



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**CURSO DE MESTRADO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES**

**CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E AVALIAÇÃO DA  
COMPACTAÇÃO DE UM RESÍDUO DA PRODUÇÃO DE  
ALUMINA (LAMA VERMELHA) DESAGUADO POR FILTRO  
PRENSA**

**KELLEN DIAS NERY**

Belo Horizonte, 29 de novembro de 2013

Kellen Dias Nery

**CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E AVALIAÇÃO DA  
COMPACTAÇÃO DE UM RESÍDUO DA PRODUÇÃO DE  
ALUMINA (LAMA VERMELHA) DESAGUADO POR FILTRO  
PRENSA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geotecnia e Transportes.

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Lúcio Flávio de Souza Villar

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG  
2013

N456c Nery, Kellen Dias.  
Caracterização geotécnica e avaliação da compactação de um resíduo da produção de alumina (lama vermelha) desaguado por filtro prensa [manuscrito] / Kellen Dias Nery. - 2013.  
xv, 143 f., enc.: il.

Orientador: Lúcio Flávio de Souza Villar.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Inclui anexos.

Bibliografia: f. 85-91.

1. Mecânica do solo - Teses. 2. Alumina - Teses. I. Villar, Lúcio Flávio de Souza. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 624.13(043)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES**



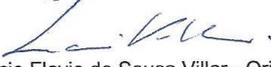
## FOLHA DE APROVAÇÃO

### **CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E AVALIAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DE UM RESÍDUO DA PRODUÇÃO DE ALUMINA (LAMA VERMELHA) DESAGUADO POR FILTRO PRENSA**

**KELLEN DIAS NERY**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOTECNIA E TRANSPORTES, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOTECNIA E TRANSPORTES, área de concentração GEOTECNIA.

Aprovada em 29 de novembro de 2013, pela banca constituída pelos membros:

  
Prof(a). Lucio Flavio de Sousa Villar - Orientador  
UFMG

  
Prof(a). Terezinha de Jesus Espósito Barbosa  
UFMG

  
Prof(a). Roberto Galery  
UFMG

Belo Horizonte, 29 de novembro de 2013.

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais, Cida e Edvard, que se dedicaram a me proporcionar as melhores condições de estudo para que eu pudesse alcançar meus objetivos. Amo vocês!

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pela vida e por toda benção, me proporcionando saúde e força para alcançar meus objetivos.

Ao Prof. Lúcio Flávio de Souza Villar, pela colaboração, ensinamentos e motivação na orientação desta dissertação.

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

À CBA – Companhia Brasileira de Alumínio, em especial, ao Rodrigo Moreno e Roberto Seno por concederem a autorização da utilização dos dados para esta pesquisa.

Aos meus colegas de trabalho da Pimenta de Ávila Consultoria e amigos, Luciana Lima, Mônica Aleixo, Rodrigo Rodrigues, Camila Queiroz e especialmente ao diretor Milton Scarmínio e ao coordenador João Pimenta pelo constante incentivo, compreensão e conhecimentos compartilhados.

À minha família, irmãos, tios e primos que sempre acreditaram em mim e no meu potencial.

Especialmente, ao meu esposo Sérgio pelo companheirismo, amor, dedicação, auxílio, durante todo o caminho, desde o início até a conclusão do mestrado, sempre ao meu lado, incondicionalmente, me incentivando e me encorajando a enfrentar todas as dificuldades. A você, o meu amor eterno.

À minha filha Letícia, razão da minha vida, que me acompanhou na etapa final do mestrado, dentro da minha barriga, durante toda a gestação, em cada momento do desenvolvimento deste trabalho, me dando forças e motivação para a conclusão do mesmo, bem como me proporcionando momentos de calma, tranquilidade e felicidade, em meio a tanto esforço e empenho neste trabalho.

*"Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito..."*

(Marthin Luther King)

# SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS .....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	x
LISTA DE TABELAS E QUADROS .....	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	xiii
RESUMO .....	xiv
ABSTRACT .....	xv
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Objetivo geral.....	3
1.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 Organização da dissertação.....	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1 Resíduo da produção de alumina (lama vermelha) .....	5
2.2 Métodos de disposição de rejeitos finos .....	7
2.2.1 Métodos convencionais .....	9
2.2.2 Métodos de disposição a seco.....	10
2.3 Principais fatores para a escolha do método de disposição .....	13
2.4 Filtragem do rejeito/resíduo .....	14
2.4.1 Filtros à vácuo .....	18
2.5 Comportamento geotécnico de solos compactados.....	30
2.6 Breve abordagem sobre solos não saturados e curva característica de sucção .....	33
2.7 Breve descrição sobre ensaios triaxiais PN (pressão neutra).....	40
3 METODOLOGIA .....	41
3.1 O resíduo estudado .....	41
3.2 Modelo de filtro prensa piloto utilizado .....	41

3.3	Área teste para coleta de amostras .....	42
3.4	Amostras para ensaios de laboratório .....	44
3.5	Ensaio de laboratório .....	44
3.5.1	Preparação das amostras e condições de moldagem dos corpos de prova .....	44
3.5.2	Procedimentos Específicos para a realização dos ensaios .....	46
4	APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	53
4.1	Resultados obtidos na Área Teste .....	53
4.2	Ensaio de Caracterização .....	53
4.2.1	Teor de umidade higroscópica.....	53
4.2.2	Peso específico dos grãos.....	54
4.2.3	Peso específico natural.....	55
4.2.4	Granulometria .....	55
4.2.5	Limites de consistência .....	58
4.3	Difração por Raio X .....	60
4.4	Microscopia Eletrônica por varredura .....	61
4.5	Ensaio de Compactação .....	61
4.6	Moldagem dos corpos de prova para os ensaios especiais .....	64
4.7	Ensaio de Permeabilidade .....	64
4.8	Curva Característica de Sucção.....	67
4.9	Ensaio de Adensamento Unidimensional.....	67
4.10	Ensaio Triaxiais UU.....	73
4.11	Ensaio Triaxiais PN .....	77
4.12	Avaliação de ângulo global de pilha de resíduo .....	79
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	82
5.1	Conclusões .....	82
5.2	Sugestões para Estudos Futuros .....	84

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86
ANEXO A.....	93
ANEXO B.....	107

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras Latinas

A	área transversal ao fluxo (área filtrante)
a	uma aproximação do valor de entrada de ar
$a_v$	coeficiente de compressibilidade
Ab	albita
$\bar{B}$	parâmetro de poropressão = relação entre a poropressão e a tensão principal maior
c	coesão em termos de tensões totais
$c'$	coesão em termos de tensões efetivas
$C_c$	Índice de compressão
$C_r$	Índice de recompressão
CR	$C_c/(1+e_i)$
Ct	caulinita
$c_v$	coeficiente de adensamento
e	número natural, 2,71828...
e	índice de vazios
$e_f$	índice de vazios final do corpo de prova
$e_i$	índice de vazios inicial do corpo de prova
$H_f$	altura final do corpo de prova
$H_i$	altura inicial do corpo de prova
K	coeficiente de filtragem ou permeabilidade do leito
k	coeficiente de permeabilidade
$K_c$	constante de Kozeny que depende da granulometria, forma e porosidade
L	espessura do meio filtrante + torta

m	um parâmetro que está relacionado com o teor de umidade residual
$m_v$	coeficiente de compressibilidade volumétrica
Mv	muscovita
n	uma parâmetro que controla a inclinação no ponto de inflexão na curva característica do solo
PN	pressão neutra
Q	fluxo do filtrado
$R = L/K$	resistência oferecida ao leito de filtrado
ru	coeficiente de geração de poropressão
S	grau de saturação
$S_{ad}$	sucção de adsorção
$S_c$	sucção capilar
Sd	sodalita
SE	área superficial específica
$S_m$	sucção matricial
$S_{om}$	sucção osmótica
$S_r$	saturação residual
$S_t$	sucção total
$u_1$	poropressão gerada
$u_a$	pressão de ar
$u_w$	pressão de água
w	umidade gravimétrica
$w_f$	teor de umidade final do corpo de prova
$w_i$	teor de umidade inicial do corpo de prova
$w_h$	umidade higroscópica
$w_{ót}$	umidade ótima obtida do ensaio de compactação na energia Proctor Normal

## Letras Gregas

$\mu$	viscosidade do filtrado
$\theta$	umidade volumétrica
$\rho_s$	massa específica dos sólidos
$\varepsilon$	índice de vazios do leito
$\psi$	sucção do solo
$\psi_r$	sucção correspondente ao teor de umidade residual, $\theta_r$
$\theta_r$	teor de umidade volumétrica residual
$\sigma_3$	tensão normal principal menor
$\sigma_3'$	tensão normal confinante efetiva
$\sigma_1$	tensão normal principal maior
$\sigma_v'$	Tensão normal efetiva vertical
$\sigma_p'$	Tensão normal de pré-adensamento
$\gamma_s$	peso específico dos grãos
$\gamma$	peso específico natural
$\gamma_d$	peso específico seco
$\phi$	ângulo de atrito em termos de tensões totais
$\phi'$	ângulo de atrito em termos de tensões efetivas

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – Resíduo de alumina após a descarga do filtro prensa. ....	3
FIGURA 2.1 – Fluxograma da fabricação de Alumina pelo processo Bayer (LIMA, 2008). ....	6
FIGURA 2.2 – Concentração/Densidade da lama <i>versus</i> resistência não drenada (Modificado ICOLD, 2002).....	8
FIGURA 2.3 – Métodos de alteamento de barragem (LIMA, 2008).....	9
FIGURA 2.4 – Classificação do rejeito pelo grau de desaguamento (adaptado de DAVIES, 2011).15	
FIGURA 2.5 – Desenho esquemático do sistema de filtragem à vácuo (GUIMARÃES, 2011). ....	19
FIGURA 2.6 – Fluxograma das classes dos filtros a vácuo (adaptado de SANTOS, 2004?).....	20
FIGURA 2.7 – Representação esquemática de um filtro de disco convencional (CHAVES ET AL, 2010). ....	21
FIGURA 2.8 – Válvula de vácuo para filtro de disco convencional (GUIMARÃES, 2011). ....	21
FIGURA 2.9 – Filtro de disco convencional Modelo VSF 120/10 (GUIMARÃES, 2011). ....	22
FIGURA 2.10 – Filtro horizontal de correia (GUIMARÃES, 2011). ....	23
FIGURA 2.11 – Filtro horizontal de correia (FLSMIDTH, 2008).....	23
FIGURA 2.12 – Desenho esquemático de filtro horizontal de correia ( <a href="http://www.pharmaceutical-int.com/article/larox-upgrades-the-patented-pannevis-rbcdv-horizontal-vacuum-belt-filter.html">http://www.pharmaceutical-int.com/article/larox-upgrades-the-patented-pannevis-rbcdv-horizontal-vacuum-belt-filter.html</a> ). .	24
FIGURA 2.13 – Exemplo de filtro tambor ( <a href="http://www.raldyperu.com/filtros.html">http://www.raldyperu.com/filtros.html</a> ). ....	26
FIGURA 2.14 – Filtro prensa de placas verticais (ANDRITZ SEPARATION (disponível em <a href="http://www.filtraguide.com">www.filtraguide.com</a> - Acesso em 20 de Outubro de 2013)).....	26
FIGURA 2.15 – Ciclo de operação dos filtros prensa com placas tipo câmara (GUIMARÃES, 2011). ....	27
FIGURA 2.16 – Ciclo de operação dos filtros prensa com placas tipo diafragma (adaptado de ANDRITZ, 2013).....	28
FIGURA 2.17 – Filtro de pressão vertical convencional (Larox). ....	28
FIGURA 2.18 – Ciclo de um filtro de pressão vertical (Larox). ....	29
FIGURA 2.19 – Influência da energia de compactação na curva de compactação de um mesmo solo (modificado de DNIT, 2006).....	32
FIGURA 2.20 – Estrutura de solos compactados. (adaptado de LAMBE, 1958).....	32
FIGURA 2.21 – Curvas de compactação de diferentes tipos de solo, para uma mesma energia de compactação (modificado de PINTO, 2006).....	34
FIGURA 2.22 – Curva característica típica de um solo siltoso (adaptado de Fredlund e Xing, 1994). ....	35
FIGURA 2.23 – Curvas características típicas para diferentes tipos de solos (adaptado de Fredlund e Xing, 1994).....	36
FIGURA 2.24 – Curva característica bimodal (adaptado de Feuerharmel et al, 2005). ....	37
FIGURA 2.25 – Comparação entre várias técnicas de medição de sucção (Villar, 2002). ....	38
FIGURA 3.1 – Filtro prensa piloto da Diemme utilizado no desaguamento do resíduo estudado. ..	41
FIGURA 3.2 – Içamento dos sacos pelo caminhão Munck para simulação da formação da pilha de estoque.....	43
FIGURA 3.3 – Simulação da formação da pilha de estoque.....	43

FIGURA 3.4 – Câmara de Richard aberta com a placa cerâmica e algumas amostras de solo sobre ela (Custódio, 2009).	49
FIGURA 4.1 – Curvas granulométricas.	57
FIGURA 4.2 – Carta de Plasticidade.	59
FIGURA 4.3 – Resultado da Difração Raio X.	60
FIGURA 4.4 – Microscopia Eletrônica – 100 $\mu\text{m}$ – Mag. 500 X	62
FIGURA 4.5 – Microscopia Eletrônica – 10 $\mu\text{m}$ – Mag. 1,00 K X.	62
FIGURA 4.6 – Microscopia Eletrônica – 10 $\mu\text{m}$ – Mag. 2,00 K X.	63
FIGURA 4.7 – Curvas de compactação	64
FIGURA 4.8 – Coeficiente de Permeabilidade x Índice de Vazios dos corpos de prova moldados a partir da amostra deformada	66
FIGURA 4.9 – Coeficiente de Permeabilidade x Índice de Vazios dos corpos de prova talhados a partir das amostras indeformadas (blocos)	66
FIGURA 4.10 – Variação do índice de vazios em função do número de passadas do equipamento utilizado (Escavadeira Doosan SOLAR255LC-V, de 24.600 kg).	67
FIGURA 4.11 – Curvas características de sucção para os corpos de prova talhados a partir das amostras indeformadas (blocos)	68
FIGURA 4.12 – Curvas características de sucção para os corpos de prova moldados em cada condição de moldagem definida no QUADRO 3.5.	69
FIGURA 4.13 – Curvas da tensão de adensamento versus o índice de vazios, obtidas dos ensaios de adensamento unidimensional.	71
FIGURA 4.14 – Coeficiente de permeabilidade (k) medido e calculado, obtido a partir dos ensaios de adensamento unidimensional	72
FIGURA 4.15 – Círculos de Mohr – Ensaios triaxiais UU em amostras talhadas dos blocos.	74
FIGURA 4.16 – Círculos de Mohr – Ensaios triaxiais UU em amostras moldadas nas condições de compactação estabelecidas no QUADRO 3.5.	76
FIGURA 4.17 – Gráficos de coesão e ângulo de atrito versus grau de saturação	77
FIGURA 4.18 – Gráfico da poropressão (kPa) versus a tensão vertical total (kPa) obtido pelo ensaio triaxial PN nos corpos de prova talhados dos blocos indeformados.	78
FIGURA 4.19 – Gráfico da poropressão (kPa) versus a tensão vertical total (kPa) no ensaio triaxial PN nos corpos de prova moldados nas condições estabelecidas no QUADRO 3.5	79

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

TABELA 2.1 – Componentes químico-mineralógicos mais comuns nas lamas vermelhas (Li & Rutherford, 1996).....	7
TABELA 4.1 – Graus de compactação (GC) obtidos em campo para cada número de passadas do equipamento de esteiras. ....	53
TABELA 4.2 – Teor de umidade higroscópico da amostra deformada destorroada.....	53
TABELA 4.3 – Teor de umidade higroscópico das amostras obtidas a partir dos blocos indeformados, sem destorroamento das tortas.....	54
TABELA 4.4 – Peso específico dos grãos ( $\gamma_s$ ).....	54
TABELA 4.5 – Peso específico natural das amostras indeformadas e respectivos graus de compactação .....	55
TABELA 4.6 – Peso específico natural obtido em campo, para cada condição de compactação, (passadas do trator de esteira) pelo método da cravação do cilindro biselado, e respectivos graus de compactação .....	56
TABELA 4.7 – Peso específico natural da amostra deformada (“torta”) e respectivo grau de saturação.....	56
TABELA 4.8 – Frações granulométricas segundo a classificação da ABNT – NBR 6502/95.....	57
TABELA 4.9 – Limites de Consistência.....	58
TABELA 4.10 – Índice de atividade da argila .....	59
TABELA 4.11 – Resultados do ensaio de compactação.....	63
TABELA 4.12 – Resultados dos ensaios de permeabilidade à carga variável.....	65
TABELA 4.13 – Dados dos corpos de prova dos ensaios de adensamento unidimensional – antes e depois do ensaio.....	70
TABELA 4.14 – Resultados dos ensaios de Adensamento Unidimensional .....	70
TABELA 4.15 – Parâmetros de resistência.....	73
TABELA 4.16 – Resultados das análises de estabilidade.....	80
QUADRO 2.1 – Variáveis que afetam a velocidade de filtragem relativas ao sólido, torta/filtrado, polpa e ao tipo de equipamento (GUIMARÃES, 2011). ....	17
QUADRO 2.2 – Mecanismos de filtragem e os principais fornecedores (GUIMARÃES, 2011). ...	18
QUADRO 2.3 – Vantagens e Desvantagens dos filtros a vácuo. (adaptado de SANTOS, 2004?)...	20
QUADRO 2.4 – Resumo das técnicas/métodos de medição da sucção no solo (adaptado de Pan, 2010) .....	38
QUADRO 3.1 – Características do equipamento utilizado nos testes de compactação do resíduo ..	44
QUADRO 3.2 – Amostras do resíduo desaguado pelo filtro prensa utilizadas para os ensaios de laboratório.....	44
QUADRO 3.3 – Ensaio nas amostras deformadas.....	45
QUADRO 3.4 – Ensaio nas amostras indeformadas.....	46
QUADRO 3.5 – Condições de moldagem dos corpos de prova para ensaios de permeabilidade, curva característica de sucção, adensamento e ensaios triaxiais UU e PN .....	47

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
GC	Grau de compactação
IP	Índice de plasticidade
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
TS	Teor de sólidos
TTD	“Tailing Thickened Discharge” ou seja disposição de rejeito espessado
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UU	“Unconsolidated Undrained” ou seja não adensado e não drenado
VEA	Valor de entrada de ar

## RESUMO

Uma das tecnologias que tem sido estudada atualmente para a disposição de resíduos de mineração é a filtragem do mesmo utilizando filtros prensa, no qual a solução de resíduo é bombeada sob alta pressão por elementos filtrantes permeáveis, que permitem a passagem da água, retendo a parte sólida em placas filtrantes, formando tortas compactas e com elevado teor de sólidos (ou porcentagem de sólidos) (de 70% a 80%) e grau de saturação de aproximadamente 80%. Por isso, torna-se necessário o estudo das características e do comportamento do resíduo filtrado para encontrar a melhor e mais segura forma de disposição, buscando o melhor aproveitamento das áreas disponíveis.

O presente trabalho apresenta a caracterização de um resíduo da produção de alumina desaguado por filtro prensa, bem como seu comportamento geotécnico quando compactado. Para tanto, foram realizados ensaios de laboratório em amostras deformadas do resíduo, coletadas na saída de um filtro prensa piloto, e em amostras indeformadas obtidas de uma área teste realizada para a avaliação da compactação, com equipamento de esteira, do resíduo desaguado por filtro prensa. A metodologia aplicada para a execução da área teste, bem como os resultados de campo obtidos foram apresentados por NERY et al, 2013.

Pelos ensaios de laboratório realizados, observou-se que o teor de umidade obtido no resíduo na saída do filtro prensa piloto é igual ao teor de umidade ótimo do material, sendo favorável para promover sua compactação na disposição. Quando compactado, o resíduo apresenta baixa permeabilidade, da ordem de  $10^{-8}$  a  $10^{-10}$  m/s, sendo estes resultados obtidos em corpos de prova moldados variando-se o grau de compactação entre 90% a 100% e o teor de umidade com 5% abaixo e acima da umidade ótima. Também foram avaliados os parâmetros de resistência por meio de ensaios triaxiais UU (não adensados e não drenados) em amostras não saturadas, pois a disposição deste resíduo em pilha deverá ocorrer de tal forma que não haja saturação da pilha, conseguindo-se maiores inclinações dos taludes.

***Palavras Chaves:*** lama vermelha, filtro prensa, caracterização geotécnica, compactação

## ABSTRACT

One of the technologies that have been studied currently for the disposition of mining wastes and tailings is their filtration by press filters. In this solution, the residue is pumped under high pressure by permeable filtering elements, which allow the passage of water while retaining the solid in filtering plates, forming compacted cakes with high solids content (from 70% to 80%) and degree of saturation of approximately 80%. Thus, it is necessary to study the characteristics and behavior of the filtered residue to design the best and safest form of their disposal.

This research presents the geotechnical characterization of a residue from alumina production, called “red mud”, that was dewatered by press filter, as well as its behavior when compacted to construct piles and landfills. Laboratory tests were conducted on disturbed samples of the residue collected at the output of a press filter pilot. A field test was conducted to evaluate the compaction of residue dewatered by press filter, using tracked equipment. Undisturbed samples were taken from this pilot landfill and tested in the laboratory. The methodology for implementation of the test area and the field results obtained were presented by NERY et al, 2013.

The laboratory results showed that the moisture content of the residue at the output of the press filter is equivalent to the optimum moisture content of the material, which facilitates the direct compaction in the disposal area. After compacted, the residue has low permeability, in the order of  $10^{-8}$  to  $10^{-10}$  m/s. These results were measured using undisturbed specimens collected from the field with degree of compaction between 90% to 100% and the moisture content at 5 % below and above the optimum moisture content. The strength parameters were also obtained by triaxial UU (Unconsolidated and Undrained) tests in unsaturated samples, because it is expected that this residue should will not saturate after its disposition.

**Key words:** *red mud, press filter, geotechnical characterization, compaction*

# 1 INTRODUÇÃO

O alto desenvolvimento tecnológico mundial tem impulsionado o crescimento da exploração e beneficiamento do minério, e por consequência, o aumento na geração de resíduos industriais. Isto despertou a atenção dos órgãos ambientais para as áreas de disposição destes resíduos, no que diz respeito à forma de armazenamento e à segurança do sistema de disposição. Segundo Boscov (2008), os principais tipos de resíduos produzidos pelas atividades mineradoras em termos de volume são os estéreis e os rejeitos.

Tendo em vista a diminuição dos impactos ambientais, as leis estão ficando cada vez mais exigentes para a liberação de áreas para destinação dos resíduos gerados pelas atividades minerárias e industriais. Outra dificuldade tem sido a autorização para utilizar áreas de empréstimo de materiais naturais para a construção dos barramentos para armazenamento de resíduos. Por isso, as empresas mineradoras tem se preocupado em aproveitar ao máximo as poucas áreas disponíveis com liberação ambiental para a disposição do resíduo, bem como procurar alternativas para suprir a escassez de material natural necessário à construção dos sistemas de disposição. Para tanto, as mineradoras e indústrias de beneficiamento de minério tem investido em técnicas inovadoras procurando a melhoria do comportamento do resíduo gerado.

Em alguns casos, como na indústria de alumina, por exemplo, como não há estéril no processo como ocorre na extração mineral, o rejeito gerado, também conhecido como lama vermelha, é normalmente designado no meio técnico como resíduo (um subproduto industrial). Sendo assim, nesta dissertação a lama vermelha será denominada de resíduo da produção de alumina. Para o caso do processo de lavagem da bauxita e da produção de alumina, a técnica mais utilizada no Brasil para disposição é a via úmida, na qual o resíduo gerado é diluído em água e bombeado para as áreas de armazenamento com baixos teores de sólidos. Este método gera volumes elevados para reservação e resulta em depósitos de baixa densidade e baixa capacidade de suporte, gerando sistemas mais susceptíveis a problemas de segurança geotécnica e ambiental. Além disto, segundo Davies (2011), a quantidade de água e/ou fluidos que é perdida nos vazios dos resíduos estocados, pois escoam ou evaporam das barragens, é algo a ser cada vez mais visualizado como crítico pelos órgãos regulatórios e pelos olhos da população, que insistem na avaliação de alternativas viáveis para qualquer proposta de desenvolvimento da mineração.

Visando a alteração deste cenário, a tendência nos dias de hoje é a disposição do resíduo com teores de sólidos mais altos, o que é possibilitado pela utilização de técnicas como a disposição da lama espessada em pasta e a filtragem do resíduo (Lima, 2006). Um método aplicado atualmente para a disposição do resíduo da produção de alumina (lama vermelha), que fornece uma solução

técnica que satisfaz os órgãos reguladores, é a disposição conhecida como empilhamento a seco ou “dry stacking”, em que o resíduo é filtrado por filtros tambor até um teor de sólidos (ou “porcentagem de sólidos”, termo utilizado na mineração) de aproximadamente 60%, sendo transportado até o local de disposição por caminhões ou por bombas de deslocamento positivo, descarregando o resíduo a partir de um ponto mais alto, formando uma pilha. Neste caso, a disposição é considerada segura, em que o resíduo pode ser obtido com características que torna possível a disposição como material “não-perigoso” (BÁNVÖLGYI e HUAN, 2009).

Uma das principais vantagens do “dry stacking” sobre outros sistemas de disposição é a facilidade de recuperação e fechamento progressivo da área de disposição. A estrutura geralmente pode ser desenvolvida para começar a recuperação bastante antecipadamente dentro do ciclo de vida do projeto. Isto pode ter muitas vantagens no controle de emissão de poeira, no uso de materiais para recuperação assim que eles se tornarem disponíveis e nos impactos ambientais do projeto em curto e longo prazo (DAVIES, 2011).

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

Uma vez que a filtração do resíduo resulta em um menor grau de saturação, então se torna possível trabalhá-lo com equipamentos de terraplenagem, espalhando-o e compactando-o em camadas, como um aterro usual de solo compactado, com significante resistência ao cisalhamento (ÁVILA, 2012). Ávila et al (2012) apresentaram ensaios de laboratório em um resíduo da produção de alumina realizados em corpos de prova moldados com teores de umidade próximos ao obtido com filtro prensa, e graus de compactação de 85%, 90% e 100%. Análises de estabilidade realizadas com os parâmetros obtidos destes ensaios mostraram a possibilidade de construção de aterros com ângulo externo do talude de até 23°.

Embora as tortas apresentem uma alta densidade quando elas saem das câmaras do filtro prensa, elas se quebram em pedaços menores, formando uma pilha de material solto, cuja densidade

não é elevada, conforme pode ser visualizado na FIGURA 1.1. Sendo assim, para ter um ganho de volume na disposição, é necessário compactar o material, o que resulta em aumento da resistência, redução da compressibilidade e diminuição da permeabilidade, possibilitando projetos de pilhas de disposição com maiores alturas e inclinações de taludes.



FIGURA 1.1 – Resíduo de alumina após a descarga do filtro prensa (<http://www.diemmefiltration.com/en/red-mud-filtration.html>)

## 1.1 Objetivo geral

A presente dissertação de mestrado tem como objetivo principal a caracterização geotécnica de um resíduo da produção de alumina, comumente designado como lama vermelha, quando o mesmo é desaguado por filtro prensa.

## 1.2 Objetivos específicos

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

- Caracterização geotécnica;
- Composição química e mineralógica;

- Curva de compactação;
- Parâmetros de resistência sob diferentes condições de compactação;
- Parâmetros de compressibilidade sob diferentes condições de compactação;
- Curva de retenção de umidade;
- Parâmetro de permeabilidade sob diferentes condições de compactação;
- Análises de estabilidade de taludes com os parâmetros obtidos para definição da inclinação de uma pilha de resíduo.

### **1.3 Organização da dissertação**

Esta dissertação está organizada em 5 capítulos, incluindo o presente capítulo introdutório onde são apresentadas as considerações gerais, os objetivos geral e específicos e a organização da dissertação.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, onde são abordados os conceitos gerais sobre a geração de resíduo na produção de alumina e os métodos utilizados para sua disposição. Também são descritos os tipos de filtros utilizados para o desaguamento de rejeitos finos, antes da disposição. Além disto, é feita uma breve explanação sobre o comportamento geotécnico de solos compactados e sobre solos não saturados.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada para a caracterização geotécnica do resíduo de alumina filtrado por filtros prensa, englobando a descrição do resíduo estudado, o relato sobre o aterro experimental executado para coleta de amostras indeformadas e deformadas deste resíduo, a lista de ensaios de laboratório conduzidos nas amostras, bem como os procedimentos para a realização destes ensaios.

A apresentação, análise e discussão dos resultados estão no capítulo 4, onde os resultados obtidos em todos os ensaios realizados são mostrados em forma de tabelas e gráficos e é feita a interpretação e análise dos mesmos, caracterizando geotecnicamente o material estudado e descrevendo seu comportamento quando compactado.

O capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas com as análises efetuadas e as principais sugestões para estudos futuros.

Também compõe este trabalho a lista de referências bibliográficas e o Anexo A, onde são apresentados os círculos de Mohr, trajetórias de tensões e gráficos da tensão desvio versus deformação e excesso de poropressão versus deformação, obtidos dos ensaios triaxiais UU realizados.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os estudos existentes a respeito dos assuntos envolvidos com o tema em questão, de forma a contextualizar o desenvolvimento da pesquisa.

### 2.1 Resíduo da produção de alumina (lama vermelha)

O resíduo de bauxita tem sido continuamente gerado desde o início da indústria de alumina/alumínio no final do século XIX. Anteriormente, o beneficiamento da bauxita era realizado pelo processo de Le Chatelier, desenvolvido por Louis Le Chatelier. Neste método, a produção da alumina se dava por meio do aquecimento da bauxita com  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (carbonato de sódio) a  $1200^\circ\text{C}$ , remoção dos aluminatos formados com água, precipitação do  $\text{Al}(\text{OH})_3$  (hidróxido de alumínio) através da ação do  $\text{CO}_2$  (gás carbônico) e, finalmente, o  $\text{Al}(\text{OH})_3$  formado era filtrado, seco e limpo (SILVA FILHO et al, 2007).

Trinta anos depois, o processo Le Chatelier foi substituído pelo processo Bayer, desenvolvido em 1888, na Alemanha, por Karl Josef Bayer. A substituição foi devido à drástica redução no custo de produção da  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (alumina) proporcionada pelo processo Bayer. Atualmente, o processo Bayer é amplamente utilizado pela indústria de refino da bauxita, mesmo com o elevado consumo de energia. Este processo constitui-se basicamente de 4 estágios (FIGURA 2.1):

- 1 - Digestão;
- 2 - Clarificação;
- 3 - Precipitação; e
- 4 - Calcinação.

O processo constitui na dissolução da alumina da bauxita pela soda cáustica concentrada em alta temperatura e baixa pressão. Após a separação do resíduo insolúvel, ocorre a precipitação parcial da alumina em solução por meio da diminuição da temperatura e diluição da lixívia de aluminato de sódio (VILLAR, 2002). A alumina hidratada original da rocha é recuperada através da hidrólise. Os resíduos de soda são, então, descartados e a alumina é secada e calcinada para a eliminação da água de cristalização.

O resíduo insolúvel gerado durante o estágio de clarificação, também chamado de lama vermelha (“red mud”), classifica-se como resíduo fino e sua composição varia em relação às impurezas existentes na bauxita de origem e de como foi o seu comportamento durante o ataque

com a soda. Normalmente, é composto por óxidos insolúveis de ferro, quartzo, aluminossilicatos de sódio, carbonatos e aluminatos de cálcio e dióxido de titânio, e possui como principal característica química elevada alcalinidade (pH de 10 a 13) (SILVA FILHO et al., 2007).

