posicionado no centro do permeâmetro e envolvido lateralmente com bentonita de forma a impedir a drenagem lateral entre o corpo de prova e o permeâmetro.

Inicialmente o corpo de prova foi saturado através de percolação no sentido ascendente até a percolação se processar sem aparecimento de bolhas de ar.

Como resultado dos ensaios, apresentam-se os coeficientes de permeabilidade referidos à temperatura de 20°C.

Os equipamentos básicos, assim como os procedimentos do ensaio, seguiram as orientações constantes do capítulo X do – “Manual of Soil Laboratory Testing ”(Pentec Press, London, 1982, Head, K.H ).

### **3.3. Execução das Pistas Experimentais**

#### **3.3.1. Pista 1**

##### **3.3.1.1. Metodologia de Execução**

A Pista 1 foi construída com 5 camadas de espessura de 0,30m com as umidades de cada camada a ser testada variando da seguinte forma:

- 1° Camada - Umidade de descarga do Filtro Prensa -->  $w \sim 27,50\%$
- 2° Camada - Umidade -->  $w \sim 28,00\%$
- 3° Camada - Umidade -->  $w \sim 29,00\%$
- 4° Camada - Umidade -->  $w \sim 33,00\%$
- 5° Camada - Umidade -->  $w \sim 36,00\%$

Houve muita dificuldade para tratar o material de resíduo Filtro Prensa de tal forma que pudéssemos controlar a umidade e homogeneizar o material. A água não penetrava no material com facilidade, se mantendo apenas na camada superficial. Mesmo com a utilização do trator agrícola com grades (Girico), foi preciso molhar e misturar o material diversas vezes. Desta forma, as variações das umidades não seguiram uma padronização por camada, variando de acordo com a capacidade de homogeneizar estas camadas em campo.

Na primeira camada testada a ser compactada, utilizou-se o material com a umidade de chegada do Filtro Prensa, 27,5% (1,5% abaixo da umidade ótima). Na segunda camada, houve dificuldade para umedecer esse material e a mesma foi testada com o valor de 28%. A terceira camada foi testada com o valor de umidade de 29%, valor da umidade ótima do resíduo do Filtro Prensa. A quarta camada, foi testada com um teor de umidade de 33%, apresentando-se 4% acima da ótima e a quinta camada testada apresentou um teor de umidade de 36%, 7% acima da ótima.

Por esse motivo, foram executadas nesta pista 5 camadas, pois as duas

primeiras camadas ficaram com o mesmo teor de umidade.

Para cada camada foi adotada o seguinte procedimento: Descarga do resíduo na pista para posterior espalhamento; Retirada de 3 (três) amostras deformadas em pontos diferentes do material para caracterização completa (Granulometria completa, Limites de Atterberg, compactação Proctor Normal); Espalhamento do resíduo em camada de ~30cm, na umidade de chegada do filtro prensa; A partir da segunda camada, revolvimento da camada, repetidas vezes, com a utilização de trator agrícola com grades e aplicação de água através da passagem de caminhão irrigadeira com verificações expeditas de umidade do material até a obtenção de umidade equivalente à da sua respectiva camada; Densificação do material através da passagem de trator de esteiras por 4 vezes sobre toda a extensão da pista (total de 4 passadas); Retirada de 5 (cinco) amostras em pontos diferentes para controle de compactação (Peso específico total e Teor de umidade) no centro da camada; Repetir o procedimento adicionando-se 2 (duas) passadas para os totais de 6 passadas, 8 passadas e 10 passadas;

Na pista 1 com camadas de 0,30 metros de espessura não se teve dificuldade para espalhar o material e trafegar pela pista, inclusive na sua condição mais crítica de teor de umidade 7% acima da umidade ótima.

A Figura 3-9 e Figura 3-10 apresentam registro das atividades realizadas durante as condições testadas para a Pista 1 do aterro experimental.



Figura 3-9 – Resíduo em forma de torta compactada e granular lançado na pista.



Figura 3-10 – Detalhes da camada de 0,30 cm de espessura, com a umidade de chegada do filtro prensa ~27%, em tratamento para variação da umidade com o auxílio do caminhão pipa e da Patrol para a realização da compactação e coleta de cilindros para controle de peso específico.

### 3.3.1.2. Ensaio de Controle Realizados Dentro da Área Teste

Após o término da densificação do material através da passagem do trator de esteiras, retirou-se 5 amostras de cilindros biselados do centro da camada em diferentes pontos para determinar o controle do peso específico e teor de umidade do material, totalizando 20 cilindros retirados por camada a ser testada.

Em 1 ponto dos 5 pontos de cilindros coletados após cada término da densificação por camada, realizou-se 1 ensaio de compactação pelo método de Hilf, totalizando a realização de 4 pontos de ensaio de compactação por camada.

### 3.3.2. Pista 2

#### 3.3.2.1. Metodologia de Execução

A Pista 2 foi construída com 4 camadas de espessura de 0,40m, com as umidades de cada camada a ser testada variando da seguinte forma:

- 1° Camada - Umidade de descarga do Filtro Prensa -->  $w \sim 27,00\%$
- 2° Camada - Umidade -->  $w \sim 29,00\%$
- 3° Camada - Umidade -->  $w \sim 33,00\%$
- 4° Camada - Umidade -->  $w \sim 37,00\%$

A mesma dificuldade encontrada para homogeneizar a camada úmida da pista anterior, foi encontrada nesta pista. Porém, como essa camada é maior, a solução encontrada foi dividi-la em duas de 20 cm de tal forma que ficasse com uma camada de 40 cm, reduzindo a sua heterogeneidade. Assim, ao se fazer este procedimento, sem tem duas sub-camadas de 20 cm espalhadas, porém densificadas com 40cm.

Na primeira camada testada a ser compactada, utilizou-se o material com a umidade de saída do Filtro Prensa, 27%. Na segunda camada testamos com o valor de umidade de 29%, valor da umidade ótima do resíduo do Filtro Prensa. A terceira camada foi testada com um teor de umidade de 33%, apresentando-se 4% acima da ótima e a quarta camada testada apresentou um teor de umidade de 37%, 8% acima da ótima.

Devido a dificuldade para tratar este material de forma homogênea em teores de umidades elevados, os graus de compactação nas bases das camadas foram em alguns casos superiores ao do topo da camada, devido a diferença de umidades. No caso destes pontos as umidades das bases estão menores do que as do topo. Admite-se que tal possa ter ocorrido pela exposição da sub-camada (20cm) inferior, antes do lançamento da camada subsequente de 20 cm, porém não há registros desta variação. Ressalte-se, entretanto, que, durante os trabalhos

de lançamento e espalhamento do resíduo para diferentes espessuras de camadas, foram constatadas perdas significativas de umidade.

Nesta quarta e última camada o trator de esteira visualmente não conseguiu compactar o material de resíduo e teve dificuldades de tráfego, conforme apresentado nas fotos abaixo. Admite-se então que o limite de trafegabilidade foi atingido com ~ 6% acima da ótima.

Na Figura 3-11 e Figura 3-12 apresentam as atividades realizadas durante as condições testadas para a Pista 2 do aterro experimental.





Figura 3-11 – Detalhes da coleta de cilindros para controle de peso específico e teor de umidade, topografia determinando cotas no aterro experimental com camada de 0,40 m de espessura, tratamento da camada com o auxílio do trator agrícola com discos (Girico) para variação da umidade acima da umidade do resíduo da chegada do filtro.



Figura 3-12 – Limite de trafegabilidade para camada de 0,40m – 6% acima da umidade do filtro

Para cada camada foi adotado o seguinte procedimento: Descarga do resíduo na pista para posterior espalhamento; Retirada de 3 (três) amostras deformadas em pontos diferentes do material para caracterização completa (Granulometria completa, Limites de Atterberg, compactação Proctor Normal); Espalhamento do resíduo em duas sub-camadas de 20cm, na umidade de saída do filtro prensa, totalizando 1 camada de 40cm; A partir da segunda camada, lançamento e espalhamento do resíduo da primeira subcamada de 20 cm, revolvimento repetidas vezes, com a utilização de trator agrícola com grades e aplicação de água através da passagem de caminhão irrigadeira com verificações expeditas de umidade do

material até a obtenção de umidade equivalente à umidade da sua respectiva camada. Lançamento e espalhamento do resíduo da segunda subcamada de 20 cm, revolvimento repetidas vezes, com a utilização de trator agrícola com grades e aplicação de água através da passagem de caminhão irrigadeira com verificações expeditas de umidade do material até a obtenção de umidade equivalente à umidade da sua respectiva camada. Densificação do material na camada de 40cm, através da passagem de trator de esteiras por 4 vezes sobre toda a extensão da pista (total de 4 passadas); Retirada de 10 (dez) amostras em pontos diferentes para controle de compactação (Peso específico total e Teor de umidade), sendo 5 (cinco) no topo da camada e 5 (cinco) na base da camada; Repetir o procedimento adicionando-se 2 (duas) passadas para os totais de 6 passadas, 8 passadas e 10 passadas;

### **3.3.2.2.**

#### **Ensaio de Controle Realizados Dentro da Área Teste**

Após o término da densificação do material através da passagem do trator de esteiras, retirou-se 10 amostras de cilindros biselados, sendo 5 cilindros no topo e 5 cilindros na base de um mesmo ponto, para determinar o controle do peso específico e umidade do material, totalizando 40 cilindros retirados por camada a ser testada.

Em 1 dos cilindros coletados após cada término da densificação da camada, realizou-se 2 ensaios de compactação pelo método de Hilf, sendo 1 no topo e 1 na base de um mesmo ponto, totalizando a realização de 8 pontos de ensaio de compactação por camada.

### **3.3.3.**

#### **Pista 3**

#### **3.3.3.1.**

##### **Metodologia de Execução**

A Pista 3 foi construída com 4 camadas de espessura de 0,50m com as

umidades de cada camada a ser testada variando da seguinte forma:

- 1° Camada - Umidade de saída do Filtro Prensa -->  $w \sim 27,00\%$
- 2° Camada - Umidade -->  $w \sim 31,00\%$
- 3° Camada - Umidade -->  $w \sim 35,00\%$
- 4° Camada - Umidade -->  $w \sim 36,00\%$

A mesma dificuldade encontrada para homogeneizar a camada úmida das pistas anteriores com 40cm foi encontrada nesta pista. A solução encontrada para homogeneizar o máximo possível da camada, foi similar ao que foi feito na segunda pista, dividi-la em duas de 25 cm e depois junta-las de tal forma que ela ficasse com uma camada de 50 cm mais homogênea possível.

Na primeira camada testada a ser compactada, utilizou-se o material com a umidade de saída do Filtro Prensa, 27%. A segunda camada foi testada com o valor de umidade de 30,5%, valor próximo da umidade ótima do resíduo do Filtro Prensa. A terceira camada foi testada com um teor de umidade de 34%, apresentando-se 5% acima da ótima e a quarta camada testada apresentou um teor de umidade de 36%, 7% acima da ótima.

Devido a dificuldade para tratar este material de forma homogênea em teores de umidades elevados, o grau de compactação nas bases das camadas foi em alguns casos superiores ao do topo da camada, devido a diferença de umidades, no caso destes pontos as umidades das bases estão menores do que as do topo.

Nesta quarta e última camada o trator esteira visualmente conseguiu compactar o material de resíduo e não teve dificuldades de trafegabilidade, conforme apresentado nas fotos abaixo.

Nas Figura 3-13 e Figura 3-14 apresentam as atividades realizadas durante as condições testadas para a Pista 3 do aterro experimental.



Figura 3-13 – Detalhes do resíduo lançado no aterro experimental antes da compactação em forma de tortas compactadas, verificação do teor de umidade via método da frigideira, compactação na camada de 0,50m de espessura e teor de umidade do resíduo de 6% acima da umidade ótima.



Figura 3-14 – Limite de trafegabilidade na camada de 0,50m é de 7% acima da umidade ótima.

Para cada camada foi adotada o seguinte procedimento: Descarga do resíduo na pista para posterior espalhamento; Retirada de 3 (três) amostras deformadas em pontos diferentes do material para caracterização completa (Granulometria completa, Limites de Atterberg, compactação Proctor Normal); Espalhamento do resíduo em duas sub-camadas de 25cm, na umidade de saída do filtro prensa,

totalizando 1 camada de 50cm; A partir da segunda camada, lançamento e espalhamento do resíduo da primeira subcamada de 25 cm, revolvimento repetidas vezes, com a utilização de trator agrícola com grades e aplicação de água através da passagem de caminhão irrigadeira com verificações expeditas de umidade do material até a obtenção de umidade equivalente à umidade da sua respectiva camada. Lançamento e espalhamento do resíduo da segunda subcamada de 25 cm, revolvimento repetidas vezes, com a utilização de trator agrícola com grades e aplicação de água através da passagem de caminhão irrigadeira com verificações expeditas de umidade do material até a obtenção de umidade equivalente à umidade da sua respectiva camada. Densificação do material na camada de 50cm, através da passagem de trator de esteiras por 4 vezes sobre toda a extensão da pista (total de 4 passadas); Retirada de 10 (dez) amostras em pontos diferentes para controle de compactação (Peso específico total e Teor de umidade), sendo 5 (cinco) no topo da camada e 5 (cinco) na base da camada; Repetir o procedimento adicionando-se 2 (duas) passadas para os totais de 6 passadas, 8 passadas e 10 passadas;

### **3.3.3.2. Ensaio de Controle Realizados Dentro da Área Teste**

Após o término da densificação do material através da passagem do trator de esteiras, retirou-se 10 amostras de cilindros biselados, sendo 5 cilindros no topo e 5 cilindros na base de um mesmo ponto, para determinar o controle do peso específico e umidade do material, totalizando 40 cilindros retirados por camada a ser testada.

Em 1 dos cilindros coletados após cada término da densificação por camada, realizou-se 2 ensaios de compactação pelo método de Hilf, sendo 1 no topo e 1 na base de um mesmo ponto, totalizando a realização de 8 pontos de ensaio de compactação por camada.

## **4**

### **Apresentação, Análise e Discussão dos Resultados de Campo e Laboratório.**

Neste capítulo são apresentados os resultados e as análises obtidos da caracterização do material, dos quais estão em forma de tabelas e gráficos, assim como é feita a interpretação e análise dos mesmos, caracterizando geotecnicamente o material estudado e descrevendo seu comportamento quando compactado.

#### **4.1. Ensaios Realizados no Laboratório da Área Teste**

##### **4.1.1. Ensaios de Caracterização**

Os ensaios de caracterização realizados no resíduo indicam que o material tem em sua composição essencialmente silte + argila (~91% passando na #200) com 9% de areia, com limites de liquidez de 35% e 26% de plasticidade, com baixa plasticidade (IP~10%)

Na Tabela 4-1 apresenta o quadro resumo das porcentagens passantes na peneira de número 200 nos ensaios de granulometria.

Na

Tabela 4-2 apresenta o quadro resumo dos ensaios de teor de umidade, limites de liquidez, limites de plasticidade e de índices de plasticidade nos ensaios de Atteberg.

Tabela 4-1 – Resultado dos ensaios de granulometria

GRANULOMETRIA #200	% SILTE	%AREIA
PISTA 1	90	8
PISTA 2	92	9
PISTA 3	90	10
	91	9

Tabela 4-2 – Resultado dos ensaios de caracterização

CARACTERIZAÇÃO		TEOR DE UMIDADE (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
PISTA 1	AMOSTRA 01	29,20	34	26	8
	AMOSTRA 02	29,10	35	25	10
	AMOSTRA 03	28,60	36	26	10
PISTA 2	AMOSTRA 01	29,20	37	26	11
	AMOSTRA 02	29,00	36	25	11
	AMOSTRA 03	30,10	36	25	11
PISTA 3	AMOSTRA 01	28,80	35	27	8
	AMOSTRA 02	29,20	35	26	9
	AMOSTRA 03	28,80	35	26	9
		29	35	26	10

#### 4.1.2. Ensaio de Compactação Proctor Normal

Os ensaios de compactação proctor normal realizados no resíduo apresentaram uma umidade ótima de 29% e um peso específico seco máximo de 1,52 t/m<sup>3</sup>.

A Tabela 4-3 e a Figura 4-1 apresentam o quadro resumo dos ensaios de compactação proctor normal em laboratório dentro do campo.

Tabela 4-3 – Resultado dos ensaios proctor normal

	W(%) campo	$\delta w$ (%)	W(%) ótima	$\gamma_{seca\ MAX}$ (g/cm <sup>3</sup> )

PISTA 1	AMOSTRA 01	28,84	-0,36	29,20	1,520
	AMOSTRA 02	29,28	-0,42	29,70	1,520
	AMOSTRA 03	27,96	-0,64	28,60	1,510
PISTA 2	AMOSTRA 01	29,12	0,12	29,00	1,520
	AMOSTRA 02	30,00	-0,1	30,10	1,520
	AMOSTRA 03	29,16	-0,04	29,20	1,520
PISTA 3	AMOSTRA 01	28,78	-0,02	28,80	1,550
	AMOSTRA 02	28,54	-0,26	28,80	1,500
	AMOSTRA 03	29,94	0,74	29,20	1,550
				<b>29</b>	<b>1,52</b>

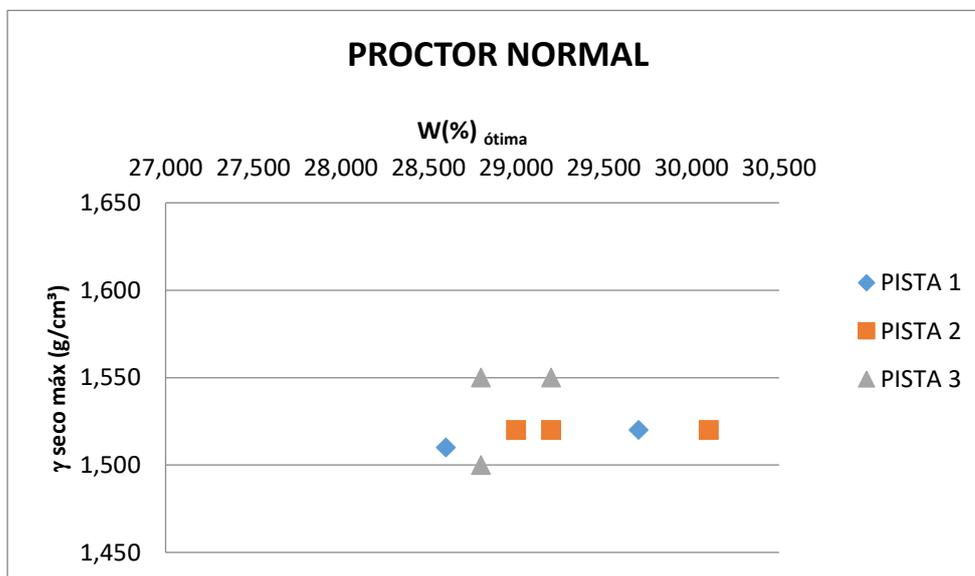


Figura 4-1 – Umidade Ótima (%) x  $\gamma$  seco máximo (g/cm<sup>3</sup>)

#### 4.1.3. Ensaio de Controle Tecnológico de Compactação (Teor de Umidade, Peso Específico e Grau de Compactação)

Os valores indicados nas tabelas e gráficos abaixo correspondem a média das determinações para cada condição de compactação.

##### 4.1.3.1. Pista 1

Os ensaios de Controle de Compactação realizados durante a execução da Pista 1 do aterro experimental estão apresentados na Tabela 4-4 à Tabela 4-8 e na Figura 4-2 à Figura 4-3 apresentando a compilação dos ensaios de controle tecnológicos desta pista.

Tabela 4-4 – Pista 1 – Camada 1 – Controle de Compactação

1° CAMADA	CAMPO		
NÚMERO DE PASSADAS	W(%) <sub>CAMPO</sub>	$\gamma$ seco (g/cm <sup>3</sup> ) <sub>CAMPO</sub>	GC (%)
4	28	1,41	92
6	28	1,42	93
8	26	1,42	94
10	28	1,44	95
<b>MÉDIA</b>	27,48	1,42	94

Tabela 4-5 – Pista 1 – Camada 2 – Controle de Compactação

2° CAMADA	CAMPO		
NÚMERO DE PASSADAS	W(%) <sub>CAMPO</sub>	$\gamma$ seco (g/cm <sup>3</sup> ) <sub>CAMPO</sub>	GC (%)
4	29	1,46	96
6	28	1,46	96
8	28	1,46	96
10	29	1,49	98
<b>MÉDIA</b>	28,25	1,47	97

Tabela 4-6 – Pista 1 – Camada 3 – Controle de Compactação

3° CAMADA	CAMPO		
NÚMERO DE PASSADAS	W(%) <sub>CAMPO</sub>	$\gamma$ seco (g/cm <sup>3</sup> ) <sub>CAMPO</sub>	GC (%)
4	29	1,48	97
6	30	1,48	98
8	29	1,49	98
10	29	1,49	98
<b>MÉDIA</b>	29,23	1,49	98

Tabela 4-7 – Pista 1 – Camada 4 – Controle de Compactação

4° CAMADA	CAMPO		
NÚMERO DE PASSADAS	W(%) <sub>CAMPO</sub>	$\gamma$ seco (g/cm <sup>3</sup> ) <sub>CAMPO</sub>	GC (%)
4	33	1,38	91
6	33	1,39	92
8	33	1,40	92
10	33	1,40	92
<b>MÉDIA</b>	33,08	1,39	92

Tabela 4-8 – Pista 1 – Camada 5 – Controle de Compactação

5° CAMADA	CAMPO		
NÚMERO DE PASSADAS	W(%) <sub>CAMPO</sub>	$\gamma$ seco (g/cm <sup>3</sup> ) <sub>CAMPO</sub>	GC (%)
4	35	1,34	88
6	35	1,37	90

8	37	1,38	91
10	38	1,39	92
<b>MÉDIA</b>	<b>36,38</b>	<b>1,37</b>	<b>90</b>

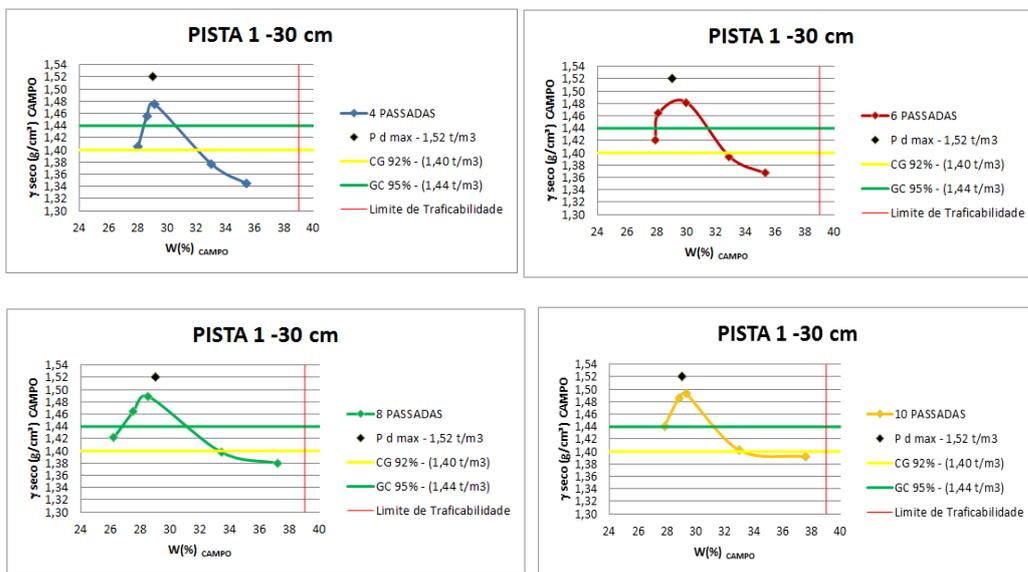


Figura 4-2 – Pista 1 – 4,6,8 e 10 passadas – Umidade (%) x  $\gamma$  seco (g/cm<sup>3</sup>)

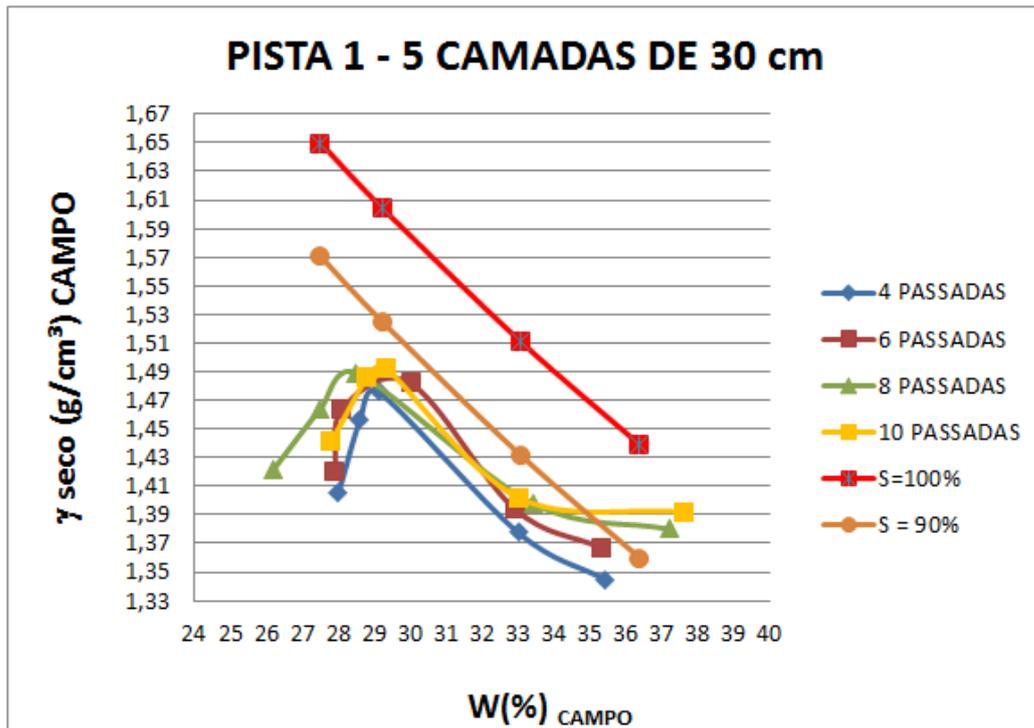


Figura 4-3 – Pista 1 – Umidade (%) x  $\gamma$  seco ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

#### 4.1.3.1.1.

#### Comentários Pista 1 – 0,30m

- Todos os gráficos apresentaram a curva de compactação de campo com forma regular, típica de solos siltosos, com rápida redução de peso específico seco com variação do teor de umidade;
- As umidades ótimas das curvas de campo são semelhantes àquela de laboratório (Proctor Normal), porém os pesos específicos secos máximos são um pouco inferiores;
- Apesar de discreto, há um aumento de Grau de Compactação com o aumento de número de passadas;
- Para umidades de até 4% acima da ótima, a camada de 0,30m apresenta valores de aceitáveis de grau de compactação, sempre acima de 92%, independente do número de passadas;
- Os testes indicam que, para esta espessura de camada e umidade igual ou menor que 4% acima da ótima, o número de 6 passadas seria suficiente

para atingir graus de compactação satisfatórios.

