

Dissertação de Mestrado

**CRITÉRIOS DE PROJETO DE SISTEMAS DE
DISPOSIÇÃO EM PILHAS DE RESÍDUOS DE
ALUMINA DESAGUADOS POR FILTRO PRENSA**

AUTORA: SUELI APARECIDA DA SILVA
ESCOLA DE MINAS / UFOP

ORIENTADOR: Prof. Dr. Romero César Gomes (UFOP)

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA DA UFOP

OURO PRETO – JULHO DE 2016

CRITÉRIOS DE PROJETO DE SISTEMAS DE DISPOSIÇÃO EM PILHAS DE RESÍDUOS DE ALUMINA DESAGUADOS POR FILTRO PRENSA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Geotecnia**.

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 20 de Julho de 2016, pela Banca Examinadora composta pelos membros:



Prof. Dr. Romero César Gomes (Orientador/ UFOP)



Prof. Dr. Hernani Mota de Lima (UFOP)



Prof.ª Dr.ª Karla Cristina Araújo Pimentel Maia (UFMG)

S586c Silva, Sueli Aparecida da.
Critérios de projeto de sistemas de disposição em pilhas de resíduos de alumina desaguados por filtro prensa [manuscrito] / Sueli Aparecida da Silva. - 2016.
172f.:

Orientador: Prof. Dr. Romero César Gomes.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia. Programa de Pós Graduação em Geotecnia.

1. Minas e mineração. 2. Alumínio. 3. Taludes (Mecânica do solo) - Estabilidade. 4. Probabilidades. I. Gomes, Romero César. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 624.13

Catálogo: www.sisbin.ufop.br

“Deus nos concede, a cada dia, uma página de vida nova no livro do tempo. Aquilo que colocarmos nela, corre por nossa conta...”

Chico Xavier

“Só uma coisa torna um sonho impossível: o medo de fracassar!”

Paulo Coelho

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação aos meus pais Célia e Leandro que nunca deixaram de me apoiar e orar por mim ao longo de toda a minha caminhada e ao meu esposo Leonardo Leite por sempre estar ao meu lado me incentivando e encorajando a enfrentar todas as dificuldades.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre guiar meus passos, dando força e coragem para eu nunca desistir dos meus objetivos.

Aos meus pais Célia e Leandro e meu irmão Marcelo, por sempre orarem e torcerem por mim.

Ao meu esposo Leonardo Leite, pelo amor, incentivo, companheirismo e compreensão. A você, dedico o meu amor eterno.

À empresa Pimenta de Ávila Consultoria, que desde 2012 tem sido uma verdadeira escola para mim. Em especial àqueles que compartilharam seu conhecimento e contribuíram muito para a realização deste trabalho: Dr. Joaquim Pimenta, João Pimenta, Kellen Nery e Rodrigo Rodrigues.

Às empresas Alunorte e Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) por permitirem a utilização de dados para realização desta pesquisa.

Aos grandes amigos Karla Maia, Andréa Portes e Ângelo Toffolo. Vocês foram muito importantes em mais essa conquista.

Ao meu Professor e Orientador Dr. Romero Gomes, pelos ensinamentos e por ser a referência para que eu seguisse a área de Geotecnia.

Ao meu filho Lorenzo que em breve conhecerei seu rostinho e que já o amo incondicionalmente. Você é a razão da minha vida!

RESUMO

É cada vez mais crescente a geração mundial de resíduos provenientes do beneficiamento industrial, o que leva as empresas a uma busca incessante por novas tecnologias, aliadas à segurança, que minimizem os impactos ambientais causados por elas. Diante de catástrofes econômicas e ambientais causadas por acidentes em estruturas geotécnicas na área de mineração e, conseqüentes dificuldades de obtenção de novos licenciamentos, vêm sendo estudadas novas alternativas de disposição de resíduos.

Uma dessas alternativas, apresentada nesse trabalho, é a utilização de filtros prensa para filtragem dos resíduos proveniente da produção de alumina (lama vermelha), em substituição à atual técnica de disposição mais utilizada que ainda é a via úmida, ou seja, a disposição da lama com baixo teor de sólidos em diques ou barragens de resíduos. Essa tecnologia aumenta significativamente o teor de sólidos do material, reduzindo a área de disposição e minimizando os impactos em caso de ruptura, além de facilitar a recuperação da área por meio da revegetação e aumentar a vida útil de estruturas já existentes.

O presente estudo contempla a proposição de dois arranjos de sistemas de disposição em pilhas de resíduo de alumina desaguado por filtro prensa. O primeiro arranjo foi desenvolvido sobre uma barragem de resíduo na região sudeste do Brasil e o segundo sobre um depósito de resíduo na região norte do Brasil.

Para avaliação da viabilidade dos arranjos propostos e definição dos critérios de projeto, tais como, aspectos ambientais, áreas de disposição, geometrias, entre outros, foi realizada a caracterização geotécnica dos resíduos e das fundações que receberão as pilhas e, posteriormente, análises de estabilidade determinísticas e probabilísticas para obtenção dos fatores de segurança e probabilidades de ruptura. Esse tipo de avaliação tem sido cada vez mais exigido pelas empresas e adotado no desenvolvimento de projetos, por considerar as incertezas e a variabilidade dos parâmetros utilizados no dimensionamento. Ao final do trabalho foi sugerida uma nova metodologia de disposição aproveitando áreas de disposição de resíduos já existentes.

Palavras Chaves: *alumina, lama vermelha, filtro prensa, resíduo filtrado, sistemas de disposição, análise probabilística.*

ABSTRACT

It is increasingly growing global generation of waste from industrial processing, which leads companies to a constant search for new technologies, combined with safety, to minimize environmental impacts caused by them. Faced with economic and environmental disasters caused by accidents in geotechnical structures in the mining area and consequent difficulties in obtaining new licenses have been studied new waste disposal alternatives.

One of these alternatives, presented in this study is the use of filter presses for filtering waste from the alumina production (red mud), replacing the current most widely used disposal technique that is still wet, ie, the provision of sludge with low solids in waste dikes or dams. This technology significantly increases the solids content of the material, reducing the area available, and minimizing the impact in case of failure, and facilitate recovery area through reforestation and increase the life of existing structures.

This study includes the proposition of two arrangements disposal systems in dewatered alumina waste piles by filter press. The first arrangement was developed over a waste dam in southeastern Brazil and the second on a waste deposit in northern Brazil.

To evaluate the viability of the proposed arrangements and defining the design criteria, such as environmental, disposal areas, geometries, among others, was made the geotechnical characterization of waste and foundations that receive the piles and, posteriorly, deterministic and probabilistic stability analysis to obtain the safety factors and failure probabilities. This type of evaluation has been increasingly demanded by companies and adopted in development projects, considering the uncertainties and variability of the parameters used in the design.

At the end of the work a new provision methodology taking advantage of available areas of existing waste was suggested.

Key Words: *alumina, red mud, filter press, filtered waste, disposal systems, probabilistic analysis.*

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Tendências no uso de rejeitos desaguados na mineração (Fonte: adaptado de Davies, 2011).....	2
Figura 2.1 – Disponibilidade do alumínio na crosta terrestre (Fonte: European Aluminium Association, 2015).....	8
Figura 2.2 – Produção de alumínio primário no mundo - 2012 (Fonte: European Aluminium Association, 2015).....	8
Figura 2.3 – Diagrama simplificado do sistema Bayer para produção de alumina a partir da bauxita (Fonte: Silva Filho <i>et al.</i> , 2007).....	9
Figura 2.4 – Digestores (Fonte: Souza, 2010).....	10
Figura 2.5 – Decantador (Fonte: Souza, 2010).....	11
Figura 2.6 – Filtros para separação da lama vermelha (Fonte: Souza, 2010).....	11
Figura 2.7 – Precipitadores de hidrato de alumínio (Fonte: Souza, 2010).....	12
Figura 2.8 – Calcinadores de alumina alfa (Fonte: Souza, 2010).....	12
Figura 2.9 – Bauxita, alumina e alumínio (Fonte: IAI - International Aluminium Institute, 2015).....	13
Figura 2.10 – Produção de alumina no mundo (Fonte: IAI – International Aluminium Institute, 2015).....	14
Figura 2.11 – Difratoograma da lama vermelha da região sudeste do Brasil (Fonte: Villar, 2002).....	16
Figura 2.12 - Barragem do Marzagão – Aditya Birla Hindalco em Ouro Preto / MG. Lançamento contínuo de polpa.....	18
Figura 2.13 – Depósito de resíduo de lama vermelha da Alumar, Ilha de São Luís – MA. Processo de lançamento com secagem.....	19
Figura 2.14 – Disposição de lama vermelha da Alunorte, (Barcarena – PA). Rejeito filtrado por filtro tambor.....	20
Figura 2.15 – Princípio de filtração (Fonte: UFOP, 2004 – Espessamento e Filtração).....	21
Figura 2.16 – Desenho esquemático do sistema de filtração à vácuo (Guimarães, 2011).....	25
Figura 2.17 – Fluxograma das classes dos filtros a vácuo (adaptado de Nery, 2013).....	25
Figura 2.18 – Exemplo de filtro tambor rotativo (Araxá – MG).....	28

Figura 2.19 – Representação esquemática de um filtro de disco convencional (Amarante, 2002).....	29
Figura 2.20 – Ciclo de filtragem no filtro de disco convencional (Guimarães, 2011).....	30
Figura 2.21 – Filtro de disco convencional (Amarante, 2002).....	30
Figura 2.22 – Filtro horizontal de mesa (Fonte: Apostila UFG, 2013 – Separação sólido líquido).....	31
Figura 2.23 – Filtro horizontal de mesa (Araxá – MG).....	32
Figura 2.24 – Filtro horizontal de correia (Fonte: Apostila UFG, 2013 – Separação sólido líquido).....	32
Figura 2.25 – Filtro horizontal de correia (Amarante, 2002).....	33
Figura 2.26 – Filtro prensa de placas verticais – 1000 mm x 1000 mm e tortas com espessura de 30 mm. (Fonte: http://www.grabe.com.br/filtroprensa).....	34
Figura 2.27 – Ciclo de operação dos filtros prensa com placas tipo câmara (Guimarães, 2011).....	35
Figura 2.28 – Ciclo de operação dos filtros prensa com placas tipo diafragma (adaptado de Andritz, 2013).....	36
Figura 2.29 – Filtro prensa de placas horizontais (Amarante, 2002).....	37
Figura 2.30 – Ciclo de um filtro de pressão vertical (Fonte: Larox).....	37
Figura 2.31 – Empilhamento a seco de rejeitos usando o transporte de caminhão (Fonte: http://www.tailings.info).....	42
Figura 2.32 – Distribuições estatísticas com diferentes médias e desvio padrão do fator de segurança (Christian <i>et al.</i> , 1994).....	44
Figura 2.33 – Valores toleráveis de probabilidade de ruptura (Baecher (1982) / Whitman (1984) apud Baecher & Christian (2003)).....	45
Figura 2.34 – Método Monte Carlo (Maia & Assis, 2004).....	50
Figura 2.35 – Esquema do Procedimento de Cálculo do Método Rosenblueth (Rocscience, 2013).....	52
Figura 2.36 – Combinação (2^n) dos Pontos Particulares X_{i+} e X_{i-} (Maia, 2003).....	52
Figura 3.1 – Companhia Brasileira de Alumínio, município de Alumínio – SP.....	53
Figura 3.2 – Resumo esquemático do processo de fabricação de alumina da CBA.....	54
Figura 3.3 – Localização da Barragem Palmital (Fonte: Google Earth, 2014).....	55
Figura 3.4 – Vista geral da Barragem Palmital (Fonte: CBA, 2013).....	56

Figura 3.5 – Comparação entre os resíduos de disposição úmida e seca (Fonte: CBA, 2013).....	57
Figura 3.6 – Simulação da formação da pilha teste de resíduo filtrado da CBA (Nery, 2013).....	58
Figura 3.7 – Compactação do resíduo nas valas com a escavadeira de esteira Doosan SOLAR255LC-V (Nery <i>et. al.</i> , 2013).....	59
Figura 3.8 – Curvas granulométricas dos blocos e amostras deformadas da área teste da CBA.....	61
Figura 3.9 – Carta de plasticidade dos blocos e amostras deformadas da área teste da CBA.....	62
Figura 3.10 – Curvas de compactação das amostras deformadas do resíduo filtrado da CBA.....	63
Figura 3.11 – Gráfico da poropressão <i>versus</i> tensão vertical total obtido pelo ensaio PN nos corpos de prova moldados para diferentes condições de compactação (Nery, 2013).....	67
Figura 3.12 – Locação dos pontos especificados <i>versus</i> executados na Barragem Palmital.....	69
Figura 3.13 – γ x profundidade - CPTu 01 ao 04 e Ensaio de Laboratório.....	71
Figura 3.14 – Variação das tensões totais (σ_v), efetivas (σ'_v) e da poropressão (u) com a profundidade CPTu-01 e 02.....	72
Figura 3.15 – Variação das tensões totais (σ_v), efetivas (σ'_v) e da poropressão (u) com a profundidade CPTu-03 e 04.....	73
Figura 3.16 – Su x profundidade – CPTu-04, VT-04 e Triaxial UU.....	74
Figura 3.17 – Su x profundidade e Su x σ'_v para amostras na condição indeformada – Ensaio VT-01 ao 04.....	75
Figura 3.18 – Su x profundidade – Ensaio CPTu-01 ao 04 e VT-01 ao 04.....	75
Figura 3.19 – Su x profundidade e Su x σ'_v para amostras na condição amolgada – Ensaio VT-01 ao 04.....	76
Figura 3.20 – M x σ'_v – CPTu-01 ao 04 e Ensaio de Adensamento.....	77
Figura 3.21 – C_v e C_h x σ'_v – CPTu-01 ao 04 e Ensaio de Adensamento.....	78
Figura 4.1 – Alunorte do Brasil S.A. em Barcarena – PA.....	80
Figura 4.2 – Vista geral do DRS1 em operação (Fonte: Google Earth, 2014).....	82

Figura 4.3 – Vista aérea do DRS1 em operação (Foto: data 17/07/2010).....	83
Figura 4.4 – Área dos ensaios geotécnicos da área teste da Alunorte.....	85
Figura 4.5 – Simulação da formação da pilha teste de resíduo filtrado da Alunorte.....	87
Figura 4.6 – Conformação final da pilha de resíduo disposta em seu ângulo de repouso.....	87
Figura 4.7 – Vista do resíduo filtrado de granulometria grosseira.....	88
Figura 4.8 – Vista do resíduo filtrado de granulometria média.....	89
Figura 4.9 – Vista do processo de espalhamento/compactação – Etapa 1.....	90
Figura 4.10 – Vista do processo de umedecimento/homogeneização – Etapa 2.....	90
Figura 4.11 – Ensaio para determinação da densidade “in situ” (<i>hif</i>).....	91
Figura 4.12 – Ensaio para determinação da umidade e Grau de Compactação (GC).....	91
Figura 4.13 – Curvas granulométricas das amostras do resíduo da Alunorte.....	94
Figura 4.14 – Carta de plasticidade das amostras do resíduo da Alunorte.....	95
Figura 4.15 – Curva de compactação de amostra do resíduo da Alunorte.....	96
Figura 4.16 – Gráfico da poropressão <i>versus</i> tensão vertical total obtido pelo ensaio PN nos corpos de prova moldados para diferentes condições de compactação.....	98
Figura 4.17 – Localização dos pontos (ilhas de investigação) dos ensaios de campo.....	100
Figura 4.18 – γ x profundidade – Região Norte.....	102
Figura 4.19 – γ x profundidade – Região Sul.....	102
Figura 4.20 – γ x profundidade – Região Oeste.....	103
Figura 4.21 – γ x profundidade – Região Norte/Leste.....	103
Figura 4.22 – γ x profundidade – Região Sul/Leste.....	104
Figura 4.23 – S_u x σ'_v e S_u x profundidade – Região Norte.....	106
Figura 4.24 – S_u x σ'_v e S_u x profundidade – Região Sul.....	106
Figura 4.25 – S_u x σ'_v e S_u x profundidade – Região Oeste.....	107
Figura 4.26 – S_u x σ'_v e S_u x profundidade – Região Norte/Leste.....	107
Figura 4.27 – S_u x σ'_v e S_u x profundidade – Região Sul/Leste.....	108
Figura 4.28 – S_u x σ'_v e S_u x profundidade – Junção de todos os ensaios Vane Test....	108
Figura 4.29 – Variação dos valores de SPT em função da profundidade.....	109
Figura 4.30 – M x σ'_v – Região Norte.....	111
Figura 4.31 – M x σ'_v – Região Sul.....	111
Figura 4.32 – M x σ'_v – Região Oeste.....	112
Figura 4.33 – M x σ'_v – Região Norte/Leste.....	112

Figura 4.34 – $M \times \sigma'_v$ – Região Sul/Leste.....	113
Figura 4.35 – c_v e $c_h \times \sigma'_v$ – Região Norte.....	114
Figura 4.36 – c_v e $c_h \times \sigma'_v$ – Região Sul.....	115
Figura 4.37 – c_v e $c_h \times \sigma'_v$ – Região Oeste.....	115
Figura 4.38 – c_v e $c_h \times \sigma'_v$ – Região Norte/Leste.....	116
Figura 4.39 – c_v e $c_h \times \sigma'_v$ – Região Sul/Leste.....	116
Figura 5.1 – Vista do talude de montante da barragem principal (Foto CBA, 2013).....	119
Figura 5.2 – Precipitação média mensal do município de Alumínio – SP.....	120
Figura 5.3 – Indicação das seções das análises de estabilidade realizadas.....	123
Figura 5.4 – Seções A-A e B-B - Análise de Estabilidade Determinística – Cobertura com resíduo do filtro prensa – $FS = 1,75$	124
Figura 5.5 – Seções C-C e D-D - Análise de Estabilidade Determinística – Cobertura com resíduo do filtro prensa – $FS = 1,70$	124
Figura 5.6 – Porcentagens de influência das variáveis aleatórias na variação do Fator de Segurança das Seções A-A e B-B.....	129
Figura 5.7 – Porcentagens de influência das variáveis aleatórias na variação do Fator de Segurança das Seções C-C e D-D.....	130
Figura 5.8 – Histograma do Fator de Segurança – $FS_{\text{médio probab.}} = 1,699$; $Pf = 0,008\%$	132
Figura 5.9 – Distribuição Acumulada do Fator de Segurança.....	132
Figura 5.10 – Histograma da taxa de aumento da resistência não drenada da fundação.....	133
Figura 5.11 – Histograma do Fator de Segurança – $FS_{\text{médio probab.}} = 1,704$; $Pf = 0,0385\%$ (obtido por cálculo em planilha de Excel).....	133
Figura 5.12 – Distribuição Acumulada do Fator de Segurança.....	134
Figura 5.13 – Histograma do ângulo de atrito do resíduo filtrado “seco”.....	134
Figura 5.14 – Seções A-A e B-B – FS obtidos pelas combinações realizadas.....	135
Figura 5.15 – Seções C-C e D-D – FS obtidos pelas combinações realizadas.....	135
Figura 5.16 – Planejamento da disposição do resíduo de alumina produzido pelo Filtro Prensa (Modificado CBA, 2014).....	137
Figura 5.17 – Configuração final do arranjo proposto para a Barragem Palmital – Detalhe da área úmida.....	137

Figura 5.18 – Configuração final do arranjo proposto para a Barragem Palmital – Descomissionamento.....	138
Figura 5.19 – Configuração final do arranjo proposto – Seções A-A e B-B (maciços/praias).....	138
Figura 5.20 – Configuração final do arranjo proposto – Seções C-C e D-D (margens)..	139
Figura 6.1 – Configuração inicial do DRS1.....	141
Figura 6.2 – Precipitação média mensal - Estação Vila do Conde.....	142
Figura 6.3 – Localização da seção analisada.....	145
Figura 6.4 – Análise de Estabilidade Determinística – Cobertura com resíduo do filtro prensa – FS = 1,55.....	146
Figura 6.5 – Análise de Estabilidade Determinística – Cobertura com resíduo do filtro prensa – Detalhe.....	147
Figura 6.6 – Porcentagens de influência das variáveis aleatórias na variação do Fator de Segurança da seção típica da Alunorte.....	151
Figura 6.7 – Histograma do Fator de Segurança – $FS_{\text{médio probab.}} = 1,552$; $P_f = 7,58\%$	152
Figura 6.8 – Distribuição Acumulada do Fator de Segurança.....	153
Figura 6.9 – Histograma da taxa de aumento da resistência não drenada da fundação...153	
Figura 6.10 – FS obtidos pelas combinações realizadas.....	154
Figura 6.11 – Arranjo proposto para o DRS1 – (1) Do lado esquerdo detalhe da área úmida e (2) Do lado direito a configuração final do arranjo.....	155
Figura 6.12 – Configuração final do arranjo proposto – Seção analisada.....	156

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Composição da lama vermelha para diversos tipos de bauxita (Fonte: Silva Filho et al., 2007).....	16
Tabela 2.2 – Mecanismos de filtragem e os principais fornecedores (Guimarães, 2011).....	21
Tabela 2.3 – Resumo das principais unidades de rejeito filtrado do mundo (adaptado de Ulrich e Coffin, 2013 – publicado no Paste 2013).....	23
Tabela 2.4 – Tipos de filtros sob pressão.....	34
Tabela 2.5 – Valores Típicos de Coeficiente de Variação Segundo Assis et al. (2001).....	46
Tabela 3.1 – Graus de Compactação (GC) obtidos em campo para cada número de passadas do equipamento de esteiras.....	59
Tabela 3.2 – Peso específico natural para cada número de passadas do equipamento de esteiras.....	60
Tabela 3.3 – Resultados dos ensaios de permeabilidade à carga variável (Nery, 2013).....	64
Tabela 3.4 – Resultados dos ensaios de adensamento unidimensional (Nery, 2013).....	64
Tabela 3.5 – Parâmetros de resistência (Nery, 2013).....	66
Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de compactação de laboratório com resíduo filtro prensa.....	91
Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de campo da camada compactada – resíduo filtro prensa.....	92
Tabela 4.3 – Peso específico natural do resíduo da Alunorte.....	94
Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios de permeabilidade à carga variável.....	96
Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios de adensamento unidimensional.....	97
Tabela 4.6 – Parâmetros de resistência do resíduo da Alunorte.....	97
Tabela 4.7 – Correlações entre resistência não drenada e tensão vertical efetiva.....	105
Tabela 4.8 – Parâmetros de resistência obtidos dos ensaios SPT.....	109
Tabela 4.9 – Correlações entre módulo confinante e tensão vertical efetiva.....	110
Tabela 4.10 – Valores médios obtidos para os coeficientes de adensamento.....	114
Tabela 5.1 – Precipitação média mensal - Estação Mairinque.....	121
Tabela 5.2 – Parâmetros geotécnicos médios dos materiais, Desvio padrão, Distribuição estatística e valores mínimos e máximos adotados nas análises da CBA para o método Monte Carlo.....	126

Tabela 5.3 – Método FOSM – Valores de FS obtidos – Seções A-A e B-B.....	128
Tabela 5.4 – Análise do FS utilizando o Método FOSM – Seções A-A e B-B.....	128
Tabela 5.5 – Método FOSM – Valores de FS obtidos em cada análise – Seções C-C e D-D.....	129
Tabela 5.6 – Análise do FS utilizando o Método FOSM – Seções C-C e D-D.....	130
Tabela 5.7 – Instabilidade do arranjo proposto para a empresa CBA - Resumo dos Resultados das Análises Probabilísticas.....	136
Tabela 6.1 – Precipitação média mensal - Estação Vila do Conde.....	143
Tabela 6.2 – Parâmetros geotécnicos médios dos materiais, Desvio padrão, Distribuição estatística e valores mínimos e máximos adotados nas análises da Alunorte para o método Monte Carlo.....	148
Tabela 6.3 – Método FOSM – Valores de FS obtidos – Seção típica da Alunorte.....	149
Tabela 6.4 – Análise do FS utilizando o Método FOSM – Seção típica da Alunorte.....	150
Tabela 6.5 – Instabilidade do arranjo proposto para a empresa Alunorte - Resumo dos Resultados das Análises Probabilísticas.....	154
Tabela 7.1 – Tabela Resumo – Dados comparativos dos estudos de caso.....	159
Tabela 7.2 – Principais resultados obtidos dos estudos de caso.....	161

Lista de Símbolos, Nomenclatura e Abreviações

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

a_v : coeficiente de compressibilidade

\bar{B} : relação entre a poropressão e a tensão principal maior

CBA: Companhia Brasileira de Alumínio

CPTu: piezocone penetration test

c : coesão em termos de tensões totais

c' : coesão em termos de tensões efetivas

C_c : índice de compressão

C_r : índice de recompressão

CR: $C_c/(1+e_i)$

C_h : coeficiente de adensamento horizontal

C_v : coeficiente de adensamento vertical

CV: coeficiente de variação

DRS: Depósito de Resíduos Sólidos

e : índice de vazios

e_0 : índice de vazios inicial

E [F]: valor médio esperado para FS

FOSM: First Order Second Moment

FS: Fator de Segurança

GC: Grau de compactação

H_0 : altura inicial do corpo de prova

IAI: International Aluminium Institute

IBRAM: Instituto Brasileiro de Mineração

K-S: Kolmogorov-Smirnov

k : coeficiente de permeabilidade

M : número de vezes em que a força resistente excedeu as forças atuantes (ou seja, em que o fator de segurança foi maior que 1,0).

M : módulo confinante

MBP: Mineração Bauxita Paragominas

MRN: Mineração Rio do Norte

m_v : coeficiente de compressibilidade volumétrica
NBR: Norma Brasileira
P: precipitação diária
 p_a : pressão atmosférica
Pa: Pascal
 P_f : probabilidade de ruptura
pH: potencial hidrogeniônico
PN: pressão neutra
R: Risco
RFP: resíduo do filtro prensa
RFT: resíduo do filtro tambor
 R_f : razão de atrito $= (f_s/q_t)$ 100%
Ru: parâmetro de poropressão
S: grau de saturação
SPT: standard penetration test
Su: resistência não drenada
TS: teor de sólidos
u: poropressão
UFG: Universidade Federal de Goiás
UFOP: Universidade Federal de Ouro Preto
UU: não consolidado, não drenado
V [F]: variância de FS, igual ao quadrado do seu desvio padrão
V [xi]: variância de cada um dos x_i
VT: Vane Test
 \bar{X}_l : valor médio da distribuição da variável x_i
w: teor de umidade
 $w_{ót}$: umidade ótima obtida do ensaio de compactação na energia Proctor Normal
 σ_i : desvio padrão da distribuição da variável x_i
 σ : desvio padrão
 σ_3 : tensão normal principal menor
 σ_1 : tensão normal principal maior
 σ'_p : tensão normal efetiva de pré-adensamento

σ'_v : tensão normal efetiva vertical

μ : média

δF : variação de FS que ocorre quando se variam de um valor igual a δx_i cada um dos n parâmetros x_i

δx_i : taxa de variação das variáveis envolvidas no estudo

γ : peso específico natural

γ_s : peso específico dos grãos

γ_w : peso específico da água

φ : ângulo de atrito em termos de tensões totais

φ' : ângulo de atrito em termos de tensões efetivas

Índice

CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1– CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 – OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	3
1.3 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	5
CAPÍTULO 2	7
CONCEPÇÕES E PREMISSAS DE SISTEMAS DE DISPOSIÇÃO EM PILHAS DE RESÍDUOS DE ALUMINA	7
2.1 – O ALUMÍNIO	7
2.2 – PROCESSO DE PRODUÇÃO DA ALUMINA.....	9
2.3 – RESÍDUO GERADO NA PRODUÇÃO DE ALUMINA	14
2.4 – SISTEMAS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS/RESÍDUOS FINOS	17
2.5 – REJEITOS/RESÍDUOS FILTRADOS	20
2.5.1 – TIPOS DE FILTROS	23
2.5.1.1 – FILTROS À VÁCUO.....	24
2.5.1.2 – FILTROS SOB PRESSÃO	33
2.6 – CONDICIONANTES DOS SISTEMAS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS / RESÍDUOS FILTRADOS	39
2.6.1 – ASPECTOS DE PROJETO E DE CONSTRUÇÃO	39
2.6.2 – VANTAGENS E DESVANTAGENS DA TECNOLOGIA DE FILTRAGEM DE REJEITOS/RESÍDUOS	41
2.7 – ABORDAGEM PROBABILÍSTICA	43
2.7.1 – MÉTODO FOSM.....	47
2.7.2 – MÉTODO MONTE CARLO	48
2.7.3 – MÉTODO DOS PONTOS DE ESTIMATIVA OU ROSENBLUETH	51
CAPÍTULO 3	53
PRODUÇÃO, GERAÇÃO E DISPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS DE ALUMINA DA CBA	53

3.1 – INTRODUÇÃO	53
3.2 – DISPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS DE ALUMINA DA CBA	55
3.3 – CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DOS RESÍDUOS DE ALUMINA DA CBA	56
3.3.1 – RESÍDUO FILTRADO	56
3.3.1.1 – PRINCIPAIS RESULTADOS – ENSAIOS GEOTÉCNICOS DE CAMPO E LABORATORIAIS.....	58
3.3.2 – MATERIAL DE FUNDAÇÃO	67
3.3.2.1 – PROGRAMAÇÃO DAS INVESTIGAÇÕES E ENSAIOS LABORATORIAIS	68
CAPÍTULO 4	80
PRODUÇÃO, GERAÇÃO E DISPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS DE ALUMINA DA ALUNORTE	80
4.1 – INTRODUÇÃO	80
4.2 – DISPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS DE ALUMINA DA ALUNORTE	81
4.3 – CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DOS RESÍDUOS DE ALUMINA DA ALUNORTE	84
4.3.1 – RESÍDUO FILTRADO	84
4.3.1.1 – PRINCIPAIS RESULTADOS – ENSAIOS GEOTÉCNICOS DE CAMPO E LABORATORIAIS.....	85
4.3.2 – MATERIAL DE FUNDAÇÃO	99
4.3.2.1 – PROGRAMAÇÃO DAS INVESTIGAÇÕES E ENSAIOS LABORATORIAIS	99
4.3.2.2 – PRINCIPAIS RESULTADOS – ENSAIOS GEOTÉCNICOS DE CAMPO E LABORATORIAIS.....	101
CAPÍTULO 5	118
CRITÉRIOS E METODOLOGIAS DE PROJETO PARA PILHAS DE RESÍDUOS DE ALUMINA DA CBA	118
5.1 – INTRODUÇÃO	118
5.2 – CARACTERIZAÇÃO PLUVIOMÉTRICA DA REGIÃO	119
5.3 – BALANÇO DE MASSAS	122
5.4 – ANÁLISES DE ESTABILIDADE	122
5.4.1 – ANÁLISES DETERMINÍSTICAS	123
5.4.2 – ANÁLISES PROBABILÍSTICAS	125
5.4.2.1 – MÉTODO FOSM.....	127

5.4.2.2 – MÉTODO MONTE CARLO	131
5.4.2.3 – ROSENBLUETH.....	134
5.5 – CONFIGURAÇÃO FINAL DO ARRANJO PROPOSTO.....	136
CAPÍTULO 6.....	140
CRITÉRIOS E METODOLOGIAS DE PROJETO PARA PILHAS DE RESÍDUOS DE ALUMINA DA ALUNORTE.....	140
6.1 – INTRODUÇÃO	140
6.2 – CARACTERIZAÇÃO PLUVIOMÉTRICA DA REGIÃO	141
6.3 – BALANÇO DE MASSAS	144
6.4 – ANÁLISES DE ESTABILIDADE	144
6.4.1 – ANÁLISES DETERMINÍSTICAS	145
6.4.2 – ANÁLISES PROBABILÍSTICAS	148
6.4.2.1 – MÉTODO FOSM.....	149
6.4.2.2 – MÉTODO MONTE CARLO	152
6.4.2.3 – ROSENBLUETH.....	153
6.5 – CONFIGURAÇÃO FINAL DO ARRANJO PROPOSTO.....	155
CAPÍTULO 7	157
7.1 – CONCLUSÕES	157
7.2 – SUGESTÕES PARA PESQUISAS COMPLEMENTARES	164
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	166

INTRODUÇÃO

1.1– CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com o frequente crescimento da exploração mineral, os rejeitos são consequências inevitáveis dos processos de tratamento a que são submetidos os minérios, sendo gerados, paralelamente, ao produto de interesse. Esses rejeitos, que são produzidos em grande quantidade, afetam de forma qualitativa e quantitativa o meio ambiente. Por este motivo, essa grande produção de rejeitos tem gerado uma preocupação cada vez maior nas empresas, que buscam minimizar os impactos ambientais aliados à segurança, adotando metodologias de disposição que otimizem a redução de áreas para estocagem e recuperação de água do processo. Uma dessas metodologias é a filtragem ou o espessamento dos rejeitos.

O conjunto de leis ambientais também motiva a busca por uma prática de minerar cada vez mais moderna e sustentável, adequando as práticas atuais às situações legais, reduzindo assim os impactos gerados por essa atividade.

O conceito de disposição de rejeitos espessados foi introduzido por Robinsky em 1968 e consiste no aumento da concentração de sólidos em peso, por meio do desaguamento da polpa. Neste processo são utilizados os espessadores ou os filtros, que possuem a função de separar os sólidos do líquido via processo mecânico.

Davies (2011) menciona que a técnica de filtragem de rejeitos está se tornando cada vez mais comum em muitas minas no mundo. De acordo com o autor, existem mais pilhas de rejeitos filtrados dispostos em superfície do que disposição de rejeitos em forma de pasta. A Figura 1.1 apresenta o número de instalações de rejeitos espessados numa escala global.

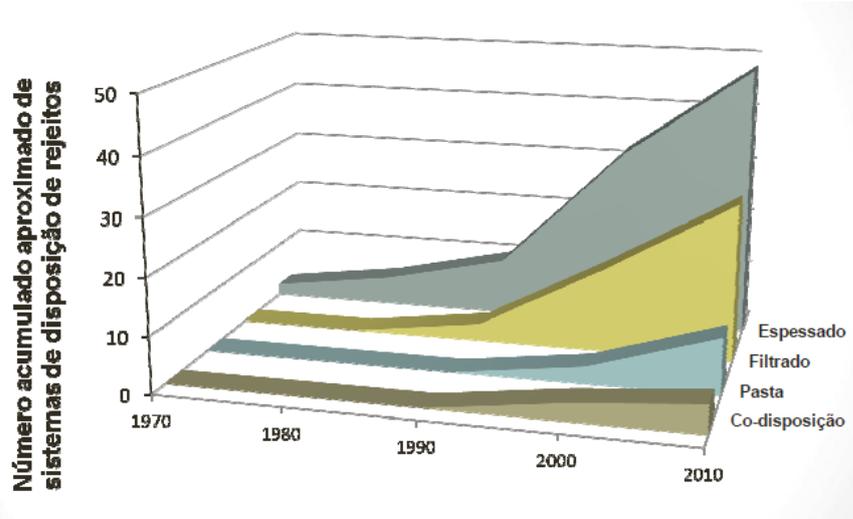


Figura 1.1 - Tendências no uso de rejeitos desaguados na mineração (Fonte: adaptado de Davies, 2011)

Uma das grandes vantagens da disposição de rejeitos filtrados é a facilidade da recuperação da área através da revegetação. Davies (2004) cita que é possível iniciá-la desde o começo da vida útil da estrutura, o que contribuirá também para o controle de poeira e da erosão.

De acordo com Access Mining Consultants (2003), com relação à recuperação e revegetação de rejeitos filtrados, estes não são considerados mais desafiadores do que os outros tipos de rejeitos dispostos. Projetos de cobertura adequados e estáveis são sempre um desafio e o sucesso da revegetação, no caso de rejeitos filtrados, não foi ainda caracterizado devido ao número limitado de operações e também devido à escassez de informação a esse respeito.

A principal proposta da pesquisa aqui apresentada corresponde ao desenvolvimento de critérios de projeto para disposição, por meio de pilhas, de resíduos provenientes da produção de alumina (lama vermelha) e desaguado por filtro prensa, de forma a proporcionar melhores condições quanto aos aspectos de segurança e ambientais. Como base do estudo, foi realizada a caracterização dos resíduos e das fundações que receberão as pilhas, definindo assim, suas propriedades e comportamento geotécnico.

Os resíduos estudados são oriundos da Empresa CBA – Companhia Brasileira de Alumínio, localizada no Estado de São Paulo e da Empresa ALUNORTE - Alumina do Norte do Brasil S. A., localizada no Estado do Pará. Para as duas empresas, foi realizada uma área teste e os ensaios geotécnicos foram conduzidos em amostras deformadas do resíduo, coletadas na saída do filtro prensa piloto, após o término do período de calibração do filtro quanto às condições de teor de sólidos e teor de soda da “torta” requeridas pelas empresas. Após a compactação do resíduo, foram coletadas amostras indeformadas para realização de mais ensaios geotécnicos.

Deve-se ressaltar que, para a CBA foi estudado o empilhamento do resíduo desaguado sobre uma de suas barragens de resíduos e para a Alunorte, foi considerado que o resíduo desaguado será disposto sobre um de seus depósitos de resíduos.

As duas empresas mencionadas produzem um grande volume de lama vermelha o que pode acarretar graves consequências ambientais na região onde estão instaladas, em caso de ruptura de suas atuais estruturas de disposição de resíduo.

Cabe esclarecer que, ao longo de todo o texto dessa dissertação é diferenciado o termo *rejeito* do termo *resíduo*. O termo *rejeito* é sempre utilizado para se referir ao material descartado proveniente da extração do minério na mineração. O termo *resíduo* se refere ao material descartado após o beneficiamento do minério na refinaria. Tanto a CBA, quanto a Alunorte beneficiam o minério bauxita para extrair a alumina em suas refinarias. Esse processo gera o resíduo denominado de lama vermelha que é descartado em suas atuais estruturas de disposição.

1.2 – OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Após a filtragem da lama vermelha em filtros prensa, o resíduo apresenta o aspecto de “tortas”, com estrutura densa e com teor de sólidos elevado. Isto possibilita a disposição deste resíduo em pilhas, compactando o material de forma a ocupar menores áreas para disposição quando comparada ao método convencional. O objetivo geral do estudo

proposto é desenvolver critérios de projeto de sistemas de disposição em pilhas de resíduos provenientes da produção de alumina. As duas metodologias avaliadas e comparadas são:

- Disposição de uma pilha de resíduo desaguado por filtro prensa sobre uma barragem de resíduo na região sudeste do Brasil;
- Disposição de uma pilha de resíduo desaguado por filtro prensa sobre um depósito de resíduos na região norte do Brasil.

São objetivos específicos deste trabalho:

- Contextualizar o problema;
- Elaborar revisão bibliográfica visando os critérios de projetos existentes para empilhamentos de rejeito, uso da tecnologia de rejeitos filtrados, além de aspectos relacionados aos resíduos de alumina (lama vermelha);
- Analisar ensaios laboratoriais e de campo do resíduo para conhecimento e determinação das características geotécnicas das duas pilhas e também das duas fundações (barragem e depósito de resíduo);
- Elaborar e estudar arranjo das pilhas do resíduo desaguado pelo filtro prensa, sobre as fundações (barragem e depósito de resíduo);
- Avaliar os aspectos construtivos e ambientais dos arranjos propostos. Serão estudadas regiões nas pilhas onde deverá ser lançado o resíduo saturado proveniente do período chuvoso;
- Aplicar métodos probabilísticos nas análises de estabilidade para a consideração da variabilidade dos parâmetros geotécnicos e determinação da probabilidade de ruptura dos taludes de cada arranjo;
- Fazer recomendações de fechamento para os arranjos estudados, de forma a minimizar os impactos ambientais causados;
- Analisar e sintetizar de forma geral os estudos realizados no referido trabalho de pesquisa.

1.3 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho é dividido em sete capítulos de acordo com os temas analisados e foi estruturado da seguinte maneira:

- Resumo / Abstract: apresenta o resumo do conteúdo do trabalho, nos idiomas português e inglês, ressaltando a sua natureza, objetivos e importância;
- Capítulo 1: neste capítulo a proposta de trabalho é apresentada, destacando-se as considerações iniciais do estudo, os objetivos previstos e a própria estrutura da dissertação;
- Capítulo 2: apresenta uma síntese dos estudos existentes sobre o tema em questão, abordando aspectos gerais sobre o alumínio, seu beneficiamento e resíduo gerado, métodos alternativos de disposição dos rejeitos/resíduos finos, técnicas de filtragem do resíduo da alumina, as condicionantes geotécnicas para os sistemas de disposição desse material filtrado e os métodos probabilísticos que podem ser utilizados para calcular a probabilidade de ruptura desses sistemas;
- Capítulo 3: apresenta os principais resultados dos ensaios geotécnicos de caracterização e resistência realizados em amostras do resíduo da CBA, tanto para o material filtrado por filtro prensa, quanto para o material de fundação no qual pretende-se dispor o resíduo filtrado;
- Capítulo 4: apresenta os principais resultados dos ensaios geotécnicos de caracterização e resistência realizados em amostras do resíduo da Alunorte, tanto para o material filtrado por filtro prensa, quanto para o material de fundação no qual pretende-se dispor o resíduo filtrado;
- Capítulo 5: descreve os critérios e metodologias utilizados para elaboração do arranjo proposto para a CBA, assim como estudos de pluviometria da região,

balanço de massas, análises de estabilidade determinísticas e probabilísticas, estudo de zoneamento da pilha para disposição do resíduo em período chuvoso e a configuração final do arranjo proposto;

- Capítulo 6: descreve os critérios e metodologias utilizados para elaboração do arranjo proposto para a Alunorte, assim como estudos de pluviometria da região, balanço de massas, análises de estabilidade determinísticas e probabilísticas, estudo de zoneamento da pilha para disposição do resíduo em período chuvoso e a configuração final do arranjo proposto;
- Capítulo 7: reúne as principais conclusões provenientes das análises e avaliações realizadas durante o desenvolvimento desta dissertação, incluindo-se também algumas sugestões para pesquisas futuras e/ou complementares;
- Referências Bibliográficas: contempla a listagem de todos os materiais técnicos consultados e referenciados ao longo do texto, em conformidade com a ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

CAPÍTULO 2

CONCEPÇÕES E PREMISSAS DE SISTEMAS DE DISPOSIÇÃO EM PILHAS DE RESÍDUOS DE ALUMINA

Neste capítulo é apresentada uma síntese dos estudos existentes sobre o tema em questão, abordando aspectos gerais sobre o alumínio, seu beneficiamento e resíduo gerado, métodos alternativos de disposição dos rejeitos/resíduos finos, técnicas de filtragem do resíduo da alumina, as condicionantes geotécnicas para os sistemas de disposição desse material filtrado e os métodos probabilísticos que podem ser utilizados para calcular a probabilidade de ruptura desses sistemas.

2.1 – O ALUMÍNIO

Dentre os materiais provenientes da exploração mineral mais utilizados pelo homem e geradores de resíduo, está o alumínio e suas ligas. Segundo a página eletrônica do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) – www.ibram.org.br (em 18/12/2013), um estudo desenvolvido pela Bain & Company afirma que o setor de alumínio no Brasil passou por fortes transformações nos últimos 15 anos. A demanda interna por alumínio praticamente dobrou nos últimos dez anos, saindo de 750 mil toneladas anuais para 1,4 milhão de toneladas por ano. O estudo aponta, ainda, que o consumo de alumínio no país deverá crescer ainda mais. Segundo as projeções, em 2020, o Brasil poderá consumir entre 2,4 e 2,8 milhões de toneladas do material por ano.

O alumínio é o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, como mostra a Figura 2.1. A disponibilidade de bauxita, o minério bruto do qual é obtido o alumínio, é suficiente para suprir a demanda de alumínio por vários séculos. A bauxita é composta principalmente de óxido de alumínio, além de sílica, óxidos de ferro e titânio.

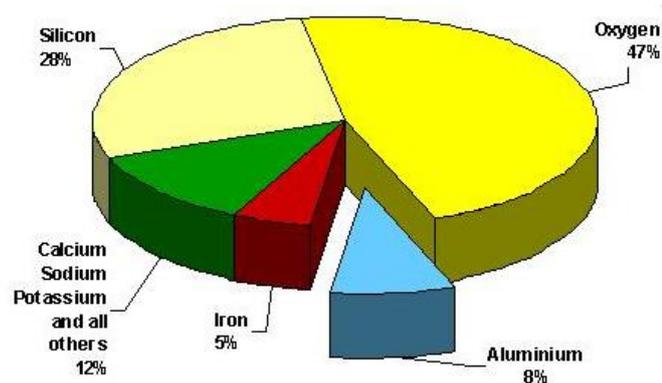


Figura 2.1 – Disponibilidade do alumínio na crosta terrestre
(Fonte: European Aluminium Association, 2015)

Mais de 160 milhões de toneladas de bauxita são mineradas a cada ano. Os principais depósitos são encontrados em áreas tropicais e sub-tropicais. A bauxita é extraída na Austrália, América Central e América do Sul (Jamaica, Brasil, Suriname, Venezuela, Guiana), África (Guiné), Ásia (China e Índia), Rússia (Cazaquistão) e Europa (Grécia). Atualmente, a China lidera a produção mundial de alumínio, produzindo 45% do total no ano de 2012 (Figura 2.2). (European Aluminium Association, 2015).

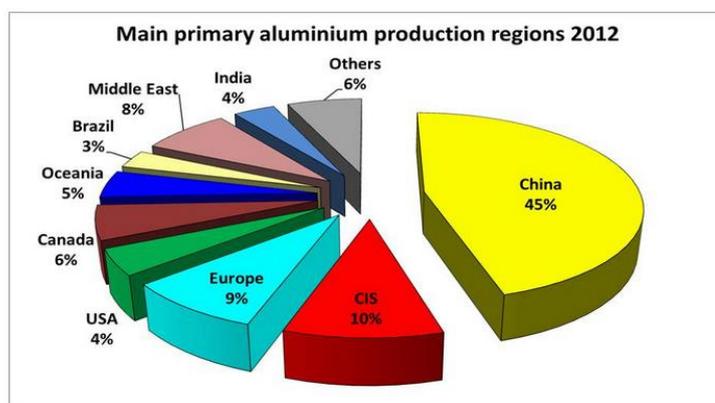


Figura 2.2 – Produção de alumínio primário no mundo - 2012
(Fonte: European Aluminium Association, 2015)

2.2 – PROCESSO DE PRODUÇÃO DA ALUMINA

O sistema Bayer é atualmente o mais usado em quase todas as plantas de beneficiamento da bauxita, mesmo com o elevado consumo de energia que ele demanda. Este sistema foi desenvolvido em 1888, na Alemanha, e suas principais fases de produção, desde a entrada do minério (bauxita) até a saída do produto final (alumina), são: digestão, clarificação, precipitação e calcinação. Essas fases tem um fluxograma de certa complexidade, mas que pode ser resumido em um circuito básico, apresentado na Figura 2.3 e descrito a seguir.

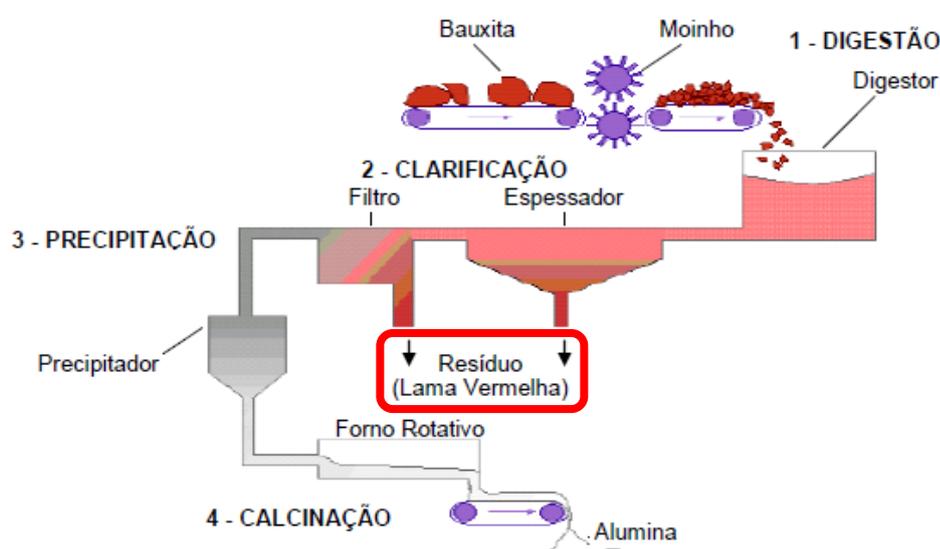


Figura 2.3 – Diagrama simplificado do sistema Bayer para produção de alumina a partir da bauxita (Fonte: Silva Filho *et al.*, 2007)

Moagem da bauxita

A fase inicial do processo envolve a moagem da bauxita com o objetivo de reduzir a dimensão das partículas minerais e tornar o mineral apropriado para a digestão. A bauxita é moída em moinhos de bola (diâmetros entre 0,08 mm e 0,06 mm) (IAI, 2008).

A moagem da bauxita é seguida da digestão.