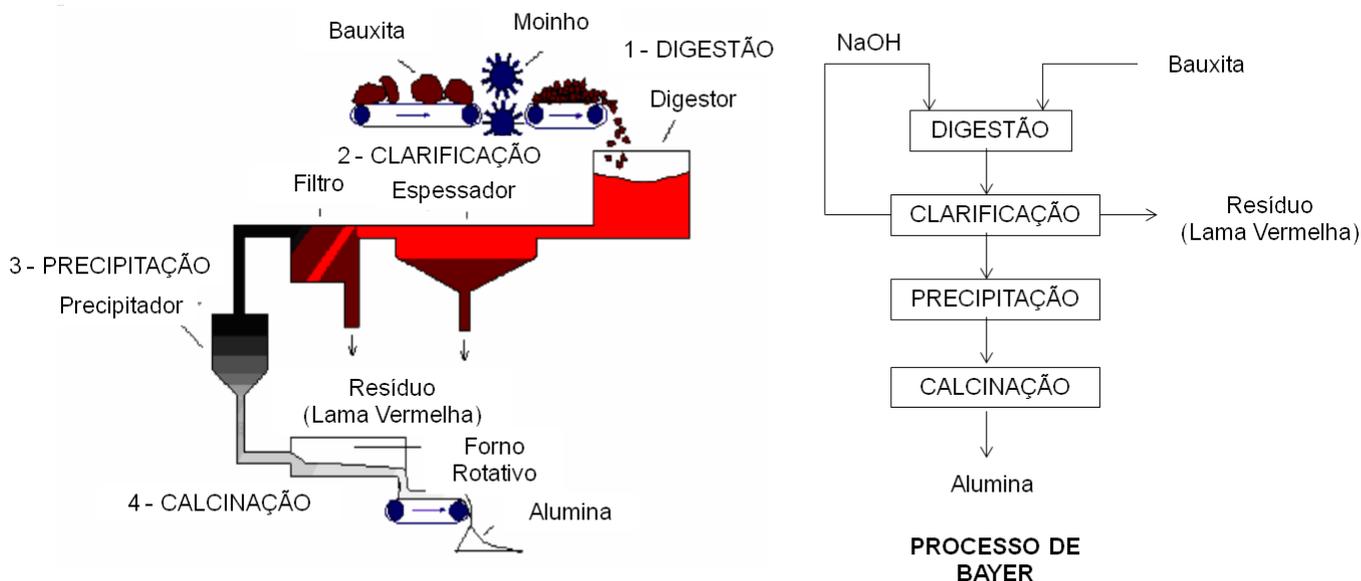


FIGURA 2.1 – Fluxograma da fabricação de Alumina pelo processo Bayer (LIMA, 2008).

Li & Rutherford (1996) fizeram uma análise da composição químico-mineralógica, pela técnica de difração de raios X e a de fluorescência de raios X, de sete diferentes tipos de bauxitas da região sudestes do Brasil e suas correspondentes lamas vermelhas. Na TABELA 2.1 estão apresentados os resultados obtidos. A conclusão da análise foi que a composição mineralógica da bauxita é um dos fatores mais importantes e que mais influenciam nas propriedades das lamas vermelhas, ou seja, as bauxitas e suas respectivas lamas vermelhas tem uma mineralogia muito similar, mas as quantidades presentes variaram muito. A quantidade da sodalita Bayer, por exemplo, que é o subproduto característico do processamento, influencia muito o comportamento final do resíduo, pois possui alta capacidade de intercambiar íons de sódio e uma das consequências de sua presença é a redução da velocidade de deposição das partículas sólidas em soro cáustico (Li, 2001). Sendo assim, a disposição deste resíduo deve ser feita de forma a se evitar os riscos de contaminação do meio ambiente. Pode-se considerar que a lama vermelha representa um passivo ambiental importante para a indústria de beneficiamento de alumina, com altos custos associados ao manejo e disposição.

TABELA 2.1 – Componentes químico-mineralógicos mais comuns nas lamas vermelhas (Li &amp; Rutherford, 1996)

CONSTITUINTES	% EM PESO (base seca)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25 - 60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5 - 25
SiO <sub>2</sub>	1 - 25
TiO <sub>2</sub>	1 - 10
Na <sub>2</sub> O	1 - 10
CaO	2 - 8
perda por calcinação	5 - 15

Segundo Power et al. (2009), em 1985, 93 anos após o estabelecimento da primeira planta de processo Bayer, o registro global da estimativa de produção de resíduo de bauxita atingiu 1 bilhão de toneladas. Este registro aumentou para 2 bilhões de toneladas no ano 2000, o dobro da quantidade em apenas 15 anos e para 2,7 bilhões de toneladas em 2007, com um crescimento de 119 milhões de toneladas por ano. A perspectiva é de um tempo de duplicação da produção de resíduo cada vez menor e um registro de 4 bilhões de toneladas provavelmente antes de 2015, o que destaca a urgência da necessidade de desenvolver e implementar melhores formas de disposição e remediação e buscar opções de reuso que utilize grandes volumes. Diferentes métodos de disposição de rejeitos finos vêm sendo estudados e aplicados para o resíduo da produção de alumina.

## 2.2 Métodos de disposição de rejeitos finos

Segundo Hond e Brouwer (2011), nos primeiros anos de produção de alumina, a lama vermelha gerada era simplesmente descarregada em rios, pântanos ou no mar. Estes métodos ainda não foram totalmente abandonados, persistindo ainda, segundo Silva Filho et al. (2007), em países como Japão e Itália. Este tipo de disposição causa grandes danos ao meio ambiente e não deve ser utilizado, sendo que o mesmo vem sendo substituído por bacias de disposição para o estoque permanente da lama vermelha, reduzindo o impacto ambiental. Conforme relatado por Power et al. (2009), desde 1980, a tendência da disposição da lama vermelha vem sendo direcionada para o empilhamento a seco (“dry stacking”), de forma a reduzir o potencial de vazamento do licor cáustico para o meio ambiente, reduzir a área de disposição necessária e maximizar a recuperação de soda e alumina.

No Brasil, os rejeitos de beneficiamento de minério são normalmente dispostos em forma de polpa em estruturas de contenção denominadas barragens (GUIMARÃES, 2011). Entretanto, com os avanços na tecnologia de desaguoamento nas últimas décadas, a lama é na realidade apenas um dos possíveis estados do rejeito (DAVIES, 2011), sendo possível a disposição na forma de polpa de alta densidade (teor de sólidos entre 57% e 68%), pastas minerais (teor de sólidos entre 60% e 70%) ou tortas (teor de sólidos entre 75% e 85%). Tais alternativas apresentam vantagens consideráveis com relação aos métodos convencionais.

A FIGURA 2.2 mostra as diferentes densidades que o rejeito fino pode apresentar dependendo da forma como é disposto: convencional ou alternativa. Pela figura, pode-se observar uma relação idealizada entre densidade e resistência não drenada do rejeito fino: quanto mais denso for o material maior é sua resistência, ou seja, a resistência é uma função crescente da densidade do material e, portanto, inversamente proporcional ao índice de vazios (ICOLD, 2002). Na figura, são apresentados também os diferentes meios de transporte da lama (bombas de gravidade ou centrífugas), os quais variam de acordo com sua consistência, bem como os possíveis equipamentos utilizados para sua densificação (filtros a vácuo e centrífugas).

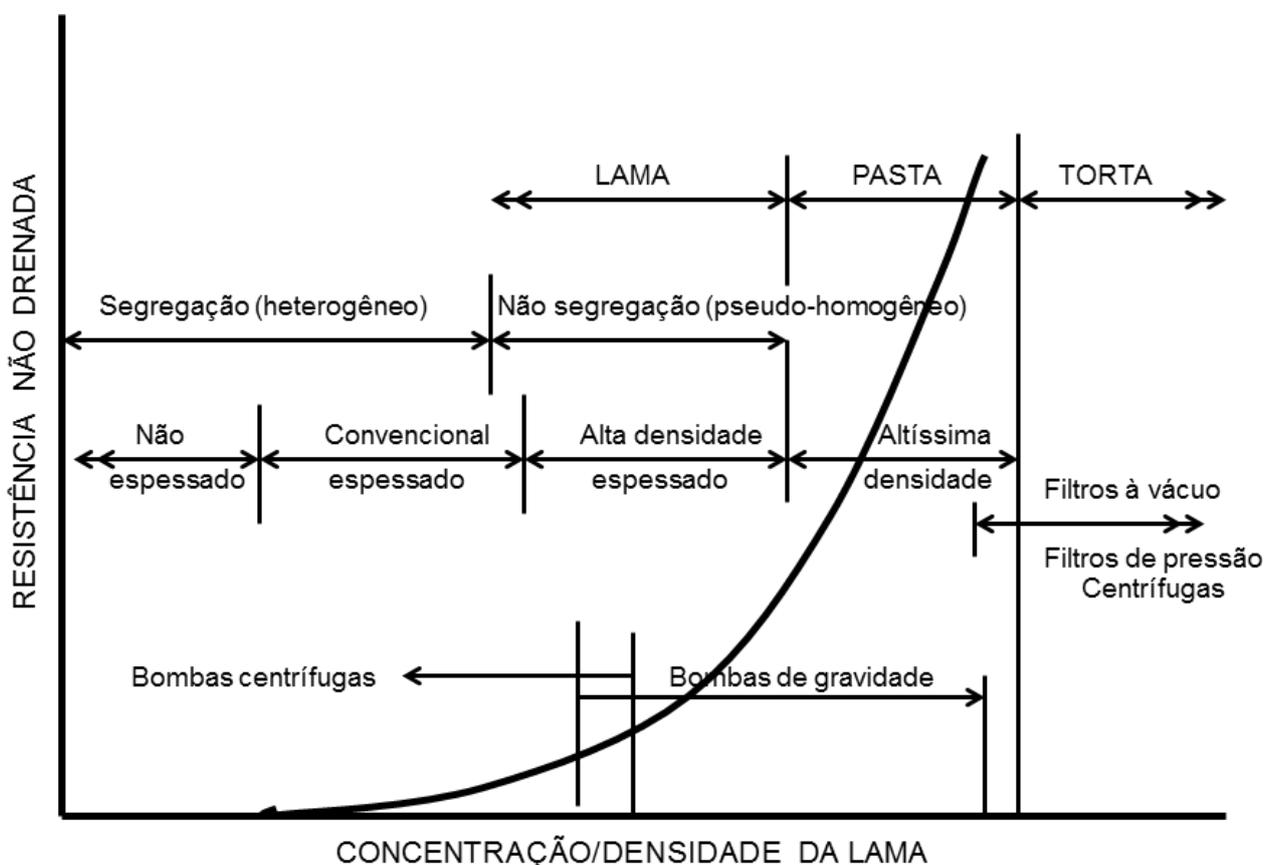


FIGURA 2.2 – Concentração/Densidade da lama *versus* resistência não drenada (Modificado ICOLD, 2002).

### 2.2.1 Métodos convencionais

Os métodos convencionais consistem na disposição dos rejeitos na forma de lama fluida, ou seja, na condição em que são descartados pelas plantas de beneficiamento, com baixa densidade, baixo teor de sólidos (20% a 25%), sem espessamento e sem adição de aglomerantes (LIMA, 2006). Também são conhecidos como métodos úmidos, devido à grande quantidade de água de processo que segue com o material sólido para a disposição (SILVA FILHO et al., 2007). Nestes métodos, o resíduo é contido por estruturas como diques ou barragens e grandes áreas são ocupadas. Normalmente é feito um dique de partida e, na medida do necessário, são feitos alteamentos desta estrutura, pelo método de jusante, de montante ou por linha de centro. A FIGURA 2.3 ilustra os referidos métodos. O lançamento do resíduo pode ser realizado por bombeamento ou por gravidade nos casos em que a condição topográfica é favorável. No local da disposição, ocorre a separação de fases, ou seja, a sedimentação do material sólido, surgindo um sobrenadante alcalino que pode ser recirculado para a fábrica.

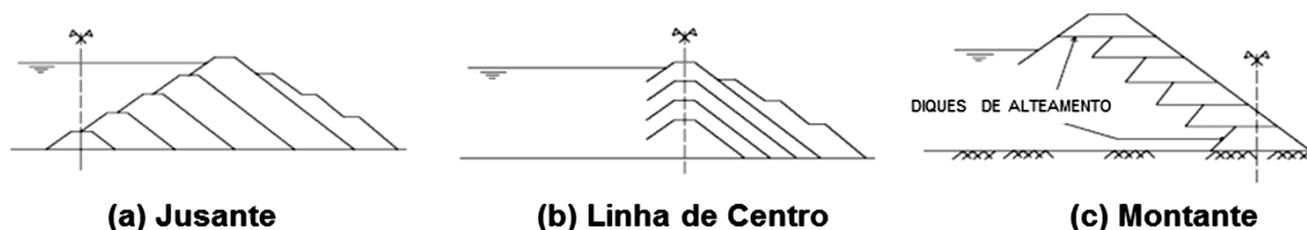


FIGURA 2.3 – Métodos de alteamento de barragem (LIMA, 2008)

A operação dos métodos convencionais é simples e de baixo custo. Entretanto, o potencial de impacto sobre o meio ambiente é alto, pois são necessárias grandes áreas de disposição, além de estruturas de contenção como diques, barragens ou bacias. Os custos associados às obras destes sistemas de disposição são elevados devido à necessidade de impermeabilização da área antes da disposição, geralmente feita com geomembranas ou com camada de material impermeável, para evitar os riscos de contaminação do solo e do lençol freático. Também existem os riscos com relação ao rompimento dos diques, que representam motivo de preocupação para populações vizinhas. Além disto, a vida útil do depósito é curta, em comparação com métodos em que se tem o resíduo com maior teor de sólidos, e o descomissionamento da área é um processo lento.

### 2.2.2 Métodos de disposição a seco

Como o futuro da mineração inclui um crescimento da fiscalização das indústrias com relação à gestão do meio ambiente, incluindo o uso da água na maioria das regiões do mundo, frequentemente é solicitado um compromisso com a utilização de alternativas de disposição além das barragens convencionais. A quantidade de água ou fluido que é “perdida” nos vazios dos rejeitos estocados, escoam ou evaporam das barragens de rejeito, é algo a ser cada vez mais visualizado de forma crítica pelos órgãos regulatórios e pelos olhos da população que insistem em avaliar se há outras alternativas viáveis para qualquer proposta de desenvolvimento da mineração. Isto pressiona a buscar o gerenciamento alternativo de rejeitos e, atualmente e no futuro, estas pressões irão se intensificar. Os métodos de disposição denominados secos ou semi-secos surgiram a partir dos avanços nas técnicas de deságue. Algumas vantagens destes métodos quando comparados com os métodos úmidos podem ser destacadas: melhor manuseio, maior segurança, geração de menor volume de resíduo, menor área ocupada, maior facilidade de reabilitação da área (SILVA FILHO et al., 2007).

A seguir, será apresentada uma breve descrição do método de disposição empilhamento a seco (“dry stacking”) e da disposição a seco (“dry stack”). Além destes, existem outros métodos para disposição de resíduos finos, que se enquadram nos métodos secos ou semi-secos, que serão apenas citados nesta dissertação, como o método de disposição de lama espessada (TTD – “Tailing Thickened Discharge”), descrito por Lima (2006), em que o rejeito é espessado até um teor de sólidos de cerca de 40% e é descarregado na área de disposição a partir de uma posição mais elevada, de forma a obter a máxima superfície exposta para evaporação. Para mais informações sobre este método, recomenda-se consultar McPhail et al (2004), Spiers (2010). Outro método é o de disposição em pasta, em que o rejeito é processado em uma mistura densa e viscosa que, diferente da lama fluida, não segrega ao ser transportado. Segundo Lima (2006), este método é utilizado para preenchimento de minas subterrâneas. Maiores detalhes sobre este método podem ser consultados em Fitton & Seddon (2013), Cavalcante et al (2013), Newman et al (2001), Biesinger & Slottee (2011).

#### (i) Empilhamento a seco (“dry stacking”)

O método de disposição a seco, conhecido como empilhamento a seco (“dry stacking”), é comumente aplicado à lama vermelha, como ocorre na Alunorte, no Pará, e também a outros resíduos, como por exemplo, em rejeitos de cobre, no Chile.

Neste método, o espessamento do resíduo é feito por meio de filtragem com filtros tambor, atingindo um teor de sólidos em torno de 55% a 60% (ÁVILA, 2012). Após o espessamento, são executados ciclos de disposição e secagem. O resíduo é disposto em finas camadas, alternando-se as frentes de lançamento, de forma a permitir um período de espera para que ocorra a evaporação da água presente no resíduo, que alcança a superfície por capilaridade. A disposição resulta em uma pilha com talude de cerca de 2% a 5% de inclinação, dependendo da reologia do resíduo e do teor de sólidos no lançamento.

Após a disposição, a remoção de água de chuva do sistema pode ocorrer por meio de diques de retenção construídos de material granular, que retém os finos do resíduo e deixa passar a água, ou por meio de sistemas extravasores controlados por comportas. A contaminação do subsolo pode ser evitada pela utilização de sistema de impermeabilização da área de estocagem, tais como geomembranas PEAD. O processo de adensamento do resíduo na pilha pode ser acelerado por meio da colocação de uma camada drenante, com tubos coletores, sobre a geomembrana ou outra camada impermeabilizante, conduzindo a água proveniente do resíduo para poços, de onde ela pode ser bombeada para uma estação de tratamento ou tratada no local e devolvida ao meio ambiente ou mesmo, retornada à planta.

O projeto da área de disposição pelo método do empilhamento a seco deve levar em consideração o clima local (incluindo evaporação, precipitação e as flutuações sazonais), as propriedades do rejeito (incluindo a reologia) e o terreno disponível para a disposição, fazendo com que o projeto para cada área seja único. E este método apresenta diversas vantagens, tais como:

- Maximiza a utilização das áreas disponíveis, uma vez que uma maior massa de sólidos e um maior volume de material podem ser estocados em uma determinada área, em comparação com o método convencional;
- Apresenta menor potencial de risco;
- Menor tempo para a reabilitação da área, uma vez que o resíduo desenvolve mais rapidamente capacidade suporte para o acesso de equipamentos necessários para as atividades de reabilitação;
- Redução da quantidade de água contaminada que é depositada junto com o resíduo, reduzindo o potencial de contaminação do subsolo e a demanda de tratamento do efluente.

(ii) Disposição a seco (“dry stack”)

O desenvolvimento de tecnologias de filtros a vácuo e a pressão de larga capacidade tem apresentado a oportunidade de armazenamento de rejeito em um estado não saturado, ao invés de armazenamento como lama convencional e/ou consistência de pasta associado com o espessamento dos rejeitos. Neste caso, após serem descarregados pelos filtros, os rejeitos filtrados são transportados por correia ou caminhão e então lançados, espalhados e compactados para formar uma pilha de rejeitos não saturada, densa e estável (geralmente designada pilha seca – “dry stack”) não requerendo barragem para retenção e bacia de rejeito associada, segundo relatório publicado por Rosemont Copper Company em 2008. Ou seja, neste caso, não é necessário o ciclo de secagem do rejeito, como no caso do item anterior.

O projeto da pilha de resíduo deve ser desenvolvido levando-se em conta a distância de transporte do resíduo até o local, visto que este representa altos custos para a operação do sistema de disposição, podendo inviabilizar a aplicação deste método. Segundo Davies (2011), para o caso do uso de caminhões na disposição, deve-se atentar no projeto para a questão da trafegabilidade principalmente em períodos de chuva.

O método de disposição a seco 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;
- Baixo potencial de risco;
- Melhores condições para fechamento (menor custo e menor período de monitoramento).

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.

### 2.3 Principais fatores para a escolha do método de disposição

A qualidade da jazida do minério beneficiado influencia diretamente na quantidade de resíduo gerado, bem como no teor de sólidos com que este é lançado, o que está diretamente ligado ao tipo de disposição adotado. A escolha do método de disposição também leva em consideração aspectos físicos, topográficos, hidrológicos, geológicos-geotécnicos, ambientais e de segurança. Para o caso da filtração do resíduo, a viabilidade econômica depende mais do gerenciamento e otimização do processo de disposição de resíduos do que relativamente dos pesados encargos financeiros associados à aquisição, montagem e operação dos equipamentos de filtração e sua inserção na planta industrial (GOMES, 2009).

Cada projeto precisa avaliar a potencial aplicabilidade para os rejeitos filtrados baseado em restrições técnicas, econômicas e regulatórias. Experiências mostram que os projetos mais aplicáveis são aqueles que têm um ou mais dos seguintes atributos:

- Localizam-se em regiões áridas, onde a conservação de água é crucial (por exemplo, no oeste da Austrália, sudoeste dos Estados Unidos, maior parte da África, muitas regiões da América do Sul, regiões árticas do Canadá e Rússia).
- Possuem fluxogramas onde a recuperação da economia é reforçada pela filtração dos rejeitos;
- Localizam-se em áreas onde a elevada sismicidade contraindica algumas formas de represamento convencional de rejeitos;
- Localizam-se em regiões frias, onde a captação de água é muito difícil no inverno;
- Possui considerações topográficas que excluem a construção de barragem convencional ou viabiliza a estocagem para volume proporcional de material da barragem.
- A responsabilidade de operação e fechamento de uma barragem de rejeitos convencional, com crescimento incremental, é elevada, quando comparada ao desenvolvimento de uma pilha seca.

A natureza do material do rejeito é importante quando se considera a filtração. Não somente a granulometria, mas também a mineralogia do rejeito é importante (isto é, não somente o tamanho das partículas do solo presente no rejeito, mas também a sua mineralogia). Em particular, altas percentagens de argilo-minerais tendem a contradizer a efetividade da filtração. Além disso, substâncias tal como betume residual (por exemplo: rejeitos de areia de petróleo) pode criar dificuldades especiais para a planta de filtração.

Também se deve atentar para o fato de que determinar o melhor custo-benefício de maneira a obter um produto filtrado consistente com os requisitos geomecânicos dos rejeitos pode ser um desafio. Sendo assim, além da experiência dos fornecedores de filtros, é necessária a realização de alguns tipos de testes pilotos, uma vez que cada rejeito irá exibir seu próprio e único comportamento na filtração. É importante antecipar alterações na mineralogia e na moagem que podem ocorrer durante a vida do projeto. Os sistemas de filtração a serem escolhidos devem ser capazes de prontamente expandir ou contrair com futuras alterações na mina com o mínimo de impacto econômico.

Até hoje, as duas razões mais comuns para selecionar a disposição a seco de resíduo filtrado como uma opção de gerenciamento de rejeitos tem sido para recuperar água do processo de abastecimento de água e quando as condições do terreno e fundação contraindicam represamento convencional. A recuperação de água é particularmente importante em ambientes áridos onde a água é um recurso extremamente valioso e o abastecimento de água é regulado (por exemplo, no Chile, Oeste da Austrália e México). Esta recuperação de água tem uma relação custo-benefício para o projeto que compensa o capital e o custo operacional do sistema de rejeitos. Deve ser ressaltado que a sobrecarga de água armazenada deve ser levada em consideração no projeto de um sistema de rejeito filtrado.

## **2.4 Filtração do rejeito/resíduo**

Define-se filtração como uma operação unitária de separação dos sólidos contidos em uma suspensão aquosa mediante a passagem da polpa através de um meio filtrante, que retém as partículas sólidas e permite a passagem do líquido. O líquido que atravessa o meio filtrante é denominado filtrado e os sólidos retidos constituem a “torta”. Segundo Guimarães (2011), a filtração de rejeitos é muito utilizada nas minerações do deserto do Atacama, na região norte do Chile, para reduzir as perdas de água devido a sua escassez na região.

A FIGURA 2.4 mostra a classificação do rejeito em função do grau de desaguamento, com a nomenclatura padrão da indústria. Com o decréscimo do teor de água torna-se crescente o custo do transporte dos rejeitos (por exemplo, o custo do bombeamento cresce e então, em se tornando uma torta úmida, o rejeito não é mais bombeável, sendo requeridos outros métodos de transporte). Entretanto, com o decréscimo do teor de água, que significa o crescimento da recuperação de água no processo, os rejeitos estão muito mais prontamente capacitados para serem utilizados em situações estruturais alto-portantes, como pilhas (DAVIES, 2011). Rejeitos filtrados são tipicamente tidos como tortas secas ou “dry cake”, mostrado na FIGURA 2.4. Este material tem

umidade suficiente para permitir maior espaço de poros a ser preenchidos com água, mas não tanto que impeça a compactação ótima do material.

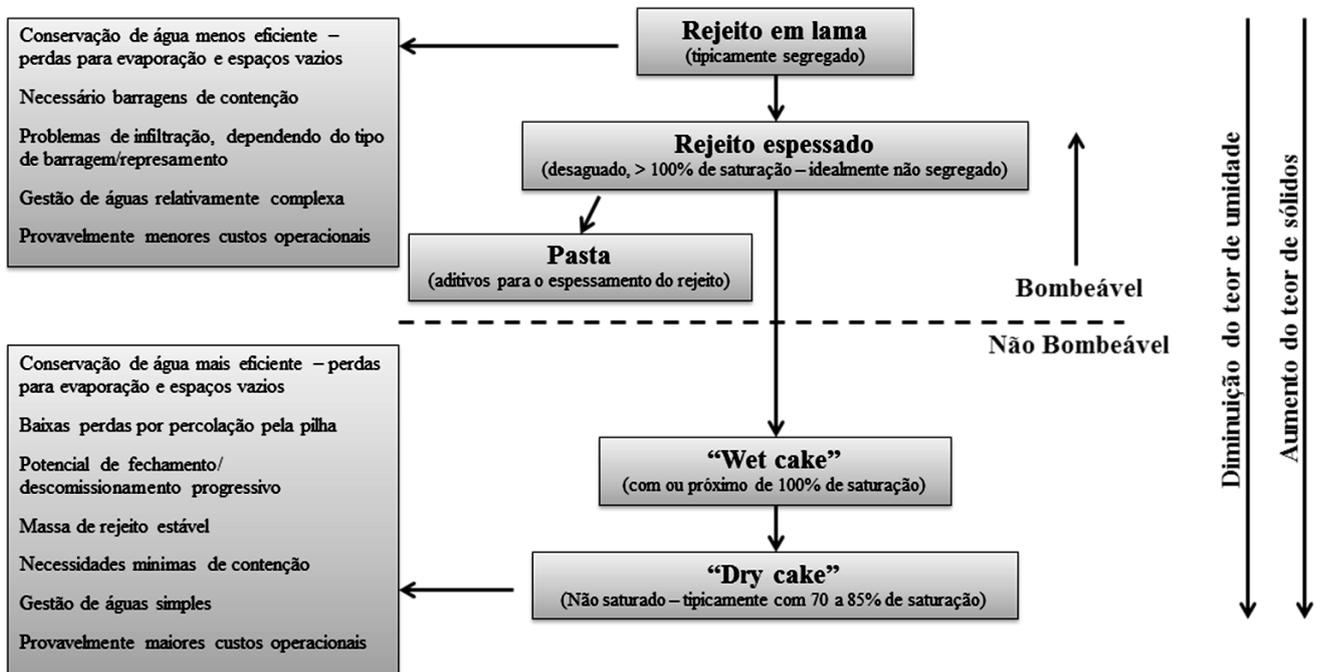


FIGURA 2.4 – Classificação do rejeito pelo grau de desaguamento (adaptado de DAVIES, 2011).

A teoria clássica de filtragem considera o fluxo de líquido através de um meio poroso (torta) não compressível, descrito por uma relação empírica conhecida como Lei de Darcy (EQ. (2.1)). (VALADÃO, 2008).

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

Onde,

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

K = permeabilidade do leito

$\Delta P$  = diferencial de pressão através da torta e do meio filtrante

A = área transversal ao fluxo (área filtrante)

$\mu$  = viscosidade do filtrado

L = espessura do meio filtrante + torta

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

A equação (2.1) demonstra que a velocidade de filtração, definida como o volume de fluido filtrado que atravessa o elemento filtrante por unidade de tempo, é diretamente proporcional à área de filtração, à permeabilidade do leito e ao diferencial de pressão e inversamente proporcional à espessura da torta e à viscosidade do material filtrado, entre outros parâmetros (GUIMARÃES, 2011).

A equação que relaciona a permeabilidade do leito (meio filtrante e torta) com a superfície específica das partículas minerais e a porosidade da torta, entre outros, para escoamento laminar e torta não compressível, foi apresentada por Kozeny (1927) e modificada por Carman (1937) (EQ. (2.2)).

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

Onde,

$K$  = coeficiente de filtração (permeabilidade do leito)

$\rho_s$  = massa específica dos sólidos

$\varepsilon$  = índice de vazios do leito

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

$SE$  = área superficial específica

Pela EQ. (2.2), observa-se a diminuição do fluxo do material filtrado com o aumento da superfície específica, isto é, polpas que contêm partículas muito finas são mais difíceis de serem filtradas. Por outro lado, o desaguamento é bastante favorecido com o aumento da porosidade do leito.

Observando as EQ. (2.1) e (2.2) verifica-se que existem muitas variáveis que afetam o desempenho do processo de filtração. Estas variáveis, entre outras, foram agrupadas por Guimarães (2011) em quatro grandes categorias (relacionadas aos sólidos, à torta/filtrado, à polpa e ao equipamento), conforme apresentado no QUADRO 2.1. Algumas observações foram feitas por Guimarães (2011) com relação às variáveis apresentadas, a saber:

- A taxa de filtração aumenta com a diminuição do ciclo de filtração, porém pode ocasionar a elevação da umidade da torta, ou a obtenção de tortas extremamente finas, que poderão prejudicar a descarga do filtro;
- O aumento da temperatura da polpa promove a redução da viscosidade do filtrado, o que favorece a filtração. Porém esta operação (através da aplicação

de vapor super aquecido) não é usual em operações industriais por ser excessivamente dispendiosa;

- Quanto maior a concentração de sólidos das polpas, melhor a filtragem. A maioria dos filtros requer uma concentração de sólidos mínima na sua alimentação (30% a 45%) para garantir o seu desempenho (principalmente os filtros que operam a vácuo). Por isto é usual o adensamento da polpa por espessadores, ciclones ou outro equipamento antes da filtragem;
- Partículas com distribuição granulométrica grossa formam tortas com interstícios maiores, fazendo com que o líquido atravesse o meio filtrante com maior facilidade, aumentando a velocidade de filtragem e reduzindo a umidade da torta;
- O pH da polpa está relacionado ao estado de dispersão/agregação das partículas, sendo quanto mais elevado o pH, maior o estado de dispersão dos sólidos na polpa. Sendo maior a dispersão, menor o fluxo de fluido filtrado e maior a umidade da torta. O estado de agregação das partículas é menor;
- Para reduzir a tensão superficial do líquido e conseqüentemente auxiliar na passagem do fluxo, são utilizados reagentes auxiliares de filtragem;
- As lamas apresentam um efeito negativo na filtragem uma vez que elas tendem a “cegar” o meio filtrante. Dessa forma, com o objetivo de reduzir o efeito das lamas e aumentar a taxa de filtragem, algumas vezes são adicionados coagulantes e floculantes nos tanques.

QUADRO 2.1 – Variáveis que afetam a velocidade de filtragem relativas ao sólido, torta/filtrado, polpa e ao tipo de equipamento (GUIMARÃES, 2011).

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

A filtração do rejeito é feita pela aplicação de uma força sobre as partículas através de um meio poroso, que pode ser feita por gravidade, centrifugação, pressão ou vácuo. Tambores, placas empilhadas horizontalmente ou verticalmente e correias horizontais são as configurações mais comuns de plantas de filtração. Filtração por pressão pode ser realizada em um espectro mais amplo de materiais, embora a filtração a vácuo por correia é provavelmente o mais lógico para larga escala de operação.

O QUADRO 2.2 apresenta alguns mecanismos de filtração e os principais fornecedores atuantes no mercado. Dentre os tipos de filtros apresentados aí, será apresentada, nos itens a seguir, uma breve descrição dos filtros à vácuo e dos filtros prensa, por serem os tipos de filtros mais aplicados atualmente para filtração da lama vermelha.

QUADRO 2.2 – Mecanismos de filtração e os principais fornecedores (GUIMARÃES, 2011).

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

#### 2.4.1 Filtros à vácuo

Segundo Bánvölgyi e Huan (2009), 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 filtração à vácuo consiste na aplicação de uma força negativa (subatmosférica), por bombas de vácuo, através do meio filtrante. Os equipamentos de filtração 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.

O circuito de filtragem consiste do filtro, 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 que liga os filtros a um vaso separador, de onde saem duas tubulações: uma que vai para a bomba de vácuo para transportar 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. A FIGURA 2.5 apresenta um desenho esquemático do sistema de filtragem a vácuo. Existem filtros a vácuo com alimentação da polpa por cima, como é o caso do filtro horizontal de correia, 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 2.6 apresenta as classes de filtros a vácuo. Com exceção do Nutsch, todos os filtros são contínuos. O QUADRO 2.3 apresenta as principais vantagens e desvantagens dos filtros a vácuo.