- O limite de trafegabilidade para esta espessura de camada atingiu 7/8% acima da ótima.

#### 4.1.3.2. Pista 2

Os ensaios de Controle de Compactação realizados durante a execução da Pista 2 do aterro experimental estão apresentados na Tabela 4-9 à Tabela 4-12 e na Figura 4-4 a Figura 4-7 apresentando a compilação dos ensaios de controle tecnológicos desta pista.

Tabela 4-9 – Pista 2 – Camada 1 – Controle de Compactação

1° CAMADA	TOPO			BASE		
	CAMPO			CAMPO		
NÚMERO DE PASSADAS	W(%) CAMPO	$\gamma$ seco (g/cm <sup>3</sup> ) CAMPO	GC (%)	W(%) CAMPO	$\gamma$ seco (g/cm <sup>3</sup> ) CAMPO	GC (%)
4	28	1,32	87	28	1,26	83
6	28	1,35	89	27	1,30	85
8	26	1,41	93	27	1,33	87
10	28	1,47	97	27	1,35	89
<b>MÉDIA</b>	27	1,39	91	27	1,31	86

Tabela 4-10 – Pista 2 – Camada 2 – Controle de Compactação

2° CAMADA	TOPO			BASE		
	CAMPO			CAMPO		
NÚMERO DE PASSADAS	W(%) CAMPO	$\gamma$ seco (g/cm <sup>3</sup> ) CAMPO	GC (%)	W(%) CAMPO	$\gamma$ seco (g/cm <sup>3</sup> ) CAMPO	GC (%)
4	31	1,38	91	29	1,28	84
6	29	1,46	96	29	1,32	87
8	28	1,46	96	28	1,34	88
10	28	1,5	99	28	1,4	92
<b>MÉDIA</b>	29	1,45	95	28	1,34	88

Tabela 4-11 – Pista 2 – Camada 3 – Controle de Compactação

3° CAMADA	TOPO			BASE		
	CAMPO			CAMPO		

NÚMERO DE PASSADAS	W(%) CAMPO	$\gamma$ seco (g/cm <sup>3</sup> ) CAMPO	GC (%)	W(%) CAMPO	$\gamma$ seco (g/cm <sup>3</sup> ) CAMPO	GC (%)
4	33	1,45	95	31	1,49	98
6	33	1,46	96	30	1,51	99
8	33	1,48	97	30	1,52	100
10	32	1,50	99	29	1,54	101
<b>MÉDIA</b>	33	1,47	97	30	1,52	100

Tabela 4-12 – Pista 2 – Camada 4 – Controle de Compactação

4º CAMADA	TOPO			BASE		
	CAMPO			CAMPO		
NÚMERO DE PASSADAS	W(%) CAMPO	$\gamma$ seco (g/cm <sup>3</sup> ) CAMPO	GC (%)	W(%) CAMPO	$\gamma$ seco (g/cm <sup>3</sup> ) CAMPO	GC (%)
4	39	1,30	85	32	1,42	94
6	38	1,34	88	32	1,49	98
8	37	1,36	89	31	1,52	100
10	36	1,42	93	31	1,54	101
<b>MÉDIA</b>	37	1,35	89	31	1,49	98

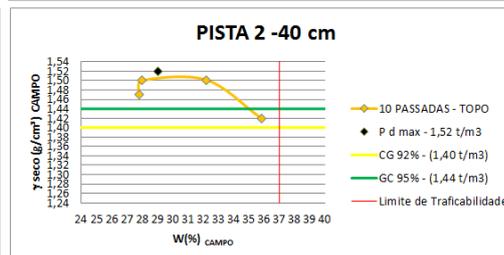
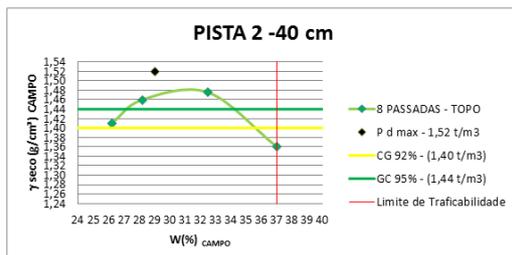
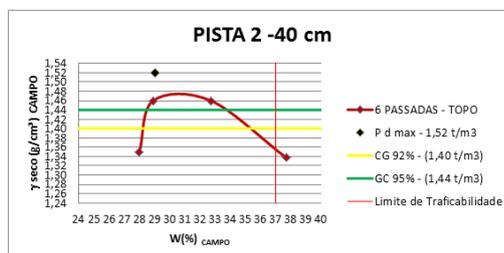
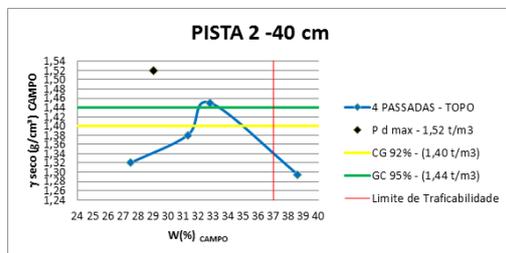


Figura 4-4 – Pista 2 – 4,6,8 e 10 passadas – Umidade (%) x  $\gamma$  seco (g/cm<sup>3</sup>) – TOPO

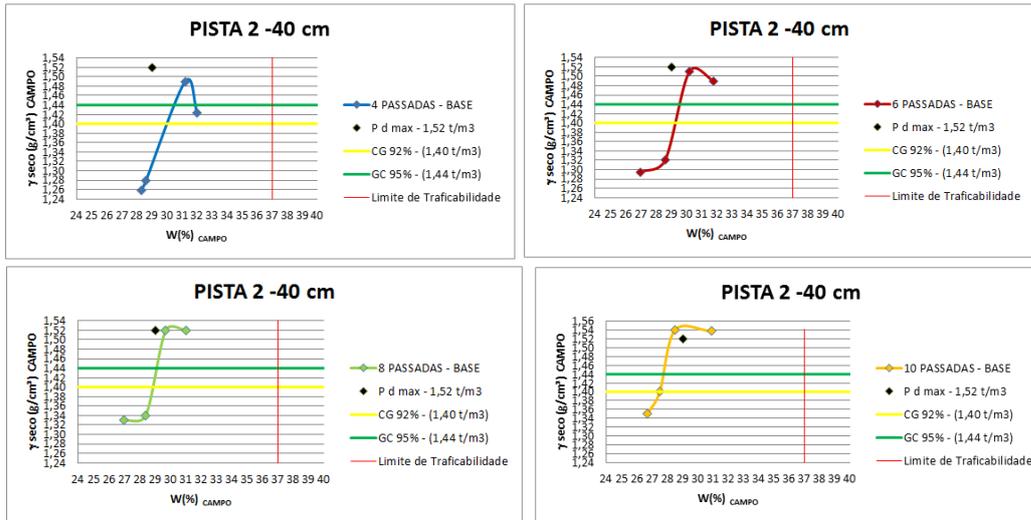


Figura 4-5 – Pista 2 – 4,6,8,10 passadas – Umidade (%) x  $\gamma$  seco (g/cm<sup>3</sup>) – BASE

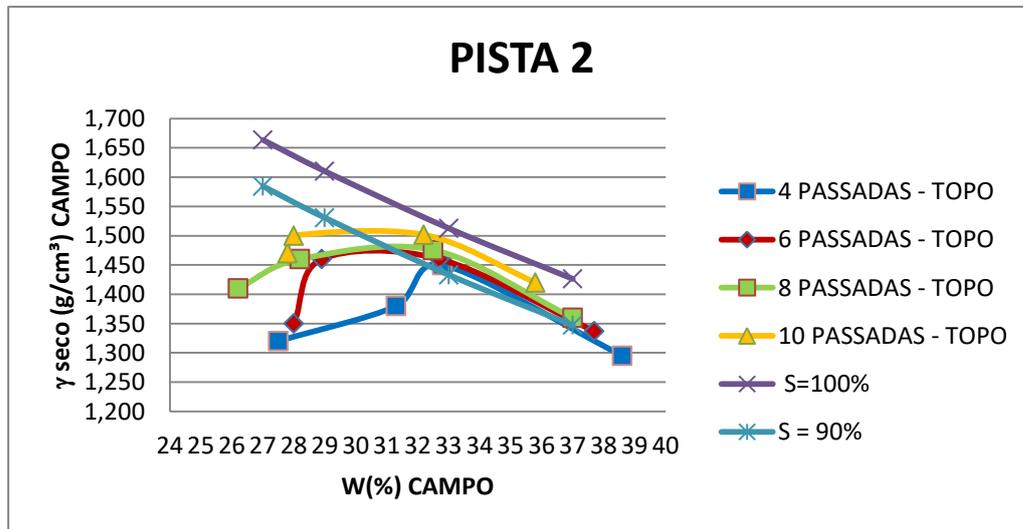


Figura 4-6 – Pista 2 – Umidade (%) x  $\gamma$  seco (g/cm<sup>3</sup>) – TOPO

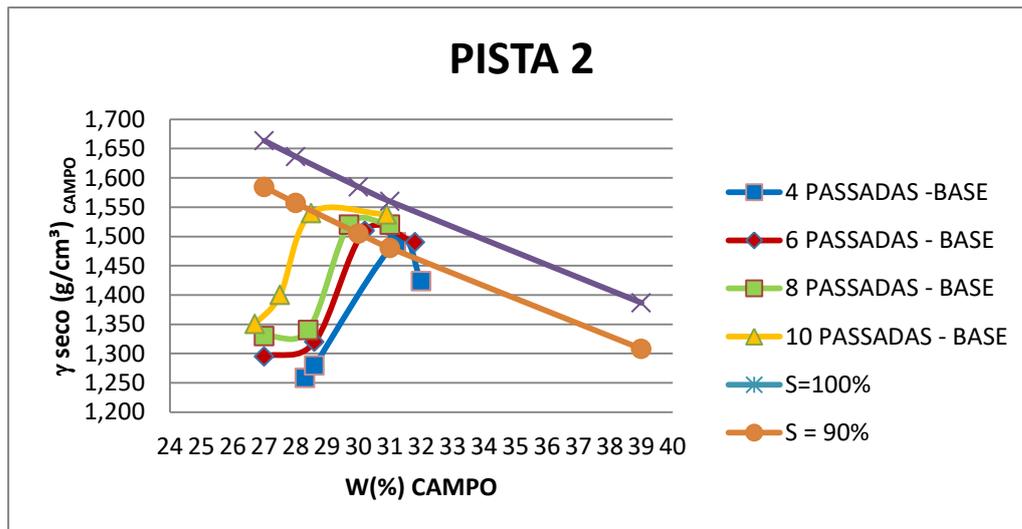


Figura 4-7 – Pista 2 – Umidade (%) x  $\gamma$  seco ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) - BASE

#### 4.1.3.2.1.

##### Comentários Pista 2 – 0,40 m

- Todos os gráficos correspondentes ao topo apresentaram a curva de compactação de campo com forma regular típicas de solos siltosos. Por outro lado, a curva correspondente à base tem forma irregular, apesar de ainda indicarem tendência de pico;
- As umidades ótimas das curvas de campo são superiores àquela de laboratório (Proctor Normal), com os pesos específicos secos máximos um pouco inferiores;
- Para a base e o topo da camada observa-se um aumento significativo de Grau de Compactação com o aumento de número de passadas;
- Esta camada apresenta uma heterogeneidade devido a sua espessura e dificuldade de umedecê-la em campo, por isso os valores de GC para topo e base não apresentam um valor constante, devido às perdas de umidade durante o processo de lançamento e espalhamento deste material;
- Para as camadas 1 e 2 (umidade ótima ou pouco abaixo) registra-se significativo gradiente de compactação, com a base com baixos valores de GC. Para as camadas 3 e 4 tem-se umidades 4 e 8% acima da ótima no topo, porém registram-se umidades bastante inferiores na base,

possivelmente pela secagem durante o espalhamento. Em função destas baixas umidades, observa-se uma inversão, com GC's elevados na base e menores no topo;

- Apesar da heterogeneidade dos resultados acima, observa-se -se que para umidades de até 4% acima da ótima, o topo da camada de 0,40m apresenta valores de grau de compactação acima de 93%, porém requerendo 8 passadas para umidades abaixo da ótima. Na base, os valores de GC são altos apenas quando se tem umidades pouco acima da ótima (camadas 3 e 4);
- O limite de traficabilidade para esta espessura de camada atingiu 7% acima da ótima.

#### 4.1.3.3. Pista 3

Os ensaios de Controle de Compactação realizados durante a execução da Pista 3 do aterro experimental estão apresentados na Tabela 4-13 a Tabela 4-16 e na Figura 4-8 à Figura 4-11 apresentando a compilação dos ensaios de controle tecnológicos desta pista.

Tabela 4-13 – Pista 3 – Camada 1 – Controle de Compactação

1° CAMADA	TOPO			BASE		
	CAMPO			CAMPO		
NÚMERO DE PASSADAS	W(%) CAMPO	$\gamma$ seco (g/cm <sup>3</sup> ) CAMPO	GC (%)	W(%) CAMPO	$\gamma$ seco (g/cm <sup>3</sup> ) CAMPO	GC (%)
4	27	1,36	89	28	1,25	82
6	27	1,43	94	27	1,28	84
8	27	1,45	95	27	1,31	86
10	26	1,47	97	27	1,33	88
<b>MÉDIA</b>	27	1,43	94	27	1,29	85

Tabela 4-14 – Pista 3 – Camada 2 – Controle de Compactação

2° CAMADA	TOPO			BASE		
	CAMPO			CAMPO		

NÚMERO DE PASSADAS	W(%) CAMPO	$\gamma$ seco (g/cm <sup>3</sup> ) CAMPO	GC (%)	W(%) CAMPO	$\gamma$ seco (g/cm <sup>3</sup> ) CAMPO	GC (%)
4	32	1,44	95	31	1,35	89
6	31	1,48	98	31	1,37	90
8	32	1,50	99	29	1,42	93
10	30	1,50	99	28	1,49	98
<b>MÉDIA</b>	31	1,48	97	30	1,41	93

Tabela 4-15 – Pista 3 – Camada 3 – Controle de Compactação

3° CAMADA	TOPO			BASE		
	CAMPO			CAMPO		
NÚMERO DE PASSADAS	W(%) CAMPO	$\gamma$ seco (g/cm <sup>3</sup> ) CAMPO	GC (%)	W(%) CAMPO	$\gamma$ seco (g/cm <sup>3</sup> ) CAMPO	GC (%)
4	36	1,39	91	31	1,4	92
6	36	1,40	92	30	1,44	95
8	35	1,42	93	30	1,48	97
10	34	1,44	95	30	1,52	100
<b>MÉDIA</b>	35	1,41	93	30	1,46	96

Tabela 4-16 – Pista 3 – Camada 4 – Controle de Compactação

4° CAMADA	TOPO			BASE		
	CAMPO			CAMPO		
NÚMERO DE PASSADAS	W(%) CAMPO	$\gamma$ seco (g/cm <sup>3</sup> ) CAMPO	GC (%)	W(%) CAMPO	$\gamma$ seco (g/cm <sup>3</sup> ) CAMPO	GC (%)
4	37	1,33	88	32	1,43	94
6	36	1,40	92	32	1,43	94
8	35	1,38	91	31	1,43	94
10	35	1,38	91	31	1,47	97
<b>MÉDIA</b>	36	1,37	90	31	1,44	95

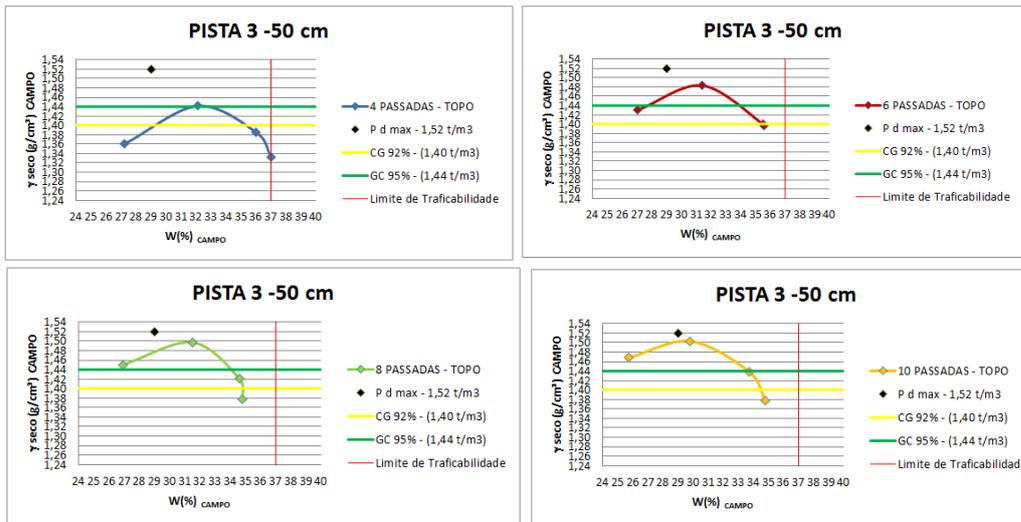


Figura 4-8 – Pista 3 – 4,6,8 e 10 passadas – Umidade (%) x  $\gamma$  seco (g/cm<sup>3</sup>) – TOPO

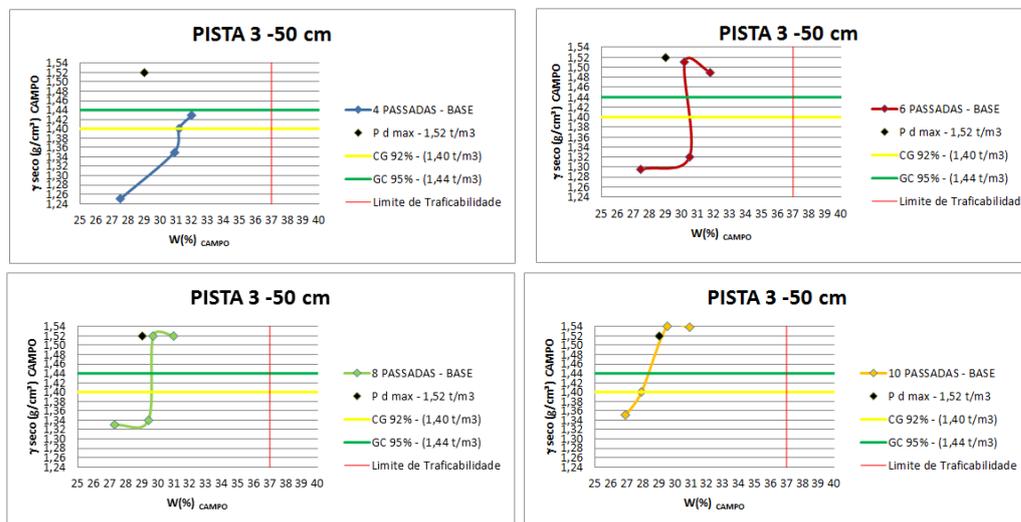


Figura 4-9 – Pista 3 – 4,6,8 e 10 passadas – Umidade (%) x  $\gamma$  seco (g/cm<sup>3</sup>) – BASE

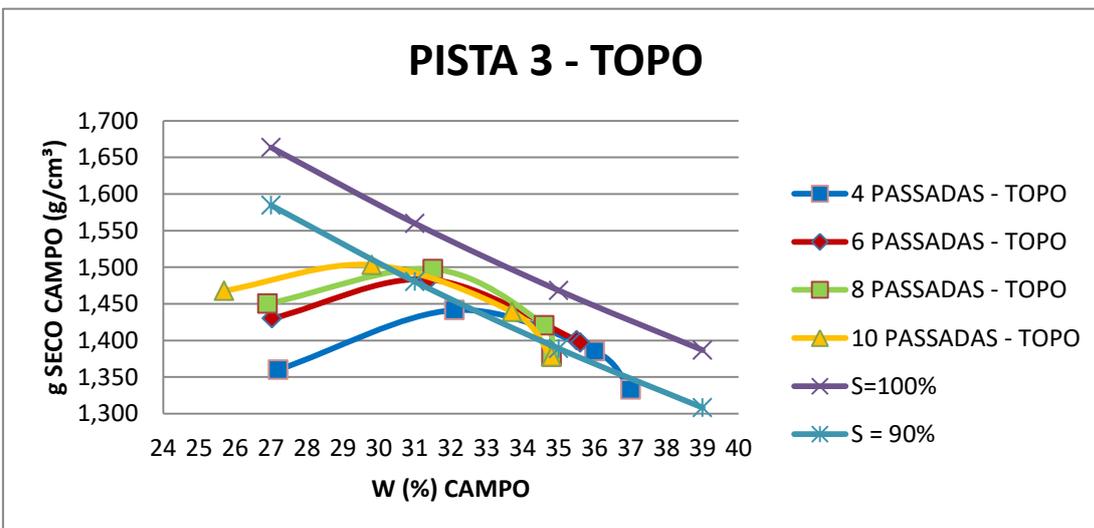


Figura 4-10 – Pista 3 – Umidade (%) x  $\gamma$  seco (g/cm<sup>3</sup>) - TOPO

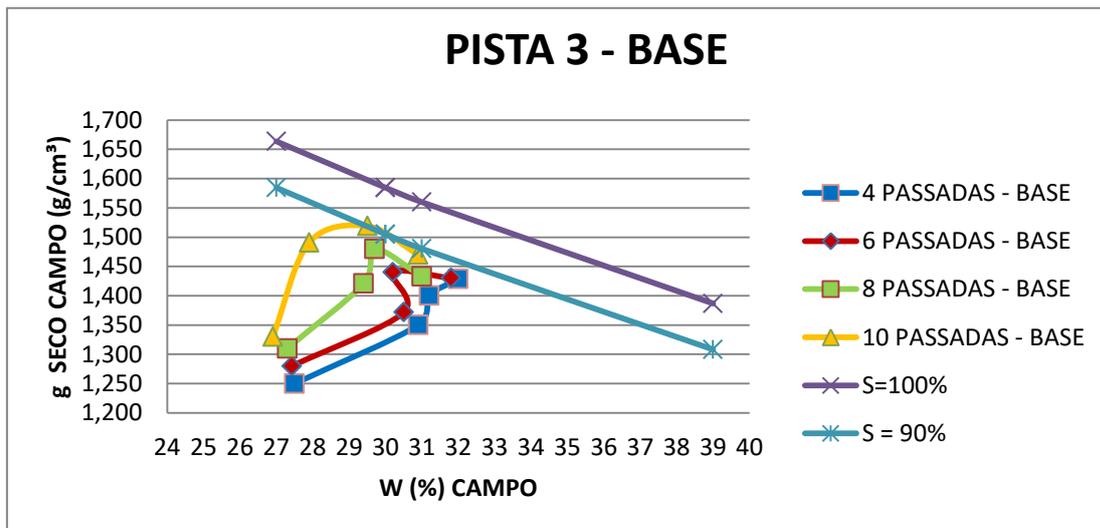


Figura 4-11 – Pista 3 – Umidade (%) x  $\gamma$  seco (g/cm<sup>3</sup>) - BASE

#### 4.1.3.3.1.

##### Comentários Pista 3 – 0,50 m

- Todos os gráficos correspondentes ao topo apresentaram a curva de compactação de campo com forma regular. Por outro lado, a curva correspondente à base tem forma irregular, sem indicarem tendência de pico. Apenas a correspondente a 10 passadas apresenta pico;
- As umidades ótimas das curvas de campo são superiores àquela de laboratório (Proctor Normal), com os pesos específicos secos máximos um pouco inferiores;
- Para a base e o topo da camada observa-se um aumento significativo de Grau de Compactação com o aumento de número de passadas, a exceção sendo os resultados para umidades mais elevadas (camada 4);
- Tal como para espessura de 40 cm, esta camada apresenta uma heterogeneidade devido a sua espessura e dificuldade de umedecê-la em campo, por isso os valores de GC para topo e base não apresentam um valor constante, devido às perdas de umidade durante o processo de lançamento e espalhamento deste material;

- Para as camadas 1 e 2 (umidades pouco acima ou abaixo da ótima) registra-se significativo gradiente de compactação, com a base com baixos valores de GC, mesmo com umidades semelhantes de topo e base. Para as camadas 3 e 4 tem-se umidades 6 e 7% acima da ótima no topo, porém registram-se umidades bastante inferiores na base, possivelmente pela secagem durante o espalhamento. Em função destas baixas umidades, observa-se uma inversão, com GCs elevados na base e menores no topo;
- Apesar dos resultados acima, observa-se que para umidades de até 7% acima da ótima, o topo da camada de 0,50m apresenta valores de grau de compactação acima de 95%, porém requerendo 8 passadas. Na base, os valores de GC são altos apenas quando se tem umidades pouco acima da ótima (camadas 3 e 4) já que devido à secagem observada, não se tem umidade mais elevadas;
- O limite de traficabilidade para esta espessura de camada atingiu 7 a 8% acima da ótima.