Digestão

A digestão (Figura 2.4) tem o objetivo de extrair a alumina contida na bauxita. Nesse processo a alumina é dissolvida pelo licor pobre (solução de soda cáustica), enquanto as impurezas que constituem a lama permanecem insolúveis. (Souza, 2010)

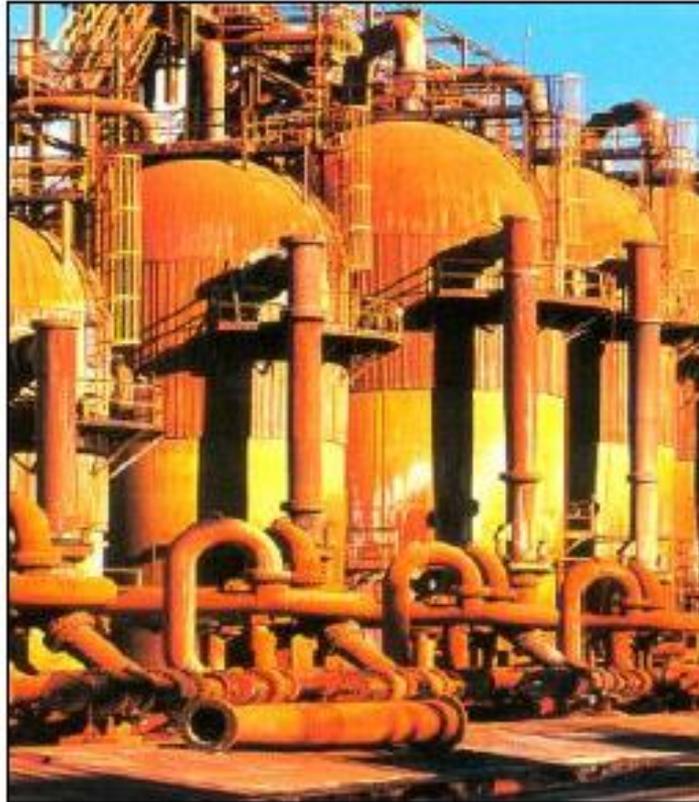


Figura 2.4 – Digestores (Fonte: Souza, 2010)

Clarificação

Através da decantação (Figura 2.5) acelerada por floculantes sintéticos, ocorre a separação da solução de licor rico das impurezas sólidas (lama). Uma vez decantada, a lama é removida e bombeada para uma série de cinco lavadores, em contra corrente com água adicionada no quinto estágio de lavagem, com o objetivo de retirar a soda cáustica presente na lama. A separação da lama da solução do licor rico é obtida através dos controles: da temperatura, da adição de floculantes e em função dos sólidos para o controle da vazão na descarga e monitoramento do nível da lama dentro do decantador. (Souza, 2010)



Figura 2.5 – Decantador (Fonte: Souza, 2010)

A filtração consiste na separação de partículas sólidas de uma suspensão líquida mediante o escoamento desta suspensão em um meio poroso estacionário, denominado de meio filtrante, no qual o sólido permanece retido sobre este meio, forma um depósito que se denomina torta de filtração, cuja espessura cresce e se deforma continuamente e passa a desempenhar um papel fundamental no decorrer da operação de separação (Figura 2.6). A fase fluida que atravessa o meio poroso é denominado de filtrado. A filtração tem como objetivo reter estas partículas de lama de aluminato de sódio. O licor rico, produto da divisão vermelha, sai com cerca de 10 mg/L de lama em suspensão para área de divisão branca. (Souza, 2010)



Figura 2.6 – Filtros para separação da lama vermelha (Fonte: Souza, 2010)

Precipitação

A alumina hidratada, dissolvida da bauxita na etapa de digestão, deixa a solução, para formar o produto do processo Bayer, na etapa da precipitação (Figura 2.7). Dois requisitos básicos devem ser atendidos nesta fase: primeiro, o licor rico filtrado deve ter o seu grau de

supersaturação acentuado, através de resfriamento; segundo, certa quantidade de alumina hidratada, previamente obtida, deve ser usada como semente.

Os precipitadores cementadores recebem semente grossa e a outra parte (70%) de licor rico, que foi resfriado em trocador de placas (responsável pela redução da temperatura através da troca de calor com a água industrial). Nos cementadores, a uma dada temperatura, agitação e tempo de residência, é promovido um aumento da resistência das partículas do hidrato, que serão enviados aos precipitadores de leito denso, que através de agitação, resfriamento forçado, promovem um aumento do rendimento de precipitação. (Souza, 2010)



Figura 2.7 – Precipitadores de hidrato de alumínio (Fonte: Souza, 2010)

Calcinação

É o processo que controla a eliminação da água de cristalização da partícula de alumina tri-hidratada e obtenção de uma superfície específica pré-determinada. Este processo ocorre a temperaturas em torno de 960°C (Figura 2.8). (Souza, 2010)



Figura 2.8 – Calcinadores de alumina alfa (Fonte: Souza, 2010)

Basicamente, são necessárias cerca de cinco toneladas de bauxita para se produzir duas toneladas de alumina e duas toneladas de alumina para produzir uma tonelada de alumínio pelo processo de Redução.

A quantidade de lama vermelha gerada pode chegar ao dobro da quantidade de alumina produzida. Dados da literatura mostram que uma variação entre 0,3 e 2,5 toneladas de lama vermelha são geradas a cada tonelada de alumina produzida. (Wang *et al.*, 2008). A Figura 2.9 mostra a bauxita, o minério bruto no qual é extraída a alumina e, a última fase do processo que é o alumínio.



Figura 2.9 – Bauxita, alumina e alumínio

(Fonte: IAI - International Aluminium Institute, 2015)

A Figura 2.10, obtida pelo Instituto Internacional do Alumínio (2015) mostra a produção total de alumina entre os anos de 1980 e 2013, distribuída pelo mundo. Em destaque, aparece a China que iniciou sua produção em 2003 e hoje é líder absoluta no mercado.

Total for 1980 to 2013: 1,801,254 thousand metric tonnes of alumina (total)

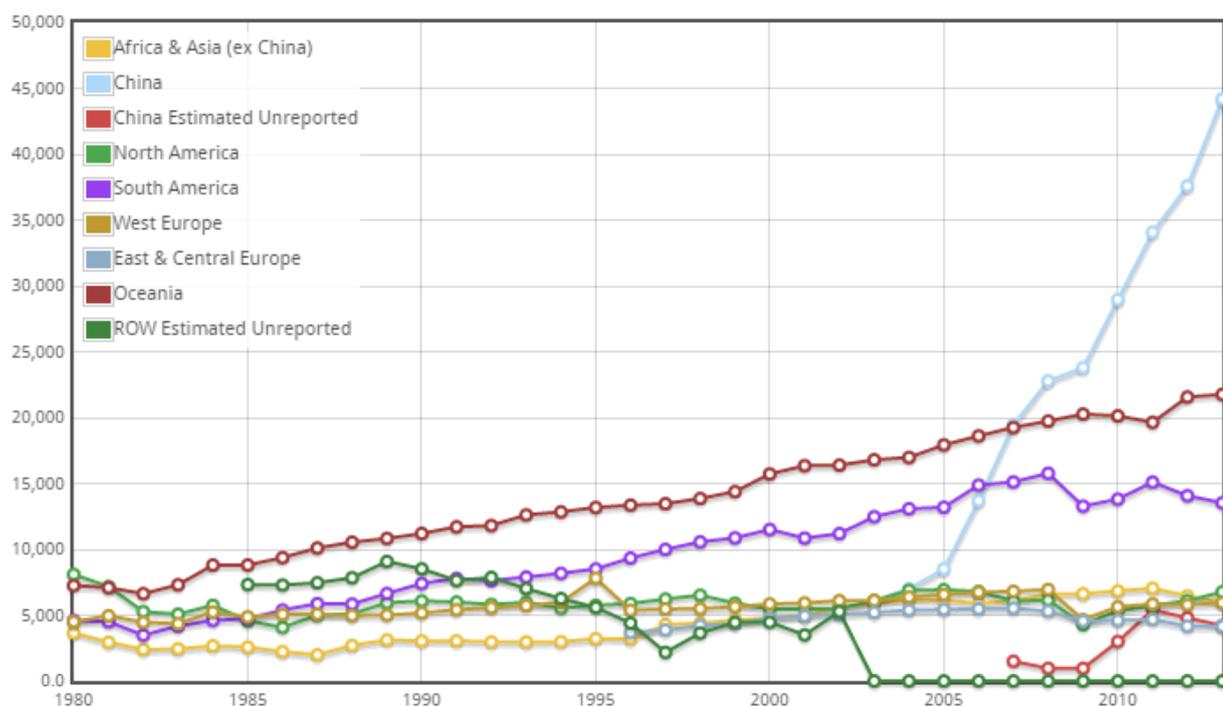


Figura 2.10 – Produção de alumina no mundo

(Fonte: IAI – International Aluminium Institute, 2015)

A produção mundial de bauxita, em 2008, correspondeu a cerca de 205 milhões de toneladas, gerando aproximadamente 41 milhões de toneladas de alumínio e 100 milhões de toneladas de resíduo (lama vermelha). No Brasil, a geração de bauxita no ano de 2008 foi estimada em 26,6 milhões de toneladas gerando aproximadamente 10 milhões de toneladas de resíduo (Ribeiro *et al.*, 2012).

2.3 – RESÍDUO GERADO NA PRODUÇÃO DE ALUMINA

Ribeiro (2011) afirma que, a lama vermelha é o principal resíduo proveniente da indústria de beneficiamento da bauxita. A alta concentração de compostos ferrosos dá ao resíduo sua cor vermelha típica e, conseqüentemente, seu nome (lama vermelha).

O grande volume de lama vermelha produzida e seu caráter alcalino (pH~13) representa um importante problema ambiental nas áreas onde as indústrias geradoras estão instaladas. Dessa forma, pesquisas que busquem alternativas de disposição a este tipo de resíduo têm particular importância.

A estocagem da grande quantidade desse resíduo alcalino gerado é cara (entre 1 e 2% do preço da alumina), requer uma grande área de disposição (cerca de 1 Km² por cinco anos, para uma fábrica que produza 1 Mton de alumina por ano) e provoca uma série de problemas ambientais.

A composição química da lama vermelha é identificada pela técnica de difração de raios X. Segundo Villar (2002), nesta técnica um feixe destes raios atinge a superfície da amostra analisada e é difratado, sendo detectado por um contador Geiger que se move a uma velocidade constante em um arco de círculo, cujo centro é o centro da amostra. O contador registra graficamente em posição e intensidade, os ângulos θ das difrações correspondentes, que estão relacionados com a inclinação e posição do raio emitido. O resultado consiste de um gráfico onde são apresentados vários picos de comprimentos diferentes ao longo do arco de varredura utilizado, chamado difratograma. A posição deste pico em função do ângulo θ da emissão permite determinar o comprimento de onda emitida, que é característica do elemento presente na amostra e função das distâncias interplanares de sua estrutura cristalina. Uma vez este comprimento calculado, ele é comparado com uma série de arquivos preexistentes de minerais conhecidos e desta maneira, é obtida a classificação mais provável do composto presente no material analisado.

A composição química das mais importantes fontes de geração de lama vermelha encontra-se na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Composição da lama vermelha para diversos tipos de bauxita

(Fonte: Silva Filho *et al.*, 2007)

Composto	ALUNORTE	ALCOA	CBA	ALCAN Canadá	ALCOA Austrália	ALCAN África
Al ₂ O ₃	35,5	35,67	36,7	37,6	25,45	26,60
Fe ₂ O ₃	37,16	33,78	29,89	32,45	34,50	48,40
SiO ₂	2,34	3,45	6,78	3,67	17,06	5,50
TiO ₂	6,18	4,56	5,67	4,12	4,90	2,80
Na ₂ O	8,49	9,67	7,89	6,78	2,74	2,40
CaO	1,23	2,34	1,20	3,45	3,69	-
MgO	-	-	-	-	-	-
P.F. (perda ao fogo)	11,19	11,24	12,35	9,80	12,90	14,60

Villar (2002), também através da análise por difração de raios-X, verificou a presença de hematita (Fe₂O₃), quartzo (SiO₂), gibbsita (Al(OH)₃) e anatásio (TiO₂) na lama vermelha da região do sudeste do Brasil (Poços de Caldas-MG), com predominância dos picos de hematita, como apresentado na Figura 2.11. Compostos como óxido de potássio (K₂O), óxido de cálcio (CaO), tridymita (SiO₂), ulvospinel (Fe₂TiO₄) também foram encontrados na lama vermelha.

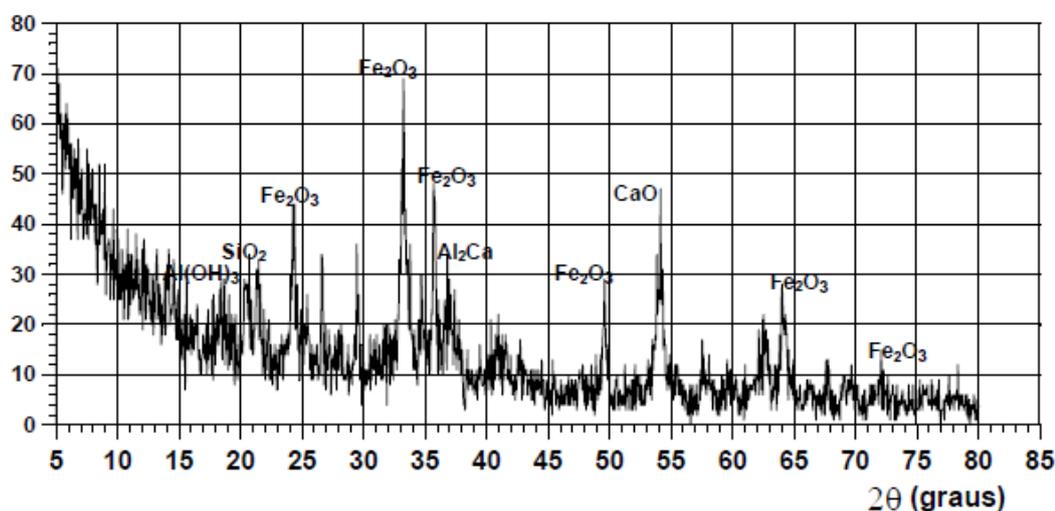


Figura 2.11 – Difratograma da lama vermelha da região sudeste do Brasil (Fonte: Villar, 2002)

2.4 – SISTEMAS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS/RESÍDUOS FINOS

No Brasil, os rejeitos de beneficiamento são normalmente dispostos em forma de polpa em estruturas de contenção denominadas barragens. Em outros países, existe uma tendência para o adensamento dos rejeitos, pois a disposição de rejeitos na forma de polpa de alta densidade, pastas minerais ou tortas apresenta vantagens consideráveis e representa alternativas às práticas convencionais (Guimarães, 2011).

Os métodos convencionais de disposição de lamas são também denominados de métodos úmidos, 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 ou barragens onde a lama vermelha é disposta com baixo teor de sólidos. Neste caso, 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 (Silva Filho *et al*, 2007).

No entanto, o potencial de impacto dos métodos úmidos sobre o meio ambiente é alto, podendo-se destacar: necessidade de grandes áreas de disposição do rejeito; risco de contaminação do solo e do lençol freático; no caso de ruptura, propagação da mancha de inundação dos rejeitos na área de jusante podendo causar sérios danos ambientais, econômicos, sociais, perda de vidas humanas, entre outros.

Os custos associados de construção das estruturas de estocagem dos resíduos são altos, devido à necessidade de impermeabilização da área antes da disposição, feita normalmente por meio 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.

Deve-se destacar também que a vida útil da área de disposição é curta, normalmente entre 4 e 7 anos, e a reabilitação da área é um processo lento. Os riscos com relação ao

rompimento dos diques também estão presentes, e representam um motivo de preocupação para a população a jusante (Silva Filho *et al*, 2007).

A Figura 2.12 mostra um exemplo de uma barragem de lama vermelha.



Figura 2.12 - Barragem do Marzagão – Aditya Birla Hindalco em Ouro Preto / MG.

Lançamento contínuo de polpa

Além dos diques ou barragens de estocagem, um outro método aplicado atualmente para disposição da “lama vermelha” e que fornece uma solução técnica que satisfaz às exigências dos órgãos reguladores é conhecido como “dry stacking” (Figura 2.13).

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 por meio da evaporação e da drenagem (Silva Filho *et al*, 2007).

A redução desse teor de umidade conduz à obtenção de um depósito de material não fluido que, por possuir uma maior consistência quando comparado ao resíduo disposto em uma barragem convencional, apresenta menor risco de ruptura da estrutura de contenção e ao mesmo tempo, no caso de ruptura, não apresenta risco de fluir para jusante.

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 (Silva *et al*, 2007).



Figura 2.13 – Depósito de resíduo de lama vermelha da Alumar, Ilha de São Luís – MA.
Processo de lançamento com secagem

Uma das principais vantagens do “dry stacking” sobre outros sistemas é a facilidade de recuperação e fechamento progressivo da área de disposição. A estrutura geralmente pode ser desenvolvida de tal maneira que a recuperação comece de forma bastante antecipada no ciclo de vida do projeto. Isto pode ter muitas vantagens no controle de emissão de poeira, no uso de materiais para recuperação, e nos impactos ambientais do projeto em curto e longo prazo (Davies, 2011).

Outro método que vem sendo recentemente considerado pelas indústrias de produção de alumina é a aplicação da tecnologia de filtragem para desaguamento de resíduos antes da sua disposição. Como exemplo, a Alunorte atualmente utiliza este método por meio de filtros tambor permitindo que a lama vermelha seja lançada nos depósitos de resíduo na forma de uma pasta contendo cerca de 60% em peso na fase sólida, evitando a segregação de líquidos e adquirindo a consistência de um solo natural em curto espaço de tempo, facilitando a recuperação da área (Figura 2.14).



Figura 2.14 – Disposição de lama vermelha da Alunorte, (Barcarena – PA). Rejeito filtrado por filtro tambor

Nery (2013) destaca a filtragem dos resíduos utilizando filtros 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 70% a 80%) e grau de saturação de aproximadamente 80%. A filtragem por pressão, comparada com outros tipos de equipamentos para desaguamento do rejeito, está sendo atualmente avaliada pelas indústrias.

Peixoto (2012) afirma que os resultados obtidos da filtragem de rejeitos demonstram o potencial da técnica do desaguamento dos rejeitos e dos sistemas de disposição dos mesmos em pilhas, induzindo, portanto, estudos alternativos para viabilização prática destas metodologias em grande escala, associadas a critérios de simplicidade e flexibilização dos dispositivos, baixos custos de implantação e facilidades de manutenção em campo.

2.5 – 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 na Figura 2.15.

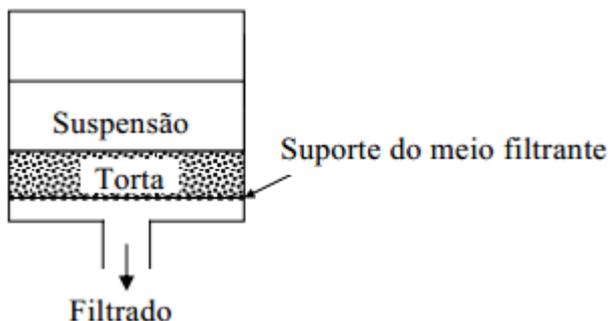


Figura 2.15 – Princípio de filtragem (Fonte: UFOP, 2004 – Espessamento e Filtragem)

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 Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Mecanismos de filtragem e os principais fornecedores (Guimarães, 2011)

Tipos	Características	Modelos de Filtros	Principais Fornecedores
<i>Filtragem a vácuo</i>	<i>Criada uma pressão negativa debaixo do meio filtrante</i>	<i>Filtro tambor, de disco convencional, filtro horizontal de mesa e filtro horizontal de correia</i>	<i>Andritz, FLSmidth, Larox, Delkor, Gaudfrin</i>
<i>Filtragem sob pressão</i>	<i>Uma pressão positiva é aplicada na polpa</i>	<i>Filtro prensa horizontal, filtro prensa vertical</i>	<i>Andritz, FLSmidth (Pneumapress), Larox</i>

Tabela 2.2 – Mecanismos de filtragem e os principais fornecedores (Guimarães, 2011) -
 Continuação

Tipos	Características	Modelos de Filtros	Principais Fornecedores
Filtragem centrífuga	Utiliza a força centrífuga para forçar a passagem do líquido	Centrífugas verticais e Decanters	Andritz, GEA (Westfalia), Alfa Laval
Filtragem hiperbárica	Em que se combinam vácuo e pressão	Filtro de disco encapsulado ou hiperbárico	Andritz, Bokela, Gaudfrin
Filtragem capilar	Utiliza a ação de capilares de meios cerâmicos porosos para efetuar o desaguamento	Ceramec	Larox

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 Tabela 2.3 apresenta um resumo das principais unidades de rejeito filtrado existentes no mundo.

Tabela 2.3 – Resumo das principais unidades de rejeito filtrado do mundo (adaptado de Ulrich e Coffin, 2013 – publicado no Paste 2013)

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

2.5.1 – Tipos de Filtros

Dentre os mecanismos de filtragem mostrados na Tabela 2.2, será apresentada nos subitens a seguir uma breve descrição apenas dos filtros utilizados nos estudos de caso deste trabalho, ou seja, os filtros à vácuo e os filtros sob pressão, por serem os tipos de filtros mais considerados atualmente para filtragem da lama vermelha.

2.5.1.1 – Filtros à Vácuo

Os filtros à vácuo tiveram grande aplicação a partir do início da década de 50 para responder pela alta produção da então crescente indústria (Amarante, 2002). Bánvölgyi e Huan (2009) cita que, o primeiro filtro tambor à vácuo em tamanho comercial foi desenvolvido e colocado em operação na Alemanha em meados de 1960 para lavar e desaguar lama vermelha.

A filtragem à vácuo consiste na aplicação de uma força negativa (subatmosférica), por bombas de vácuo, através do meio filtrante. Os equipamentos de filtragem à vácuo são sempre contínuos, mas realizam diversas tarefas, dentro de um espaço de tempo (ciclo), como: formação de torta, secagem, lavagem e descarga da torta. A torta é formada colocando-se o meio filtrante em contato com a polpa, sob ação do vácuo. A formação da torta pode se dar por meio da deposição do material sobre o meio filtrante, como acontece nos filtros horizontais, ou pela aspiração do material sólido para junto do meio filtrante, como nos filtros de disco e tambor. O processo de secagem é realizado sob ação do vácuo e consegue retirar água presa na estrutura da torta. A etapa de lavagem da torta é muito utilizada na indústria de alumina. O descarregamento da torta pode ser realizado de diversas formas, como por exemplo, no caso de filtros de discos convencionais, a descarga é feita pela inversão do fluxo de ar, com sopro de ar no meio filtrante (Nery, 2013).

O circuito de filtragem consiste do filtro (equipamento principal), dos sistemas de transporte da torta e transporte do filtrado, das linhas de vácuo e da bomba de vácuo. A tubulação de vácuo é constituída de um trecho em anel, ligando os filtros a um vaso separador. Deste saem duas tubulações: uma vai para a bomba de vácuo e transporta o ar (vácuo) e a outra é vertical e desce para o tanque onde o filtrado é descarregado. A altura desta tubulação vertical descendente deve ser maior que a coluna de água correspondente à depressão do circuito de vácuo, e é denominada perna barométrica como mostra a Figura 2.16 (Guimarães, 2011).

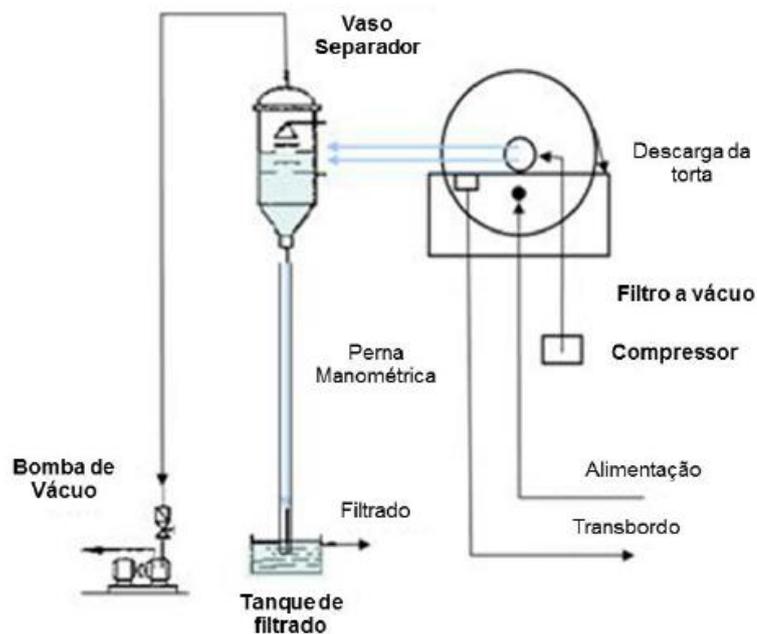


Figura 2.16 – Desenho esquemático do sistema de filtragem à vácuo (Guimarães, 2011)

Os filtros a vácuo podem ser com alimentação da polpa por cima, como é o caso do filtro horizontal de correia e o de mesa, ou com alimentação por baixo, que é aplicada apenas para polpas que possam ser mantidas em suspensão mediante agitação moderada, como no filtro de disco convencional. O fluxograma apresentado na Figura 2.17 mostra as classes de filtros a vácuo. Observa-se que, com exceção do filtro Nutsch, todos os filtros são contínuos.

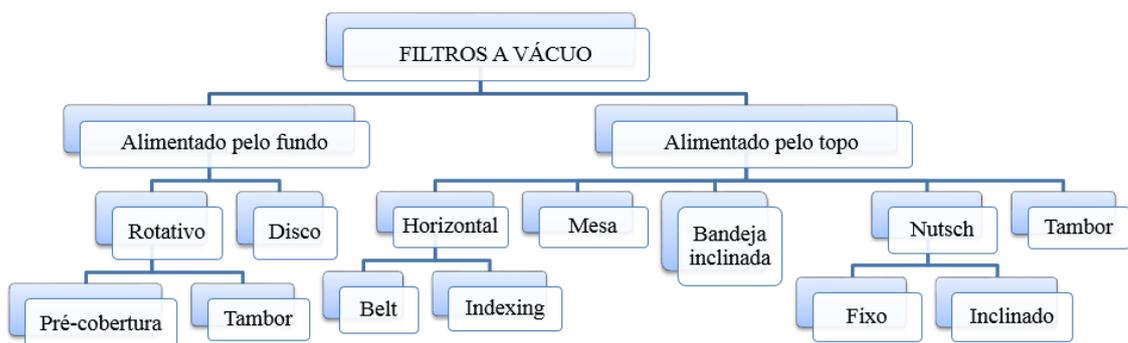


Figura 2.17 – Fluxograma das classes dos filtros a vácuo (adaptado de Nery, 2013)

Segundo Nery (2013), as principais vantagens e desvantagens dos filtros à vácuo são listadas a seguir.

Vantagens:

- Operação contínua (com exceção do filtro Nutsch);
- Recuperação ou remoção dos contaminantes solúveis pela lavagem em contracorrente (especialmente nos filtros de correia horizontal, de bandeja inclinada e de mesa);
- Produção de filtrados relativamente limpos usando uma porta para o fluido ou uma bacia de sedimentação (nos filtros de correia horizontal, de bandeja inclinada e de mesa);
- Permite polir soluções (em um filtro pré-revestido);
- Acesso conveniente à torta para atividades do operador ou retirada de amostragem;
- Controle fácil de parâmetros operacionais, tais como relação da espessura ou da lavagem da torta;
- Grande variedade de materiais de construção;
- Baixo custo de manutenção, já que não requer tanta mão de obra.

Desvantagens:

- Umidade residual mais elevada na torta;
- Construção de difícil vedação para permitir presença de gases;
- Difícil de limpar;
- Consumo elevado de potência pela bomba de vácuo.

Uma breve descrição dos filtros a vácuo de tambor rotativo, de disco convencional, horizontais de mesa e de correia é apresentada a seguir.

Filtros de tambores rotativos

Utilizado em processos onde os líquidos a serem filtrados contenham alto volume de sólidos. É um sistema para separar um sólido particulado de um fluido, fazendo com que o sólido fique retido num meio poroso (torta) e o fluido passe através desse meio.

Esse sistema filtra, lava e descarrega a torta de forma contínua. O tambor é recoberto com um meio de filtração conveniente onde uma válvula automática no centro do tambor ativa o ciclo de filtração, secagem, lavagem e retirada da torta e a filtração sai pelo eixo de rotação. Existem passagens separadas para o sólido e para o líquido de lavagem, além de uma conexão de ar comprimido que se utiliza para ajudar a raspadeira de facas na retirada da torta. Trata-se de um tambor cilíndrico horizontal que gira em baixa velocidade parcialmente submerso na suspensão a filtrar.

A superfície externa do tambor é feita de tala ou metal perfurado sobre a qual é fixada a lona filtrante. O cilindro é dividido em um número de setores por meio de partições radiais com o comprimento do tambor. Ligando estas partições há um outro cilindro interno de chapa comum. Desta forma, cada setor é parte de um compartimento que se liga diretamente com um furo na sede de uma válvula rotativa especial colocada no eixo do cilindro.

A sede da válvula gira com o tambor, mas está em contato com uma outra placa estacionária com rasgos junto à periferia. Estes rasgos comunicam-se através de tubulações presas em uma terceira placa, também estacionária, com os reservatórios de filtrado, água de lavagem e, algumas vezes, de ar comprimido.

À medida que o tambor gira, os diversos setores vão passando sucessivamente pela suspensão. Enquanto um setor estiver submerso, o furo que lhe corresponde na sede da válvula estará passando em frente ao rasgo que comunica com o reservatório de filtrado e que é mantido em vácuo. Logo que o setor sair da suspensão e a torta estiver drenada começa a lavagem e o furo correspondente passa a ficar em comunicação com o reservatório de água de lavagem.

Depois de feitas quantas lavagens forem necessárias, a torta é soprada com ar comprimido e raspada por meio de uma faca. A retirada do sólido nunca é total, por não haver o risco de rasgar a lona ou a tela do filtro e para não perder o vácuo (Fonte: <http://www.meiofiltrante.com.br>).

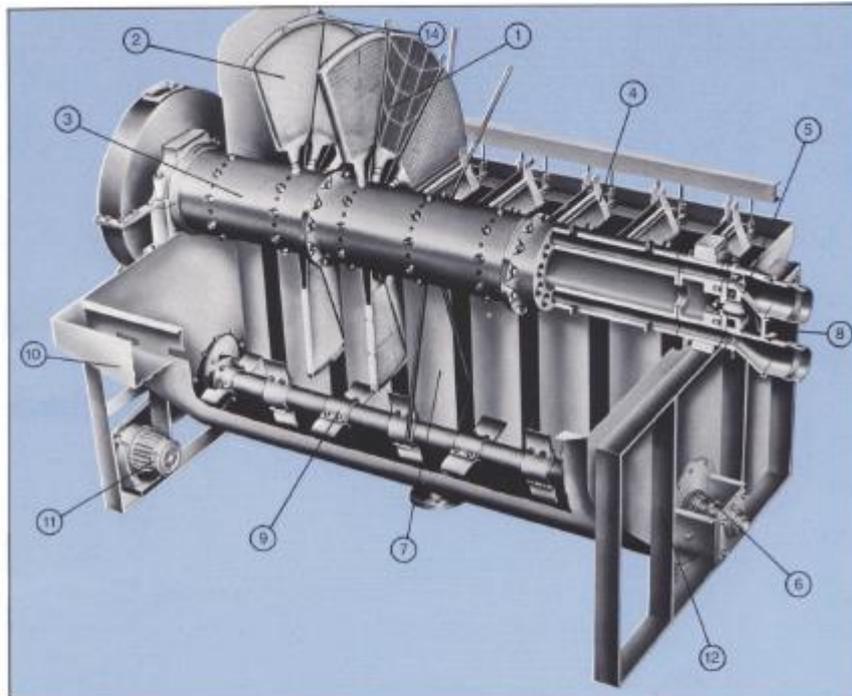
A Figura 2.18 apresenta um exemplo de filtro tambor rotativo.



Figura 2.18 – Exemplo de filtro tambor rotativo (Araxá – MG)

Filtros de disco convencional

Filtros de discos convencionais (Figura 2.19) são formados por uma série de discos espaçados e ligados em um tubo que passa pelo eixo. O tubo, por sua vez, é ligado em uma válvula automática que é conectada às tubulações de vácuo e de ar comprimido. Cada setor do filtro fica sob a ação de vácuo, utilizado para a formação e secagem da torta ou ar comprimido, responsável pela descarga da torta. Em um ciclo de rotação os discos são submersos na bacia e posteriormente o material é seco à vácuo, sendo descarregado em uma unidade própria (Portes, 2013).



- | | |
|------------------------|-------------------------------|
| 1- setor | 8- entrada do ar do sopro |
| 2- elemento filtrante | 9- sistema de agitação |
| 3- barril central | 10- coleta de overflow |
| 4- defletor | 11- motorização do agitador |
| 5- válvula de vácuo | 12- tanque: estrutura externa |
| 6- selagem da agitação | 13- alimentação: distribuidor |
| 7- chute de descarga | 14- tirantes |

Figura 2.19 – Representação esquemática de um filtro de disco convencional (Amarante, 2002)

Na extremidade do eixo, é encaixada uma válvula estática denominada cabeçote que se comunica com as linhas de vácuo e ar comprimido. Esta válvula tem suas aberturas desenhadas para controlar o período em que cada setor do filtro está sob a ação do vácuo (formação e secagem) ou do ar comprimido (descarga da torta) ou, ainda, sem movimentação de ar (“tempos mortos”). Durante o ciclo de filtragem (uma rotação) forma-se uma camada de partículas sólidas (torta) que ficam retidas no tecido filtrante pela força de vácuo aplicada quando os discos estão submersos na bacia (Figura 2.20). Ao emergir inicia-se a etapa de secagem, quando a água é extraída da polpa, ainda por efeito de vácuo, resultando em uma umidade residual da torta produzida. O filtrado passa através do meio filtrante para dentro do setor e deste para o eixo central, de onde é encaminhado para o vaso separador. A descarga da torta é feita utilizando-se ar comprimido (sopro).

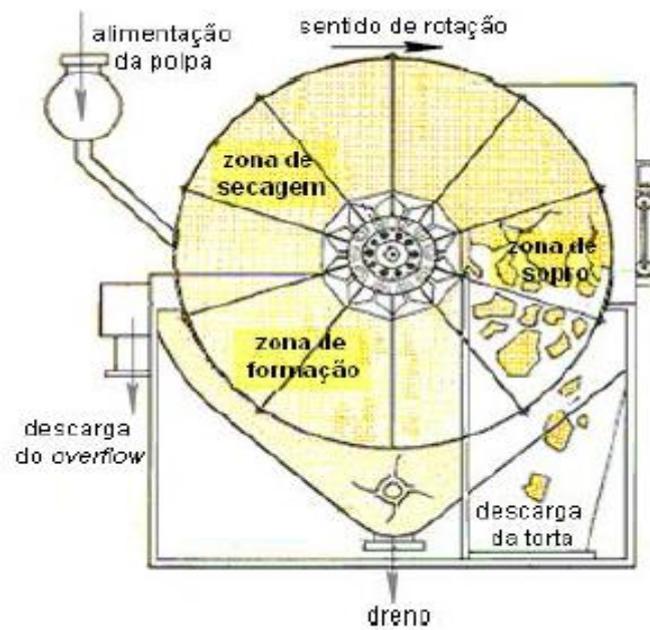


Figura 2.20 – Ciclo de filtragem no filtro de disco convencional (Guimarães, 2011)

O principal diferencial dos filtros de discos em relação aos concorrentes é a sua enorme área de filtragem quando comparada com a área ocupada pelo próprio equipamento. Por outro lado, esse tipo de filtro não permite a lavagem da torta. Na Figura 2.21 é apresentada uma imagem de um filtro de disco convencional.



Figura 2.21 – Filtro de disco convencional (Amarante, 2002)

Este equipamento é largamente empregado na indústria mineral, em especial nas instalações de beneficiamento de minério de ferro, na filtragem do produto pellet feed.

Neste caso, a alimentação do filtro é promovida com polpa espessada (acima de 60% sólidos) e produz tortas com umidades entre 9 e 13%, dependendo principalmente das características do material (a presença de argilas e do mineral limonita prejudica a filtragem) (Guimarães, 2011).

Filtros horizontais de mesa

Os filtros horizontais de mesa são circulares, dispõem de movimento giratório no plano horizontal e sua alimentação é feita por cima. O vácuo tem o mesmo sentido da força gravitacional. A descarga da torta é realizada com auxílio de um parafuso ou lâmina. Operam em faixa granulométrica entre 100 e 100 μm .

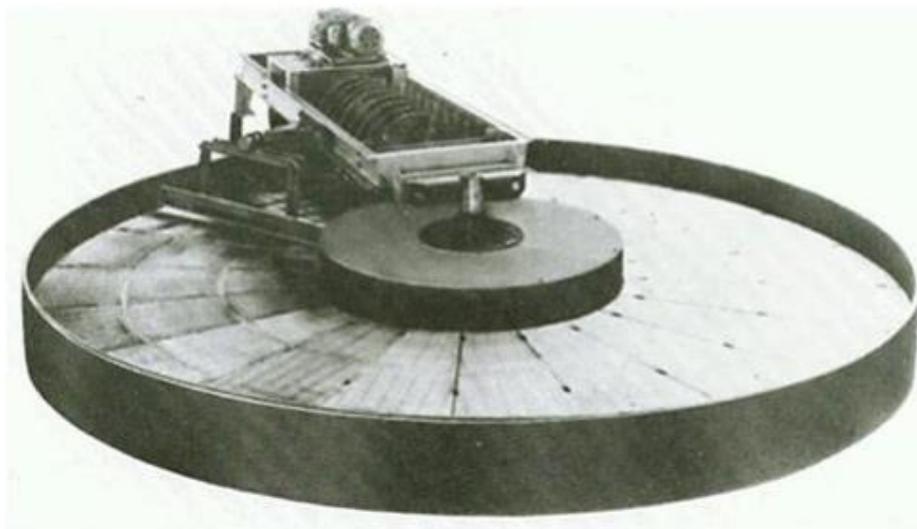


Figura 2.22 - Filtro horizontal de mesa (Fonte: Apostila UFG, 2013 – Separação sólido líquido)



Figura 2.23 - Filtro horizontal de mesa (Araxá – MG)

Filtros horizontais de correia

Os filtros horizontais de correia podem operar com porcentagens de sólido em uma faixa mais ampla de valores e com polpas heterogêneas. Caracterizam-se por uma correia de borracha, perfurada em vários pontos, que suporta o meio filtrante e permite a ação do vácuo realizado sob a mesma. A polpa é alimentada em uma das extremidades da correia ocorrendo formação de torta, secagem, lavagem (opcional), descarga e lavagem do meio filtrante. A Figura 2.24 mostra uma imagem de um filtro horizontal de correia.



Figura 2.24 – Filtro horizontal de correia (Fonte: Apostila UFG, 2013 – Separação sólido líquido)

Caracterizam-se pela alimentação direta da polpa sobre o elemento filtrante (alimentação por cima) e pelo vácuo aplicado na sua parte inferior (no mesmo sentido da força gravitacional). Assemelha-se visualmente a um transportador de correia, sendo que o tapete de correia serve de suporte para a instalação do elemento filtrante (Figura 2.25). A polpa é alimentada numa extremidade do transportador e, no percurso até o ponto de descarga, é desaguada. Uma série de sprays (jatos) de água é instalada na parte inferior da correia com o objetivo de limpar o meio filtrante (Guimarães, 2011).

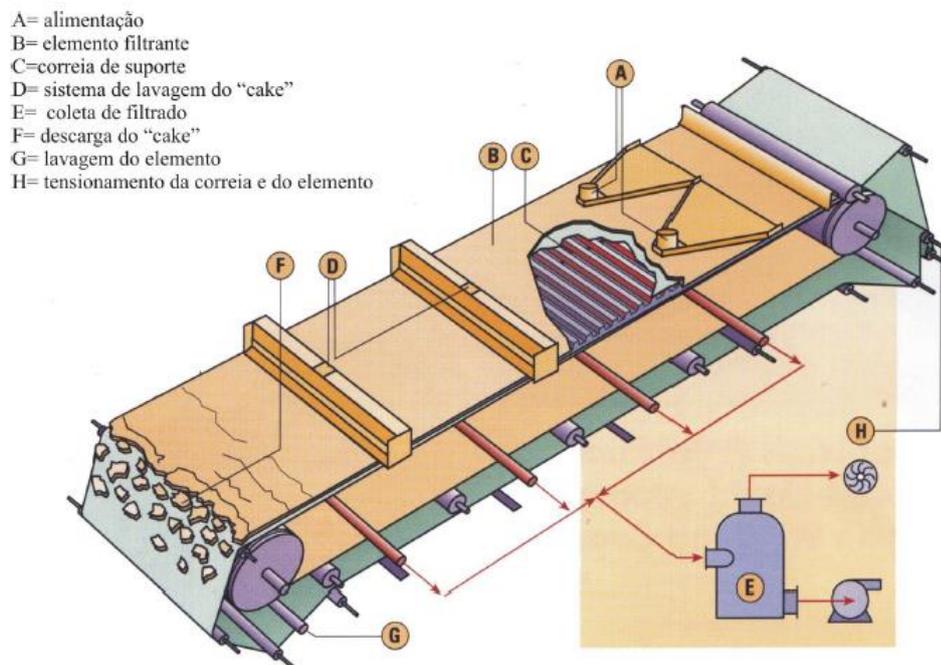


Figura 2.25 – Filtro horizontal de correia (Amarante, 2002)

2.5.1.2 – Filtros sob Pressão

Filtros sob pressão (filtros prensa) são menos usuais para aplicação em minérios de ferro, mas com aplicações específicas para materiais finos, inclusive para a faixa de 0 a 10 μm (Amarante, 2002).

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 Tabela 2.4 a seguir.

Tabela 2.4 – Tipos de filtros sob pressão

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

Filtro prensa horizontal (Filtro prensa de placas verticais)

A Figura 2.26 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.

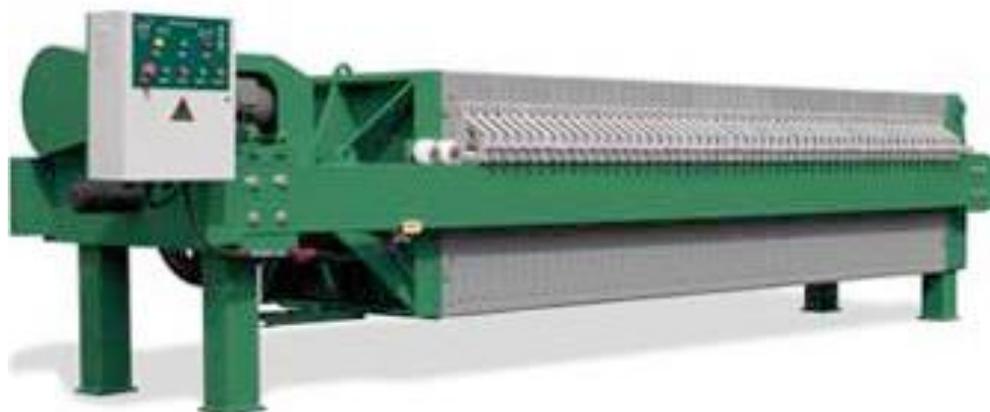


Figura 2.26 – Filtro prensa de placas verticais – 1000 mm x 1000 mm e tortas com espessura de 30 mm. (Fonte: <http://www.grabe.com.br/filtroprensa>)

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).

Existem placas de diferentes modelos, tipos de câmara e diafragma. Os formatos das placas variam de 250 x 250 até 2500 x 2500 mm.

Filtro prensa horizontal com placas tipo câmara

O ciclo de operação do filtro prensa horizontal com placas tipo câmara pode ser dividido em três etapas básicas: enchimento, filtragem sob pressão máxima, e descarga de torta. O enchimento das câmaras com a polpa ocorre através do sistema de alimentação até formação completa das tortas. A pressão de alimentação é mantida por um tempo preestabelecido no sentido de extrair o maior volume de filtrado. A pressão obriga o filtrado a atravessar o meio filtrante que escoar pelas ranhuras das placas e é conduzido para fora do filtro. Após desligamento, se procede a expulsão do canal central através da injeção de ar comprimido. Segue-se a lavagem da torta (quando aplicável). Em seguida o filtro é aberto e a torta descarregada (Figura 2.27).

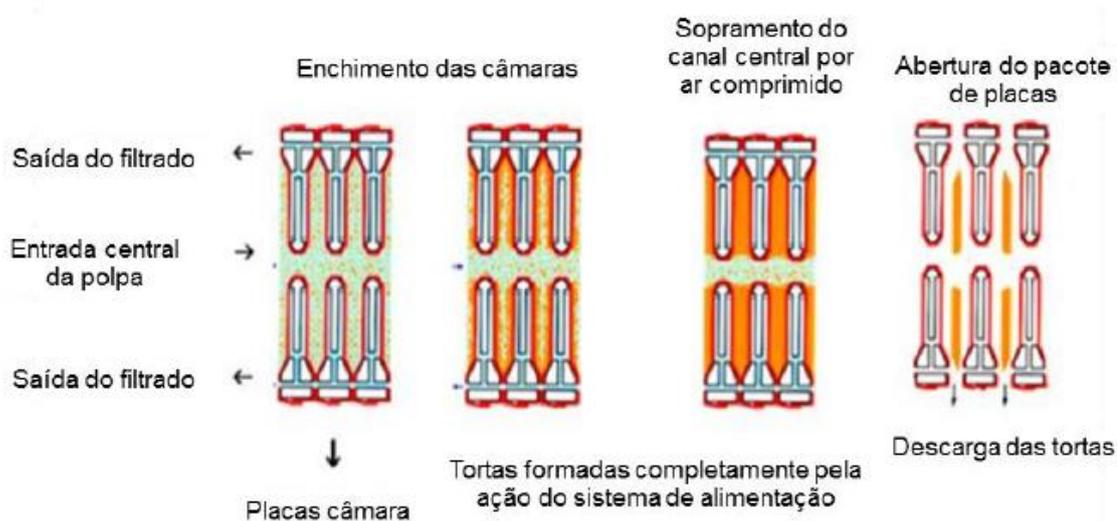


Figura 2.27 – Ciclo de operação dos filtros prensa com placas tipo câmara (Guimarães, 2011)

Filtro prensa horizontal com placas tipo diafragma

O filtro prensa com placas tipo diafragma é composto por diversas placas individuais intercaladas entre câmara e diafragma, sendo que as placas diafragma são revestidas por um diafragma elástico, formando assim um pacote de placas denominado misto. Após o enchimento das câmaras com a polpa, as bombas de alimentação são desligadas e os diafragmas são pressurizados hidráulicamente a fim de extrair mais filtrado progressivamente. A vazão de filtrado aumenta com a elevação da pressão de pressurização, sem que ocorra alimentação de polpa ao filtro prensa. Com o sistema diafragma, o processo de separação sólido líquido habitualmente se reduz no tempo de filtragem. Transcorridos os tempos de pressurização ocorre a despressurização dos diafragmas com posterior descarga das tortas (Figura 2.28).

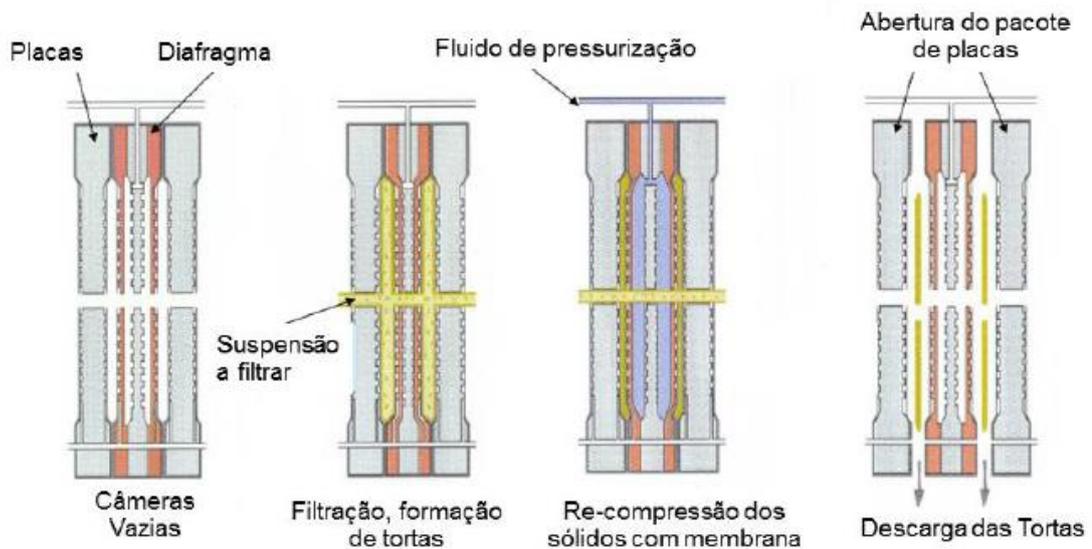


Figura 2.28 – Ciclo de operação dos filtros prensa com placas tipo diafragma (adaptado de Andritz, 2013)

Filtro prensa vertical (Filtro prensa de placas horizontais)

O filtro prensa de placas horizontais, também denominado filtro prensa vertical (Figura 2.29) é uma tecnologia recente de filtragem. A configuração vertical economiza área de piso. Caracterizam-se por produção de tortas com mais baixa umidade, menor custo de operação, porém com alto custo de investimento (Valadão, 2008).

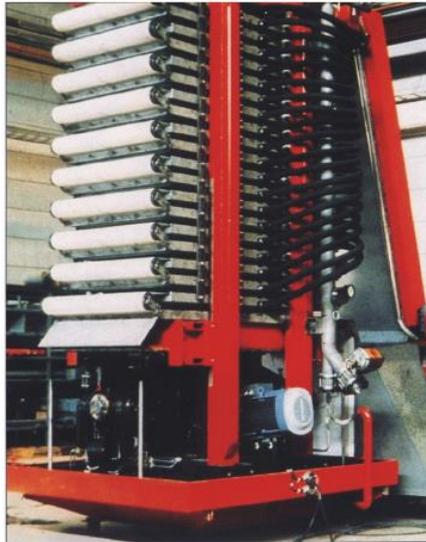


Figura 2.29 – Filtro prensa de placas horizontais (Amarante, 2002)

O ciclo de filtragem de um filtro de pressão vertical convencional consiste nas etapas mostradas na Figura 2.30 e descritas a seguir:

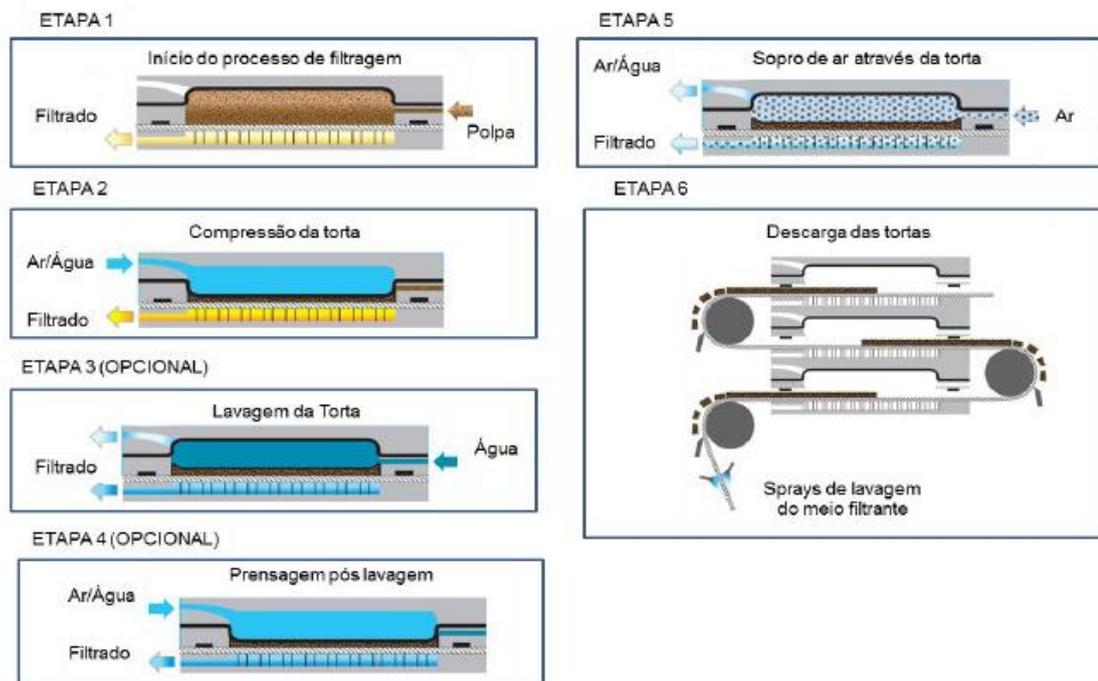


Figura 2.30 – Ciclo de um filtro de pressão vertical (Fonte: Larox)

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

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

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

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

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

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

A pressão de operação durante a alimentação da suspensão é 8×10^5 Pa e durante a compressão da torta, $1,6 \times 10^6$ Pa (Guimarães, 2011).