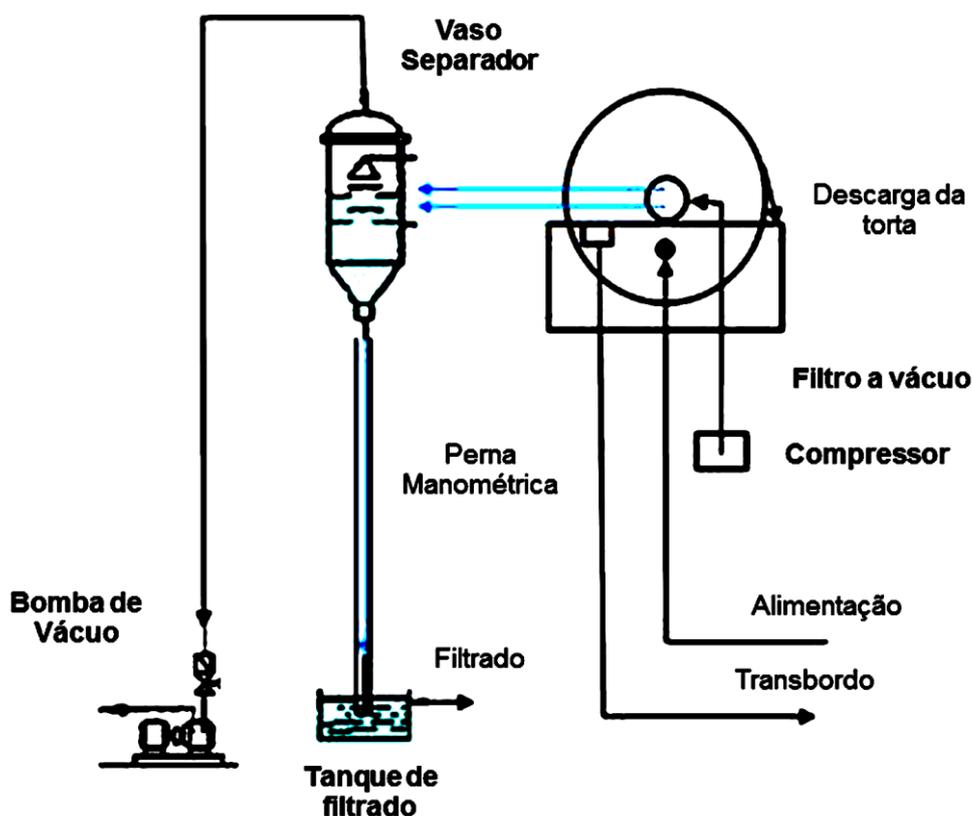


FIGURA 2.5 – Desenho esquemático do sistema de filtragem à vácuo (GUIMARÃES, 2011).

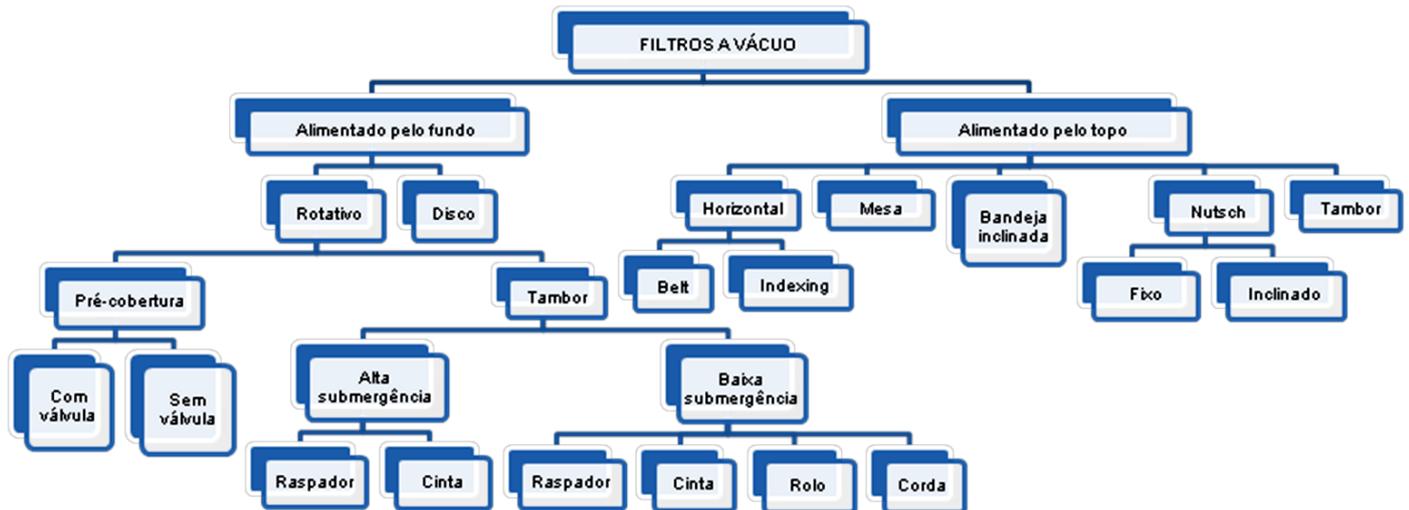


FIGURA 2.6 – Fluxograma das classes dos filtros a vácuo (adaptado de SANTOS, 2004).

QUADRO 2.3 – Vantagens e Desvantagens dos filtros a vácuo. (adaptado de SANTOS, 2004?)

VANTAGENS	DESVANTAGENS
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operação contínua (com exceção do Nutsch)</li> <li>• Recuperação ou remoção dos contaminantes solúveis pela lavagem em contracorrente (especialmente nos filtros de correia horizontal, de bandeja inclinada e de mesa)</li> <li>• Produção de filtrados relativamente limpos usando uma porta para o turvo ou uma bacia de sedimentação (nos filtros de correia horizontal, de bandeja inclinada e de mesa)</li> <li>• Permite polir soluções (em um filtro pré-revestido)</li> <li>• Acesso conveniente à torta para atividades do operador ou retirada de amostragem</li> <li>• Controle fácil de parâmetros operacionais tais como relação da espessura ou da lavagem da torta</li> <li>• Grande variedade de materiais de construção</li> <li>• Baixo custo de manutenção, já que não requer tanta mão de obra</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Umidade residual mais elevada na torta</li> <li>• Construção de difícil vedação para permitir presença de gases</li> <li>• Difícil de limpar</li> <li>• Consumo elevado de potência pela bomba de vácuo</li> </ul>

A seguir é apresentada uma breve descrição dos filtros a vácuo de disco, horizontais de correia e tambor rotativo:

a) Filtros de disco:

O filtro de disco convencional (FIGURA 2.7) é composto por uma série de discos verticais, paralelos e espaçados, ligados entre si por um eixo central (constituído de um feixe de tubos) que executa um movimento de rotação. Cada disco é composto de múltiplos setores independentes, cobertos pelo tecido filtrante. Cada setor é conectado a um dos tubos do eixo central. Na extremidade do eixo, é encaixada uma válvula estática denominada cabeçote (FIGURA 2.8) 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”).

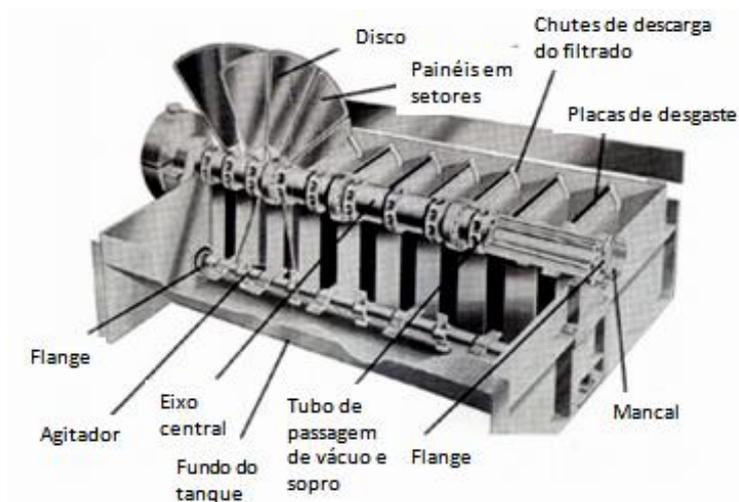


FIGURA 2.7 – Representação esquemática de um filtro de disco convencional (CHAVES ET AL, 2010).

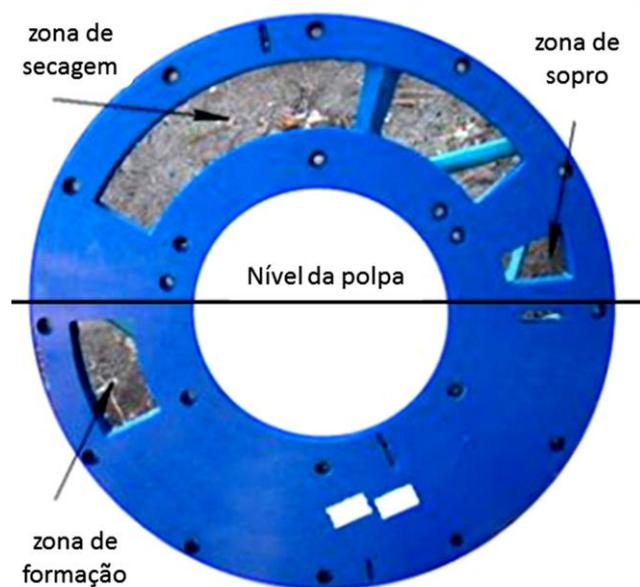


FIGURA 2.8 – Válvula de vácuo para filtro de disco convencional (GUIMARÃES, 2011).

Durante o ciclo de filtração (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. Ao emergir inicia-se a etapa de secagem, quando a água é extraída da polpa, ainda por efeito do 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).

O principal diferencial dos filtros de discos em relação aos concorrentes é a sua enorme área de filtração quando comparada com a área ocupada pelo próprio equipamento. Por outro lado, esse tipo de filtro não permite a lavagem da torta. A FIGURA 2.9 apresenta uma imagem de um filtro de disco convencional amplamente utilizado na indústria mineral, principalmente nas instalações de beneficiamento de minério de ferro, na filtração do produto *pellet feed*. Neste caso a alimentação do filtro é feita com polpa espessada (acima de 60% de sólidos) e produz tortas com umidades de 9% a 13%, dependendo das características do material (a presença de argilas e do mineral limonita prejudica a filtração).



FIGURA 2.9 – Filtro de disco convencional Modelo VSF 120/10 (GUIMARÃES, 2011).

b) Filtros horizontais de correia:

Os filtros horizontais de correia são mais apropriados para polpas de granulometria mais grosseira. A FIGURA 2.10 mostra uma imagem de um filtro horizontal de correia. 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.). 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.



FIGURA 2.10 – Filtro horizontal de correia (GUIMARÃES, 2011).

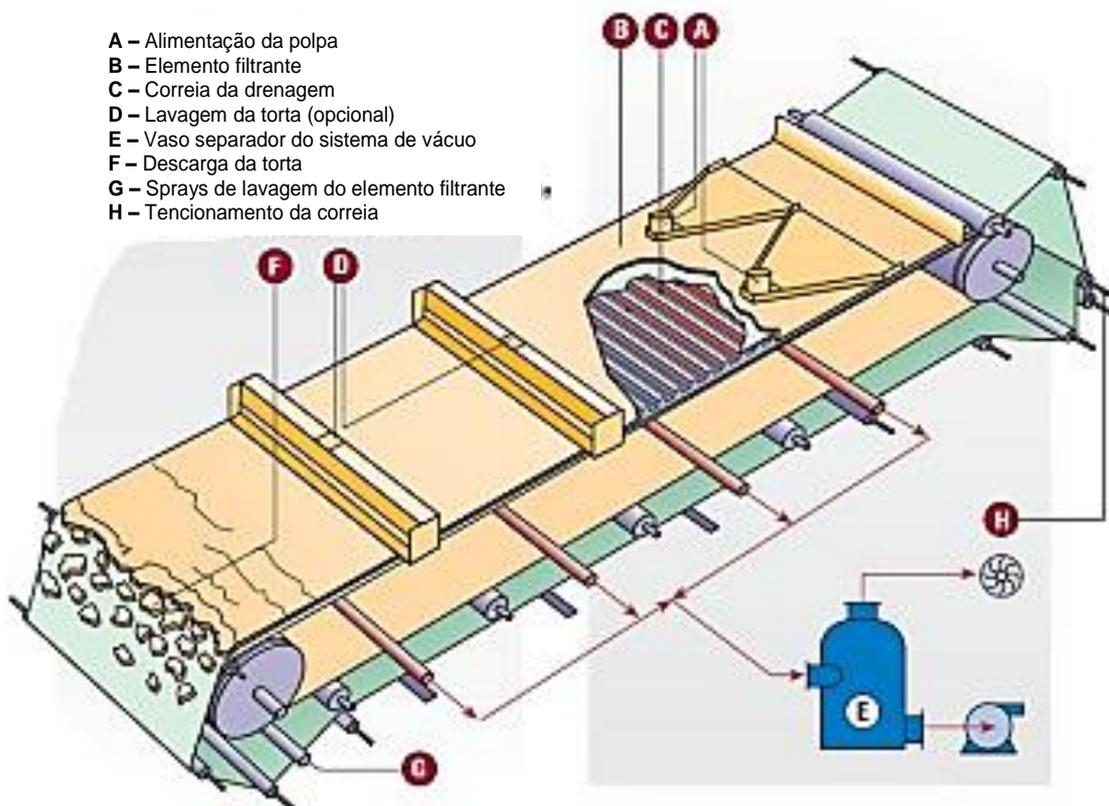


FIGURA 2.11 – Filtro horizontal de correia (FLSMIDTH, 2008).

A correia é desenhada com ranhuras e furos que permitem a ação do vácuo que atua abaixo da correia. O material filtrado atravessa a correia e é conduzido por tubulações para o vaso separador, que está interligado à bomba de vácuo e ao tanque de filtrado, conforme desenho esquemático apresentado na FIGURA 2.10.

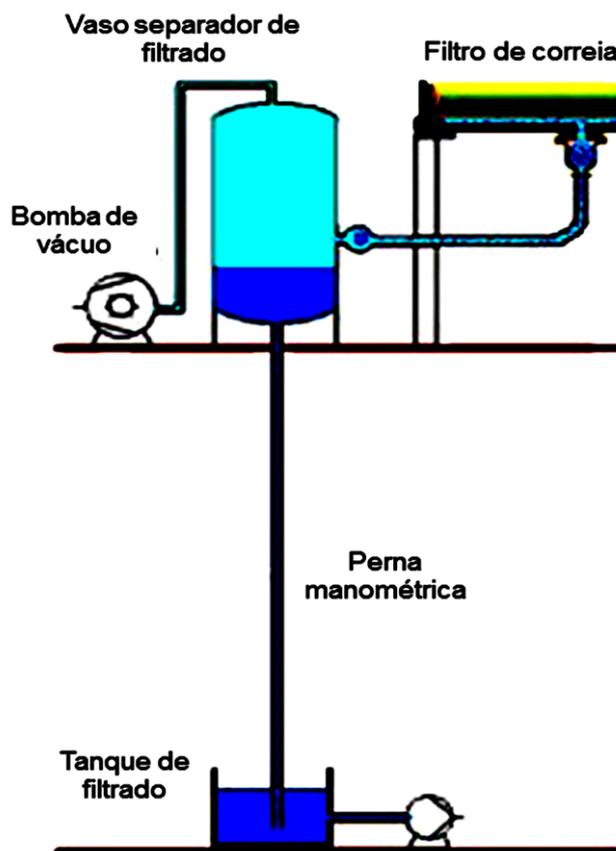


FIGURA 2.10 – Desenho esquemático de filtro horizontal de correia (FONTE: <http://www.pharmaceutical-int.com/article/larox-upgrades-the-patented-pannevis-rbcdv-horizontal-vacuum-belt-filter.html>).

c) Filtros de tambores rotativos:

Os filtros de tambor rotativos são projetados para obter maior capacidade de filtração por área construída, assegurando torta mais seca e filtrado de excelente qualidade. Ele pode ser dotado de meio filtrante especial e processo de lavagem exclusivo. A filtração inicia-se quando o setor está submerso na bacia que contém a polpa. À medida que o líquido passa através do meio filtrante, deixa os sólidos retidos no mesmo, formando assim, a camada de torta (carga).

Os filtros de tambor rotativos são normalmente utilizados para as seguintes situações:

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

O filtro de tambor rotativo é formado por um tambor na horizontal que fica semi-submerso sobre um cilindro cortado ao meio na horizontal, com raio maior que o do tambor, formando uma espécie de banheira que irá receber e acondicionar a lama. No fundo desse semi-cilindro há um agitador para evitar que a lama se sedimente no fundo. A superfície do tambor é toda furada com furos circulares pequenos agrupados em células horizontais de forma a permitir o controle de pressão em cada furo. Cada célula está conectada por 1 ou 2 dutos que vão até a válvula de controle. Quando o duto passa pela zona de formação da torta, ele recebe uma pressão negativa e todos os furos daquela célula succionam.

O filtro de tambor rotativo possui uma válvula de controle que determina a área da superfície do tambor que irá ficar em determinada zona. Os diversos dutos dentro do filtro de tambor rotativo giram concomitantemente com o filtro, e na medida em que giram, eles entram e saem de zonas com vácuo, pressurizadas ou sem pressão, controladas pela válvula de controle. O líquido filtrado succionado entra pelos furos e dentro das células é direcionado aos dutos, onde irá sair pela válvula na zona em que estiver passando. A superfície do tambor é envolta por uma manta de filtração, que impede o entupimento dos furos e distribui sobre toda a superfície da célula a sucção. A torta se forma sobre a manta de filtração.

Após a filtração, a torta formada pode ser removida por raspadores, rolos, cintas de descarte, fios de descarte ou jatos de água ou ar. Os jatos de água ou ar podem também ser usados junto com outro tipo de removedor de torta para auxiliar a remoção. A FIGURA 2.11 apresenta um exemplo de filtro tambor.

#### d) Filtros prensa:

A filtração a pressão é caracterizada pela aplicação de uma pressão positiva (e não o vácuo) na polpa e, por possuir um ciclo descontínuo, sua operação é conduzida em batelada. Uma das principais vantagens da filtração a pressão é a produção de tortas com menor teor de umidade,

em comparação com outras tecnologias de filtragem. Os filtros prensa também oferecem eficiência na lavagem da torta para recuperação de soda (AVERY e WILSON, 2013).

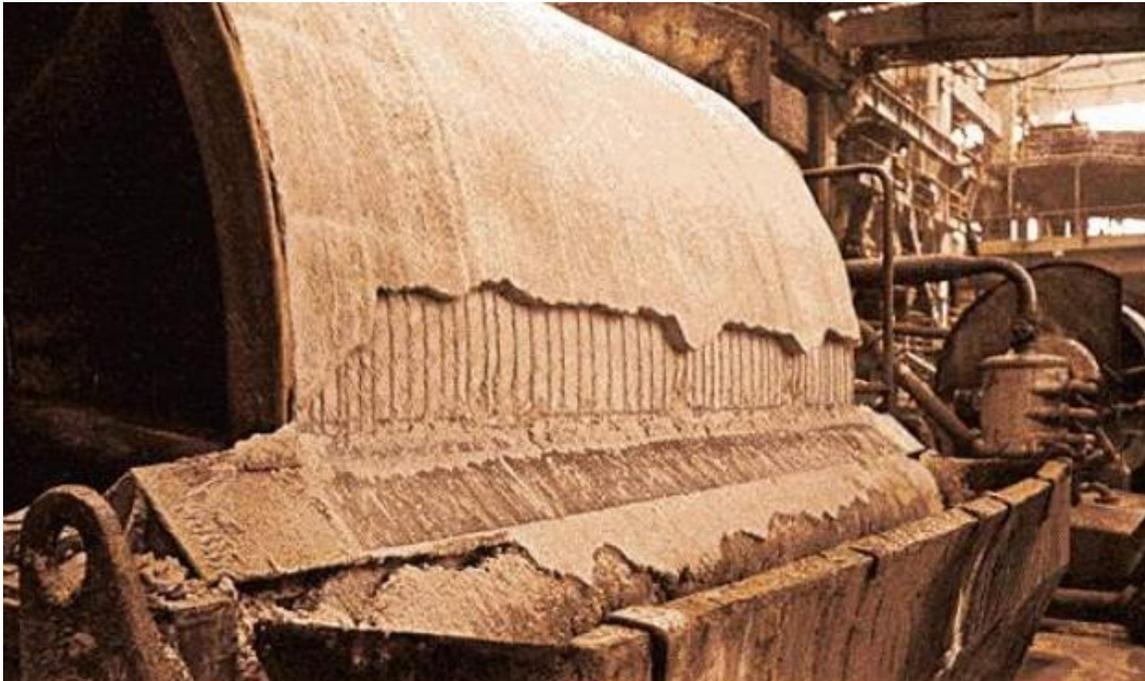


FIGURA 2.11 – Exemplo de filtro tambor (FONTE: <http://www.raldyperu.com/filtros.html>).

A FIGURA 2.12 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 2.12 – Filtro prensa de placas verticais (ANDRITZ SEPARATION (disponível em [www.filtraguide.com](http://www.filtraguide.com) - Acesso em 20 de Outubro de 2013)).

Os filtros prensa horizontais possuem basicamente o mesmo princípio de funcionamento, diferenciando-se de acordo com 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. Existem placas de diferentes modelos, tipos de câmara e diafragma. Os formatos das placas variam de 250 x 250 até 2500 x 2500 mm.

As etapas básicas do ciclo de operação do filtro prensa horizontal com placas tipo câmara (ver a FIGURA 2.12) apresenta são: 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 escoam 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.

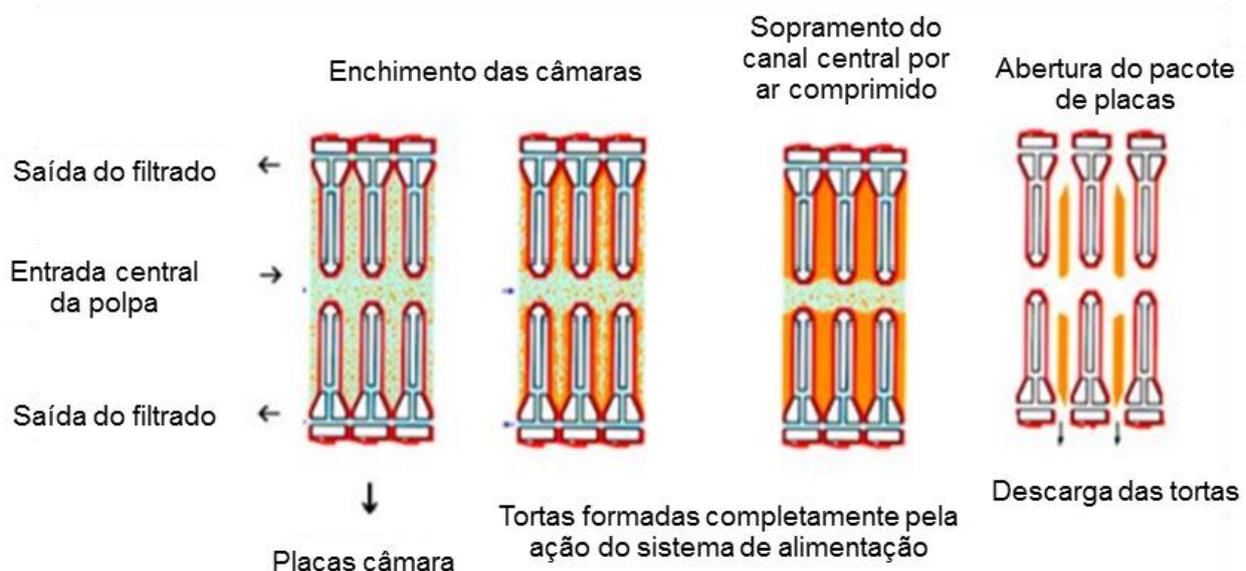


FIGURA 2.13 – Ciclo de operação dos filtros prensa com placas tipo câmara (GUIMARÃES, 2011).

O filtro prensa com placas tipo diafragma é composto por diversas placas individuais intercaladas entre câmara e diafragma, sendo que as placas diafragma são revestidas por um diafragma elástico, 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 hidraulicamente 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 filtração. Transcorridos os tempos de pressurização ocorre a despressurização dos diafragmas com posterior descarga das tortas (FIGURA 2.14).

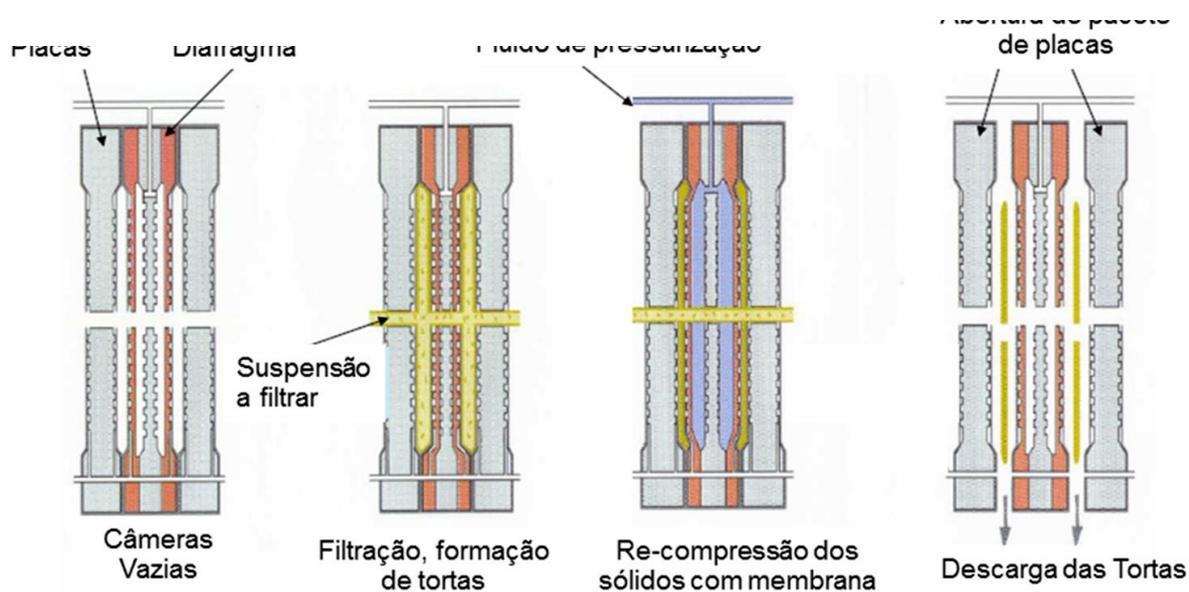


FIGURA 2.14 – Ciclo de operação dos filtros prensa com placas tipo diafragma (adaptado de ANDRITZ, 2013)

O filtro prensa de placas horizontais, também denominado filtro prensa vertical (FIGURA 2.15) é uma tecnologia recente de filtração. 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 2.15 – Filtro de pressão vertical convencional (Guimarães, 2011).

O ciclo de filtragem de um filtro de pressão vertical convencional consiste nas etapas descritas a seguir e é mostrado na FIGURA 2.16:

- 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  $8 \times 10^5$  Pa e durante a compressão da torta,  $1,6 \times 10^6$  Pa.

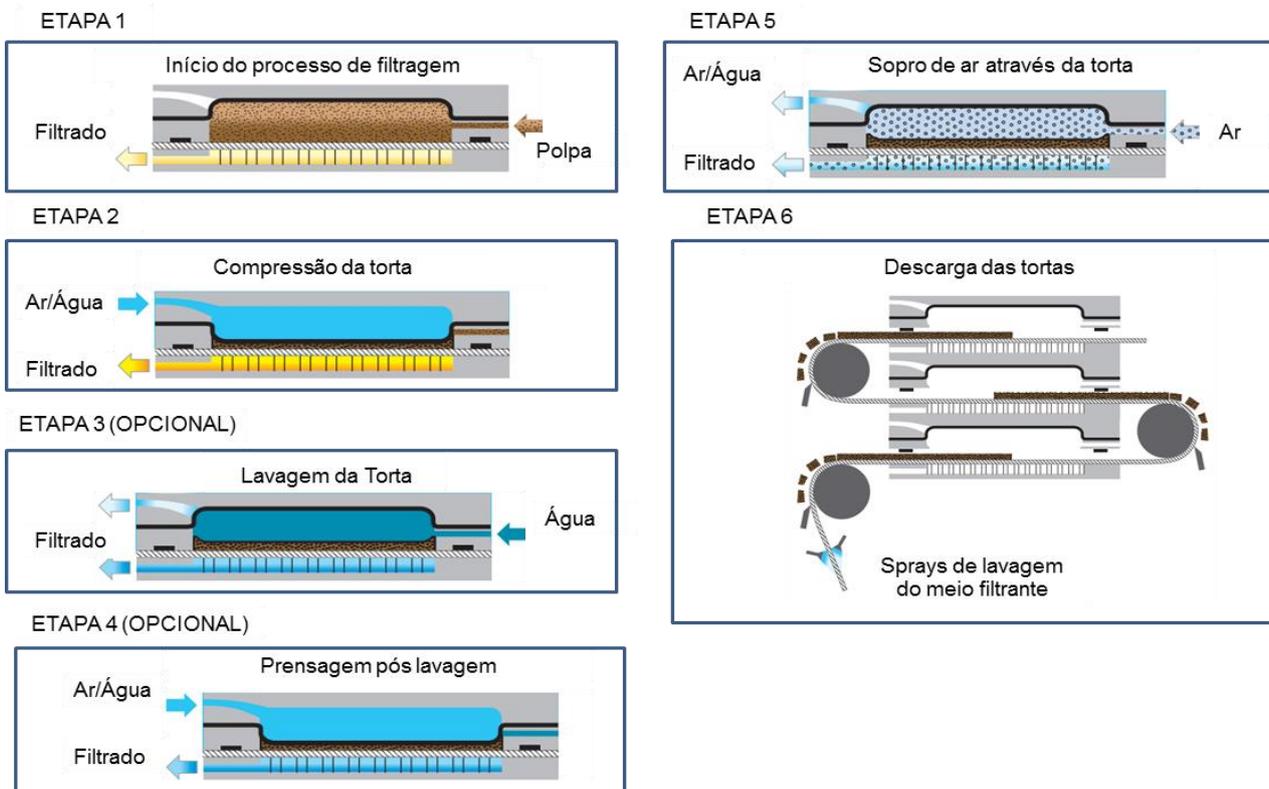


FIGURA 2.16 – Ciclo de um filtro de pressão vertical (Guimarães, 2011).

Avery e Wilson (2013) apresentaram resultados de testes de filtração com filtro prensa realizados em lama vermelha. O modelo do filtro prensa utilizado foi FLS AFP IV<sup>TM</sup> da FLSmith. Os resultados mostraram que o modelo básico do filtro consegue filtrar lama vermelha de um teor de sólidos inicial na alimentação do filtro de 30 a 40% para um teor de sólidos final da torta de 67 a 70%. Os autores concluíram que vários fatores afetam a taxa de filtração e o teor de sólidos final da torta, incluindo o teor de sólidos na alimentação dos filtros, a temperatura da lama, a relação entre a taxa de fornecimento da bomba de alimentação e a pressão, e a configuração das placas do filtro. Alguns testes mostraram que a filtração com alta pressão de cerca de  $3 \times 10^6$  Pa pode produzir teor de sólidos final de 75%. Avery e Wilson (2013) recomendam realizar testes de laboratório e/ou com equipamento piloto para estudar as especificidades de cada caso:

- As fases da filtração e os tempos de ciclos podem variar consideravelmente;
- Dependendo do material, podem ser alcançados teores de sólidos maiores que 80%;
- A eficiência da lavagem da torta para recuperação da soda deve ser estudada.

## **2.5 Comportamento geotécnico de solos compactados**

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

O fenômeno da compactação de um solo consiste, basicamente, na redução de seu índice de vazios, obtida pela ação de uma força mecânica. É comum associar esta redução à ocorrência de variação na fase gasosa do solo (CRISPIM, 2007). A compactação visa aumentar o contato entre os grãos e tornar o aterro mais homogêneo, buscando a melhoria das características do solo, como o aumento da resistência ao cisalhamento, redução da deformabilidade e da permeabilidade. Para tanto, é necessário especificar qual é a redução do índice de vazios necessária para cada caso e definir a melhor maneira de obtê-la no campo.

A compactação se dá pela expulsão do ar dos vazios do solo, mantendo-se constante as quantidades de partículas e de água no solo. Como já é bem sabido, quando se compacta o solo com

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

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

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

Com o emprego de diferentes energias de compactação em um mesmo solo, observa-se que, com o aumento da energia, tem-se uma diminuição do teor de umidade ótima e um aumento da densidade aparente seca máxima, como pode ser visualizado na FIGURA 2.17. A estrutura do solo obtida com a compactação depende da energia aplicada e da umidade do solo, como ilustrado na FIGURA 2.. Quando o solo é compactado em umidade baixa (ramo seco da curva de compactação), a atração face-aresta das partículas não é vencida pela energia aplicada, e o solo fica com a estrutura denominada floclulada. Para umidades maiores (ramo úmido da curva de compactação) a compactação promove a orientação das partículas, posicionando-as paralelamente, em uma estrutura denominada dispersa. Para a mesma umidade, quanto maior a energia de compactação, maior o grau de dispersão.