#### **4.1.4. Conclusão dos Resultados**

##### **4.1.4.1. Geral**

Durante a execução dos aterros experimentais o resíduo filtrado pelo filtro prensa apresentou na descarga no aterro, teor de umidade em média 2% abaixo da umidade ótima do material na energia Proctor Normal de laboratório, com pequena variação, sendo esta uma condição ideal de recebimento do material no aterro.

Não se tem o registro da umidade de saída no filtro-prensa para avaliar possível perda de umidade no transporte. Porém, de qualquer forma, durante a operação as condições e distancia de transporte serão diferentes e está verificação deverá ser feita oportunamente.

O resíduo estudado foi caracterizado geotecnicaamente através de ensaios de

laboratório. Obteve-se o peso específico médio dos grãos de  $3,020 \text{ g/cm}^3$ , e foi classificado como silte de baixa plasticidade. Entretanto, a classificação granulométrica deverá ser confirmada por ensaios de sedimentação para definição dos teores de silte e de argila.

Os nove ensaios de compactação na energia Proctor Normal realizados com a amostra destorroada apresentaram como resultados médios de peso específico seco máximo de  $1,52 \text{ g/cm}^3$  e umidade ótima de 29,00%.

#### **4.1.4.2. Aterros**

Com relação aos resultados obtidos nos aterros experimentais, têm-se os seguintes comentários e conclusões:

- Pelos resultados encontrados na realização dos aterros experimentais, com a compactação do resíduo em campo com equipamento de esteiras, pode-se observar a boa trabalhabilidade do material na compactação, bem como a obtenção de graus de compactação (com relação a energia do Proctor Normal) razoáveis, respeitados os limites de trafegabilidade e atendimento às condições de homogeneidade dos aterros;
- Em todos os casos, há sempre um crescimento de peso específico seco e grau de compactação (GC) com o número de passadas;
- Os limites de traficabilidade para espalhamento e densificação das camadas é da ordem de 7% acima da ótima, para qualquer das espessuras testadas. Entretanto, o limite de 6% pode ser estabelecido como garantia;
- Para camada com 30cm de espessura, atinge-se grau de compactação adequado para umidades entre - 2% e + 4%, para 6 ou mais de passadas;
- As camadas 40 e 50 cm apresentaram dificuldades de homogeneização da umidade, particularmente para umidades mais elevadas. Diferentes valores de GC são obtidos entre topo e base destas camadas, apesar de complicados pelas perdas de umidades durante o espalhamento. Não

obstante, observa-se que, mesmo para a base da camada de 40cm, mantendo-se a umidade com limite superior de + 4%, e executando 8 passadas, se tem valores aceitáveis de grau de compactação;

- Para espessura de camada de 50 cm, em função da dificuldade de definição da curva de compactação na sua base, não se tem uma clara definição para umidades maiores que 2% acima da ótima. Porém considerando os resultados para o topo da camada admite-se que se poderá atingir GC mim de 92% mesmo na base, considerando 8 passadas de equipamento e umidades inferiores a 4% acima da ótima;
- Recomendações

Pelo exposto acima, tem-se as seguintes recomendações para execução dos aterros com resíduo densificado por passagem de trator de esteiras D6, visando atingir graus de compactação previstos para a camada de reconformação da reabilitação do DRS1:

- Espessura de camada 30 a 40cm;
- Umidades entre aquela da descarga do resíduo e 4% acima da ótima (~33%);
- Número de passadas igual a 8.

#### **4.2. Ensaio Realizados no Laboratório Fora da Área Teste**

A partir campanha de investigações geotécnicas de laboratório realizadas em amostras indeformadas retiradas do aterro experimental construído no DRS1, executado com material do filtro prensa, foi possível a obtenção e a interpretação dos resultados dos ensaios realizados, definindo os parâmetros a serem adotados na caracterização do material proveniente do filtro prensa, na área de propriedade da Hydro-Alunorte - Rodovia - PA – 481 – Barcarena - PA.

A retirada das amostras, para execução das investigações geotécnicas do rejeito filtro prensa compactado foi realizada pela empresa Geomecânica. As

amostras indeformadas talhadas dos blocos indeformados foram coletadas na área teste de acordo com as seguintes características de compactação descritas na Tabela 4-17 com o resumo dos ensaios executados nas amostras deformadas e indeformadas do aterro experimental, construído com material proveniente do filtro prensa.

Tabela 4-17 – Resumo dos ensaios executados nas amostras deformadas e indeformadas do aterro experimental

Bloco	GC (%)	$\Delta w$ (%)	Caracterização	CPN	Adensamento c/ Permeabilidade	CIU	UU	UU PN	k
1	99,8	Wot - 1.1 %	x	x	x	x	x	xx	x
2	84,9	Wot + 2.7 %	x	x	x	x	x	xx	x
3	102	Wot - 3.3 %	x	x	x	x	x		x
4	-	Wot - 1.0 %	x	x					
5	-	Wot + 0.3 %	x	x					
6	-	Wot - 1.1 %	x	x					
7	90,7	Wot + 0.7 %	x	x	x	x	x	x	x
8	96,8	Wot + 4.0 %	x	x		x	x	x	
9	90,8	Wot + 4.6 %	x	x	x			x	x
10	-	Wot + 8.2 %	x	x					
11	96,4	Wot - 1.1 %	x	x	x	x	x	xx	x
12	102,5	Wot - 6.2 %	x	x	x			xx	

k: permeabilidade, CPN: compactação Proctor normal, GC: grau de compactação

Para uma melhor interpretação dos resultados obtidos dos ensaios executados para caracterização da lama vermelha filtrada pelo Filtro Prensa, foram utilizados como referência e comparação os resultados do aterro experimental, realizado em 2015 (FT-2015), utilizando-se resíduo do filtro tambor proveniente da mesma área do resíduo do filtro prensa. Como naquele momento, 2015, não se dispunha de resíduo proveniente do filtro prensa, a construção do aterro experimental foi desenvolvida utilizando-se resíduo do filtro tambor disposto no DRS1. O material foi escavado no próprio reservatório da propriedade da Hydro Alunorte e transportado para as áreas de secagem / tratamento até atingir características próximas à do resíduo do filtro prensa (umidade e teor de sólidos).

A outra referência adotada neste capítulo foi o material pesquisado por Nery et al., (2013) com a compactação da camada de resíduo das valas com 6, 8, 10, 12 e 14 passadas das esteiras de uma escavadeira, com o objetivo de caracterizar a lama vermelha resultante durante o estágio de clarificação do Processo Bayer para produção de alumina (denominado lama vermelha) da refinaria da CBA – Companhia Brasileira de Alumínio, localizada no município de Alumínio – SP, próximo à cidade de Sorocaba. A bauxita utilizada na produção da alumina na

unidade CBA-Alumínio é proveniente de Poços de Caldas e Itamarati de Minas (zona da mata), Minas Gerais.

#### **4.2.1. Ensaio de Caracterização**

O ensaio de caracterização executado em amostras retiradas do aterro experimental executado com material do filtro prensa, mostrou a ocorrência predominante de material silte argiloso com pouca areia fina, cor vermelha.

A Tabela 4-18 apresenta um resumo dos resultados dos ensaios de caracterização e as variações dos índices físicos obtidos nas amostras estão apresentadas a seguir:

Tabela 4-18 – Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização executados nas amostras coletadas do aterro experimental

Local	Amostra	Cota	Posição	Profundidade (m)	Granulometria (%)						Classificação Tátil-Visual	Wnat	$\gamma_0$ (g/cm <sup>3</sup> )	Limites de Atterberg			USCS
					Argila	Silte	Areia			Pedregulho				w <sub>L</sub> (%)	w <sub>P</sub> (%)	IP (%)	
							Fina	Média	Grossa								
DRS 1 - Pista 1	Bloco 01	37,028	No meio da camada	0,30	40%	48%	9%	2,8%	0,2%	0,0%	Silte argiloso com pouca areia fina, cor vermelho.	0,4%	3,071	33%	23%	10%	CL
	Bloco 02	36,170	No meio da camada	1,20	34%	53%	10%	2,7%	0,3%	0,0%	Silte argiloso com pouca areia fina, cor vermelho.	0,6%	3,130	33%	20%	13%	CL
	Bloco 03	35,511	No meio da camada	0,91	35%	51%	11%	2,7%	0,3%	0,0%	Silte argiloso com pouca areia fina, cor vermelho.	0,9%	3,061	32%	20%	12%	CL
DRS 1 - Pista 2	Bloco 04	37,182	Base da camada	0,80	36%	52%	9%	2,6%	0,4%	0,0%	Silte argiloso com pouca areia fina, cor vermelho.	0,2%	3,137	32%	20%	12%	CL
	Bloco 5	36,367	Base da camada	0,80	35%	53%	9%	2,7%	0,2%	0,1%	Silte argiloso com pouca areia fina, cor vermelho.	0,4%	3,008	31%	22%	9%	CL
	Bloco 6	36,349	Base da camada	0,80	43%	46%	8%	2,7%	0,2%	0,0%	Silte argiloso com pouca areia fina, cor vermelho.	0,4%	3,05	33%	19%	14%	CL
	Bloco 7	35,942	Base da camada	1,60	41%	48%	8%	2,8%	0,2%	0,0%	Silte argiloso com pouca areia fina, cor vermelho.	0,9%	3,14	32%	22%	10%	CL
	Bloco 8	36,405	Base da camada	1,20	41%	47%	9%	2,6%	0,4%	0,0%	Silte argiloso com pouca areia fina, cor vermelho.	0,9%	3,072	33%	20%	13%	CL
	Bloco 9	36,119	Base da camada	1,19	46%	40%	10%	3,3%	0,7%	0,0%	Silte argiloso com pouca areia fina, cor vermelho.	0,9%	2,996	33%	19%	14%	CL
	Bloco 10	36,660	Base da camada	1,51	41%	47%	9%	2,6%	0,4%	0,0%	Silte argiloso com pouca areia fina, cor vermelho.	0,2%	3,022	31%	19%	12%	CL
DRS 1 - Pista 03	Bloco 11	36,932	Base da camada	1,00	41%	48%	8%	2,7%	0,3%	0,0%	Silte argiloso com pouca areia fina, cor vermelho.	0,1%	3,058	32%	21%	11%	CL
	Bloco 12	36,415	Base da camada	1,50	37%	51%	9%	2,54%	0,43%	0,0%	Silte argiloso com pouca areia fina, cor vermelho.	0,2%	3,015	31%	21%	10%	CL

#### 4.2.1.1. Granulometria

Em todo material caracterizado foi verificada presença predominante de solo silto-argiloso com pequena quantidade de areia fina. O resultado dos ensaios de granulometria realizados no laboratório dentro da área teste durante a execução do aterro experimental, item 4.1.1, estão coerentes com os resultados apresentados neste item, a porcentagem de material passante na peneira # 200 apresenta a mesma ordem de grandeza em relação aos ensaios executados nos dois laboratórios.

Na Figura 4-12 estão apresentadas as faixas de proporções granulométricas observadas nas duas ocasiões de realização de ensaios de granulometria. No primeiro momento durante a execução das pistas do aterro experimental, laboratório dentro da área teste, e posteriormente no laboratório da Geomecânica, juntamente com os ensaios das amostras indeformadas coletadas junto com os blocos deformados:

<b>LABORATÓRIO DENTRO DA ÁREA TESTE</b>	<b>LABORATÓRIO GEOMECÂNICA</b>
Silte: 51,0 %;	Silte: 40,0 – 53,0 %;
Argila: 40,0 %;	Argila: 34,0 – 46,0 %;
Areia fina: 9,0 %.	Areia fina: 10,9 – 14,0 %.

Figura 4-12 – Faixas de proporções granulométricas

A Figura 4-13 apresenta o conjunto de curvas granulométricas obtidas nas amostras deformadas realizadas no laboratório da Geomecânica, fora da área teste.

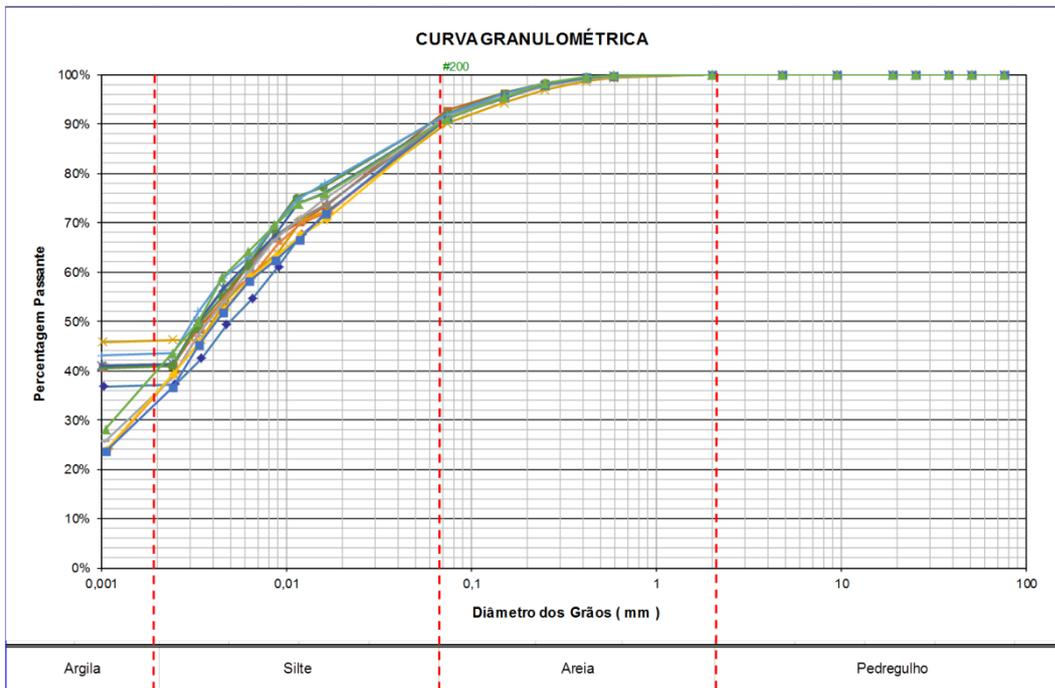


Figura 4-13 – Curvas granulométricas dos ensaios dos blocos coletados

#### 4.2.1.2. Limites de Atterberg

Foram realizados ensaios para determinação dos limites de consistência na amostra deformada do resíduo e também em amostra retirada dos blocos. Os limites de Atterberg obtidos apresentaram as seguintes variações:

LL – 31 a 33 %; tendo como valores médios 32,2%

LP – 19 a 23 %; tendo como valores médios 20,5%

IP – 9 a 13 %, tendo como valores médios 11,7%

Os valores dos limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP) e do índice de plasticidade (IP) encontrados nos ensaios e apresentados classificam o material como silte de baixa plasticidade, conforme a Figura 4-14 que apresenta a carta de plasticidade de Casagrande para a classificação geotécnica do material.

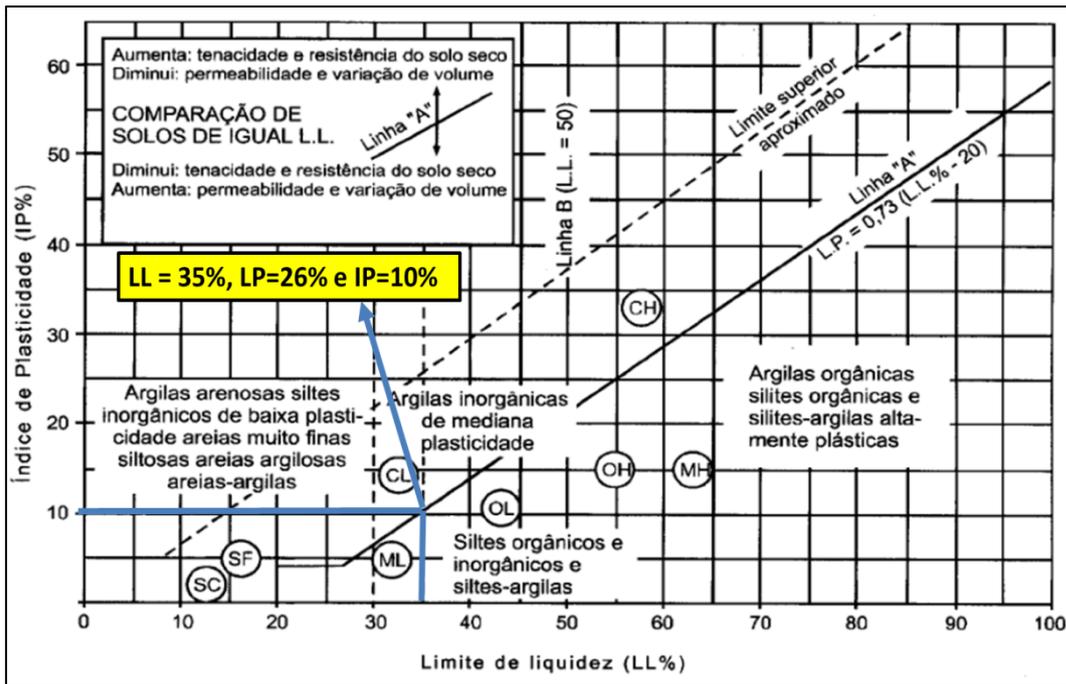


Figura 4-14: Carta de Plasticidade dos ensaios dos blocos coletados

Os resultados aqui apresentados estão coerentes com os resultados de limites obtidos no laboratório dentro da área teste e que estão apresentados no item 4.1.1 desta dissertação, em que apresentação os seguintes índices: LL = 35%, LP=26% e IP=10%.

#### 4.2.1.3. Densidade Específica Real dos Grãos

O peso específico dos grãos (ou dos sólidos) ( $\gamma_s$ ) consiste na relação entre o peso das partículas sólidas e o seu volume. Foi determinado o peso específico dos grãos a partir da amostra deformada e de amostra retirada dos blocos. Os valores de peso específico dos sólidos obtidos para cada amostra estão apresentados na Tabela 4-18. Não houve uma grande variabilidade dos valores encontrados da densidade real dos grãos. O peso específico médio dos grãos encontrado para o resíduo foi de:

$$\gamma_g = 2,996 \text{ a } 3,140 \text{ g/cm}^3, \text{ tendo como valor médio } 3,063 \text{ g/cm}^3.$$

#### 4.2.1.4. Peso Específico Total

Com base nos dados dos ensaios triaxiais e ensaios de adensamento constatou-se que o peso específico das amostras foi sensível à qualidade da compactação.

- Material bem compactado ( $1,56 < \gamma_d < 1,65$ ): 1,95 a 2,24 g/cm<sup>3</sup> (Ex: Blocos 1/Pista 1; 12/ Pista 3);
- Material medianamente compactado ( $\gamma_d = 1,45$  g/cm<sup>3</sup>): 1,88 a 1,91 g/cm<sup>3</sup> (Ex: Bloco 9/Pista 2);
- Material baixa compactação ( $\gamma_d = 1,37$  g/cm<sup>3</sup>): 1,75 a 1,82 g/cm<sup>3</sup> (Ex: Bloco 2/Pista 1).

#### 4.2.1.5. Índice de Vazios

Da mesma forma que o peso específico, os índices de vazios também foram sensíveis à qualidade da compactação.

- Material bem compactado: 0,82 a 0,93 (Ex: Blocos 1/Pista 1, 11 e 12/ Pista 3);
- Material medianamente compactado: 1,02 a 1,03 (Ex: Bloco 9/Pista 2);
- Material baixa compactação: 1,15 a 1,24 (Ex: Bloco 2/Pista 1).

#### 4.2.1.6. Umidade Natural

Foram realizadas 12 determinações de umidade natural, uma por bloco. Os valores de umidade medidos foram da ordem de 23,2 a 31,1%, tendo como valor médio 26,9%. Para obtenção deste parâmetro foram excluídos os resultados dos blocos 10 e 12, apresentados na Tabela 4-18, discrepante dos demais.

#### 4.2.1.7. Resumo dos Ensaio de Caracterização

O material analisado é bastante homogêneo, e apresenta ocorrência predominante de material silte argiloso com pouca areia fina, cor vermelho. Como os valores da densidade especifica real dos grãos foram pouco variáveis adotou-se o valor 3,0 g/cm<sup>3</sup>.

As amostras analisadas apresentaram baixos valores de limites de liquidez (31 a 33%) e plasticidade (19 a 23%).

Conforme comentado nos itens 4.2.1.4 e 4.2.1.5, os valores do peso específico e índices de vazios foram sensíveis quanto à qualidade de compactação dos aterros.

Com base nestes dados, adotou-se os valores de peso específico de 2,0, 1,9 e 1,8 g/cm<sup>3</sup>, para aterros com boa, mediana e baixa compactação, respectivamente.

Na Tabela 4-19 apresenta um resumo dos ensaios de caracterização realizados nas amostras indeformadas (blocos).

Tabela 4-19 – Resultado dos ensaios de caracterização realizado nos blocos coletados.