Vantagens do filtro prensa:

Os fabricantes destacam as vantagens do filtro prensa (Fonte: 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.

2.6 – 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.

2.6.1 – Aspectos de Projeto e de Construção

De acordo com Davies (2004), as principais considerações de projeto para sistemas de disposição de rejeitos/resíduos filtrados são as descritas a seguir:

- Características da filtragem: determinar a forma mais rentável de se obter um produto desaguado condizente com os demais critérios de projeto (geomecânicos,

gestão de rejeitos e gestão da água). Deve-se avaliar se os fornecedores de filtros são experientes, mas o teste piloto é essencial, pois cada rejeito expõe sua própria característica de filtração;

- Características geomecânicas: a resistência, o teor de umidade e a condutividade hidráulica do rejeito precisam ser estabelecidas;
- Gestão de rejeitos: é necessário que o projeto seja compatível com as práticas convencionais de transporte e lançamento de rejeito. Os custos do processo de filtração, operacionais e do gerenciamento das estruturas de rejeito filtrado são fundamentais para sua viabilidade. As facilidades de fechamento e recuperação das áreas utilizadas para a disposição de rejeito filtrado pode fazer uma grande diferença nos custos em comparação com as disposições tradicionais em forma de polpa ou pasta;
- Gestão de água: a captação e o encaminhamento das águas pluviais na pilha deverão ser adequadamente projetados de modo a evitar erosões.

Ainda segundo Davies (2004), as principais considerações construtivas e operativas para sistemas de disposição de rejeitos/resíduos filtrados são:

- Preparação do local: execução do sistema de coleta e redirecionamento das águas superficiais e subterrâneas, de forma a evitar o contato da água com o rejeito, minimizando processos erosivos e geração de drenagem ácida, quando for o caso. Esta água “limpa” pode ainda ser reutilizada na planta de processo ou bombeada para uma estação de tratamento;
- Transporte e disposição de rejeitos: realizado com a utilização de correias transportadoras ou caminhões. Devido a questões de capacidade de carga da fundação, para fins de trafegabilidade, e tendo em vista que o teor de umidade do rejeito filtrado pode se encontrar um pouco acima da umidade ótima de compactação, pode ser necessária a adoção de um plano operacional para disposição do rejeito;
- Reutilização e fornecimento de água: um dos principais motivos que leva à adoção da técnica de disposição de rejeitos filtrados é a possibilidade de recuperação de

água para a planta de processos. Esta vantagem é de extrema importância em ambientes áridos, onde a água é um recurso valioso. Este aspecto faz com que o armazenamento temporário de água seja necessário, por meio de barragens;

- Recuperação e descomissionamento: Uma das principais vantagens do empilhamento de rejeito filtrado é a facilidade de recuperação progressiva e o descomissionamento da instalação. A recuperação da unidade pode muitas vezes ser desenvolvida logo no início do ciclo de vida do projeto. Isso pode ter muitas vantagens no controle de poeiras e de erosões, reduzindo os impactos ambientais de curto e longo prazo. A recuperação progressiva pode incluir a construção de coberturas e a revegetação das superfícies de rejeito.

2.6.2 – 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.



Figura 2.31 – 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.

2.7 – ABORDAGEM PROBABILÍSTICA

A abordagem convencional da análise de estabilidade de uma estrutura consiste em utilizar os valores médios das propriedades do material (solo, rocha ou rejeito). Tal abordagem é denominada determinística e sua aplicação resulta em um valor único para o fator de segurança (FS), o qual é considerado representativo da estabilidade da estrutura.

Os métodos determinísticos consideram a variabilidade natural dos parâmetros de entrada por meio da seleção de valores que incorporam um nível de conservadorismo. Conseqüentemente, a solução determinística resultante pode ser excessivamente conservadora, pois acumula o conservadorismo utilizado na adoção dos parâmetros de entrada (Valerio *et al.*, 2013).

A abordagem probabilística incorpora a variabilidade de parâmetros chave de entrada (variáveis aleatórias) de um determinado estudo, resultando num histograma de fatores de segurança.

Espósito (1995) apontou a importância das análises probabilísticas para um maior controle do projeto e construção de barragens de rejeito. Segundo a autora, as análises de estabilidade devem levar em conta a variabilidade dos parâmetros geotécnicos, haja vista que a utilização de apenas um parâmetro geotécnico médio para o rejeito numa análise determinística não reflete o comportamento variável desses materiais. A autora conclui que essa deveria ser uma prática corrente no dimensionamento de projetos que envolvam a disposição desses materiais, com o objetivo de propiciar maior segurança, economia e menores danos e perdas em caso de falhas. Entretanto, o método de análise probabilístico requer ainda o conhecimento da variabilidade dos parâmetros geotécnicos, sendo um item de discussão no meio técnico.

Atualmente, três métodos probabilísticos são bastante difundidos: o método FOSM (“*First-Order, Second-Moment*”); o método Monte Carlo e o método dos pontos de estimativa (Rosenblueth, 1975). A aplicabilidade dos métodos probabilísticos está na capacidade

desses em calcular a probabilidade de falha (ou probabilidade de ruptura – P_f) intrínseca nos projetos de engenharia. Por exemplo, esta capacidade se contrapõe à ideia de que projetos com altos fatores de segurança (FS) são sempre mais seguros, o que não está verdadeiramente correto como apresentado por Sandroni & Sayão (1993).

Christian *et al.* (1994) definem a probabilidade de ruptura (P_f) de uma determinada estrutura como a área sob a curva de distribuição de probabilidades contida a esquerda do Fator de Segurança (FS) igual a 1. A Figura 2.32 ilustra essa definição. Neste exemplo, o projeto A, com FS e desvio padrão menores que B, é mais seguro devido este apresentar um valor menor de probabilidade de ruptura, do ponto de vista probabilístico.

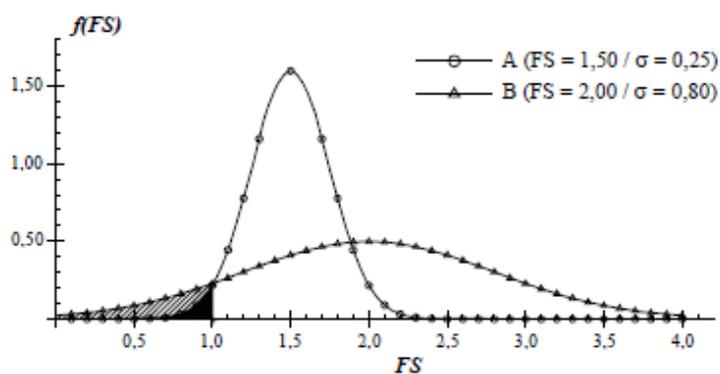


Figura 2.32 – Distribuições estatísticas com diferentes médias e desvio padrão do fator de segurança (Christian *et al.*, 1994)

A probabilidade de ruptura vem sendo cada vez mais utilizada como um critério de aceitação nos últimos 35 anos, embora ainda seja vista com diferentes graus de entusiasmo e ceticismo (Wesselloo & Read, 2009). Esses autores apontam as seguintes vantagens no cálculo da probabilidade de ruptura:

- Permite a variação das forças resistentes e das forças mobilizadoras no cálculo do fator de segurança e ajudam a estabelecer o nível de confiança no projeto. A confiabilidade da estrutura é sua probabilidade de sucesso. Portanto, se a probabilidade de ruptura estimada de um talude é de 20%, a sua confiabilidade é de 80%;

- A probabilidade de ruptura (P_f) varia linearmente, ou seja, uma P_f de 10% é duas vezes maior do que uma P_f de 5%;
- É um parâmetro essencial no cálculo do risco (R), definido pela equação abaixo:

$$R (\$) = P_f \times \text{Custo da consequência da ruptura} (\$).$$

A Figura 2.33 apresenta valores toleráveis de probabilidade de ruptura para algumas estruturas geotécnicas.

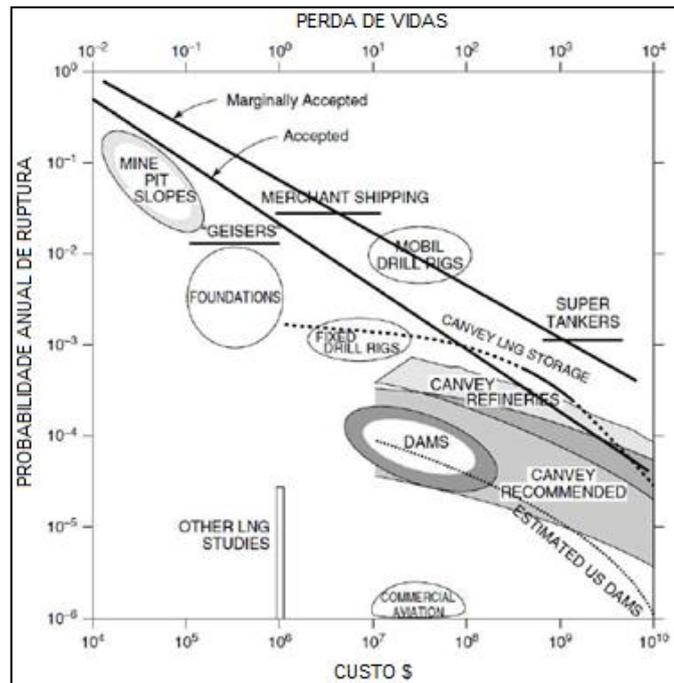


Figura 2.33 – Valores toleráveis de probabilidade de ruptura (Baecher (1982) / Whitman (1984) apud Baecher & Christian (2003))

Sendo assim, considerando que os arranjos desenvolvidos ao longo desse trabalho se enquadrem na categoria “barragens”, esse gráfico foi utilizado como uma referência para definir o critério de tolerabilidade quanto à probabilidade de ruptura dos mesmos.

O procedimento geral em considerar a variabilidade das propriedades do solo, rocha ou rejeito é ensaiar um número de amostras e depois utilizar os resultados dos ensaios para definir a variabilidade da população de onde as amostras foram retiradas. Observa-se que sempre haverá um grau de incerteza na estimativa final das propriedades da população.

Quando se tem um número suficiente de amostras, dados estatísticos, tais como, média, desvio padrão, variância podem ser diretamente calculados a partir dos valores das amostras. Podem ser feitos também testes de ajuste dos dados às distribuições estatísticas, tais como, mínimos quadrados, chi-quadrado, K-S, entre outros.

Caso não se tenha um número suficiente de dados com representatividade estatística, valores existentes das variáveis são assumidos como a média e os desvios padrão são estimados por meio do coeficiente de variação. Além disso, distribuições estatísticas de cada variável são assumidas, se necessário, com base nos valores da média e do desvio padrão. (Assis, 2003)

O coeficiente de variação se tem mostrado uma característica das propriedades e pode ser calculado a partir da seguinte equação:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (\text{Equação 2.1})$$

Onde:

CV = coeficiente de variação;

σ = desvio padrão;

μ = média.

A Tabela 2.5 apresenta faixas de coeficientes de variação dos parâmetros geotécnicos de interesse para análises de estabilidade. Essa tabela corresponde a uma compilação de valores encontrados na literatura.

Tabela 2.5 – Valores Típicos de Coeficiente de Variação Segundo Assis *et al.* (2001)

Parâmetro	Coeficiente de Variação
Peso Específico	03 (02 a 08)
Coesão	40 (20 a 80)
Ângulo de Atrito Efetivo	10 (04 a 20)
Coesão Não Drenada	30 (20 a 50)

Deve-se ressaltar que, como a faixa de valores é bastante ampla, os mesmos são apenas sugestivos e recomenda-se utilizá-los de maneira criteriosa.

2.7.1 – Método FOSM

O método FOSM (“First Order Second Moment”) foi inicialmente utilizado em projetos da indústria de aço (Kottegoda & Rosso, 1974 *apud* Maia, 2003). É um método que usa os primeiros termos de uma expansão da série de Taylor da função de desempenho (i.e. fator de segurança) para estimar o valor esperado (médio) e a variância da função de desempenho. É chamado de segundo momento porque a variância é uma forma de segundo momento, sendo o resultado de maior ordem estatística usado na análise (Baecher & Christian, 2003).

Assumindo múltiplas variáveis aleatórias, independentes entre si, as equações do método FOSM correspondem a:

$$E[F] = F(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) \quad (\text{Equação 2.2})$$

$$V[F] = \sum_1^n \left(\frac{\partial F_i}{\partial X_i} \right)^2 \times V[X_i] \quad (\text{Equação 2.3})$$

Onde:

E [F] = valor médio esperado para FS;

V [F] = variância de FS, igual ao quadrado do seu desvio padrão;

δF = Variação de FS que ocorre quando se variam de um valor igual a δx_i cada um dos n parâmetros x_i ;

δx_i = Taxa de variação das variáveis envolvidas no estudo;

V [x_i] = variância de cada um dos x_i .

Tal como observado anteriormente, F corresponde à função de desempenho que, neste caso, se refere ao fator de segurança (FS). Se o número de variáveis aleatórias é igual a n, este método requer a realização de $n + 1$ análises. As etapas de cálculo podem ser resumidas nos seguintes passos:

- Identificação das variáveis que contribuem para a incerteza no valor de FS;
- Cálculo da média e do desvio padrão dessas variáveis;
- Cálculo do FS considerando uma taxa de incremento de 5 a 10% no valor de cada variável aleatória, mantendo as demais variáveis com os seus valores médios;
- Resultados:
 - ✓ Cálculo da variância e do desvio padrão do fator de segurança;
 - ✓ Cálculo da probabilidade de ruptura, assumindo uma distribuição estatística, usualmente normal;
 - ✓ Contribuição relativa de cada variável aleatória no valor total da variância do fator de segurança.

De acordo com Maia (2007), em estudos probabilísticos, é muito importante a definição do número de parâmetros relevantes aos cálculos que serão desenvolvidos, pois esses poderão requisitar elevado tempo para sua realização, como também, recursos computacionais especiais, que em determinados momentos não são fáceis de serem obtidos. Logo, o método FOSM se apresenta como uma ferramenta de grande colaboração na determinação dos parâmetros relevantes ao estudo, além desse método necessitar de um pequeno número de cálculos para essa finalidade.

2.7.2 – Método Monte Carlo

O método Monte Carlo foi utilizado pela primeira vez como uma ferramenta de pesquisa no desenvolvimento dos trabalhos da bomba atômica durante a Segunda Guerra Mundial (Hammersley & Handscomb, 1964 *apud* Maia, 2003). Trata-se de um procedimento iterativo que abrange quatro passos, descritos abaixo (Willie & Mah, 2004):

- Estimativa das distribuições de probabilidade para cada um dos parâmetros de entrada considerados como variáveis;

- Geração de valores aleatórios para cada parâmetro;
- Cálculo dos valores das forças atuantes e resistentes e verificação se as forças resistentes são maiores do que as atuantes;
- Repetição do processo N vezes ($N > 100$) e, em seguida, determinação da probabilidade de ruptura P_f de acordo com a seguinte equação:

$$P_f = \frac{N-M}{N} \quad (\text{Equação 2.4})$$

Onde:

M é o número de vezes em que a força resistente excedeu as forças atuantes (ou seja, em que o fator de segurança foi maior que 1,0).

Portanto, a probabilidade de ruptura é calculada pela razão entre o número de vezes em que o FS foi menor que 1,0, dividido pelo número total de iterações.

Em resumo, o método Monte Carlo basicamente utiliza as distribuições estatísticas de variáveis aleatórias, para a obtenção da distribuição probabilística de uma variável, dita probabilística, dependente dessas variáveis estatísticas. A Figura 2.34 ilustra a obtenção da distribuição probabilística do FS feita a partir de numerosas combinações de valores, sorteados aleatoriamente, das distribuições de probabilidade das variáveis estatísticas.

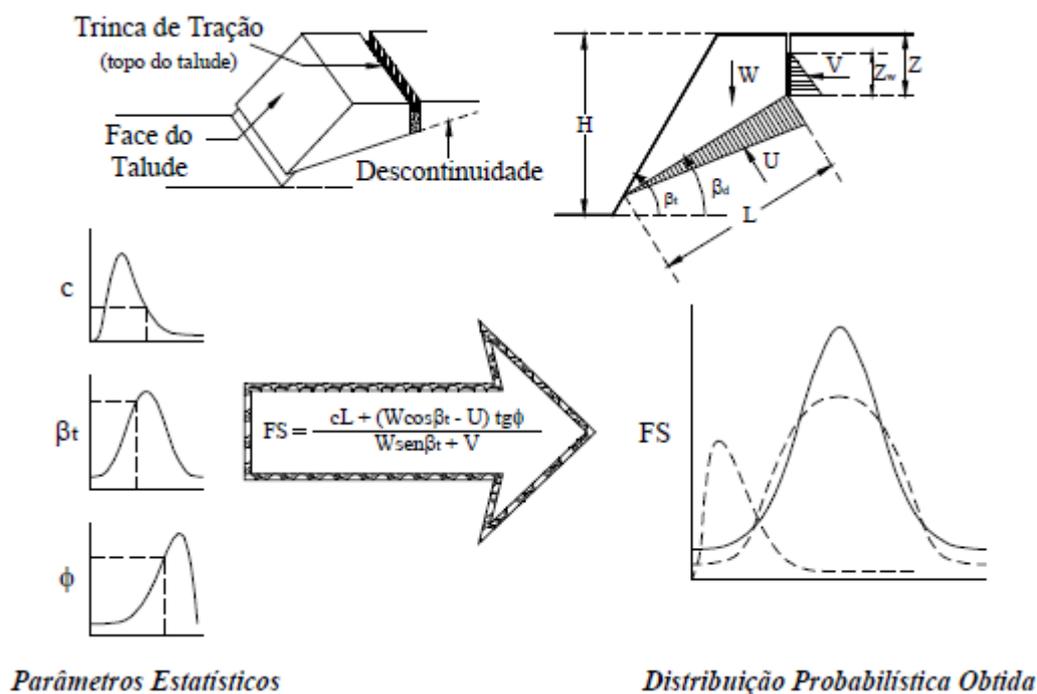


Figura 2.34 – Método Monte Carlo (Maia & Assis, 2004)

Alves (2009) analisou a estabilidade dos taludes e sua probabilidade de ruptura associados à disposição compartilhada de estéril e rejeito depositados num mesmo local, aplicando o método Monte Carlo. Em seu trabalho, no que diz respeito ao número de iterações durante a realização de análises probabilísticas, o autor propôs uma rotina onde são realizadas simulações a fim de estabelecer o número de iterações que serão realizadas pelo método Monte Carlo. O autor estabeleceu pelo menos três hipóteses (1.000, 10.000 e 100.000) e verificou que a hipótese 100.000 apresentou a menor variação dos resultados de saída, observando-se a convergência dos valores de FS (Fator de Segurança), média e desvio padrão. Alves (2009) afirma que o número de iterações está diretamente ligada à probabilidade de ruptura, sugerindo no mínimo 100.000 iterações para uma probabilidade de ruptura de 1/10.000. Caso o tempo de processamento seja considerável, o autor sugere a redução do número de iterações, desde que a média e o desvio padrão apresentem pequena variação.

O software Slide da Rocscience realiza análises de estabilidade probabilísticas pelo método Monte Carlo. Para as simulações, o número de iterações deverá ser testado e definido após

a estabilização da distribuição de probabilidade da variável dependente. Deverá ser definido também o tipo de análise “Global Minimum” ou “Overall Slope”.

As superfícies críticas dos arranjos desenvolvidos no presente trabalho foram encontradas pela opção “Global Minimum”, a qual realiza a análise probabilística apenas na superfície mínima global determinística. A opção “Overall Slope” permite que a pesquisa pela superfície crítica seja realizada diversas vezes gerando várias superfícies globais probabilísticas, o que exige um elevado tempo de processamento, podendo demorar dias para que seja encontrado o resultado.

Os dados de desvio padrão, distribuição estatística e valores mínimos e máximos adotados deverão ser inseridos no software para os parâmetros geotécnicos médios dos materiais da seção a ser analisada.

2.7.3 – Método dos Pontos de Estimativa ou Rosenblueth

O método probabilístico Rosenblueth, também conhecido como método dos pontos de estimativa, foi inicialmente limitado a análises de três variáveis, posteriormente sendo estendido para um número qualquer de variáveis independentes (Giani, 1992). De acordo com Rosenblueth (1975), a distribuição de uma variável aleatória X_i é concentrada em dois pontos particulares localizados por:

$$X_{i+} = \bar{X}_i + \sigma_i \quad (\text{Equação 2.5})$$

$$X_{i-} = \bar{X}_i - \sigma_i \quad (\text{Equação 2.6})$$

Onde:

\bar{X}_i e σ_i são o valor médio e o desvio padrão da distribuição da variável x_i .

“O método dos pontos de estimativa, para o caso de n variáveis correlacionadas, necessita de 2^n valores estimados para cada combinação dos pontos particulares X_{i+} e X_{i-} . Após a realização da combinação dos pontos particulares, se inicia o procedimento probabilístico por meio de cálculos determinísticos (análise de estabilidade), para este grupo de 2^n

valores. Assim, para cada nova etapa do processo probabilístico, os cálculos determinísticos são alimentados por um grupo de novos valores (dados) de entrada a serem utilizados no próximo cálculo” (Maia, 2007).

A Figura 2.35 ilustra o procedimento de cálculo do método Rosenblueth, considerando duas variáveis aleatórias e, a Figura 2.36 mostra as combinações dos pontos particulares X_{i+} e X_{i-} para n variáveis aleatórias.

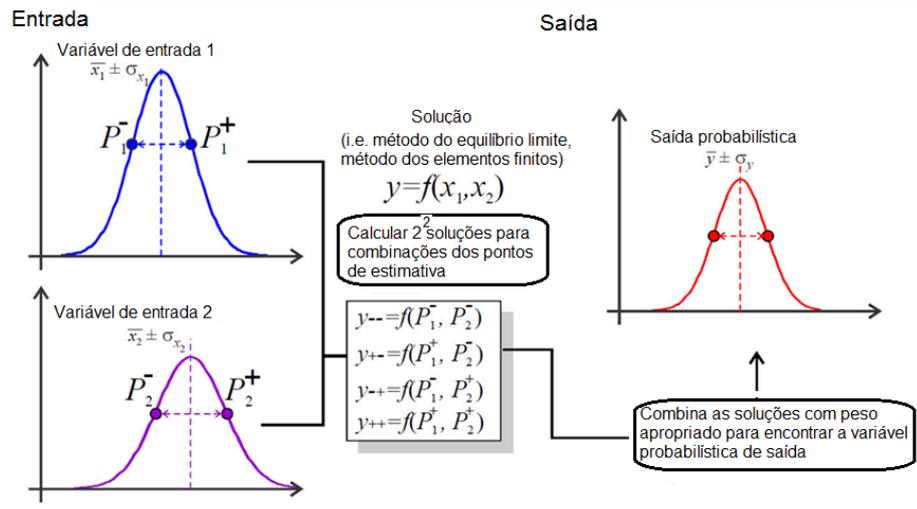


Figura 2.35 – Esquema do Procedimento de Cálculo do Método Rosenblueth (Rocscience, 2013)

Número de Variáveis Aleatórias

		1	2	3	4	...	n
N		1	-	-	-		
ú	2 ¹	2	+	-	-		
		3	-	+	-		
m	2 ²	4	+	+	-		
		5	-	-	+	-	
e	2 ³	6	+	-	+	-	
		7	-	+	+	-	
d	2 ⁴	8	+	+	+	-	
		9	-	-	-	+	
T	2 ⁵	10	+	-	-	+	
		11	-	+	-	+	
e	2 ⁶	12	+	+	-	+	
		13	-	-	+	+	
r	2 ⁷	14	+	-	+	+	
		15	-	+	+	+	
o	2 ⁸	16	+	+	+	+	
		17	-	-	-	-	
s	2 ⁹	18	+	+	+	+	
		19	-	-	-	-	
		20	+	+	+	+	
		21	-	-	-	-	
		22	+	+	+	+	
		23	-	-	-	-	
		24	+	+	+	+	
		25	-	-	-	-	
		26	+	+	+	+	
		27	-	-	-	-	
		28	+	+	+	+	
		29	-	-	-	-	
		30	+	+	+	+	
		31	-	-	-	-	
		32	+	+	+	+	
		33	-	-	-	-	
		34	+	+	+	+	
		35	-	-	-	-	
		36	+	+	+	+	
		37	-	-	-	-	
		38	+	+	+	+	
		39	-	-	-	-	
		40	+	+	+	+	
		41	-	-	-	-	
		42	+	+	+	+	
		43	-	-	-	-	
		44	+	+	+	+	
		45	-	-	-	-	
		46	+	+	+	+	
		47	-	-	-	-	
		48	+	+	+	+	
		49	-	-	-	-	
		50	+	+	+	+	
		51	-	-	-	-	
		52	+	+	+	+	
		53	-	-	-	-	
		54	+	+	+	+	
		55	-	-	-	-	
		56	+	+	+	+	
		57	-	-	-	-	
		58	+	+	+	+	
		59	-	-	-	-	
		60	+	+	+	+	
		61	-	-	-	-	
		62	+	+	+	+	
		63	-	-	-	-	
		64	+	+	+	+	
		65	-	-	-	-	
		66	+	+	+	+	
		67	-	-	-	-	
		68	+	+	+	+	
		69	-	-	-	-	
		70	+	+	+	+	
		71	-	-	-	-	
		72	+	+	+	+	
		73	-	-	-	-	
		74	+	+	+	+	
		75	-	-	-	-	
		76	+	+	+	+	
		77	-	-	-	-	
		78	+	+	+	+	
		79	-	-	-	-	
		80	+	+	+	+	
		81	-	-	-	-	
		82	+	+	+	+	
		83	-	-	-	-	
		84	+	+	+	+	
		85	-	-	-	-	
		86	+	+	+	+	
		87	-	-	-	-	
		88	+	+	+	+	
		89	-	-	-	-	
		90	+	+	+	+	
		91	-	-	-	-	
		92	+	+	+	+	
		93	-	-	-	-	
		94	+	+	+	+	
		95	-	-	-	-	
		96	+	+	+	+	
		97	-	-	-	-	
		98	+	+	+	+	
		99	-	-	-	-	
		100	+	+	+	+	

Figura 2.36 – Combinação (2ⁿ) dos Pontos Particulares Xi+ e Xi- (Maia, 2003)

CAPÍTULO 3

PRODUÇÃO, GERAÇÃO E DISPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS DE ALUMINA DA CBA

Este capítulo apresenta uma breve descrição da empresa CBA (Companhia Brasileira de Alumínio) e os principais resultados dos ensaios geotécnicos de caracterização e resistência realizados em amostras do resíduo proveniente do seu processo de produção de alumina. Os ensaios foram conduzidos em amostras de resíduo filtrado por filtro prensa e em amostras coletadas em sua atual estrutura de disposição, denominada Barragem Palmital.

3.1 – INTRODUÇÃO

De acordo com a publicação da Revista Minérios (2014), a Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), pertencente ao Grupo Votorantim, é a maior unidade produtora de alumínio primário do Brasil, sexto produtor mundial de alumínio. Cabe ressaltar que, sua produção nacional correspondeu a 1,4 milhões de toneladas em 2012, dos quais 420 mil toneladas são provenientes da CBA instalada no município de Alumínio - SP, mostrada na Figura 3.1.



Figura 3.1 – Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), município de Alumínio – SP

A CBA atua desde o processamento do minério de bauxita, para a obtenção do óxido de alumínio (Alumina), passando pela fabricação de alumínio primário através do processo de eletrólise, até a produção de produtos transformados.

A área desse processo, que é destaque em desenvolvimento de projetos de melhoria envolvendo a melhor disposição de resíduos e o reuso de água, é a área de obtenção do Óxido de Alumínio, conhecida como Alumina, que converte anualmente a bauxita em 870 mil toneladas de óxido de alumínio, Al_2O_3 .

A primeira parte da refinaria, a área vermelha, recebe a bauxita via linha férrea. A bauxita moída entra em contato com soda cáustica, sob condições de alta temperatura e pressão, para solubilizar o óxido de alumínio trihidratado ($Al_2O_3 \cdot 3H_2O$). Como as outras principais impurezas da bauxita não solubilizam, esses sólidos em suspensão são separados da solução líquida por um processo de decantação seguida de filtração. A área vermelha tem, portanto, dois principais produtos: a solução de soda e alumina, que é entregue à área branca e segue para o processo de produção do óxido, e o resíduo de bauxita, com os componentes indesejados presentes no minério, que é destinado para a barragem de resíduos. O resumo esquemático do processo para obtenção da alumina pode ser observado na Figura 3.2.

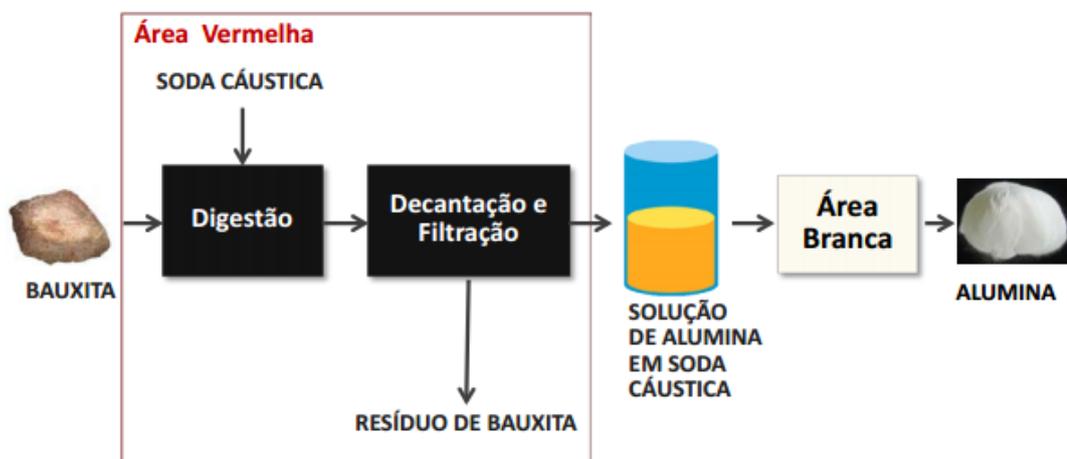


Figura 3.2 – Resumo esquemático do processo de fabricação de alumina da CBA

3.2 – DISPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS DE ALUMINA DA CBA

A Companhia Brasileira de Alumínio produz, em média, cerca de 2.400 toneladas por dia em base seca de resíduo a 50% de umidade, segundo a publicação da Revista Minérios (2014), ou seja, 876.000 toneladas/ano. O método de disposição adotado atualmente pela CBA é a disposição úmida, que requer uma barragem para estocagem de resíduos. A vida útil desta barragem é limitada por seu volume disponível e pela produção de resíduo da refinaria.

Para garantir a continuidade das operações da Refinaria da CBA e reduzir os riscos ambientais, várias iniciativas foram conduzidas para prolongar a vida útil de sua atual barragem de disposição, denominada Palmital. Ressalta-se que a construção de uma nova barragem não é uma alternativa viável, pois implica em altíssimos custos e depende de uma licença ambiental não garantida.

Barragem Palmital

Foi executada uma campanha de ensaios *In Situ* e de laboratório, para avaliação das características geotécnicas dos materiais presentes no depósito atual da Barragem Palmital, localizado no município de Alumínio, estado de São Paulo (Figura 3.3), para estudos de alternativas visando estender sua vida útil.

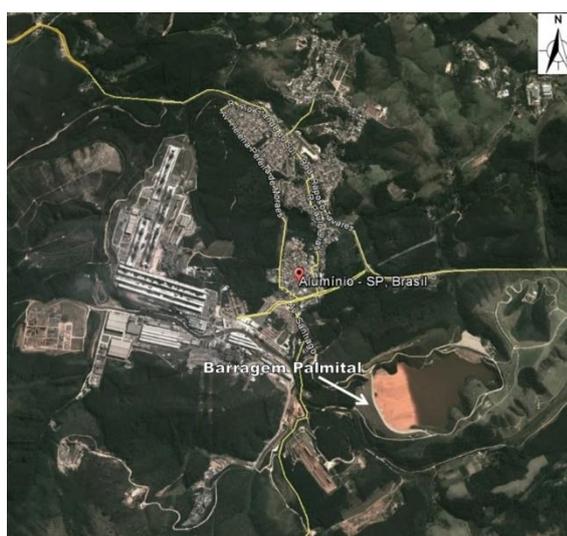


Figura 3.3 – Localização da Barragem Palmital (Fonte: Google Earth, 2014)

Na Barragem Palmital (Figura 3.4), é feita a disposição de resíduos provenientes do processamento da bauxita para obtenção do óxido de alumínio (alumina). Com a produção atual, ou seja, 2.400 toneladas por dia de resíduo de bauxita, estima-se que o volume útil da barragem será esgotado em 2020 e, por questões ambientais e/ou de licenciamentos a barragem não poderá ser alteada.



Figura 3.4 – Vista geral da Barragem Palmital (Fonte: CBA, 2013)

Desta forma, a alteração da forma de disposição do resíduo com baixa concentração de sólidos atualmente utilizado, para a disposição com aproximadamente 70% de concentração de sólidos, seria a alternativa que prolongaria a vida útil da barragem atual, apresentando menos riscos ambientais e demandando um investimento bem inferior em relação à construção de uma nova barragem.

A disposição em forma sólida será realizada por meio da utilização de filtro prensa. Neste contexto, as investigações realizadas, apresentadas a seguir, auxiliam na previsão do comportamento do resíduo existente frente às solicitações impostas pela nova forma de disposição.

3.3 – CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DOS RESÍDUOS DE ALUMINA DA CBA

3.3.1 – Resíduo Filtrado

O material a ser depositado sobre a Barragem Palmital foi caracterizado geotecnicamente por Nery (2013), que analisou seu comportamento quando compactado. Trata-se de um resíduo (denominado lama vermelha), obtido durante o estágio de clarificação do processo Bayer para produção de alumina na refinaria da CBA. A bauxita utilizada na produção de alumina dessa unidade da CBA é proveniente de Poços de Caldas e Itamarati de Minas (zona da mata), estado de Minas Gerais.

Esse resíduo é atualmente filtrado por filtros tambores, para recuperação da soda presente na lama vermelha, e posteriormente é adicionada água no resíduo até alcançar teor de sólidos de cerca de 35%, para possibilitar o bombeamento do mesmo até a barragem de disposição.

Para o estudo de seu comportamento quando compactado e desenvolvimento de novas alternativas de disposição, o resíduo foi filtrado por filtro tipo prensa piloto até atingir um teor de sólidos de aproximadamente 75% e, em seguida, uma área teste com esse resíduo foi executada para coleta de amostras e execução de ensaios geotécnicos.



Figura 3.5 – Comparação entre os resíduos de disposição úmida e seca (Fonte: CBA, 2013)

Nery (2013) descreve o modelo de filtro prensa piloto utilizado, a área teste preparada para a coleta de amostras, executada em novembro de 2012, e toda a preparação dos corpos de prova para a realização dos ensaios. Os principais objetivos dessa área teste foram:

- Coleta de amostras para o estudo em laboratório dos parâmetros de resistência, permeabilidade e compressibilidade do resíduo;

- Determinação do ângulo de repouso do resíduo a ser descarregado formando uma pilha de material solto;
- Obtenção da densidade da pilha do material solto;
- Obtenção do grau de compactação do resíduo compactado com passadas do trator de esteiras.

Foram disponibilizadas cerca de 8,0 toneladas de material proveniente dos testes executados com o filtro prensa para execução da área teste.

O item a seguir apresenta um resumo dos principais resultados encontrados nos ensaios geotécnicos de campo e laboratoriais realizados nesse resíduo e que serão utilizados em análises de metodologias de disposição no Capítulo 5.

3.3.1.1 – Principais Resultados – Ensaios Geotécnicos de Campo e Laboratoriais

Área Teste

A simulação da formação da pilha de resíduo filtrado (Figura 3.6) resultou em um ângulo de repouso de cerca de 35°, para o resíduo solto lançado (sem compactação). O peso específico médio obtido nesta pilha foi de 14,9 kN/m³ (média entre os métodos de cravação do cilindro biselado e o método da membrana), com umidade média de 31,52%.



Figura 3.6 – Simulação da formação da pilha teste de resíduo filtrado da CBA (Nery, 2013)

Esse resíduo foi compactado em valas de 0,75 x 6,0 m e 0,4 m de profundidade e os graus de compactação obtidos no topo e base da camada para cada número de passadas do equipamento de esteiras estão apresentados na Tabela 3.1. A Figura 3.7 mostra como foi a compactação do resíduo na área teste.

Tabela 3.1 – Graus de Compactação (GC) obtidos em campo para cada número de passadas do equipamento de esteiras

Número de Passadas	6	8	10	12	14
GC (%) topo	94,14	95,66	96,32	99,51	98,95
GC (%) base	89,74	95,56	95,86	97,18	99,71



Figura 3.7 – Compactação do resíduo nas valas com a escavadeira de esteira Doosan SOLAR255LC-V (Nery *et. al.*, 2013)

Coleta de Amostras

Amostra Deformada: Foi coletada 1 (uma) amostra deformada do resíduo na saída do filtro prensa.

Amostra Indeformada: Foram coletadas 4 (quatro) amostras indeformadas do resíduo compactado na área teste, sendo um bloco de 30 x 30 x 30 cm para diferentes números de passadas de esteira (8, 10, 12 e 14 passadas).

Ensaio de Caracterização

Todos os ensaios de caracterização apresentados a seguir, foram realizados pela Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa – MG no 1º semestre de 2013, conforme padronizados por suas respectivas normas ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

Peso específico dos grãos (γ_s): Foi determinado o peso específico dos grãos a partir da amostra deformada e de amostra retirada dos blocos. O valor médio encontrado para o resíduo foi de 27,97 kN/m³.

Peso específico natural (γ): Esta determinação foi feita nas amostras indeformadas coletadas na área teste, de forma a avaliar o ganho de densidade com o aumento do número de passadas do equipamento de esteira. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Peso específico natural para cada número de passadas do equipamento de esteiras

Número de Passadas	8	10	12	14
γ (kN/m ³)	16,194	17,796	18,195	18,533

Granulometria: A análise granulométrica completa foi realizada na amostra deformada e no material retirado dos blocos (amostras indeformadas). Foram realizados os métodos de peneiramento e sedimentação. Do material das amostras deformadas, foi realizado também o ensaio de granulometria sem o uso de defloculante, com o objetivo de avaliar qual a influência do defloculante nas frações granulométricas para este material, verificar a ocorrência de floculação no campo e obter a distribuição granulométrica que o material realmente apresenta quando sai do filtro. A Figura 3.8 ilustra as curvas granulométricas das amostras.

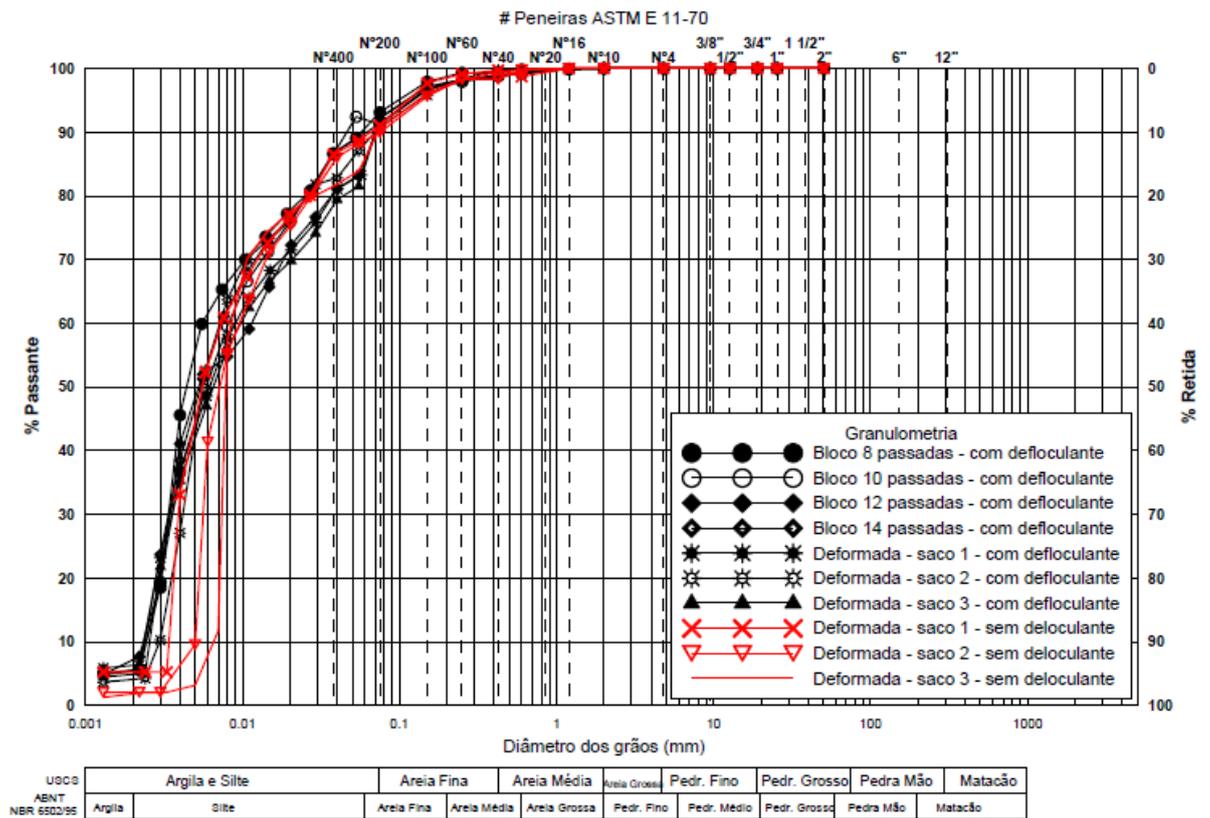


Figura 3.8 – Curvas granulométricas dos blocos e amostras deformadas da área teste da CBA

Observa-se da Figura 3.8 que a fração fina é a predominante e o material pode ser classificado como silte.

Limites de Consistência: Foram realizados ensaios para determinação dos limites de consistência na amostra deformada do resíduo e também em amostra retirada dos blocos. A Figura 3.9 apresenta a carta de plasticidade de Casagrande para a classificação geotécnica do material.

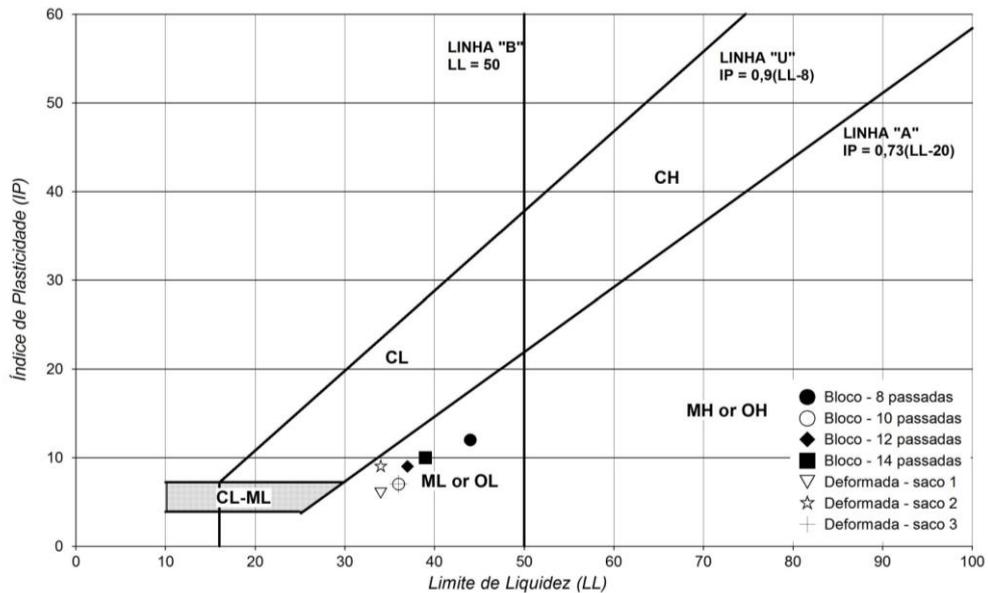


Figura 3.9 – Carta de plasticidade dos blocos e amostras deformadas da área teste da CBA

De acordo com a carta de plasticidade apresentada na Figura 3.9, o material é classificado como silte de baixa plasticidade.

O índice médio de atividade da argila encontrado para o resíduo ensaiado é acima de 1,25, indicando que a fração argila presente no material é considerada ativa. Entretanto, a proposta de Skempton do índice de atividade do argilo-mineral pode não ser aplicável para o resíduo em questão. Acredita-se que o índice de atividade encontrado tenha mais relação com o tipo de fluido presente na amostra, que contém soda cáustica, do que com o argilo-mineral presente.

Ensaio de Compactação: Os ensaios de compactação foram realizados em três amostras deformadas, utilizando-se a energia de compactação Proctor Normal. O ensaio foi feito em duas condições:

- Com a amostra destorroada, conforme orientação na norma;
- Sem destorroar a amostra, ou seja, mantendo-se os fragmentos de “torta” obtidos do processo de filtragem pelo filtro prensa, visando observar se há variação dos resultados em função da estrutura da amostra.

Os resultados obtidos não mostraram diferenças significativas entre as amostras sem destorroar e destorroadas. A Figura 3.10 ilustra as curvas de compactação.

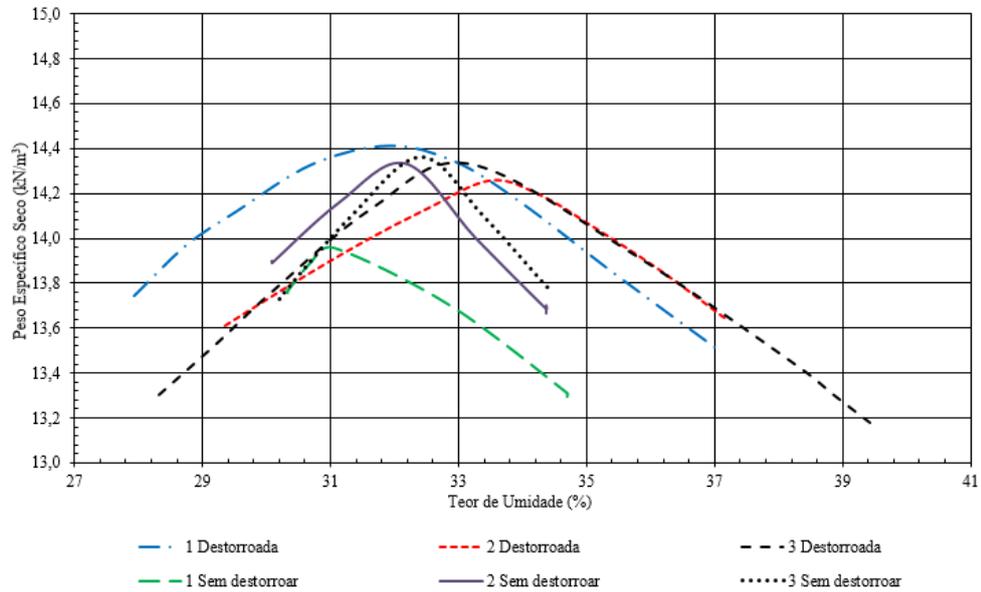


Figura 3.10 – Curvas de compactação das amostras deformadas do resíduo filtrado da CBA

Para os próximos resultados de ensaios a serem apresentados, Nery (2013) mostrou em seu trabalho valores correspondentes aos corpos de prova moldados para três graus de compactação (GC) diferentes: 90%, 95% e 100%. Nesse trabalho, serão abordados apenas os resultados referentes ao GC=90% por ser considerado um valor de maior facilidade para se obter em campo e que será adotado nas análises de metodologias de disposição.

Ensaio de Permeabilidade: Os ensaios foram executados com fluxo vertical, perpendicular às camadas de compactação. Os valores de coeficiente de permeabilidade obtidos dos ensaios de permeabilidade a carga variável para os corpos de prova com grau de compactação igual a 90% e para as amostras indeformadas (talhadas) estão apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Resultados dos ensaios de permeabilidade à carga variável (Nery, 2013)

Amostra	Condições de moldagem		Dados da moldagem			k (m/s)
	Grau de Compactação (GC)	Teor de Umidade	γ (kN/m ³)	w (%)	e	
Deformada	90%	wót - 5%	16,27	26,49	1,231	1,914E-08
		wót	16,98	32,02	1,231	5,683E-09
		wót + 5%	17,85	36,77	1,199	1,400E-09
Indeformada	Bloco 08 passadas		17,10	35,71	1,277	4,032E-07
	Bloco 10 passadas		18,45	32,48	0,988	1,946E-08
	Bloco 12 passadas		18,91	33,10	0,959	1,483E-08
	Bloco 14 passadas		19,28	31,17	0,891	3,300E-09

Onde:

γ = peso específico inicial do corpo de prova;

w = teor de umidade inicial do corpo de prova;

e = índice de vazios inicial do corpo de prova;

k = coeficiente de permeabilidade do corpo de prova.

Ensaio de Adensamento Unidimensional: A Tabela 3.4 apresenta os parâmetros obtidos nos ensaios de adensamento.