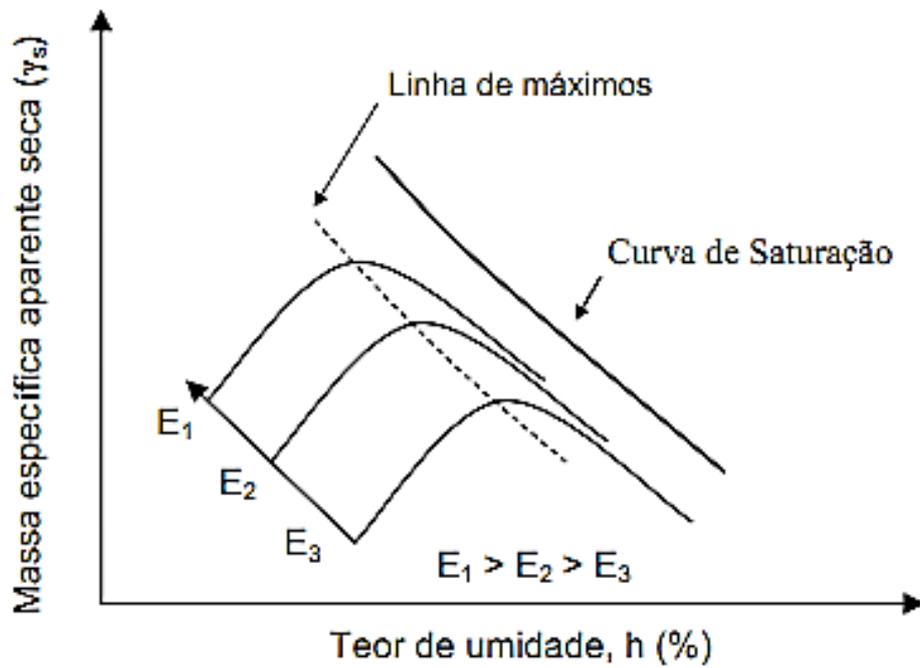


FIGURA 2.17 – Influência da energia de compactação na curva de compactação de um mesmo solo (modificado de DNIT, 2006).

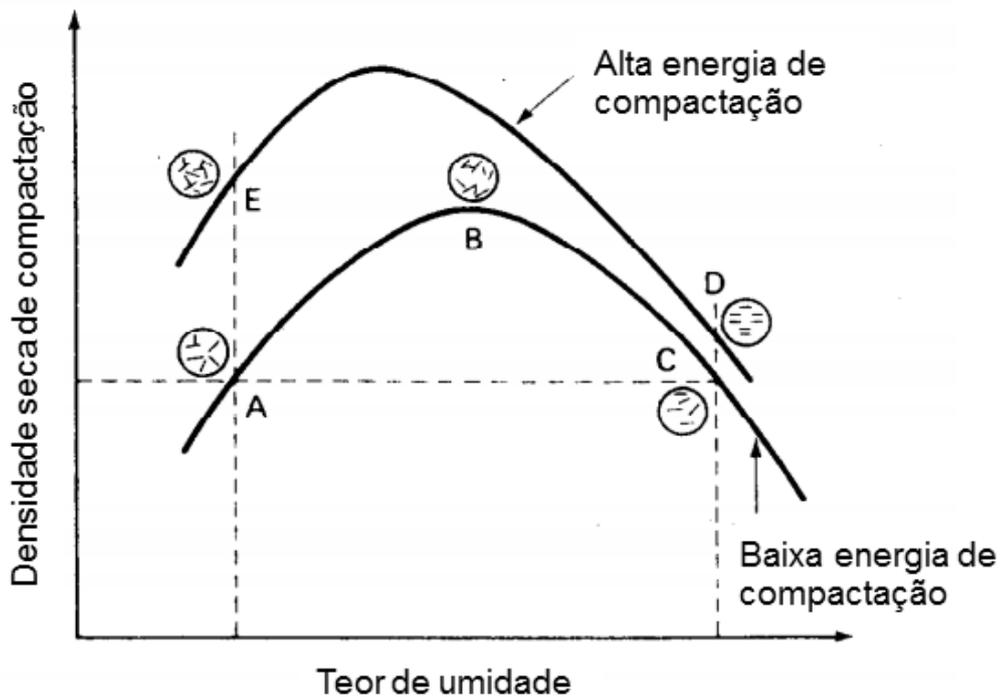


FIGURA 2.20 – Estrutura de solos compactados. (adaptado de LAMBE, 1958)

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

- Classe 1 – Solos que apresentam tendência a dispersar apenas por incremento da umidade.
- Classe 2 – Solos que apresentam tendência a floccular, de forma que um aumento na umidade não produz aumento da dispersão. A combinação do aumento de umidade com um método de compactação que produz grandes deformações cisalhantes podem produzir uma estrutura dispersa.
- Classe 3 – Solos onde a tendência a floccular é tão grande que só um aumento de umidade e utilização de um método de compactação com grandes deformações cisalhantes produzem uma estrutura dispersa.
- Classe 4 – Solos que tendem a dispersar mesmo quando moldados no ramo seco, com o método de compactação induzindo ou não deformações cisalhantes.
- Classe 5 – Solos que apresentam pronunciado incremento na dispersão quando compactado no ramo úmido, mas tal fato é mascarado por outros fatores de forma a não se perceber as variações estruturais ocorridas.

Para uma mesma energia de compactação, o tipo de solo tem influência na curva de compactação. Os solos argilosos apresentam umidades ótimas mais elevadas e massas específicas aparentes secas máximas menores que os solos siltosos e arenosos (FIGURA 2.). A compactação do solo pode ser feita por 4 diferentes processos, os quais podem ser reproduzidos em laboratório:

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

## **2.6 Breve abordagem sobre solos não saturados e curva característica de sucção**

A filtragem do resíduo com filtro prensa resulta em teores de sólidos elevados (de 70% a 80%) e grau de saturação em torno de 80%. Logo após a filtragem, o resíduo é direcionado à sua

disposição final nesta condição, ou seja, não saturado, onde deve ser promovida sua compactação, sempre selando as camadas, com inclinações da superfície de forma a diminuir a taxa de infiltração de água de chuva, mantendo-se assim a condição não saturada do resíduo na pilha. Logo, para o dimensionamento da pilha, é importante conhecer o comportamento do resíduo quando não saturado.

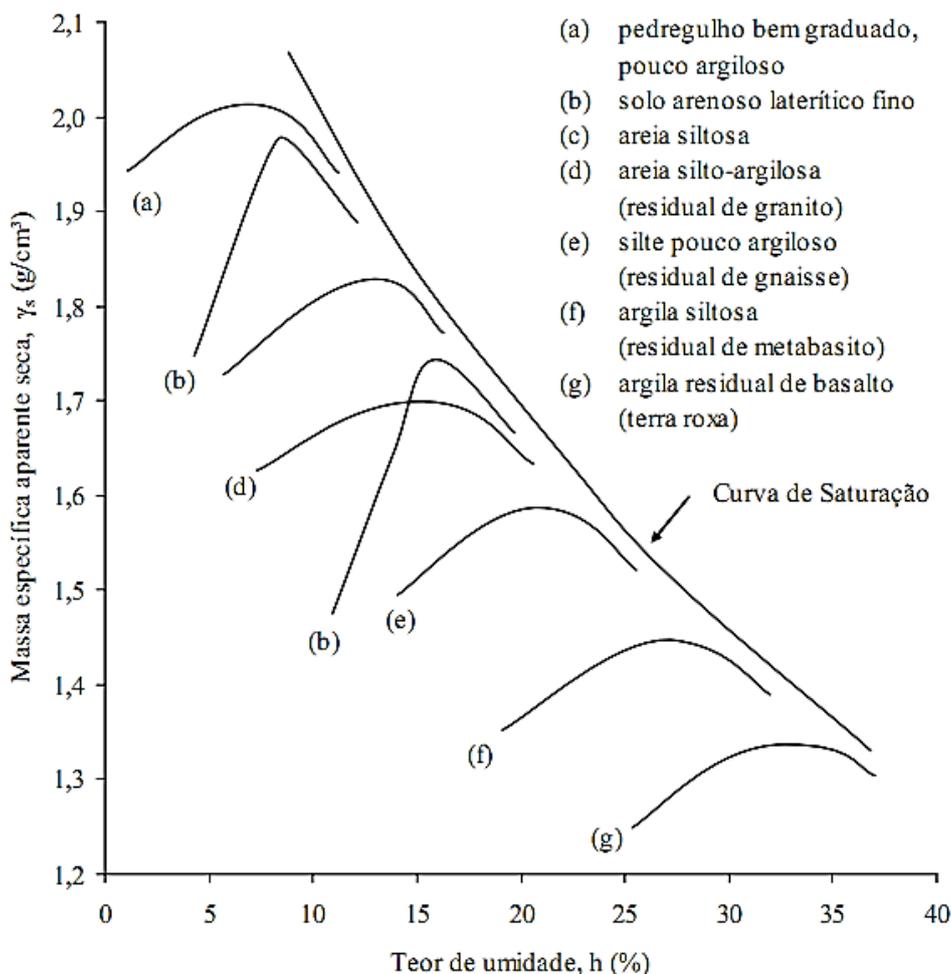


FIGURA 2.21 – Curvas de compactação de diferentes tipos de solo, para uma mesma energia de compactação (modificado de SOUZA PINTO, 2006).

O solo não saturado é constituído de um sistema trifásico (partículas sólidas, água e ar). Quando ocorre o fluxo de água livre em um solo não saturado, a mesma pode ser retirada ou adsorvida por ele. A sucção de um solo é a quantidade de energia necessária para reter a água neste solo. Em geral, a sucção é dividida em duas parcelas: matricial e osmótica. A componente matricial ( $S_m$ ) está relacionada com a matriz do solo, ou seja, ao tipo de partícula e seu arranjo estrutural. A componente osmótica ( $S_{om}$ ) está relacionada à concentração química da água do solo. A sucção total ( $S_t$ ) é, então, a soma estas duas componentes (EQ. (2.3) (Marshall, 1959 apud Villar, 2002):

$$S_t = S_m + S_{om} \quad (2.3)$$

A sucção matricial, por sua vez, é composta de duas parcelas, a sucção capilar ( $S_c$ ) e a sucção de adsorção ( $S_{ad}$ ). A sucção capilar está relacionada ao nível macro estrutural do solo, quando os poros são interligados e a água flui devido a gradientes de pressão capilar. Já a sucção de adsorção está relacionada ao nível micro estrutural, ocorre pela hidratação de minerais argílicos. Fredlund (1979) afirma que o comportamento dos solos não saturados depende basicamente da parcela de sucção matricial. A parcela osmótica estaria associada à ocorrência de diferenças de concentração de solutos no solo, não contribuindo significativamente para sua resistência ao cisalhamento.

A curva característica de sucção de um solo ou curva de retenção de água é a relação entre a sucção e a quantidade de fluido no solo. A quantidade do fluido no solo pode ser expressa pela umidade gravimétrica ( $w$ ), grau de saturação ( $S$ ) ou umidade volumétrica ( $\theta$ ) (FREDLUND E XING, 1994). Dentre os principais fatores que influenciam na forma da curva característica, podem ser citados o tipo de solo (estrutura e agregação), o teor de umidade inicial, o índice de vazios, a textura, a mineralogia, a história de tensões, e os métodos de compactação. A curva característica de sucção pode ser utilizada para fornecer estimativa de parâmetros importantes para a descrição do comportamento do solo não saturado, tais como permeabilidade, resistência ao cisalhamento e variação de volume (VILLAR, 2002). A FIGURA 2. apresenta a curva característica típica de um solo siltoso.

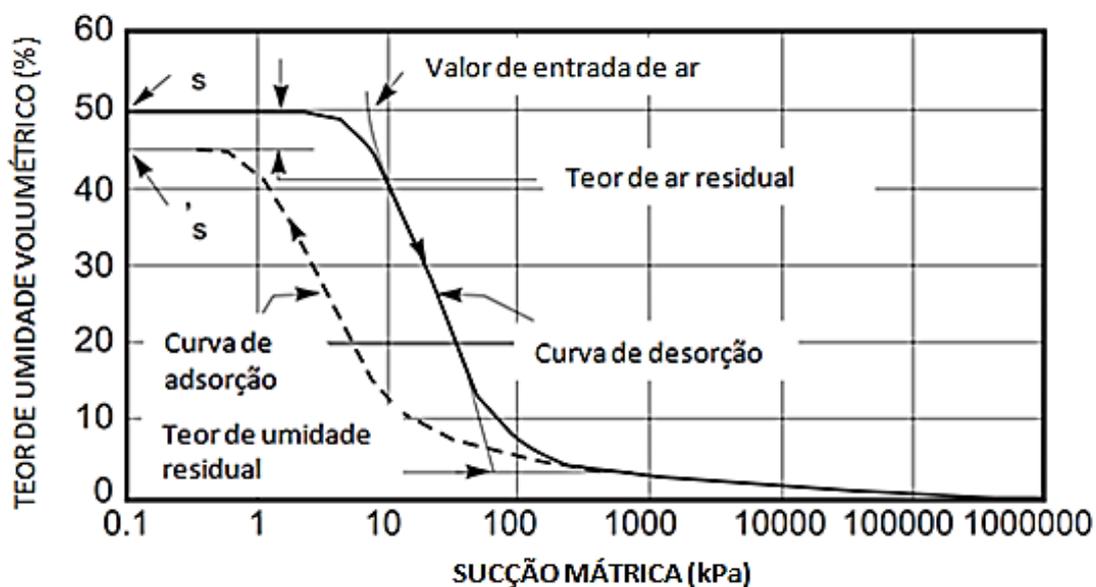


FIGURA 2.22 – Curva característica típica de um solo siltoso (adaptado de Fredlund e Xing, 1994).

Segundo Fredlund e Xing (1994), o valor de entrada de ar representa o nível de sucção a partir do qual o ar começa a entrar nos maiores vazios do solo. Nos teores de umidade acima do valor de entrada de ar, os conceitos da Mecânica dos Solos clássica são válidos, quando se considera o solo estando saturado. O ponto de teor de umidade residual é aquele além do qual é necessária uma grande variação de sucção para remover a água ainda presente no solo, pois a fase líquida encontra-se descontínua. Assim, pequenas variações no teor de umidade acarretam grandes aumentos de sucção. Geralmente, o teor de umidade volumétrica e o valor de entrada de ar crescem com a plasticidade do solo. Outros fatores, como o histórico de tensões, também afetam a forma da curva característica. A FIGURA 2. apresenta curvas características típicas para diferentes tipos de solos.

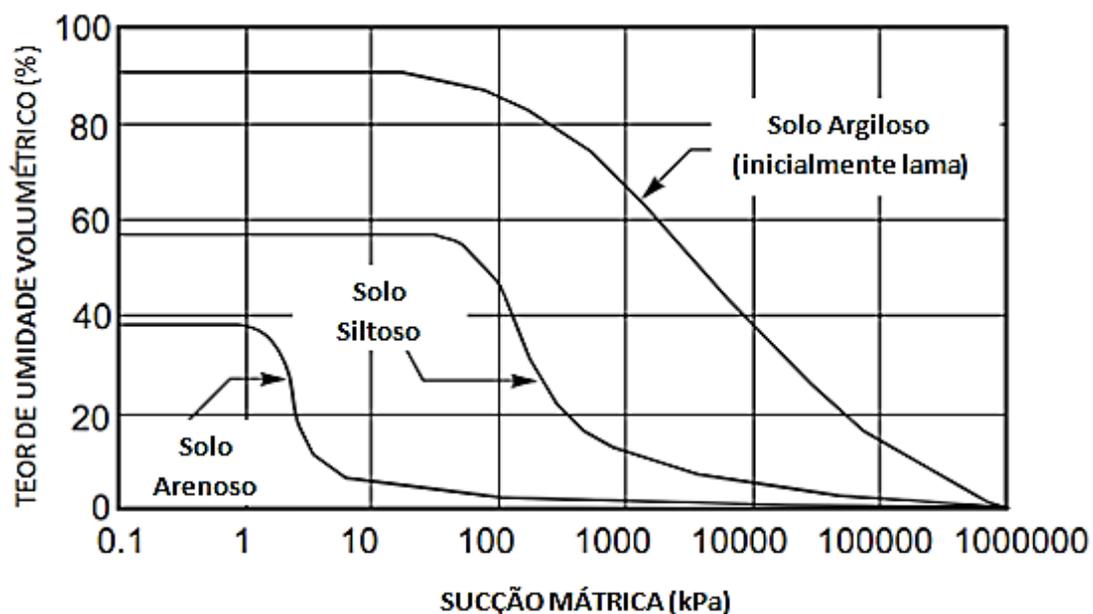


FIGURA 2.23 – Curvas características típicas para diferentes tipos de solos (adaptado de Fredlund e Xing, 1994).

Além do formato unimodal apresentado na FIGURA 2., a curva característica de sucção pode apresentar-se também no formato bimodal, quando o solo apresenta em sua estrutura microporos e macroporos bem definidos. Estas curvas apresentam como características principais dois valores distintos de entrada de ar e a presença de um patamar intermediário. No primeiro trecho da curva, a dessaturação é governada pela macroestrutura, ou seja, quando o solo apresenta grumos ou partículas argilosas fortemente agregadas em tamanho de grãos de areia, tendendo a perder água mais facilmente. No patamar intermediário, o aumento da sucção não provoca uma variação significativa no teor de umidade, pela ausência de poros de tamanho intermediário e devido a alta capacidade da microestrutura em reter água. No último trecho da curva, que tem início

no segundo valor de entrada de ar há redução do grau de saturação devido à retirada progressiva de água da microestrutura do solo, ou seja, no interior dos grumos ou micro-agregados de argila. A FIGURA 2. ilustra a curva bimodal.

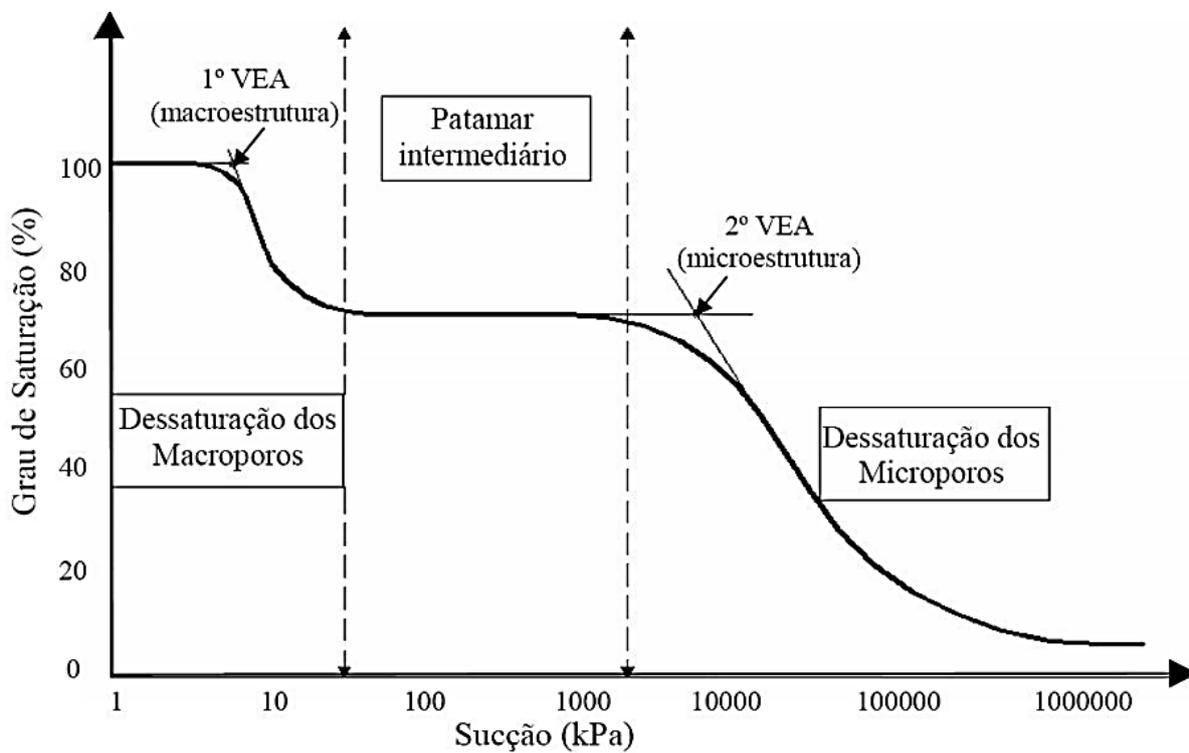


FIGURA 2.24 – Curva característica bimodal (adaptado de Feuerharmel et al, 2005).

Segundo Villar (2002), a curva característica de sucção de um solo pode ser obtida em laboratório pela aplicação de diferentes equipamentos e técnicas que têm sido exaustivamente discutidas em vasta literatura. Pan *et al* (2010) descreve diversos métodos, diretos e indiretos, para medição em laboratório da sucção no solo. O QUADRO 2.4 apresenta um resumo destes métodos. Custódio (2009) desenvolveu um estudo do efeito combinado da estrutura e da sucção sobre o comportamento mecânico de solos não saturados utilizando as técnicas de placa de sucção e da placa de pressão para determinação da sucção dos solos. Lee & Wray (1995), apud Villar (2002), fizeram uma comparação entre alguns equipamentos e técnicas de medida de sucção. Eles obtiveram uma curva característica de sucção por meio de uma placa de pressão e a utilizaram para comparação entre as técnicas. Eles utilizaram um solo com sucção osmótica desprezível e confeccionaram amostras deste solo com sucção matricial conhecida. A medição da sucção por vários instrumentos obteve boa concordância. Os resultados foram superpostos na curva característica de sucção do solo, conforme mostrado na FIGURA 2.18, indicando que as respostas são semelhantes e que o uso de instrumentos diferentes conduz a medição da mesma grandeza

quando corretamente calibrados e utilizados, sendo assim possível a utilização de diferentes técnicas na obtenção de uma única curva característica de sucção.

QUADRO 2.4 – Resumo das técnicas/métodos de medição da sucção no solo (adaptado de Pan *et al*, 2010)

		Técnica (Método)	Intervalo de sucção (kPa)	Tempo de equilíbrio
Medida direta da sucção	Sucção Mátrica	Técnica de translação de eixos	0 – 1.500	Horas
		Tensiômetro		Horas
		Sonda de sucção		Minutos
Medida indireta da sucção	Sucção Mátrica	Reflectômetro	0 – 1.500	Horas
		Sensor de condutividade elétrica	50 – 1.500	6 a 50 horas
		Sensor de condutividade térmica	1 – 1.500	Horas/ dias
		Papel Filtro com contato	Todo	7 a 14 dias
	Sucção Osmótica	Técnica de compressão	0 – 1.500	Dias
	Sucção Total	Psicrômetro	100 – 10.000	1 hora
		Sensor da umidade relativa	100 – 8.000	Horas/dias
		Higrômetro de espelho refrigerado	150 – 30.000	10 minutos
Papel filtro sem contato		Todo	7 a 14 dias	

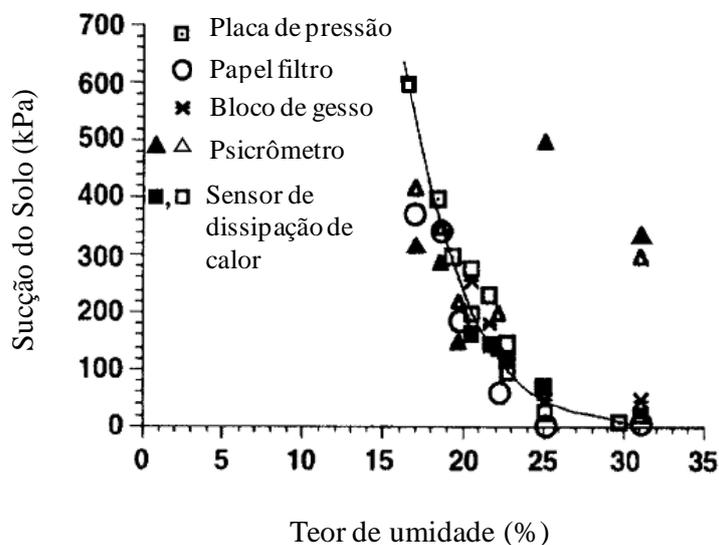


FIGURA 2.18 – Comparação entre várias técnicas de medição de sucção (Villar, 2002).

Existem várias equações propostas para ajuste da curva característica de sucção, citadas por Fredlund e Xing (1994). As equações propostas na literatura são em sua maioria de natureza empírica e cada equação pode ser aplicada para um grupo particular de solos. A equação proposta por Fredlund e Xing (1994) descreve a curva característica de sucção para todo o intervalo de

sucção (ou seja, 0 a 1.000.000 kPa). Em termos de grau de saturação e sucção do solo a equação é escrita conforme a seguir (EQ. (2.4):

$$S = \left[ 1 - \frac{\ln \left( 1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right)}{\ln \left( 1 + \frac{1.000.000}{\psi_r} \right)} \right] \left[ \frac{1}{\ln \left( e + \left( \frac{\psi}{a} \right)^n \right)} \right]^m \quad (2.4)$$

Onde:

S = grau de saturação;

$\psi$  = sucção do solo;

e = número natural, 2,71828..;

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

a = uma aproximação do valor de entrada de ar;

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

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

Os parâmetros de ajuste a, n e m podem ser determinados usando o procedimento de regressão não linear descrito por Fredlund e Xing (1994).

Fredlund et al (1995) desenvolveu uma solução para previsão da resistência ao cisalhamento de solos não saturados usando a equação 2.4 para definição da curva característica de sucção do solo. Com a previsão dos parâmetros de resistência com base na equação da curva característica de sucção do resíduo, portanto, será possível prever o comportamento de uma pilha de resíduo não saturado, verificando-se a variação do fator de segurança dos taludes ao longo do ano, para períodos de estiagem e de chuvas. O modelo preditivo geral para a resistência ao cisalhamento usando a equação da curva característica de sucção do solo é (EQ. (2.5):

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + \tan \phi' \int_0^{\psi} \left[ \left( \frac{S - S_r}{1 - S_r} \right) \right] d(u_a - u_w) \quad (2.5)$$

Onde:

$S_r$  = saturação residual,

$c'$  é o intercepto de coesão;

S é o grau de saturação;

$S_r$  é o grau de saturação residual;  $(u_a - u_w)$  é a sucção matricial

## 2.7 Breve descrição sobre ensaios triaxiais PN (pressão neutra)

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

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

Os ensaios triaxiais tipo PN devem ser realizados na umidade de compactação (grau de saturação) das condições de campo. Na consolidação inicial de um aterro ocorre a presença de ar na estrutura do solo, existindo uma poropressão negativa devido a sucção. Porém, com a compactação das camadas superiores, que ocorre como um carregamento não drenado, há geração de variações positivas da poropressão, aumentando-a devido ao confinamento da água dentro da estrutura do solo. Alguns exemplos de projetos de barragens que utilizaram este tipo de ensaio são Ilha Solteira (Paraná) e Serra da Mesa (Goiás).

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 O resíduo estudado

O material em estudo consiste no resíduo obtido durante o estágio de clarificação do Processo Bayer para produção de alumina (denominado lama vermelha) da refinaria da CBA – Companhia Brasileira de Alumínio, localizada no município de Alumínio – SP, próximo à cidade de Sorocaba. A bauxita utilizada na produção da alumina na unidade CBA-Alumínio é proveniente de Poços de Caldas e Itamarati de Minas (zona da mata), Minas Gerais.

Este resíduo é atualmente filtrado por filtros tambores para recuperação da soda presente no filtrado 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 os estudos em questão, o resíduo foi filtrado por filtro tipo prensa piloto até um teor de sólidos (porcentagem de sólidos) de aproximadamente 75%.

### 3.2 Modelo de filtro prensa piloto utilizado

O filtro prensa piloto utilizado para o desaguamento do resíduo estudado é de fabricação da Diemme, modelo KE 500 com placas de alimentação central, com lavagem/secagem pela extremidade (2 pontos) (FIGURA 3.1).



FIGURA 3.1 – Filtro prensa piloto da Diemme utilizado no desaguamento do resíduo estudado.

Após os processos de alimentação das câmeras, filtragem, pressurização e secagem do resíduo, foram produzidas “tortas” de 500 x 500 mm e 30 mm de espessura. É importante ressaltar que o modelo e o tamanho do filtro prensa, bem como os processos envolvidos na filtragem, tamanho, tipo e design da câmera de filtragem são extremamente importantes para a obtenção das características desejáveis do resíduo filtrado. Sendo assim, para a escala real de filtragem é necessário que o filtro prensa seja projetado considerando as propriedades do resíduo em questão.

### **3.3 Área teste para coleta de amostras**

Para a avaliação do comportamento do resíduo compactado, foram coletadas amostras indeformadas (blocos) em uma área teste, onde o resíduo em estudo foi compactado por tratores. Nestas amostras, foram realizados ensaios de laboratório de forma a se obter parâmetros de resistência, permeabilidade e compressibilidade. A metodologia e descrição da execução da compactação do resíduo na área teste foram apresentadas por Nery et al (2013). Além da coleta das amostras, também foram objetivos da área teste:

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

Para a simulação da formação da pilha de estoque, três sacos, cada um contendo cerca uma tonelada de resíduo, foram içados por um caminhão do tipo Munck até uma altura de cerca de dois metros e, então, a parte inferior dos mesmos foi aberta para permitir a queda do resíduo e consequente formação de uma pilha em formato de um cone (FIGURA 3.2 e FIGURA 3.3). A densidade da pilha foi determinada pelo método da cravação do cilindro biselado e pelo método da membrana, onde se abre uma cavidade na pilha, pesando o material retirado para abertura desta cavidade, coloca-se uma membrana cobrindo esta cavidade por dentro e preenche com água, medindo-se o volume de água necessário para preencher a cavidade.

Para a obtenção do grau de compactação do resíduo com passadas do trator de esteiras, foram abertas duas valas espaçadas entre si na medida do espaçamento entre as esteiras do trator de esteiras. Cada vala teve 0,40m de profundidade, 0,75m de largura e seis metros de comprimento, preenchidos com o resíduo desaguado pelo filtro prensa. Foi, então, promovida a compactação da camada de resíduo das duas valas com 6, 8, 10, 12 e 14 passadas das esteiras de uma escavadeira

Doosan SOLAR255LC-V, cujas características relevantes estão apresentadas na QUADRO 3.1. Para cada número de passadas foi, então, coletadas amostras indeformadas (blocos) para a realização de ensaios de laboratório, exceto para 6 passadas, na qual não foi possível coletar o bloco devido ao baixo grau de compactação na base. Também foram coletados 500 kg de amostra deformada na saída do filtro prensa, para realização de ensaios geotécnicos de laboratório.



FIGURA 3.2 – Içamento dos sacos pelo caminhão Munck para simulação da formação da pilha de estoque.



FIGURA 3.3 – Simulação da formação da pilha de estoque.

QUADRO 3.1 – Características do equipamento utilizado nos testes de compactação do resíduo

Equipamento	Excavator Doosan SOLAR255LC-V
Largura da esteira (m)	0,60
Comprimento da esteira (m)	3,83
Area de contato com o terreno (m <sup>2</sup> )	4,60
Peso do equipamento (kg)	24.600
Tensão de contato com o terreno (kg/m <sup>2</sup> )	5.352

### 3.4 Amostras para ensaios de laboratório

O QUADRO 3.2 relaciona os tipos e quantidades das amostras do resíduo desaguado pelo filtro prensa utilizadas para a realização de ensaios de laboratório.

QUADRO 3.2 – Amostras do resíduo desaguado pelo filtro prensa utilizadas para os ensaios de laboratório

Amostra	Tipo de amostra	Característica da amostra	Quant.
1	Deformada	Resíduo na saída do Filtro Prensa	500 kg
2	Indeformada Bloco 30 x 30 x 30 cm	8 passadas da esteira	1 bloco
3		10 passadas da esteira	1 bloco
4		12 passadas da esteira	1 bloco
5		14 passadas da esteira	1 bloco

### 3.5 Ensaios de laboratório

Os QUADRO 3.3 e QUADRO 3.4, a seguir, apresentam os ensaios realizados nas amostras deformadas e indeformadas do resíduo desaguado pelo filtro prensa. Os ensaios de laboratório realizados visam a caracterização do material e a avaliação do seu comportamento geotécnico quando compactado.

#### 3.5.1 Preparação das amostras e condições de moldagem dos corpos de prova

As amostras para os ensaios de caracterização (determinação do teor de umidade higroscópica, peso específico dos grãos, granulometria conjunta, limites de Atterberg) e compactação com destorroamento foram preparadas de acordo com a norma da ABNT – NBR 6457/1986 – “Amostras de Solo – Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de caracterização”.