Local	Amostra	Granulometria (%)			w (%)	Limites de Atterberg (%)		
		Argila	Silte	Areia		LL	LP	IP
Pista 1	Bloco 1	40	48	12	24,9	33	23	10
	Bloco 2	34	53	13	29,2	33	20	13
	Bloco 3	35	51	14	23,2	32	20	12
Pista 2	Bloco 4	36	52	12	25,5	32	20	12
	Bloco 5	35	53	11,9	26,8	31	22	9
	Bloco 6	43	46	10,9	25,4	33	19	14
	Bloco 7	41	48	11	27,2	32	22	10
	Bloco 8	41	47	12	30,5	33	20	13
	Bloco 9	46	40	14	32,1	33	19	14
Pista 3	Bloco 10	41	47	12	18,3	31	19	12
	Bloco 11	41	48	11	25,4	32	21	11
	Bloco 12	37	51	12	20,3	31	21	10

Comparando os resultados de caracterização obtidos nesta pesquisa com os encontrados nos estudos do Filtro Tambor realizados em 2015 (FT-2015) e por Nery et al., (2013), temos as seguintes comparações apresentadas na Tabela 4.20:

Tabela 4-20 – Comparação do ensaios de caracterização realizado no resíduo de bauxita densificado.

	Gs (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma$ (g/m <sup>3</sup> )	Granulometria	W <sub>natural</sub> (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Neves 2017	3,0	1,9	Silte Argiloso pouco Arenoso	27	32	20	12
FT - 2015	2,9	1,9	Silte Argiloso pouco Arenoso	43	32	18	14
Nery 2013	2,8	1,9	Silte pouco Argiloso Arenoso	34	39	30	9

O material estudado apresenta uma característica similar com os demais executados em datas anteriores, o material pesquisado em 2015, FT-2015, apresenta uma umidade natural maior que os demais por ser de origem do filtro tambor e seco naturalmente, sem a filtragem por filtro prensa. O material pesquisado por Nery et al., (2013) apresenta poucas diferenças de caracterização em relação aos demais, podendo estas diferenças estarem relacionadas a diferentes jazidas de bauxita.

#### 4.2.2. Ensaio de Compactação Proctor Normal

Os ensaios de compactação foram realizados na amostra deformada, utilizando-se a energia de compactação Proctor Normal, conforme padronizado pela NBR - 7182 (ABNT, 1986).

Na Tabela 4-21 estão apresentados os resultados dos ensaios de compactação Proctor Normal realizados em amostras preparadas com material do filtro prensa, coletado junto aos blocos.

Tabela 4-21: Resultado dos ensaios de compactação Proctor Normal realizado nos blocos coletados.

Local	Amostra	$\gamma_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	W <sub>ot</sub> (%)
Pista 1	Bloco 1	1,613	26,5
	Bloco 2	1,610	26,0
	Bloco 3	1,598	27,2
Pista 2	Bloco 4	1,594	27,2
	Bloco 5	1,639	26,2
	Bloco 6	1,620	26,5
	Bloco 7	1,613	26,7
	Bloco 8	1,613	26,7
	Bloco 9	1,610	26,3
Pista 3	Bloco 10	1,619	26,3
	Bloco 11	1,628	26,7
	Bloco 12	1,623	26,1

#### 4.2.2.1.

##### Peso Específico Seco Máximo

- $\gamma_{dmax}$ : 1,594 a 1,639 g/cm<sup>3</sup>

Tanto a média quanto a tendência apontam o valor 1,61g/cm<sup>3</sup> como representativo, valor pouco superior à média dos valores de peso específico seco máximo (1,52g/cm<sup>3</sup>) apresentado nos estudos geotécnicos de laboratório de campo, item 4.1.2.

#### 4.2.2.2.

##### Umidade Ótima

- W<sub>ot</sub>: 26,0 a 27,2 %

Tanto a média quanto a tendência apontam o valor 26,5% como representativo, valor inferior à média dos valores da umidade ótima (29%) apresentados nos estudos geotécnicos de laboratório de campo, item 4.1.3.

Considerando os valores de peso específico total e o teor de umidade medidos nos blocos e nos corpos-de-prova de cada bloco, tem-se na Tabela 4-22 um resumo das condições de compactação de cada bloco, referidos aos ensaios de compactação Proctor Normal na Tabela 4-21.

Tabela 4-22 – Resumo das condições de compactação de cada bloco referente aos ensaios de compactação Proctor Normal.

Amostra	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Wot (%)	GC	$\Delta w$ (%)
Bloco 1	20.22 ***	24.9**	16.18***	16.13*	26.5*	100,3	Wot - 1.6
	20.31+		16.65+			97	
	20.50++		16.49++			102,2	
Bloco 2	17.65 ***	29.2**	13.66***	16.10*	26.0*	84,8	Wot + 2.7
	17.65+		13.69+			85	
Bloco 3	-	23.2**	16.31+	15.98*	27.2*	102	Wot - 3.3
	20.09+		16.31+			102,1	
Bloco 4	-	25.5**	-	15.94*	27.2*	-	Wot - 1.0
Bloco 5	-	26.8**	-	16.39*	26.2*	-	Wot + 0.3
Bloco 6	-	25.4**	-	16.20*	26.5*	-	Wot - 1.1
Bloco 7	19.02***	27.2**	14.94***	16.13*	26.7*	92,6	Wot + 0.7
	18.18+		14.32+			88,8	
Bloco 8	20.12***	30.5**	15.62***	16.13*	26.7*	96,8	Wot + 4.0
Bloco 9	19.07+	31.1**	14.55+	16.10*	26.3*	90,4	Wot + 4.6
	19.1++		14.66+			91,1	
Bloco 11	20.62***	25.4**	16.52***	16.28*	26.7*	101,5	Wot - 1.1
	18.82+		14.85+			91,2	
Bloco 12	20.52***	20.3**	16.72***	16.23*	26.1*	103	Wot - 6.2
	20.44.		16.55+			102	

\* Valores extraídos dos ensaios de compactação Proctor Normal;

\*\* Valores extraídos dos ensaios de caracterização;

\*\*\* Valores extraídos dos ensaios Triaxiais CIU;

+ Valores extraídos dos ensaios de adensamento oedométrico;

++ Valores extraídos dos ensaios Triaxiais UU PN.

#### 4.2.2.3. Resumo dos Ensaios de Compactação

Segundo os resultados dos ensaios de compactação Proctor Normal pode-se utilizar como parâmetros de projeto peso específico seco máximo de 1,6 g/cm<sup>3</sup> e umidade ótima igual a 26,5%, conforme apresentados na Tabela 4-23

Tabela 4-23 – Resultado dos ensaios de compactação Proctor Normal.

Ensaio Proctor Normal	
Wot (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (g/cm <sup>3</sup> )
26,5	1,6

Comparando os resultados de compactação obtidos nesta pesquisa com os encontrados por Nery et. al, (2013) e nos estudos do Filtro Tambor realizados em 2015 (FT-2015), temos as seguintes comparações apresentadas na Tabela 4-24:

Tabela 4-24 – Comparação do ensaios de compactação realizado no resíduo de bauxita densificado.

	Ensaio Proctor Normal	
	Wot (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (g/cm <sup>3</sup> )
<b>Neves 2017</b>	26,5	1,6
<b>FT - 2015</b>	27,3	1,3
<b>Nery 2013</b>	32	1,4

O material estudado apresenta uma característica similar com os demais executados em datas anteriores. O material pesquisado por Nery et. al, (2013) apresenta uma umidade ótima um pouco superior as demais, podendo esta diferença esta relacionada ao fato desta bauxita ser de uma jazida localizada na região Sudeste diferente das demais, que estão localizadas na região Norte do País.

A Figura 4-15 apresenta a comparação de resultados dos ensaios de compactação realizados em amostras representativas do rejeito de minério e rejeito de alumina.

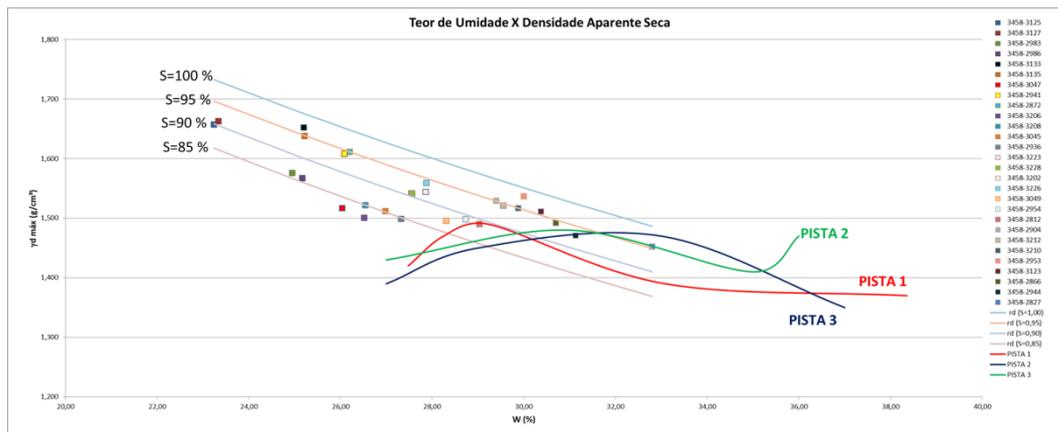


Figura 4-15: Comparação dos rejeitos de minério e alumina

### **4.2.3. Ensaio de Adensamento com Medida de Permeabilidade**

A Tabela 4-25 apresenta um quadro resumo com os resultados dos ensaios de adensamento oedométrico com medida de permeabilidade realizados nas amostras indeformadas coletadas no aterro experimental. Da mesma forma que o peso específico, os ensaios de adensamento com medida de permeabilidade também foram sensíveis à qualidade da compactação, sendo assim separou-se os blocos de acordo com o seu valor de compactação, conforme apresentado nos itens a seguir.

Tabela 4-25 – Resumo do ensaios de adensamento oedométrico com medida de permeabilidade

Local	Amostra	Cota	Posição	Profundidade (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$e_0$	$w_l$ (%)	$w_r$ (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$C_c$	$C_r$	$C_e$	$\sigma'_{vm}$ (kPa)	$e_{\sigma'_{vm}}$	Permeabilidade	
															Pressão (kPa)	$k_{20}$ (cm/s)
DRS 1 - Pista 1	0	37,028	No meio da camada	0,30	20,307	0,93	29,8	31,0	15,647	0,19	0,08	0,12	50,00	0,87	50	4,96E-06
															100	2,81E-06
															197	7,88E-07
															397	7,79E-09
	0	36,170	No meio da camada	1,20	17,654	1,24	28,9	32,4	13,694	0,28	0,11	0,10	65,00	1,16	50	5,24E-06
															100	1,08E-06
															197	2,46E-08
															398	7,84E-09
	0	36,768	No meio da camada	0,91	20,089	0,84	23,2	27,9	16,311	0,12	0,06	0,10	80,00	0,80	50	1,06E-06
															101	5,01E-07
															198	1,49E-07
															401	1,36E-08
DRS 1 - Pista 2	0	36,405	Base da camada	1,60	18,179	1,15	26,9	29,8	14,323	0,27	0,10	0,15	73,00	1,05	49	3,79E-06
															99	3,75E-06
															195	1,72E-06
															394	1,34E-06
	0	36,119	Base da camada	1,19	19,077	1,02	31,1	31,3	14,548	0,27	0,06	0,15	120,00	0,96	51	5,0E-06
															102	9,4E-07
															201	4,3E-07
															407	3,2E-08
DRS 1 - Pista 3	0	36,932	Base da camada	1,00	18,820	1,03	26,7	28,4	14,853	0,12	0,07	0,08	50,00	0,97	50	5,7E-06
															100	7,2E-07
															200	9,6E-08
															400	6,2E-08
	0	36,415	Base da camada	1,50	20,435	0,82	23,5	29,6	16,551	0,16	0,04	0,10	60,00	0,78	50	5,5E-06
															99	1,0E-06
															200	1,5E-07
															399	7,5E-08

#### **4.2.3.1. Material Bem Compactado – Blocos 1, 3 e 12**

Nestes blocos observamos a seguinte variação de parâmetros:

Cc: 0,12 a 0,19;

Cr: 0,04 a 0,08;

Cr/Cc: 0,25 a 0,50

Cv:  $3,90 \times 10^{-3}$  a  $4,69 \times 10^{-2}$  cm<sup>2</sup>/s;

K20 ( $\sigma \sim 100$  kPa):  $5,01 \times 10^{-7}$  a  $2,81 \times 10^{-6}$  cm/s.

As tensões de pré-adensamento dos blocos 1,3 e 12 são, respectivamente, 50, 80 e 60 kPa.

#### **4.2.3.2. Material Mediamente Compactado – Blocos 9 e 11**

Nestes blocos observamos a seguinte variação de parâmetros:

Cc: 0,12 a 0,27;

Cr: 0,06 a 0,07;

Cr/Cc: 0,22 a 0,58

Cv:  $6,67 \times 10^{-3}$  a  $6,73 \times 10^{-2}$  cm<sup>2</sup>/s;

K20 ( $\sigma \sim 100$  kPa):  $7,2 \times 10^{-7}$  a  $9,4 \times 10^{-7}$  cm/s.

As tensões de pré-adensamento dos blocos 9 e 11 são, respectivamente, 120 e 50 kPa.

#### **4.2.3.3. Material Pouco Compactado – Blocos 2 e 7**

Nestes blocos observamos a seguinte variação de parâmetros:

Cc: 0,27 a 0,28;

Cr: 0,10 a 0,11;

Cr/Cc: 0,37 a 0,39

Cv:  $1,20 \times 10^{-2}$  a  $2,68 \times 10^{-2}$  cm<sup>2</sup>/s;

K20 ( $\sigma \sim 100$  kPa):  $1,08 \times 10^{-6}$  a  $3,75 \times 10^{-6}$  cm/s.

As tensões de pré-adensamento dos blocos 2 e 7 são, respectivamente, 65 e 73 kPa.

#### 4.2.3.4. Resumo dos Ensaios de Adensamento

Os ensaios de adensamento com medida de permeabilidade também foram sensíveis à qualidade da compactação. Os valores dos coeficientes de compressibilidade  $C_c$  apresentaram uma variação de 0,12 a 0,28, em função da qualidade de compactação da amostra. Amostras bem compactadas apresentaram  $C_c$  de 0,12 a 0,19, enquanto que aquelas amostras com baixa compactação apresentaram  $C_c$  na ordem de 0,28. Os coeficientes de recompressão  $C_r$  foram menos sensíveis, estes variaram de 0,04 a 0,11.

A partir dos ensaios de adensamento foram observados coeficientes de adensamento vertical variando de  $3,81 \times 10^{-3}$  a  $6,73 \times 10^{-2}$   $\text{cm}^2/\text{s}$ , no trecho de compressão virgem, tendo como valor médio  $2,72 \times 10^{-2}$   $\text{cm}^2/\text{s}$ .

Comparados aos dados nos estudos geotécnicos de laboratório no resíduo do Filtro Tambor (FT-2015), vemos que o intervalo de valores dos coeficientes de compressibilidade ( $0,30 < C_c < 0,65$ ) são superiores ao encontrados na presente campanha, os índices de vazio iniciais apresentam-se com intervalo de valores característico de amostras com possível baixa compactação ( $1,00 < e_0 < 1,20$ ).

A permeabilidade média do material ensaiado nos estudos FT-2015 aponta um valor da ordem de  $2,25 \times 10^{-6}$   $\text{cm}/\text{s}$ , compatível com o intervalo de valores dos materiais com possível baixa compactação. Assim como nos ensaios de permeabilidade, a média dos coeficientes de adensamento vertical do material ensaiado nos estudos FT-2015 aponta um  $C_v$  da ordem de  $1,0 \times 10^{-2}$   $\text{cm}^2/\text{s}$ , também compatível com o intervalo de valores dos materiais com possível baixa compactação.

Comparando os resultados de adensamento obtidos nesta pesquisa com os encontrados por Nery et al. (2013) e nos estudos do Filtro Tambor realizados em 2015 (FT-2015), temos as seguintes comparações apresentadas na Tabela 4-26:

Tabela 4-26 – Comparação dos ensaios de adensamento realizado no resíduo de bauxita densificado.

	Ensaio Adensamento			
	Cc	Cr	e <sub>0</sub>	Cv
<b>Neves 2017</b>	0,12 - 0,28	0,04 - 0,11	0,82 - 1,24	4X 10 <sup>-3</sup> - 7X 10 <sup>-2</sup>
<b>FT - 2015</b>	0,30 - 0,65	0,04 - 0,8	1,00 - 1,20	1X 10 <sup>-2</sup>
<b>Nery 2013</b>	0,13 - 0,32	0,025 - 0,045	0,96 - 1,18	1X 10 <sup>-5</sup> - 8X 10 <sup>-6</sup>

A diferença de valores encontrados nos estudos comparados pode estar relacionada com a qualidade de compactação de cada pesquisa. As pesquisas referenciadas adotaram diferentes metodologias de compactação, diferenciando o número de passadas e o tipo de maquinário para compactação de cada camada.

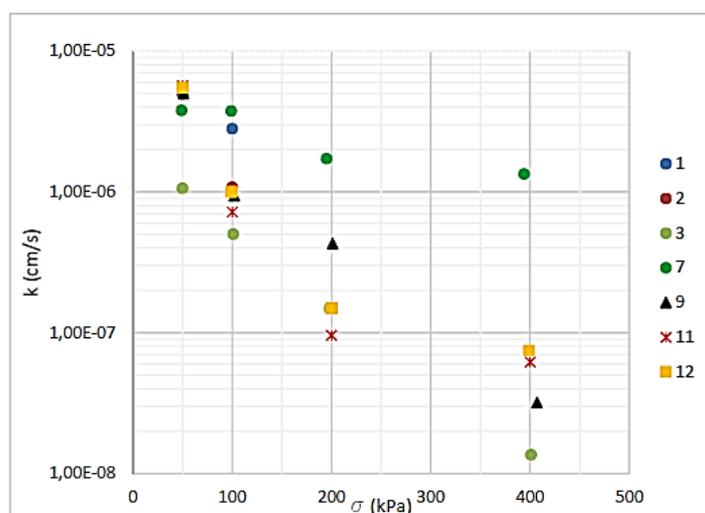
#### 4.2.4. Permeabilidade com Carga Variável

A partir dos ensaios de permeabilidade com carga variável, observou-se valores de permeabilidade média variou entre  $3,56 \times 10^{-6}$  a  $1,7 \times 10^{-6}$  cm/s, conforme se observa na Tabela 4-27.

Tabela 4-27 – Resumo dos ensaios de permeabilidade com carga variável.

Tempo (s)	Amostras					
	Bloco 1	Bloco 2	Bloco 7	Bloco 9	Bloco 11	Bloco 12
0	-	-	-	-	-	-
1800	2,02E-06	3,89E-06	3,05E-06	3,58E-06	3,75E-06	5,42E-06
3600	2,03E-06	3,92E-06	3,07E-06	3,61E-06	3,78E-06	2,74E-06
5400	2,04E-06	3,96E-06	3,09E-06	3,64E-06	3,67E-06	2,76E-06
5880	-	-	-	-	-	3,30E-06
7200	2,05E-06	3,99E-06	3,12E-06	3,67E-06	3,70E-06	2,58E-06
9000	2,06E-06	4,03E-06	3,02E-06	3,70E-06	3,73E-06	2,54E-06
10800	2,07E-06	4,07E-06	3,05E-06	3,72E-06	3,61E-06	2,55E-06
12600	1,95E-06	3,83E-06	3,07E-06	3,75E-06	3,64E-06	2,57E-06
14400	1,96E-06	-	3,09E-06	3,78E-06	3,52E-06	2,59E-06
14760	-	3,69E-06	-	-	-	-
14880	-	-	-	-	-	-
16200	-	-	3,12E-06	3,81E-06	-	-
18000	1,97E-06	-	-	-	-	-
19800	-	-	3,03E-06	3,47E-06	-	-
21600	-	-	-	-	-	-
22200	1,92E-06	-	-	3,51E-06	-	-
22500	-	-	2,64E-06	-	-	-
25200	1,20E-06	-	-	-	-	-
29100	1,18E-06	-	-	-	-	-
<b>Média</b>	<b>1,70E-06</b>	<b>3,56E-06</b>	<b>2,69E-06</b>	<b>3,25E-06</b>	<b>3,26E-06</b>	<b>2,70E-06</b>

#### 4.2.4.1. Resumo dos Ensaios de Permeabilidade



Bloco	GC	Dw (%)
1	99,8	W <sub>ot</sub> - 1,6
2	84,9	W <sub>ot</sub> + 2,7
3	102,0	W <sub>ot</sub> - 3,3
7	90,7	W <sub>ot</sub> + 0,7
9	90,8	W <sub>ot</sub> + 4,6
11	96,4	W <sub>ot</sub> - 1,1
12	102,5	W <sub>ot</sub> - 6,2

Figura 4-16 - Resultado dos ensaios de permeabilidade

Na Figura 4-16 apresentam os resultados dos ensaios de permeabilidade com carga variável, observa-se valores de permeabilidade variando de  $3,56 \times 10^{-6}$  a  $1,7 \times 10^{-6}$  cm/s, com valor médio de permeabilidade na ordem de  $3 \times 10^{-6}$  cm/s, muito próximo da média encontrada no ensaio de adensamento com medida de permeabilidade, apesar da diferença dos níveis de tensões. Desta forma, a atribuição do valor  $k$  igual  $2 \times 10^{-6}$  cm/s é apropriada para ser adotada para o material de estudo dessa pesquisa.

As amostras compactadas utilizadas nos ensaios de permeabilidade com carga variável nesta pesquisa apresentam-se menos permeáveis (valores entre  $1,70 \times 10^{-6}$  a  $3,56 \times 10^{-6}$  cm/s, com média em torno de  $2,90 \times 10^{-6}$  cm/s) quando comparados aos estudos realizados com o FT-2015, quando obtiveram coeficientes de permeabilidade na faixa de  $1,15 \times 10^{-5}$  a  $3,13 \times 10^{-5}$  cm/s, com média em torno de  $2,50 \times 10^{-5}$  cm/s.

Comparando os resultados de permeabilidade obtidos nesta pesquisa com os encontrados por Nery et. al, (2013) e nos estudos do Filtro Tambor realizados em 2015 (FT-2015), temos as seguintes comparações apresentadas na Tabela 4-28:

Tabela 4-28 – Comparação dos ensaios de permeabilidade realizado no resíduo de bauxita densificado.

	<b>Ensaio de Permeabilidade</b>
	<b>k (cm/s)</b>
<b>Neves 2017</b>	$3 \times 10^{-6}$
<b>FT - 2015</b>	$2,5 \times 10^{-5}$
<b>Nery 2013</b>	$2 \times 10^{-7}$

A razão para esta discrepância, em torno de 10 vezes, pode estar associada às diferentes estruturas criadas pelas compactações de campo com o Filtro Tambor em 2015 e o Filtro Prensa em 2016. Já a diferença em torno de 20 vezes entre o material desta pesquisa para o de Nery 2013, pode estar relacionada à qualidade da compactação adotada para cada pesquisa ou a diferença de jazida (Nery 2013 – jazida de MG e Neves 2016- jazida do PA), devido ao fato da bauxita ser um material de composição heterogênea.

#### 4.2.5. Ensaio Triaxial CIU sat

Com base nos dados apresentados na Tabela 4-29, construiu-se os gráficos apresentados na Figura 4-17 e Figura 4-18, onde são apresentados os círculos de Mohr e as envoltórias de resistência em tensões efetivas para os ensaios realizados com o Filtro Tambor e o Filtro Prensa.

Na Tabela 4-29 estão apresentados os resultados dos ensaios triaxiais CIU sat, na condição de ruptura.

Tabela 4-29 – Ensaio Triaxiais CIUsat na condição de ruptura.