Tabela 3.4 – Resultados dos ensaios de adensamento unidimensional (Nery, 2013)

Condições de moldagem		Parâmetros de compressibilidade							
Grau de Compactação (GC)	Teor de Umidade (w)	σ'_p (kPa) (Pacheco Silva)	Cr	Cc	CR = Cc/(1+ei)	σ'_v (kPa)	a_v (m ² /kN)	m_v (m ² /kN)	c_v (m ² /ano)
90%	wót - 5%	147	0,045	0,320	0,15	400	0,334	0,177	6,90
	wót	260	0,031	0,264	0,13	400	0,206	0,106	3,70
	wót + 5%	220	0,030	0,214	0,10	400	0,151	0,078	28,90

Tabela 3.4 – Resultados dos ensaios de adensamento unidimensional (Nery, 2013) -
 Continuação

Condições de moldagem		Parâmetros de compressibilidade							
Grau de Compactação (GC)	Teor de Umidade (w)	σ'_p (kPa) (Pacheco Silva)	Cr	Cc	CR = $Cc/(1+ei)$	σ'_v (kPa)	a_v (m ² /kN)	m_v (m ² /kN)	c_v (m ² /ano)
Bloco 08 passadas		162	0,040	0,295	0,14	400	0,267	0,144	1,85
Bloco 10 passadas		337	0,038	0,266	0,14	400	0,203	0,113	1,03
Bloco 12 passadas		363	0,034	0,254	0,13	400	0,179	0,094	5,83
Bloco 14 passadas		219	0,025	0,130	0,07	400	0,129	0,076	1,05

Onde:

σ'_p (Pacheco Silva) = Tensão normal efetiva de pré-adensamento determinada pelo método de Pacheco Silva;

Cr = Índice de recompressão;

Cc = Índice de compressão;

CR = $Cc/(1+ei)$;

σ'_v = Tensão normal efetiva vertical;

a_v = Coeficiente de compressibilidade;

m_v = Coeficiente de compressibilidade volumétrica;

c_v = Coeficiente de adensamento.

Ensaio Triaxiais UU: Foram executados em corpos de prova não saturados, aplicando-se tensões confinantes de 50, 100, 200 e 400 kPa. Os parâmetros de resistência (total e efetivo) obtidos são apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Parâmetros de resistência (Nery, 2013)

Condições de moldagem		γ (kN/m ³) dos CPs	S (%)	c (kPa)	ϕ (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Grau de Compactação (GC)	Teor de Umidade (w)						
90%	wót - 5%	16,35	64	49,85	21,3	48,86	21,3
	wót	16,92	75	29,13	23,7	30,29	23,7
	wót + 5%	17,87	91	19,84	13,5	0,00	33,0
Bloco 8 passadas		18,22	92	77,79	20,3	74,34	21,3
Bloco 10 passadas		19,25	97	118,75	24,2	118,33	24,7
Bloco 12 passadas		19,40	100	58,50	30,1	63,35	30,5
Bloco 14 passadas		19,85	100	90,15	27,5	89,35	29,2

Onde:

γ = peso específico natural do corpo de prova;

S = grau de saturação do corpo de prova;

c = intercepto de coesão em termos de tensões totais;

ϕ = ângulo de atrito em termos de tensões totais;

c' = intercepto de coesão em termos de tensões efetivas;

ϕ' = ângulo de atrito em termos de tensões efetivas.

Ensaio Triaxiais PN: Foram realizados para simular a construção rápida da pilha, sem que se tenha tempo para a dissipação das poropressões geradas, utilizando a relação $\sigma_1/\sigma_3 = 2,0$.

Através do ensaio PN é obtido o parâmetro \bar{B} da relação entre as poropressões no corpo de prova e as tensões verticais efetivas.

Os resultados dos ensaios PN foram plotados em gráfico de poropressão (u) versus a tensão principal maior (σ_1) (Figura 3.11). A inclinação das curvas representa o parâmetro de geração de poropressão (\bar{B}), que é a relação entre a poropressão e a tensão principal maior.

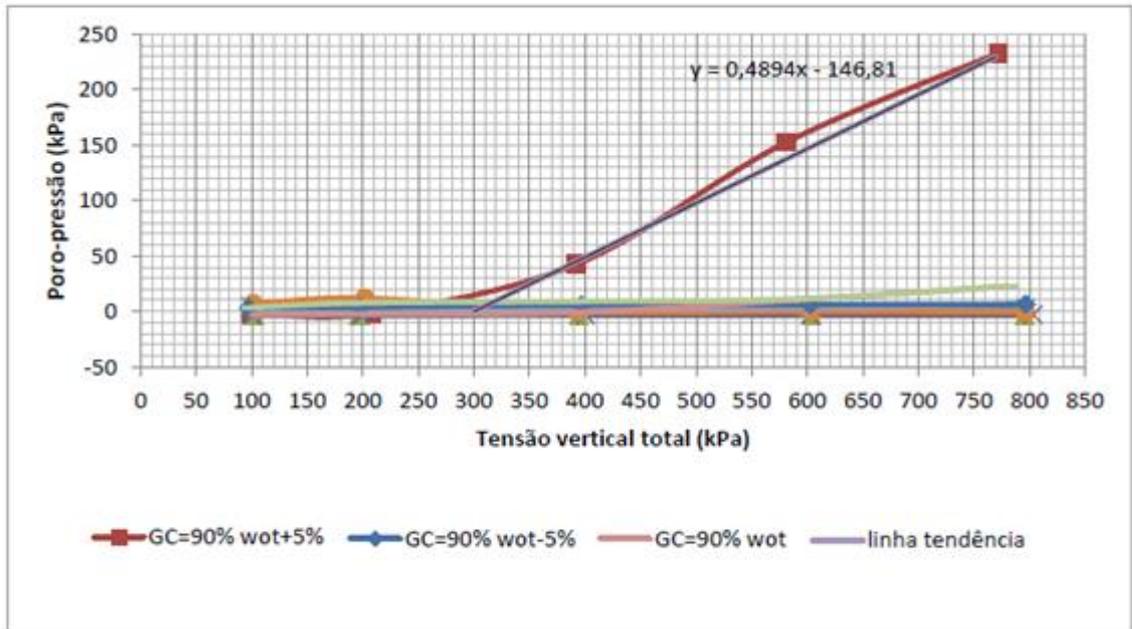


Figura 3.11 – Gráfico da poro-pressão *versus* tensão vertical total obtido pelo ensaio PN nos corpos de prova moldados para diferentes condições de compactação (Nery, 2013)

Observa-se que, nos ensaios realizados nas amostras indeformadas, não houve geração de poro-pressão com o aumento do carregamento. Para as amostras moldadas em diferentes condições de compactação, somente o corpo de prova moldado com grau de compactação de 90% e umidade ótima mais 5%, apresentou geração de poro-pressão durante o carregamento, com parâmetro de geração de poro-pressão (\bar{B}) igual a 0,49, calculado no intervalo de tensão vertical total de 300 kPa a 750 kPa.

Nas análises a serem realizadas nesse resíduo no Capítulo 5 será considerado que, para graus de saturação superiores a 90%, há uma geração de poro-pressão com o carregamento, sendo o coeficiente adotado de **0,25**.

3.3.2 – Material de Fundação

A campanha de ensaios realizada visou pesquisar as características e propriedades geotécnicas do resíduo depositado na Barragem Palmital correspondente ao material de fundação do empilhamento, com o objetivo de obter informações necessárias para avaliar a

sua capacidade de suporte e subsidiar o estudo de disposição do resíduo desaguado pelo filtro prensa.

3.3.2.1 – Programação das Investigações e Ensaios Laboratoriais

Em campo, foram executadas sondagens à percussão com ensaios de penetração (SPT – “Standard Penetration Test”), “Vane Test” (palheta) e ensaios CPTu (piezocone), além da coleta de amostras indeformadas com amostrador “Shelby” para a realização de ensaios de laboratório. Os serviços de campo foram realizados entre outubro e novembro de 2013 pela Empresa Fugro In Situ.

A campanha laboratorial executada em dezembro de 2013, também pela Empresa Fugro In Situ, contou com ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação, massa específica real dos grãos, limites de Atterberg, teor de umidade, peso específico aparente/natural, adensamento e triaxial.

Segundo a empresa responsável pela execução das investigações e ensaios, durante a coleta de amostras indeformadas foram realizadas 24 (vinte e quatro) tentativas, sendo que, somente em 05 (cinco) foi possível recuperar o material a ser ensaiado em laboratório.

A amostragem em quantidade inferior à prevista afetou diretamente a programação dos ensaios de laboratório, que forneceu uma quantidade de resultados menos representativa. A locação dos pontos, que possibilita comparar as investigações programadas com as executadas, é apresentada na Figura 3.12.

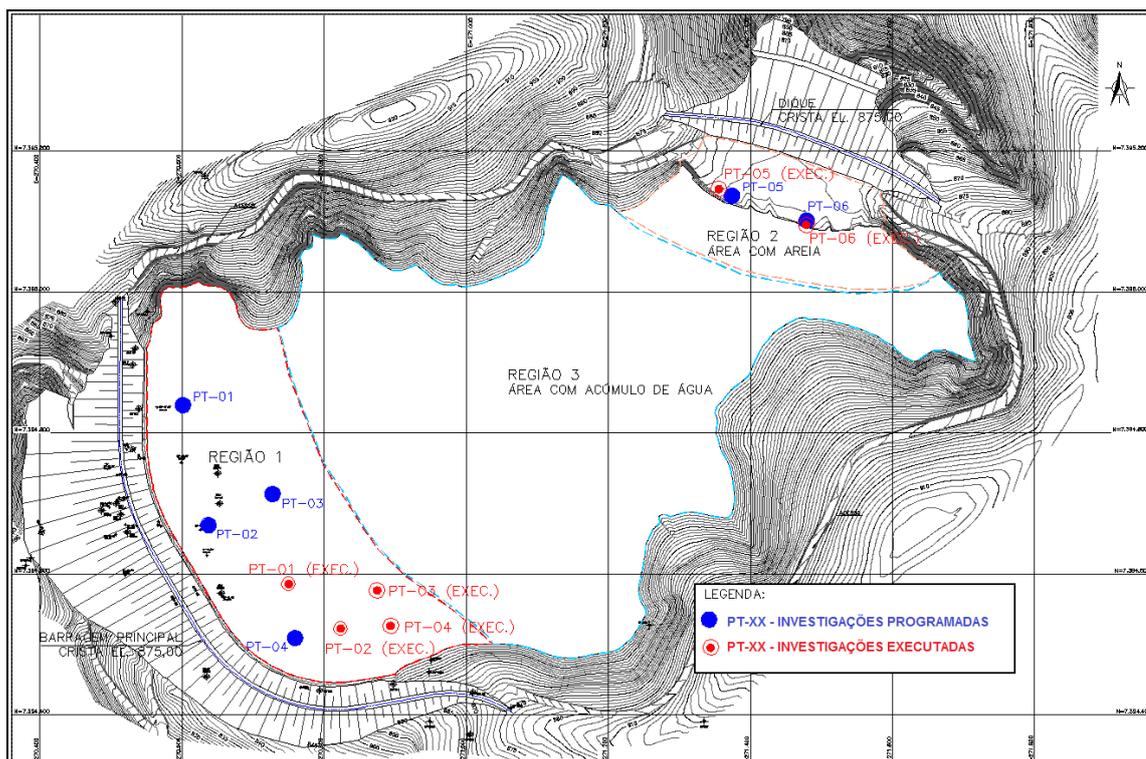


Figura 3.12 – Locação dos pontos especificados *versus* executados na Barragem Palmital

O item a seguir apresenta os principais resultados obtidos nos ensaios geotécnicos de campo e laboratoriais realizados no resíduo depositado na Barragem Palmital.

3.3.2.2 – Principais Resultados – Ensaios Geotécnicos de Campo e Laboratoriais

Para definição dos parâmetros geotécnicos do rejeito, sobre o qual será depositado o resíduo desaguado pelo filtro prensa, foram utilizados os dados provenientes das investigações e ensaios realizados na Região 1 (Figura 3.12). Os materiais presentes na Região 2, por apresentarem características comportamentais bem distintas daquelas encontradas na Região 1, que efetivamente receberá as solicitações impostas pelo resíduo a ser depositado, não foram considerados.

Peso específico in situ do resíduo no reservatório

Os dados obtidos no ensaio de CPTu foram interpretados pelo software CPeT-IT da Empresa Geologismiki, que obteve os valores dos pesos específicos por meio da seguinte correlação:

$$\gamma/\gamma_w = 0.27 [\log R_f] + 0.36 [\log(q_t/p_a)] + 1.236 \quad (\text{Equação 3.1})$$

Onde,

R_f = razão de atrito $= (f_s/q_t)$ 100%

γ = peso específico do resíduo

γ_w = peso específico da água

p_a = pressão atmosférica

Os pesos específicos calculados não apresentaram variações significativas com a profundidade, conforme representado graficamente na Figura 3.13. Observa-se que, os ensaios de laboratório apresentaram valores mais elevados e com maior dispersão.

A interpretação conjunta dos resultados do ensaio CPTu possibilitou a definição de uma envoltória de valores médios cujo comportamento é dado pela equação:

$$\gamma = 13 + 0,18 \times \text{profundidade}, \quad (\text{Equação 3.2})$$

Onde γ é o peso específico do material, obtido em kN/m^3 .

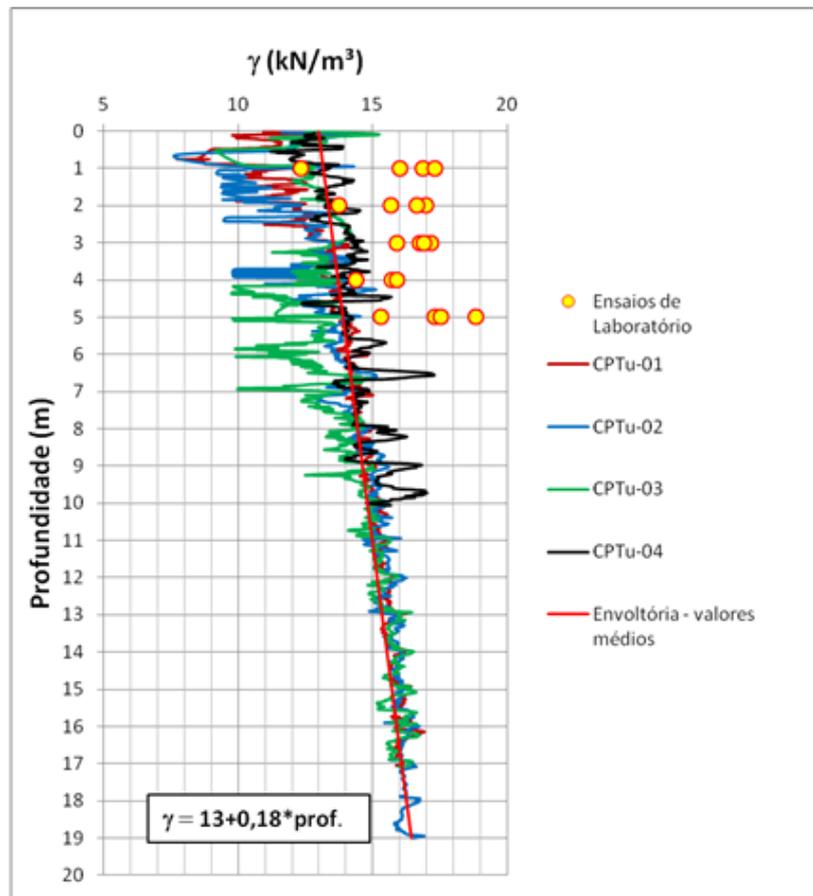


Figura 3.13 – γ x profundidade - CPTu 01 ao 04 e Ensaio de Laboratório

Considerando apenas uma média geral dos resultados dos ensaios de laboratório, pode-se considerar um valor de peso específico de $16,0 \text{ kN/m}^3$ constante com a profundidade.

Tensões Totais, Tensões Efetivas e Poropressões

As Figuras 3.14 e 3.15 apresentam o comportamento da variação de tensões totais, efetivas e da poropressão com a profundidade para cada ponto avaliado.

É importante observar que os ensaios CPTu's 01, 02 e 03 apresentaram comportamento semelhante com o crescimento dos parâmetros, atrelado ao aumento da profundidade.

Quanto ao ensaio CPTu-04, a partir dos 6,5 m de profundidade, houve uma redução significativa no valor da poropressão. Acredita-se que, pela proximidade do furo em

relação à ombreira esquerda da barragem, a partir desta profundidade, o equipamento de ensaio tenha atingido o terreno natural. Essa afirmativa é reforçada ao se analisar o perfil de comportamento do solo, que apresenta, a partir da profundidade citada, intercalações de materiais de característica silto-arenosa a areno-siltosa, diferindo do comportamento predominantemente argiloso da camada superior.

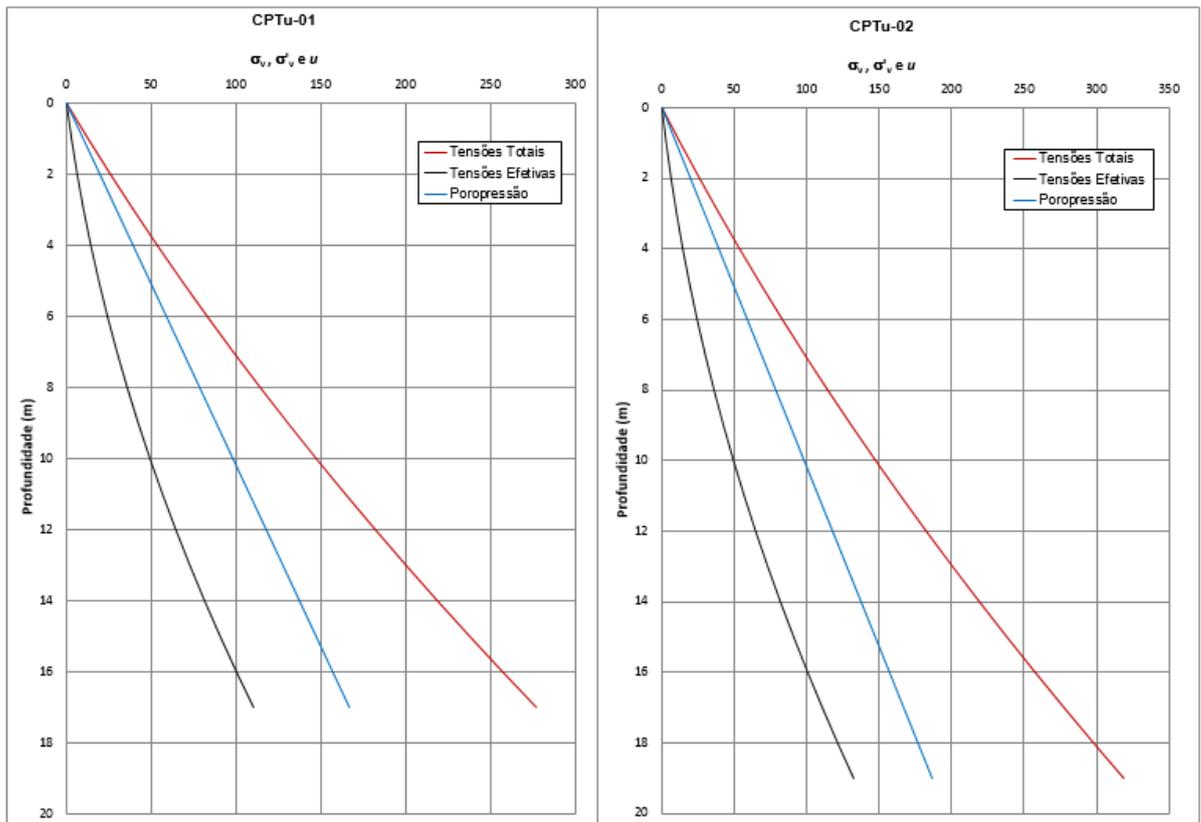


Figura 3.14 – Variação das tensões totais (σ_v), efetivas (σ'_v) e da poropressão (u) com a profundidade CPTu-01 e 02

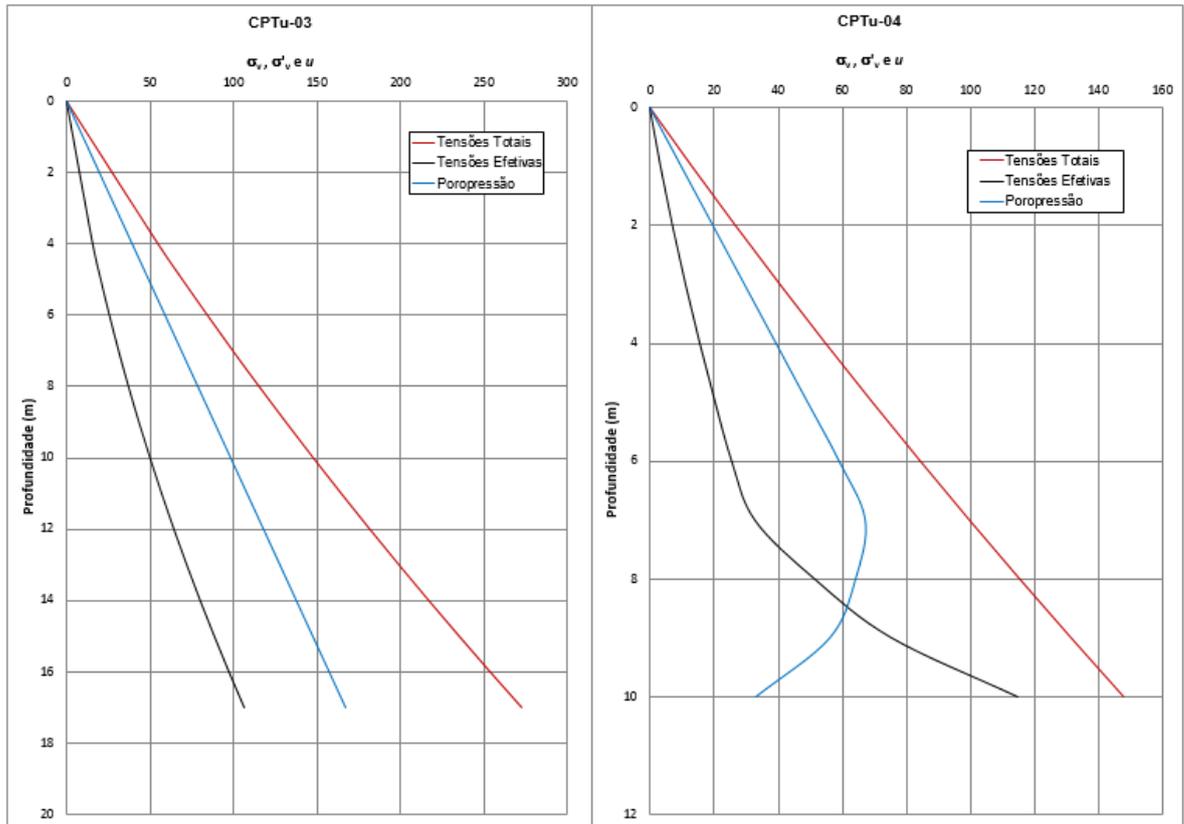


Figura 3.15 – Variação das tensões totais (σ_v), efetivas (σ'_v) e da poropressão (u) com a profundidade CPTu-03 e 04

Resistência não drenada (S_u)

Para a identificação de padrões e tendências de comportamento da resistência não drenada em relação à profundidade e à variação do nível de tensões, foram utilizados os resultados provenientes dos ensaios CPTu, Vane Test e, no caso do ponto PT-04, também o ensaio triaxial UU.

Por contar com uma variabilidade maior de ensaios, optou-se por representar os resultados do ponto PT-04 separadamente, antes de incorporá-los para interpretação conjunta aos demais pontos de investigação.

Como pode ser observado na Figura 3.16, a resistência não drenada apresentou comportamento semelhante para os resultados provenientes do ensaio de CPTu e Vane

Test, já o ensaio triaxial apresentou valores mais elevados. O comportamento comum a todos é a tendência de aumento da resistência não drenada com a profundidade.

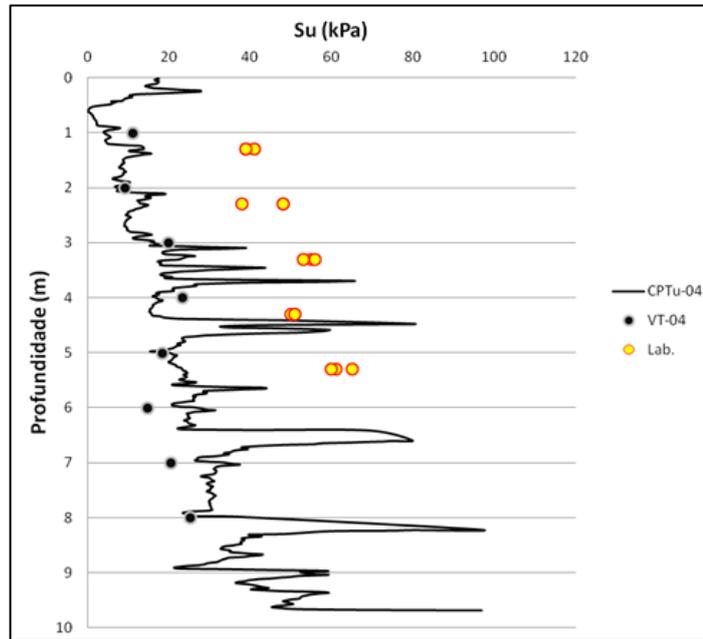


Figura 3.16 – Su x profundidade – Ensaios CPTu-04, VT-04 e Triaxial UU

A Figura 3.17 representa graficamente, para as amostras na condição indeformada, os valores da resistência não drenada em relação à profundidade e à variação da tensão vertical efetiva, obtidos pelos ensaios de palheta realizados no PT-01 ao 04. Em função das análises probabilísticas a serem realizadas no Capítulo 5, optou-se por se definir uma tendência baseada na envoltória de valores médios para a condição indeformada.

O comportamento linear da envoltória média é definido pelas seguintes equações:

$$Su = 1,5 \times \text{profundidade}; \quad (\text{Equação 3.3})$$

$$Su = 0,35 \times \sigma'_v. \quad (\text{Equação 3.4})$$

Onde, Su é a resistência não drenada e σ'_v é a tensão vertical efetiva, medidas em kPa.

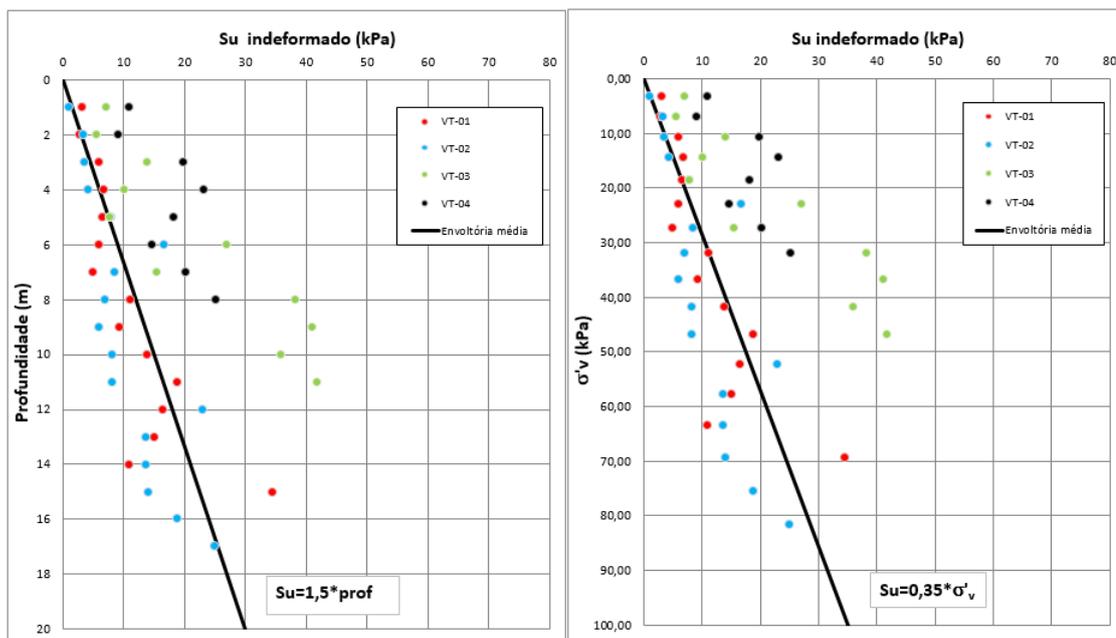


Figura 3.17 – S_u x profundidade e S_u x σ'_v para amostras na condição indeformada – Ensaio VT-01 ao 04

No gráfico da Figura 3.18, é feita a junção entre os resultados dos ensaios de palheta e CPTu para os pontos PT-01 ao PT-04, com a representação dos valores de resistência não drenada em função da profundidade. A Figura 3.18 apresenta a envoltória considerada.

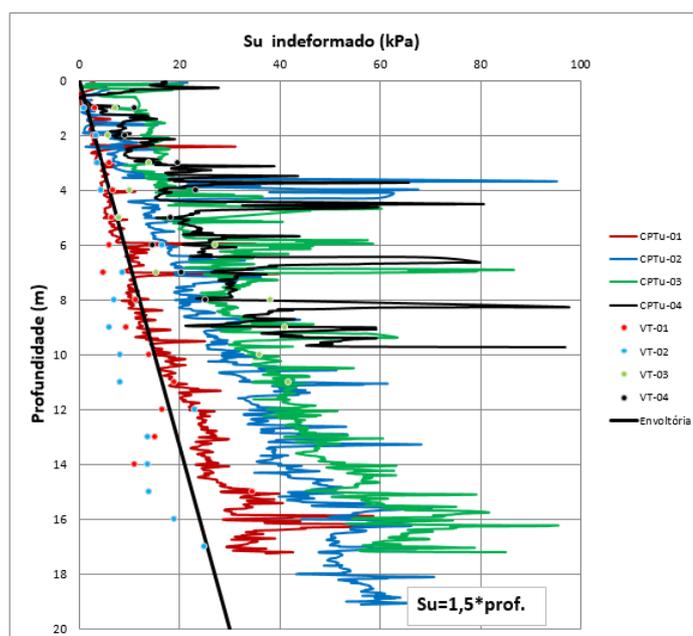


Figura 3.18 – S_u x profundidade – Ensaio CPTu-01 ao 04 e VT-01 ao 04

A Figura 3.19 representa graficamente, para as amostras na condição amolgada, os valores da resistência não drenada em relação à profundidade e à variação da tensão vertical efetiva. Nesta condição, a dispersão dos resultados está representada pela envoltória de valores inferiores. O comportamento linear da envoltória é definido pelas seguintes equações:

$$Su = 0,2 \times \text{profundidade}; \quad (\text{Equação 3.5})$$

ou,

$$Su = 0,04 \times \sigma'_v. \quad (\text{Equação 3.6})$$

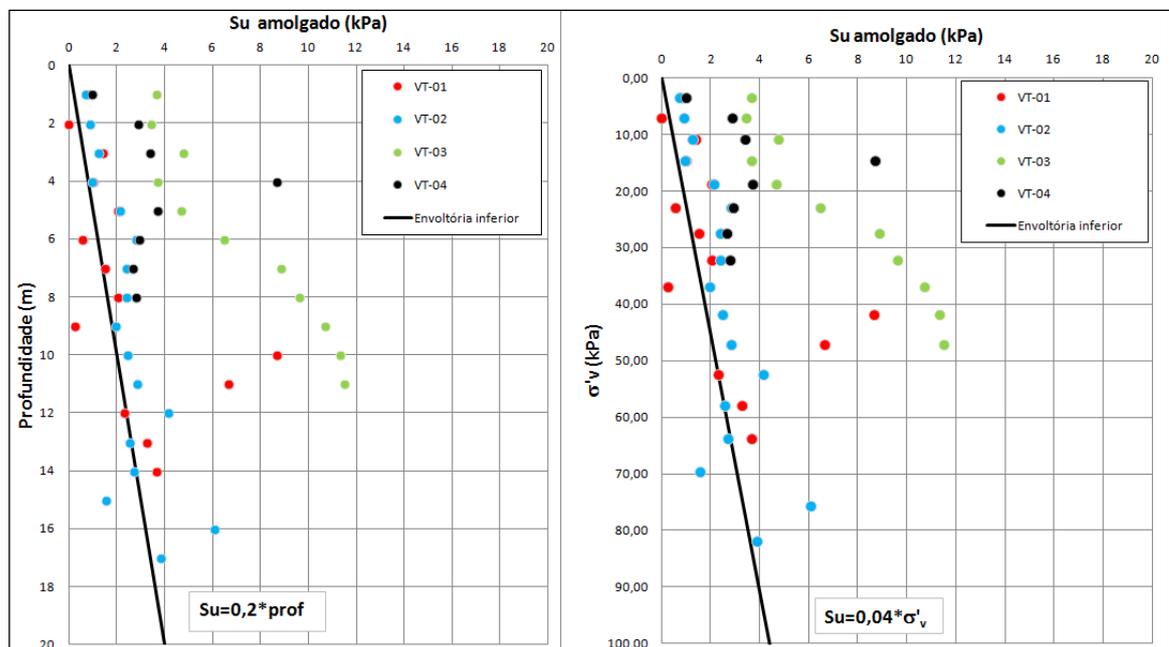


Figura 3.19 – Su x profundidade e Su x σ'_v para amostras na condição amolgada – Ensaios VT-01 ao 04

Compressibilidade

Os valores do Módulo Confinante foram calculados por meio da correlação entre parâmetros obtidos nos ensaios de adensamento, para amostras retiradas no ponto PT-01, e estimados pelos ensaios de CPTu realizados nos pontos PT-01 ao 04.

Conforme representado graficamente na Figura 3.20, os valores do módulo confinante obtidos pelo ensaio de adensamento são sensivelmente inferiores àqueles provenientes do ensaio de CPTu. Desta forma, pela maior confiabilidade oferecida pelos parâmetros calculados em relação aos estimados, optou-se por adotar como referência de comportamento do módulo confinante em relação à tensão vertical efetiva, a envoltória de valores inferior cuja relação é descrita pela seguinte equação:

$$M = 14,16 \times \sigma'_v \quad (\text{Equação 3.7})$$

Onde, M é o módulo confinante e σ'_v é a tensão vertical efetiva, medidos em kPa.

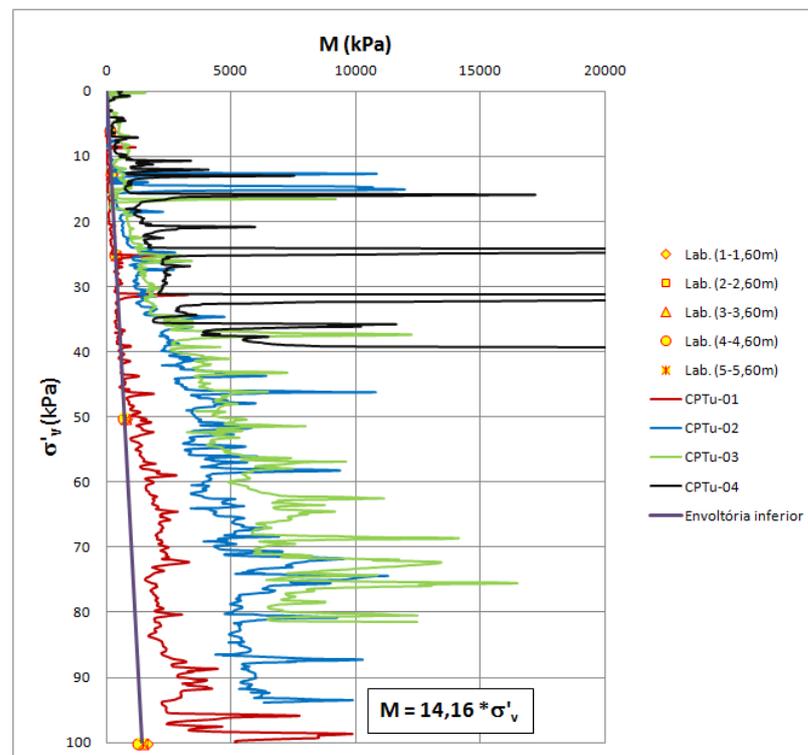


Figura 3.20 – M x σ'_v – CPTu-01 ao 04 e Ensaio de Adensamento

Coefficiente de adensamento

Os coeficientes de adensamento obtidos no ensaio de adensamento, e os coeficientes de adensamento horizontal, provenientes dos ensaios de CPTu 01 ao 04, têm sua variação com a tensão efetiva vertical apresentadas graficamente na Figura 3.21.

Os valores obtidos possibilitaram a definição de uma tendência que indica o valor médio para cada parâmetro a ser utilizado, sendo:

$$C_v = 6 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$C_h = 1,79 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$$

Onde C_v é o coeficiente de adensamento vertical e C_h é o coeficiente de adensamento horizontal.

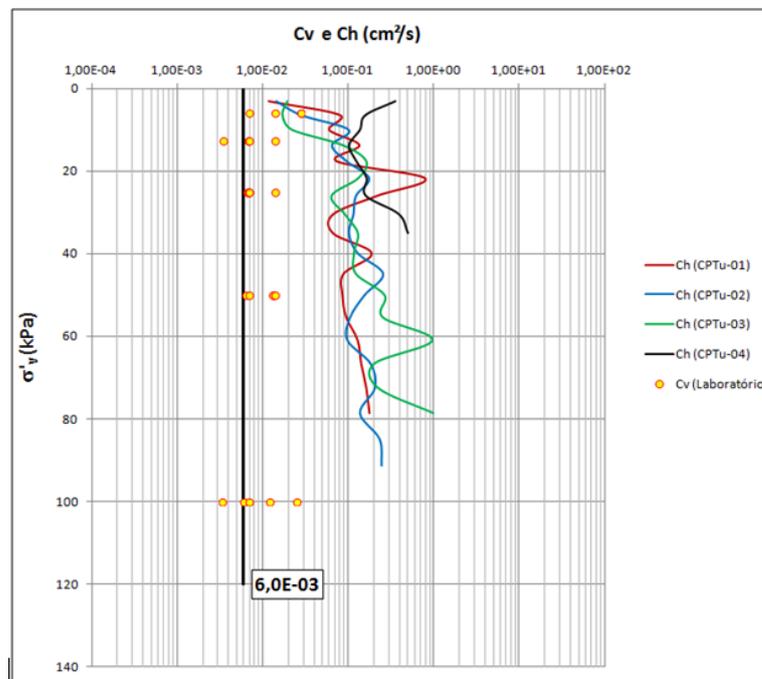


Figura 3.21 – C_v e $C_h \times \sigma'_v$ – CPTu-01 ao 04 e Ensaio de Adensamento

Considerações

De forma geral, pode-se admitir que o resíduo presente na Barragem Palmital não foi investigado de maneira satisfatória, já que tanto as investigações de campo, quanto a campanha de ensaios de laboratório, diferiram do especificado tanto em localização quanto em quantidade.

As investigações de campo foram deslocadas com distâncias superiores às especificadas, situando-se de forma concentrada na área próxima à ombreira esquerda, não abrangendo a área central e a porção próxima à ombreira direita do resíduo depositado na Região 1.

A amostragem também se demonstrou falha, uma vez que foi realizada em quantidade muito inferior à especificada e em apenas um ponto (PT-04 – Região 1), o que afetou diretamente na campanha de ensaio de laboratório.

As investigações da Região 2, realizadas sobre o aterro de areia, indicaram a existência de materiais com características bem distintas daquelas encontradas na Região 1. Desta forma, optou-se pela não abordagem de seus resultados na definição dos parâmetros de resistência e deformabilidade dos materiais que receberão as solicitações impostas pelo resíduo do filtro prensa.

A parte central do reservatório (Região 3), local com acúmulo de água e resíduo com baixo teor de sólidos, não contou com programação de investigações. A realização de investigações nesta região, condicionada pela remoção da água acumulada, é de grande importância para a deposição de resíduo do filtro prensa em pilha sobre o reservatório, visto que nesta região existe a tendência de que o resíduo apresente resistência consideravelmente inferior à encontrada para o resíduo da praia (Região 1).

Os resultados das investigações e ensaios, mesmo não sendo executados de forma satisfatória, possibilitaram a obtenção de valores e/ou tendência de comportamento dos parâmetros geotécnicos capazes de subsidiar o estudo de disposição do resíduo desaguado pelo filtro prensa sobre o material presente no reservatório da Barragem Palmital.

CAPÍTULO 4

PRODUÇÃO, GERAÇÃO E DISPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS DE ALUMINA DA ALUNORTE

Este capítulo apresenta uma breve descrição da empresa Alunorte e os principais resultados dos ensaios geotécnicos de caracterização e resistência realizados em amostras do resíduo proveniente do seu processo de produção de alumina. Os ensaios foram conduzidos em amostras de resíduo filtrado por filtro prensa e em amostras coletadas em sua atual estrutura de disposição, denominada DRS1 (Depósito de Resíduos Sólidos 1).

4.1 – INTRODUÇÃO

Construída estrategicamente em Barcarena, município situado a 40 quilômetros em linha reta de Belém (PA), a Alunorte (Figura 4.1), pertencente ao Grupo Hydro, iniciou suas operações em julho de 1995, após um período de paralisação das obras em função de uma crise no mercado, que retardou a implantação do projeto.



Figura 4.1 – Alunorte do Brasil S.A. em Barcarena – PA

Em 2000, iniciou-se o primeiro projeto de expansão da refinaria, que foi concluído em 2003. Com a ampliação, a capacidade produtiva passou de 1,6 para 2,5 milhões de toneladas de alumina por ano. Com esse salto na produção, a empresa ganhou destaque no cenário internacional e passou a figurar como a maior refinaria da América Latina e a quarta do mundo. Nesse mesmo ano, iniciou-se a segunda expansão que foi concluída no primeiro semestre de 2006, consolidando a Alunorte como a maior refinaria de alumina do mundo. A empresa chegava então a uma capacidade de produção de 4,4 milhões de toneladas de alumina por ano.

Em agosto de 2008, a Alunorte concluiu as obras da Expansão 3 que capacitou a empresa para produzir 6,26 milhões de toneladas de alumina por ano. Com esse patamar, a Alunorte passou a ser responsável por 7% da produção mundial de alumina.

4.2 – DISPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS DE ALUMINA DA ALUNORTE

Para garantir a continuidade das operações da Alunorte em Barcarena e reduzir os riscos ambientais, estão sendo desenvolvidos estudos de alternativas para estender a vida útil de seu atual depósito de disposição de resíduos sólidos, denominado DRS1.

Para o presente estudo de disposição dos resíduos, admitiu-se que a Alunorte produz atualmente cerca de 7.500.000 toneladas/ano de lama vermelha a 60% de sólidos, ou seja, cerca de 4.500.000 toneladas de lama vermelha na base seca por ano.

Cabe ressaltar que até 2005, o rejeito produzido resultava apenas do processamento da bauxita da Mineração Rio do Norte (MRN) e que, atualmente a Alunorte recebe também a bauxita da Mineração Bauxita Paragominas (MBP).

Depósito de Resíduos Sólidos (DRS1)

A área do Depósito de Resíduos Sólidos atual em operação (DRS1) é denominada, dentro da planta de alumina, de Área 54. O DRS1 está localizado no município de Barcarena, estado do Pará.



Figura 4.2 - Vista geral do DRS1 em operação (Fonte: Google Earth, 2014)

Dentro da área da Alunorte, o DRS1 localiza-se a aproximadamente 700,0 m da planta industrial e tem como finalidade o armazenamento do resíduo sólido (*red mud*, rejeito, lama vermelha) proveniente do processamento da bauxita.

Observa-se que, desde sua construção, em 1995, a Área 54 já passou por diversas expansões. A Figura 4.3 mostra uma foto aérea do DRS1 tirada em 2010.



Figura 4.3 – Vista aérea do DRS1 em operação (Foto: data 17/07/2010)

Em linhas gerais, a área atual de disposição de rejeitos é contornada por diques periféricos (paredes) em toda a sua extensão. Estas paredes são denominadas de parede norte, sul, leste e oeste, em função de sua posição em relação à planta de alumina. Nestas paredes estão instaladas estruturas extravasoras, chamadas de rápidos, onde o nível da lama e da água são controlados por meio de *stop-logs*. Contornando todo o reservatório, existem canais (canais de contorno) que recebem o efluente líquido proveniente do rejeito (efluente) e da água de chuva, conduzindo-os até as bacias de controle (BCs).

Atualmente, o rejeito é transportado por meio de caminhões, com TS \cong 60% e disposto pela técnica conhecida como *dry stacking* (empilhamento a seco). Pode-se afirmar que, dentre os métodos de disposição “a seco”, este é o método comumente aplicado à lama vermelha (*red mud*) no qual o lançamento e a disposição do resíduo se dão de forma planejada, com a formação de uma pilha de rejeito. Ressalta-se que o rejeito é “desaguado” por meio de filtros tambor.

Após o processo de desaguamento, a lama vermelha é transportada por caminhões até o DRS1. No DRS1 os pontos de lançamento de lama são posicionados de acordo com a necessidade de avanço da plataforma, distribuição homogênea da pilha e disponibilidade de borda livre das paredes. Estas frentes passam por um rodízio de modo a garantir um período mínimo sem lançamento num mesmo ponto, com o objetivo de aumentar o teor de

sólidos e o ganho de resistência do material e, desta forma, possibilitar o avanço da plataforma.

Além da lama vermelha, são lançados no DRS1 outros materiais como: crosta de areia, filtros de manga de poliéster, alumina contaminada, cinza / carvão, lodo mineralizado, hidrato contaminado e bauxita contaminada.

4.3 – CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DOS RESÍDUOS DE ALUMINA DA ALUNORTE

4.3.1 – Resíduo Filtrado

O material a ser depositado sobre o DRS1 é um resíduo (denominado lama vermelha), obtido durante o processo de clarificação do processo Bayer para produção de alumina na refinaria da Alunorte.

Para o estudo de seu comportamento quando compactado e desenvolvimento de novas alternativas de disposição, o resíduo foi inicialmente submetido a filtragem por meio de filtro prensa e ensaiado entre os dias 13 e 14 de dezembro de 2010 em uma área teste. Os principais objetivos dessa área teste foram:

- Determinação do ângulo de repouso da pilha formada pelo rejeito proveniente do filtro prensa;
- Densidade da pilha;
- Densidade e umidade do resíduo após compactação;
- Umidade ótima para compactação do resíduo.

Três empresas realizaram testes de filtragem para avaliar a filtrabilidade da lama vermelha utilizando filtro prensa: a ANDRITZ, a DIEMME e a LAROX. Foram disponibilizadas cerca de 16,0 toneladas de material proveniente dos testes executados com o filtro prensa para execução da área teste.

O item a seguir apresenta um resumo dos principais resultados encontrados nos ensaios geotécnicos de campo e laboratoriais realizados nesse resíduo e que serão utilizados em análises de metodologias de disposição no Capítulo 6.

4.3.1.1 – Principais Resultados – Ensaio Geotécnicos de Campo e Laboratoriais

Área Teste

Os ensaios foram executados pela Alunorte em uma área localizada na porção sul da plataforma do DRS1 em operação.

A área escolhida se deu pela facilidade de acesso, extensão e dimensões. A Figura 4.4 mostra a área onde foram realizados os ensaios geotécnicos.



Figura 4.4 – Área dos ensaios geotécnicos da área teste da Alunorte

Para o desenvolvimento dos serviços foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Trator de esteira D6;
- Caminhão pipa;
- Caminhão munck;
- Escavadeira.

A seguir são apresentados os principais resultados encontrados nos ensaios realizados na área teste.

Teor de sólidos do resíduo antes de iniciar os trabalhos:

Cabe mencionar que, apesar do resíduo disponível ter perdido muito a umidade desde a realização dos testes de filtração com o filtro prensa, antes de iniciar os serviços, foram coletadas amostras em “bags” para calcular o seu teor de sólidos. Os resultados obtidos indicaram que havia materiais com umidades distintas, a saber:

- O resíduo proveniente da filtração realizada pela ANDRITZ se apresentava bastante seco. Os ensaios revelaram um teor de sólidos variando de TS=84,6% a 89,6%.
- O resíduo proveniente da filtração realizada pela LAROX se apresentava um pouco mais úmido - com um teor de sólidos variando de TS=81,2% a 83%.

Testes de empilhamento com o resíduo do filtro prensa:

O teste de empilhamento realizado com os resíduos do filtro prensa forneceu uma pilha, com formato final de um cone com as seguintes medidas:

- Diâmetro= 4,10 m;
- Altura= 1,85 m.

Para formação da pilha, cada “bag” onde estava acondicionado o resíduo foi içado, e o material lançado a uma altura variável de 1,0 a 3,0 m. Foi obtido um volume de lama filtrada correspondente a 8,13 m³.

A partir do empilhamento do resíduo realizado, foram definidos dois parâmetros: o ângulo de repouso e a densidade da pilha. A formação da pilha ao longo do lançamento do material está ilustrada na Figura 4.5.



Figura 4.5 – Simulação da formação da pilha teste de resíduo filtrado da Alunorte

É interessante observar que o material mais grosseiro fica posicionado, em geral, na porção inferior da pilha, e nas regiões onde ocorre maior concentração deste material o ângulo de repouso é mais acentuado.

Com base na pilha formada pelo resíduo da filtração, estima-se que o ângulo de repouso deste material varia de 31° a 38° . Geralmente, a grande variação na inclinação é decorrente de quatro fatores: granulometria, umidade do material, altura de lançamento e altura da pilha. A Figura 4.6 mostra a pilha na sua configuração final obtida nos testes.



Figura 4.6 – Conformação final da pilha de resíduo disposta em seu ângulo de repouso

Peso específico do material (medida na pilha):

Para a determinação da densidade aparente do material na pilha foi utilizado o método da membrana, por meio da abertura de uma cavidade na pilha e preenchimento deste com água (densidade conhecida). Da relação entre o peso da amostra escavada com o volume de água necessário para encher o furo tem-se a densidade *in situ* do material.

- Peso específico = 11,39 kN/m³.

A densidade do material na pilha foi determinada, na porção média/superior da pilha, onde predominava o material de granulometria fina (ANDRITZ / TS=85,6% a 89,6%).

Peso específico do material solto (medida no laboratório da obra):

Foi também realizado em laboratório o ensaio de determinação do peso específico com material solto, para três granulometrias distintas, definidas como: fina, média e grossa. Adotou-se como granulometria fina a porção areno silto argilosa e, a porção de granulometria média e grossa os torrões (pastilhas) resultantes do processo da filtragem. As Figuras 4.7 e 4.8 mostram as diferentes granulometrias do resíduo da filtragem.