QUADRO 3.3 – Ensaios realizados com amostras deformadas

Item	Ensaio	Título da Norma	Código da Norma	Quantidade
1	Determinação do Teor de Umidade	Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização	NBR-6457 (ABNT, 1986)	3
2	Peso Específico dos Grãos	Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm - Determinação da massa específica	NBR-6508 (ABNT, 1984)	3
3	Peso Específico Natural da "torta"	Determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas, com emprego de balança hidrostática	NBR-10838 (ABNT, 1988)	3
4	Granulometria Completa (com defloculante)	Solo - Análise Granulométrica	NBR-7181 (ABNT, 1984) Versão corrigida 1988	2
5	Granulometria Completa (sem defloculante)			2
6	Limite de Liquidez	Solo - Determinação do Limite de liquidez	NBR-6459 (ABNT, 1984)	3
7	Limite de Plasticidade	Solo - Determinação do Limite de plasticidade	NBR-7180 (ABNT, 1984) Versão corrigida 1988	3
8	Difração de Raios X (DRX)	-	-	1
9	Microscopia Eletrônica	-	-	1
10	Compactação Proctor Normal (com destorroamento)	Solo – Ensaio de Compactação	NBR-7182 (ABNT, 1986) Versão corrigida 1988	3
11	Compactação Proctor Normal (sem destorroamento)			3
12	Permeabilidade a carga variável	Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável	NBR-14545 (ABNT, 2000)	9*
13	Curva Característica de Sucção (placa de pressão e placa de sucção)	Procedimentos descritos na tese de doutorado de Custódio (2009) (uma breve descrição deste ensaio será feita mais adiante)	-	9*
14	Adensamento Unidimensional (com 11 estágios)	Solo - Ensaio de adensamento unidimensional	NBR-12007 (ABNT, 1990)	9*
15	Ensaios de Compressão Triaxial UU (4 corpos de prova por ensaio)	Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soil	ASTM D2850 03a(2007)	9*
16	Ensaios de Compressão Triaxial PN (1 corpo de prova por ensaio)	Manual of Soil Laboratory Testing – Effective Stress Tests (uma breve descrição deste ensaio será feita mais adiante)	HEAD, 1986, vol.III	9*

OBS: \* 1 ensaio para cada condição de moldagem, descritas no QUADRO 3.5.

QUADRO 3.4 – Ensaio realizados com amostras indeformadas

Item	Ensaio	Título da Norma	Código da Norma	Quant. por bloco	Quant. total
1	Determinação do Teor de Umidade	Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização	NBR-6457 (ABNT, 1986)	3	12
2	Peso Específico Natural do bloco	Determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas, com emprego de balança hidrostática	NBR-10838 (ABNT, 1988)	3	12
3	Permeabilidade a carga variável	Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável	NBR-14545 (ABNT, 2000)	1	4
4	Curva Característica de Sucção (placa de pressão e placa de sucção)	Procedimentos descritos na tese de doutorado de Custódio (2009) (uma breve descrição deste ensaio será feita mais adiante)	-	3	12
5	Adensamento Unidimensional (com 11 estágios)	Solo - Ensaio de adensamento unidimensional	NBR-12007 (ABNT, 1990)	1	4
6	Ensaio de Compressão Triaxial UU (4 CP)	Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soil	ASTM D2850 03a(2007)	1	4
7	Ensaio de Compressão Triaxial PN (1 CP)	Manual of Soil Laboratory Testing – Effective Stress Tests (uma breve descrição deste ensaio será feita mais adiante)	HEAD, 1986, vol.III	1	4

Para alguns ensaios de compactação bem como para a moldagem dos corpos de prova para ensaios de permeabilidade, microscopia eletrônica, curva característica de sucção, adensamento e ensaios triaxiais UU (não consolidado e não drenado) e PN (pressão neutra), a amostra não foi destorroada, visando a avaliação do real comportamento deste material em campo. De forma a simular em laboratório possíveis condições de compactação do resíduo no campo, foram definidas 9 condições de moldagem dos corpos de prova (QUADRO 3.5) para posterior medição da permeabilidade, curva de retenção de umidade, compressibilidade e resistência ao cisalhamento. Porém, devido à dimensão reduzida dos corpos de prova, pela limitação dos equipamentos do laboratório, as “tortas” foram quebradas em pedaços menores, de cerca de aproximadamente 2cm.

### 3.5.2 Procedimentos Específicos para a realização dos ensaios

Para alguns ensaios, além dos procedimentos recomendados pelas respectivas normas técnicas aplicáveis, alguns procedimentos específicos foram definidos, objetivando a melhor

obtenção dos resultados e de forma a se ter uma avaliação do comportamento do resíduo na condição em que ele será submetido em campo no método de disposição a seco, com compactação do material. Os subitens a seguir apresentam procedimentos específicos utilizados em cada ensaio.

QUADRO 3.5 – Condições de moldagem dos corpos de prova para ensaios de permeabilidade, curva característica de sucção, adensamento e ensaios triaxiais UU e PN

Grau de Compactação (GC)	Teor de Umidade
90%	w <sub>ót</sub> - 5%
	w <sub>ót</sub>
	w <sub>ót</sub> + 5%
95%	w <sub>ót</sub> - 5%
	w <sub>ót</sub>
	w <sub>ót</sub> + 5%
100%	w <sub>ót</sub> - 5%
	w <sub>ót</sub>
	w <sub>ót</sub> + 5%

(i) Difração Raio X

O ensaio de difração de raios X foi realizado por meio de difratômetro, onde há incidência de raios X sobre a amostra. Através deste processo foram obtidos os registros gráficos (difratograma), onde são apresentados os picos que representam as distâncias interplanares entre as bases formadas pelos planos cristalinos do mineral. Estes picos correspondem a vários ângulos de um goniômetro, onde, através desses ângulos, o espaçamento cristalográfico dos minerais é calculado por meio da Lei de Bragg. Uma vez calculado, este espaçamento é comparado com uma série de arquivos preexistentes de minerais conhecidos e é obtida a classificação mais provável do composto presente no material analisado. Por se tratar de uma comparação, os resultados estão sujeitos a uma margem de erro.

A preparação da amostra foi realizada com o destorroamento e peneiramento na peneira 0,42 mm (#40). Com o objetivo de uma melhor determinação dos constituintes da fração argila, o ensaio foi realizado em lâminas orientadas pelo método do gotejo. Este ensaio consiste em misturar a amostra preparada ao dispersante/defloculante (foi utilizado o hexametáfosfato de sódio, que comumente é utilizado para solo em ensaios geotécnicos), na concentração de 0,2% em massa, e deixá-la em repouso por 24 horas. A solução, então, foi colocada no dispersor e agitada por um período de 10 minutos e, em seguida, colocada numa proveta com capacidade de 1000 ml e completada com água destilada. O material ficou em repouso por 24 horas e, após esse período,

foram retirados os primeiros 20 cm de líquido da proveta. Completou-se novamente a proveta com água destilada até 1000 ml e agitou-se manualmente para melhor dispersão das partículas, permanecendo em repouso por mais 24 horas. Este processo foi realizado repetidas vezes até que a água estivesse completamente límpida sem suspensão de partículas. Toda água proveniente dos primeiros 20 cm de líquido retirados das provetas foi colocada em beakers e levados a estufa até completa evaporação.

Do material resultante de todo o processo, foram confeccionadas lâminas através do método do gotejo para a realização das análises. O método do gotejo consiste em preparar uma pasta bem diluída com o material proveniente da sedimentação e dispô-lo em uma lâmina de vidro gotejando-o com o auxílio de uma pipeta. Este método provê um melhor resultado, pois na sua realização não é imposta uma orientação das partículas. As amostras foram então submetidas à difração de raios X.

#### (ii) Microscopia Eletrônica

O princípio de funcionamento do microscópio eletrônico de varredura (MEV) consiste na incidência de um feixe de elétrons de alta energia na superfície da amostra, onde ocorre uma interação e parte do feixe é refletido e coletado pelo detector. As imagens são normalmente obtidas por elétrons secundários (ES) que provém de interações inelásticas entre os elétrons e a amostra, pois fornecem imagens de maior resolução com impressão tridimensional e de fácil interpretação.

Para a realização do ensaio, pequenos torrões da amostra do resíduo foram colocados na estufa a 40° por um período de 72 horas, tempo suficiente para secar as amostras em temperatura que não comprometa as características dos argilominerais presentes. As amostras foram preparadas em torrões e não em lâminas, pois a forma de torrões permite uma visão espacial da disposição dos argilominerais presentes na amostra.

#### (iii) Curva Característica de Sucção

O resíduo desaguado pelo filtro prensa apresenta-se na condição não saturada e assim é esperado de permanecer a maior parte de sua vida útil, senão toda. Por isso, para o resíduo estudado, foram determinadas as curvas características de sucção para corpos de prova moldados a partir dos blocos indeformados e nas diferentes condições de compactação estabelecidas no QUADRO 3.5. Para tanto, foi utilizado o método da placa de sucção, para valores até 20 kPa, e acima deste valor, foi utilizada a placa de pressão. Ambos os métodos foram descritos por Custódio (2009).

Nas técnicas da placa de sucção e da placa de pressão são utilizadas placas cerâmicas com alto valor de entrada de ar, previamente saturadas, onde as amostras são dispostas. Num solo submetido à sucção, sob condições do meio ambiente, a pressão de ar é a própria pressão atmosférica e a pressão de água no solo é negativa, visto que a sucção é representada matematicamente pela pressão de ar menos a pressão de água no solo ( $u_a - u_w$ ). Na técnica da placa de pressão, esta condição é obtida através da conexão de um tubo preenchido de água deaerada na face inferior da placa, estando sua outra extremidade em condição atmosférica normal. Quando há o deslocamento da extremidade livre do tubo em cota inferior à do conjunto placa-solo, é gerada uma pressão negativa na água do solo. Porém, em ensaios de laboratório, as pressões negativas da água são limitadas a 1 atm (9,81 kPa), sendo que, acima deste valor, ocorre cavitação do sistema.

A técnica da placa de pressão se baseia na translação de eixos de Hilf (1956), que consiste na aplicação da pressão de ar maior que a pressão atmosférica, ajustando as pressões até obter a diferença ( $u_a - u_w$ ) desejada, mantendo a pressão da água positiva para facilitar a medição. Estas condições são obtidas posicionando-se o conjunto placa-solo dentro da câmara de Richard. Esta câmara é um recipiente de paredes grossas, feita de ferro fundido, hermeticamente fechada com tampa. Dentro dela é aplicada uma pressão positiva sobre o conjunto placa-solo, o qual possui a face inferior da placa conectada ao meio externo. A FIGURA 3.4 ilustra a câmara de Richard aberta, com a placa cerâmica e algumas amostras de solo sobre ela.



FIGURA 3.4 – Câmara de Richard aberta com a placa cerâmica e algumas amostras de solo sobre ela (Custódio, 2009).

A obtenção da umidade da amostra de solo, tanto na técnica da placa de sucção quanto para placa de pressão, é feita por meio da pesagem do solo para uma dada sucção aplicada. O solo só é submetido a nova sucção quando se verifica uma constância de massa das amostras. O tipo de solo, altura do corpo de prova e valor de entrada de ar da placa cerâmica são alguns dos fatores que afetam a equalização da sucção.

#### (iv) Adensamento Oedométrico

Os ensaios de adensamento foram realizados com a aplicação de carregamento nos corpos de prova na seguinte sequência: 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1.600 kPa. O descarregamento foi realizado em 3 estágios. Os corpos de prova foram inundados desde o início do ensaio.

#### (v) Ensaios Triaxiais UU

Os ensaios de compressão triaxial UU (não adensado e não drenado) foram realizados com medida de poropressão, nas seguintes condições de confinamento: 50, 100, 200 e 400 kPa. Os corpos de prova foram moldados segundo condições descritas no QUADRO 3.5, com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Os corpos de prova não foram saturados para a realização dos ensaios. Isso foi definido pelo fato deste material apresentar baixa permeabilidade e a disposição do mesmo deverá ser feita com inclinações na superfície que devem permitir a drenagem da água de chuva, diminuindo a taxa de infiltração. Por isso, considerando as condições climáticas do local da disposição bem como as características geométricas da pilha, é adotada uma premissa de projeto de que o material não irá se saturar na condição de campo, o que levou à opção por manter os corpos de prova sem saturação, mas todos provavelmente em uma condição de ar ocluso e não de ar contínuo. Na montagem do corpo de prova na célula triaxial, foi colocada pedra porosa de alta pressão de entrada de ar saturada na base do pedestal para que as medidas de poropressão não fossem afetadas pela presença de ar. No topo do corpo de prova foi utilizado um top quepe sólido de forma a não permitir a drenagem. Os ensaios foram conduzidos a uma velocidade de deformação de 0,15 mm/min, definido de maneira arbitrária.

#### (vi) Ensaios Triaxiais PN

O ensaio triaxial PN (pressão neutra) é utilizado para determinar o valor do coeficiente de poropressão ( $\bar{B}$ ) e/ou o parâmetro  $R_u$ , conforme já descrito no Capítulo 02, sob condições em

que as tensões principais, (vertical e horizontal no ensaio triaxial), variam simultaneamente, tal como ocorre durante a construção de um aterro de solo. O procedimento para execução do ensaio triaxial PN foi descrito por Head (1998). As características essenciais do ensaio são:

- Medida de poropressão na base do corpo de prova;
- Pedra porosa de alta pressão de entrada de ar saturada na base do pedestal para que as medidas de poropressão não sejam afetadas pela presença de ar;
- Não permitir a drenagem no topo do corpo de prova, utilizando um top quepe sólido;
- Não é aplicada contra-pressão;
- Instalar um indicador de alteração de volume na célula. Embora seja um ensaio não drenado, o volume do corpo de prova irá alterar porque o solo é não-saturado e os vazios preenchidos por ar são compressíveis;
- A célula triaxial deve ser cuidadosamente calibrada para mudanças no volume com acréscimo da tensão e tempo;
- A área do pistão da célula deve ser conhecida;
- Deve-se garantir que não haverá vazamentos;
- O transdutor de deformação deverá ter precisão de 0,002mm.

Para a realização do ensaio PN, define-se uma relação  $\sigma_3/\sigma_1$  que, segundo Lacerda e Mahler (1973), geralmente varia entre 0,4 a 0,7. O corpo de prova é preparado nas medidas definidas, sendo a altura de 2 a 2,5 vezes o diâmetro, e montado na célula triaxial com a pedra de alta pressão de entrada de ar na base do pedestal, saturada, por onde serão feitas as medidas de poropressão. O ensaio é realizado com o corpo de prova não saturado, ou seja, na sua condição de campo. Os procedimentos do ensaio estão listados a seguir:

- 1) Registrar a poropressão inicial;
- 2) Encher a célula do triaxial com água deaerada, garantindo que não se formem bolhas de ar;
- 3) Ajustar a base da prensa do triaxial, até que o pistão esteja em contato com o quepe do corpo de prova. Fechar a entrada de ar e ajustar a prensa para a taxa de deformação apropriada;
- 4) Zerar o medidor do anel de carga;
- 5) Aumentar a pressão na célula (tensão confinante) para o primeiro estágio de pressão (50 kPa);

- 6) Recuperar o contato entre o pistão e o quepe se este tiver sido perdido devido à compressão do corpo de prova ou deflexão do anel ou célula de carga. Quando as condições estiverem ajustadas, registrar as leituras do anel ou célula de carga, da deformação, variação de volume e poropressão;
- 7) Plotar a pressão confinante efetiva no eixo horizontal do diagrama de trajetória de tensões. Neste instante:

$$\sigma'_3 = (50 - u_1)kPa$$

- 8) Iniciar o motor de compressão da prensa para aplicar a tensão desvio no corpo de prova. Em intervalos de deformação de 0,2%, fazer as leituras do anel ou célula de carga, deformação, variação de volume, poropressão e tempo.
- 9) Calcular a tensão desvio e a tensão efetiva confinante. Plotar estes valores no diagrama de trajetória de tensões.
- 10) Quando a trajetória de tensões interceptar a linha de  $\sigma_3/\sigma_1$  definida, desligar o motor da prensa e anotar as leituras para o ponto exato de intercepto da linha.
- 11) Aumentar a pressão confinante por mais um incremento. Quando as condições estiverem estáveis, registrar as leituras. A tensão desvio deve ser levemente reduzida, por causa de uma pequena compressão do corpo de prova e relaxamento do anel ou célula de carga.
- 12) Aplique novamente a tensão desvio e plote as leituras, até que se atinja novamente a linha de  $\sigma_3/\sigma_1$  definida.
- 13) Continue com os passos descritos acima para cada incremento da tensão confinante, até o valor desejado. Então, remova a tensão axial e a confinante, retire o corpo de prova da prensa, obtenha a massa e as medidas do corpo de prova, bem como o teor de umidade.

Para os ensaios em questão, foi utilizada a relação  $\sigma_3/\sigma_1 = 0,5$ . Os corpos de prova foram moldados nas condições definidas no QUADRO 3.5 e foram talhados a partir dos blocos indeformados, de cada condição de compactação da área teste. Os corpos de prova não foram saturados para a realização dos ensaios. Em cada corpo de prova, o ensaio foi conduzido, de acordo com os procedimentos descritos anteriormente, até atingir uma tensão desvio de 400 kPa. A velocidade do carregamento foi de 0,01 mm/min, verificando-se se esta velocidade é baixa o suficiente para permitir a equalização das poropressões no corpo de prova e sua medição.

## 4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 Resultados obtidos na Área Teste

A simulação da formação da pilha de estoque resultou em um ângulo de repouso de cerca de 35°, para o resíduo solto lançado (sem compactação). A densidade média obtida nesta pilha foi de 1,49 g/cm<sup>3</sup>. Os graus de compactação obtidos no topo e base da camada para cada número de passadas do equipamento de esteiras estão apresentados na TABELA 4.1.

TABELA 4.1 – 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

### 4.2 Ensaio de Caracterização

#### 4.2.1 Teor de umidade higroscópica

Teor de umidade higroscópica de um solo consiste no teor de umidade do solo, após secagem prévia ao ar livre sob temperatura inferior à 60°C, por tempo suficiente para não mais possuir água livre ou capilar. Depende da natureza do solo e do teor de umidade do ar. Como a umidade do ar oscila, costuma-se considerar umidade higroscópica o valor médio em torno do qual oscila o teor de umidade da amostra após um período de secagem que a deixe com a massa aproximadamente constante. Foi realizada a determinação do teor de umidade higroscópica ( $w_h$ ) da amostra deformada, destorroada, segundo especificado pela NBR-6457 (ABNT, 1986) e os resultados encontram-se na TABELA 4.2.

TABELA 4.2 – Teor de umidade higroscópica da amostra deformada destorroada

Amostra	$w_h$ (%)	TS (%)
Deformada	2,99	97,10
	1,92	98,12
	2,47	97,59
Média	2,46	97,60

Onde:

$w_h$  = teor de umidade higroscópica

TS = teor de sólidos

Também foi determinada a umidade higroscópica a partir de amostra dos blocos, sem destorroamento das tortas, sendo os resultados apresentados na TABELA 4.3. Os valores de umidade higroscópica obtidos são elevados, característicos de solos argilosos.

TABELA 4.3 – Teor de umidade higroscópica das amostras obtidas a partir dos blocos indeformados, sem destorroamento das tortas

Amostra		$w_h$ (%)	TS (%)
Indeformada	8 passadas	18,96	84,06
	10 passadas	11,92	89,35
	12 passadas	6,62	93,79
	14 passadas	11,43	89,74
Média		12,23	89,23

#### 4.2.2 Peso específico dos grãos

O peso específico dos grãos (ou dos sólidos) ( $\gamma_s$ ) consiste na relação entre o peso das partículas sólidas e o seu volume. Foi determinado o peso específico dos grãos a partir da amostra deformada e de amostra retirada dos blocos. Os valores de peso específico dos sólidos obtidos para cada amostra estão apresentados na TABELA 4.4. Pode-se observar uma variabilidade dos resultados de peso específico dos grãos nas diferentes amostras. O desvio padrão dos resultados é de 0,80. O peso específico médio dos grãos encontrado para o resíduo foi de 27,969 kN/m<sup>3</sup>.

TABELA 4.4 – Peso específico dos grãos ( $\gamma_s$ )

Amostra		$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )
Deformada		27,130
		27,315
		27,137
Indeformada	8 passadas	29,260
	10 passadas	28,220
	12 passadas	28,377
	14 passadas	28,345
Média		27,969
Desvio padrão		0,80

### 4.2.3 Peso específico natural

Esta determinação foi feita nas amostras indeformadas coletadas da 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 4.5. Considerando a média do peso específico seco máximo encontrado nos ensaios de compactação sem destorroamento da amostra de 14,23 kN/m<sup>3</sup>, pode-se obter o grau de compactação das amostras para cada condição de compactação.

TABELA 4.5 – Peso específico natural das amostras indeformadas e respectivos graus de compactação

Amostra		$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	GC (%)
Indeformada	8 passadas	16,194	34,609	12,030	84,6
	10 passadas	17,796	32,318	13,449	94,5
	12 passadas	18,195	32,632	13,719	96,4
	14 passadas	18,533	31,429	14,101	99,1

Onde:

$\gamma$  = peso específico natural da amostra;

w = teor de umidade da amostra;

$\gamma_d$  = peso específico seco da amostra;

GC = grau de compactação da amostra.

A TABELA 4.6 mostra os resultados de peso específico encontrados em campo pelo método de cravação do cilindro biselado, apresentados por Nery et. al, (2013). Considerando-se o valor do peso específico seco máximo encontrado nos ensaios de compactação Proctor Normal realizados no laboratório montado em campo de 14,9 kN/m<sup>3</sup>, calculou-se os graus de compactação. Ressalta-se que os valores de peso específico obtidos em campo podem ser mais representativos devido ao maior tamanho do corpo de prova amostrado. Também foram realizados ensaios de determinação de determinação do peso específico natural da “torta” do resíduo que sai do filtro prensa. A TABELA 4.7 apresenta os resultados obtidos.

### 4.2.4 Granulometria

A análise granulométrica completa foi realizada na amostra deformada e também do material retirado dos blocos (amostras indeformadas). Foi realizado o método de peneiramento e sedimentação, seguindo os procedimentos estabelecidos pela NBR-7181 (ABNT, 1984). 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. Na TABELA 4.8 estão apresentadas as frações granulométricas obtidas nos ensaios realizados. A FIGURA 4.1 ilustra as curvas granulométricas das amostras.

TABELA 4.6 – Peso específico natural obtido em campo, para cada condição de compactação, (passadas do trator de esteira) pelo método da cravação do cilindro biselado, e respectivos graus de compactação

Amostra		Parte da camada	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	GC (%)
Indeformada	8 passadas	topo	18,90	34,71	14,030	94,2%
		base	18,88	37,82	13,699	91,9%
	10 passadas	topo	19,03	33,62	14,242	95,6%
		base	18,94	27,82	14,818	99,4%
	12 passadas	topo	19,66	35,93	14,463	97,1%
		base	19,20	36,28	14,089	94,6%
	14 passadas	topo	19,55	31,18	14,903	100,0%
		base	19,70	31,99	14,925	100,2%

Onde:

$\gamma$  = peso específico natural da amostra;

w = teor de umidade da amostra;

$\gamma_d$  = peso específico seco da amostra;

GC = grau de compactação da amostra.

TABELA 4.7 – Peso específico natural da amostra deformada (“torta”) e respectivo grau de saturação

Amostra	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	TS (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	S (%)
Deformada	12,790	28,127	78%	9,982	1,802	44%
	12,760	30,493	77%	9,778	1,860	46%
	12,864	24,143	81%	10,362	1,699	40%

Onde:

$\gamma$  = peso específico natural da amostra;

w = teor de umidade da amostra;

TS = teor de sólidos;

$\gamma_d$  = peso específico seco da amostra;

e = índice de vazios;

S = grau de saturação da amostra.

TABELA 4.8 – Frações granulométricas segundo a classificação da ABNT – NBR 6502/95 do resíduos ensaiados

Amostra		Uso de defloculante	Granulometria (%)			
			Argila	Silte	Areia	Pedr.
Deformada		Não	5,3	83,3	11,4	0,0
		Não	2,1	86,0	11,8	0,0
		Não	2,1	81,8	16,1	0,0
Deformada		Sim	6,4	76,8	16,7	0,0
		Sim	4,3	82,8	12,9	0,0
		Sim	5,1	76,4	18,5	0,0
Indeformada	8 passadas	Sim	5,7	83,4	10,9	0,0
	10 passadas	Sim	5,6	86,7	7,6	0,0
	12 passadas	Sim	7,7	75,6	16,8	0,0
	14 passadas	Sim	5,5	83,3	11,1	0,0

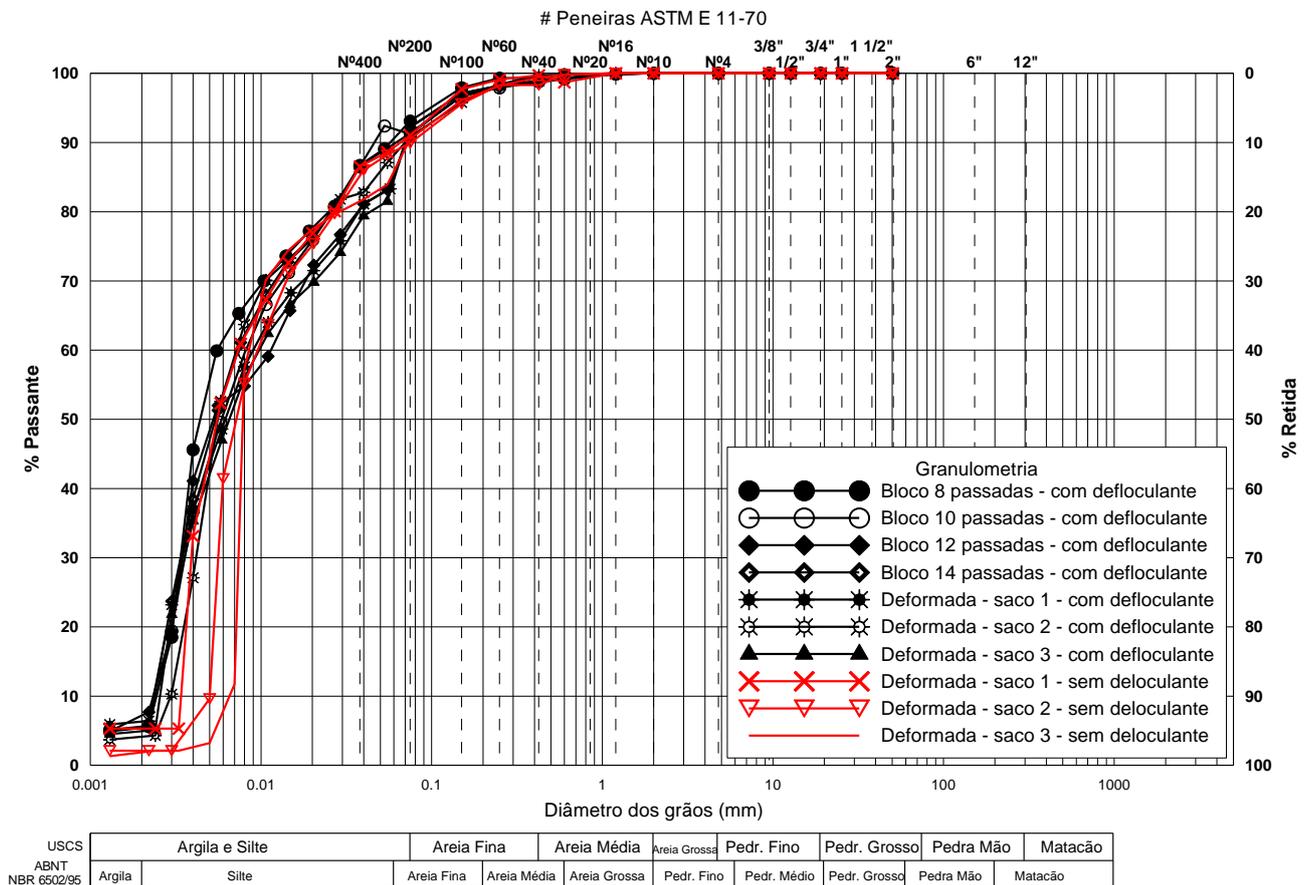


FIGURA 4.1 – Curvas granulométricas dos resíduos ensaiados.

Analisando os resultados obtidos dos ensaios de granulometria, verifica-se que a fração fina na faixa dos siltes é a predominante. Pode-se observar que a fração argila encontrada nos ensaios com o uso do defloculante foi um de 1% a 3% maior do que nos ensaios sem o defloculante.

Observa-se baixa tendência a floculação para a faixa de tamanho abrangida pela análise, mas parece haver uma diferença quando os grãos são menores que 0,008 mm, exceto para as amostras do saco 01.

#### 4.2.5 Limites de consistência

Foram realizados ensaios para determinação dos limites de consistência na amostra deformada do resíduo e também em amostra retirada dos blocos. Os valores dos limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP) e do índice de plasticidade (IP) encontrados nos ensaios estão apresentados na TABELA 4.9. A FIGURA 4.2 apresenta a carta de plasticidade de Casagrande para a classificação geotécnica do material. Por ela, o material é classificado como silte de baixa plasticidade.

TABELA 4.9 – Limites de Consistência

Amostra		LL (%)		LP (%)		IP
		w	TS	w	TS	$\Delta w$
Deformada		34	74,63	28	78,13	6
		34	74,63	25	80,00	9
		36	73,53	29	77,52	7
Indeformada	8 passadas	44	69,44	32	75,76	12
	10 passadas	36	73,53	29	77,52	7
	12 passadas	37	72,99	28	78,13	9
	14 passadas	39	71,94	29	77,52	10

Onde:

w = teor de umidade;

TS = teor de sólidos;

A TABELA 4.10 apresenta o índice de atividade da fração argila proposta por Skempton, que consiste no potencial da fração argila em conferir plasticidade e coesão ao solo.

$$\text{Índice de atividade} = \frac{\text{Índice de plasticidade (IP)}}{\text{fração argila (< 0,002 mm)}}$$

De acordo com esta classificação, a fração argila presente no solo é considerada normal quando seu índice de atividade se situa entre 0,75 e 1,25. Quando o índice é menor que 0,75, considera-se a fração argila como inativa e, quando o índice é maior que 1,25, ela é considerada ativa.

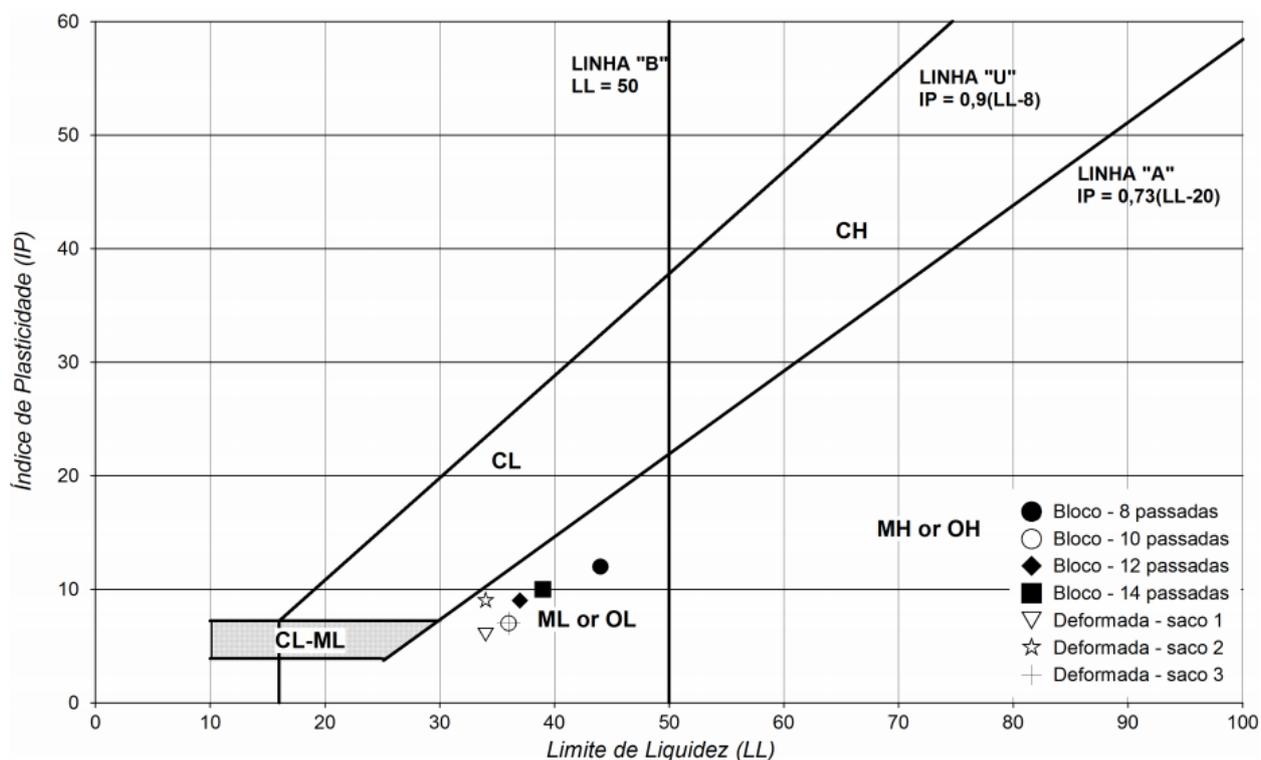


FIGURA 4.2 – Classificação dos resíduos estudados na Carta de Plasticidade de Casagrande.