Bloco	$\sigma_{f1}$ (kPa)	$\sigma_{f3}$ (kPa)	$\Delta u_f$ (kPa)	$p'$ (kPa)	$q$ (kPa)
1	720	180	-130	450	270
	710	183	-83	447	264
	842	208	-8	525	317
	1480	351	49	916	565
2	118	30	20	74	44
	220	34	66	127	93
	373	103	97	238	135
	610	163	237	387	224
7	218	52	-2	135	83
	221	54	46	138	84
	425	112	78	269	157
	631	182	218	407	225
8	138	39	11	89	50
	208	59	41	134	75
	713	199	1	456	257
	843	225	185	534	309
11	445	83	-33	214	131
	809	166	-66	488	322
	1186	286	-86	736	450
	1554	354	46	954	600
12	609	169	-119	389	220
	979	227	-127	603	376
	904	220	-20	562	342
	1810	464	-64	1137	673

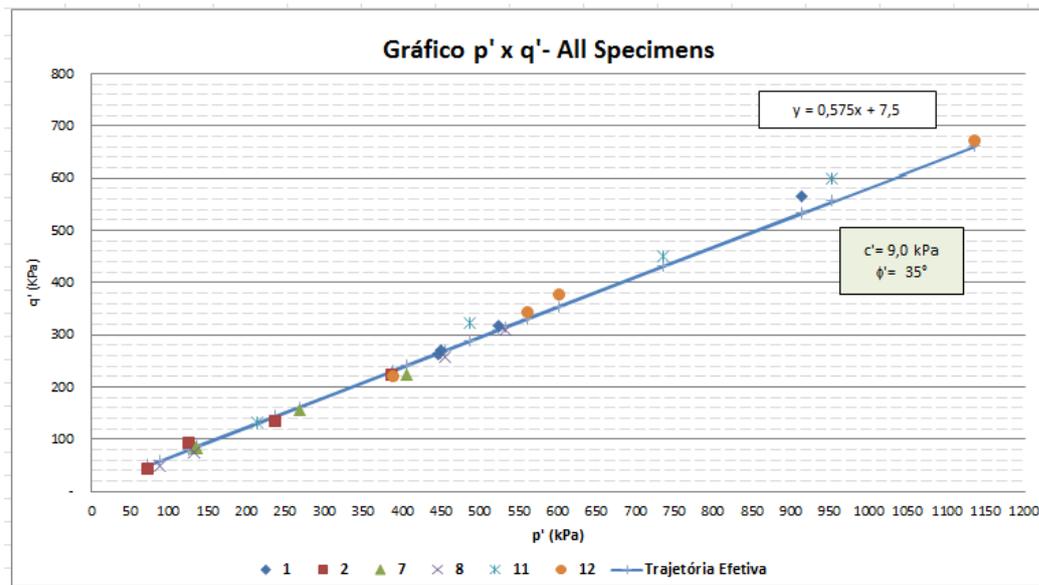


Figura 4-17 - Triaxial CIU – Campanha Filtro Prensa (2017) – Trajetória de tensões efetivas.

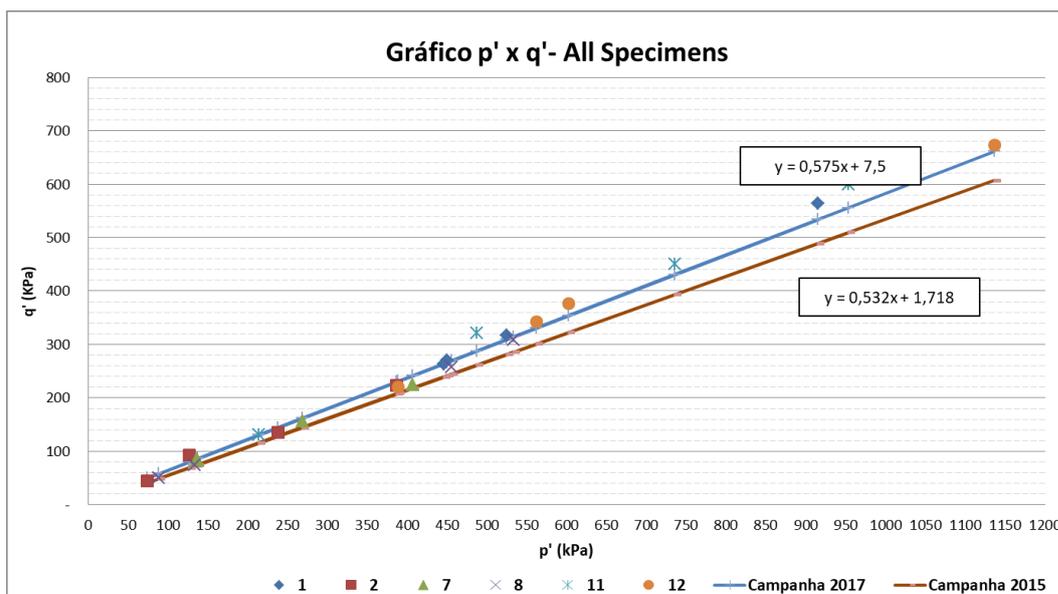


Figura 4-18 - Triaxial CIU Campanhas 2015 e 2017 – Trajetória de tensões efetivas.

Esta última figura mostra que o material ensaiado nesta pesquisa em 2017 (resíduo FP) apresenta trajetória de tensões pouco superior ao encontrada na campanha realizada em 2015 (resíduo FT seco).

#### 4.2.5.1. Parâmetros Efetivos de Resistência

Os conjuntos de valores na ruptura dos ensaios CIU estão plotados no na Figura 4-17

Observa-se independentemente das condições de compactação dos diversos ensaios, obtém-se uma única envoltória efetiva de resistência, envolvendo todos os ensaios CIU realizados. Tem-se os seguintes parâmetros de resistência:

$$\phi' = 35^\circ \text{ e } c' = 9,0 \text{ kPa.}$$

Observa-se que a mesma envoltória é válida mesmo a baixos níveis de tensão efetiva (50 a 250 kPa), representativos das condições de campo. Não obstante na Tabela 4-30 são apresentados os valores de  $c'$  e  $\phi'$  para cada bloco.

Tabela 4-30 – Parâmetros Efetivos de Resistência ao Cisalhamento – Blocos Isolados.

Blocos	Ângulo de atrito (°)	Coesão (kPa)
1	39,6	0
2	33,2	13,1
7	31,7	14,6
8	35,3	0
11	38,5	4,6
12	36,4	4,2

Comparando os resultados de resistência obtidos nesta pesquisa com os encontrados por Nery et. al, (2013) e nos estudos do Filtro Tambor realizados em 2015 (FT-2015), temos as seguintes comparações apresentadas na Figura 4-19:

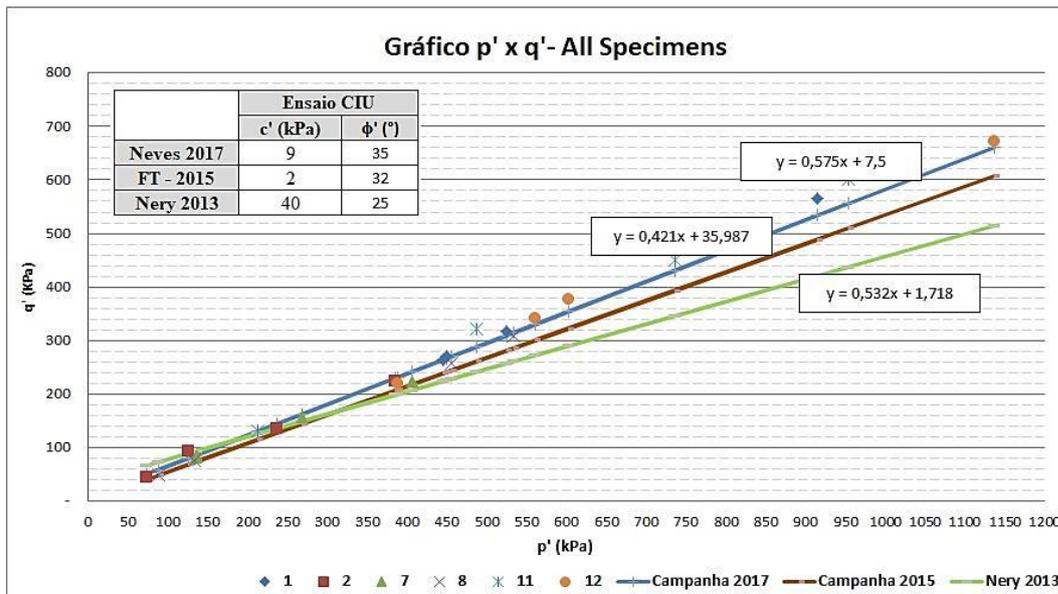


Figura 4-19 - Triaxial CIU Campanhas 2015, 2017 e Nery (2013) – Trajetória de tensões efetivas.

A diferença de valores de resistência pode estar associada às diferentes estruturas criadas pelas compactações de campo com o Filtro Tambor em 2015 e o Filtro Prensa em 2016. Já a diferença com os dados do resíduo da lama vermelha do Pará com o material de Nery 2013, pode estar relacionada a qualidade da compactação adotada para cada pesquisa ou a diferença de jazida (Nery 2013 – jazida de MG e Neves 2017- jazida do PA), devido ao fato da bauxita ser um material de composição heterogênea.

#### 4.2.6. Ensaio Triaxial UU unsat

Observa-se que nas amostras para realização dos ensaios UU unsat o grau de saturação de 15 de 18 corpos-de-prova estão com saturação superior a 80%, e que destes 10 estão acima de 85%, ou seja, maior parte deste material possui bolhas oclusas. Sabendo disto, haverá um aumento na resistência com o aumento do confinamento. Nestas condições:

- as envoltórias em tensões totais podem apresentar leve curvatura até atingir a saturação;

- as medidas de poro-pressão efetuadas são consideradas representativas para definição de tensões efetivas e consequente envoltória de resistência efetiva.

A Tabela 4-31 apresenta os valores na ruptura dos ensaios UU não saturados realizados nos blocos coletados.

Tabela 4-31 – Ensaios Triaxiais UU não saturados

Bloco	S (%)	$\sigma_{fn}$ (kPa)	$\sigma_{fs}$ (kPa)	$\sigma'_{fn}$ (kPa)	$\sigma'_{fs}$ (kPa)	$u_f$ (kPa)	p (kPa)	p' (kPa)	q' (kPa)
1	87,2	529	50	554	75	-25	290	315	239,5
	86,6	963	150	977	164	-14	557	571	406,5
	88,9	1222	300	1264	342	-42	761	803	461,0
2	69,7	359	50	365	56	-6	205	211	154,5
	26,5	714	150	711	147	3	432	429	282,0
	92,4	1389	300	1378	289	11	845	834	544,5
7	82,8	567	50	589	72	-22	309	331	258,5
	82,2	1086	150	1095	159	-9	618	627	468,0
	75,1	1480	300	1469	289	11	890	879	590,0
8	89,8	291	50	299	58	-8	171	179	120,5
	88,8	655	150	698	193	-43	403	446	252,5
	90,0	1003	300	965	263	38	652	614	351,5
11	83,1	586	50	610	74	-24	318	342	268,0
	88,9	777	150	804	177	-27	464	491	313,5
	88,8	1096	300	1097	301	-1	698	699	398,0
12	81,7	351	50	385	84	-34	201	235	150,5
	88,2	808	150	830	172	-22	479	501	329,0
	82,3	1377	300	1398	321	-21	839	860	538,0

Na Figura 4-20 apresentam as trajetórias de tensões totais registradas nos ensaios UU unsat realizados.

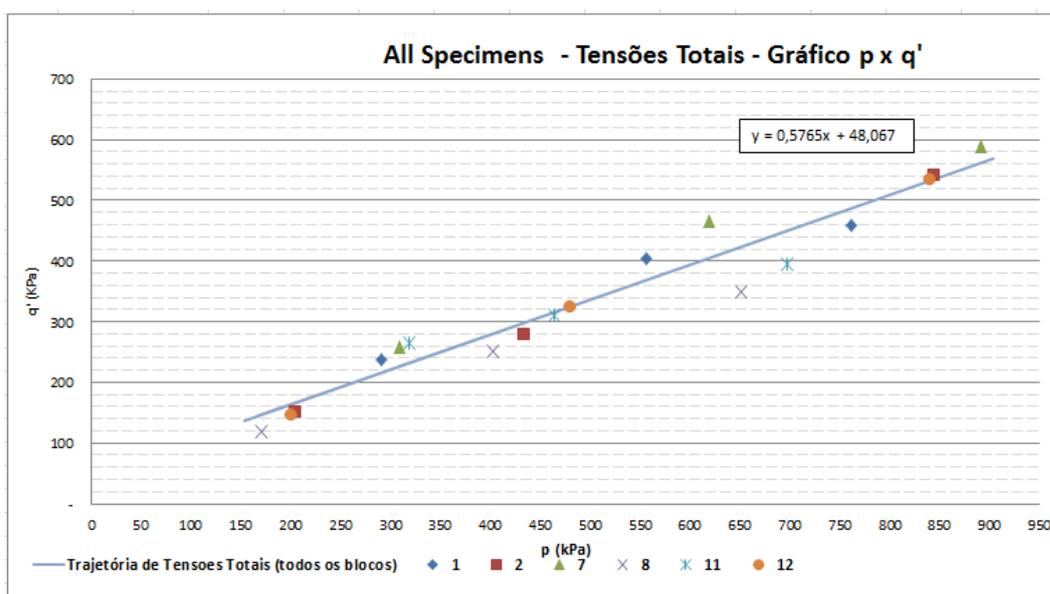


Figura 4-20 - Triaxial UU Campanhas 2017 – Trajetória de tensões totais.

Na Tabela 4-32 que resume os valores de parâmetros de resistência em tensões totais para as diferentes condições de compactação dos ensaios UU realizados.

Tabela 4-32 – Parâmetros de Resistência em termos de Tensões Totais

Blocos	Condição de compactação		Condição de compactação		Resistencia ( $\sigma = 100$ kPa (kPa))
	GC (%)	$\Delta h$ (%)	c (kPa)	$\phi$ (°)	
1	99,8	Wot - 1.6 %	291,0	15,8	318,2
2	84,9	Wot + 2.7 %	54,4	34,2	110,6
7	90,7	Wot + 0.7 %	261,9	23,6	301,9
8	96,8	Wot + 4.0 %	46,2	30,0	96,2
11	96,4	Wot - 1.1 %	154,6	25,1	197,0
12	102,5	Wot - 6.2 %	93,3	31,0	144,8

#### 4.2.6.1.

#### Resumo dos Ensaio UU unsat

Com base nos dados extraídos da tabela apresentada no item 4.2.6 plotou-se o gráfico da Figura 4-21 para os caminhos de tensões totais, destacando-se a distinção entre as diferentes condições iniciais das amostras.

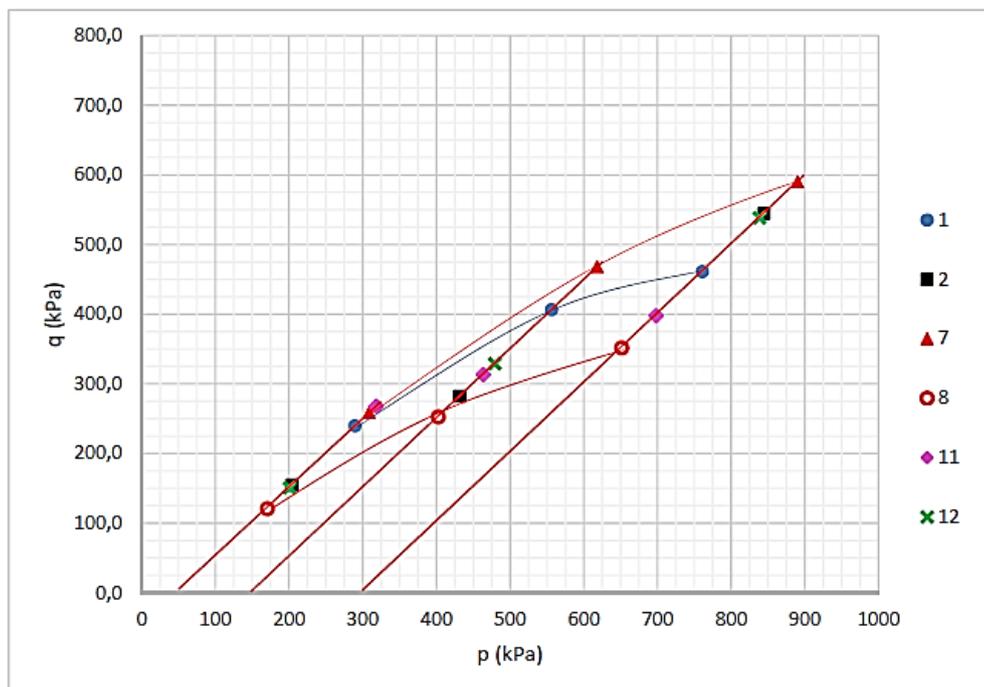


Figura 4-21 - Caminho da Tensão Total

Na Figura 4-22 os valores de ruptura em termos de tensão efetiva registrados nos ensaios estão plotados juntamente com a trajetória de tensões efetivas dos ensaios CIU. Observa-se que, com maior dispersão, os valores estão agrupados em torno da mesma trajetória.

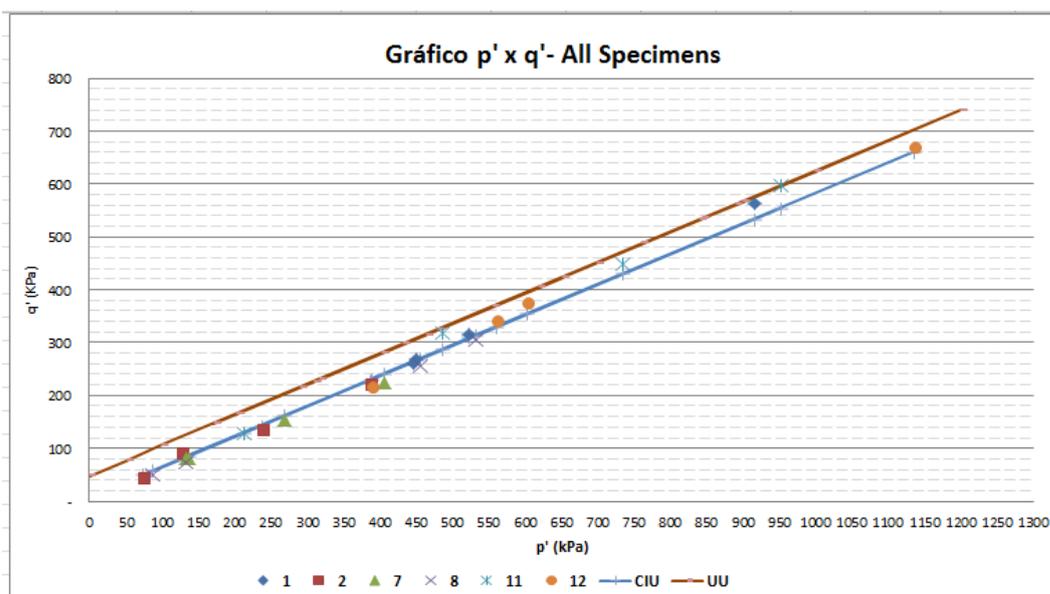


Figura 4-22 - Trajetória Efetiva ensaios CIU versus dados Efetivos de Ruptura ensaios UU

#### 4.2.7. Ensaio Triaxial PN

Os ensaios triaxiais UU-PN tem por objetivo observar o desenvolvimento das poro-pressões geradas pelo carregamento durante a construção do aterro. Como especificado, os ensaios triaxiais UU-PN foram executados em amostras indeformadas, com razões de carregamento  $\sigma_h/\sigma_v$  ( $\sigma_3/\sigma_1$ ) iguais a 0,5 e 0,6. Para atender à faixa de tensões verticais máximas do aterro previsto para reabilitação, foi considerado o valor de  $u/\sigma_1$  correspondente a  $\sigma_1$  entre 70 e 110 kPa.

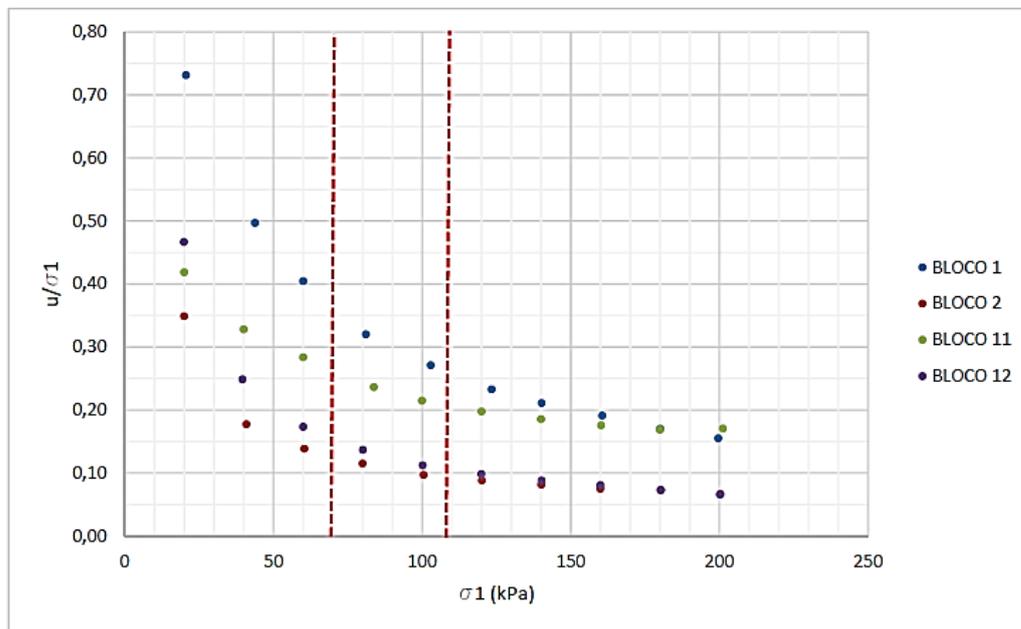
a)  $\sigma_h/\sigma_v = 0,5$

A Tabela 4-33 apresenta o resumo dos valores de  $u/\sigma_1$  observado nas amostras provenientes do blocos 1, 2, 11 e 12 para faixa de tensões de interesse.

Tabela 4-33 – Valores de  $u/s_1$  na faixa de interesse:  $\sigma_h/\sigma_v=0,5$ .

Blocos	$u/\sigma_1$	GC (%)	$\Delta h$ (%)
1	0.32 - 0.27	99,8	Wot - 1.6 %
2	0.12 - 0.10	84,9	Wot + 2.7 %
11	0.24 - 0.21	96,4	Wot - 1.1 %
12	0.14 - 0.11	102,5	Wot - 6.2 %

Todos os resultados apresentados na Figura 4-23 indica a redução do valor de  $u/\sigma_1$  com o aumento das tensões aplicadas, simulação do desenvolvimento das poro-pressões durante construção do aterro,  $\sigma_h/\sigma_v=0,5$ .

Figura 4-23 - Simulação do desenvolvimento das poro-pressões durante construção do aterro:  $\sigma_h/\sigma_v=0,5$ 

b)  $\sigma_h/\sigma_v = 0,6$

A Tabela 4-34 apresenta os valores de  $u/\sigma_1$  observado nas amostras provenientes do blocos 1, 2, 7, 8 e 12 para faixa de tensões de interesse.

Tabela 4-34 – Valores de  $u/\sigma_1$  na faixa de interesse:  $\sigma_h/\sigma_v=0,6$ .

Blocos	$u/\sigma_1$	GC (%)	$\Delta h$ (%)
1	0.13 - 0.12	99,8	Wot - 1.6 %
2	0.13 - 0.11	84,9	Wot + 2.7 %

7	0.09 - 0.08	90,7	Wot + 0.7 %
8	0.41 - 0.38	96,8	Wot + 4.0 %
12	0.25 - 0.22	102,5	Wot - 6.2 %

Assim como o observado na Figura 4-24, todos os resultados apresentados na no Figura 4.34 indicaram redução do valor de  $u/\sigma_1$  com o aumento das tensões aplicadas, dentro da faixa de interesse, simulação do desenvolvimento das poro-pressões durante construção do aterro,  $\sigma_h/\sigma_v=0,6$ .