Para a determinação do peso específico do material solto, no laboratório foi utilizado o resíduo proveniente dos testes realizados pela ANDRITZ (TS=84,6% a 89,6%), e os resultados são:

- Resíduo granulometria fina: peso específico médio = 11,44 kN/m³;
- Resíduo granulometria média: peso específico médio = 11,30 kN/m³;
- Resíduo granulometria grossa: peso específico médio = 10,68 kN/m³.



Figura 4.7 – Vista do resíduo filtrado de granulometria grosseira



Figura 4.8 – Vista do resíduo filtrado de granulometria média

Após o teste de empilhamento foi realizada uma pista experimental para avaliar as condições de compactação do resíduo com trator de esteira, de acordo com o seguinte procedimento:

Etapa 1 - Camada compactada com umidade do material da pilha (direto dos “bags”)

Utilizando o trator de esteira D6, as seguintes operações foram realizadas:

- A pilha de resíduo foi espalhada, resultando numa camada de cerca de 0,40 m de espessura;
- O próprio equipamento empregado no espalhamento D6 promoveu o processo de compactação (ver Foto 4.9);
- Após 6 passadas com o D6, foi realizado ensaio para averiguar a umidade e densidade (utilizando método “hilt”). Os valores estão apresentados na Tabela 4.2.

Etapa 2 - Camada compactada após umedecimento do material da pilha

- Utilizando o trator de esteira D6 e o caminhão pipa o material da pilha foi umedecido/homogeneizado;
- Posteriormente, o material foi espalhado em uma nova camada com cerca de 0,40 m de espessura, e compactado com o mesmo equipamento (D6);
- Após 6 passadas com o D6, foi realizado ensaio para averiguar a umidade e densidade (utilizando o método “hilt”);

- Após 2 passadas adicionais com o trator D6, foi realizado novo ensaio para averiguar a umidade e densidade (utilizando o método “hiltf”).

As Figuras 4.9 a 4.12 ilustram os trabalhos executados e a Tabela 4.1 os resultados laboratoriais dos ensaios de compactação realizados nas amostras coletadas.



Figura 4.9 – Vista do processo de espalhamento/compactação – Etapa 1



Figura 4.10 – Vista do processo de umedecimento/homogeneização – Etapa 2



Figura 4.11 – Ensaio para determinação da densidade “in situ” (*hif*)



Figura 4.12 – Ensaio para determinação da umidade e Grau de Compactação (GC)

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de compactação de laboratório com resíduo do filtro prensa

Amostras	Umidade ótima	Densidade seca máxima	TS	GC
1	31,00%	14,3 kN/m ³	76,3%	100%
2	32,00%	15,2 kN/m ³	75,7%	
3	30,50%	14,7 kN/m ³	76,6%	
4	31,00%	14,3 kN/m ³	76,3%	

A Tabela 4.2 apresenta os valores de umidade e teor de sólidos obtidos em campo para as camadas de resíduo compactadas antes e após umedecimento do material da pilha.

Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de campo da camada compactada – resíduo filtro prensa

Camada Compactada	Material “in situ”		GC	Notas
	Umidade (<i>in situ</i>)	TS (<i>in situ</i>)		
Etapa 1 - Camada compactada com material com a umidade da pilha	21,00%	82,64%	84%	6 passadas com D6
	19,50%	83,68%	83%	
Etapa 2 - Camada compactada após umedecimento do material da pilha	26,00%	79,36%	87%	8 passadas com D6
	28,00%	78,12%	91%	6 passadas com D6

O teste de espalhamento e compactação do resíduo do filtro prensa, com o trator D6 mostrou-se bastante promissor do ponto de vista de ganho de densidade, o que se traduz em uma maior capacidade de reservação de material. Porém, é importante mencionar que os trabalhos com o trator D6 foram realizados sob condições ideais, ou seja, sem chuvas, com material com umidade próxima da ótima e em uma pequena área.

Devido ao fato da quantidade de resíduo proveniente dos testes com o filtro prensa ter sido pequena, os ensaios laboratoriais de caracterização foram realizados com amostras coletadas no reservatório do DRS1, submetidas às mesmas condições de umidade e teor de sólidos encontrados nas amostras obtidas do filtro prensa. A seguir é apresentado um resumo desses resultados, fornecidos pela Alunorte.

Ensaio de Caracterização

Todos os ensaios apresentados a seguir foram realizados pelo Laboratório da Pattrol em Belo Horizonte – MG no 2º semestre de 2011, conforme padronizados por suas respectivas normas ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

Coleta de amostras: Para a campanha de ensaios de laboratório foram coletadas amostras de resíduo conforme se segue:

- Amostras 01 e 02 (AM-01 e AM-02): 2 amostras indeformadas (blocos de 30x30x30 cm), coletadas a 0,5 m da superfície, no poço de inspeção aberto no interior do DRS1, a cerca de 130 m da plataforma (região central do depósito) na direção da parede norte;
- Amostra 03 (AM-03): 1 amostra deformada (cerca de 15 kg) coletada no poço de inspeção aberto no interior do DRS1, a cerca de 130 m da plataforma na direção da parede norte;
- Amostra 04 (AM-04): 1 galão (30 litros) de amostra deformada do resíduo do filtro tambor, coletada das Linhas 1, 2 e 3 da Área 34A e B (resíduo do beneficiamento da bauxita proveniente da Mineração Rio do Norte, MRN – transporte da bauxita por navio);
- Amostra 05 (AM-05): 1 galão (30 litros) de amostra deformada do resíduo do filtro tambor, coletada das Linhas 6 e 7 da Área 34D (resíduo do beneficiamento da bauxita proveniente da Mineração Bauxita Paragominas, MBP – transporte da bauxita por mineroduto).

Peso específico dos grãos (γ_s): Foi determinado o peso específico dos grãos a partir de cada amostra coletada. O valor médio encontrado para o resíduo foi de 29,60 kN/m³.

Peso específico natural (γ): Esta determinação foi feita nas amostras indeformadas com o intuito de avaliar o peso específico do resíduo depositado na profundidade de coleta das amostras. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Peso específico natural do resíduo da Alunorte

Amostras	γ (kN/m ³)
AM-01	19,11
AM-02	18,25

Granulometria: Foi realizada a caracterização granulométrica em cada amostra (AM-01 a AM-05) e também para a mistura (33%AM-04 + 67%AM-05). A Figura 4.13 ilustra as curvas granulométricas das amostras.

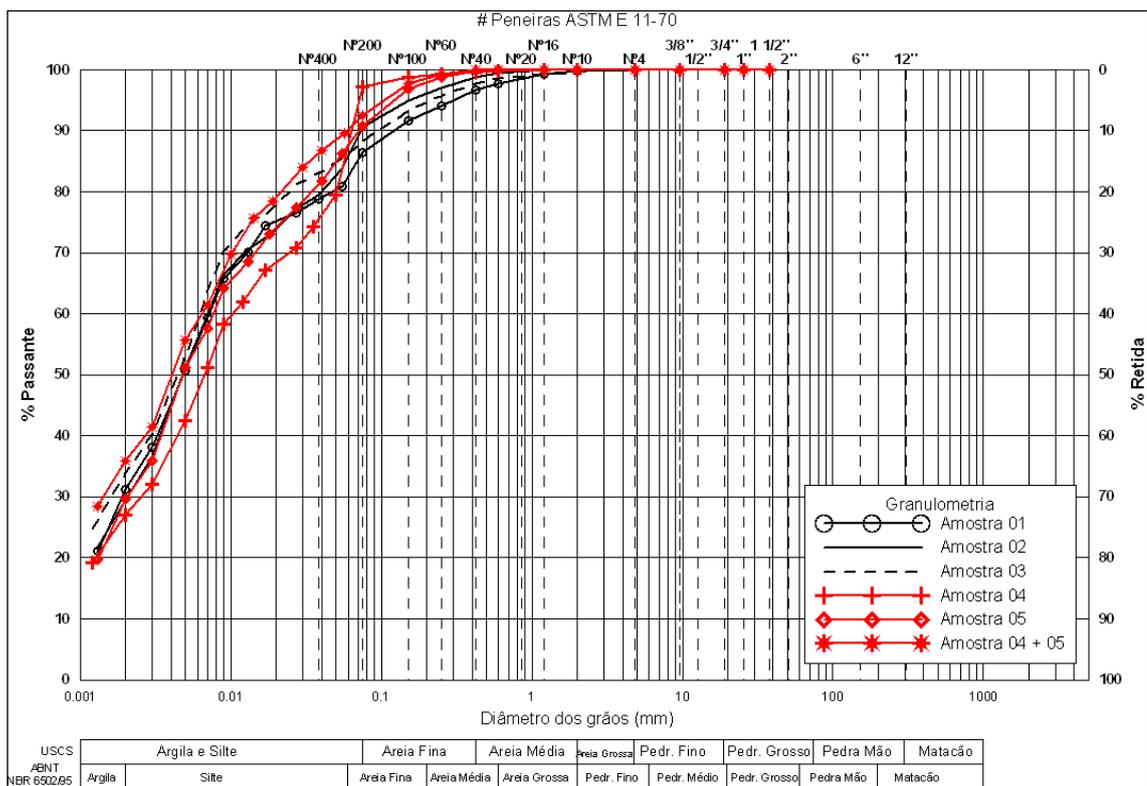


Figura 4.13 – Curvas granulométricas das amostras do resíduo da Alunorte

Analisando os resultados obtidos dos ensaios de granulometria, verifica-se que a fração fina é predominante na lama vermelha e o material é classificado como silte-argiloso. Também pode ser observado que a composição granulométrica do resíduo obtido do beneficiamento da bauxita da MRN (AM-04) difere muito pouco da composição do resíduo obtido do beneficiamento da bauxita da MBP (AM-05).

Limites de Consistência: A Figura 4.14 apresenta a carta de plasticidade de Casagrande para a classificação geotécnica do material.

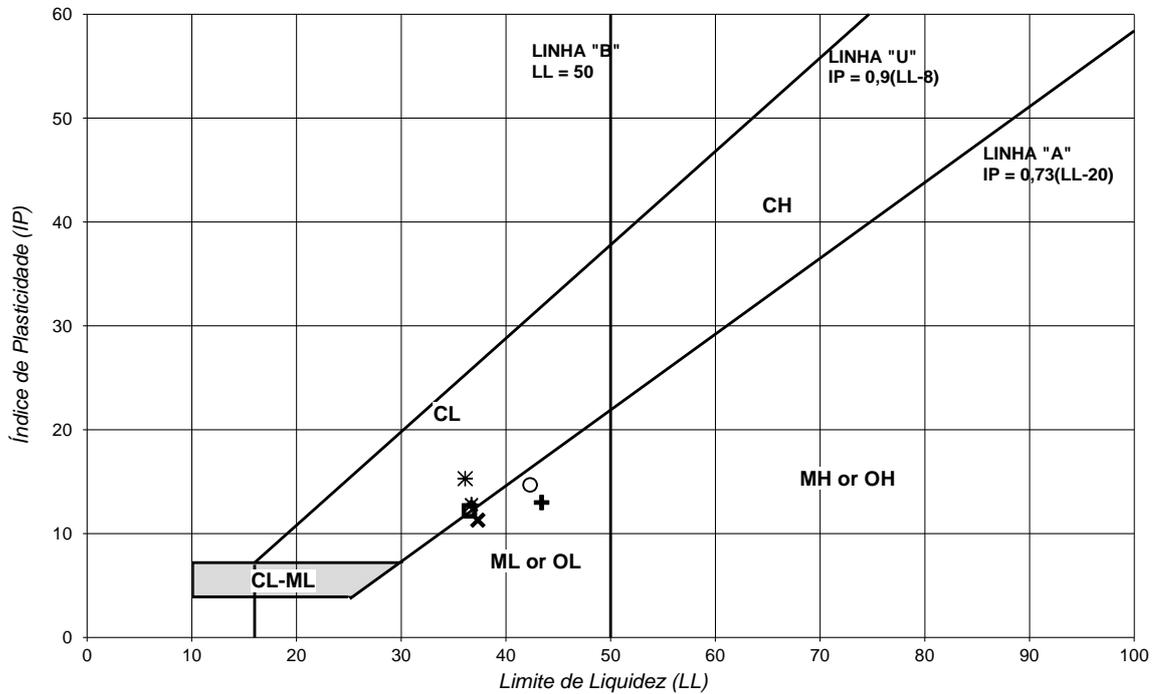


Figura 4.14 – Carta de plasticidade das amostras do resíduo da Alunorte

Pela carta de plasticidade, o material é classificado como silto-argiloso de baixa plasticidade.

O índice médio de atividade da argila, encontrado para o resíduo ensaiado, está abaixo de 0,75, indicando que a fração argila presente no material pode ser considerada inativa.

Ensaio de Compactação: O ensaio de compactação foi realizado na amostra deformada AM-03, com reuso do material, utilizando-se a energia de compactação Proctor Normal. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 4.15 que ilustra a curva de compactação.

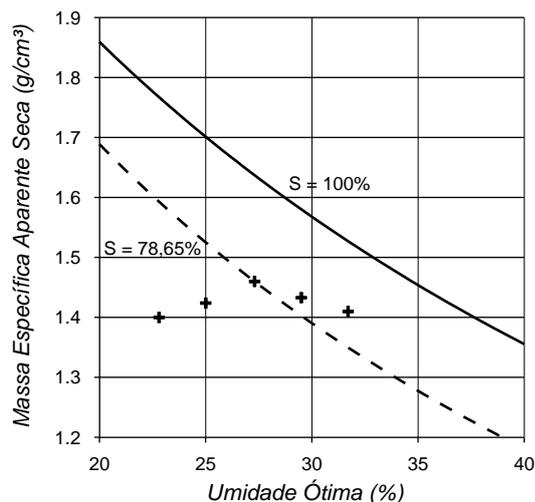


Figura 4.15 – Curva de compactação de amostra do resíduo da Alunorte

Ensaio de Permeabilidade à carga variável: Os corpos de prova foram talhados a partir das amostras indeformadas (AM-01 e AM-02) em corpos de prova moldados a partir da amostra deformada (AM-03). Os resultados são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios de permeabilidade à carga variável

Amostras	Condição de moldagem	Dados da moldagem			k (m/s)
		γ (kN/m ³)	w (%)	e	
AM-01	Talhagem - indeformada	18,76	37,07	1,16	$5,0 \times 10^{-8}$
AM-02	Talhagem - indeformada	17,57	42,16	1,39	$6,3 \times 10^{-8}$
AM-03	GC=90% e w _{ót} +2%	17,04	29,64	1,25	$3,6 \times 10^{-8}$
	GC=90% e w _{ót} +4%	17,25	31,08	1,25	$7,8 \times 10^{-8}$

Onde:

γ = Peso específico do corpo de prova;

w = Teor de umidade do corpo de prova;

e = Índice de vazios do corpo de prova;

k = Coeficiente de permeabilidade do corpo de prova.

Ensaio de Adensamento Unidimensional: A Tabela 4.5 apresenta os parâmetros obtidos nos ensaios de adensamento.

Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios de adensamento unidimensional

Condições de moldagem	Parâmetros de compressibilidade							
	H ₀ (mm)	e ₀	a _v (m ² /kN)	m _v (m ² /kN)	M (kN/m ²)	C _c	Cr	CR
Indef / w_{nat}	25,51	1,07	5,87E-05	2,80E-05	35678,32	0,156	0,007	0,075
GC = 90% / w_{ót}+2%	25,55	1,14	8,00E-05	3,70E-05	27037,04	0,213	0,008	0,099
GC = 90% / w_{ót}+4%	25,55	1,14	9,25E-05	4,31E-05	23200,91	0,246	0,009	0,115

Onde:

H₀ = Altura inicial do corpo de prova;

e₀ = Índice de vazios inicial;

a_v = Coeficiente de compressibilidade;

m_v = Coeficiente de compressibilidade volumétrica;

M = Módulo confinante;

C_c = Índice de compressão;

Cr = Índice de recompressão;

CR = C_c/(1+e_i).

Ensaio Triaxiais UU: Foram executados em corpos de prova não saturados, aplicando-se tensões confinantes de 50, 100, 200 e 400 kPa. Os parâmetros de resistência (total e efetivo) obtidos são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Parâmetros de resistência do resíduo da Alunorte

Condições de moldagem	γ (kN/m ³)	c (kPa)	φ (°)	c' (kPa)	φ' (°)
Indeformada	18,25	67,98	30,53	52,35	34,13
GC = 90% / w_{ót} + 2%	17,41	51,18	26,17	49,74	27,30
GC = 90% / w_{ót} + 4%	17,68	47,03	23,20	45,02	25,12

Onde:

γ = Peso específico natural do corpo de prova;

c = Intercepto de coesão em termos de tensões totais;

φ = Ângulo de atrito em termos de tensões totais;

c' = Intercepto de coesão em termos de tensões efetivas;

φ' = Ângulo de atrito em termos de tensões efetivas.

Ensaio Triaxiais PN: Foram realizados para simular a construção rápida da pilha, sem que se tenha tempo para a dissipação das poropressões geradas, utilizando a relação $\sigma_1/\sigma_3 = 2,0$.

Por meio do ensaio PN é obtido o parâmetro \bar{B} da relação entre as poropressões no corpo de prova e as tensões verticais efetivas.

Os resultados dos ensaios PN foram plotados em gráfico de poropressão (u) versus tensão principal maior (σ_1) (Figura 4.16). A inclinação das curvas representa o parâmetro de geração de poropressão (\bar{B}), que é a relação entre a poropressão e a tensão principal maior.

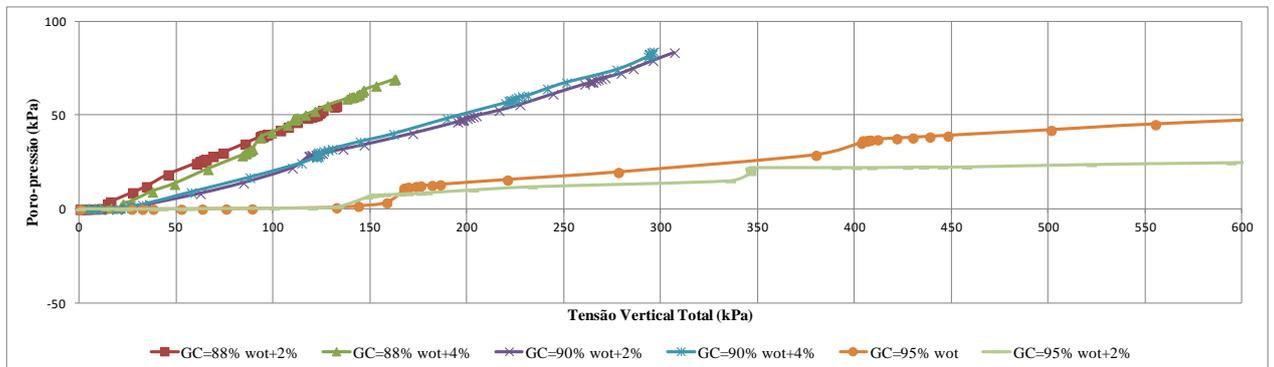


Figura 4.16 – Gráfico da poropressão *versus* tensão vertical total obtido pelo ensaio PN nos corpos de prova moldados para diferentes condições de compactação

Nos ensaios realizados nas amostras com $GC = 90\%$ / $wót + 2\%$ e $GC = 90\%$ / $wót + 4\%$, os resultados de \bar{B} foram 0,28 e 0,31, respectivamente.

Nas análises a serem realizadas nesse resíduo no Capítulo 6 será considerado que, para graus de saturação superiores a 90%, há uma geração de poropressão com o carregamento, sendo o coeficiente adotado de **0,25**.

4.3.2 – Material de Fundação

A campanha de ensaios realizada no material de fundação visou pesquisar as características e propriedades geotécnicas do resíduo de filtro tambor depositado no DRS1, com o objetivo de obter informações necessárias para avaliar a sua capacidade de suporte e subsidiar o estudo de disposição do resíduo desaguado pelo filtro prensa sobre o material presente nesse depósito, promovendo assim, um ganho de vida útil e a preparação da superfície para o seu descomissionamento.

4.3.2.1 – Programação das Investigações e Ensaios Laboratoriais

Em campo, foram executadas sondagens à percussão com ensaios de penetração (SPT – “Standard Penetration Test”), “Vane Test” (palheta) e ensaios CPTu (piezocone), além da coleta de amostras indeformadas com amostrador “Shelby” e blocos para a realização de ensaios de laboratório. Os serviços de campo foram realizados entre novembro e dezembro de 2013 pela Empresa Fugro In Situ, que corresponde ao final do período de estiagem na região.

Foram realizadas trinta e sete (37) tentativas de coleta de amostras indeformadas, onde foi possível recuperar material em trinta e três (33) delas. As amostras recuperadas foram enviadas ao laboratório. Durante as perfurações para alcançar as profundidades dos ensaios de palheta, a cada 2 metros, nas mesmas profundidades em que foram executados os ensaios de dissipação de poropressão no CPTu, procederam-se as coletas de amostras deformadas, num número de setenta e duas (72), para a determinação do teor de umidade do material. Cada amostra foi acondicionada em um frasco de plástico, hermeticamente fechado e identificado com o nome do furo e a profundidade da amostragem. Também foram coletados, nas mesmas profundidades, cerca de 500g de amostra para a

determinação da densidade relativa dos grãos (Gs). Na região da plataforma foram escavados poços de inspeção de dois (02) metros de profundidade onde foram coletados três (03) blocos indeformados de 30x30x30 cm. A locação dos pontos, com as investigações executadas, é apresentada na Figura 4.17.

De forma a organizar a apresentação da análise dos resultados dos ensaios, essas ilhas de investigações foram agrupadas em 5 regiões (Norte, Sul, Oeste, Norte/Leste e Sul/Leste). Além disto, foram traçadas algumas seções para facilitar a interpretação dos resultados das amostras Shelby em profundidade. Na Figura 4.17 também foram representados, na cor cinza, os pontos de Vane Test realizados em 2011 (VT-01, VT-02, VT-04, VT-08 e VT-09), que terão seus resultados acoplados nas avaliações atuais para complementação e aferição das análises.

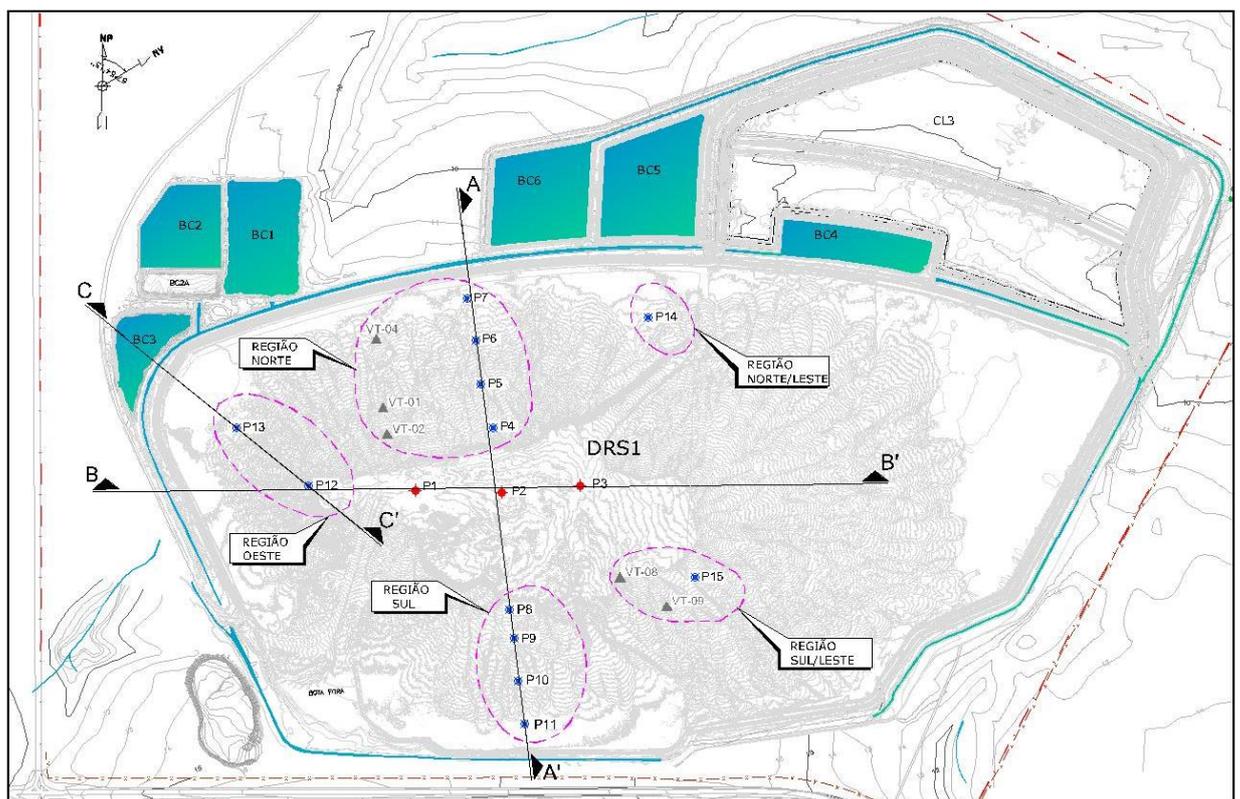


Figura 4.17 – Locação dos pontos (ilhas de investigação) dos ensaios de campo

A campanha laboratorial finalizada em maio de 2014, também pela Empresa Fugro In Situ, contou com ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação, massa específica

real dos grãos, limites de Atterberg, teor de umidade, peso específico aparente/natural, permeabilidade, adensamento, triaxial e compactação.

O item a seguir apresenta os principais resultados encontrados nos ensaios geotécnicos de campo e laboratoriais realizados no resíduo depositado no DRS1.

4.3.2.2 – Principais Resultados – Ensaio Geotécnicos de Campo e Laboratoriais

Para definição dos parâmetros do rejeito, sobre o qual será depositado o resíduo desaguado pelo filtro prensa, foram utilizados os dados provenientes das investigações e ensaios realizados no DRS1.

Peso específico “in situ” do resíduo no reservatório

Para a definição do peso específico in situ do resíduo no DRS1, foram avaliados em conjunto os valores obtidos por meio de:

- correlação com os resultados do CPTu;
- ensaios de laboratório de determinação direta nas amostras Shelby;
- corpos de prova utilizados para a execução de ensaios triaxiais e adensamento.

As Figuras 4.18 a 4.22 apresentam os gráficos com todos os resultados de pesos específico obtidos.

Foi observado que os valores de peso específico obtidos por correlação dos ensaios CPTu, mostraram-se inferiores aos resultados de laboratório obtidos para o mesmo material. Sendo assim, como se trata de uma determinação por meio de correlação com outros parâmetros e não de obtenção direta, foram utilizados os valores obtidos nos ensaios de laboratório para a determinação da média.

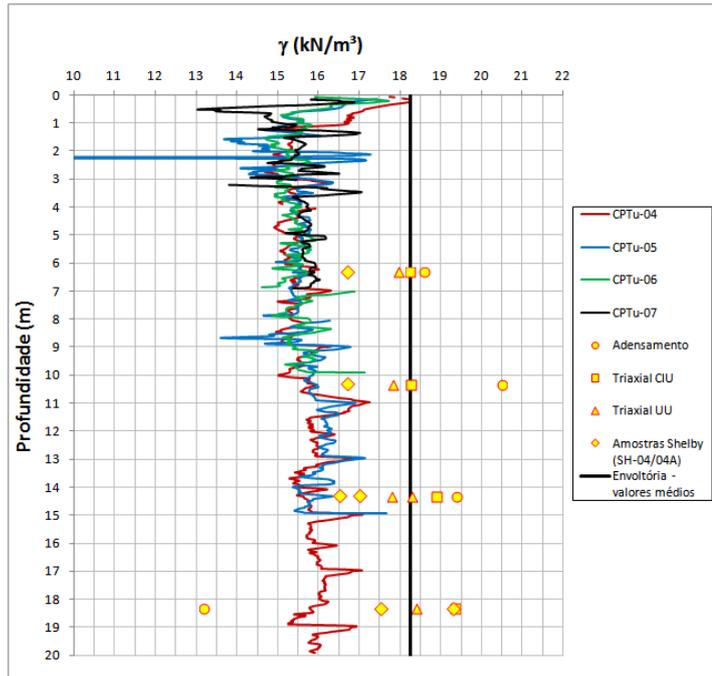


Figura 4.18 – γ x profundidade – Região Norte

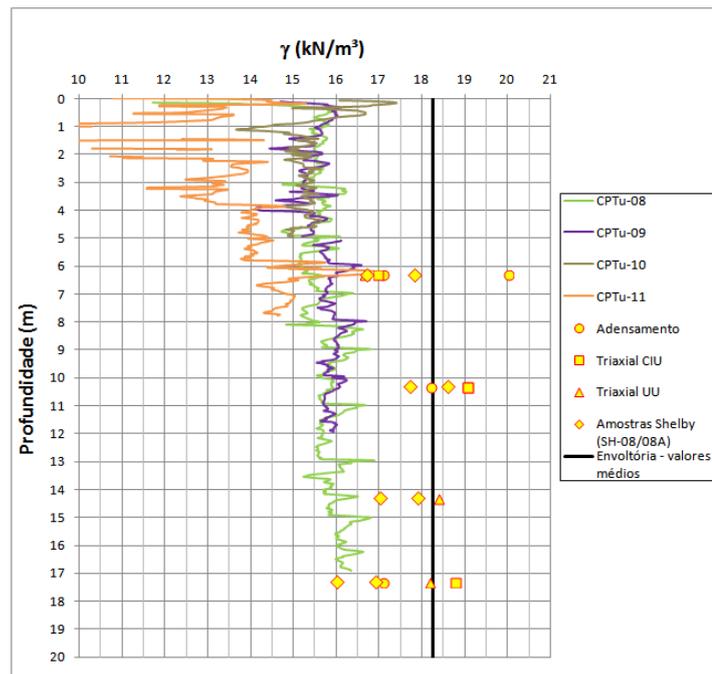


Figura 4.19 – γ x profundidade – Região Sul

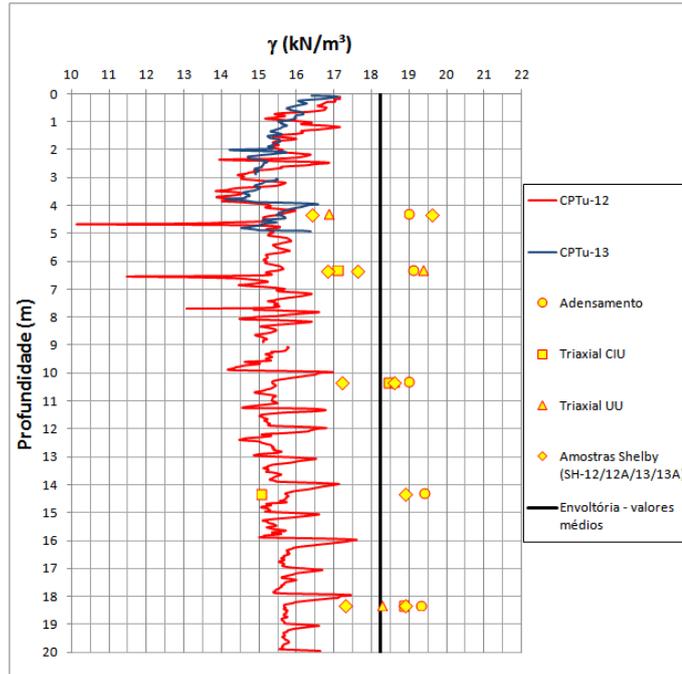


Figura 4.20 – γ x profundidade – Região Oeste

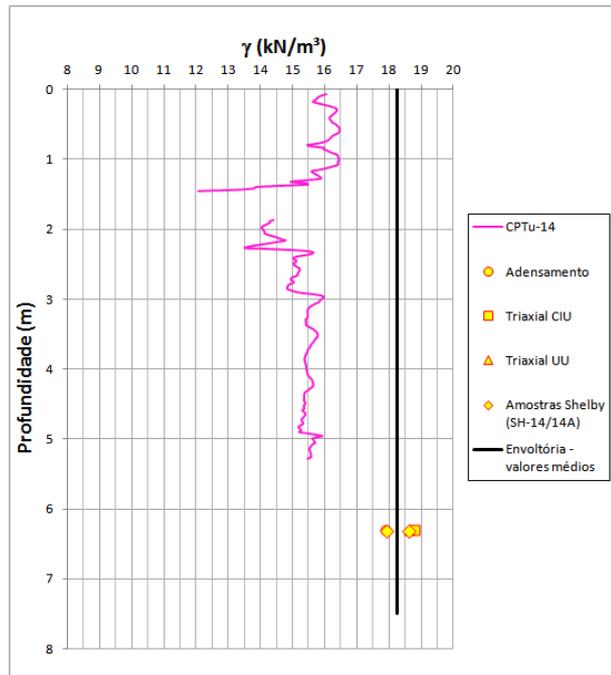


Figura 4.21 – γ x profundidade – Região Norte/Leste

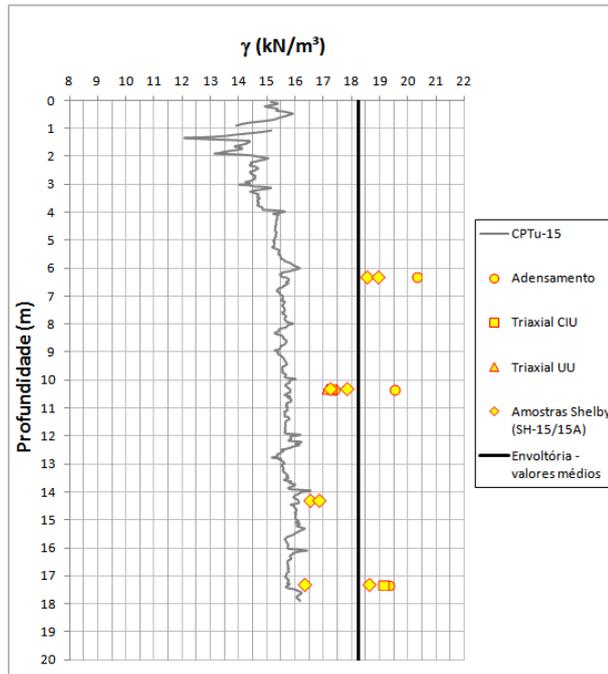


Figura 4.22 – γ x profundidade – Região Sul/Leste

Avaliando os resultados apresentados, adotou-se para o resíduo disposto no DRS1 o valor de peso específico de $18,25 \text{ kN/m}^3$ para todas as regiões, constante com a profundidade, obtido de uma média de todos os resultados dos ensaios de laboratório em amostras shelby.

Resistência não drenada (S_u)

Para a identificação dos padrões e tendências de comportamento da resistência não drenada em relação à profundidade e à variação do nível de tensões, foram utilizados os resultados provenientes dos ensaios de palheta (Vane Test) e Triaxial UU.

Quando avaliada a resistência não drenada em relação à profundidade, foram observados os seguintes aspectos:

- Para as regiões Norte e Oeste (Figuras 4.23 e 4.25) houve uma dispersão dos resultados obtidos nos ensaios triaxiais em relação àqueles provenientes do Vane Test, apresentando tendências de comportamento distintas.
- A região Sul (Figura 4.24) apresentou comportamento da linha de tendência semelhante quando comparados os resultados dos ensaios de campo com os de laboratório.

- Para as regiões Norte/Leste e Sul/Leste (Figuras 4.26 e 4.27), os ensaios triaxiais foram realizados para amostras coletadas em apenas uma profundidade, não sendo possível estabelecer um comparativo com os resultados obtidos no Vane Test.

O comportamento da resistência não drenada em função da tensão efetiva e da profundidade, para cada região avaliada, foi interpretado de forma conservadora, considerando a envoltória traçada por valores inferiores de S_u nos gráficos, conforme representado nas Figuras 4.23 a 4.27. As equações que definem estas envoltórias estão apresentadas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Correlações entre resistência não drenada e tensão vertical efetiva

Região	Equação em função da Tensão Efetiva	Equação em função da Profundidade	Figuras de referência
Norte	$S_u = 10 + 0,2195 \times \sigma'_v$ (Equação 4.1)	$S_u = 10 + 2,1818 \times \text{profund.}$ (Equação 4.2)	Figura 4.23
Sul	$S_u = 10 + 0,2632 \times \sigma'_v$ (Equação 4.3)	$S_u = 10 + 2,75 \times \text{profund.}$ (Equação 4.4)	Figura 4.24
Oeste	$S_u = 20 + 0,262 \times \sigma'_v$ (Equação 4.5)	$S_u = 20 + 3,33 \times \text{profund.}$ (Equação 4.6)	Figura 4.25
Norte / Leste	$S_u = 20 + 0,0897 \times \sigma'_v$ (Equação 4.7)	$S_u = 20 + 0,875 \times \text{profund.}$ (Equação 4.8)	Figura 4.26
Sul / Leste	$S_u = 5 + 0,225 \times \sigma'_v$ (Equação 4.9)	$S_u = 5 + 1,8 \times \text{profund.}$ (Equação 4.10)	Figura 4.27

Onde:

S_u = resistência não drenada;

σ'_v = tensão vertical efetiva.

Ambos medidos em kPa.

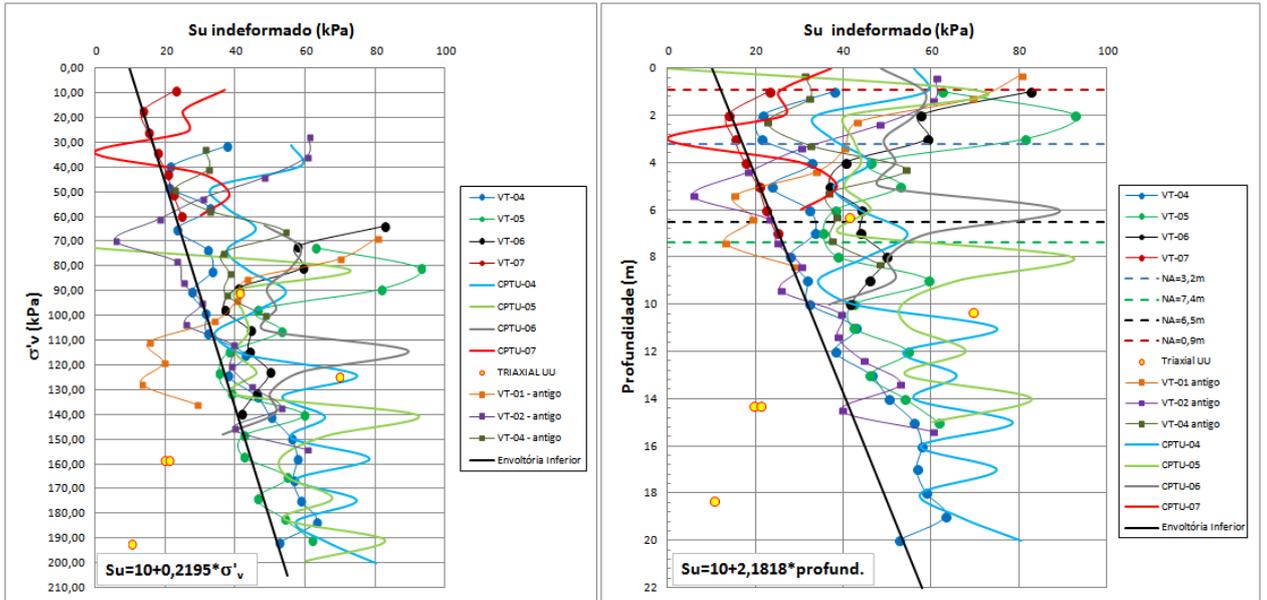


Figura 4.23 – Su x σ'_v e Su x profundidade – Região Norte

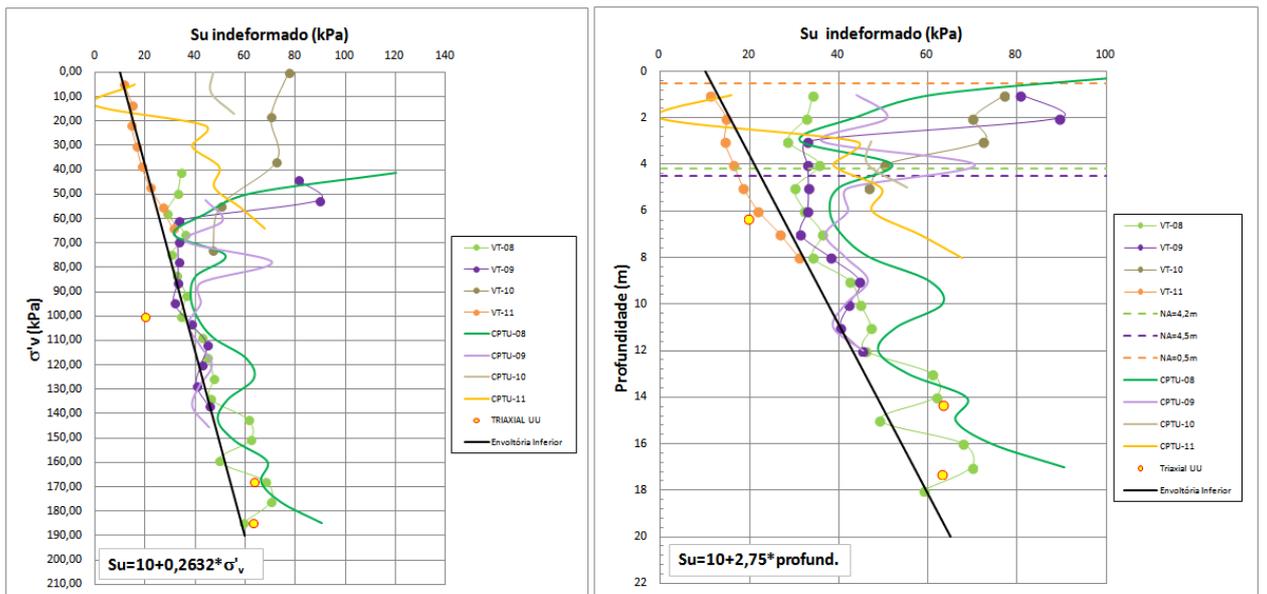


Figura 4.24 – Su x σ'_v e Su x profundidade – Região Sul

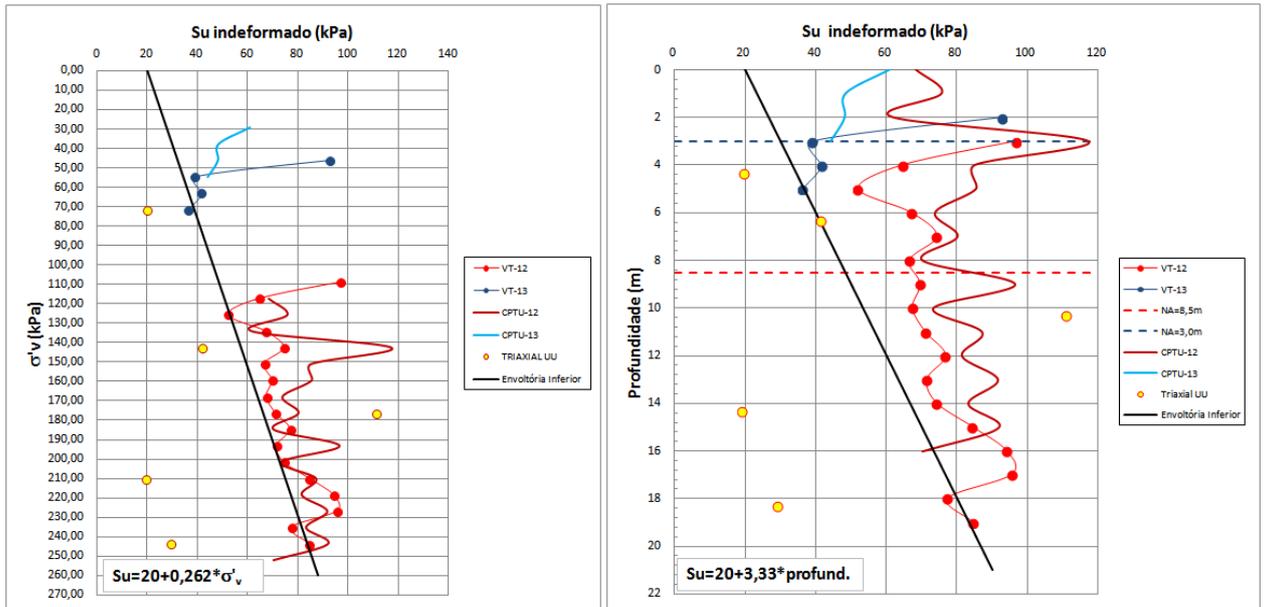


Figura 4.25 – $S_u \times \sigma'_v$ e $S_u \times$ profundidade – Região Oeste

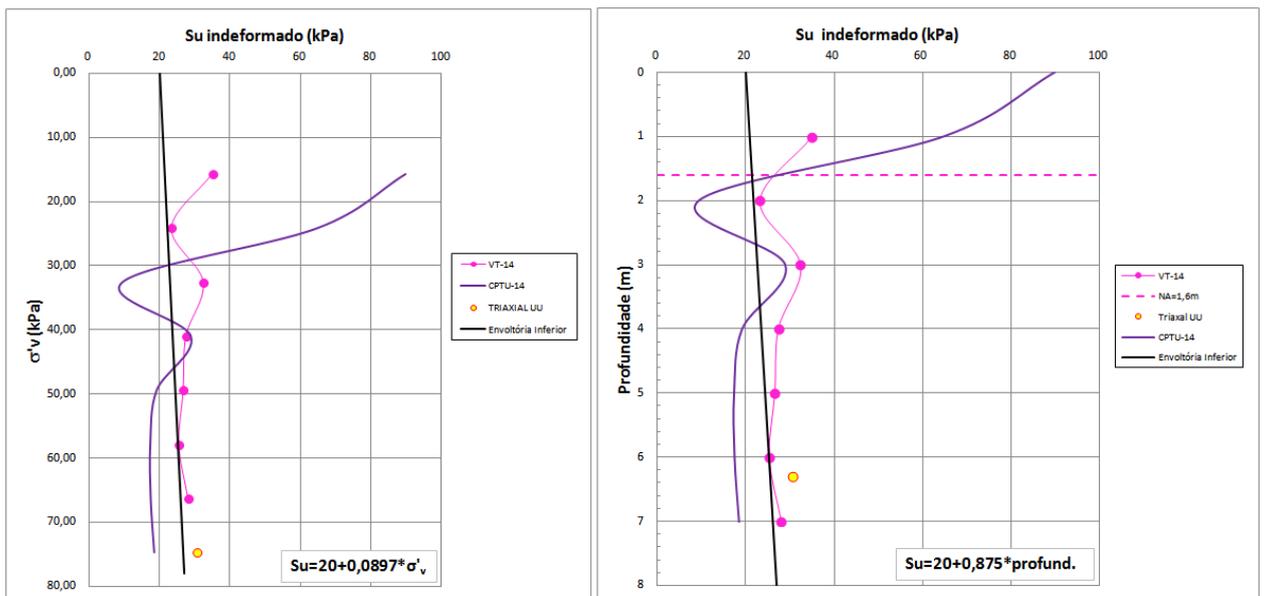


Figura 4.26 – $S_u \times \sigma'_v$ e $S_u \times$ profundidade – Região Norte/Leste

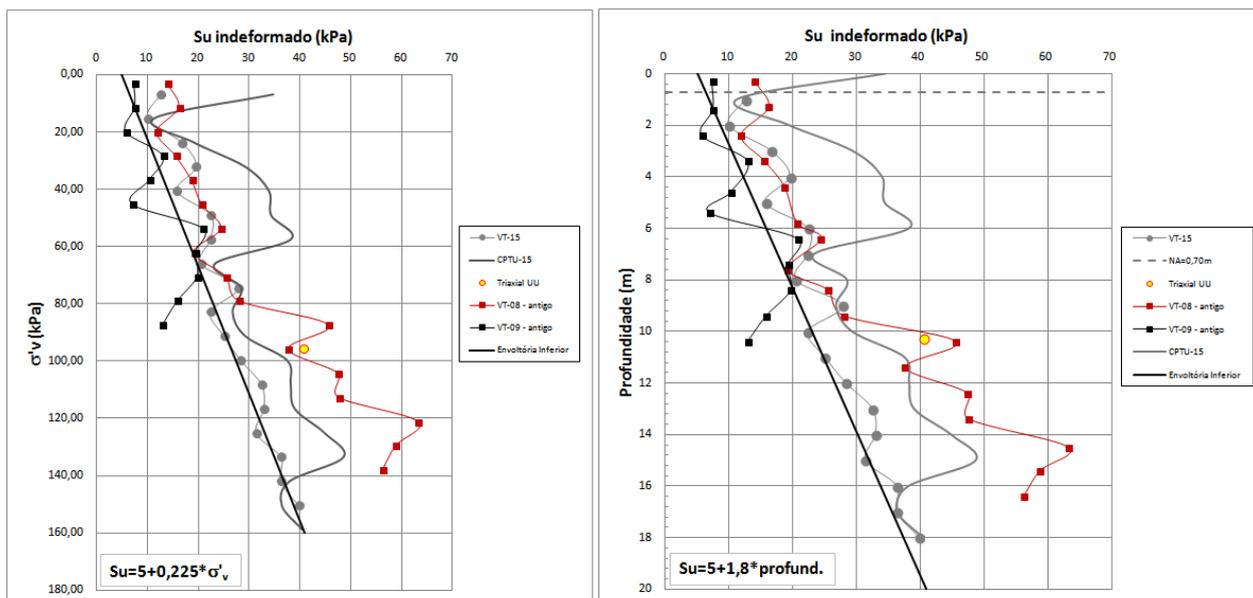


Figura 4.27 – Su x σ'_v e Su x profundidade – Região Sul/Leste

Em função das análises probabilísticas a serem realizadas no Capítulo 6, optou-se por apresentar a envoltória da resistência não drenada em função da profundidade das amostras indeformadas considerando valores médios.