TABELA 4.10 – Índice de atividade dos resíduos estudados

Amostra		% < 0,002	Índice de atividade
DEFORMADA		6,4	0,94
		4,3	2,09
		5,1	1,37
INDEFORMADA	8 passadas	5,7	2,11
	10 passadas	5,6	1,25
	12 passadas	7,7	1,17
	14 passadas	5,5	1,82
Média			1,54

Observa-se nos resultados apresentados na Tabela 4.10, que o índice de atividade médio para o resíduo ensaiado é acima de 1,25, indicando que a fração argila presente no material é considerada ativa. Entretanto, suspeita-se que a proposta de Skempton do índice de atividade do argilo-mineral não seja aplicável para o resíduo em questão, pois o argilo-mineral presente no mesmo (em pequena quantidade) identificado pelas análises químicas e mineralógicas, cujos resultados serão apresentados a seguir, é a caulinita, que é estável. 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. Segundo Villar (2002), estudos realizados por

Ignatius & Pinto (1991), avaliando ensaios de sedimentação de um solo argiloso com caulinita e vermiculita em sua composição, em água sem defloculante e em água com quantidades variáveis de soda cáustica, concluíram que o fluido cáustico tende a provocar a dispersão das partículas, de acordo com sua quantidade na solução. Para concentrações de 5 a 10 ml de soda por litro de água destilada, o solo se defloculava e, para maiores concentrações, tornava-se a flocular. A explicação, segundo eles, seria devido à variação da concentração iônica do líquido intersticial, influenciando a espessura da camada dupla. A influência da soda cáustica na espessura da camada dupla pode estar ligada ao valor de índice de atividade encontrado. Sugere-se que isto seja melhor pesquisado.

### 4.3 Difração por Raio X

A composição mineralógica da lama vermelha está relacionada à composição química e comportamento da bauxita durante o ataque da soda utilizada no processo de extração da alumina. Normalmente, a composição básica da lama vermelha consiste de hematitas e silicatos remanescentes da bauxita (VILLAR, 2002). Na análise mineralógica por difração de raio X do resíduo aqui pesquisado, foram detectadas as seguintes fases (ver a FIGURA 4.3): Mv = muscovita; Ct = caulinita; Ab = albita; Sd = sodalita. Entretanto, como se trata de uma análise qualitativa, não se sabe qual é a proporção existente de cada uma das fases.

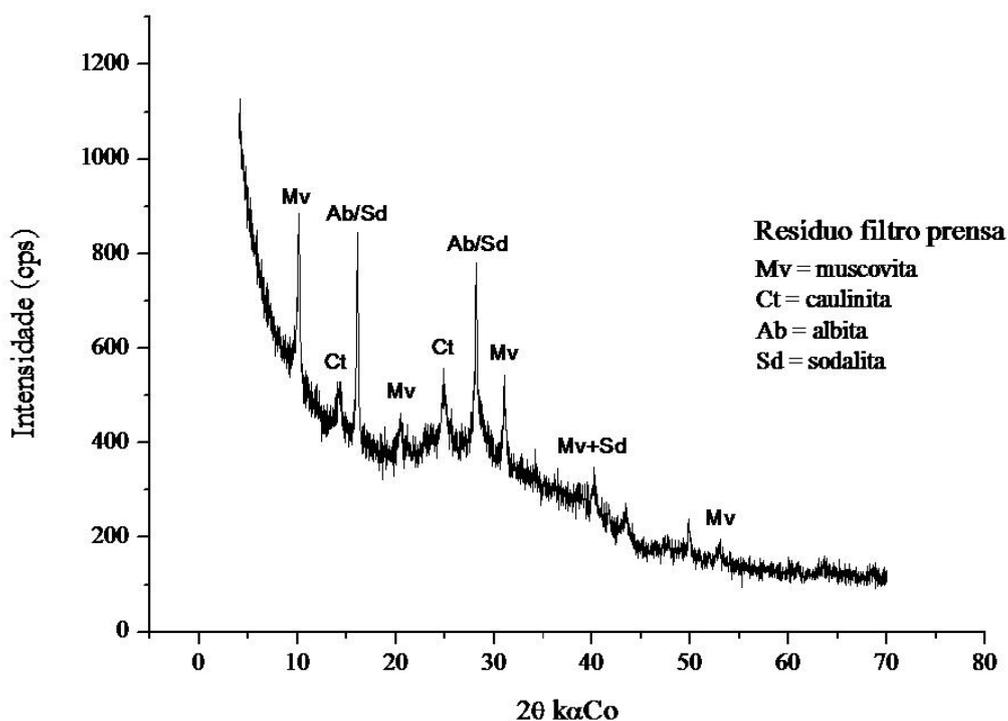


FIGURA 4.3 – Resultado da Difração Raio X realizada em amostras do rejeito do filtro prensa

Foi detectada a presença dos argilo-minerais caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) e muscovita ( $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ), que são compostos presentes na bauxita utilizada e são normalmente consumidos durante o processo de beneficiamento da bauxita para fabricação da alumina. Por isso, acredita-se que a percentagem destes argilo-minerais presente no resíduo não seja significativa. A presença de caulinita tende a conferir plasticidade ao material e, a muscovita tende a influenciar no comportamento de compressibilidade. Foram também identificados picos de albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) e sodalita ( $\text{Na}_4\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{Cl}$ ). A sodalita é formada a partir da solubilização da caulinita e do avanço da digestão no processo Bayer. A sodalita é uma das principais fases mineralógicas existentes na lama vermelha. Ela é um subproduto característico do processamento da bauxita pelo processo Bayer e sua quantidade influencia muito no comportamento final do resíduo, quando depositado na forma de lama (disposição convencional) (VILLAR 2002). Ele tem alta capacidade de intercambiar íons de sódio e uma das consequências de sua presença é a redução da velocidade de deposição das partículas sólidas em soro cáustico.

#### **4.4 Microscopia Eletrônica por varredura**

Pela análise de microscopia eletrônica (ver FIGURA 4.4 a FIGURA 4.6), realizada em amostra de torrões do resíduo filtrado pelo filtro prensa, pode-se observar a formação de flocos achatados, o que evidencia o efeito do processo de filtragem por pressão. Pode ser observada também a presença de macro e micro poros no material devido a este processo mecânico, já que as curvas granulométricas obtidas com e sem defloculante evidenciaram que quase não há floculação entre as partículas. Isto deve conferir ao resíduo filtrado uma tendência de comportamento anisotrópico.

#### **4.5 Ensaios de Compactação**

Os ensaios de compactação foram realizados na amostra deformada, utilizando-se a energia de compactação Proctor Normal, conforme padronizado pela NBR - 7182 (ABNT, 1986). O ensaio foi feito em duas condições: a primeira com a amostra destorroada, conforme orientação na norma e, a segunda, 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 estão apresentados na TABELA 4.11. A FIGURA 4.7 ilustra as curvas de compactação.

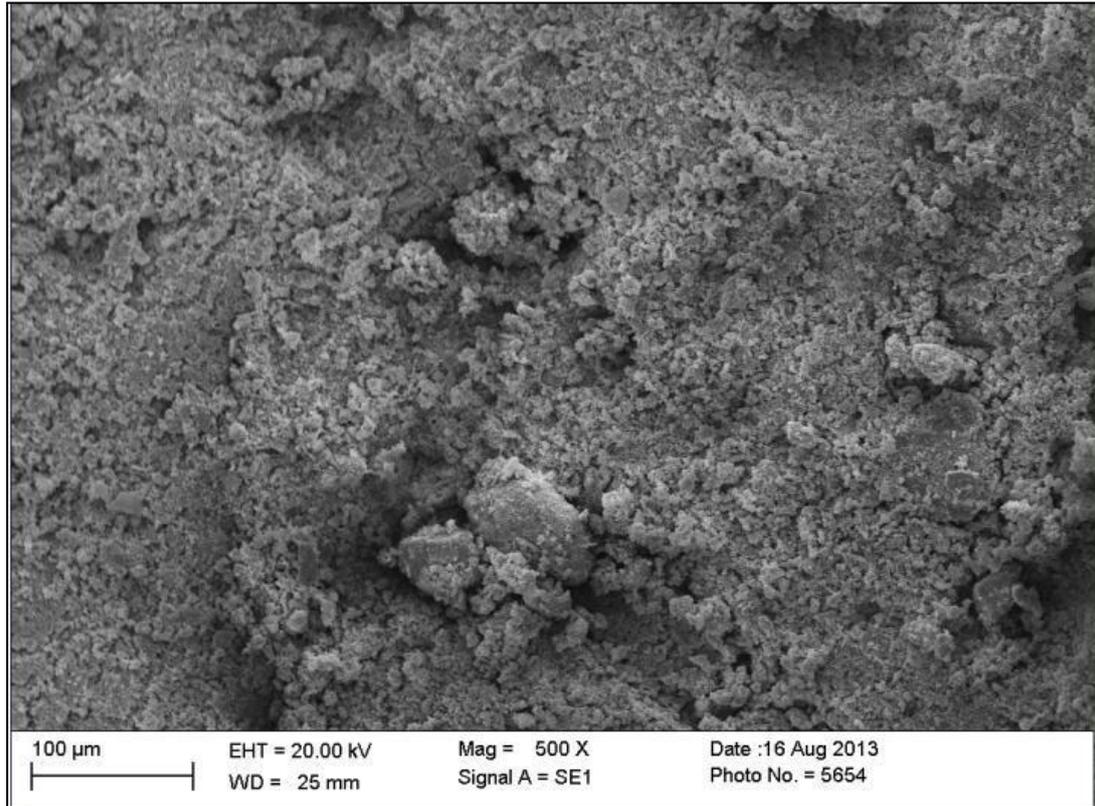


FIGURA 4.4 – Microscopia Eletrônica do Rejeito – 100 µm – Mag. 500 X

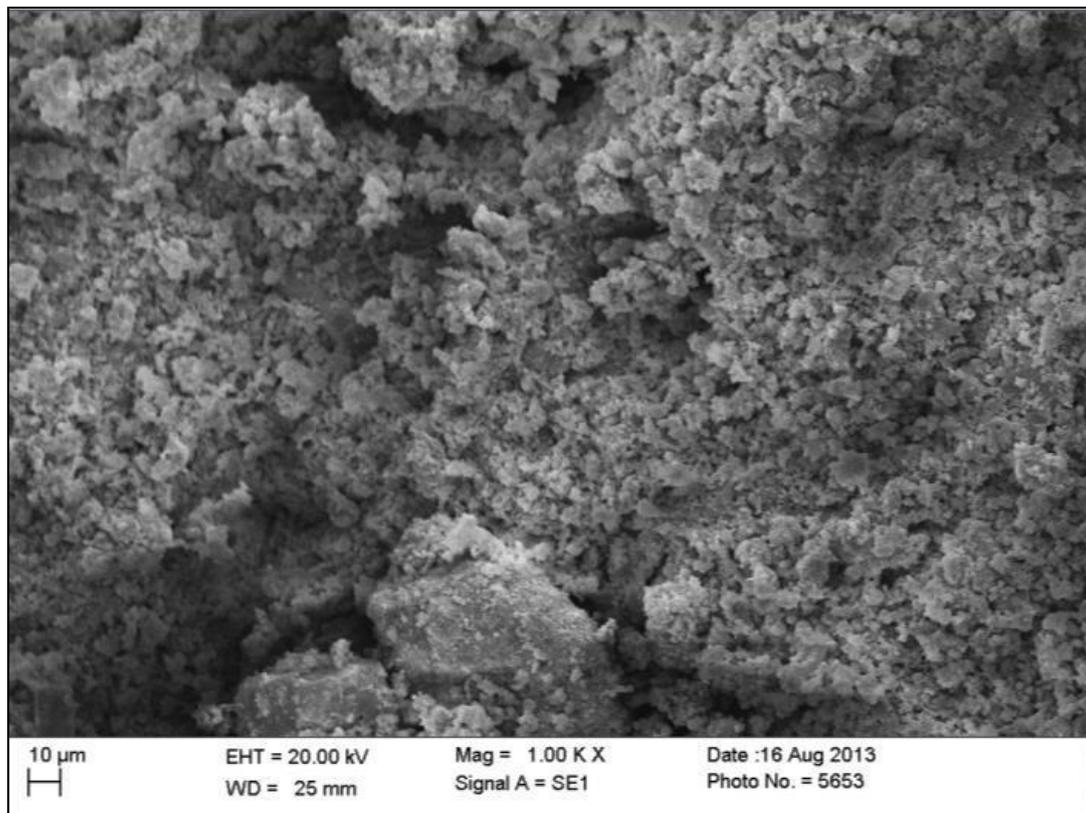


FIGURA 4.5 – Microscopia Eletrônica do Rejeito– 10 µm – Mag. 1,00 K X

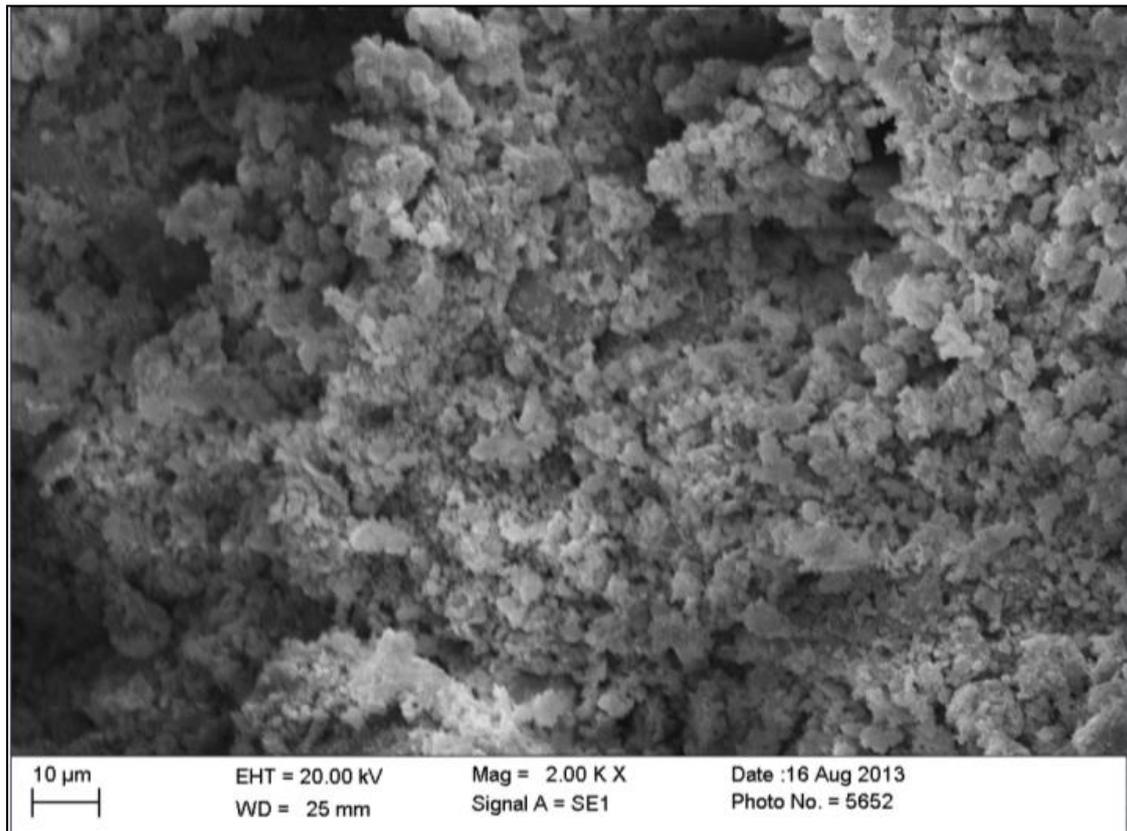


FIGURA 4.6 – Microscopia Eletrônica do Rejeito – 10 µm – Mag. 2,00 K X

TABELA 4.11 – Resultados do ensaio de compactação do rejeito estudado

Amostra		$\gamma_d$ máx (g/cm <sup>3</sup> )	w <sub>ót</sub> (%)	TS (%)
Deformada	1 - Destorroada	14,42	31,92	75,80
	2 - Destorroada	14,24	33,91	74,68
	3 - Destorroada	14,33	33,16	75,10
	<b>Média</b>	<b>14,33</b>	<b>33,00</b>	<b>75,19</b>
	1 - Sem destorroar	13,97	31,03	76,32
	2 - Sem destorroar	14,34	32,15	75,67
	3 - Sem destorroar	14,37	32,42	75,52
	<b>Média</b>	<b>14,23</b>	<b>31,87</b>	<b>75,84</b>

Onde:

$\gamma_d$  máx = peso específico seco máximo obtido pelo ensaio de compactação na energia Proctor Normal;

w<sub>ót</sub> = umidade ótima obtida pelo ensaio de compactação na energia Proctor Normal;

TS = teor de sólidos correspondente à umidade ótima

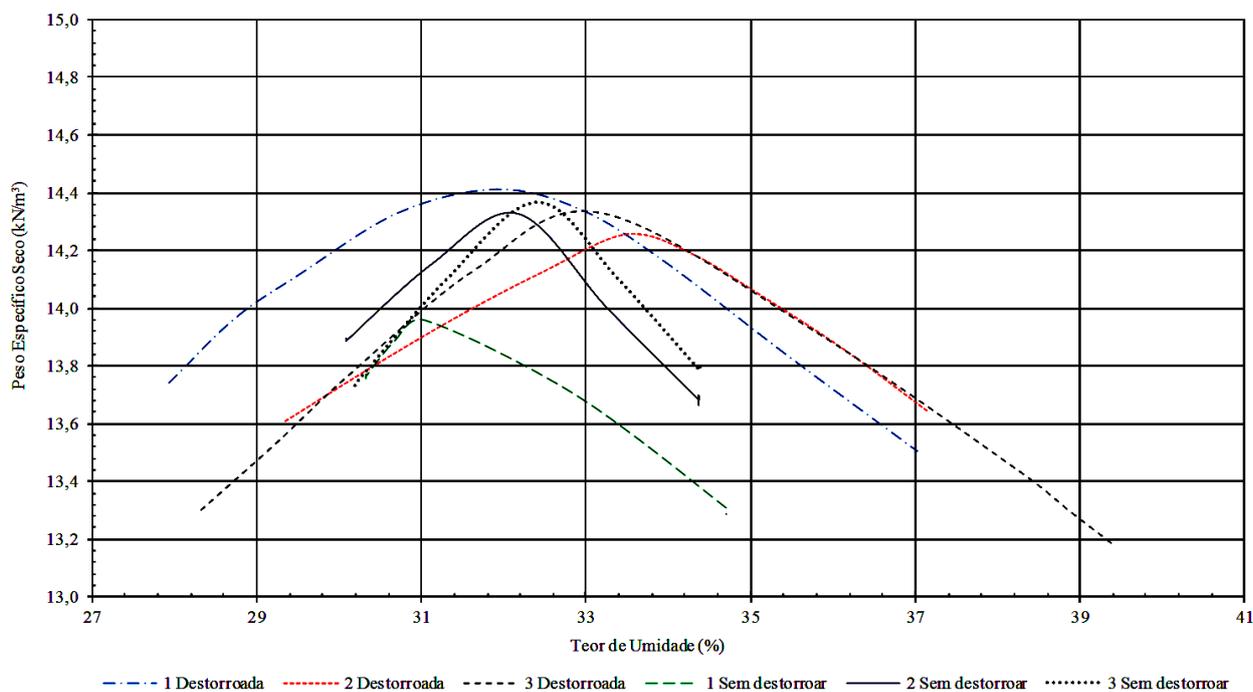


FIGURA 4.7 – Curvas de compactação obtidas para o rejeito estudado

#### 4.6 Moldagem dos corpos de prova para os ensaios especiais

A moldagem dos corpos de prova para a realização dos ensaios definidos no QUADRO 3.5 demandou muito tempo, cuidado e trabalho. Houve muita dificuldade na moldagem dos corpos de prova a partir das amostras indeformadas devido a presença de pedaços de “tortas” do resíduo filtrado no bloco, que não se desfizeram com a compactação pelo equipamento de esteiras. Sendo assim, na tentativa de talhar os corpos de prova nos blocos, algumas destas tortas, que se apresentam bastante rígidas, não conseguiram ser cortadas e acabaram se deslocando e deixando buracos na superfície do corpo de prova, inutilizando-o.

Também foi encontrada muita dificuldade na compactação dos corpos de prova com umidade w<sub>ót</sub> + 5%, pois com esta umidade o material já não apresenta boa trabalhabilidade. A moldagem de corpos de prova com grau de compactação igual a 90% também foi complicada, pois, devido a baixa densidade, o corpo de prova se desfazia na retirada do molde.

#### 4.7 Ensaios de Permeabilidade

Foram executados ensaios de permeabilidade à carga variável em corpos de prova talhados a partir das amostras indeformadas (blocos) e em corpos de prova moldados com a amostra

deformada em diferentes condições de moldagem. Os ensaios foram executados com fluxo vertical, perpendicular às camadas de compactação, o que deve conferir o seu menor valor. Os valores de coeficiente de permeabilidade obtidos dos ensaios de permeabilidade a carga variável, bem como os dados da moldagem dos corpos de prova, estão apresentados na TABELA 4.12. Os valores de permeabilidade obtidos foram baixos, da ordem de  $10^{-7}$  m/s a  $10^{-10}$  m/s, característico de siltes e argilas, segundo Sousa Pinto (2006).

TABELA 4.12 – Resultados dos ensaios de permeabilidade à carga variável

Amostra	Condições de moldagem		Dados da moldagem			k (m/s)
	Grau de Compactação (GC)	Teor de Umidade	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	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
	95%	wót - 5%	17,06	26,52	1,128	1,328E-08
		wót	17,75	31,67	1,128	6,075E-09
		wót + 5%	18,61	36,84	1,110	6,681E-10
	100%	wót - 5%	18,13	26,96	1,009	4,076E-09
		wót	18,70	31,67	1,020	3,567E-10
		wót + 5%	19,42	36,84	1,022	1,757E-09
Indeformada	Bloco 8 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:

$\gamma$  = 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.

As FIGURA 4.8 e FIGURA 4.9 apresentam a relação do coeficiente de permeabilidade com o índice de vazios do corpo de prova ensaiado, das amostras deformadas e das amostras indeformadas, respectivamente. Por elas, pode-se observar que quanto maior o grau de compactação, menor é o índice de vazios e menor é o coeficiente de permeabilidade. Para um mesmo grau de compactação (índice de vazios praticamente igual) quanto maior o teor de umidade, maior é a permeabilidade, conforme esperado. Devido à tendência do material em apresentar comportamento anisotrópico, conforme observado na microscopia eletrônica, sugere-se fazer o

ensaio de permeabilidade também com fluxo no sentido paralelo às camadas de compactação, de forma a avaliar a diferença entre os valores de permeabilidade em função do sentido do fluxo.

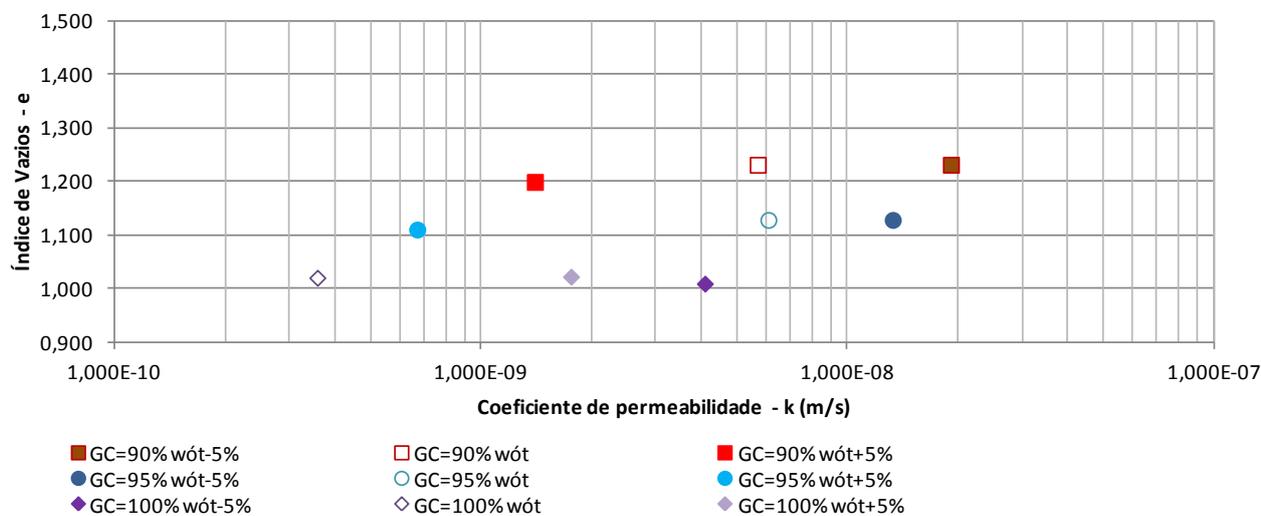


FIGURA 4.8 – Coeficiente de Permeabilidade x Índice de Vazios dos corpos de prova moldados a partir da amostra deformada

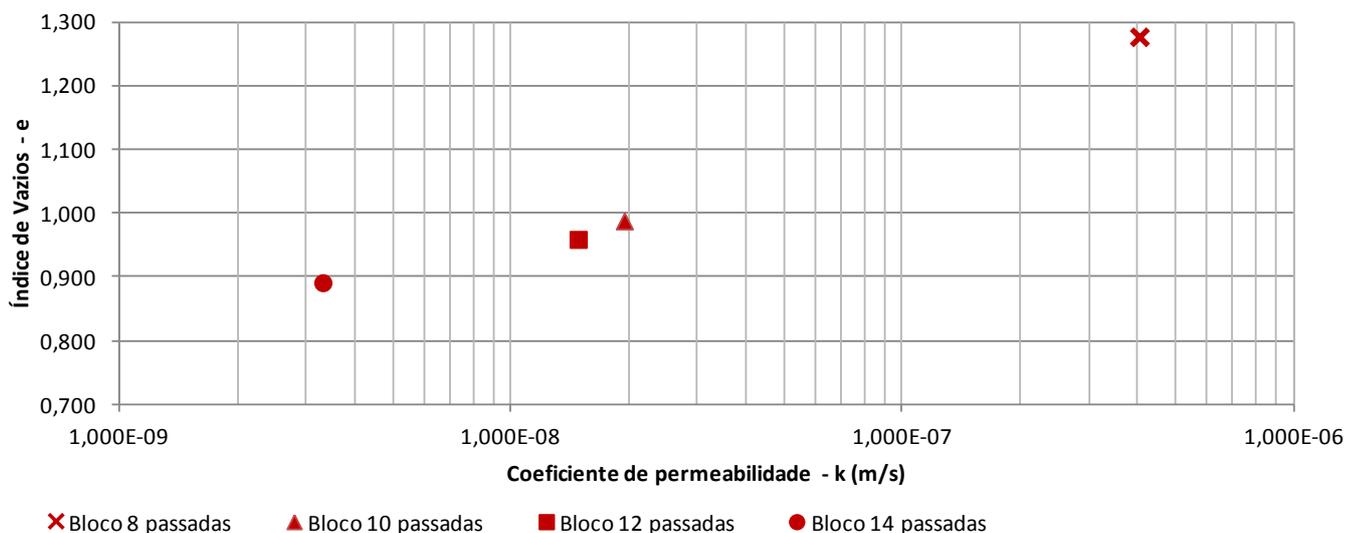


FIGURA 4.9 – Coeficiente de Permeabilidade x Índice de Vazios dos corpos de prova talhados a partir das amostras indeformadas (blocos)

A FIGURA 4.10 apresenta a variação do índice de vazios em função do número de passadas do equipamento utilizado (escavadeira Doosan SOLAR255LC-V, de 24.600 kg). Por esta figura, pode-se observar que a redução do índice de vazios de 10 para 14 passadas é pequeno, ou seja, para a energia de compactação aplicada, a partir de 10 passadas do equipamento, o aumento do número de passadas não contribui consideravelmente para o aumento na densidade.

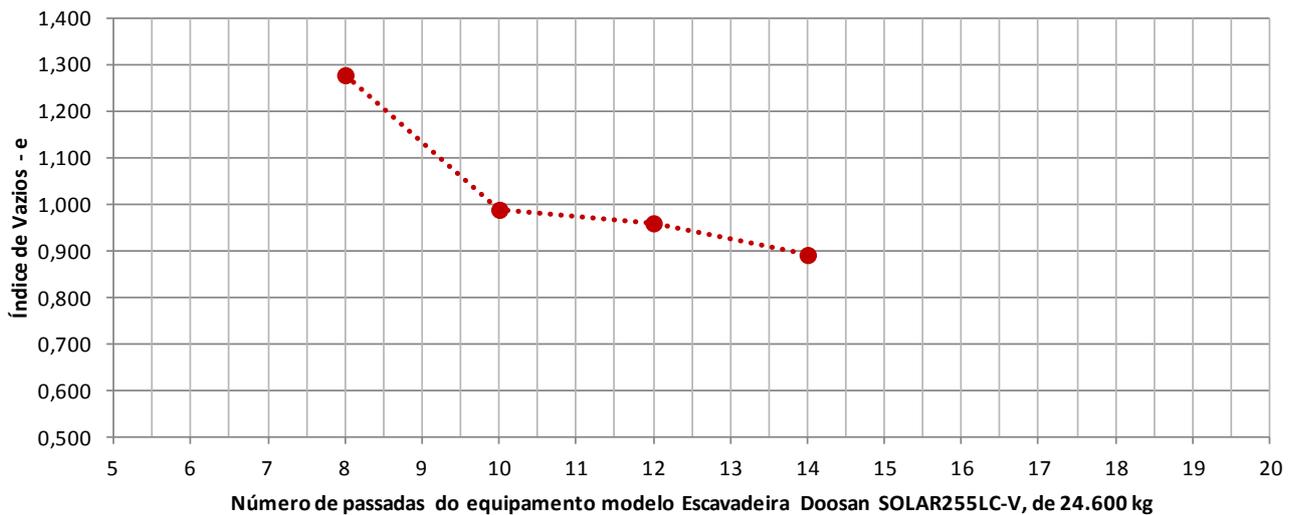


FIGURA 4.10 – Variação do índice de vazios em função do número de passadas do equipamento utilizado (Escavadeira Doosan SOLAR255LC-V, de 24.600 kg).

#### 4.8 Curva Característica de Sucção

A FIGURA 4.11 apresenta as curvas características de sucção (teor de umidade volumétrica versus sucção) para os corpos de prova talhados a partir das amostras indeformadas (blocos) e a FIGURA 4.12 apresenta as curvas características de sucção para os corpos de prova moldados em diferentes condições de moldagem, como previamente definido no QUADRO 3.5.

Os resultados precisam ainda ser analisados, sendo necessária a aplicação de um modelo de ajuste (ou Fredlund e Xing, 1994 ou Van Genuchten, 1980), de onde, então, será possível obter informações que poderão, num futuro, ser usadas para melhor entendimento do comportamento mecânico e hidráulico do rejeito (parâmetros de resistência na condição não saturada e variação da condutividade hidráulica com a sucção, por exemplo). Porém, é possível já identificar que algumas das curvas obtidas apresentam uma distribuição bimodal bem clara. Esta forma é devido à presença de macroporos e microporos bem definidos nas amostras formados durante o processo de prensagem, o que foi também observado na microscopia eletrônica.

#### 4.9 Ensaios de Adensamento Unidimensional

A TABELA 4.13 apresenta os dados dos corpos de prova antes e após o ensaio de adensamento oedométrico. A TABELA 4.14 apresenta os resultados obtidos nestes ensaios para cada corpo de prova. A FIGURA 4.13 ilustra as curvas de tensão versus índice de vazios obtidas.