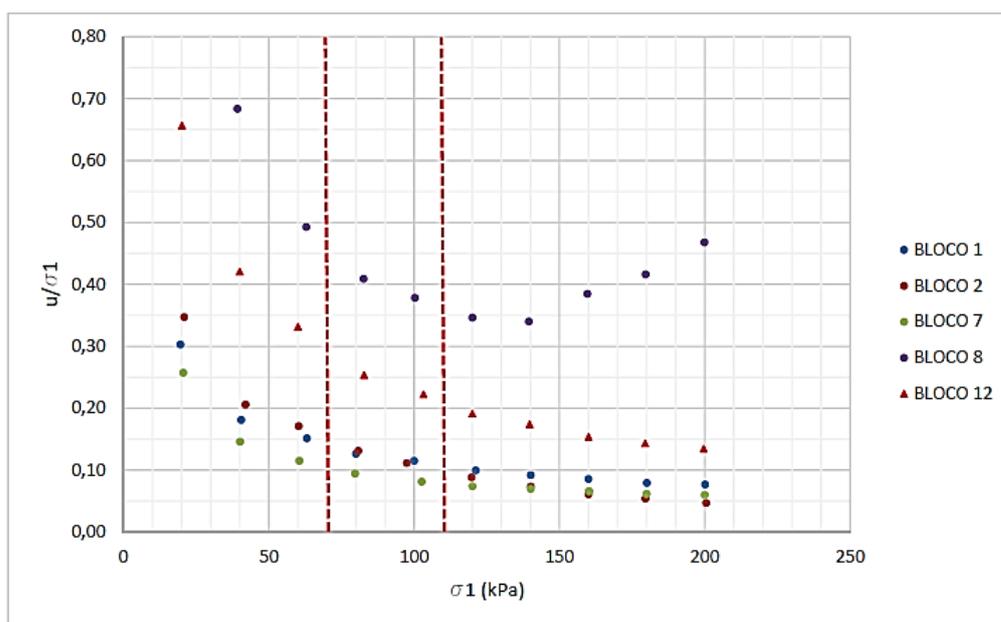


Figura 4-24 - Simulação do desenvolvimento das poro-pressões durante construção do aterro:  $\sigma_h/\sigma_v=0,6$

Valores obtidos em ensaios realizados sobre amostras compactadas em laboratório de filtro tambor (2015), moldadas com umidade 4% acima da umidade ótima apresentam  $u/\sigma_1$  variando de 0,23 a 0,51. Ressalta-se que não há indicativo de nível de tensões para a referida variação de  $u/\sigma_1$ .

A Tabela 4-35 apresenta os valores na ruptura das amostras ensaiadas.

Tabela 4-35 – Valores de Ruptura nas amostras indeformadas ensaiadas.

$\sigma_h/\sigma_v$	Blocos	$\sigma'_{f1}$ (kPa)	$\sigma'_{f3}$ (kPa)	$u_f$ (kPa)	$p'$ (kPa)	$q$ (kPa)
0,5	1	426	97	-31	262	165

	2	635	78	9	357	279
	11	768	118	-53	443	325
	12	748	86	8	417	331
0,6	1	588	95	-15	342	247
	2	611	75	1	343	268
	7	758	91	5	425	334
	8	258	29	-23	144	115
	9	748	86	8	417	331
	11	1277	116	-29	697	581
	12	1200	149	-71	675	526

#### 4.2.7.1. Resumo dos Ensaio PN

Analisando os resultados apresentados no item 4.3.7 pode-se adotar o valor de  $u/\sigma_1$  igual 0,27 para o conjunto de ensaios, para o nível de tensões de interesse, para as condições de compactação dos blocos ensaiados, englobando aproximadamente 85% dos resultados observados. Ressalta-se que este valor é apropriado para baixas tensões, pois à medida que a tensão aumenta há redução dos valores de  $u/\sigma_1$ , conforme observado na Figura 4-23 e Figura 4-24.

### 4.3. Análises Numéricas via Teoria do Equilíbrio Limite

O DRS1 (Depósito de Resíduo Sólido 1), da Hydro Alunorte, está em operação desde 1995, e tem previsão de esgotamento, considerando as últimas ampliações prevista para maio de 2017. O processo de geração de resíduo em filtro prensa estava previsto para iniciar sua operação gradual ao longo de 2016.

Com o início da operação do filtro-prensa, está previsto que a deposição passará a ser particularmente feita no DRS2 (Depósito de Resíduo Sólido 2) , construído em 2016/2017.

Parte do resíduo gerado no filtro prensa será então utilizado na camada de conformação do encerramento do DRS1. De forma a evitar impactos ambientais de particulados, e a redução do volume de efluentes, impõe-se a necessidade de iniciar o processo de reabilitação ambiental das áreas já esgotadas no DRS1.

Este item apresenta um modelo numérico que adota a teoria do equilíbrio limite como uma ferramenta para avaliação do processo construtivo do DRS2. O modelo proposto avalia a influência dos valores do parâmetro  $R_u$  na resistência a ruptura da seção do DRS.

O modelo numérico bi-dimensional foi construído a partir do software Slide versão 6.0 que compõe o pacote da Rocscience.

#### 4.3.1. Parâmetros Geotécnicos

Conforme apresentado no item 4.2.5.1 os parâmetros geotécnicos adotados nas análises acopladas são:

$$\gamma = 1,9 \text{ g/cm}^3$$

$$\phi' = 35^\circ$$

$$c' = 9,0 \text{ kPa}$$

$$R_u = 0,08 / 0,10 / 0,20 / 0,30 \text{ e } 0,40$$

$$K = 2 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$$

$$E = 89 \text{ Mpa}$$

### 4.3.2. Metodologia de Análise

As análises de estabilidade de taludes objetivam a determinação dos fatores de segurança mínimos requeridos pela norma brasileira referente à estabilidade de taludes e encostas, levando-se em conta as características geotécnicas dos materiais e geometria da estrutura.

Para as referidas análises foi utilizado o software Slide, versão 6.0, da empresa canadense Rocscience. O programa faz uso de formulação bidimensional de análise de estabilidade de taludes e avalia o fator de segurança para rupturas circulares e não circulares, usando a teoria do Equilíbrio Limite.

Para a modelagem da resistência dos materiais, foi adotada a lei constitutiva de Mohr-Coulomb. O método de cálculo utilizado foi o GLE/Morgenstern-Price, que considera qualquer forma da superfície de ruptura e calcula o fator de segurança a partir do equilíbrio de forças e momentos, levando-se em consideração as propriedades de interface (força normal e de cisalhante) entre as fatias (desenvolvidas no processo de cálculo).

Diferentes valores do parâmetro  $R_u$ , para a condição de final de construção, para o resíduo seco foram testados, mantendo-se os parâmetros dos outros materiais presentes na seção constantes. A partir das análises dos fatores de segurança (FS) obtidos, pode-se verificar que o valor do parâmetro  $R_u$  possui grande impacto na resistência do material analisado, sendo que quanto maior o valor do  $R_u$  menor o fator de segurança obtido. Os fatores de segurança admissíveis adotados,  $FS=1,5$ , baseiam-se na importância, vida útil da obra e na frequência, tipo e período de solicitação.

Para a verificação da influência do parâmetro  $R_u$  na seção do DRS2, foram simulados valores de 0,08;0,10;0,20;0,30 e 0,40 para os parâmetros de resistência determinados nos estudos de :Neves 2017 (resultados obtidos nessa dissertação), FT\_2015 (estudos executados com material seco do filtro tambor com o mesmo rejeito dos estudos de 2017), Resultados obtidos na dissertação de Nery 2013 em com bauxita filtrado por um filtro prensa piloto.

A Figura 4-25 mostra a seção típica do DRS2 com a divisão dos materiais considerados no modelo numérico e com altura da pilha de aproximadamente 64,00 m, com bermas de 5,0 m a cada 10 m de desnível na inclinação 1V:2H.

A Tabela 4-36 apresenta o resumo dos valores do fator de segurança (FS) encontrados nas análises para avaliação da influência dos valores do parâmetro  $R_u$  na resistência a ruptura da seção do DRS2.

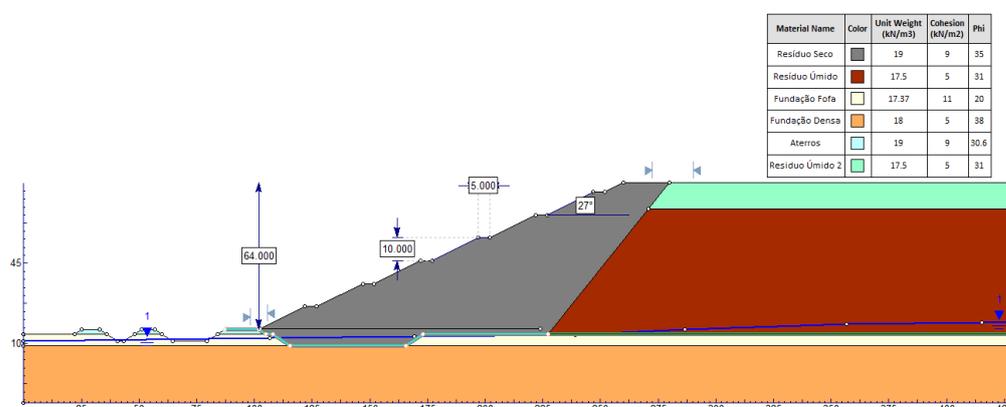


Figura 4-25 – Seção adotada para análise numérica acoplada

Tabela 4-36: Valores de Ruptura nas amostras indeformadas ensaiadas.

FS	Ru				
	0,08	0,10	0,20	0,30	0,40
<b>CAMPANHA 2017 (NEVES)</b>	1,79	1,76	1,57	1,35	1,14
<b>CAMPANHA 2015 (FT)</b>	1,53	1,49	1,30	1,12	0,93
<b>NERY (2013)</b>	1,46	1,44	1,33	1,21	1,07

Em uma condição não-drenada, a medida em que a altura da seção for aumentando e, conseqüentemente, o carregamento do DRS2, os valores da razão de poropressão ( $R_u$ ) diminuem, uma vez que o valor de  $R_u$  é inversamente proporcional ao valor da tensão vertical aplicada ( $R_u = u/\sigma_1$ ). Nesse sentido, optou-se por se seccionar o modelo em horizontes de aproximadamente 10,00 m de altura e atribuir a cada camada valores decrescentes de  $R_u$  a partir da base do modelo. A Figura 4-26 mostra a seção típica do DRS2 com a divisão dos materiais considerados no modelo numérico.

A Tabela 4-36 apresenta o resumo dos valores do fator de segurança (FS) encontrados nas análises para avaliação da situação de construção para a seção do DRS2

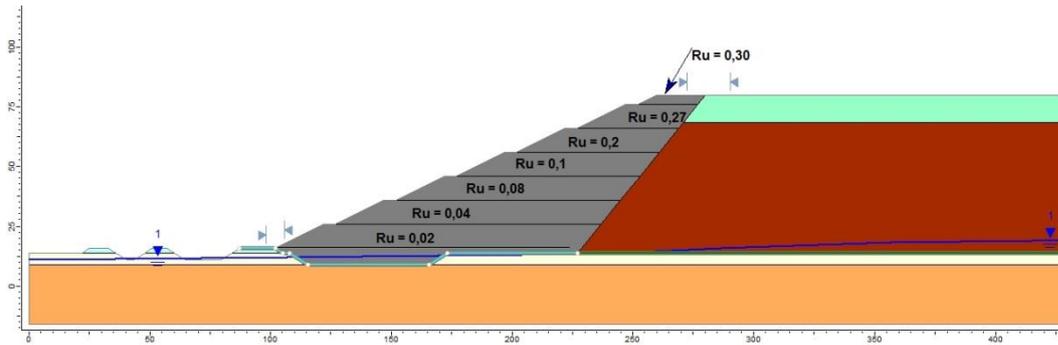


Figura 4-26 – Seção adotada para análise numérica de construção

Tabela 4-37 – Fatores de segurança análise de construção.

FS	Parâmetros	FS
<b>CAMPANHA 2017 (NEVES)</b>	( $c' = 9$ e $\text{PHI} = 35$ )	1,46
<b>CAMPANHA 2015 (FT)</b>	( $c' = 2$ e $\text{PHI} = 32$ )	1,31
<b>NERY (2013)</b>	( $c' = 40$ e $\text{PHI} = 25$ )	1,23

A partir das análises dos fatores de segurança (FS) obtidos, pode-se verificar que o valor do parâmetro Ru possui grande impacto na resistência do material analisado, sendo que quanto maior o valor do Ru menor o fator de segurança obtido, conforme apresenta a Figura 4-27.