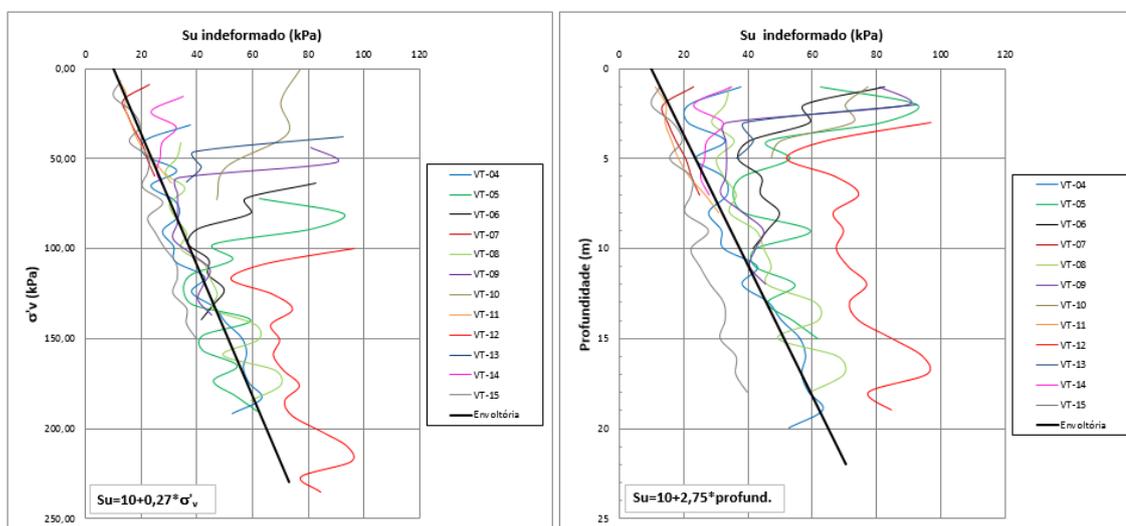


Figura 4.28 – Su x σ'_v e Su x profundidade – Junção de todos os ensaios Vane Test

Parâmetros de resistência da região da plataforma

A investigação da área do DRS1 contou também com 3 sondagens percussivas (furos SP), executadas na região da plataforma (região central do depósito) pela empresa WE Engenharia sob a coordenação da Fugro.

O gráfico da Figura 4.29 mostra a relação entre os valores de SPT e a profundidade. Nota-se que a camada mais superficial (de 1,0 a 5,0m) apresenta uma resistência maior que a camada de 5,0 a 20,0m.

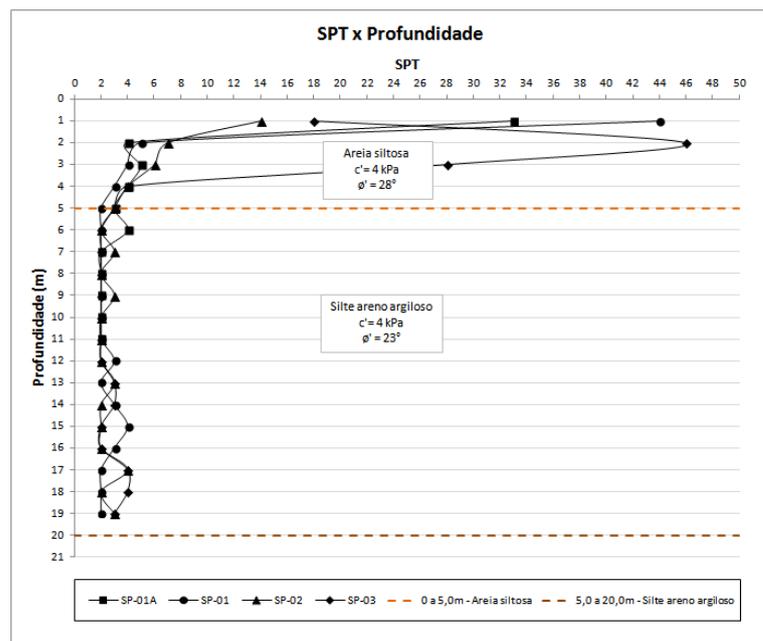


Figura 4.29 – Variação dos valores de SPT em função da profundidade

Através de correlações entre os valores de SPT e o tipo de solo, fornecidas pela literatura, é possível obter os parâmetros de resistência dos materiais. Os valores encontrados para a plataforma são apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Parâmetros de resistência obtidos dos ensaios SPT

Região	Granulometria do material	Profundidade (m)	Parâmetros efetivos	
			Coesão (kPa)	Atrito (°)
Plataforma	Areia siltosa	0 a 5,0m	4,0	28
	Silte areno argiloso	5,0 a 20,0m	4,0	23

Compressibilidade

Os valores do Módulo Confinante foram calculados pela correlação entre parâmetros obtidos nos ensaios de adensamento, e estimados pelo software CPeT-IT por meio da interpretação dos dados obtidos nos ensaios de CPTu. Conforme apresentado nas Figuras 4.30 a 4.34, os valores do módulo confinante obtidos pelo ensaio de adensamento são sensivelmente inferiores àqueles provenientes do ensaio CPTu. Desta forma, pela maior confiabilidade oferecida pelos parâmetros calculados em relação aos estimados, optou-se por adotar como referência de comportamento do módulo confinante em relação à tensão vertical efetiva, a envoltória de valores inferior cuja relação é descrita pelas equações representadas na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Correlações entre módulo confinante e tensão vertical efetiva

Região	Equação	Figuras de referência
Norte	$M = 27,5 \times \sigma'_v$ (Equação 4.11)	Figura 4.30
Sul	$M = 18,25 \times \sigma'_v$ (Equação 4.12)	Figura 4.31
Oeste	$M = 33,75 \times \sigma'_v$ (Equação 4.13)	Figura 4.32
Norte / Leste	$M = 12,0 \times \sigma'_v$ (Equação 4.14)	Figura 4.33
Sul / Leste	$M = 41,5 \times \sigma'_v$ (Equação 4.15)	Figura 4.34

Onde:

M = Módulo confinante;

σ'_v = tensão vertical efetiva.

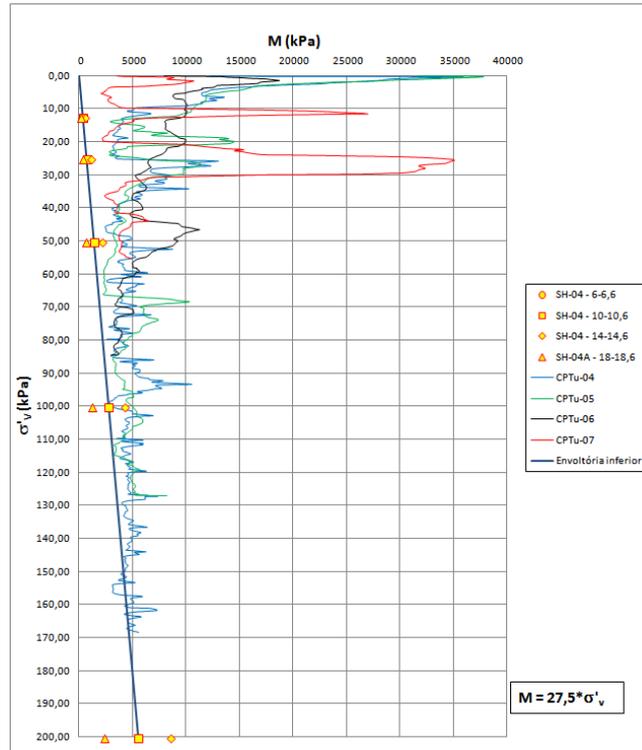


Figura 4.30 – $M \times \sigma'_v$ – Região Norte

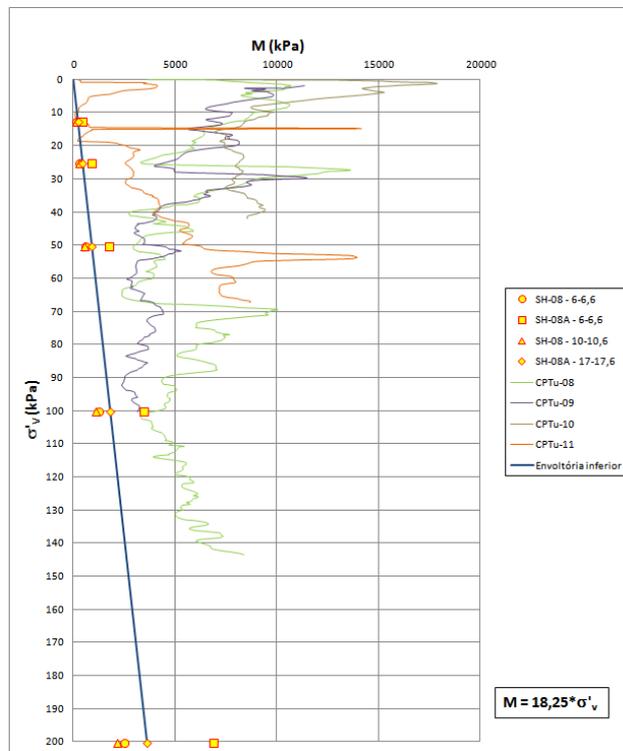


Figura 4.31 – $M \times \sigma'_v$ – Região Sul

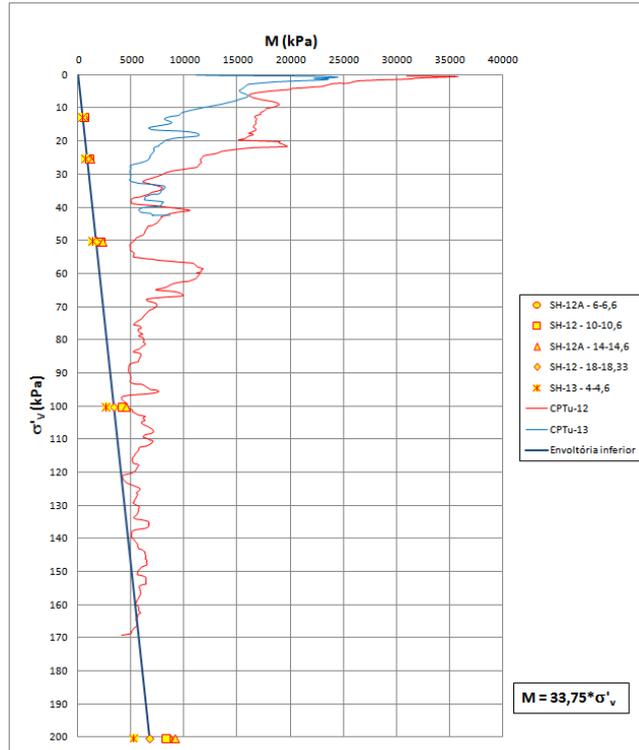


Figura 4.32 – $M \times \sigma'_v$ – Região Oeste

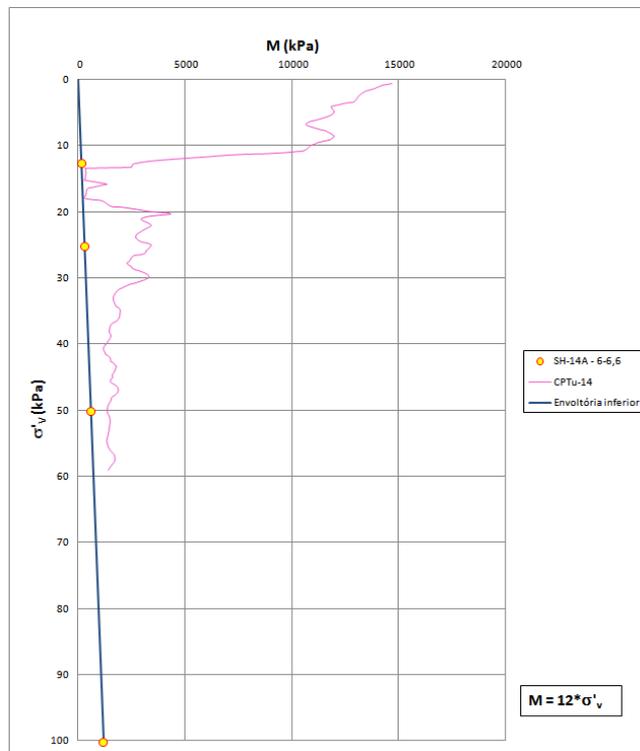


Figura 4.33 – $M \times \sigma'_v$ – Região Norte/Leste

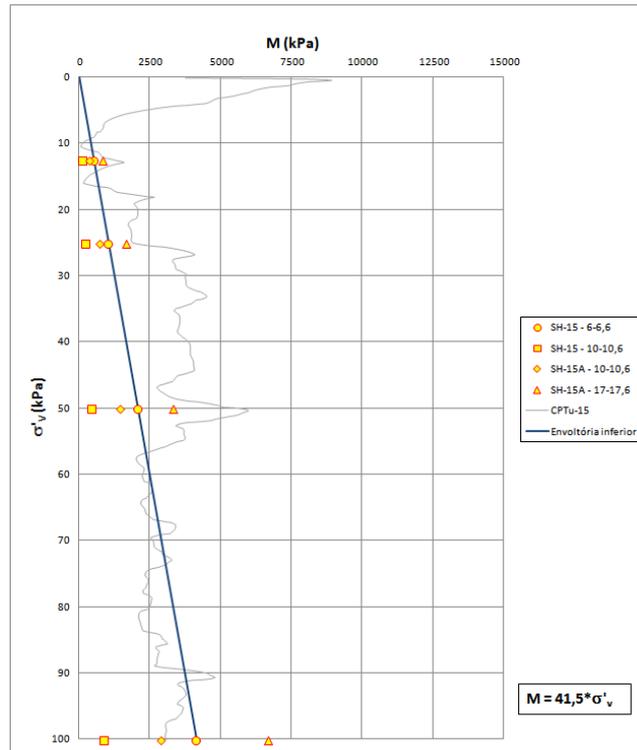


Figura 4.34 – $M \times \sigma'_v$ – Região Sul/Leste

Coeficiente de adensamento

Os coeficientes de adensamento obtidos no ensaio de adensamento unidimensional e os coeficientes de adensamento horizontal, provenientes do ensaio de CPTu, têm sua variação em relação à tensão vertical efetiva representadas graficamente nas Figuras 4.35 a 4.39.

Nas regiões Sul, Norte/Leste e Sul/Leste a distribuição dos valores obtidos para o coeficiente de adensamento apresentou uma tendência de comportamento bem definida, o que não ocorreu nas regiões Norte e Oeste, que apresentaram elevada dispersão.

Os coeficientes de adensamento horizontal apresentaram uma tendência de comportamento relativamente bem definida em todas as regiões avaliadas, em torno de $10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$. A Tabela 4.10 apresenta os valores médios dos coeficientes de adensamento por região.

Tabela 4.10 – Valores médios obtidos para os coeficientes de adensamento

Região	Valores médios		Figuras de referência
	c_v (cm ² /s)	c_h (cm ² /s)	
Norte	-	$3,32 \times 10^{-1}$	Figura 4.35
Sul	$1,20 \times 10^{-2}$	$3,84 \times 10^{-1}$	Figura 4.36
Oeste	-	$3,92 \times 10^{-1}$	Figura 4.37
Norte / Leste	$2,80 \times 10^{-3}$	$5,89 \times 10^{-1}$	Figura 4.38
Sul / Leste	$1,10 \times 10^{-2}$	$3,50 \times 10^{-1}$	Figura 4.39

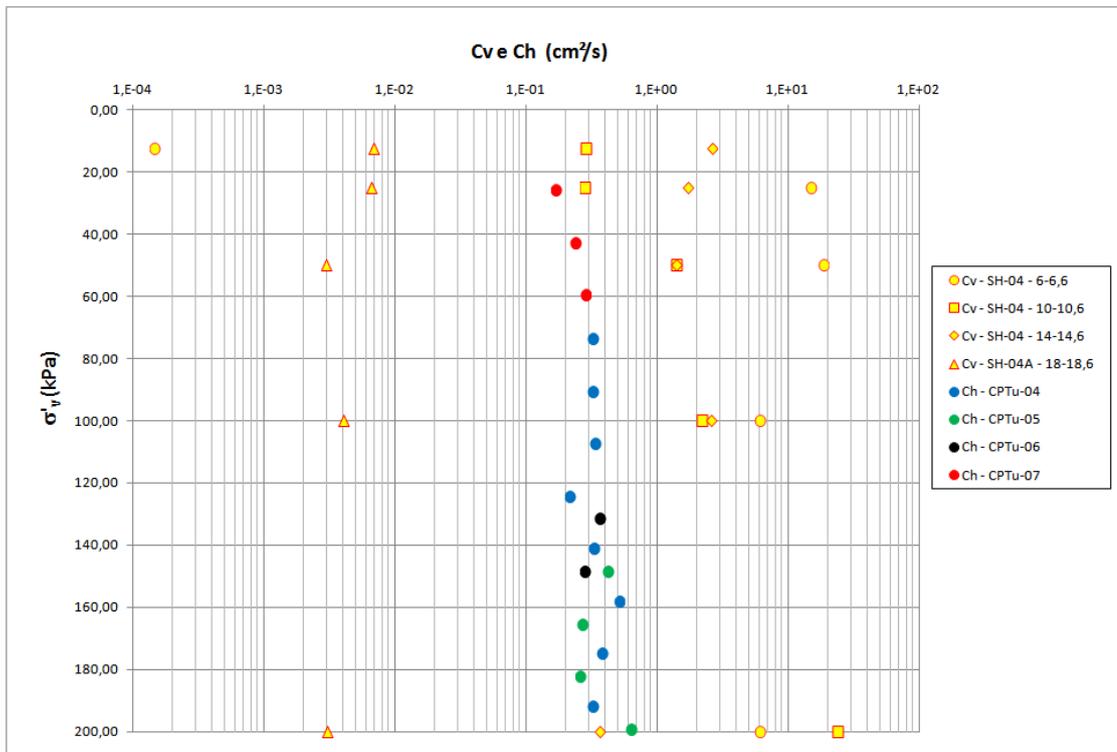


Figura 4.35 – c_v e c_h x σ'_v – Região Norte

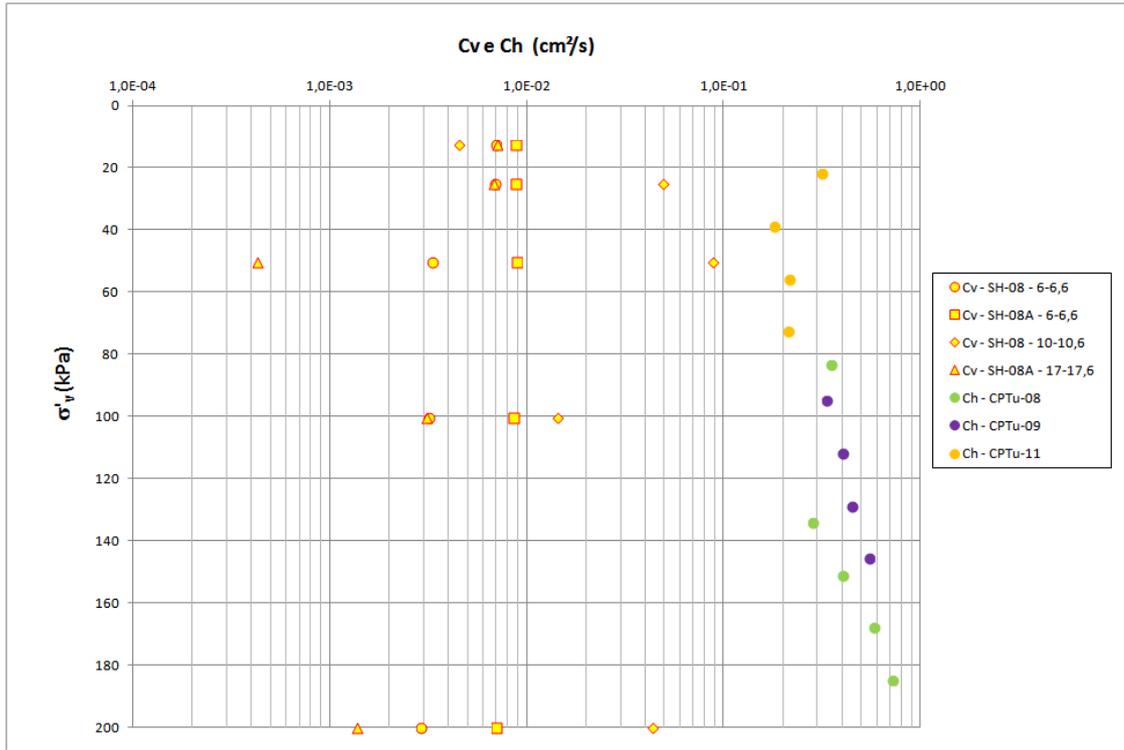


Figura 4.36 – c_v e c_h x σ'_v – Região Sul

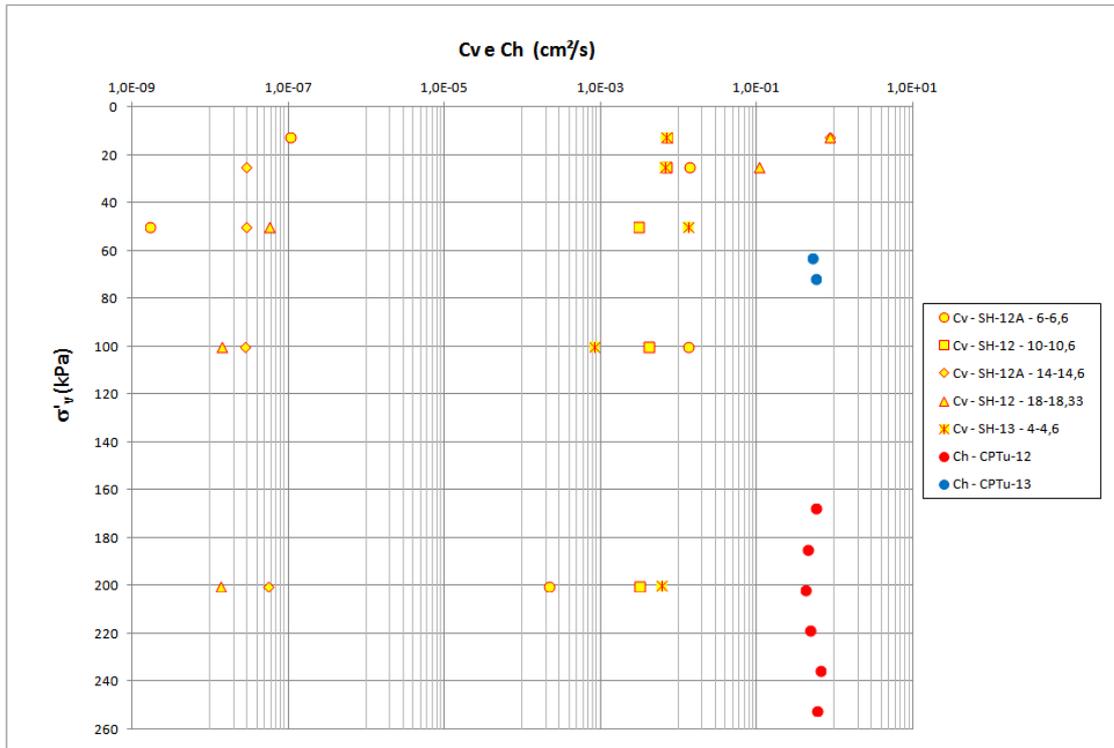


Figura 4.37 – c_v e c_h x σ'_v – Região Oeste

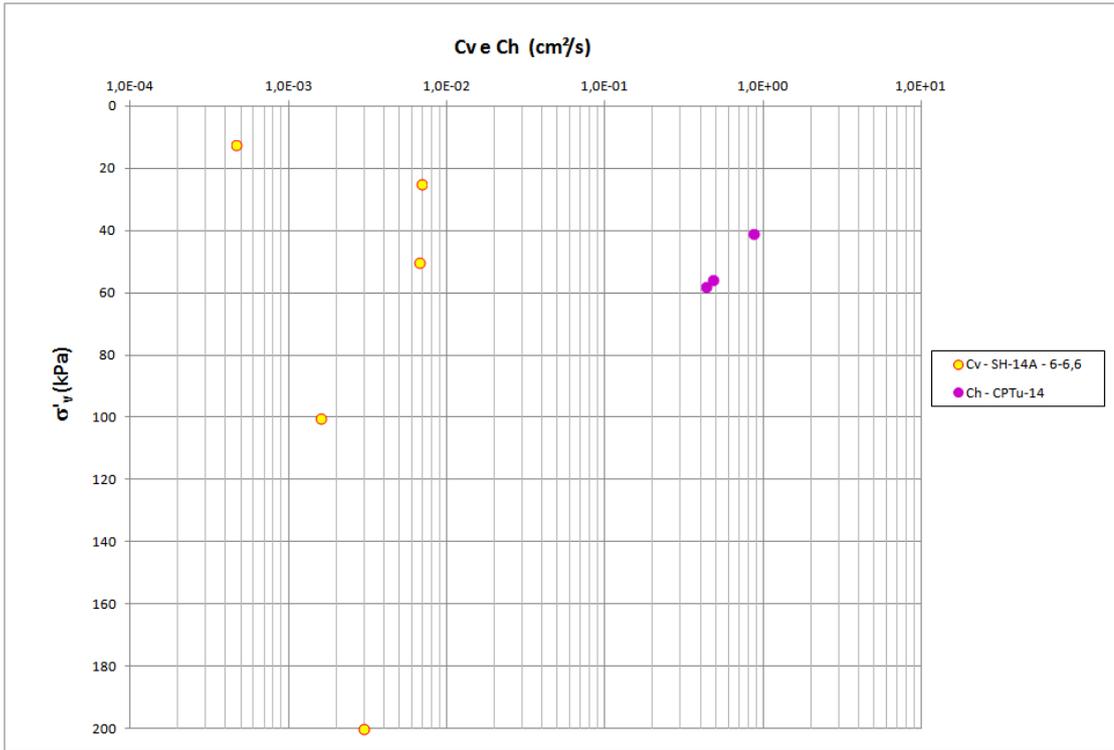


Figura 4.38 – c_v e $c_h \times \sigma'_v$ – Região Norte/Leste

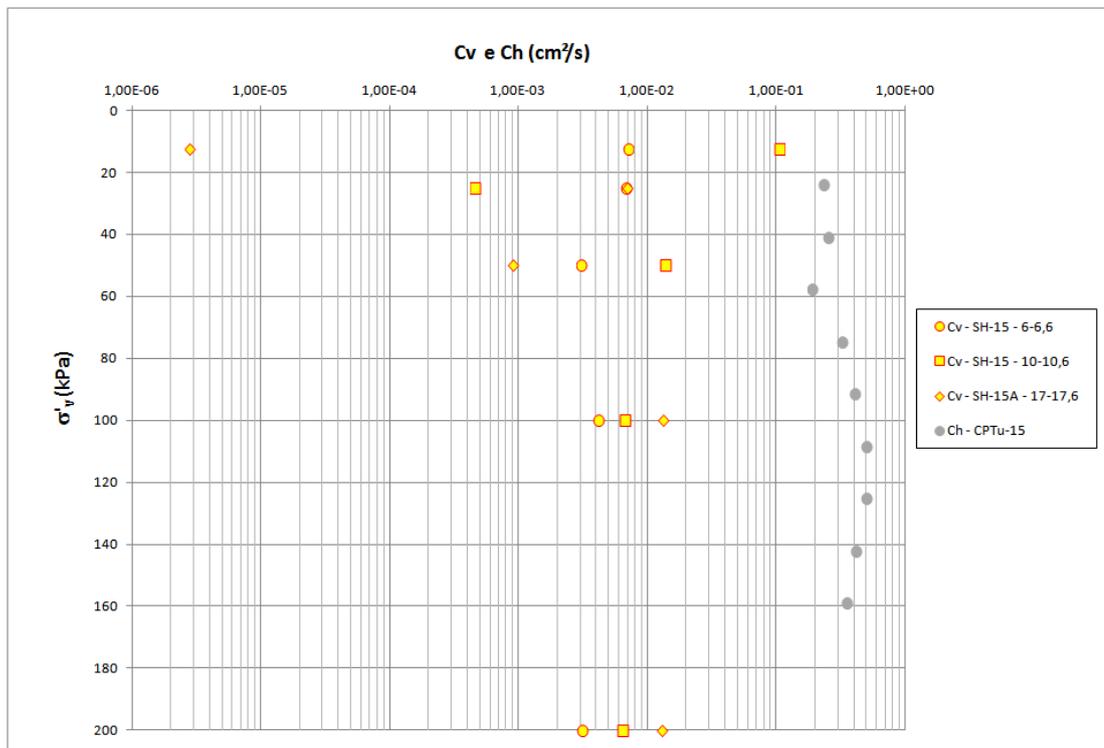


Figura 4.39 – c_v e $c_h \times \sigma'_v$ – Região Sul/Leste

Considerações

O objetivo deste capítulo foi compilar dados sobre a caracterização e avaliação do comportamento geotécnico do resíduo da produção de Alumina da Hydro Alunorte depositado no DRS1, com foco na conceituação futura de uma solução que venha permitir a disposição de resíduo filtrado por filtro prensa sobre esse material.

Os resultados de ensaios apresentados possibilitaram obter valores e/ou tendência de comportamento dos parâmetros geotécnicos do resíduo do beneficiamento da bauxita (lama vermelha) depositado no DRS1 da Alunorte, capazes de subsidiar o estudo em questão.

CAPÍTULO 5

CRITÉRIOS E METODOLOGIAS DE PROJETO PARA PILHAS DE RESÍDUOS DE ALUMINA DA CBA

5.1 – INTRODUÇÃO

O sistema de disposição de resíduos da Barragem Palmital da CBA conta com duas estruturas: a barragem principal e a barragem auxiliar. Na disposição atual, o resíduo é lançado com aproximadamente 35% de sólidos através de espigote posicionado no talude de montante da barragem principal.

A barragem principal possui maciço argiloso compactado e encontra-se atualmente com crista na El. 875,0 m, com 6,0 m de largura. O talude de montante é composto por enrocamento com talude de 1V:1,5H de inclinação. O talude de jusante também tem a face coberta por enrocamento, com talude de 1V:1,7H de inclinação.

O núcleo da barragem principal é composto por solo silto argiloso compactado limitado a montante e jusante por filtros de transição até o enrocamento. O sistema extravasor é composto por uma estrutura de concreto posicionada na ombreira esquerda, com soleira na EL. 871,5 m.

A barragem auxiliar também tem maciço argiloso compactado e enrocamento, crista na El. 875,0 m e 6,0 m de largura. O talude de montante tem 1V:1,2H de inclinação até a El. 858,0 m e a partir desta cota a inclinação é de 1H:1,6V. O talude de jusante tem 1V:1,7H de inclinação. A barragem auxiliar também conta com filtros no interior do maciço.

O último alteamento das barragens principal e auxiliar foi realizado em 2010, quando a crista foi alteada para a El. 875,00 m. Para ambas as estruturas, o alteamento foi feito para jusante do barramento.



Figura 5.1 – Vista do talude de montante da barragem principal (Foto CBA, 2013)

A concepção do arranjo proposto neste capítulo corresponde à disposição do resíduo (lama vermelha) com teor de sólidos (TS) de $\cong 78\%$ (período seco) e (TS) de $\cong 70\%$ (período úmido), filtrado a partir de filtros prensa, sobre o resíduo atualmente depositado com menor teor de sólidos, sendo o mesmo transportado até a barragem por meio de correia transportadora e/ou caminhões.

5.2 – CARACTERIZAÇÃO PLUVIOMÉTRICA DA REGIÃO

A estação pluviométrica Mairinque (02347038), localizada próxima às instalações da CBA, foi escolhida como a mais representativa para a caracterização pluviométrica da região. Além de sua proximidade da região de estudo, a escolha desta estação deve-se também à grande extensão de sua série histórica. Com base nessa estação pluviométrica, foi elaborado o histograma mostrado na Figura 5.2.

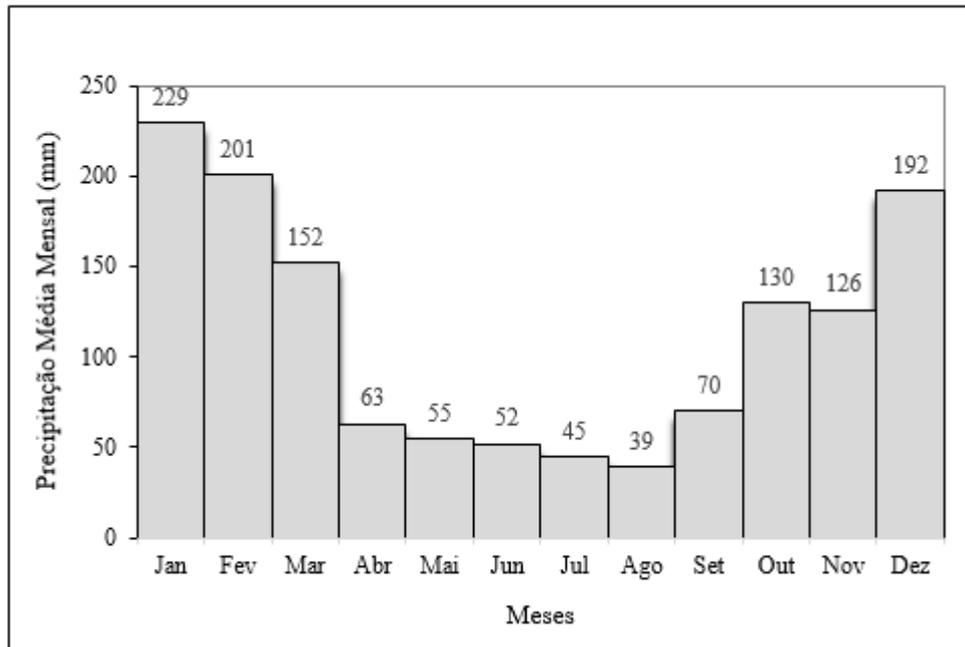


Figura 5.2 – Precipitação média mensal do município de Alumínio – SP

Observando a Figura 5.2, podemos destacar os seguintes pontos:

- O ano hidrológico na região varia de janeiro a dezembro, estando o **período chuvoso** concentrado entre os **meses de outubro a março**;
- Os meses de **dezembro a fevereiro** apresentam os **índices pluviométricos** médios mais **elevados**;
- A **precipitação média anual** gira em torno de **113 mm**.
- A **precipitação total** é igual a **1.354 mm**.

Em função da previsão de variação das condições de disposição do resíduo filtrado na Barragem Palmital, entre dias secos e dias chuvosos, a disposição foi dividida em 2 zonas com diferentes condições de grau de compactação e umidade, e, conseqüentemente, com diferentes parâmetros geotécnicos:

- Zona seca
- Zona úmida

Levando em consideração os dados estatísticos de pluviometria na região da CBA, sugere-se o zoneamento da disposição, levando em consideração as seguintes faixas de precipitação diária (P).

- **P < 10 mm:** Foi considerado que precipitações diárias (P) < 10 mm não afetam significativamente o teor de umidade final do resíduo, isto é, 100% do resíduo apresenta condições de ser depositado na zona denominada “**área seca**” da Barragem Palmital.
- **P ≥ 10 mm:** Foi considerado que precipitações diárias (P) ≥ 10 mm afetam o teor de umidade final do resíduo, devendo todo o resíduo gerado em dias com estas condições de precipitação ser depositado no centro da Barragem Palmital, na zona denominada “**área úmida**”.

Para a disposição de resíduo do filtro prensa em escala real, estas premissas devem ser confirmadas executando aterro experimental.

A partir da série histórica da estação Mairinque, são obtidos os percentuais de pluviometria maiores e menores que 10 mm para todos os meses do ano, como mostra a Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Precipitação média mensal - Estação Mairinque

Janeiro	< 10 mm	73%	Julho	< 10 mm	95%
	≥ 10 mm	27%		≥ 10 mm	5%
Fevereiro	< 10 mm	74%	Agosto	< 10 mm	97%
	≥ 10 mm	25%		≥ 10 mm	3%
Março	< 10 mm	82%	Setembro	< 10 mm	88%
	≥ 10 mm	18%		≥ 10 mm	12%
Abril	< 10 mm	90%	Outubro	< 10 mm	87%
	≥ 10 mm	10%		≥ 10 mm	13%
Maio	< 10 mm	90%	Novembro	< 10 mm	84%
	≥ 10 mm	10%		≥ 10 mm	16%
Junho	< 10 mm	91%	Dezembro	< 10 mm	76%
	≥ 10 mm	9%		≥ 10 mm	24%

Isto significa que **85%** [$\Sigma(\%P < 10 \text{ mm}) / 12 \text{ meses}$] do resíduo será depositado na zona seca ($P < 10 \text{ mm}$) e **15%** [$\Sigma(\%P \geq 10 \text{ mm}) / 12 \text{ meses}$] será depositado na zona úmida ($P \geq 10 \text{ mm}$).

5.3 – BALANÇO DE MASSAS

Conforme informado no item 3.2 do Capítulo 3, a geração anual de resíduo (lama vermelha) na base seca, considerada nos estudos é de **876.000 t/ano**. Desaguado por filtros prensa, a um teor de sólidos de $TS=78\%$, a geração nominal será de **1.366.560 t/ano de lama vermelha na base seca**.

Considerando que 85% desse resíduo filtrado será disposto em período seco e 15% será disposto em período chuvoso, temos os seguintes volumes:

- Produção anual de resíduo filtrado “seco”: 1.161.576 toneladas/ano;
- Produção anual de resíduo filtrado “úmido”: 204.984 toneladas/ano.

5.4 – ANÁLISES DE ESTABILIDADE

As análises de estabilidade foram realizadas utilizando o software Slide versão 5.0, da Rocscience para avaliação do ângulo global da pilha de resíduo filtrado depositado sobre o resíduo atualmente presente na Barragem Palmital.

A Figura 5.3 apresenta as seções estudadas.

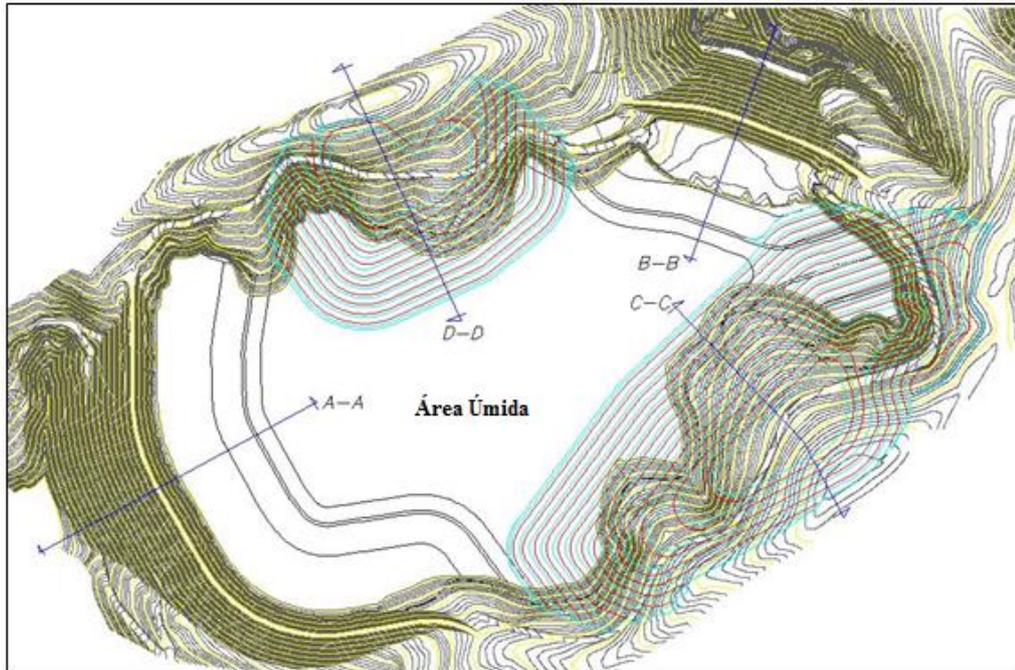


Figura 5.3 – Indicação das seções das análises de estabilidade realizadas

Para as análises de estabilidade, a seção A-A foi considerada igual a seção B-B (maciços/praias) e a seção C-C considerada igual a seção D-D (margens), por apresentarem características geométricas e geológico-geotécnicas semelhantes.

Os valores médios dos parâmetros de resistência utilizados para os diversos materiais das seções geológico-geotécnicas analisadas são mostrados na Tabela 5.2.

5.4.1 – Análises Determinísticas

Os fatores de segurança foram determinados pelo método de equilíbrio limite de Bishop Simplificado (1955). Foram utilizados os parâmetros médios de resistência em termos de tensões efetivas, pelo critério de ruptura de Mohr Coulomb. Os parâmetros foram obtidos por meio das interpretações de ensaios apresentadas no Capítulo 3.

Como não foi possível obter os coeficientes de geração de poropressão pelos ensaios PN, foi considerado que, para graus de saturação superiores a 90%, há uma geração de poropressão com o carregamento, sendo o coeficiente adotado de 0,25.

As Figuras 5.4 e 5.5 apresentam os resultados de fatores de segurança determinísticos encontrados para as seções.

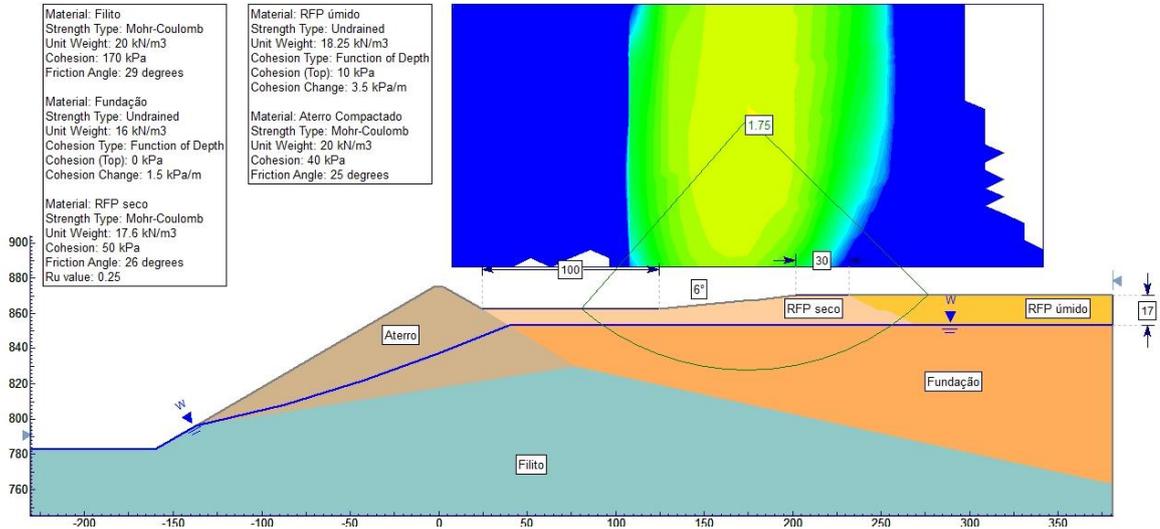


Figura 5.4 – Seções A-A e B-B - Análise de Estabilidade Determinística – Cobertura com resíduo do filtro prensa – FS = 1,75

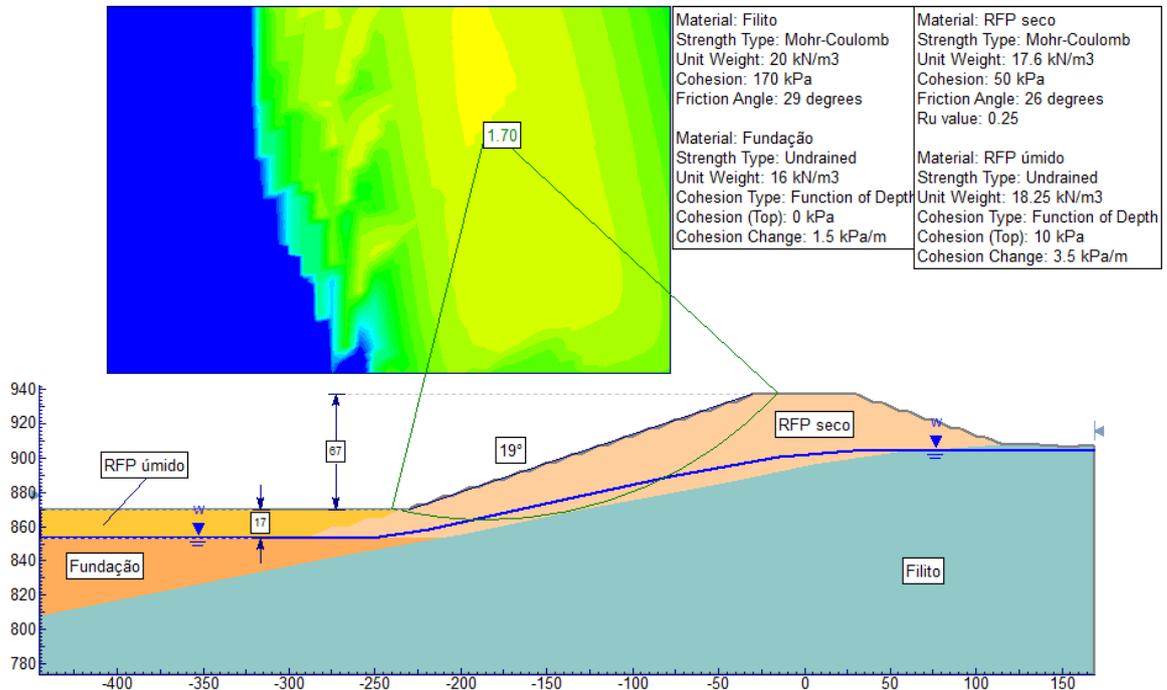


Figura 5.5 – Seções C-C e D-D - Análise de Estabilidade Determinística – Cobertura com resíduo do filtro prensa – FS = 1,70

As análises de estabilidade na região dos maciços da barragem (seções A-A e B-B) indicam que a camada que governa a estabilidade da pilha é a camada formada pelo resíduo depositado atualmente (denominado no arranjo de fundação), que é menos resistente, resultando um ângulo geral final da pilha de cerca de 6°. Nas margens observa-se um ângulo global da pilha estável em torno de 19°. Com a aplicação do coeficiente de geração de poropressão de 0,25 no resíduo do filtro prensa “seco”, o fator de segurança é reduzido ainda mais.

5.4.2 – Análises Probabilísticas

Este item apresenta os resultados das análises probabilísticas realizadas para as seções A-A e B-B e seções C-C e D-D. De maneira geral, foram executadas as seguintes etapas de análise:

- Análises probabilísticas pela metodologia FOSM: utilizada na determinação das variáveis aleatórias que mais influenciam na variação do fator de segurança, possibilitando a seleção das variáveis aleatórias chaves a serem utilizadas na aplicação dos demais métodos probabilísticos. Além disso, essa metodologia fornece o valor médio, a variância do fator de segurança e a probabilidade de ruptura da estrutura, assumindo-se uma dada distribuição estatística para o fator de segurança;
- Análises probabilísticas pelo método Monte Carlo: fornece o valor médio, a variância do fator de segurança e a probabilidade de ruptura da estrutura. O método Monte Carlo fornece também o histograma de distribuição de probabilidade do fator de segurança, resultante das diversas iterações realizadas.
- Análises probabilísticas pelo método Rosenblueth: método simplificado e que somente comprometerá a eficácia se as dispersões das variáveis forem muito grandes. O método se resume em estimar os momentos (média, desvio padrão, etc.) da variável dependente em função das variáveis aleatórias independentes, desde que se conheçam ao menos dois momentos, a média e o desvio padrão, ou as suas

estimativas. Fornece o valor médio e a probabilidade de ruptura da estrutura, assumindo-se uma dada distribuição estatística para o fator de segurança.

A Tabela 5.2 apresenta os valores médios dos parâmetros geotécnicos utilizados nas análises, bem como o desvio padrão, o coeficiente de variação, a distribuição estatística e a faixa de variação máxima adotada. Deve-se observar que nem todos os parâmetros foram considerados como variáveis aleatórias na aplicação dos diferentes métodos probabilísticos. A análise da influência de cada variável aleatória foi realizada por meio da aplicação do método FOSM e as variáveis com pouca influência foram descartadas na análise pelo método Monte Carlo.

Tabela 5.2 – Parâmetros geotécnicos médios dos materiais, Desvio padrão, Distribuição estatística e valores mínimos e máximos adotados nas análises da CBA para o método Monte Carlo

MATERIAL	RESÍDUO FILTRO PRENSA "SECO"				RESÍDUO FILTRO PRENSA "ÚMIDO"		RESÍDUO DISPOSTO BARRAGEM (FUNDAÇÃO)	
	Peso Específico	Coesão (c')	Atrito (ϕ)	Ru	Peso Específico	Incremento do Su com a profundidade	Peso Específico	Incremento do Su com a profundidade
Unidade	(kN/m ³)	(kPa)	(°)	-	(kN/m ³)	(kPa/m)	(kN/m ³)	(kPa/m)
Valor Médio	17,60	50,00	26,00	0,25	18,25	3,50	16,00	1,50
CV (%) ⁽¹⁾	5,5	58,9	16,6	-	3	40	9,1	40
Desvio Padrão (σ) ⁽²⁾	0,97	29,45	4,31	-	0,55	1,40	1,46	0,6
Distribuição Estatística	-	-	Lognormal ⁽¹⁾	-	-	-	-	Lognormal ⁽³⁾
Limite de Variabilidade ⁽⁴⁾	-	-	2 σ	-	-	-	-	2 σ
Valor Mínimo	-	-	17,38	-	-	-	-	0,3
Valor Máximo	-	-	34,62	-	-	-	-	2,7

Notas:

- (1) Alguns valores de CV (Coeficiente de Variação) foram adotados da literatura para os parâmetros que não possuem dados de ensaios suficientes para calculá-lo.

- (2) Considerando-se uma distribuição normal, um desvio padrão (1σ) abrange 68,3% dos dados envolvidos no estudo; dois desvios padrão (2σ) abrangem 95,4% e três desvios padrão (3σ) abrangem 99,7%.
- (3) Distribuição estatística adotada. A adoção de diferentes distribuições estatísticas pode resultar em diferentes valores de probabilidade de ruptura.
- (4) Limite de variabilidade: é uma medida que reflete a variabilidade natural dos dados, assumindo que o valor médio está correto.

A influência de cada parâmetro na variação do fator de segurança foi avaliada pela aplicação da metodologia FOSM, detalhada a seguir.

5.4.2.1 – Método FOSM

Considerando que as variáveis aleatórias são independentes entre si, o fator de segurança médio calculado pelo método FOSM corresponde ao fator de segurança obtido com os valores médios das variáveis aleatórias, neste caso, $FS_{\text{médio}} = 1,75$ para as Seções A-A e BB e $FS_{\text{médio}} = 1,70$ para as Seções C-C e D-D, ambos calculados no item 5.4.1. As variáveis aleatórias utilizadas nas análises probabilísticas são aquelas correspondentes aos materiais por onde passam a superfície crítica de ruptura da análise determinística.