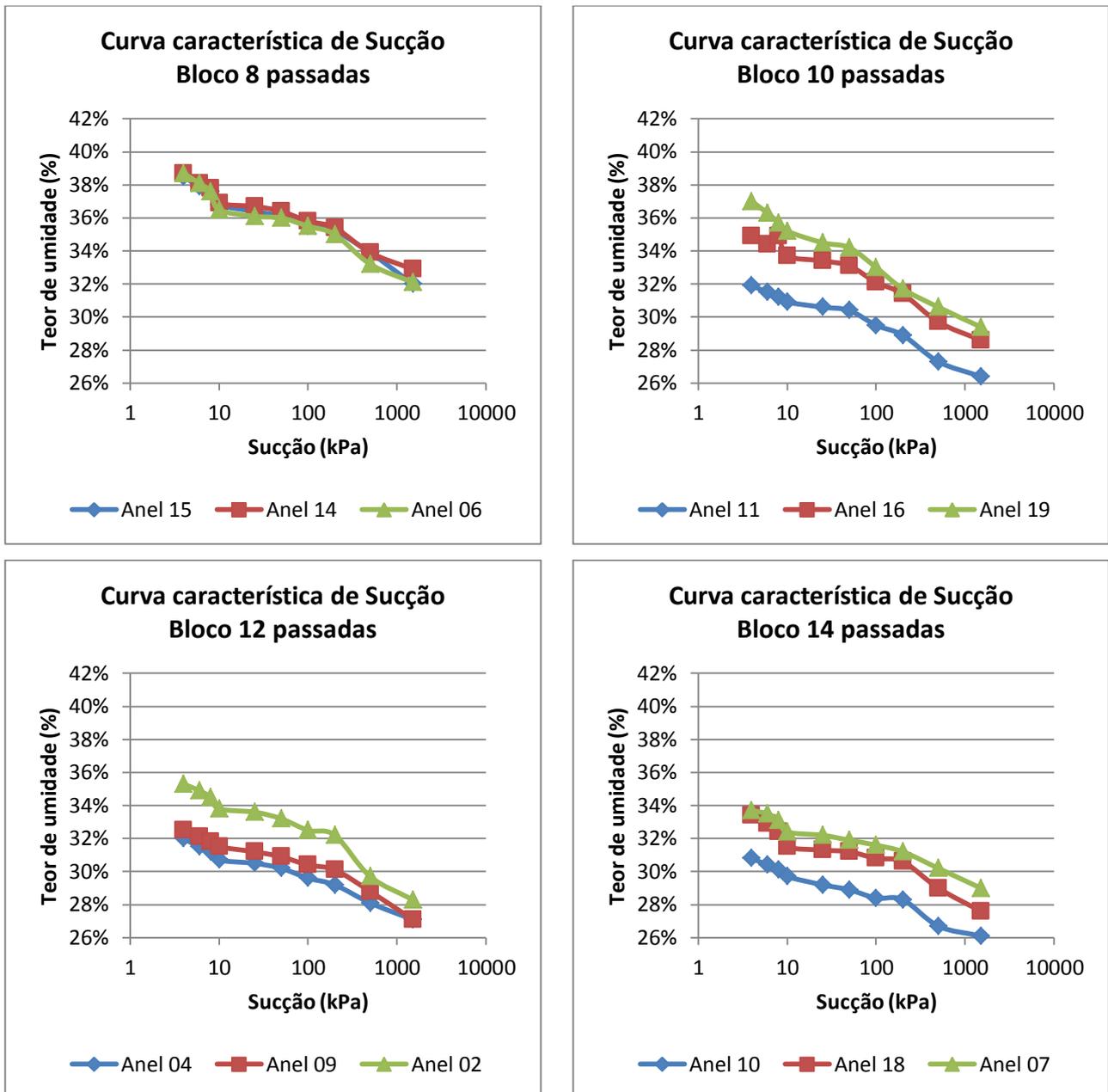


FIGURA 4.11 – Curvas características de sucção de amostras indeformadas

A medição do coeficiente de permeabilidade também foi realizada durante os ensaios de adensamento. Este coeficiente foi também calculado pela equação EQ. ((4.1). A FIGURA 4.14 apresenta os gráficos dos valores de coeficiente de permeabilidade medidos e calculados versus o índice de vazios.

$$k = c_v \cdot m_v \cdot \gamma_w \tag{4.1}$$

Onde,

k = coeficiente de permeabilidade;

$m_v$  = coeficiente de compressibilidade volumétrica;

$c_v$  = coeficiente de adensamento;

$\gamma_w$  = peso específico da água.

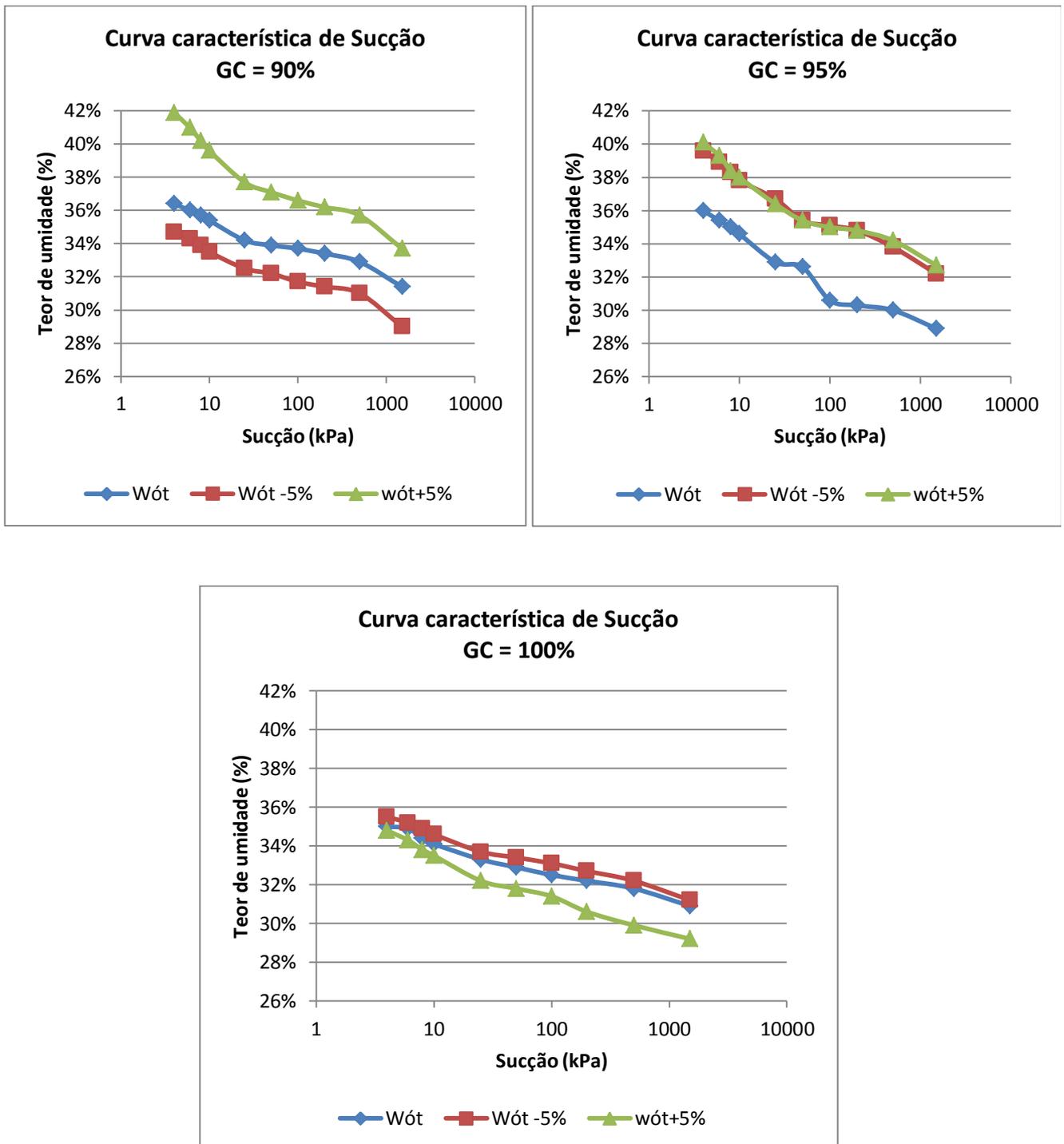


FIGURA 4.12 – Curvas características de sucção para os corpos de prova moldados a partir de amostras deformadas. As condições de moldagem foram definidas no QUADRO 3.5.

TABELA 4.13 – Dados dos corpos de prova nos ensaios de adensamento unidimensional – antes e depois do ensaio

Condições de moldagem		Dados dos corpos de provas					
Grau de Compactação (GC)	Teor de Umidade (w)	H <sub>i</sub> (cm)	H <sub>f</sub> (cm)	e <sub>i</sub>	e <sub>f</sub>	w <sub>i</sub> (%)	w <sub>f</sub> (%)
90%	wót - 5%	1,995	1,646	1,179	0,798	27,44%	27,97%
	wót	2,010	1,820	1,085	0,839	30,68%	27,30%
	wót + 5%	2,010	1,824	1,069	0,880	13,28%	31,64%
95%	wót - 5%	1,995	1,727	0,835	0,589	14,81%	20,57%
	wót	2,010	1,814	1,090	0,886	30,21%	30,94%
	wót + 5%	2,010	1,957	1,019	0,966	34,02%	33,72%
100%	wót - 5%	2,010	1,829	0,961	0,785	22,78%	27,95%
	wót	2,010	1,877	1,055	0,919	32,27%	32,00%
	wót + 5%	2,010	1,815	1,098	0,894	36,97%	30,62%
Bloco 8 passadas		1,995	1,995	1,673	0,735	26,99%	25,82%
Bloco 10 passadas		2,010	2,010	1,868	0,809	29,96%	29,34%
Bloco 12 passadas		2,010	2,010	1,827	0,836	35,27%	29,58%
Bloco 14 passadas		2,015	2,015	1,912	0,696	29,49%	22,74%

Onde: H<sub>i</sub> = altura inicial do corpo de prova; H<sub>f</sub> = altura final do corpo de prova; e<sub>i</sub> = índice de vazios inicial do corpo de prova; e<sub>f</sub> = índice de vazios final do corpo de prova; w<sub>i</sub> = teor de umidade inicial do corpo de prova; w<sub>f</sub> = teor de umidade final do corpo de prova.

TABELA 4.14 – Resultados dos ensaios de Adensamento Unidimensional

Condições de moldagem		Parâmetros de compressibilidade							
Grau de Compactação (GC)	Teor de Umidade (w)	σ' <sub>p</sub> (kPa) (Pacheco Silva)	C <sub>r</sub>	C <sub>c</sub>	CR = C <sub>c</sub> /(1+e <sub>i</sub> )	σ' <sub>v</sub> (kPa)	a <sub>v</sub> (m <sup>2</sup> /kN)	m <sub>v</sub> (m <sup>2</sup> /kN)	c <sub>v</sub> (cm <sup>2</sup> /s) x 10 <sup>-6</sup>
90%	wót - 5%	147	0,045	0,32	0,15	400	0,334	0,177	21,84
	wót	260	0,031	0,264	0,13	400	0,206	0,106	11,73
	wót + 5%	220	0,030	0,214	0,10	400	0,151	0,078	91,61
95%	wót - 5%	237	0,025	0,238	0,13	400	0,187	0,113	2,21
	wót	212	0,035	0,263	0,13	400	0,234	0,122	8,72
	wót + 5%	251	0,041	0,229	0,11	400	0,131	0,07	17,75
100%	wót - 5%	331	0,025	0,211	0,11	400	0,135	0,073	34,55
	wót	229	0,035	0,194	0,09	400	0,159	0,082	29,92
	wót + 5%	167	0,038	0,221	0,11	400	0,177	0,091	6,94
Bloco 8 passadas		162	0,040	0,295	0,14	400	0,267	0,144	5,86
Bloco 10 passadas		337	0,038	0,266	0,14	400	0,203	0,113	3,27
Bloco 12 passadas		363	0,034	0,254	0,13	400	0,179	0,094	18,48
Bloco 14 passadas		219	0,025	0,13	0,07	400	0,129	0,076	3,33

Onde: σ'<sub>p</sub> (Pacheco Silva) = Tensão normal efetiva de pré-adensamento determinada pelo método de Pacheco Silva; C<sub>r</sub> = Índice de recompressão; C<sub>c</sub> = Índice de compressão; CR = C<sub>c</sub>/(1+e<sub>i</sub>); σ'<sub>v</sub> = tensão normal efetiva vertical; a<sub>v</sub> = coeficiente de compressibilidade; m<sub>v</sub> = coeficiente de compressibilidade volumétrica; c<sub>v</sub> = coeficiente de adensamento

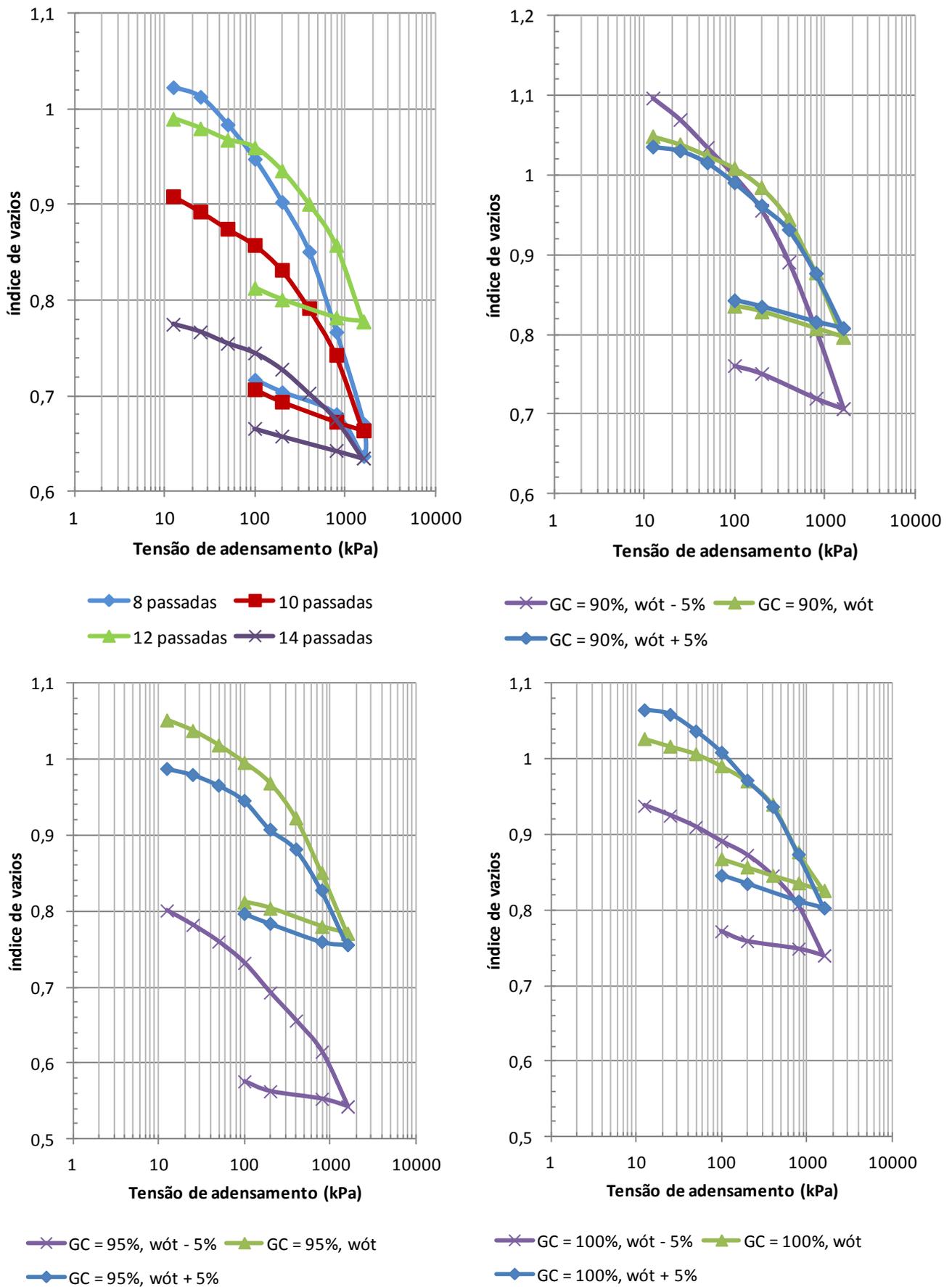


FIGURA 4.13 – Curvas da tensão efetiva versus o índice de vazios dos ensaios de adensamento unidimensional.

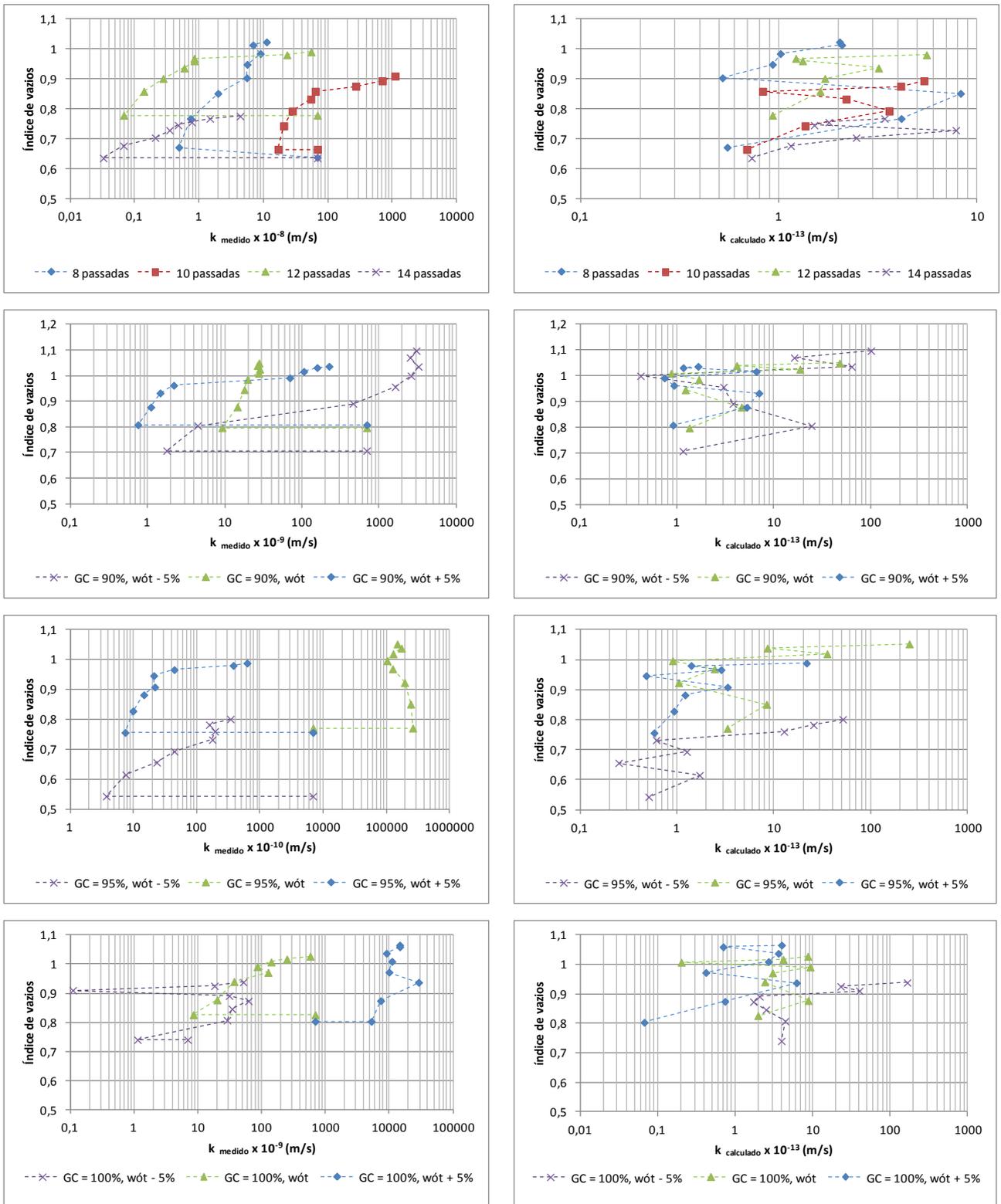


FIGURA 4.14 – Coeficiente de permeabilidade (k) medido e calculado, obtido a partir dos ensaios de adensamento unidimensional

#### 4.10 Ensaios Triaxiais UU

Os ensaios de compressão triaxial foram do tipo não-adensado e não-drenado, (Unconsolidated-Undrained - UU). Foram executados em corpos de prova não saturados, aplicando-se tensões confinantes de 50, 100, 200 e 400 kPa, e com leituras das poro pressões na base, onde foi colocada uma pedra porosa de alta entrada de ar e sem drenagem pela parte superior. Os parâmetros de resistência (total e efetivo) obtidos estão apresentados na TABELA 4.15.

TABELA 4.15 – Parâmetros de resistência obtidos em ensaios UU

Condições de moldagem		$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) dos CPs	S (%)	c (kPa)	$\phi$ (°)	c' (kPa)	$\phi'$ (°)
Grau de Compactação (GC)	Teor de Umidade						
90%	wót - 5%	16,350	64	49,85	21,3	48,86	21,3
	wót	16,923	75	29,13	23,7	30,29	23,7
	wót + 5%	17,873	91	19,84	13,5	0,00	33,0
95%	wót - 5%	17,215	70	74,36	26,6	74,32	26,6
	wót	17,890	85	46,32	17,2	47,13	19,8
	wót + 5%	18,535	97	42,55	9,1	40,79	13,5
100%	wót - 5%	18,250	80	161,06	27,5	152,72	28,8
	wót	19,130	95	73,50	26,6	50,17	31,8
	wót + 5%	19,263	100	49,55	8,5	36,74	13,5
Bloco 8 passadas		18,223	92	77,79	20,3	74,34	21,3
Bloco 10 passadas		19,248	97	118,75	24,2	118,33	24,7
Bloco 12 passadas		19,400	100	58,50	30,1	63,35	30,5
Bloco 14 passadas		19,853	100	90,15	27,5	89,35	29,2

Onde:  $\gamma$  = peso específico natural do corpo de prova;

S = grau de saturação do corpo de prova;

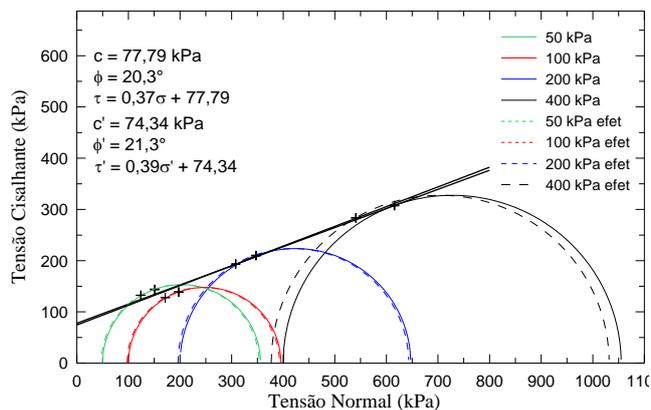
c = intercepto de coesão em termos de tensões totais;

$\phi$  = ângulo de atrito em termos de tensões totais;

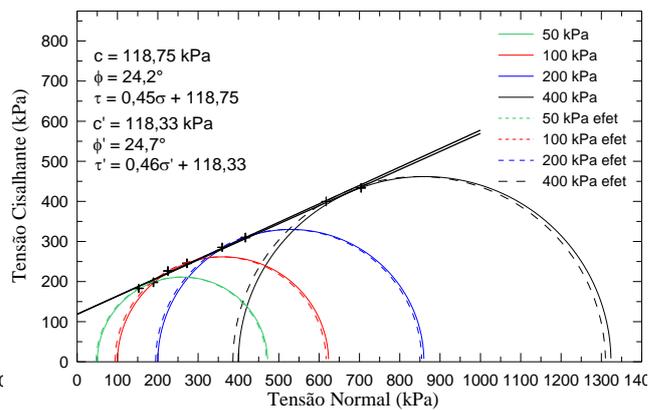
c' = intercepto de coesão em termos de tensões efetivas;

$\phi'$  = ângulo de atrito em termos de tensões efetivas;

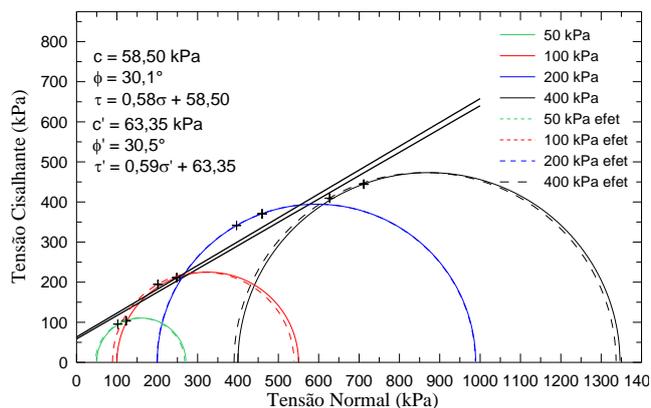
As



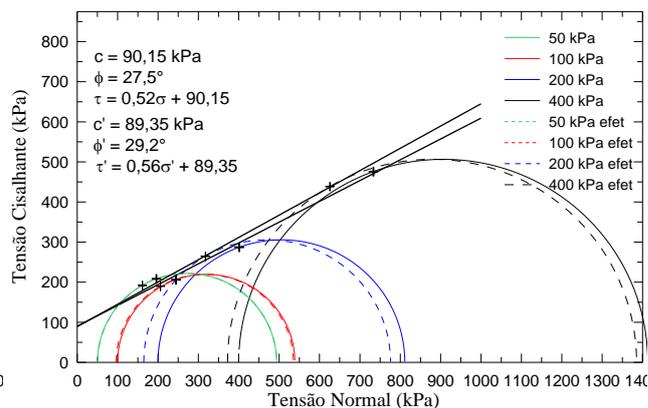
(a) 8 passadas



(b) 10 passadas

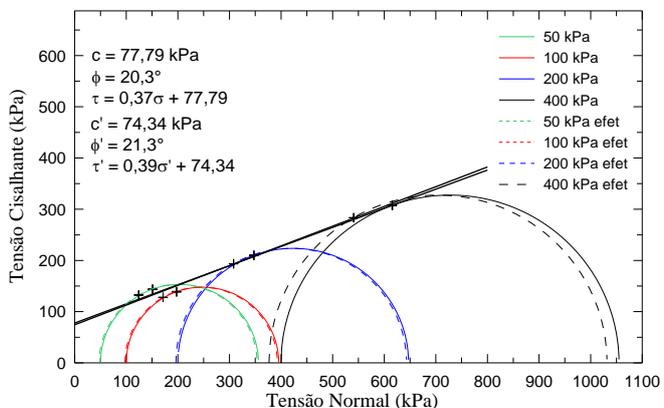


(c) 12 passadas

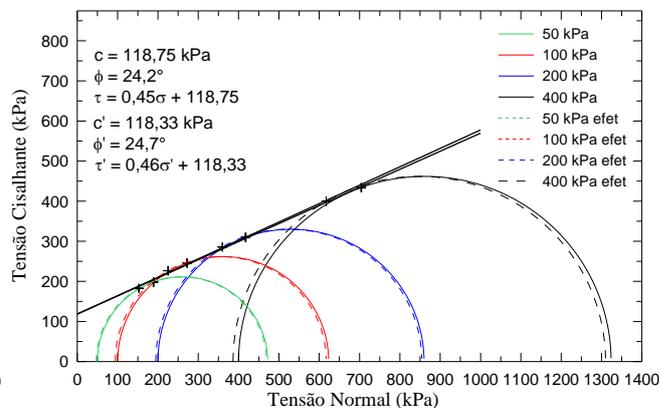


(d) 14 passadas

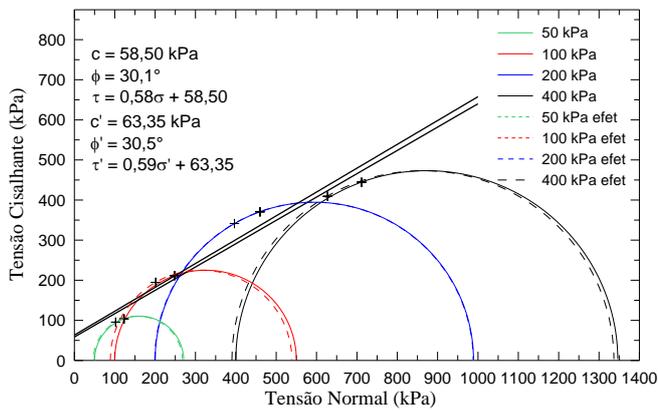
FIGURA 4.15 e FIGURA 4.17 (a e b) apresentam os círculos de Mohr obtidos dos ensaios em corpos de prova talhados das amostras indeformadas e em corpos de prova moldados nas condições de compactação estabelecidas no QUADRO 3.5. As trajetórias de tensões e gráficos da tensão desvio versus deformação e excesso de poropressão versus deformação estão apresentados no Anexo A.



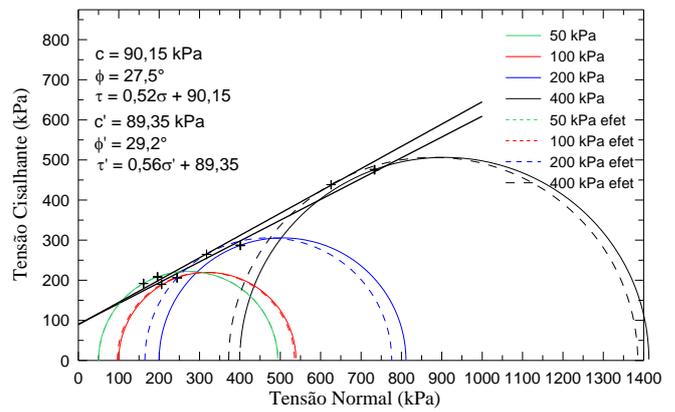
(a) 8 passadas



(b) 10 passadas

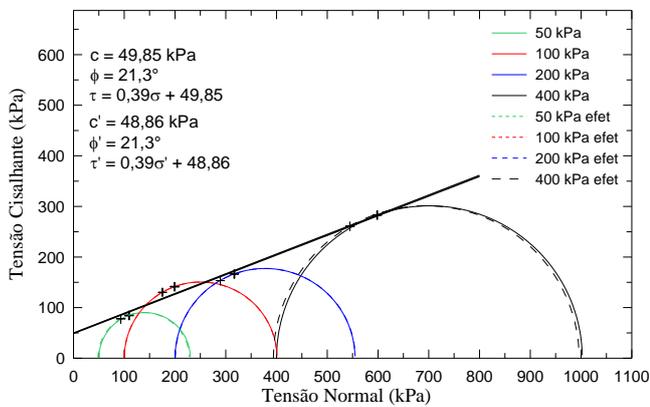


(c) 12 passadas

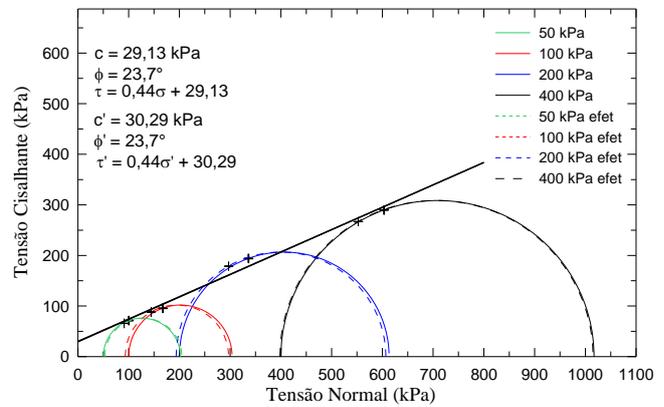


(d) 14 passadas

FIGURA 4.15 – Círculos de Mohr obtidos de Ensaios Triaxiais UU em amostras indeformadas (talhadas dos blocos).

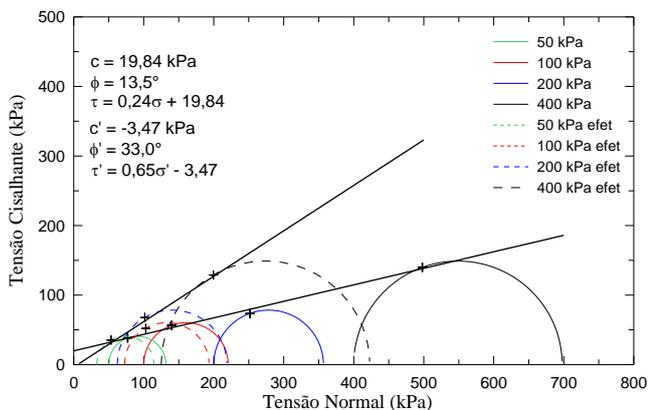


(a) GC = 90%, wót - 5%

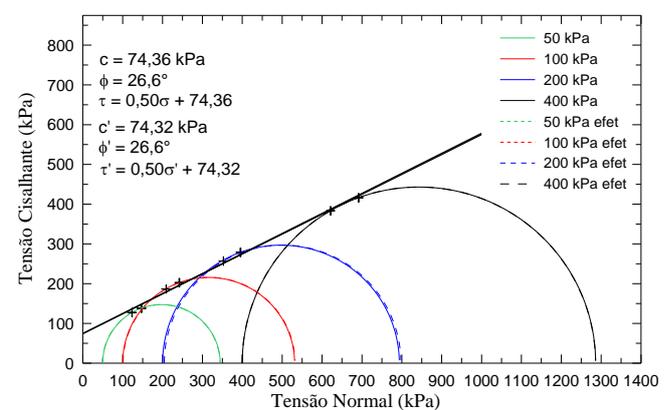


(b) GC = 90%, wót

FIGURA 4.16a – Círculos de Mohr Obtidos de Ensaios Triaxiais UU em amostras compactadas nas condições de estabelecidas no QUADRO 3.5.