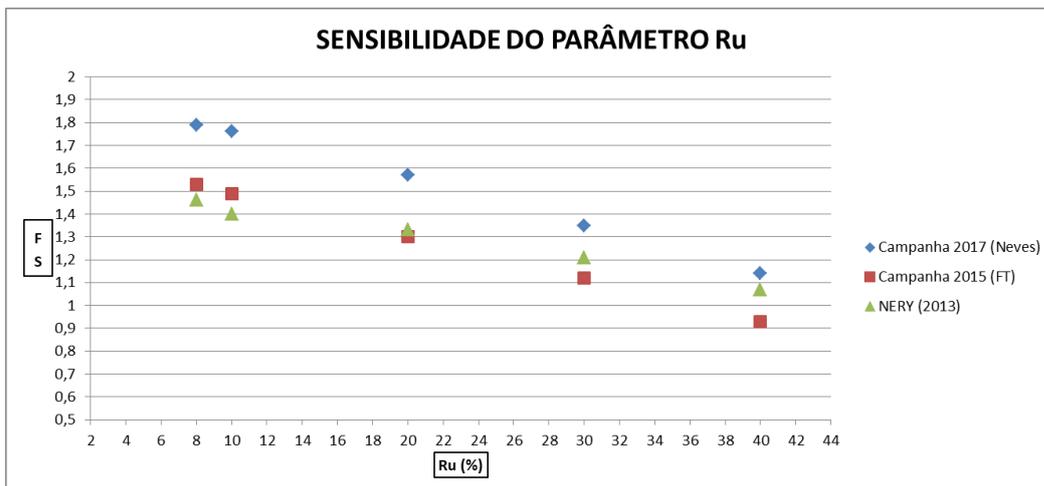


Figura 4-27: Sensibilidade do parâmetro Ru

### 4.3.3. Resultados das Análises

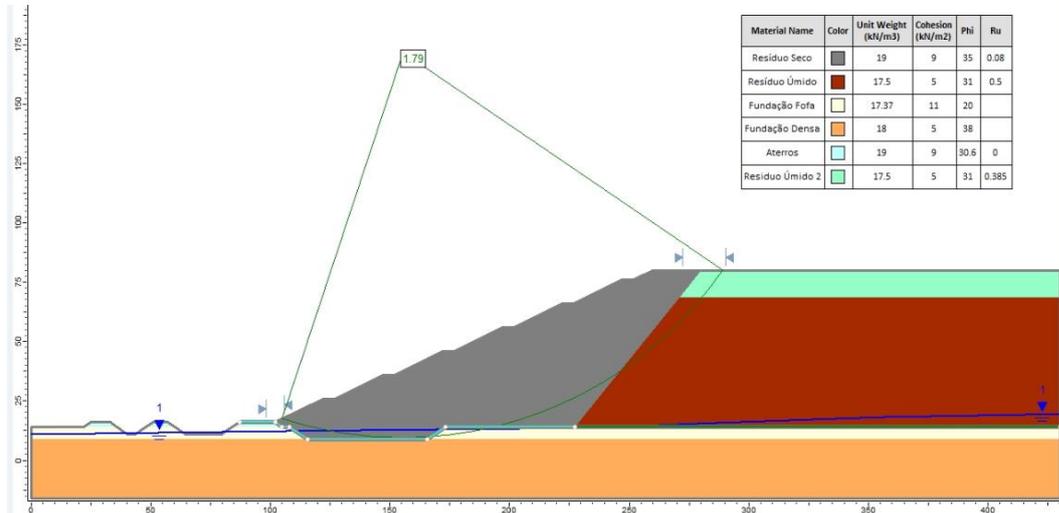


Figura 4-28 – Campanha de 2017 com  $Ru = 0,08 \rightarrow FS=1,79$

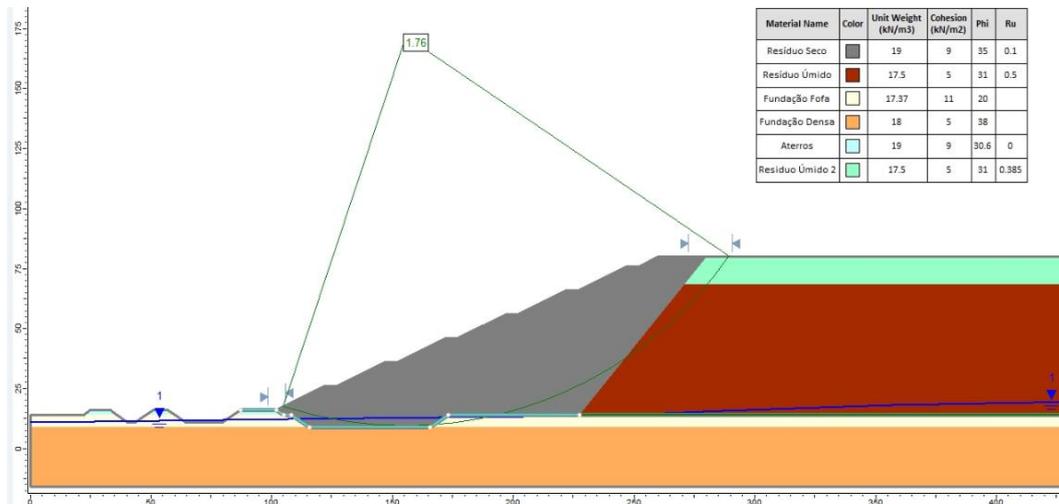


Figura 4-29 – Campanha de 2017 com  $Ru = 0,10 \rightarrow FS=1,76$

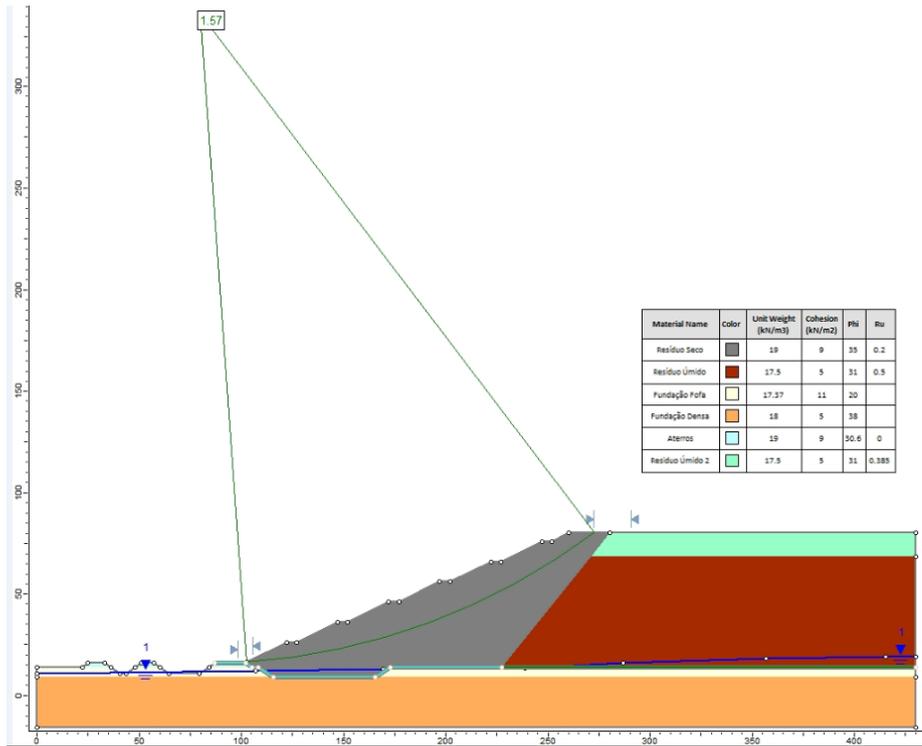


Figura 4-30 – Campanha de 2017 com  $Ru = 0,20 \rightarrow FS=1,57$

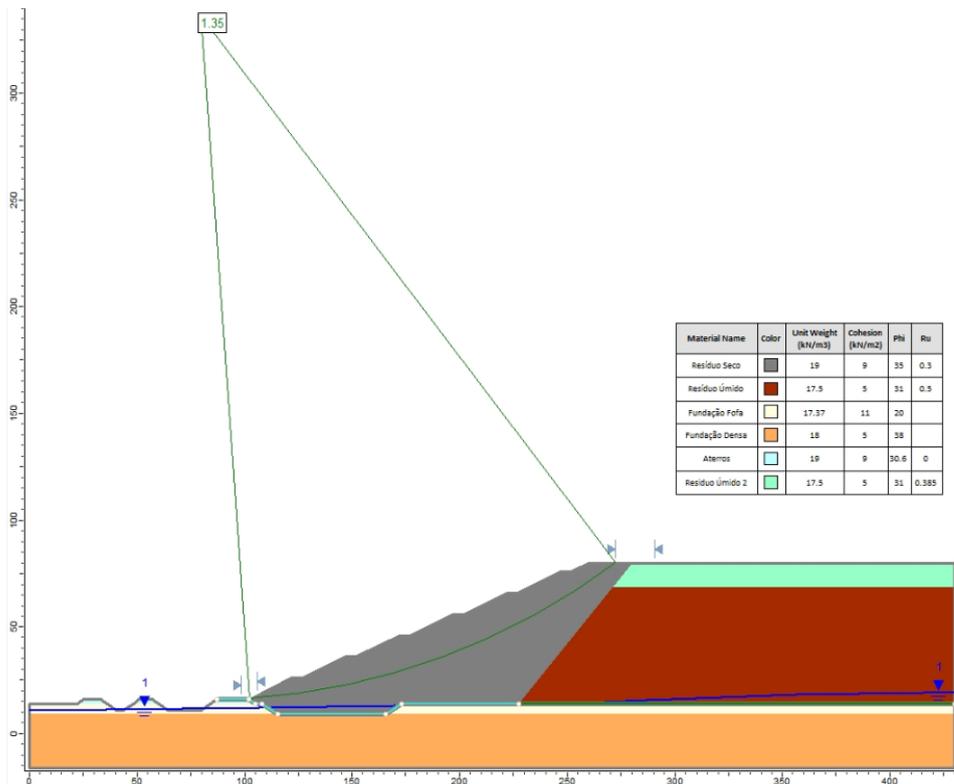


Figura 4-31 – Campanha de 2017 com  $Ru = 0,30 \rightarrow FS=1,35$

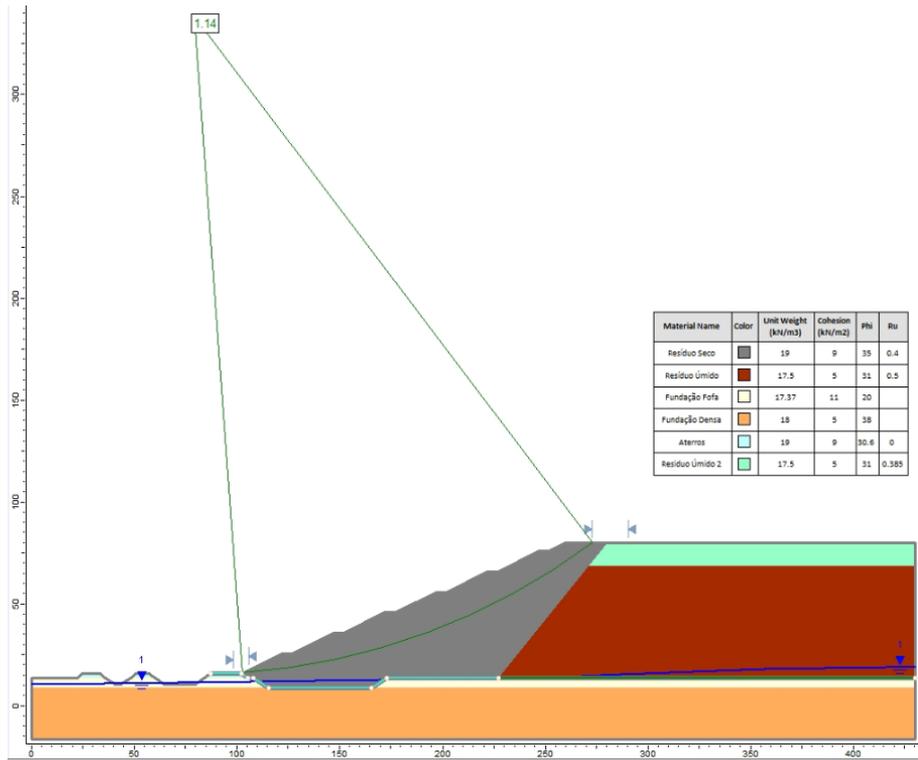


Figura 4-32 – Campanha de 2017 com  $Ru = 0,40 \rightarrow FS=1,14$

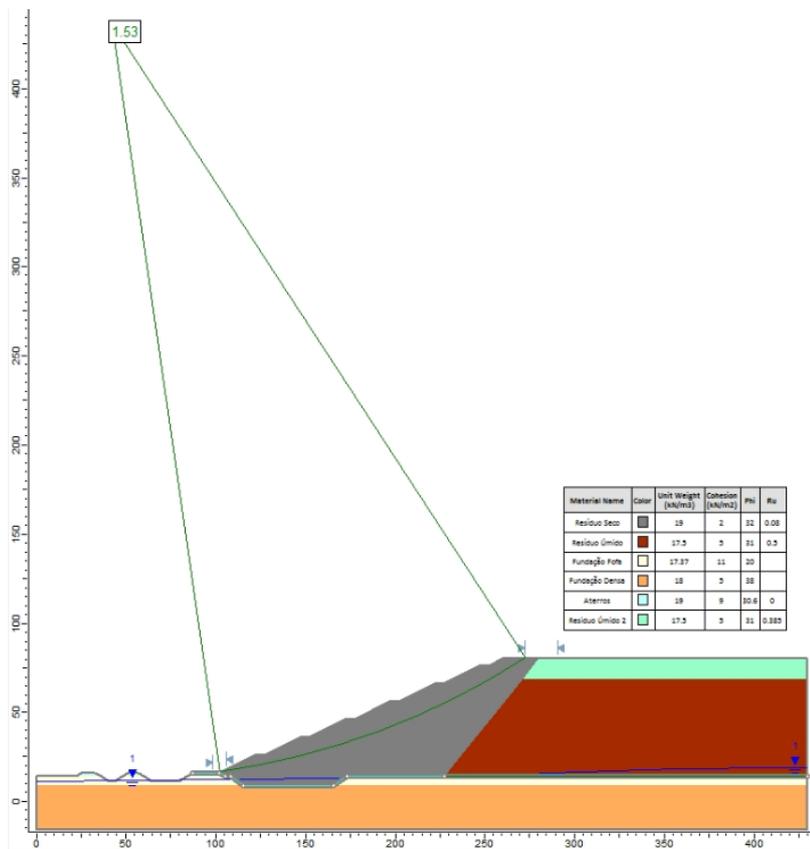


Figura 4-33 – Campanha de 2015 com  $Ru = 0,08 \rightarrow FS=1,53$

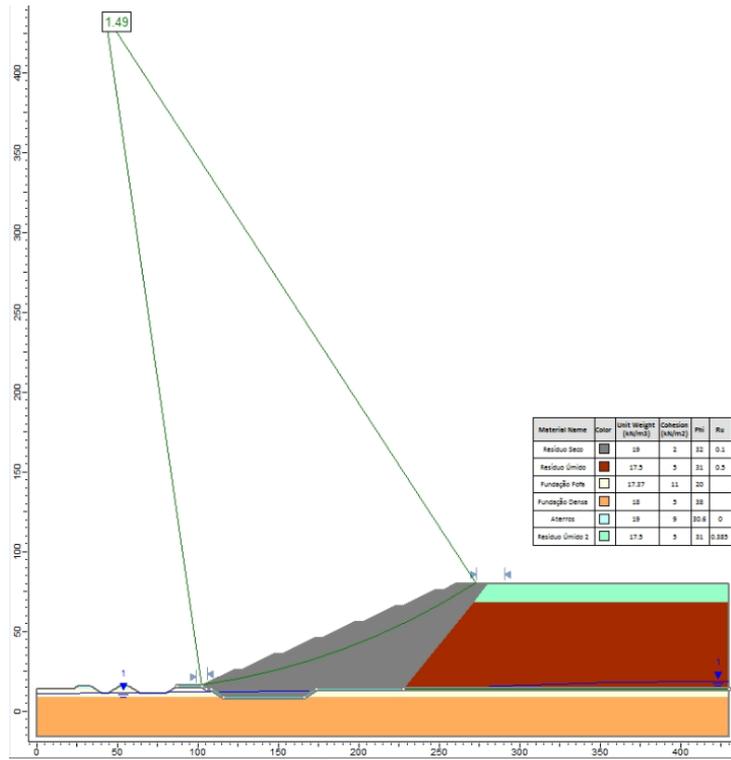


Figura 4-34 – Campanha de 2015 com  $Ru = 0,10 \rightarrow FS=1,49$

PUC-Rio - Certificação Digital N° 1421563/CA

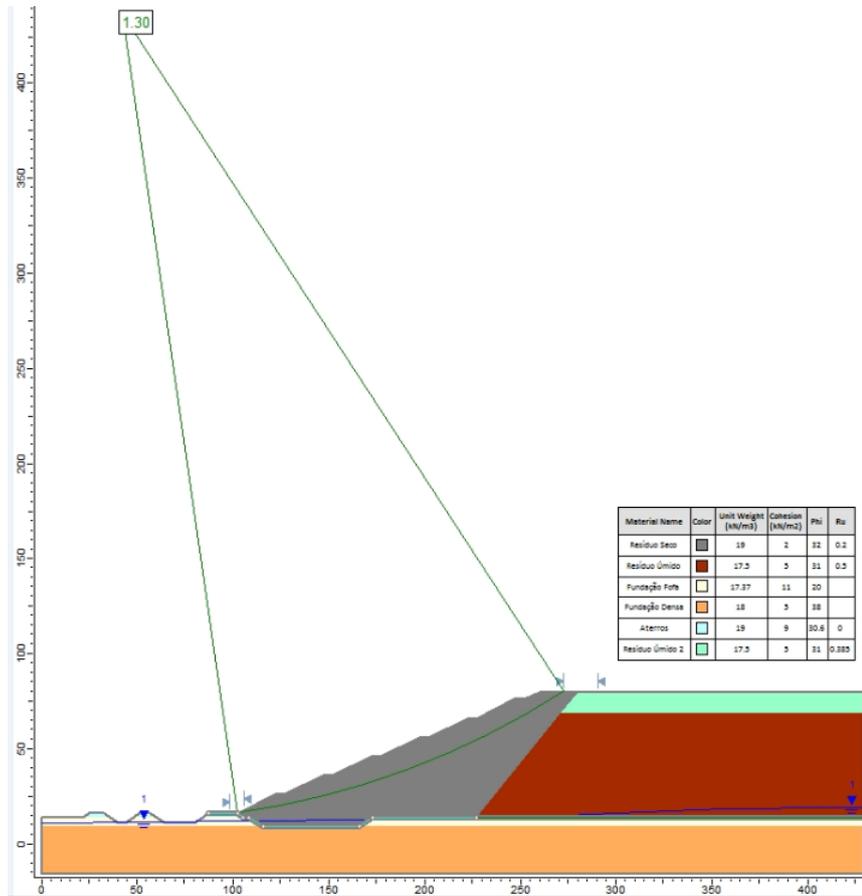


Figura 4-35 – Campanha de 2015 com  $Ru = 0,20 \rightarrow FS=1,30$

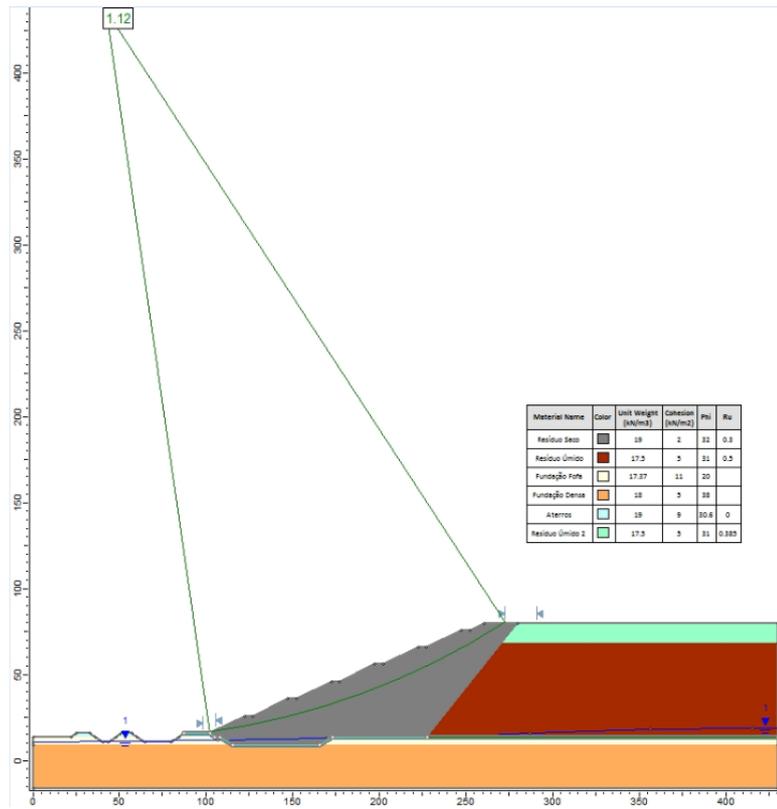


Figura 4-36 – Campanha de 2015 com  $Ru = 0,30 \rightarrow FS=1,12$

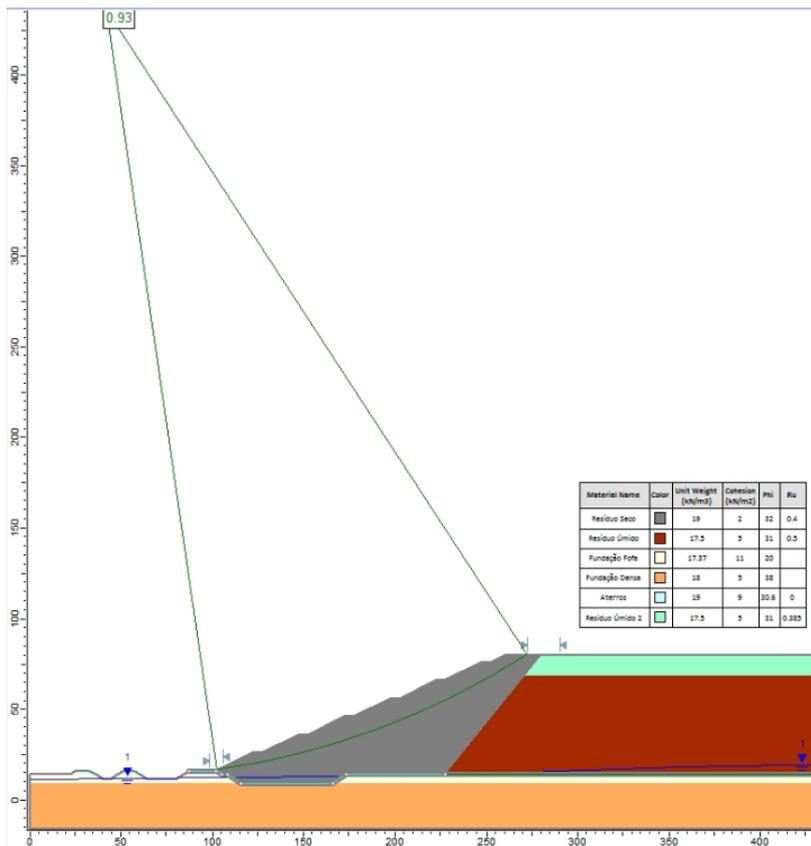


Figura 4-37 – Campanha de 2015 com  $Ru = 0,40 \rightarrow FS=0,93$

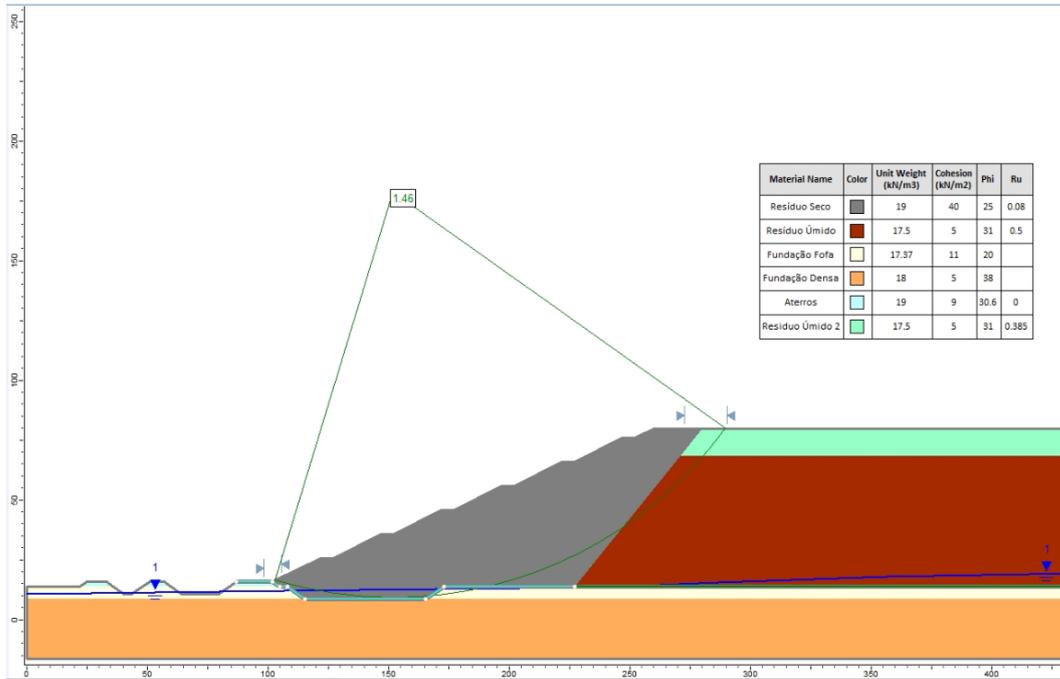


Figura 4-38 – Campanha de 2013 com  $Ru = 0,08 \rightarrow FS=1,46$

PUC-Rio - Certificação Digital N° 1421563/CA

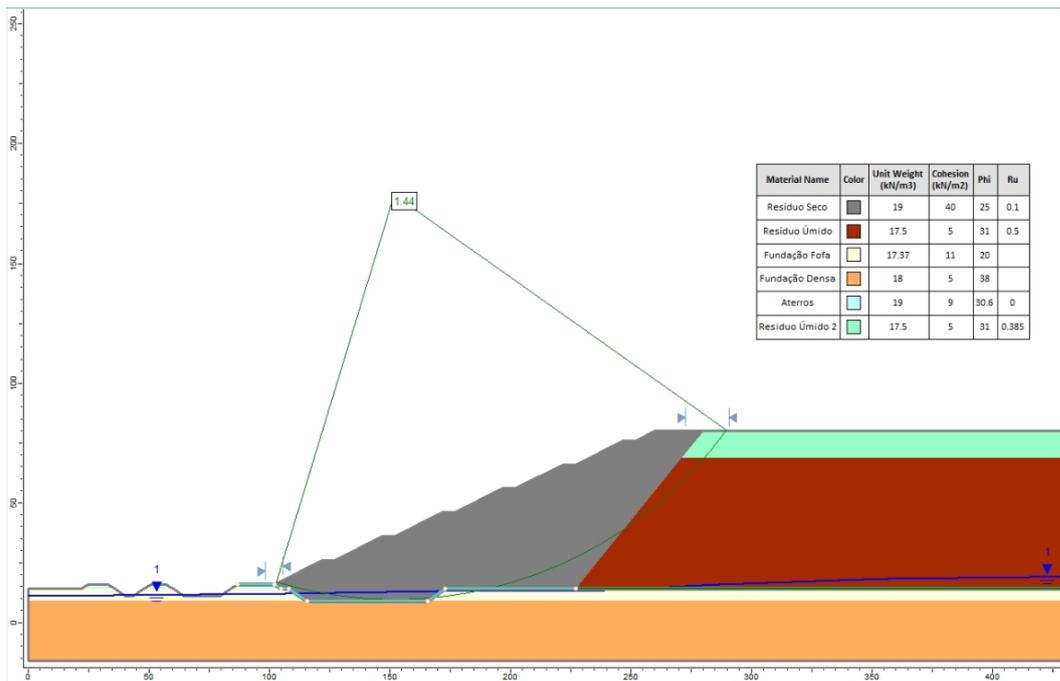


Figura 4-39 – Campanha de 2013 com  $Ru = 0,10 \rightarrow FS=1,44$

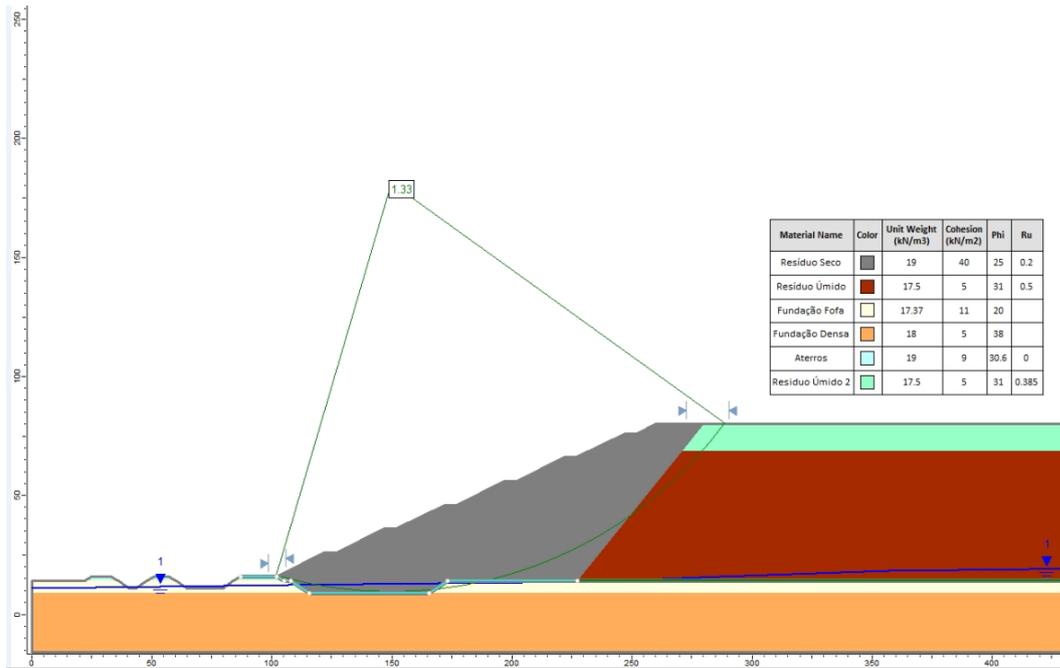


Figura 4-40 – Campanha de 2013 com  $Ru = 0,20 \rightarrow FS=1,33$

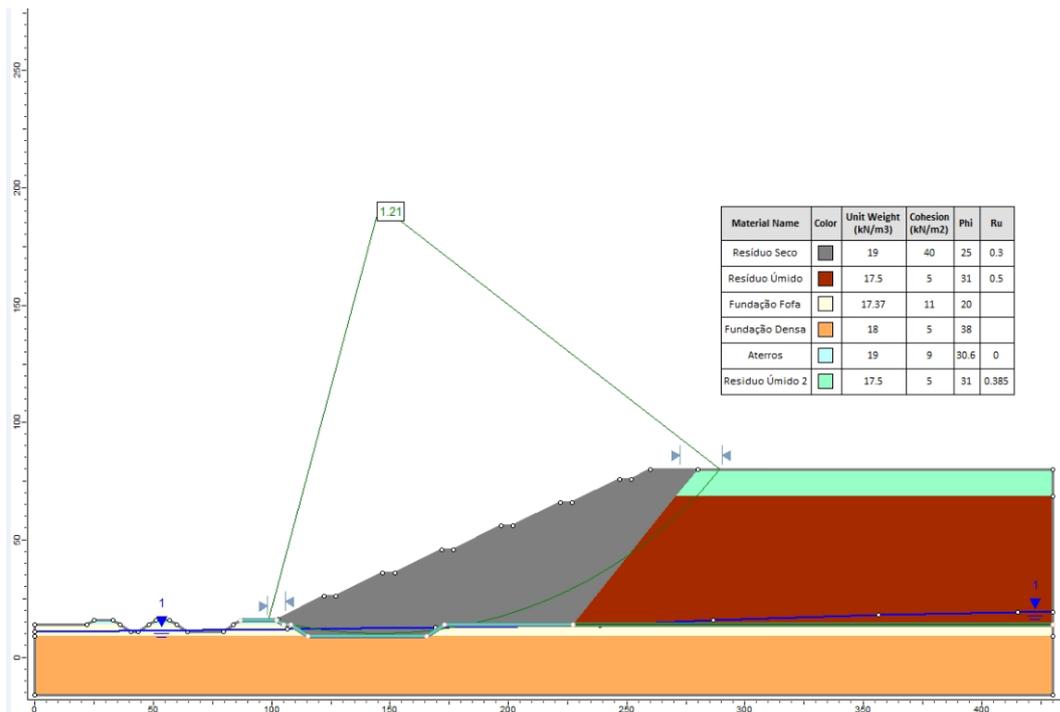


Figura 4-41 – Campanha de 2013 com  $Ru = 0,30 \rightarrow FS=1,21$

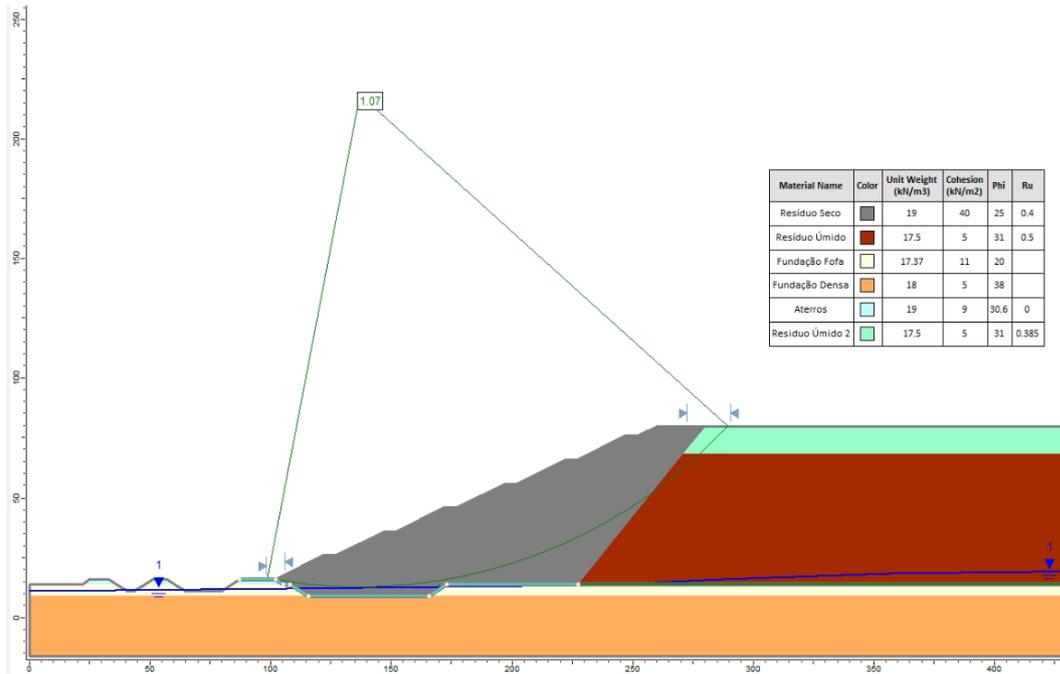


Figura 4-42 – Campanha de 2013 com  $R_u = 0,40 \rightarrow FS=1,07$

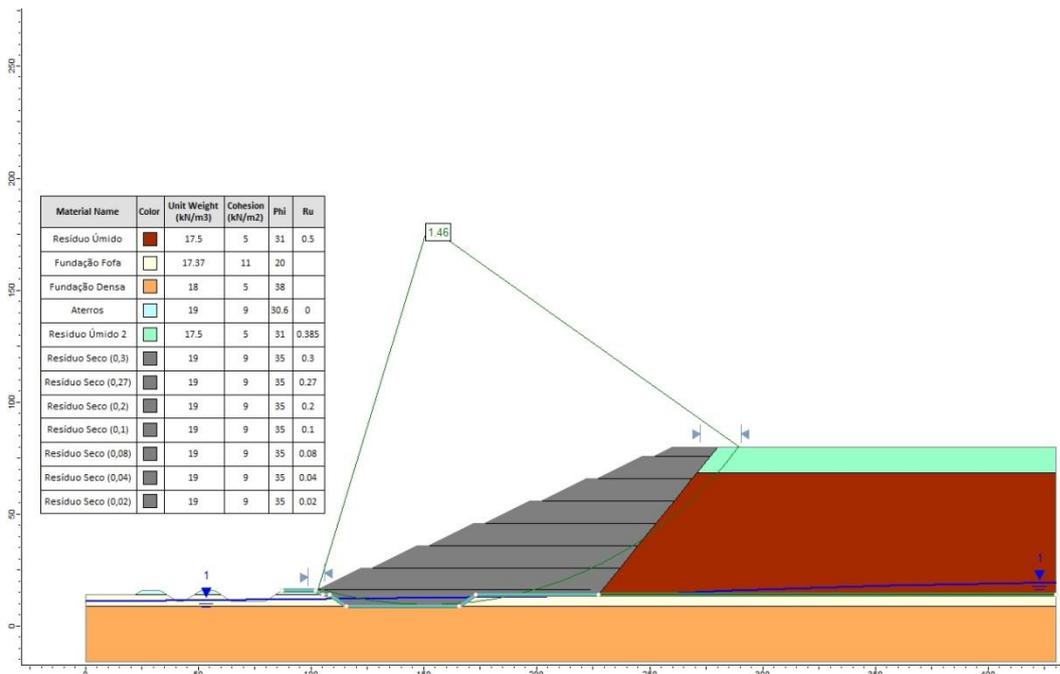


Figura 4-43 – Campanha de 2017 com  $R_u$  entre 0,02e 0,3 – Análise de Construção  $\rightarrow FS=1,46$