Além das análises realizadas com os parâmetros médios dos materiais (determinísticas), foram realizadas mais sete análises para a aplicação da metodologia FOSM para as Seções A-A e B-B e mais três análises para as Seções C-C e D-D. Para realização dessas análises, foi aplicada uma taxa de acréscimo de 10% no valor de cada parâmetro médio, enquanto se mantinham os demais valores constantes. De maneira a ilustrar o procedimento adotado na aplicação do método FOSM, as Tabelas 5.3 e 5.4 apresentam os valores de FS calculados em cada análise e os cálculos realizados para as Seções A-A e B-B e Seções C-C e D-D.

Seções A-A e B-B

Tabela 5.3 – Método FOSM – Valores de FS obtidos – Seções A-A e B-B

Variável Aleatória	X_i (Valor Médio)	Valor Médio + 10%	FS
Resíduo filtrado seco_coesão (kPa)	50,00	55,00	1,770
Resíduo filtrado seco_atrito (°)	26,00	28,60	1,780
Resíduo filtrado seco_peso específico (kN/m³)	17,60	19,36	1,660
Fundação_Su (kPa/m)	1,50	1,65	1,840
Fundação_peso específico (kN/m³)	16,00	17,60	1,750
Resíduo filtrado úmido_Su (kPa/m)	3,50	3,85	1,760
Resíduo filtrado úmido_peso específico (kN/m³)	18,25	20,08	1,570

Tabela 5.4 – Análise do FS utilizando o Método FOSM – Seções A-A e B-B

Variável Aleatória	δX_i	δFS_i	$\delta FS_i / \delta X_i$	$V[X_i]$	$V[F] = \sum_1^n \left(\frac{\delta F_i}{\delta X_i} \right)^2 \times V[X_i]$	Porcentagem de Contribuição
Resíduo filtrado seco_coesão	5,0000	-0,0200	-0,0040	867,3025	0,014	9,1%
Resíduo filtrado seco_atrito	2,6000	-0,0300	-0,0115	18,5761	0,002	1,6%
Resíduo filtrado seco_peso específico	1,7600	0,0900	0,0511	0,9409	0,002	1,6%
Fundação_Su	0,1500	-0,0900	-0,6000	0,3600	0,130	84,7%
Fundação_peso específico	1,6000	0,0000	0,0000	2,1316	0,000	0,0%
Resíduo filtrado úmido_Su (kPa/m)	0,3500	-0,0100	-0,0286	1,9600	0,002	1,0%
Resíduo filtrado úmido_peso específico (kN/m³)	1,8250	0,1800	0,0986	0,3025	0,003	1,9%
				V[FS]	0,153	100,0%

O gráfico da Figura 5.6 mostra as porcentagens de contribuição de cada variável aleatória na variância total do fator de segurança. Pode-se observar que a resistência não drenada da fundação é a variável aleatória que mais contribui na variação do fator de segurança, com 84,7% de contribuição seguida pela coesão do resíduo filtrado seco. Os outros materiais contribuem muito pouco na variação do FS. As demais variáveis perfazem aproximadamente 6% da porcentagem de contribuição na variância do FS.

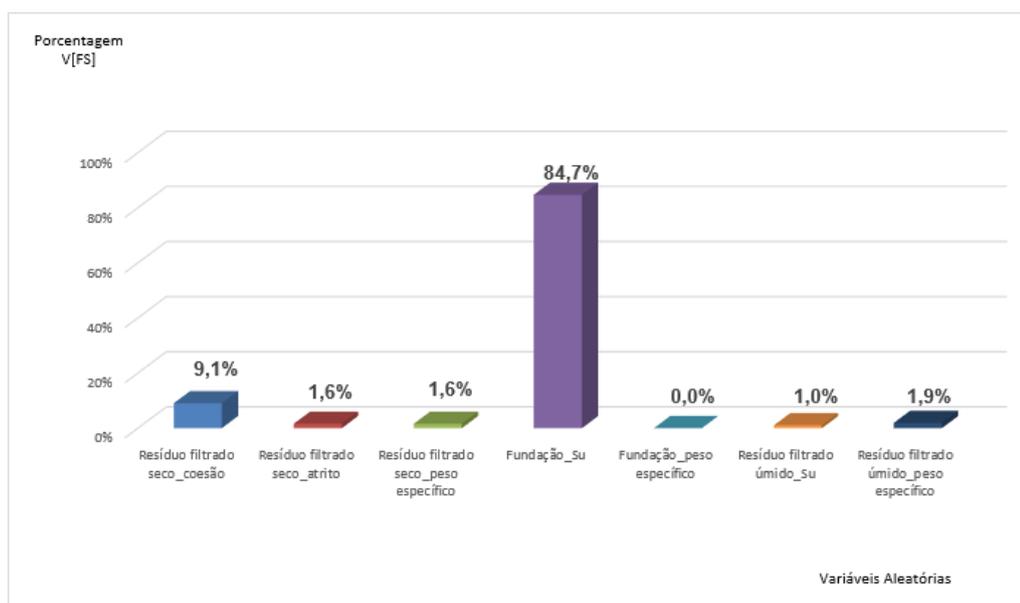


Figura 5.6 – Porcentagens de influência das variáveis aleatórias na variação do Fator de Segurança das Seções A-A e B-B

Seções C-C e D-D

Tabela 5.5 – Método FOSM – Valores de FS obtidos em cada análise – Seções C-C e D-D

Variável Aleatória	X_i (Valor Médio)	Valor Médio + 10%	FS
Resíduo filtrado seco_coesão (kPa)	50,00	55,00	1,740
Resíduo filtrado seco_atrito (°)	26,00	28,60	1,840
Resíduo filtrado seco_peso específico (kN/m ³)	17,60	19,36	1,630

Tabela 5.6 – Análise do FS utilizando o Método FOSM – Seções C-C e D-D

Variável Aleatória	δX_i	δFS_i	$\delta FS_i/\delta X_i$	$V[X_i]$	$V[F] = \sum_1^n \left(\frac{\delta F_i}{\delta X_i} \right)^2 \times V[X_i]$	Porcentagem de Contribuição
Resíduo filtrado seco_coesão	5,0000	0,0100	0,0020	867,3025	0,003	11,5%
Resíduo filtrado seco_atrito	2,6000	-0,0900	-0,0346	18,5761	0,022	73,9%
Resíduo filtrado seco_peso específico	1,7600	0,1200	0,0682	0,9409	0,004	14,5%
V[FS]					0,030	100,0%

Pode-se observar na Figura 5.7 que o atrito do resíduo filtrado “seco” é a variável aleatória que mais contribui na variação do fator de segurança, com 73,9% de contribuição, seguida pelo peso específico do resíduo filtrado “seco” que contribui 14,5%.

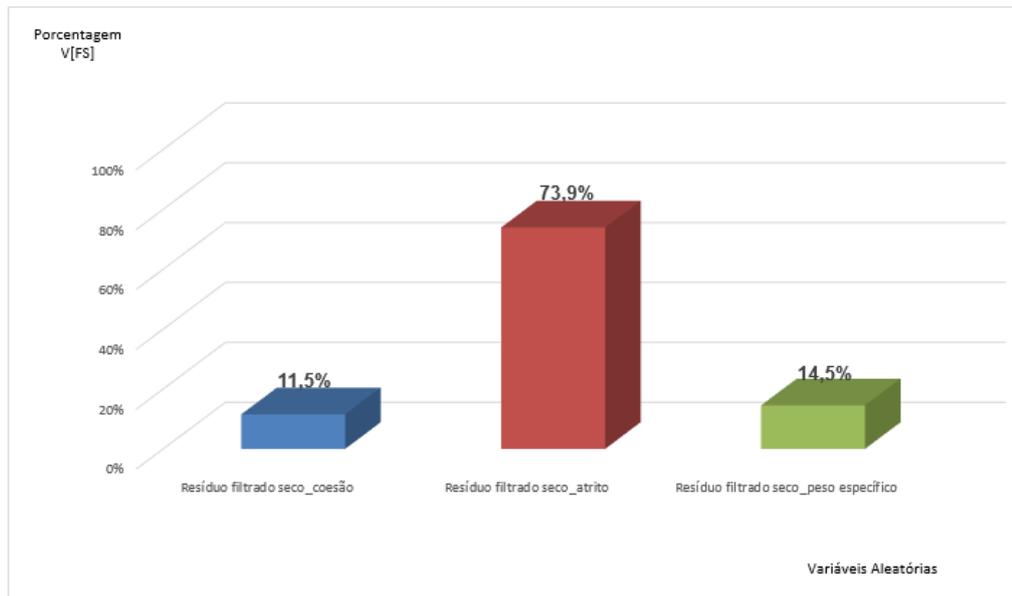


Figura 5.7 – Porcentagens de influência das variáveis aleatórias na variação do Fator de Segurança das Seções C-C e D-D

Contudo, as análises demonstram que, para essa situação de estudo, as variáveis aleatórias que apresentam maior influência na variação do fator de segurança são: **resistência não**

drenada da fundação e coesão do resíduo filtrado seco, para as seções A-A e B-B, e ângulo de atrito e peso específico do resíduo filtrado “seco” para as seções C-C e D-D.

Em resumo, obtiveram-se com a aplicação do método FOSM os seguintes resultados:

Seções A-A e B-B:

- Fator de segurança médio = 1,75
- Desvio padrão de FS = 0,391
- **Probabilidade de ruptura = 3,8E-06 (assumindo uma distribuição lognormal do FS)**, obtido por cálculo em planilha de Excel.

Seções C-C e D-D:

- Fator de segurança médio = 1,70
- Desvio padrão de FS = 0,173
- **Probabilidade de ruptura = 2,7E-05 (assumindo uma distribuição normal do FS)**, obtido por cálculo em planilha de Excel.

É extremamente importante mencionar que, a adoção de diferentes distribuições estatísticas, pode resultar em diferentes valores de probabilidade de ruptura.

5.4.2.2 – Método Monte Carlo

A partir da aplicação do método FOSM, foram realizadas análises pelo método Monte Carlo, considerando a variável aleatória resistência não drenada da fundação para a Seção A-A e B-B e as variáveis ângulo de atrito e peso específico do resíduo filtrado “seco” para a Seção C-C e D-D.

Para a aplicação do método Monte Carlo, foi definido para cada variável aleatória, o valor médio, o desvio padrão, a distribuição estatística e o intervalo de variação utilizado, tal como mostrado na Tabela 5.2.

A partir da análise da convergência dos valores de probabilidade de ruptura, ou seja, após a estabilização dos dados, foram obtidos os histogramas do fator de segurança e a sua distribuição acumulada e também os histogramas das variáveis aleatórias para as duas seções analisadas.

Seções A-A e B-B:

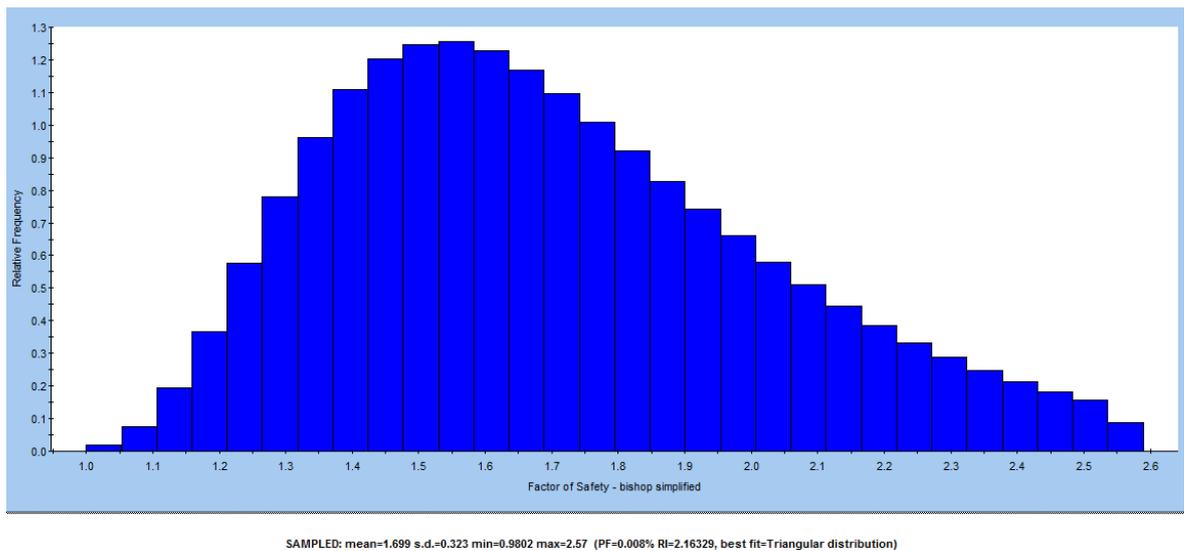


Figura 5.8 – Histograma do Fator de Segurança –

$$FS_{\text{médio probab.}} = 1,699; Pf = 0,008\%$$

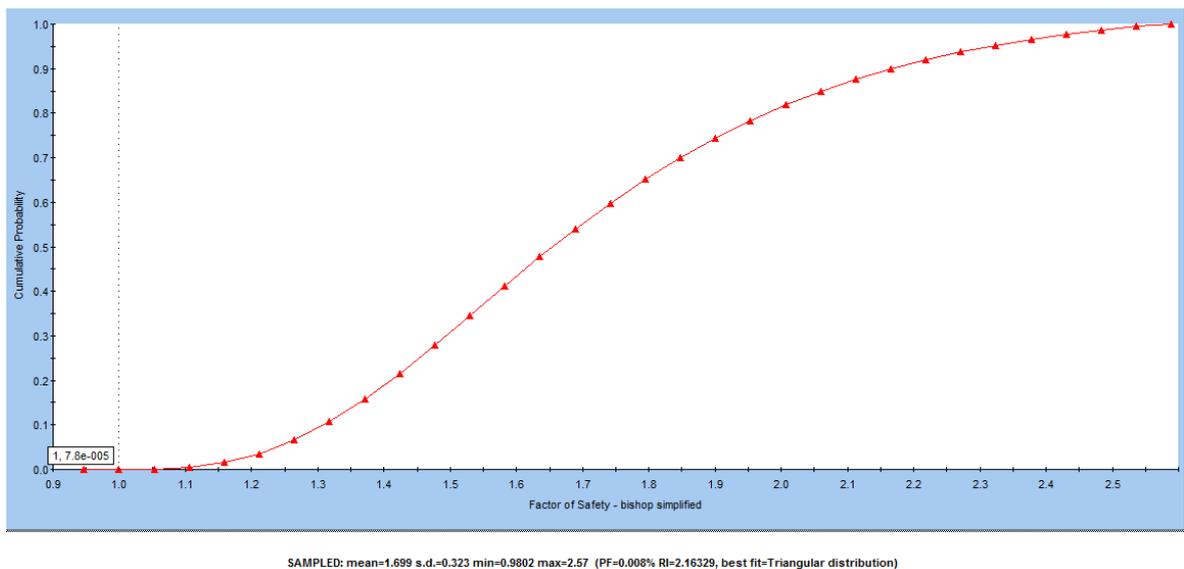


Figura 5.9 – Distribuição Acumulada do Fator de Segurança

A Figura 5.10 apresenta o histograma para a variável aleatória utilizada.

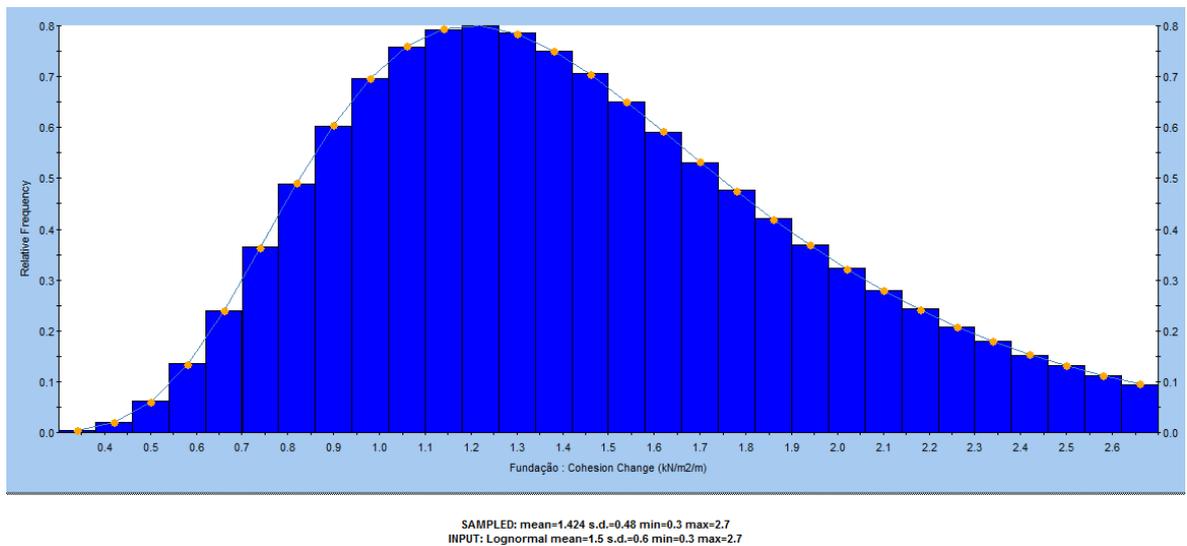


Figura 5.10 - Histograma da taxa de aumento da resistência não drenada da fundação

Seções C-C e D-D:

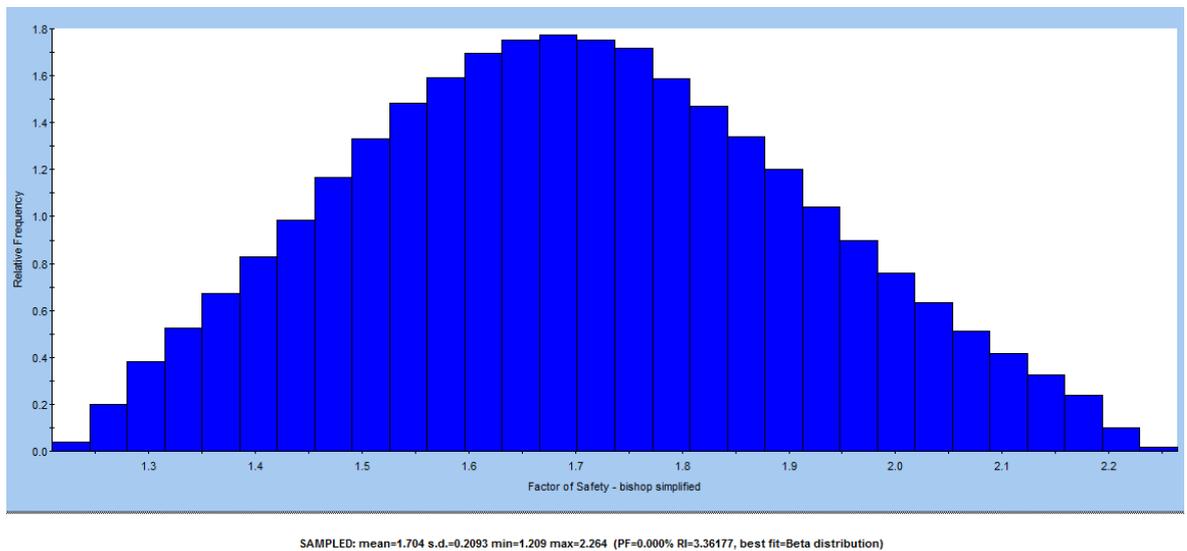
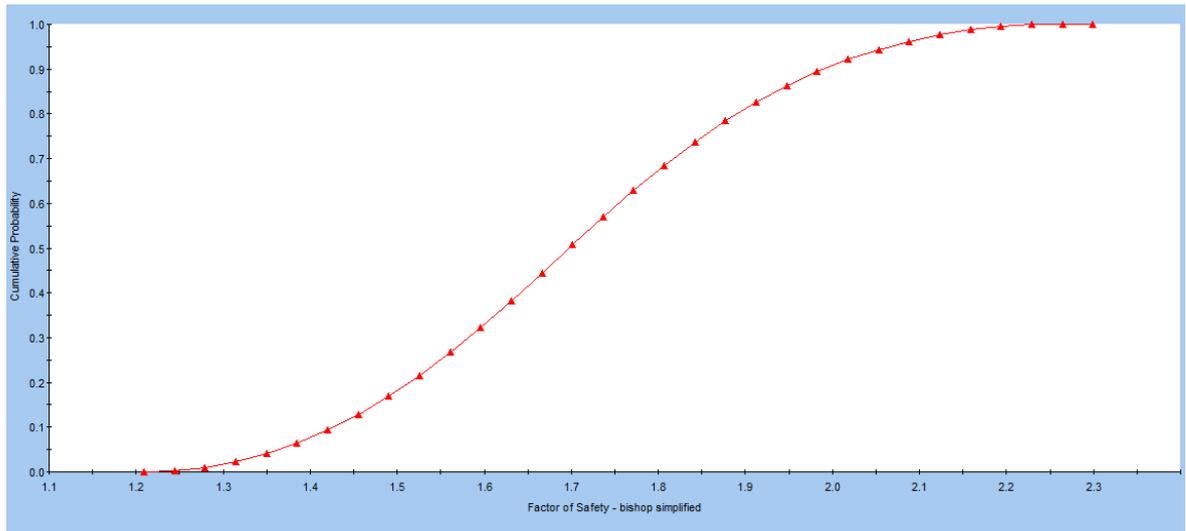


Figura 5.11 – Histograma do Fator de Segurança –

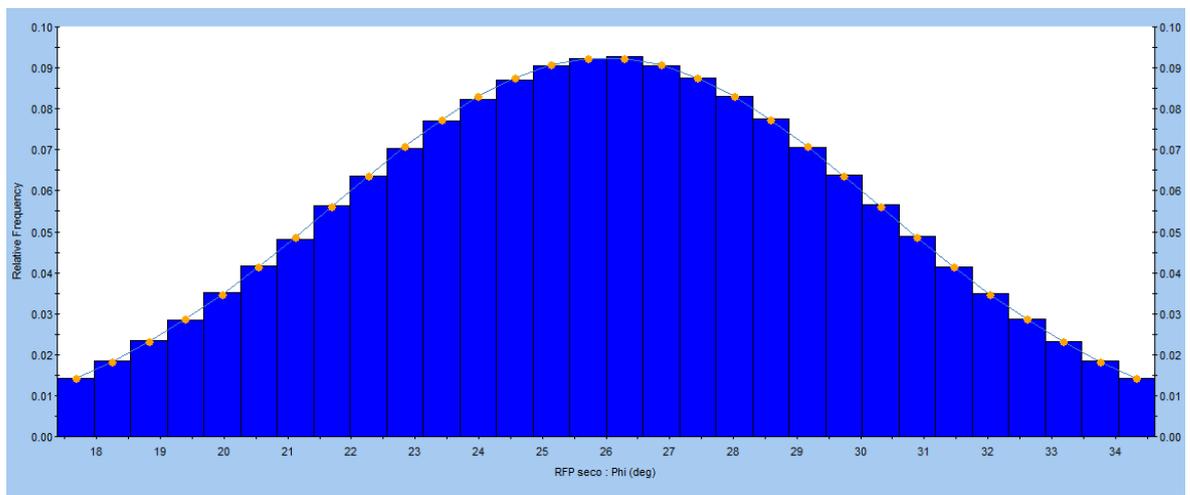
$FS_{\text{médio probab.}} = 1,704$; $Pf = 0,0385\%$ (obtido por cálculo em planilha de Excel)



SAMPLED: mean=1.704 s.d.=0.2093 min=1.209 max=2.264 (PF=0.000% RI=3.36177, best fit=Beta distribution)

Figura 5.12 – Distribuição Acumulada do Fator de Segurança

A Figura 5.13 apresenta o histograma para a variável aleatória ângulo de atrito do resíduo filtrado “seco”.



SAMPLED: mean=26 s.d.=3.794 min=17.38 max=34.62
 INPUT: Normal mean=26 s.d.=4.31 min=17.38 max=34.62

Figura 5.13 - Histograma do ângulo de atrito do resíduo filtrado “seco”

5.4.2.3 – Rosenblueth

As Figuras 5.14 e 5.15 mostram as combinações feitas para os parâmetros de resistência que mais influenciam na probabilidade de ruptura das seções A-A e B-B e C-C e D-D e respectivos fatores de segurança obtidos.

2 ⁿ	Nº do Cálculo	Combinações					Fundação-Su	Resultados (FS)
2 ¹ .	1	+	+	+	+	+	2,1	2,079
	2	-	+	+	+	+	0,9	1,317

Figura 5.14 – Seções A-A e B-B - FS obtidos pelas combinações realizadas

2 ⁿ	Nº do Cálculo	Combinações					Resíduo filtrado seco-Atrito	Resíduo filtrado seco-Peso Específico	Resultados (FS)
2 ¹ .	1	+	+	+	+	+	30,31	18,57	1,875
	2	-	+	+	+	+	21,69	18,57	1,444
2 ² .	3	+	-	+	+	+	30,31	16,63	1,967
	4	-	-	+	+	+	21,69	16,63	1,496

Figura 5.15 – Seções C-C e D-D - FS obtidos pelas combinações realizadas

Para as seções A-A e B-B, o Fator de Segurança médio probabilístico é igual a 1,698, com desvio padrão de 0,539 e probabilidade de ruptura igual a $8,1 \times 10^{-4}$, adotando uma distribuição lognormal, obtido por cálculo em planilha de Excel.

Para as seções C-C e D-D, o Fator de Segurança médio é igual a 1,696, com desvio padrão de 0,264 e probabilidade de ruptura igual a $4,2 \times 10^{-3}$, adotando uma distribuição normal, obtido por cálculo em planilha de Excel.

Considerações Gerais das Análises de Estabilidade Probabilísticas

A Tabela 5.7 resume os resultados das análises probabilísticas das seções em estudo.

Tabela 5.7 – Instabilidade do arranjo proposto para a empresa CBA - Resumo dos Resultados das Análises Probabilísticas

Método	Seção	FS _{médio}	σ [FS]	FS _{mín}	FS _{máx}	P _{FS≤1}	Função de Distribuição
FOSM	A-A e B-B	1,750	0,391	1,57	1,84	3,8E-06	Lognormal
	C-C e D-D	1,700	0,173	1,63	1,84	2,7E-05	Normal
Monte Carlo	A-A e B-B	1,699	0,323	0,98	2,57	8,0E-05	Lognormal
	C-C e D-D	1,704	0,209	1,21	2,26	3,8E-04	Normal
Rosenblueth	A-A e B-B	1,698	0,539	1,317	2,079	8,1E-04	Lognormal
	C-C e D-D	1,696	0,264	1,444	1,967	4,2E-03	Normal

A partir da Tabela 5.7 conclui-se que a maior probabilidade de ruptura do arranjo proposto para a CBA é $4,2 \times 10^{-3}$ (Seções C-C e D-D) dentre os métodos de análise probabilística estudados. Comparando esse valor obtido com o limite de tolerabilidade para barragens inferiores a 10^{-4} , mostrado na Figura 2.33 do Capítulo 2, conclui-se que o valor não é aceitável para a geometria proposta.

5.5 – CONFIGURAÇÃO FINAL DO ARRANJO PROPOSTO

A Figura 5.16 mostra a sequência de ocupação da Barragem Palmital pelo resíduo filtrado.

As etapas de ocupação da Barragem Palmital pelo resíduo filtrado consistem de:

Etapa 1: Execução do aterro de conquista para implantação da pilha de resíduo filtrado por filtro prensa.

Etapa 2: Início da pilha de resíduo filtrado por filtro prensa nas encostas.

Etapa 3: Disposição do resíduo filtrado por filtro prensa seco e úmido no interior do reservatório.

Etapa 4: Disposição do resíduo filtrado por filtro prensa em sua configuração final. O resíduo filtrado seco é utilizado para descomissionamento da estrutura.

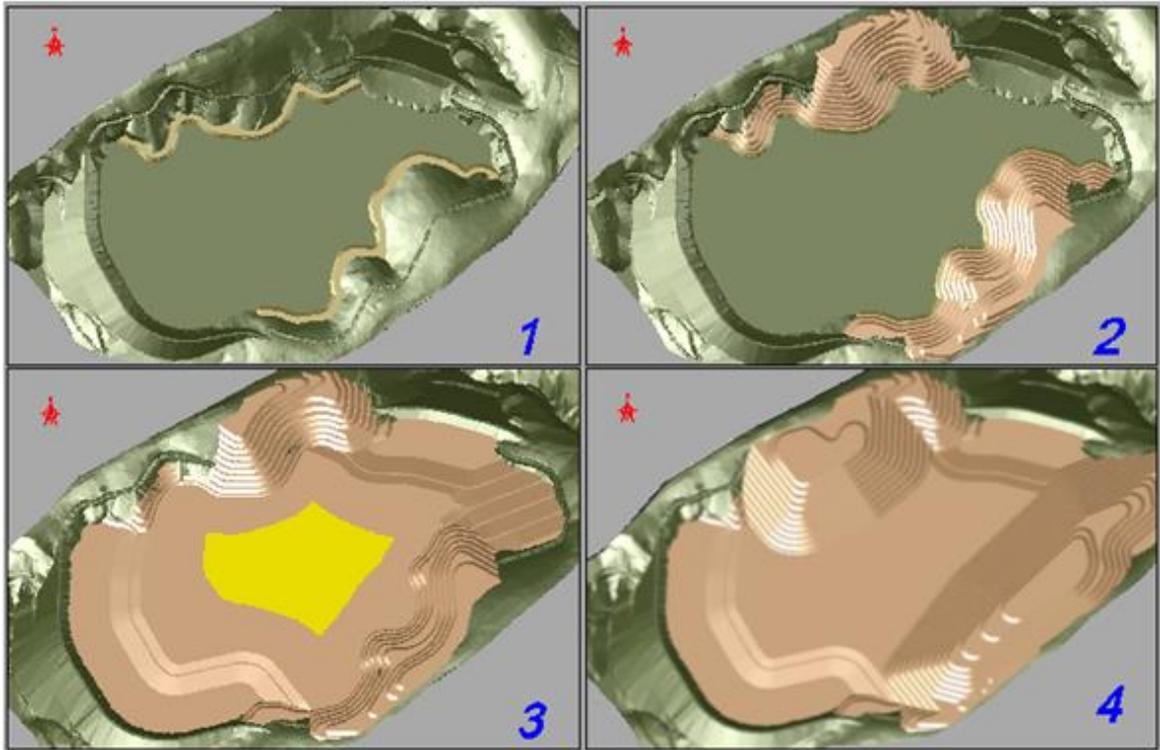


Figura 5.16 – Planejamento da disposição do resíduo de alumina produzido pelo Filtro Prensa (Modificado CBA, 2014)

As Figuras 5.17 e 5.18 apresentam detalhe da área úmida do arranjo proposto e a sua configuração final, respectivamente.

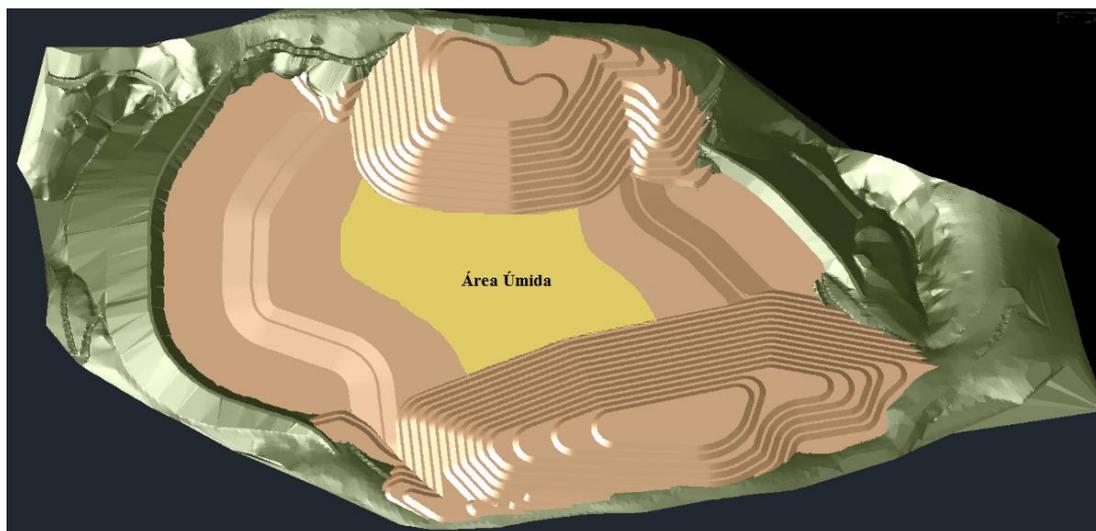


Figura 5.17 – Configuração final do arranjo proposto para a Barragem Palmital – Detalhe da área úmida

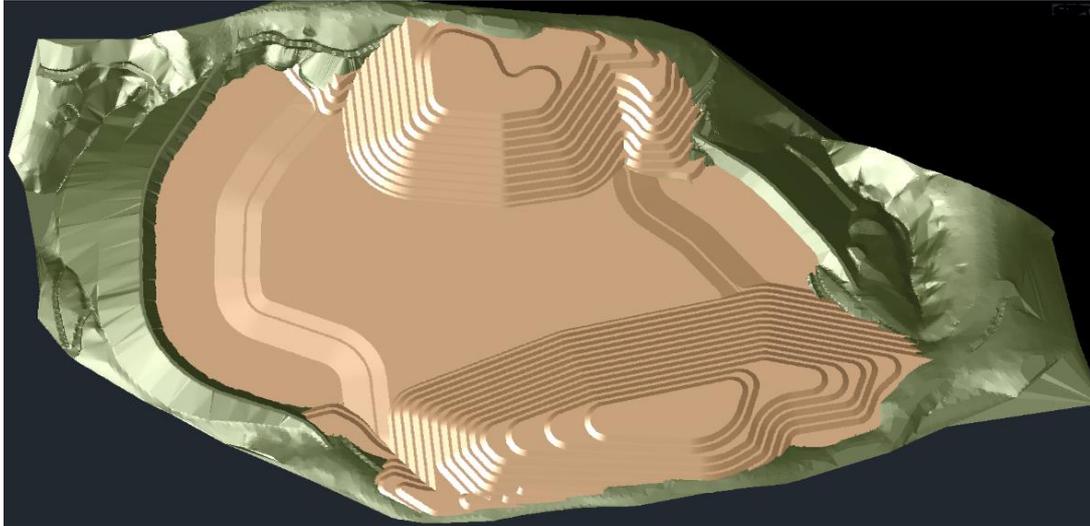


Figura 5.18 – Configuração final do arranjo proposto para a Barragem Palmital - Descomissionamento

O arranjo proposto para a Barragem Palmital se resume a um ângulo geral final da pilha de cerca de 6° no interior do reservatório e de 19° nas margens e uma camada de resíduo filtrado de aproximadamente 17,0 m de altura no reservatório e de 67,0 m nas margens, como mostram as Figuras 5.19 e 5.20.

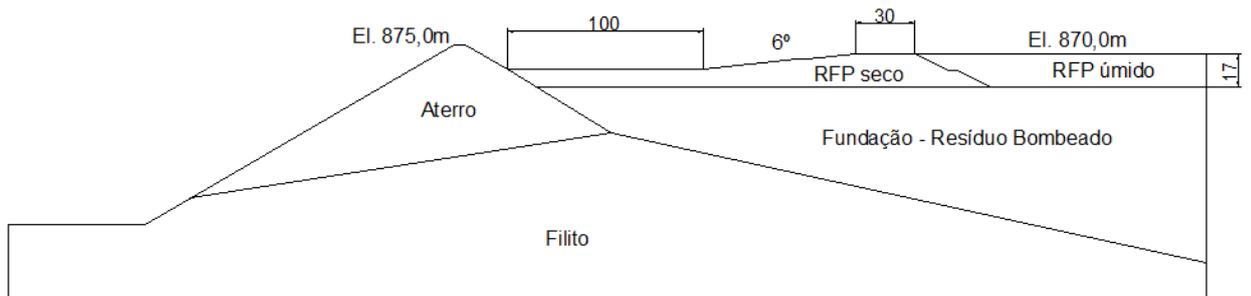


Figura 5.19 – Configuração final do arranjo proposto – Seções A-A e B-B (maciços/praias)

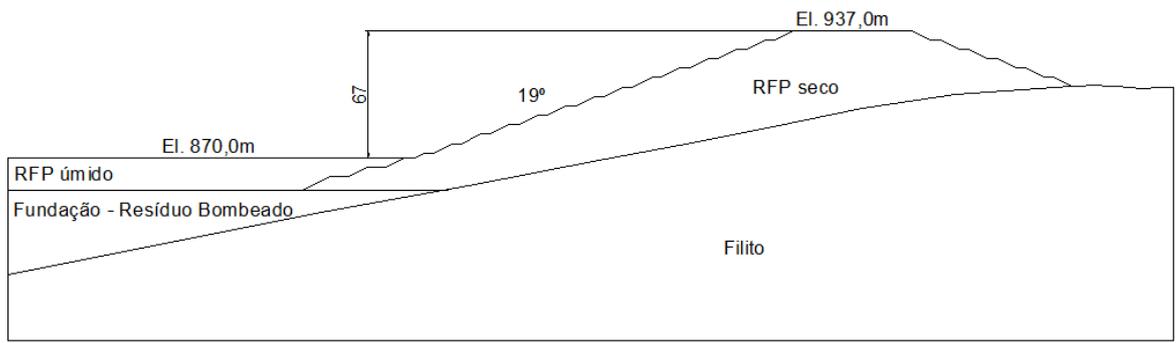


Figura 5.20 – Configuração final do arranjo proposto – Seções C-C e D-D (margens)

CAPÍTULO 6

CRITÉRIOS E METODOLOGIAS DE PROJETO PARA PILHAS DE RESÍDUOS DE ALUMINA DA ALUNORTE

6.1 – INTRODUÇÃO

No método de disposição atual da Alunorte, o resíduo é desaguado pelo filtro tambor e apresenta um teor de sólidos (TS) de lançamento de aproximadamente 60%. É transportado por meio de caminhões basculantes e disposto no reservatório a partir de uma plataforma posicionada em uma cota mais elevada, no centro do DRS.

O DRS1 é composto pelo DRS antigo e suas expansões: células leste CL1, CL2 e CL3.

Cotas de Crista das paredes do DRS antigo

Parede Norte: crista na El. 21,00 m;

Parede Oeste: crista com cota variável (da El. 21,0 m a El. 23,0 m);

Parede Leste: crista com cota variável (da El. 19,5 m a El. 23,0 m);

Parede Sul: crista na El. 25,00 m.

Cota da plataforma atual na El. 50,0 m: atualmente a cota máxima da plataforma encontra-se na El. 50,0 m e o ângulo obtido na pilha de resíduo do filtro tambor é em torno de 2,5°.

Crítérios de segurança frente a eventos de cheias: borda livre mínima de 1,0 m e faixa de 40,0 m adjacente às paredes na cota referente à borda livre mínima, funcionando como reservatório de amortecimento de cheias.

A Figura 6.1 apresenta a configuração inicial do DRS1.



Figura 6.1 – Configuração inicial do DRS1

O estudo aqui apresentado foi concebido para dispor o resíduo (lama vermelha) com teor de sólidos (TS) de $\cong 78\%$ (período seco) e (TS) de $\cong 70\%$ (período úmido), filtrado a partir de filtros prensa, sobre o resíduo atualmente depositado com menor teor de sólidos, sendo o mesmo transportado até o depósito de resíduo por meio de correia transportadora e/ou caminhões.

6.2 – CARACTERIZAÇÃO PLUVIOMÉTRICA DA REGIÃO

A estação pluviométrica Vila do Conde (00148011), localizada próxima as instalações da Alunorte, foi escolhida como a mais representativa para a caracterização pluviométrica da região. Além de sua proximidade da região de estudo, a escolha desta estação deve-se também a grande extensão de sua série histórica.

Com base nessa estação pluviométrica foi elaborado o histograma mostrado na Figura 6.2.

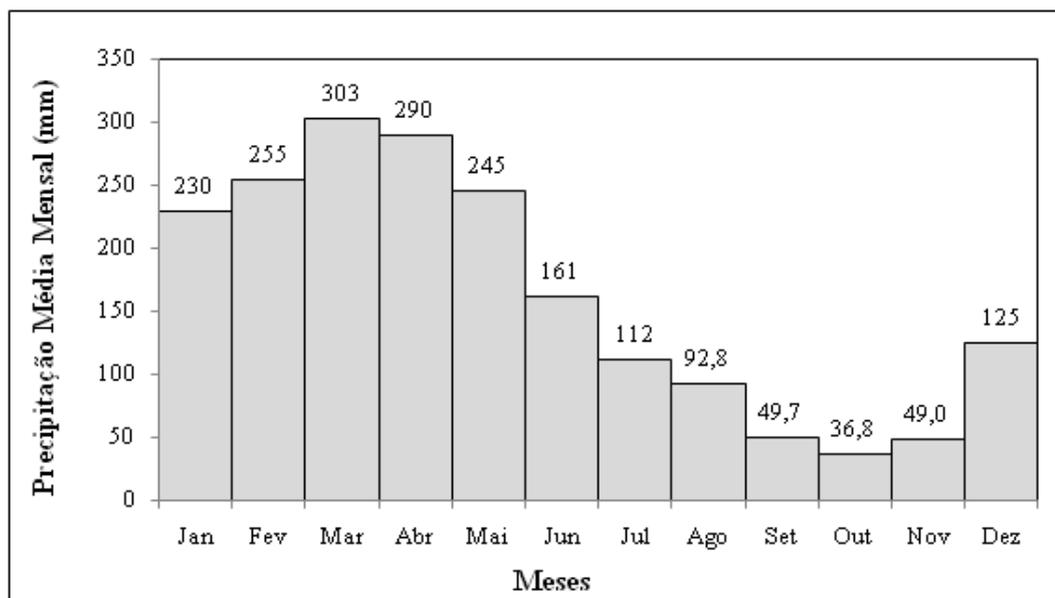


Figura 6.2 – Precipitação média mensal - Estação Vila do Conde

Em linhas gerais, as seguintes conclusões podem ser extraídas a partir da Figura 6.2:

- O ano hidrológico na região varia de janeiro a dezembro, estando o **período chuvoso** concentrado entre os **meses de janeiro a junho**;
- Os meses de **fevereiro a maio** apresentam os **índices pluviométricos** médios mais **elevados**;
- A **precipitação média anual** gira em torno de **162,5 mm**.
- A **precipitação total** é igual a **1.950 mm**.

Em função da previsão de variação das condições de disposição do resíduo filtrado no DRS1, entre dias secos e dias chuvosos, a disposição foi dividida em 2 zonas com diferentes condições de grau de compactação e umidade, e, conseqüentemente, com diferentes parâmetros geotécnicos:

- Zona seca
- Zona úmida

Levando em consideração os dados estatísticos de pluviometria na região da Alunorte, sugere-se o zoneamento da disposição levando em consideração as seguintes faixas de precipitação diária (P).

- **P < 10 mm:** Foi considerado que precipitações diárias (P) < 10 mm não afetam significativamente o teor de umidade final do resíduo, isto é, 100% do resíduo apresenta condições de ser depositado na zona denominada “**área seca**” do DRS1.
- **P ≥ 10 mm:** Foi considerado que precipitações diárias (P) ≥ 10 mm afetam o teor de umidade final do resíduo, devendo todo o resíduo gerado em dias com estas condições de precipitação ser depositado no centro do DRS1, na zona denominada “**área úmida**”.

Para a disposição de resíduo do filtro prensa em escala real, estas premissas devem ser confirmadas executando aterro experimental.

A partir da série histórica da estação Vila do Conde, são obtidos os percentuais de pluviometria maiores e menores que 10 mm para todos os meses do ano, como mostra a Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Precipitação média mensal - Estação Vila do Conde

Janeiro	< 10 mm 78%	Julho	< 10 mm 89%
	≥ 10 mm 22%		≥ 10 mm 11%
Fevereiro	< 10 mm 72%	Agosto	< 10 mm 91%
	≥ 10 mm 28%		≥ 10 mm 9%
Março	< 10 mm 76%	Setembro	< 10 mm 96%
	≥ 10 mm 24%		≥ 10 mm 4%
Abril	< 10 mm 72%	Outubro	< 10 mm 98%
	≥ 10 mm 28%		≥ 10 mm 2%
Maiο	< 10 mm 75%	Novembro	< 10 mm 96%
	≥ 10 mm 25%		≥ 10 mm 4%
Junho	< 10 mm 85%	Dezembro	< 10 mm 89%
	≥ 10 mm 15%		≥ 10 mm 11%

Isto significa que **85%** [$\Sigma(\%P < 10 \text{ mm}) / 12 \text{ meses}$] do resíduo será depositado na zona seca (P < 10 mm) e **15%** [$\Sigma(\%P \geq 10 \text{ mm}) / 12 \text{ meses}$] será depositado na zona úmida (P ≥ 10 mm).

6.3 – BALANÇO DE MASSAS

Conforme informado no item 4.2 do Capítulo 4, a geração anual de resíduo (lama vermelha) na base seca, considerada nos estudos é de **4.500.000 t/ano**. Desaguado por filtros prensa, a um teor de sólidos de $TS=78\%$, a geração nominal será de **5.850.000 t/ano de lama vermelha na base seca**.

Considerando que 85% desse resíduo filtrado será disposto em período seco e 15% será disposto em período chuvoso, temos os seguintes volumes:

- Produção anual de resíduo filtrado “seco”: 4.972.500 toneladas/ano;
- Produção anual de resíduo filtrado “úmido”: 877.500 toneladas/ano.

6.4 – ANÁLISES DE ESTABILIDADE

Os parâmetros do resíduo de filtro tambor, determinados por meio de ensaios de campo “Vane Test” realizados no DRS1 foram utilizados como referência para a definição dos parâmetros do resíduo de filtro prensa, quando disposto em dias chuvosos (na área úmida).

Para o resíduo de filtro prensa a ser disposto em dias secos, foram adotados parâmetros determinados por meio de ensaios triaxiais UU realizados em corpos de prova não saturados, moldados com grau de compactação de 90%.

A Figura 6.3 apresenta a localização da seção analisada.

Os valores médios dos parâmetros de resistência utilizados para os diversos materiais da seção geológico-geotécnica analisada são mostrados na Tabela 6.2.

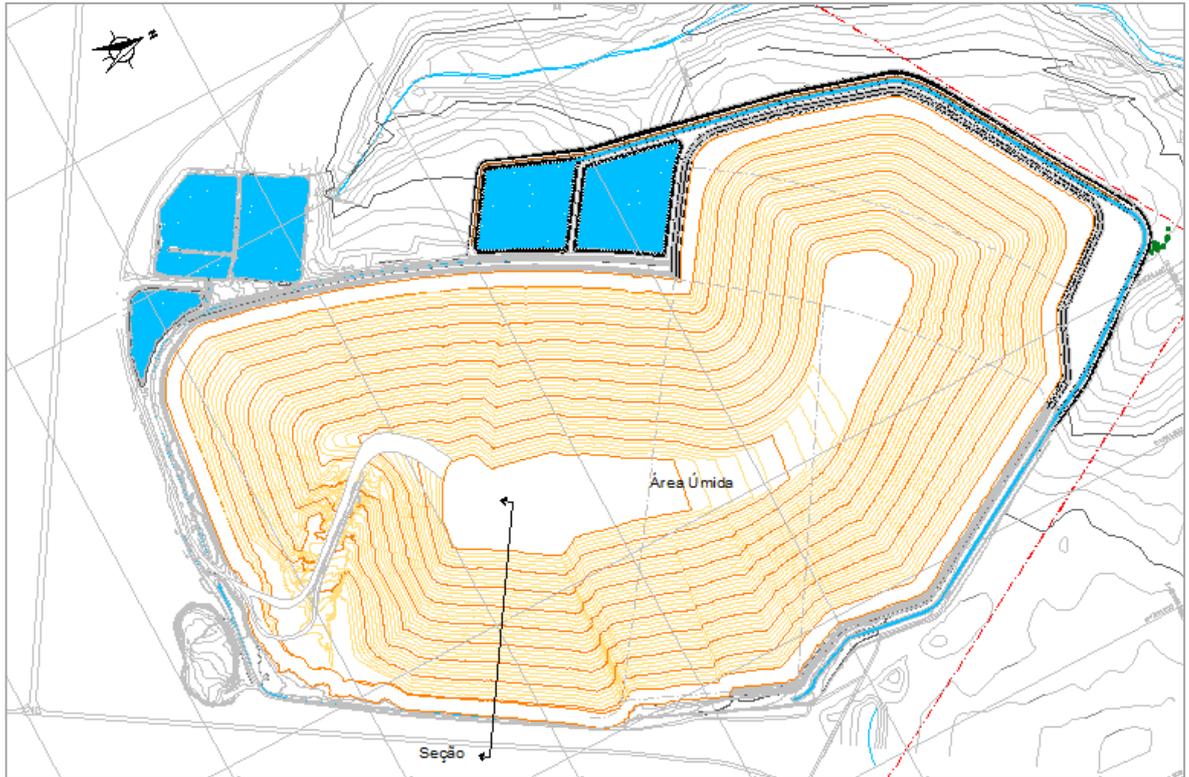


Figura 6.3 – Localização da seção analisada

6.4.1 – Análises Determinísticas

Para realização das análises de estabilidade, foi utilizado o software Slide versão 5.0, da Rocscience.

A avaliação da estabilidade, conforme o programa utilizado, adota métodos de equilíbrio limite para determinar o fator de segurança da estrutura. Nas análises apresentadas a seguir, foi utilizado o método de equilíbrio limite de Bishop Simplificado, envoltória de resistência de Mohr-Coulomb e a função correspondente à resistência não drenada variando com a profundidade.

As Figuras 6.4 e 6.5 apresentam o resultado do fator de segurança encontrado e detalhe da seção analisada, respectivamente.

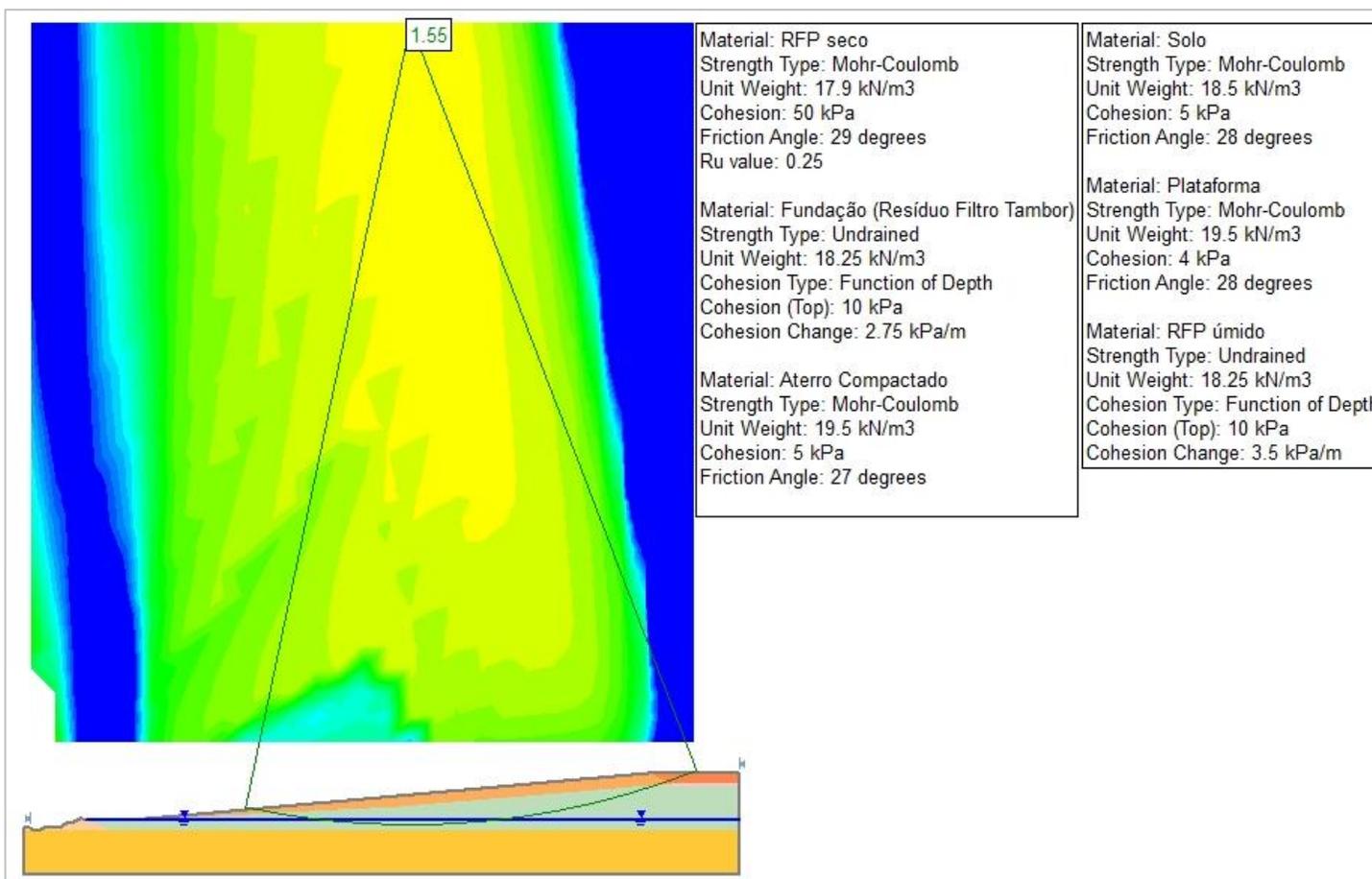


Figura 6.4 – Análise de Estabilidade Determinística – Cobertura com resíduo do filtro prensa – FS = 1,55

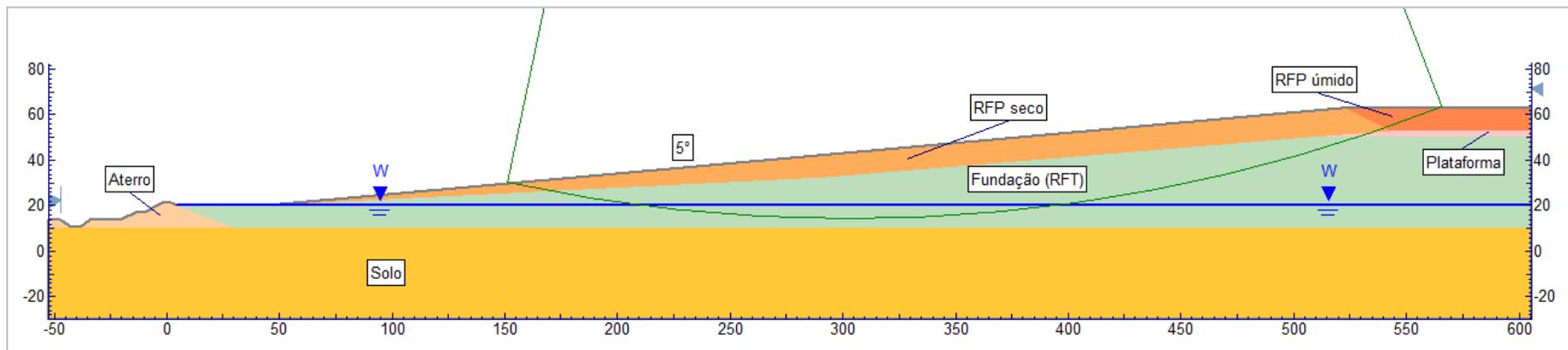


Figura 6.5 – Análise de Estabilidade Determinística – Cobertura com resíduo do filtro prensa – Detalhe

Nota: devido à presença da geomembrana na face das estruturas não foi considerada linha freática no interior do aterro.

A análise de estabilidade efetuada apresentou fator de segurança dentro do recomendável por norma, ou seja, superior a 1,50 para a condição analisada. Pode-se observar que a camada que governa a estabilidade da pilha é a camada formada pelo resíduo depositado atualmente, que é menos resistente, resultando um ângulo geral final da pilha de cerca de 5°.

6.4.2 – Análises Probabilísticas

Este item apresenta os resultados das análises probabilísticas realizadas para a seção do arranjo proposto para a Alunorte. Foram executadas as mesmas etapas citadas no Capítulo 5 para a CBA. A Tabela 6.2 apresenta os valores médios dos parâmetros geotécnicos utilizados nas análises, o desvio padrão, o coeficiente de variação, a distribuição estatística e a faixa de variação máxima adotada. Deve-se observar que nem todos os parâmetros foram considerados como variáveis aleatórias na aplicação dos diferentes métodos probabilísticos. A análise da influência de cada variável aleatória foi realizada por meio da aplicação do método FOSM e as variáveis com pouca influência foram descartadas na análise pelo método Monte Carlo.

Tabela 6.2 – Parâmetros geotécnicos médios dos materiais, Desvio padrão, Distribuição estatística e valores mínimos e máximos adotados nas análises da Alunorte para o método Monte Carlo

<i>MATERIAL</i>	<i>RESÍDUO FILTRO PRENSA "SECO"</i>				<i>RESÍDUO FILTRO PRENSA "ÚMIDO"</i>		<i>RESÍDUO DISPOSTO BARRAGEM – FILTRO TAMBOR (FUNDAÇÃO)</i>	
	Peso Específico	Coesão (c')	Atrito (ϕ')	Ru	Peso Específico	Incremento do Su com a profundidade	Peso Específico	Incremento do Su com a profundidade
Unidade	(kN/m ³)	(kPa)	(°)	-	(kN/m ³)	(kPa/m)	(kN/m ³)	(kPa/m)
Valor Médio	17,90	50,00	29,00	0,25	18,25	3,50	18,25	2,75
CV (%) ⁽¹⁾	3,7	6,1	13,2	-	3	40	6,1	40
Desvio Padrão (σ) ⁽²⁾	0,67	3,03	3,84	-	0,55	1,40	1,10	1,10
Distribuição Estatística	-	-	-	-	-	-	-	Normal ⁽³⁾
Limite de Variabilidade ⁽⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	2 σ
Valor Mínimo	-	-	-	-	-	-	-	0,55
Valor Máximo	-	-	-	-	-	-	-	4,95

Notas:

- (1) Alguns valores de CV (Coeficiente de Variação) foram adotados da literatura para os parâmetros que não possuem dados de ensaios suficientes para calculá-lo.
- (2) Considerando-se uma distribuição normal, um desvio padrão (1σ) abrange 68,3% dos dados envolvidos no estudo; dois desvios padrão (2σ) abrangem 95,4% e três desvios padrão (3σ) abrangem 99,7%.
- (3) Distribuição estatística adotada. A adoção de diferentes distribuições estatísticas pode resultar em diferentes valores de probabilidade de ruptura.
- (4) Limite de variabilidade: é uma medida que reflete a variabilidade natural dos dados, assumindo que o valor médio está correto.

A seguir, a influência de cada parâmetro no fator de segurança foi avaliada pela aplicação da metodologia FOSM.

6.4.2.1 – Método FOSM

Considerando que as variáveis aleatórias são independentes entre si, o fator de segurança médio calculado pelo método FOSM corresponde ao fator de segurança obtido com os valores médios das variáveis aleatórias, neste caso, $FS_{\text{médio}} = 1,55$ para a seção analisada. Além da análise realizada com os parâmetros médios dos materiais (determinística), mostrada no item 6.4.1.1, foram realizadas mais sete análises para a aplicação da metodologia FOSM na seção. Para realização dessas análises, foi aplicada uma taxa de acréscimo de 10% no valor de cada parâmetro médio, enquanto se mantinham os demais valores constantes. As Tabelas 6.3 e 6.4 apresentam os valores de FS calculados em cada análise e os cálculos realizados para a seção.

Tabela 6.3 – Método FOSM – Valores de FS obtidos – Seção típica da Alunorte

Variável Aleatória	X_i (Valor Médio)	Valor Médio + 10%	FS
Resíduo filtrado seco_coesão (kPa)	50,00	55,00	1,560
Resíduo filtrado seco_atrito (°)	29,00	31,90	1,560

Tabela 6.3 – Método FOSM – Valores de FS obtidos – Seção típica da Alunorte -
Continuação

Variável Aleatória	Xi (Valor Médio)	Valor Médio + 10%	FS
Resíduo filtrado seco_peso específico (kN/m³)	17,90	19,69	1,500
Fundação_Su (kPa/m)	2,75	3,03	1,660
Fundação_peso específico (kN/m³)	18,25	20,08	1,480
Resíduo filtrado úmido_Su (kPa/m)	3,50	3,85	1,550
Resíduo filtrado úmido_peso específico (kN/m³)	18,25	20,08	1,540

Tabela 6.4 – Análise do FS utilizando o Método FOSM – Seção típica da Alunorte

Variável Aleatória	δX_i	δFS_i	$\delta FS_i / \delta X_i$	$V[X_i]$	$V[F] = \sum_1^n \left(\frac{\delta F_i}{\delta X_i} \right)^2 \times V[X_i]$	Porcentagem de Contribuição
Resíduo filtrado seco_coesão	5,0000	-0,0100	-0,0020	9,1809	0,000	0,0%
Resíduo filtrado seco_atrito	2,9000	-0,0100	-0,0034	14,7456	0,000	0,1%
Resíduo filtrado seco_peso específico	1,7900	0,0500	0,0279	0,4489	0,000	0,2%
Fundação_Su	0,2750	-0,1100	-0,4000	1,2100	0,194	98,8%
Fundação_peso específico	1,8250	0,0700	0,0384	1,2100	0,002	0,9%
Resíduo filtrado úmido_Su (kPa/m)	0,3500	0,0000	0,0000	1,9600	0,000	0,0%
Resíduo filtrado úmido_peso específico (kN/m³)	1,8250	0,0100	0,0055	0,3025	0,000	0,0%
				V[FS]	0,196	100,0%

O gráfico da Figura 6.6 mostra as porcentagens de contribuição de cada variável aleatória na variância total do fator de segurança. Pode-se observar que a resistência não drenada da fundação é a variável aleatória que mais contribui na variação do fator de segurança, com 98,8% de contribuição. Os outros materiais contribuem muito pouco na variação do FS.

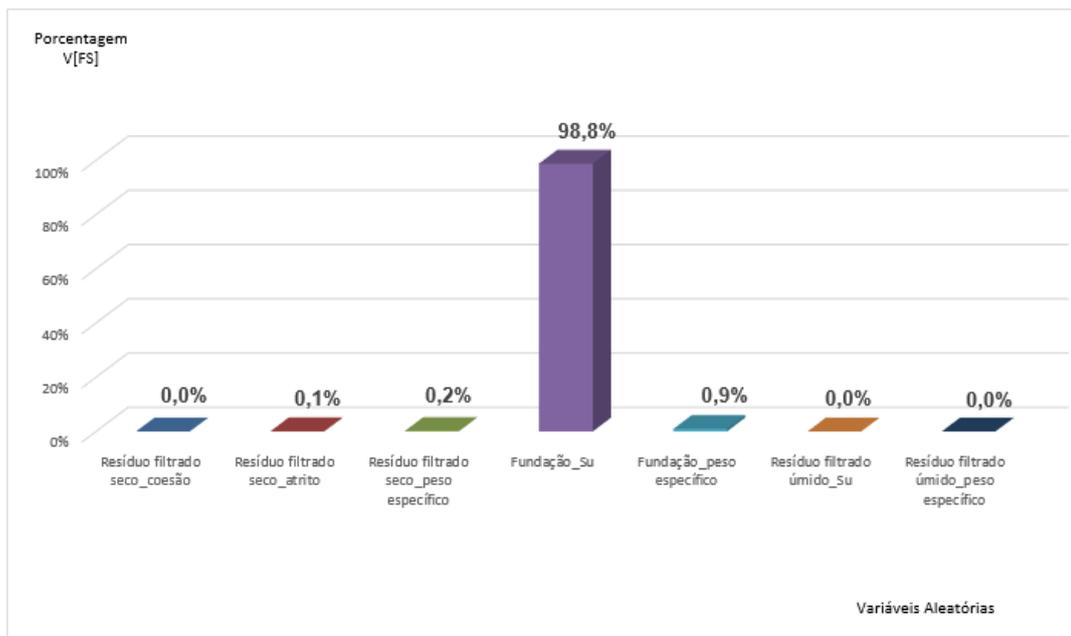


Figura 6.6 – Porcentagens de influência das variáveis aleatórias na variação do Fator de Segurança da seção típica da Alunorte

As análises demonstram que, para essa situação de estudo, a variável aleatória que apresenta maior influência na variação do fator de segurança é a **resistência não drenada da fundação**.

Em resumo, obtiveram-se com a aplicação do método FOSM os seguintes resultados:

- Fator de segurança médio = 1,55
- Desvio padrão de FS = 0,443

- **Probabilidade de ruptura = 1,1E-01 (assumindo uma distribuição normal do FS)**, obtido por cálculo em planilha de Excel.

É extremamente importante mencionar que, a adoção de diferentes distribuições estatísticas, pode resultar em diferentes valores de probabilidade de ruptura.

6.4.2.2 – Método Monte Carlo

A partir da aplicação do método FOSM, foram realizadas análises pelo método Monte Carlo, considerando a variável aleatória resistência não drenada da fundação para a seção típica da Alunorte. Após a análise da convergência dos valores de probabilidade de ruptura, foram obtidos o histograma do fator de segurança e a sua distribuição acumulada e também o histograma da variável aleatória considerada.

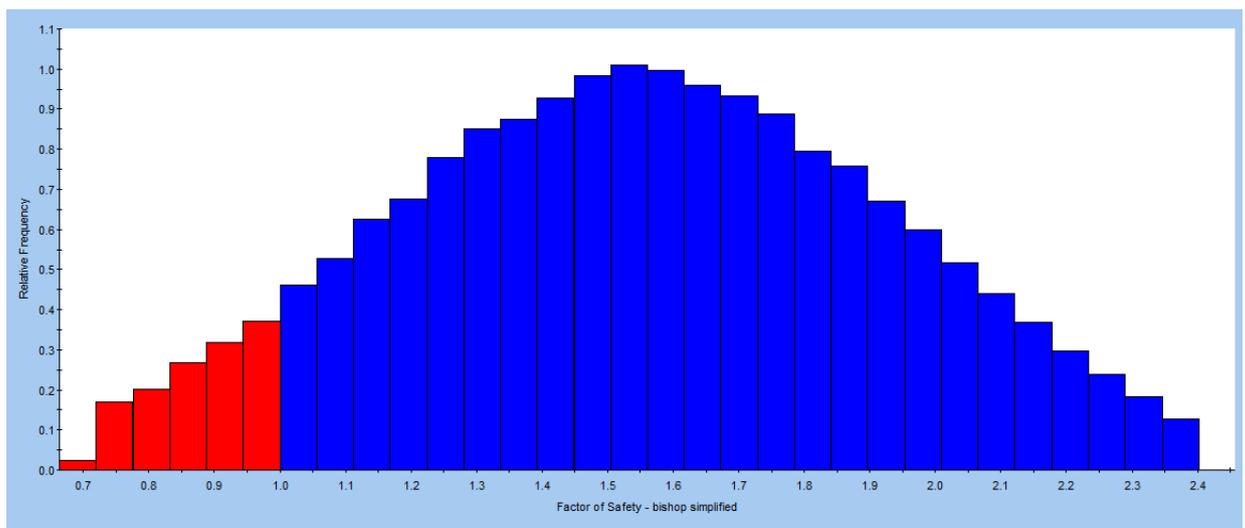


Figura 6.7 – Histograma do Fator de Segurança –

$FS_{\text{médio probab.}} = 1,552; Pf = 7,58\%$

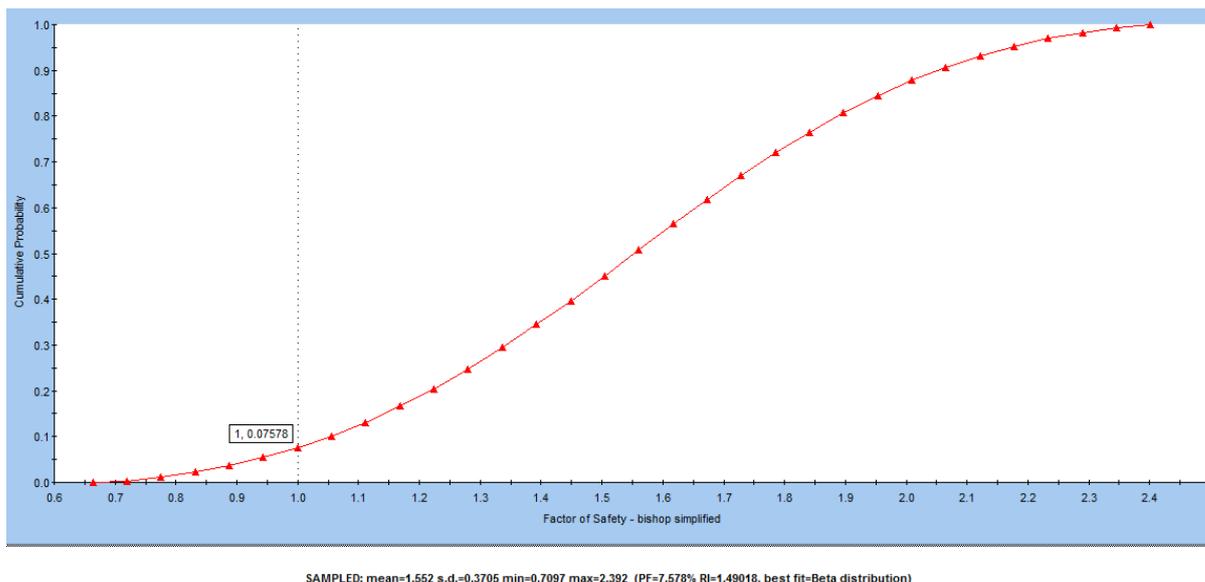


Figura 6.8 – Distribuição Acumulada do Fator de Segurança

A Figura 6.9 apresenta o histograma para a variável aleatória utilizada.

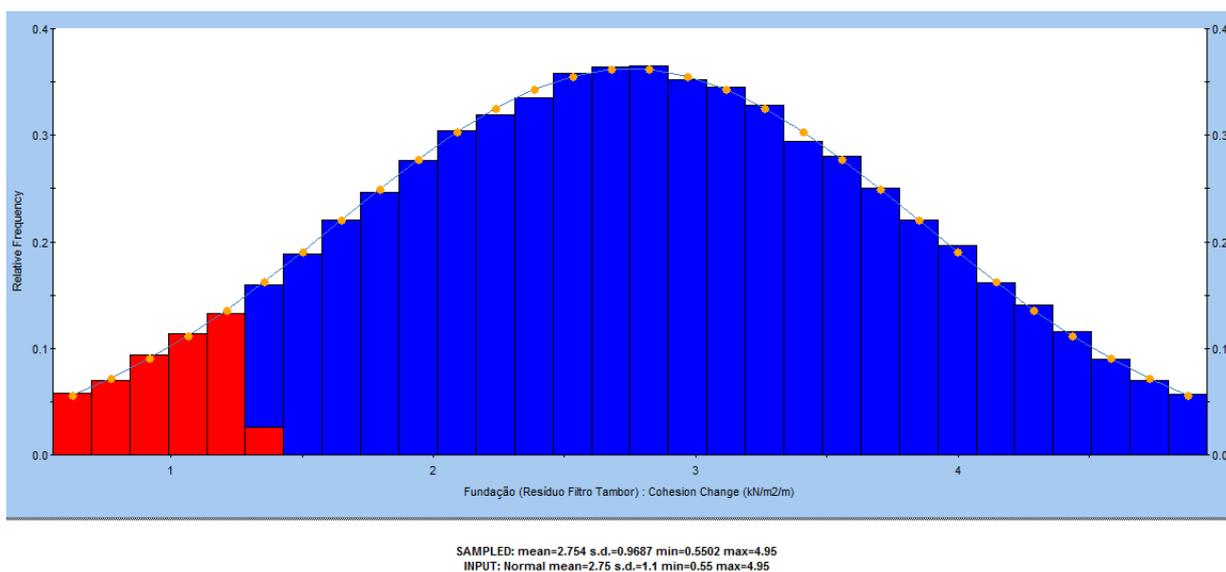


Figura 6.9 – Histograma da taxa de aumento da resistência não drenada da fundação

6.4.2.3 – Rosenblueth

A Figura 6.10 mostra as combinações feitas para o parâmetro da resistência não

drenada da fundação e respectivos fatores de segurança obtidos.

2ª	Nº do Cálculo	Combinações					Fundação-Su	Resultados (FS)
2 ¹	1	+	+	+	+	+	3,85	1,960
	2	-	+	+	+	+	1,65	1,109

Figura 6.10 – FS obtidos pelas combinações realizadas

O Fator de Segurança médio probabilístico é igual a 1,535, com desvio padrão de 0,602 e probabilidade de ruptura igual a $1,9 \times 10^{-1}$, adotando uma distribuição normal, obtido por cálculo em planilha de Excel.

Considerações Gerais das Análises de Estabilidade Probabilísticas

A Tabela 6.5 resume os resultados das análises probabilísticas da seção em estudo.

Tabela 6.5 – Instabilidade do arranjo proposto para a empresa Alunorte - Resumo dos Resultados das Análises Probabilísticas

Método	FS _{médio}	σ [FS]	FS _{mín}	FS _{máx}	P _{FS≤1}	Função de Distribuição
FOSM	1,550	0,443	1,48	1,66	1,1E-01	Normal
Monte Carlo	1,552	0,370	0,71	2,39	7,6E-02	Normal
Rosenblueth	1,535	0,602	1,11	1,96	1,9E-01	Normal

A partir da Tabela 6.5 conclui-se que a maior probabilidade de ruptura do arranjo proposto para a Alunorte é de $1,1 \times 10^{-1}$ dentre os métodos de análises probabilísticas estudados. Comparando esse valor obtido com o limite de tolerabilidade para barragens inferiores a 10^{-4} , mostrado na Figura 2.33 do Capítulo 2, conclui-se que o valor não é aceitável para a geometria proposta.

6.5 – CONFIGURAÇÃO FINAL DO ARRANJO PROPOSTO

A sequência de ocupação do DRS1 pelo resíduo filtrado consiste de:

Etapa 1: Execução de aterro de conquista para implantação da pilha de resíduo filtrado por filtro prensa nas regiões onde o rejeito apresenta as características menos resistentes.

Etapa 2: Disposição do resíduo filtrado por filtro prensa seco sobre a fundação e o resíduo úmido no interior do depósito.

Etapa 3: Disposição do resíduo filtrado por filtro prensa em sua configuração final. O resíduo filtrado seco é utilizado para descomissionamento da estrutura.

A Figura 6.11 a seguir apresenta detalhe da área úmida do arranjo proposto e a sua configuração final.

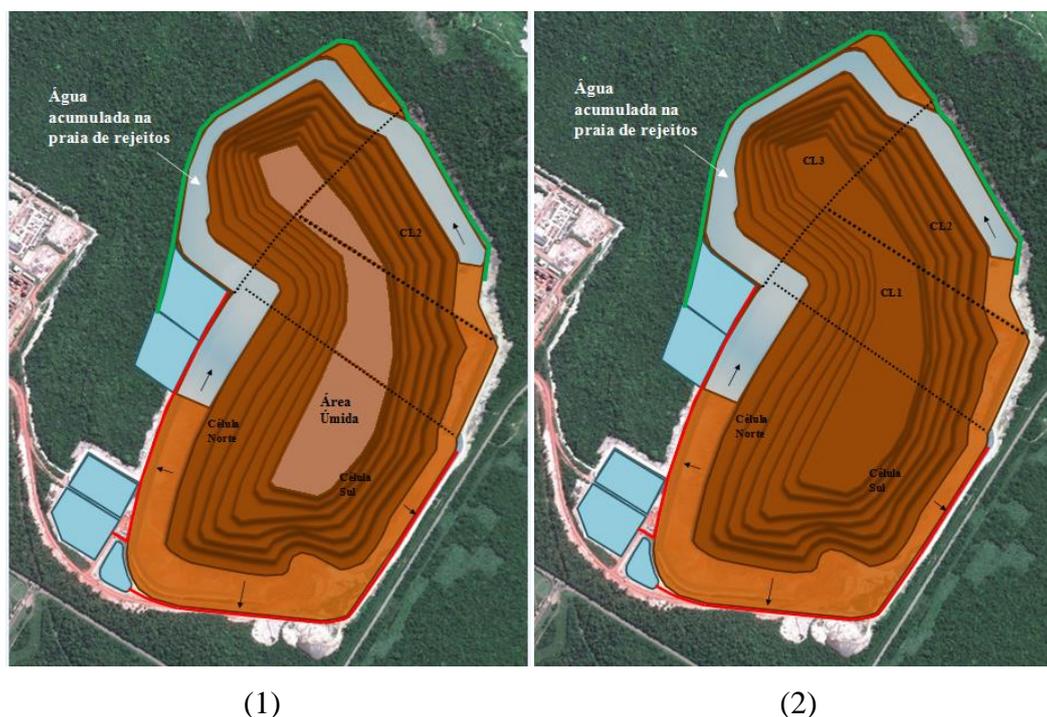


Figura 6.11 – Arranjo proposto para o DRS1 – (1) Do lado esquerdo detalhe da área úmida e (2) Do lado direito a configuração final do arranjo

O arranjo proposto para o DRS1 se resume a um ângulo geral final da pilha de cerca de 5° e uma camada de resíduo filtrado de aproximadamente 10,0 m de altura, como mostra a Figura 6.12.

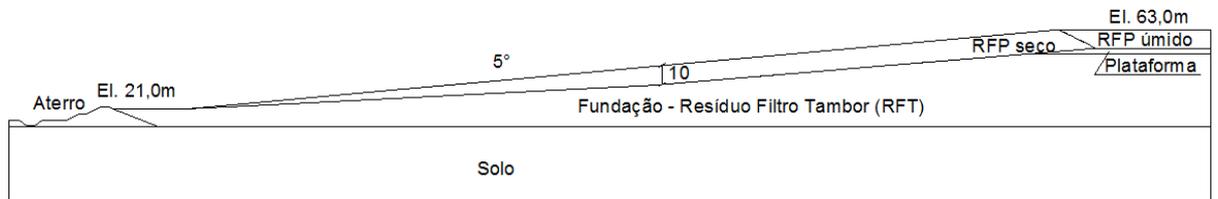


Figura 6.12 – Configuração final do arranjo proposto – Seção analisada

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS COMPLEMENTARES

7.1 – CONCLUSÕES

O objetivo geral do presente estudo foi avaliar duas metodologias de disposição em pilhas de resíduo filtrado da produção de alumina que pudessem proporcionar condições ambientais e de segurança satisfatórias, de modo a se tornar uma alternativa de disposição de resíduos para as refinarias.

Foram apresentados resultados de ensaios de campo e laboratório para caracterização geotécnica do resíduo da produção de alumina de duas refinarias diferentes, o que permitiu obter parâmetros para o desenvolvimento dos estudos aqui apresentados e que puderam também fornecer um banco de dados para estudos futuros. Os resíduos estudados foram provenientes da produção de alumina, pelo processo Bayer, da refinaria da CBA – Companhia Brasileira de Alumínio, município de Alumínio – SP e da Alunorte, município de Barcarena – PA.

Do ponto de vista determinístico, o estudo demonstrou ser possível a disposição do resíduo proveniente da produção de alumina sobre fundações menos resistentes visando o prolongamento da vida útil e a facilidade de fechamento de estruturas convencionais existentes.

É importante destacar que o método de disposição de resíduo proposto é inédito no Brasil e, portanto, não existem dados anteriores deste processo que estejam disponíveis. Neste contexto, os estudos desenvolvidos no presente trabalho, para aplicação em um determinado projeto devem ser validados quando do conhecimento das características e propriedades do resíduo em escala real, do detalhamento do

método de disposição, bem como da obtenção de informações adicionais da área de disposição.

O estudo de caso considerou duas estruturas com características geotécnicas e geométricas bem particulares, localizadas em regiões brasileiras que apresentam regimes pluviométricos distintos.

As duas principais motivações para esta pesquisa foram:

- As indústrias vêm buscando desenvolver metodologias de disposição de rejeito/resíduo que ocupem menores áreas, reduzindo os impactos ambientais, priorizando a segurança e que ainda proporcionem um aumento da vida útil de depósitos já existentes. Dessa forma, a técnica de desaguamento do resíduo por filtros prensa tem se mostrado promissora, tornando-se uma solução para a obtenção de maiores ângulos de disposição e conseqüentemente ocupando menores áreas. Além disso, é utilizada uma menor quantidade de água nos depósitos, minimizando assim o potencial de danos em caso de ruptura.
- A importância da realização de análises probabilísticas em estruturas geotécnicas. As análises probabilísticas permitem a consideração das incertezas quanto aos parâmetros dos materiais e são cada vez mais exigidas pelas empresas de mineração em seus projetos.

As análises de estabilidade realizadas nos arranjos propostos, com base nos dados dos ensaios de laboratório e de campo executados com o resíduo das duas refinarias, apresentaram fatores de segurança aceitáveis para as seguintes geometrias:

- **Barragem Palmital, com o resíduo do Filtro Prensa disposto sobre o resíduo bombeado;**

- **DRS1, com o resíduo do Filtro Prensa disposto sobre o resíduo de Filtro Tambor.**

As análises de estabilidade indicaram que a camada que governa a estabilidade da pilha é a camada formada pelo resíduo da fundação, que é menos resistente, resultando um ângulo geral final da pilha de cerca de 5° a 6°.

Observa-se que, a geometria das bermas do talude das pilhas de resíduo na conformação final para fechamento das estruturas não foi avaliada. A Tabela 7.1 apresenta um resumo, comparando os dados utilizados nos dois estudos de caso.

Tabela 7.1 – Tabela Resumo – Dados comparativos dos estudos de caso

DADOS		CBA	ALUNORTE
Produção anual de lama vermelha (base úmida) considerada nos estudos (toneladas/ano)		1.752.000	7.500.000
Teor de umidade (%)		50	40
Produção anual de lama vermelha (base seca) considerada nos estudos (toneladas/ano)		876.000	4.500.000
Período chuvoso (meses/ano)		6	8
Precipitação total anual (mm)		1.354	1.950
Produção anual de resíduo filtrado TS=78% (toneladas/ano)		1.366.560	5.850.000
Resíduo a ser depositado na zona seca ($P < 10\text{mm}$) (%)		85	85
Resíduo a ser depositado na zona úmida ($P \geq 10\text{mm}$) (%)		15	15
Produção anual de resíduo filtrado “seco” (toneladas/ano)		1.161.576	4.972.500
Produção anual de resíduo filtrado “úmido” (toneladas/ano)		204.984	877.500
Base do Arranjo	Tipo de Material	Filito	Solo
	Peso Específico (kN/m^3)	20,0	18,5
	Ângulo de atrito ($^\circ$)	29,0	28,0
	Coesão (kPa)	170,0	5,0

Tabela 7.1 – Tabela Resumo – Dados comparativos dos estudos de caso – Continuação

DADOS		CBA	ALUNORTE
Fundação	Tipo de Estrutura	Barragem	Depósito de Resíduo
	Método de Disposição	Bombeamento	Filtro tambor
	Peso Específico (kN/m ³)	16,0	18,25
	Resistência não drenada - Su (kPa/m) – Incremento com a profundidade	1,5 x prof.	10 + 2,75 x prof.
	Teor de Sólidos aproximado (%)	35,0	60,0
Resíduo Filtrado “Seco”	Equipamento de Filtragem	Filtro Prensa	Filtro Prensa
	Peso Específico (kN/m ³)	17,6	17,9
	Ângulo de atrito (°)	26,0	29,0
	Coesão (kPa)	50,0	50,0
	Ru	0,25	0,25
	Teor de Sólidos aproximado (%)	78,0	78,0
Resíduo Filtrado “Úmido”	Peso Específico (kN/m ³)	18,25	18,25
	Resistência não drenada - Su (kPa/m) – Incremento com a profundidade	10 + 3,5 x prof.	10 + 3,5 x prof.
	Teor de Sólidos aproximado (%)	70,0	70,0
Plataforma	Peso Específico (kN/m ³)	-	19,5
	Ângulo de atrito (°)	-	28,0
	Coesão (kPa)	-	4,0
Aterro Compactado	Tipo de Estrutura	Maçãos	Diques
	Peso Específico (kN/m ³)	20,0	19,5
	Ângulo de atrito (°)	25,0	27,0
	Coesão (kPa)	40,0	5,0

Os principais resultados obtidos nos estudos de caso são mostrados na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 – Principais resultados obtidos dos estudos de caso

PRINCIPAIS RESULTADOS OBTIDOS	CBA	ALUNORTE
Ângulo de repouso da pilha de resíduo filtrado (°)	6 (Maciços/Praias)	5
	19 (Margens)	
Espessura máxima da camada de resíduo filtrado (m)	17,0 (Maciços/Praias)	10
	67,0 (Margens)	
Cota máxima do arranjo proposto (m)	870,0 (Maciços/Praias)	63,0
	937,0 (Margens)	
Fator de Segurança – Análise Determinística (FS)	1,75 (Maciços/Praias)	1,55
	1,70 (Margens)	
Probabilidade de Ruptura (P_f) – FOSM	$3,8 \times 10^{-6}$ (Maciços/Praias)	$1,1 \times 10^{-1}$
	$2,7 \times 10^{-5}$ (Margens)	
Probabilidade de Ruptura (P_f) – Monte Carlo	$8,0 \times 10^{-5}$ (Maciços/Praias)	$7,6 \times 10^{-2}$
	$3,8 \times 10^{-4}$ (Margens)	
Probabilidade de Ruptura (P_f) – Rosenblueth	$8,1 \times 10^{-4}$ (Maciços/Praias)	$1,9 \times 10^{-1}$
	$4,2 \times 10^{-3}$ (Margens)	

O método FOSM utilizado nas análises probabilísticas possibilitou avaliar a influência de cada parâmetro na variabilidade do fator de segurança, permitindo a otimização das análises do método Monte Carlo.

Com os resultados das análises de estabilidade determinísticas, conclui-se que é possível formar pilhas estáveis (com fatores de segurança acima de 1,5) sobre fundações menos resistentes, com o resíduo da produção de alumina, filtrado por filtros prensa. Porém, ressalta-se que a operação deve ser feita de forma a não permitir que haja saturação da pilha, para que não ocorra a redução do fator de segurança.

A geometria final proposta para o DRS1 da Alunorte apresentou maior probabilidade de ruptura quando comparada ao arranjo proposto para a CBA, entre 10^{-2} e 10^{-1} (métodos FOSM e Monte Carlo). Quando comparamos esses valores ao mostrado na Figura 2.33 do Capítulo 2, para barragens, temos que os mesmos não são toleráveis para este tipo de estrutura. Os valores de probabilidade de ruptura obtidos para o arranjo da CBA ficaram entre 10^{-4} e 10^{-6} (métodos FOSM e Monte Carlo), ou seja, inferiores ao valor de 10^{-4} , mostrados na Figura 2.33, o que leva a concluir que o arranjo proposto para a CBA é mais estável do ponto de vista probabilístico. É importante mencionar que, os valores de probabilidade de ruptura obtidos estão relacionados às distribuições estatísticas adotadas nos modelos. A adoção de diferentes distribuições estatísticas pode resultar em diferentes valores de probabilidade de ruptura.

Apesar da probabilidade de ruptura obtida para o arranjo da Alunorte ser muito maior que o da CBA, a confiabilidade dos dados da Alunorte é muito superior ao da CBA devido à quantidade e qualidade dos ensaios realizados no material da fundação (camada que mais influencia no resultado da probabilidade de ruptura). Devido a essas incertezas nos parâmetros da fundação da CBA, os resultados de análises probabilísticas encontradas para a Alunorte são mais ajustados à realidade, apesar da grande variabilidade da resistência não drenada da fundação da Alunorte.

A grande desvantagem do arranjo proposto para a CBA, em caso de uma ruptura hipotética, é a fluidez do resíduo de fundação que poderá atingir grandes distâncias. Essa fundação com baixo teor de sólidos dificulta muito o lançamento do resíduo filtrado que tem que ser realizado com muita cautela, somente após o bombeamento da água e execução de aterro de conquista para ganho de suporte.

Já a principal desvantagem do arranjo da Alunorte é com relação à geometria de sua fundação que possui uma elevada cota central, o que permite o lançamento de apenas uma espessura reduzida de resíduo filtrado.

Para geração de resíduo do filtro prensa em escala real, as premissas consideradas na caracterização pluviométrica da região e balanço de massas devem ser confirmadas executando aterro experimental. O ângulo final da conformação das pilhas deve ser reavaliado com base na experiência a ser adquirida nos primeiros meses de lançamento do resíduo proveniente do filtro prensa.

Ressalta-se que os arranjos aqui propostos são hipotéticos e trata-se de uma sugestão de disposição de resíduo filtrado de alumina, buscando um melhor aproveitamento de áreas de disposição já existentes. Para que a tecnologia apresentada possa ser colocada em prática, são necessários estudos mais detalhados do ponto de vista hidrológico e geotécnico.

O estudo não objetivou a escolha da melhor alternativa desenvolvida. Para que a escolha do melhor arranjo seja possível, do ponto de vista da análise de risco, seria necessário uma avaliação considerando o cálculo do risco de cada arranjo (probabilidade de ruptura x custo das consequências).

Fechamento Progressivo

Uma das grandes vantagens da disposição de rejeitos/resíduos filtrados é a facilidade da recuperação da área por meio da revegetação, sendo possível iniciá-la desde o começo da vida útil da estrutura, contribuindo para o controle de poeira e da erosão. Dessa maneira, as facilidades de fechamento e recuperação das áreas utilizadas para a disposição de rejeito/resíduo filtrado podem fazer uma grande diferença nos custos em comparação com as disposições tradicionais em forma de polpa ou pasta.

Para o fechamento dessas estruturas deverá ser prevista a implantação de sistema de drenagem superficial e de instrumentação para o monitoramento geotécnico das mesmas.

Durante a operação das pilhas de resíduo filtrado sugere-se a construção de estruturas de drenagem superficial provisórias a serem escavadas no próprio resíduo já compactado. Estes dispositivos terão a função de coletar o escoamento superficial da plataforma em operação e conduzi-lo até às descidas de água definitivas. O sistema de drenagem superficial definitivo poderá consistir na implantação de estruturas como canaletas de berma, descidas de água em degraus, caixas coletoras e bueiros de greide. Assim, a implantação destas estruturas ocorre de forma progressiva e ao final de cada período seco, será necessária a extensão das descidas de água até a plataforma em operação, conectando-se assim, com a canaleta temporária escavada no próprio resíduo compactado. A instrumentação poderá ser composta de piezômetros, medidores de nível de água, inclinômetros e marcos superficiais.

7.2 – SUGESTÕES PARA PESQUISAS COMPLEMENTARES

A tecnologia de desaguamento do resíduo com filtros prensa é recente e as características geotécnicas deste material para a sua disposição de forma eficiente ainda são pouco conhecidas. As dificuldades quanto à obtenção de licenciamento por parte das indústrias torna cada vez maior a necessidade de aproveitamento das áreas já disponíveis.

A seguir, são sugeridos tópicos a serem estudados futuramente, de modo a complementar o estudo realizado:

- Avaliar o custo-benefício da metodologia de disposição em pilhas de resíduo filtrado por filtro prensa, comparando com as metodologias tradicionais como barragens e “dry stacking”;
- Estender os estudos 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;

- Realizar estudos de adensamento do resíduo filtrado disposto nas fundações com características de baixa resistência apresentadas;
- 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;
- Estender os estudos de alternativas de zoneamentos das pilhas de resíduos, diferentes da apresentada neste estudo, avaliando a estabilidade do resíduo disposto considerando seu balanço de massa para períodos de seca e de chuva;
- Avaliar a influência da soda cáustica no comportamento geotécnico da lama vermelha;
- Estudar diferentes formas de acesso de equipamentos para dispor o resíduo nas pilhas, e também avaliar quais são os modelos de equipamentos mais adequados para a compactação do resíduo filtrado;
- Realizar estudos de percolação de água superficial e subterrânea nas pilhas de resíduo filtrado;
- Avaliar a estabilidade das pilhas de resíduo filtrado para diferentes condições de compactação prevendo o comportamento do material em diversas épocas do ano;
- Aprofundar o estudo de fechamento progressivo desse tipo de metodologia de disposição, assim como suas principais vantagens;
- Realizar análise de risco dos arranjos propostos de forma a confirmar a viabilidade do empilhamento e auxiliar nas decisões de projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Access Mining Consultants (2003). Examination of Revegetation Methodologies for Dry Stack Tailings in Northern Environments. Mining Environmental Research Group. Government of Yukon. 35p.

Alves, A.R.C. (2009). Disposição Compartilhada de Rejeito e Estéril Gerados no Processo de Extração de Minério de Ferro. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 183p.

Amarante, S.C. (2002). Filtragem de Minérios de Ferro – Comparação entre Métodos de Filtragem de Laboratório: Testes de Folha e de Funil de Büchner. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. 125p.

Andritz Separation (2013) - 7th Annual Grand Junction 2013 - Water and Conference - Dewatering Technologies Comparison.

Assis, A. P., Espósito, T. J., Gardoni, M. G. & Silva, P. D. E. A. (2001). Métodos Estatísticos Aplicados a Geotecnia. Publicação G.AP-002/01, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 177p.

Assis, A.P. (2003). Mecânica das Rochas – Apostila G.AP-001/03. Universidade de Brasília.

Ávila, J. P.; Nery, K. D.; Freire Neto, J. P.; Pantoja, R. (2012). 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.

Baecher, G. B. & Christian, J. T. (2003). Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering. John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 618p.

Bánvölgyi, G. e Huan, T. M. (2009). De-Watering, Disposal and Utilization of Red Mud: State of the Art and Emerging Technologies.

CBA, (2013). Projeto Utilização da Água da Barragem de Resíduos de Bauxita. 9ª Edição do Prêmio FIESP de Conservação e Reúso de Água. 11p.

CBA, (2014). Aumento da Vida Útil do Palmital. Revista Minérios, 24p.

Christian, J. T., Ladd, C. C. & Baecher, G. B. (1994). Reliability applied to Slope Stability Analysis. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 120(12): 2180-2207.

Davies, M.P. e Rice, S. (2001). An Alternative to Conventional Tailing Management – Dry Stack Filtered Tailings. In Proceedings of the Eighth Internacional Conference on Tailings and Mine Waste. Fort Collins, Colorado, US: Balkema. 441-422 pp.

Davies, M.P. (2004). An Alternative to Conventional Tailing Management – “Dry Stack” Filtered Tailings. In Proceedings Tailings and Mine Waste '01, Balkema.

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

Dell'Avanzi, E.; Sayão, A.S.F.J., (1998). Avaliação da Probabilidade de Ruptura de Taludes. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 11, Cobramseg, Brasília, Anais, Brasília, V.2, P.1289- 1295.

EAA (2015). European Aluminium Association. Acessado em Maio de 2015.

Espósito, T.J. (1995). Controle Geotécnico da Construção da Barragem de Rejeito – Análise da Estabilidade de Taludes e Estudos de Percolação. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 159p.

Filtros de Tambores Rotativos. Disponível em <http://www.meiofiltrante.com.br>. Acessado em Maio de 2015.

Filtro Prensa de Placas Verticais. Disponível em <http://www.grabe.com.br/filtroprensa>. Acessado em Maio de 2015.

Giani, G. P. (1992). Rock Slope Stability Analysis. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 361p.

Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering – P. K. Robertson and K. L. Cabal (November 2012), 5th Edition. Manual do Software CPeT-IT da Empresa Geologismiki.

Guimarães, N.C (2011). Filtragem de Rejeitos de Minério de Ferro visando a sua Disposição em Pilhas. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 129p.

IAI (2008). International Aluminium Institute. www.world-aluminium.org. Acessado em Maio de 2015.

IAI (2015). International Aluminium Institute. www.world-aluminium.org. Acessado em Maio de 2015.

IBRAM (18/12/2013). Demanda por Alumínio no Brasil dobra nos Últimos Dez Anos. Disponível em http://www.ibram.org.br/150/15001002.asp?ttcd_chave=223213.

Lara, J.L., Pornillos, E.U. E Muñoz, H.E. (2013). Geotechnical-Geochemical and Operational Considerations for the Application for Dry Stacking Tailings Deposits – State-of-the-Art. Paste 2013 – R.J. Jewell, A.B. Fourie, Caldwell, J. e Pimenta, J. Belo Horizonte, Brasil.

Lupo, F. e Hall, P.E. (2010). Dry Stack Tailings Design Considerations. Disponível em www.infomine.com/publications/docs/lupo2010.pdf.

Maia, J. A. C. (2003). Métodos Probabilísticos aplicados à Estabilidade de Taludes e Cavidades em Rocha. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-099/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 192p.

Maia, J. A. C. & Assis, A. P. (2004). Etapas para Estudos Probabilísticos aplicados a Geotecnia. Geo-Jovem 2004 – 1º Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos, ABMS, São Carlos, SP, CD-ROM, 6p.

Maia, J. A. C. (2007). Modelagem Probabilística da Zona Plástica de Obras Subterrâneas em Meios Rochosos. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-040/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 161p.

Massola, C.P. (2008). Flotação Reversa da Bauxita de Mirai, MG. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 85p.

Messano, A. J. G. P. (2010). Tipos de Filtros. 21p.

Nery, K. D.; Villar, L. F. S.; Moreno, R. A.; Freire Neto, J. P.; Scarmínio, M.; Júnior, R. S. (2013). 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.

Nery, K.D. (2013). Caracterização Geotécnica e Compactação de um Resíduo da Produção de Alumina (Lama Vermelha) Desaguado por Filtro Prensa. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 112p.

Peixoto, C. L. P. (2012). Proposta de Nova Metodologia de Desaguamento de Rejeitos em Polpa. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG, 93p.

Portes, A. M. C. (2013). Avaliação da Disposição de Rejeitos de Minério de Ferro nas Consistências Polpa e Torta. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 155p.

Ribeiro, D. V. (2011). Influência da Temperatura de Calcinação nas Propriedades Cimentícias do Resíduo de Bauxita. Relatório Científico Final de Pós-Doutorado, apresentado à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP). São Carlos, SP, 78p.

Ribeiro, D. V, Silva, A. M. S., Labrincha, J. A., Morelli, M. R. (2012). Estudo das Reações Alcalis-Sílica associadas ao Uso da Lama Vermelha em Argamassas Colantes e de Revestimento.

Rocscience (2013). Analysis of Slope Stability Course.

Rosenblueth, E. (1975). Point Estimates for Probability Moments. Proceedings of the National Academy of Sciences of The United States of America, USA, 72(10): 3812–3814.

Sandroni, S. S. & Sayão, A. S. F. (1993). The Use of Relative Probability of Failure in the Design of Open Pit Mine Slopes. Innovative Mine Design for the 21st Century, Balkema, Rotterdam, The Netherlands: 21–24.

Silva, E. B. F., Alves, M. C. M., Motta, M. D. (2007). Lama Vermelha da Indústria de Beneficiamento de Alumina: Produção, Características, Disposição e Aplicações Alternativas. Revista Matéria, V. 12, N. 2, P. 322-338.

Souza, J. A. S. (2010). Estudo e Avaliação do Uso de Resíduos do Processo Bayer como Matéria-Prima na Produção de Agregados Sintéticos para a Construção Civil. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Pará. Belém, PA, 154p.

Tabela de Correlações entre Valores de SPT e Tipo de Solo, elaborada pela Empresa Geofast em 2012.

Tailings.info. Dry Stacking of Tailings (Filtered Tailings). Disponível em <http://www.tailings.info/disposal/drystack.htm>. Acessado em Maio de 2015.

UFG (2013). Apostila sobre Separação Sólido Líquido. Departamento de Engenharia de Minas. Goiás, GO, 22p. Apostila sem nome de autores disponíveis.

UFOP (2004). Oliveira, M. L. M.; Luz, J. A. M.; Lacerda, C. M. M. Espessamento e Filtragem. Departamento de Engenharia de Minas. Ouro Preto, MG, 122p.

Ulrich, B. e Coffin, J. (2013). Considerations for Tailings Facility Design and Operation using Filtered Tailings. Paste 2013 – R.J. Jewell, A.B. Fourie, Caldwell, J. e Pimenta, J. Belo Horizonte, Brasil.

Valadão, G. E. S. (2008). Separação Sólido-Líquido. Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

Valerio, M; Clayton, C. D'Ambra, S. & Yan, C. (2013). An Application of a Reliability based Method to Evaluate Open Pit Slope Stability. Slope Stability 2013, Brisbane, Australia.

Villar, L. F. S. (2002). Estudo do Adensamento e Ressecamento de Resíduos de Mineração e Processamento de Bauxita. Tese de Doutorado (Departamento de Engenharia Civil), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 443p.

Wang, S; Ang, H.M; Tadó, M.O., (2008). Novel Applications of Red Mud as Coagulant, Adsorbent and Catalyst for Environmentally Benign Processes. Chemosphere 72, 1621-1635.

Wesseloo, J. & Read, J. Guidelines for Open Pit Slope Design, (2009). Editors: John Read & Peter Stacey. Acceptance Criteria, 221 – 236.

Whitman, R.V. (1984). Evaluating Calculated Risk in Geotechnical Engineering. Journal of Geotechnical Engineering, 110:143-188.

Willie & Mah (2004). Rock Slope Stability.