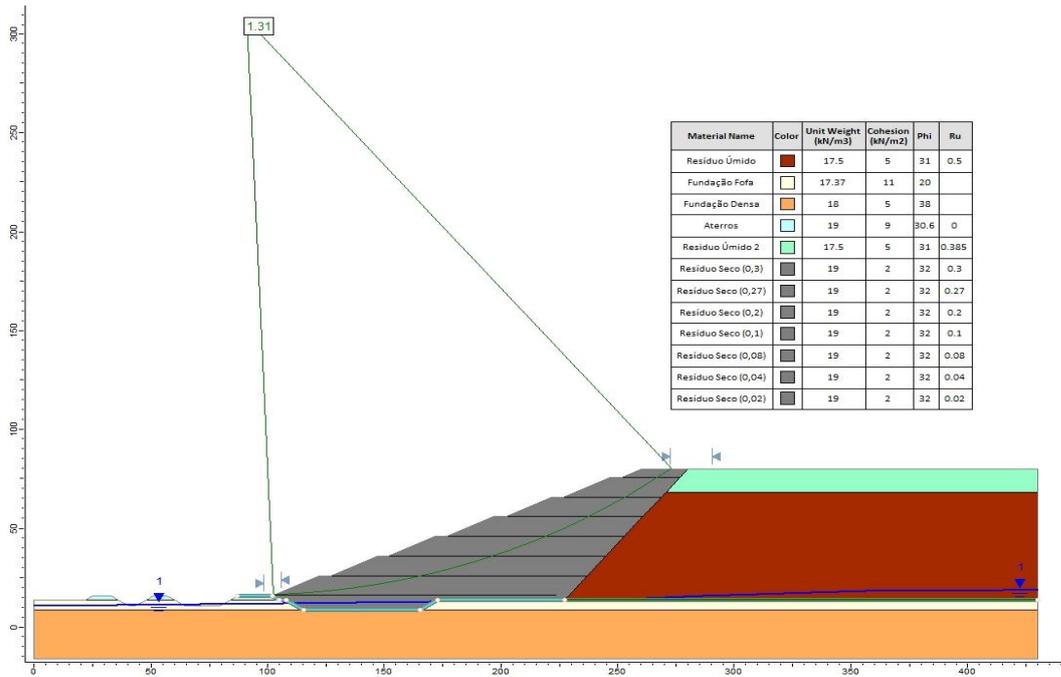


Figura 4-44 – Campanha de 2015 com Ru entre 0,02e 0,3 – Análise de Construção → FS=1,37

PUC-Rio - Certificação Digital N° 1421563/CA

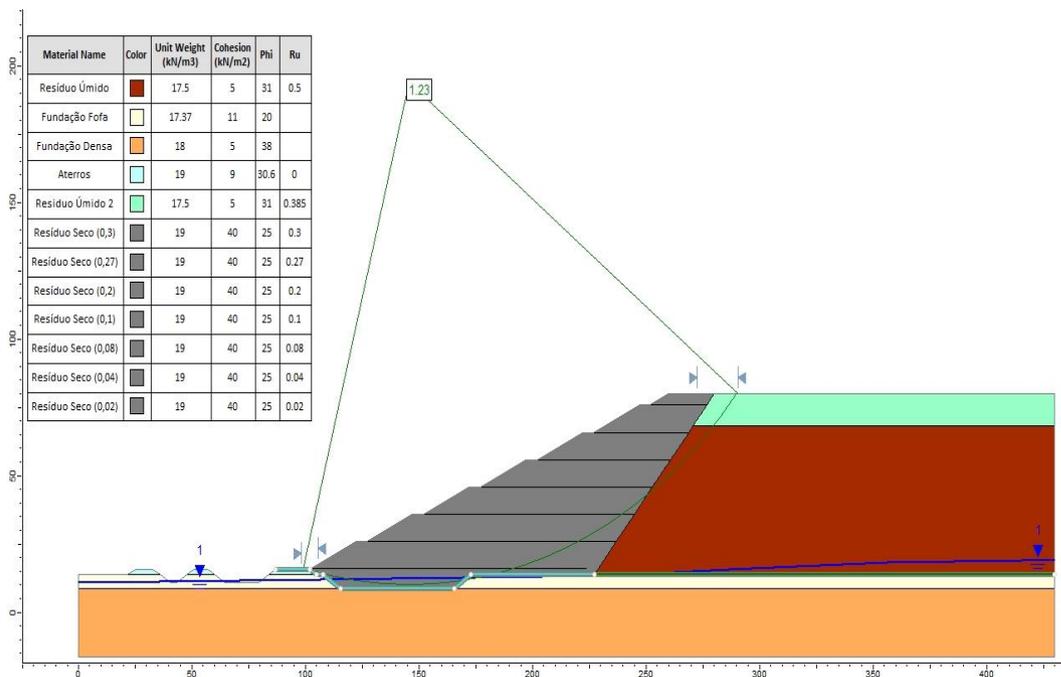


Figura 4-45 – Campanha de 2013 com Ru entre 0,0e 0,3 – Análise de Construção → FS=1,28

## 5 Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo caracterizar geotecnicamente e verificar o comportamento de um resíduo da produção de alumina (lama vermelha) desaguado por filtro prensa quando compactado. O resíduo estudado é proveniente da produção de alumina, pelo processo Bayer, da refinaria da Hydro Alunorte, município de Altamira – PA. O fator motivador para esta pesquisa é a busca das indústrias de alumina por métodos de disposição que ocupem menores áreas ou que possam aumentar a vida útil de depósitos de resíduos já existentes e que ainda privem pela segurança do sistema de disposição. Neste sentido, a técnica de desaguamento do resíduo por filtros prensa tem sido apresentada como uma solução para a obtenção de maiores ângulos de disposição e menor quantidade de água nos depósitos, reduzindo assim o potencial de danos em caso de ruptura.

Pelos resultados encontrados na realização dos aterros experimentais, com a compactação do resíduo em campo com equipamento de esteiras D6, pode-se observar a boa trabalhabilidade do material na compactação, bem como a obtenção de graus de compactação (com relação a energia do Proctor Normal) razoáveis, respeitados os limites de trafegabilidade e atendimento às condições de homogeneidade dos aterros;

Em todos os casos, há sempre um crescimento de peso específico seco e grau de compactação (GC) com o número de passadas;

O limite de trafegabilidade para espalhamento e densificação das camadas é da ordem de 7% acima da ótima, para qualquer das espessuras testadas. Entretanto, o limite de 6% pode ser estabelecido como garantia;

Para camada com 30 cm de espessura, atinge-se grau de compactação adequado para umidades entre – 2% e + 4%, para 6 ou mais de passadas;

As camadas 40 e 50 cm apresentaram dificuldades de homogeneização da umidade, particularmente para umidades mais elevadas. Diferentes valores de GC são obtidos entre topo e base destas camadas, apesar de complicados pelas perdas

de umidades durante o espalhamento. Não obstante, observa-se que, mesmo para a base da camada de 40 cm, mantendo-se a umidade com limite superior de + 4%, e executando 8 passadas, se tem valores aceitáveis de grau de compactação;

Para espessura de camada de 50 cm, em função da dificuldade de definição da curva de compactação na sua base, não se tem uma clara definição para umidades maiores que 2% acima da ótima. Porém considerando os resultados para o topo da camada admite-se que se poderá atingir GC mim de 92% mesmo na base, considerando 8 passadas de equipamento e umidades inferiores a 4% acima da ótima;

O resíduo estudado foi caracterizado geotecnicamente através de ensaios de laboratório. Obteve-se o peso específico médio dos grãos de 3,063 g/cm<sup>3</sup> e o resíduo foi classificado como silte de baixa plasticidade.

Os ensaios de compactação na energia Proctor Normal realizados apresentaram como resultado peso específico seco máximo de 1,400 g/cm<sup>3</sup> e umidade ótima de 26,50%.

Foram realizados ensaios em corpos de prova moldados em diferentes condições de compactação, variação do teor de umidade e grau de compactação de, bem como em corpos de prova talhados a partir das amostras indeformadas coletadas na área teste, após 4, 6, 8 e 10 passadas do equipamento de esteiras.

Os valores de permeabilidade obtidos através de ensaio de laboratório à carga variável, com a amostra saturada, foram da ordem de 3 x 10<sup>-6</sup> cm/s, sendo estes valores típicos de siltes e argilas. A Tabela 5-1 apresenta um resumo da caracterização do resíduo.

Tabela 5-1 – Resumo dos valores obtidos da caracterização da lama vermelha.

<b>MATERIAL ANALISADO</b>	Resíduo da produção de alumina (lama vermelha) , da Hydro Alunorte - PA, desaguado por filtro prensa
$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	30,63
<b>classificação granulométrica</b>	silte
<b>plasticidade</b>	baixa
<b>w</b> ótima	26,5
$\gamma_d$ máx (kN/m <sup>3</sup> )	16
<b>permeabilidade (cm/s)</b>	3 x 10 <sup>-6</sup>

Foram obtidos os parâmetros de compressibilidade do material, nas diferentes condições de compactação estudadas, por meio de ensaios de adensamento unidimensional. Dos ensaios UU unsat o grau de saturação de 15 de 18 corpos-de-prova estão com saturação superior a 80%, e que destes 10 estão acima de 85%, ou seja, maior parte deste material possui bolhas oclusas. Sabendo disto, haverá um aumento na resistência com o aumento do confinamento.

Pelos ensaios PN, pode-se adotar o valor de  $u/\sigma_1$  igual 0,27 para o conjunto de ensaios, para o nível de tensões de interesse, para as condições de compactação dos blocos ensaiados, englobando aproximadamente 85% dos resultados observados. Ressalta-se que este valor é apropriado para baixas tensões, pois a medida que a tensão aumenta há redução dos valores de  $u/s_1$ .

Para os valores de Ru referente aos parâmetros de resistência estudados para este trabalho, verificou-se que após as análises de estabilidade foi possível concluir que a disposição do material caracterizado nesta pesquisa desaguado por filtro prensa densificado em forma de aterro, após ser disposto em camadas compactadas, se apresenta estável (com fatores de segurança acima de 1,5) com 66 m de altura e inclinação de 1V :3H para valores de RU de até 0,20, sendo os fatores de segurança admissíveis adotados, FS=1,5, baseiam-se na importância, vida útil da obra e na frequência, tipo e período de solicitação.

Porém, ressalta-se que a operação deve ser feita de forma a não permitir que haja saturação da pilha, para se ter o controle destas poropressões, a pilha deverá ser devidamente instrumentada. A metodologia utilizada para avaliação da compactação do resíduo da produção de alumina (lama vermelha) desaguado por filtro prensa apresentou-se eficaz para a determinação de diversos parâmetros do resíduo, que são úteis para demais análises geotécnicas do resíduo.

## **5.1. Sugestão para Trabalhos Futuros**

Existem poucos estudos sobre a disposição de resíduo da produção de alumina, depois de desaguado por filtros prensa. Em função da necessidade das indústrias em aproveitar ao máximo as áreas disponíveis para disposição de resíduos, devido a dificuldade na obtenção de licenciamento de novas áreas para

este fim, torna-se cada vez mais importante o conhecimento de métodos alternativos de disposição que proporcione um melhor aproveitamento das áreas e que apresente menor potencial de dano ambiental. A tecnologia de desaguamento do resíduo com filtros prensa é nova e ainda pouco se conhece sobre as características geotécnicas deste material para a sua disposição de forma eficiente.

Sendo assim, sugerem-se os seguintes tópicos a serem estudados futuramente:

- Execução de aterro experimental para avaliação do modelo de equipamento mais adequado, em função da pressão exercida no material na compactação, bem como a velocidade das passadas. Pode ser avaliado o custo-benefício da utilização de diferentes equipamentos para compactação, em função do número de passadas e espessura da camada de material solto para a obtenção do grau de compactação desejado;
- Estender os estudos ora realizados para resíduos de outras refinarias, de forma a observar as diferenças dos resultados em função da diferença da origem da bauxita que é beneficiada;
- Obter função para previsão dos parâmetros de resistência do resíduo desaguado por filtro prensa, quando compactado, utilizando as curvas características de sucção do material nas diferentes condições de compactação. Isso permitirá prever o comportamento do material em diversas épocas do ano bem como em diferentes condições de compactação.
- Obtenção de novas curvas de retenção de umidade do material, seguindo ciclos de secagem e umedecimento.
- Realizar ensaios de campo ou com modelo reduzido em laboratório para simular a condição da pilha em período de chuva, verificando assim se ela irá se saturar.
- Estudar possíveis zoneamentos da pilha de resíduos para disposição em épocas de seca e de chuva.
- Avaliar com maior cuidado a influência da soda cáustica no comportamento geotécnico da lama vermelha, especialmente ao longo do tempo.
- Realizar melhores análises com os resultados dos ensaios de adensamento.

- Construção e instrumentação de uma pilha piloto ao longo de um período que englobe pelo menos dois ciclos de secagem e umedecimento.

## 6

### Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1984). **NBR 6459**: Solo – determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1984). **NBR 6508**: grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – determinação da massa específica. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1984). **NBR 7180**: Solo – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1984). **NBR 7181**: Solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1986). **NBR 6457**: Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1986). **NBR 7182**: Solo – ensaio de compactação. Rio de Janeiro.

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. **Discussões sobre as hipóteses de pressões neutras em análises de estabilidade de barragens de terra**. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1980.

ÁVILA, J. P.; NERY, K.D.; FREIRE Neto, J.P.; PANTOJA, R. **Dry Storage Technology - Strength and pore pressure development and compactability of tailings**, Proceedings of the 19th International 87 Symposium of ICSOBA - International Committee for Study of Bauxite, Alumina & Aluminium, Belém – PA, Brasil, 2012.

ÁVILA, J. P. **Disposal Methods for Fine Tailings**, Proceedings of the 19th International Symposium of ICSOBA - International Committee for Study of Bauxite, Alumina & Aluminium, Belém – PA, Brasil, 2012.

BACH, M. e WESTON, V. **Red Mud Filtration Test Results using AFP IV™ Automatic Filter Press**, Bauxite Residue Seminar 2011 – ICSOBA - International Committee for Study of Bauxite, Alumina & Aluminium, Travaux Vol. 36 n° 40, Goa, Índia, 2011. p. 167-175.

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

BIESINGER, M.; SLOTTREE, S. **Tailings paste disposal – more than water recovery**. International Mining Supplement, Paste – Tailing Management. p. 10-12, 2011

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia Ambiental**. Ed. Oficina de Textos, São Paulo, 2008

BULKAI, D. **World review on environmental aspects and protection in Bauxite-Alumina industry**. Informal Publication of United Nations Industrial Development Organization, 1983.

CARMAN, P. C. Trans. Inst. Chem. Engrs., London, 15, 160, 1937. apud

CUPERTINO, D. F. **Caracterização de propriedades do meio poroso em solo arenoso através de permo-porosímetro a gás**. Monografia. Curso de graduação em Geologia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

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. p. 443-454. Belo Horizonte, 2013

CHAVES, A. P. E COLABORADORES. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios – Desaguamento, Espessamento e Filtragem**. Vol 2. Editora Signus, 3ª edição, São Paulo, 2010.

D.; KASWALDER, F.; PARIS, F.; BABINI, E. PEZZI, A. **High Efficiency in Red Mud Filtration with Automatic Filterpress**, Bauxite Residue Seminar 2011 – ICSOBA - International Committee for Study of Bauxite, Alumina & Aluminium, Travaux Vol. 36 n° 40, Goa, Índia, 2011. p. 161-166.

DEPÓSITO DE RESÍDUOS SÓLIDOS – DRS. **Ensaio geotécnicos de laboratório no residuo do Filtro tambor** - relatório técnico da empresa Geomecânica Engenharia S.A. de 16/06/2015 para a empresa Hydro Alunorte.

CUSTÓDIO, G. S. **Estudo do efeito combinado da estrutura e da sucção sobre o comportamento mecânico de solos não saturados**. Tese de Doutorado (Departamento de Engenharia Civil), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2009.

DAVIES, M. **Filtered Dry Stacked Tailings – The Fundamentals**, Proceedings Tailings and Mine Waste 2011, Vancouver, BC, Canada, 2011.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação**. Diretoria de Planejamento e Pesquisa, Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, IPR – Publicação 719. Rio de Janeiro, RJ, 2006, 274 p.

FEUERHARMEL, C.; CEHLING, W. Y. Y.; BICA, A. V. D. **Determination of soil-water characteristic curve of undisturbed colluvium soils**. In: International Symposium Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics, EXPERUS 2005. Trento, Itália, Proceedings, Vol 1, p. 345-349, 2005

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. p. 37-45. Belo Horizonte, 2013

FLSMIDTH MINERALS. **Einco Extractor Horizontal Belt Vacuum Filter.** Mai. 2008. 6 p. folder.

FREDLUND, D. G. **Appropriate concepts and technology for unsaturated soils.** Canadian Geotechnical Journal, 16: 121-139, 1979.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil Mechanics for Unsaturated Soils.** Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., 1993.

89

FREDLUND, D. G.; XING, A. **Equations for the soil-water characteristic curve.** Canadian Geotechnical Journal, 31(3): 521-532, 1994.

FREDLUND, D. G.; VANAPALLI, S. K.; XING, A.; PUFAHL, D. E. **Predicting the shear strength function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve.** Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils, Vol 1, pp. 63-70. Paris, França, 1995.

HEAD, K. H. **Manual of Laboratory Testing – Effective Stress Tests.** Vol 3, Second Edition, (1998).

HOND, R.D.; BROUWER, M. **Design aspect of bauxite residue storage areas.** Bauxite Residue Seminar 2011 – ICSOBA - International Committee for Study of Bauxite, Alumina & Aluminium, Travaux Vol. 36 n° 40, Goa, Índia, 2011. p. 66-74.

IGNATIUS, S. G. & PINTO, C. S. **Aspectos do Comportamento de um Solo em Presença de Efluente Químico a Base de Soda Cáustica.** In II REGEO, Proc...Rio de Janeiro, p.p. 233 – 241, 1991

GUIMARÃES, N. C. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas.** 2011. 129 f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas – Tecnologia Mineral) – Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

GOMES, M. F. M. **Metodologia de análise hierárquica aplicada para escolha do sistema de disposição de subprodutos da mineração com ênfase nos rejeitos de minério de ferro.** 2009. 193 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica da UFOP – Geotecnia Aplicada à Mineração) – Escola de Minas - NUGEO – UFOP, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

KOZENY, J. 1927. Stz. ber. Akad. Wiss. Wien, Abt. IIa, 136, 271. apud CUPERTINO, D. F. **Caracterização de propriedades do meio poroso em solo arenoso através de permo-porosímetro a gás.** Monografia. Curso de graduação em Geologia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

LACERDA, W. A.; MAHLER, C. F. **Comentários sobre as deformações de barragens de terra durante e após a construção analisadas pelo método dos elementos finitos.** IX Seminário Nacional de Grandes Barragens, 24. 2001, Fortaleza. Anais... Fortaleza: CBDB, 2001. V4, pp. 79-82.

LAMBE, T. W. **The structure of compacted Clay.** *Journal Soils Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 84, No SM2, 1958.

LI, L. Y.; RUTHERFORD, G. K. **Effect of bauxite properties on settling of red mud.** *International Journal of Mineral Processing*, 48, Elsevier, p.p. 169-182, 1996.

LI, L. Y. **A study of iron mineral transformation to reduce red mud tailings.** *Waste Management*, 21, p.p. 525-534, 2001.

LIGOCKI, L. P. **Comportamento geotécnico da barragem de Curuá-Una, Pará.** 174 f. Dissertação de Mestrado (Departamento de Engenharia Civil – Área de Geotecnia), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

LIMA, M. K. L. **Retroanálise da formação de um depósito de rejeitos finos de mineração construído pelo método subaéreo.** 2006. 140 f. Dissertação (Pós graduação em Engenharia Civil – Geotecnia) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

LIMA, J. **Simulação numérica do processo de alteamento de áreas de deposição de resíduos pelo método a montante.** 118p. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil), Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

MARSHAL, T. J. **Relations between water and soil.** Com. Bureau Soils Tech. Com. No. 50. Harpenden. 1959.

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

NERY, Kellen Dias. **Caracterização geotécnica e avaliação da compactação de um resíduo da produção de alumina (lama vermelha) desaguado por filtro prensa [manuscrito]** / Kellen Dias Nery. - 2013. xv, 143 f., enc.: il.

NERY, K. D.; VILLAR, L. F. S.; MORENO, R. A.; FREIRE NETO, J. P.; SCARMÍNIO, M.; JÚNIOR, R. S. **Evaluation of Field Compaction of a Filtered Residue from Alumina Production,** Proceedings of the 16th International Seminar on Paste and Thickened Tailings – Paste 2013, Belo Horizonte – MG, Brasil, 2013.

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

OLIVEIRA, O. M.; **Estudo sobre a resistência ao cisalhamento de um solo residual compactado não saturado.** 330p. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

PAN, H.; QING, Y.; PEI-YONG, L. **Direct and indirect measurement of soil suction in the laboratory.** EJGE, vol. 15, 2010.

PEREIRA, D. A.; ASSIS, A. P. **Previsão de poropressão construtiva em barragens via simulação numérica.** XXVI Seminário Nacional de Grandes Barragens, Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, Goiânia – GO, 2005.

PINTO, C. S.; **Curso Básico de Mecânica dos Solos,** 3ª Edição, Oficina de Textos, São Paulo – SP, 2006.

POWER, G.; GRÄFE, M.; KLAUBER, C. **Review of current bauxite residue management, disposal and storage: practices, engineering and science.** CSIRO Document DMR-3608, Project ATF-06-3: Management of bauxite residues, Department of Resources, Energy and Tourism (DRET), 2009.

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

SANTOS, F. S. **Operações unitárias da tecnologia ambiental – Filtração.** Apresentação de seminário. Pontifícia Universidade Católica – PUC, Rio de Janeiro. 2004

SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M. C.; DA MOTTA, M. **Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas.** Revista Matéria, v. 12, n. 2, pp. 322 – 338, 2007

SILVA, SUELI Aparecida da. **Crêterios de projeto de sistemas de disposi o em pilhas de resíduos de alumina desaguados por filtro prensa (manuscrito)** – Ouro Preto, Julho 2016.

SKEMPTON, A. W. **The pore pressure coefficients A and B. Géotechnique**, 4 (2): 143-147, 1954.

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

VALADÃO, G. E. S. **Separa o Sólido-Líquido**. Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

VILLAR, L. F. S. **Estudo do adensamento e ressecamento de resíduos de minera o e processamento de Bauxita**. 443 p. Tese de Doutorado (Departamento de Engenharia Civil), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.