(c) GC = 90%, wót + 5%



(d) GC = 95%, wót - 5%

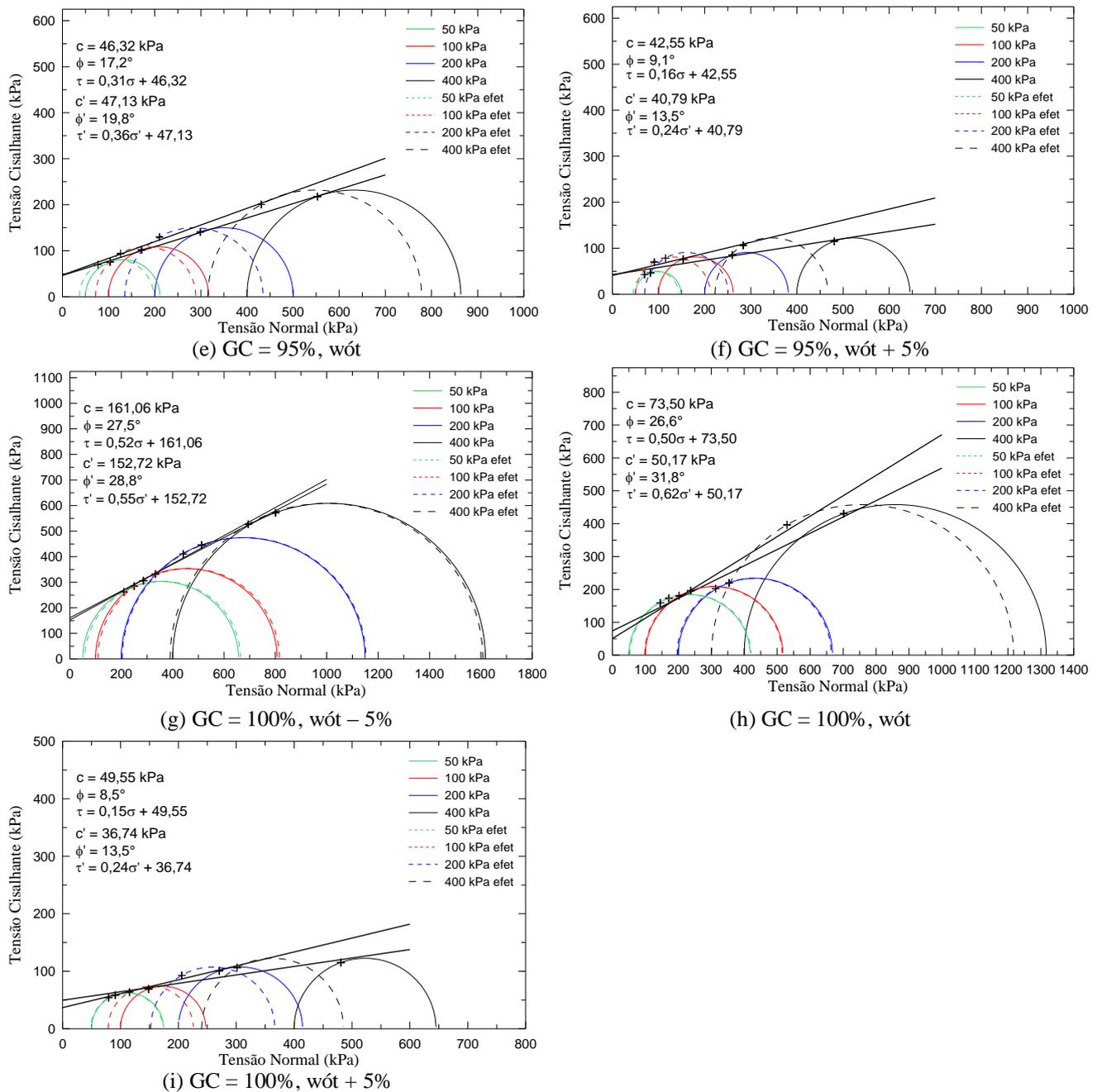


FIGURA 4.17b – Círculos de Mohr Obtidos de Ensaios Triaxiais UU em amostras compactadas nas condições de estabelecidas no QUADRO 3.5.

Nos corpos de prova moldados a partir de amostra deformada, compactadas, pode ser observado que só houve geração de poropressão no ensaio para os corpos de prova que tiveram grau de saturação superior a 80%. Nos corpos de prova talhados das amostras indeformadas (blocos), não foi registrada geração de poropressão significativa. Uma justificativa para este fato é que os corpos de prova não estavam saturados e o equipamento utilizado não media pressão de ar no interior das mesmas. Sendo assim, como há dúvidas sobre a medição das poropressões nos corpos de prova, recomenda-se utilizar os parâmetros totais para análises do material. A FIGURA 4.18 apresenta os

gráficos de intercepto de coesão e ângulo de atrito em termos de tensões totais versus o grau de saturação.

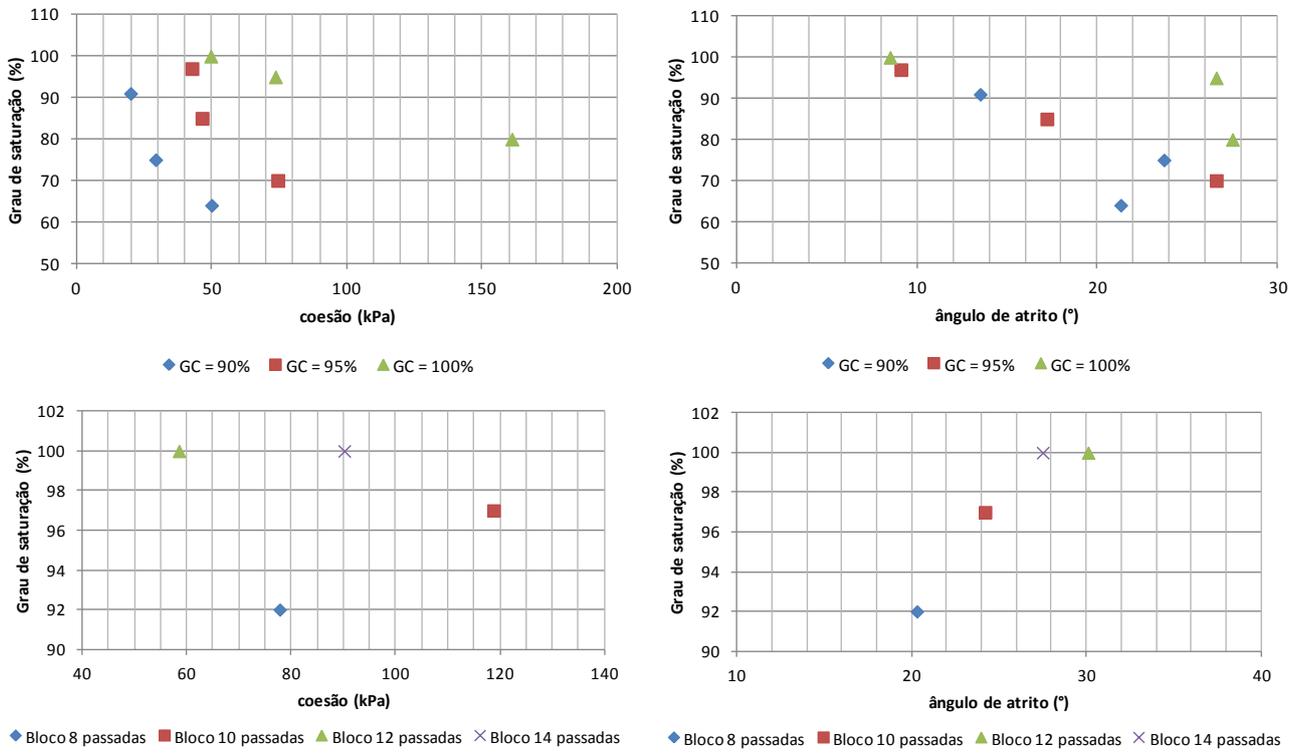


FIGURA 4.18 – Gráficos de coesão e ângulo de atrito versus grau de saturação

Pelos gráficos apresentados na FIGURA 4.18, para amostras com o mesmo grau de compactação, observa-se que a coesão é mais alta para os corpos de prova que possuem menor grau de saturação, provavelmente devido ao efeito da sucção. Pode ser observado que, para qualquer grau de compactação, o ângulo de atrito cai muito com o aumento do grau de saturação (da ordem de 25 para aproximadamente 10).

#### 4.11 Ensaios Triaxiais PN

Os resultados dos ensaios PN foram plotados em gráficos de poropressão ( $u$ ) versus a tensão principal maior ( $\sigma_1$ ) (FIGURA 4.19 e FIGURA 4.20). Observou-se que nos ensaios realizados nas amostras indeformadas não houve geração de poropressão com o aumento do carregamento. Para as amostras compactadas nas condições estabelecidas no QUADRO 3.5, somente o corpo de prova moldado com grau de compactação de 90% e umidade ótima mais 5%, apresentou geração de poropressão durante o carregamento, com parâmetro de geração de

poropressão (poropressão pela tensão vertical, que é a tensão principal maior) igual a 0,49, calculado no intervalo de tensão vertical total de 300 kPa a 750 kPa. Entretanto, como nenhum outro corpo de prova apresentou geração de poropressão, mesmo estando na mesma umidade ( $w_{ót}+5\%$ ), é preciso analisar a possibilidade de que tenha havido algum problema na realização do ensaio, como por exemplo, a entrada de água no corpo de prova devido a alguma perfuração da membrana, causando a saturação do mesmo e por consequência a geração elevada de poropressão.

Os resultados obtidos dos ensaios PN realizados não estão sendo considerados confiáveis devido ao fato de que as amostras ensaiadas não eram saturadas, o que dificulta garantir se houve equalização das poropressões ao longo da amostra. Além disso, recomenda-se que os ensaios PN devem ser refeitos em corpos de prova maiores, para se ter uma maior representatividade do material, e com a utilização de equipamento próprio para amostras não saturadas.

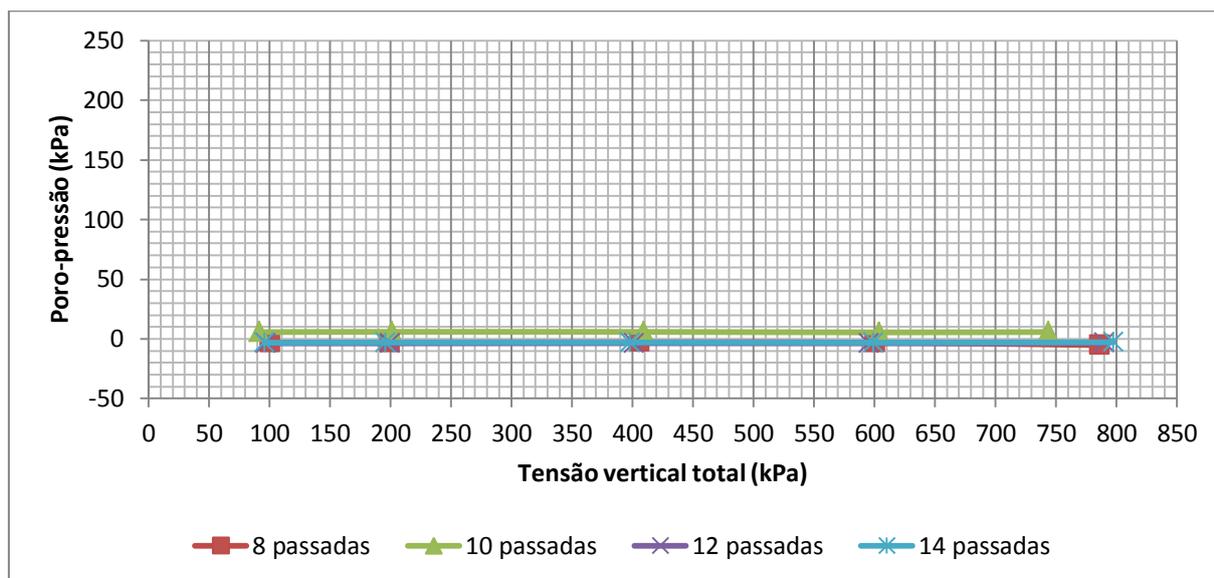


FIGURA 4.19 – Gráfico da poropressão (kPa) versus a tensão vertical total (kPa) obtido pelo ensaio triaxial PN nos corpos de prova talhados dos blocos indeformados

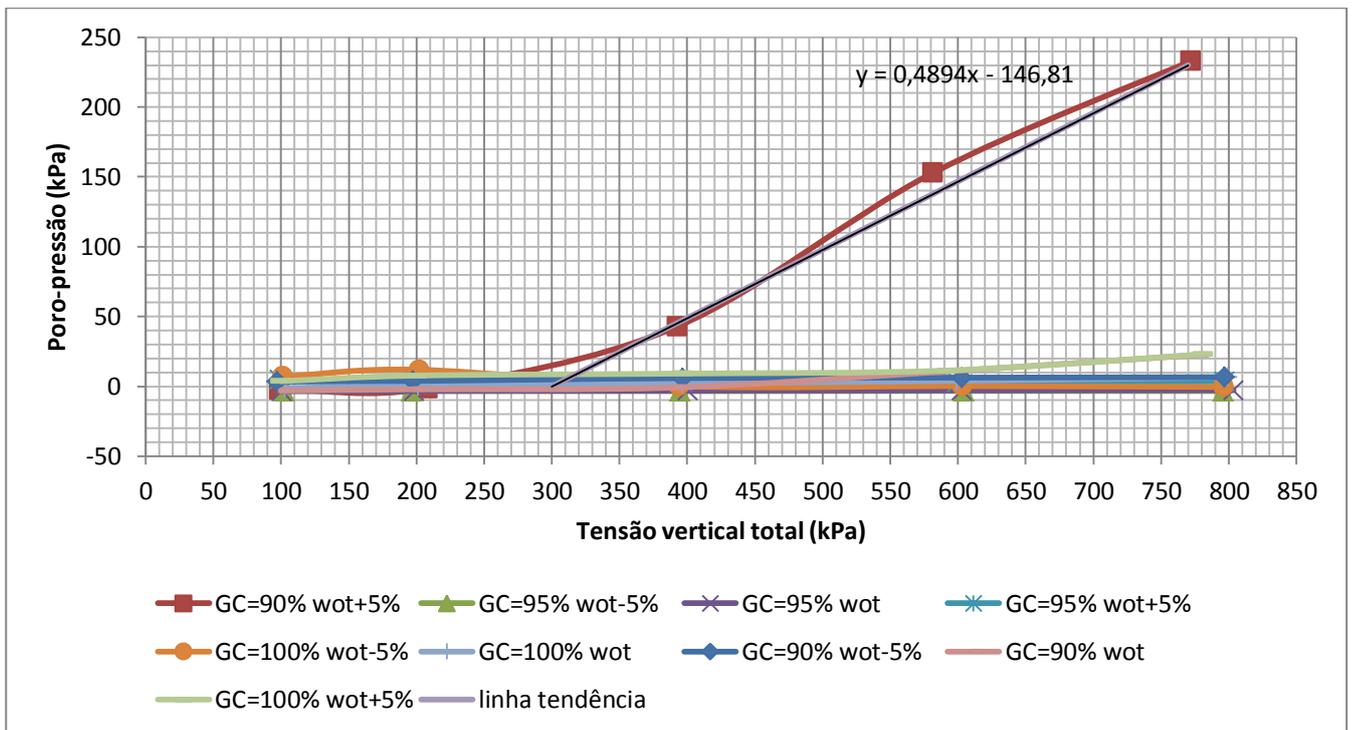


FIGURA 4.20 – Gráfico da poro-pressão (kPa) versus a tensão vertical total (kPa) obtido pelo ensaio triaxial PN nos corpos de prova moldados nas condições de compactação estabelecidas no QUADRO 3.5

#### 4.12 Avaliação de ângulo global de pilha de resíduo

Com os resultados obtidos de parâmetros de resistência para cada condição de compactação estudada, foram realizadas análises de estabilidade para avaliação do ângulo global de pilha de resíduo de 50m de altura. Para tal, como não foi conseguido obter os coeficientes de geração de poro-pressão pelos ensaios PN, foi considerado que, para graus de saturação superiores a 90%, há uma geração de poro-pressão com o carregamento, sendo o coeficiente  $R_u$  adotado de 0,25. O software Slide versão 5.0 da Rocscience foi utilizado para a realização das análises de estabilidade. Foi utilizado o método de Bishop Simplificado (1955) que é baseado em equilíbrio limite. As análises foram realizadas utilizando os parâmetros de resistência em termos de tensões totais, apresentados na TABELA 4.15. As análises consideraram inclinações de taludes globais de  $22^\circ$ , sendo este ângulo o máximo aplicável para garantir a operação da pilha, com a implantação de bermas, e de  $11^\circ$  para o caso de compactação do resíduo em umidade 5% acima da umidade ótima. As FIGURAS 4.20 e 4.21 ilustram as geometrias consideradas para a pilha de resíduos. A TABELA 4.16 apresenta os resultados de fatores de segurança encontrados.

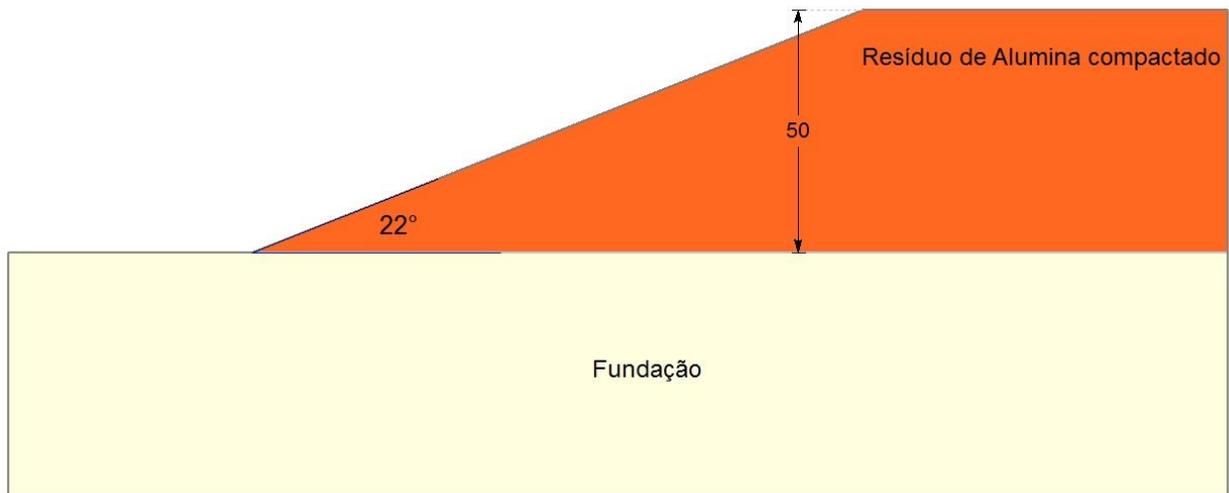


FIGURA 4.21 – Pilha de resíduos com 50m de altura e inclinação global do talude de 22°



FIGURA 4.22 – Pilha de resíduos com 50m de altura e inclinação global do talude de 11°

TABELA 4.16 – Resultados das análises de estabilidade

Condições de moldagem		S (%)	ru	Fator de Segurança (FS)	
Grau de Compactação (GC)	Teor de Umidade			inclinação talude global 1V:2,5H (22°)	inclinação talude global 1V:5,0H (11°)
90%	wót - 5%	64	-	1,82	-
	wót	75	-	1,66	-
	wót + 5%	91	-	0,95	1,67
			0,25	0,75	1,33
95%	wót - 5%	70	-	2,42	-
	wót	85	-	1,48	-
	wót + 5%	97	-	0,96	1,59
			0,25	0,82	1,36
100%	wót - 5%	80	-	3,38	-
	wót	95	0,25	1,90	-
	wót + 5%	100	-	0,98	1,62
			0,25	0,85	1,39

Pelos resultados de fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade realizadas, observa-se que com o resíduo em umidade de 5% acima da umidade ótima, o ângulo global da pilha de 22° não é estável ( $FS < 1$ ), conforme valores destacados em vermelho na TABELA 4.16. Com a aplicação do coeficiente de geração de poropressão de 0,25, reduz ainda mais o fator de segurança. Sendo assim, recomenda-se que para estes casos seja utilizada uma inclinação global da pilha abaixo de 11°, para a qual o fator de segurança mínimo encontrado foi 1,33.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

### 5.1 Conclusões

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

O resíduo filtrado pelo filtro prensa piloto utilizado apresentou, na saída do filtro, teor de umidade igual à umidade ótima do material na energia Proctor Normal, sendo esta condição ideal para a utilização de métodos de compactação na disposição do resíduo e proporcionando melhores condições de estabilidade do material, que pode ser disposto na forma de pilhas, otimizando o espaço para disposição. Pelos resultados encontrados na realização da área teste, com a compactação do resíduo em campo com equipamento de esteiras, pode-se observar a boa trabalhabilidade do material na compactação, bem como a obtenção de graus de compactação elevados (com relação a energia do Proctor Normal), com cerca de 12 passadas do equipamento modelo Escavadeira Doosan SOLAR255LC-V, de 24.600 kg utilizado nesta pesquisa. A utilização de equipamento de esteiras mais pesado e menor espessura da camada solta para compactação pode reduzir ainda mais o número de passadas para a obtenção do grau de compactação desejado.

Foram obtidos teores de umidade higroscópica maiores em amostras do resíduo filtrado por filtro prensa, sem o destorroamento para a realização do ensaio, quando comparado aos resultados obtidos com a amostra destorroada. Isto evidenciou a retenção de água nos microporos presentes nas “tortas” de resíduo que se formam com a filtragem por filtro prensa.

O resíduo estudado foi caracterizado geotecnicamente através de ensaios de laboratório. Obteve-se o peso específico médio dos grãos de 27,969 kN/m<sup>3</sup>, e o resíduo foi classificado como silte de baixa plasticidade. Pelos ensaios de difração raio X, foi identificada a presença dos minerais muscovita, caulinita, albita e sodalita. Pela microscopia eletrônica foi possível observar a presença de macro e micro poros na estrutura do resíduo filtrado por filtro prensa.

Os ensaios de compactação na energia Proctor Normal realizados com a amostra destorroada apresentaram como resultado peso específico seco máximo de 14,33 kN/m<sup>3</sup> e umidade ótima de 33,00%. A média dos resultados com a amostra sem destorroar foi muito parecida, com peso específico seco máximo de 14,23 kN/m<sup>3</sup> e umidade ótima de 31,87%. Foram realizados ensaios em corpos de prova moldados em diferentes condições de compactação, na faixa de variação do teor de umidade de  $w_{ót} \pm 5\%$  e grau de compactação de 90% a 100%, bem como em corpos de prova talhados a partir das amostras indeformadas coletadas na área teste, após 8, 10, 12 e 14 passadas do equipamento de esteiras.

Os valores de permeabilidade obtidos através de ensaio de laboratório à carga variável, com a amostra saturada, foram da ordem de  $10^{-7}$  m/s (na amostra indeformada com 8 passadas do equipamento de esteiras) a  $10^{-10}$  m/s (no corpo de prova moldado com grau de compactação de 100% na umidade ótima), sendo estes valores típicos de siltes e argilas. A TABELA 5.1 apresenta um resumo da caracterização do resíduo.

TABELA 5.1. resumo Dos valores obtidos na caracterização do resíduo.

<b>Material analisado</b>	Resíduo da produção de alumina (lama vermelha) da CBA - Sorocaba - SP, desaguado por filtro prensa
$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	27,969
<b>classificação granulométrica</b>	silte
<b>Plasticidade</b>	baixa
<b>Minerais presentes</b>	muscovita, caulinita, albira e sodalita
<b>Microscopia eletrônica</b>	presença de macro e micro poros
<b>w<sub>ót</sub> - compactação Proctor Normal</b>	33%
<b><math>\gamma_{d\text{ máx}}</math> (kN/m<sup>3</sup>) - compactação Proctor Normal</b>	14,33
<b>Permeabilidade</b>	$10^{-7}$ a $10^{-10}$

As curvas características de sucção evidenciaram a presença de macroporos e microporos bem definidos nas amostras. Através destas curvas, com o modelo preditivo proposto por Fredlund et al (1995), pode-se obter a estimativa de parâmetros de resistência para diferentes teores de umidade do material, podendo assim, através de análises de estabilidade, dimensionar a pilha de resíduos considerando as condições em período de estiagem e período de chuva.

Foram obtidos os parâmetros de compressibilidade do material, nas diferentes condições de compactação estudadas, por meio de ensaios de adensamento unidimensional. Nos ensaios triaxiais UU realizados, foram obtidos valores de coesão mais elevados para os corpos de prova com menor grau de saturação, provavelmente devido ao fenômeno da sucção. Pelos parâmetros de

resistência em termos de tensões efetivas encontrados nos ensaios, suspeita-se que a leitura das poropressões nestes ensaios não é confiável, já que foram ensaiadas amostras não saturadas em equipamento não adequado para isso. Por isso, é recomendado utilizar os parâmetros de resistência obtidos em termos de tensões totais.

Pelos ensaios PN, não foi observada geração de poropressão significativa no resíduo com o aumento do carregamento, na relação  $\sigma_3/\sigma_1 = 0,5$ . Entretanto, suspeita-se que possa ter ocorrido algum problema na leitura das poropressões, pois, devido a não saturação dos corpos de prova dificulta a interpretação dos valores de poropressão, ainda mais que o equipamento utilizado não era adequado para amostras não saturadas. Portanto, recomenda-se que os ensaios PN sejam refeitos, utilizando corpos de prova de maior dimensão, de forma a se ter uma melhor representatividade do material, e novos procedimentos sejam utilizados, tais como variação da velocidade de ensaio, para verificar se há ou não geração de poropressão neste material com o carregamento aplicado.

Com os resultados das análises de estabilidade, conclui-se que é possível formar pilhas estáveis (com fatores de segurança acima de 1,5) de 50 m de altura, com ângulo global de 22°, com o resíduo da produção de alumina, filtrado por filtros prensa, compactando-o em graus de compactação de 90% a 100% e umidade ótima ( $w_{ót} = 32\%$ ) e até 5% abaixo da ótima. 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 deste fator de segurança. Para umidades acima da umidade ótima, devem-se utilizar ângulos menores para a pilha, abaixo de 11°, para se ter fatores de segurança aceitáveis, e ainda deve-se atentar para a geração de poropressões durante a execução da pilha, pois isto reduz consideravelmente o fator de segurança. Sendo assim, ao se trabalhar com o resíduo acima da umidade ótima, a disposição deve acontecer de forma mais lenta, permitindo a dissipação das poropressões geradas. Para se ter o controle destas poropressões, a pilha deverá ser devidamente instrumentada. A metodologia utilizada para avaliação da compactação do resíduo da produção de alumina (lama vermelha) desaguado por filtro prensa apresentou-se eficaz para a determinação de ângulo de pilha de disposição, além da determinação de diversos parâmetros do resíduo, que são úteis para demais análises geotécnicas do resíduo.

## **5.2 Sugestões para Estudos Futuros**

Existem poucos estudos sobre a disposição de resíduo da produção de alumina, depois de desaguado por filtros prensa. Em função da necessidade das indústrias em aproveitar ao máximo as áreas disponíveis para disposição de resíduos, devido a dificuldade na obtenção de licenciamento de novas áreas para este fim, torna-se cada vez mais importante o conhecimento de métodos

alternativos de disposição que proporcione um melhor aproveitamento das áreas e que apresente menor potencial de dano ambiental. A tecnologia de desagüamento do resíduo com filtros prensa é nova e ainda pouco se conhece sobre as características geotécnicas deste material para a sua disposição de forma eficiente.

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

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

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRITZ SEPARATION - 7th Annual Grand Junction 2013 Water and Conference - Dewatering Technologies Comparison.

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

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

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

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

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

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

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

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

ÁVILA, J. P.; Nery, K.D.; Freire Neto, J.P.; Pantoja, R. *Dry Storage Technology - Strength and pore pressure development and compactability of tailings*, Proceedings of the 19th International

Symposium of ICSOBA - International Committee for Study of Bauxite, Alumina & Aluminium, Belém – PA, Brasil, 2012.

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

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

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

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

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

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

CARMAN, P. C. Trans. Inst. Chem. Engrs., London, 15, 160, 1937. apud CUPERTINO, D. F. *Caracterização de propriedades do meio poroso em solo arenoso através de permo-porosímetro a gás*. Monografia. Curso de graduação em Geologia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

CAVALCANTE, P. R. B.; PALKOVITS, F. *Paste fill – a safety solution for pillar mining*. Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Seminar on Paste and Thickened Tailings. p. 443-454. Belo Horizonte, 2013

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

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

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

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

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

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

FITTON, T. G.; SEDDON, K. D. *Paste and thickened tailings – myth busting and clarification*. Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Seminar on Paste and Thickened Tailings. p. 37-45. Belo Horizonte, 2013

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

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

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

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

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

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

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

ICOLD (2002). International Commission on Large Dams, Belo Horizonte, 1 CD-ROM.

IGNATIUS, S. G. & PINTO, C. S. *Aspectos do Comportamento de um Solo em Presença de Efluente Químico a Base de Soda Cáustica*. In II REGEO, Proc...Rio de Janeiro, p.p. 233 – 241, 1991 apud VILLAR, L. F. S. *Estudo do adensamento e ressecamento de resíduos de mineração e processamento de Bauxita*. 443 p. Tese de Doutorado (Departamento de Engenharia Civil), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

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

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

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

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

LAMBE, T. W. *The structure of compacted Clay*. Journal Soils Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 84, N° SM2, 1958.

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

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

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

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

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

MARSHAL, T. J. *Relations between water and soil*. Com. Bureau Soils Tech. Com. No. 50. Harpenden. 1959 apud VILLAR, L. F. S. *Estudo do adensamento e ressecamento de resíduos de mineração e processamento de Bauxita*. 443 p. Tese de Doutorado (Departamento de Engenharia Civil), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

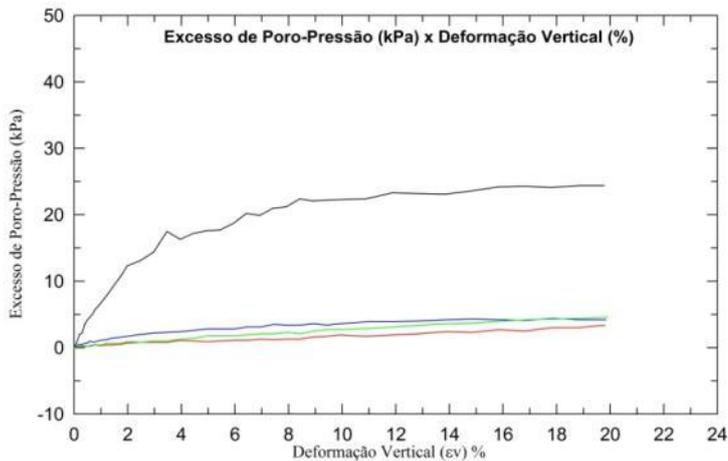
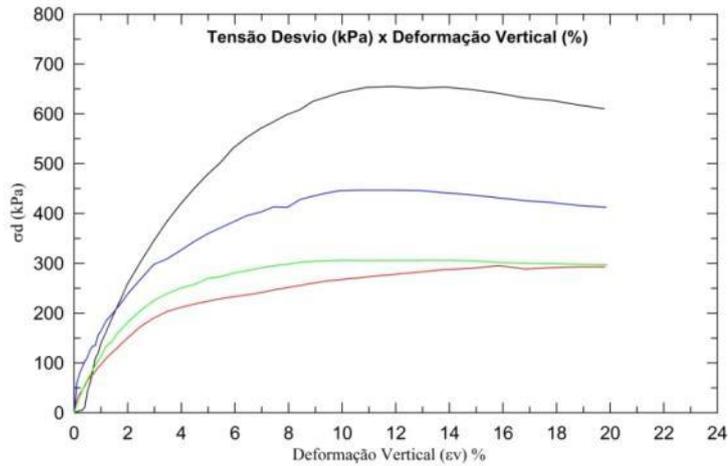
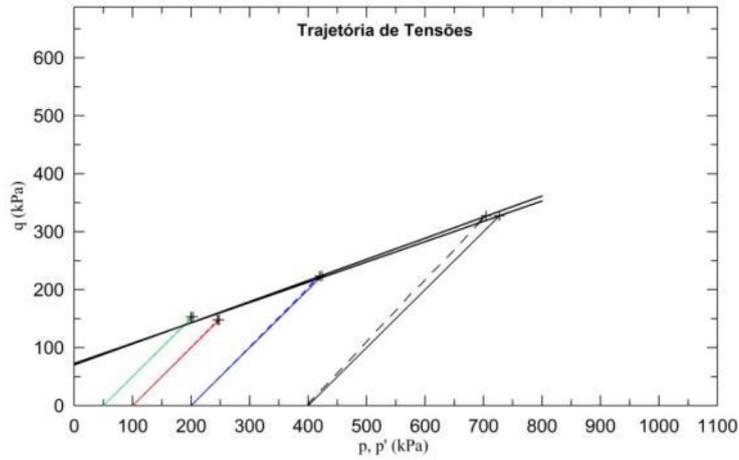
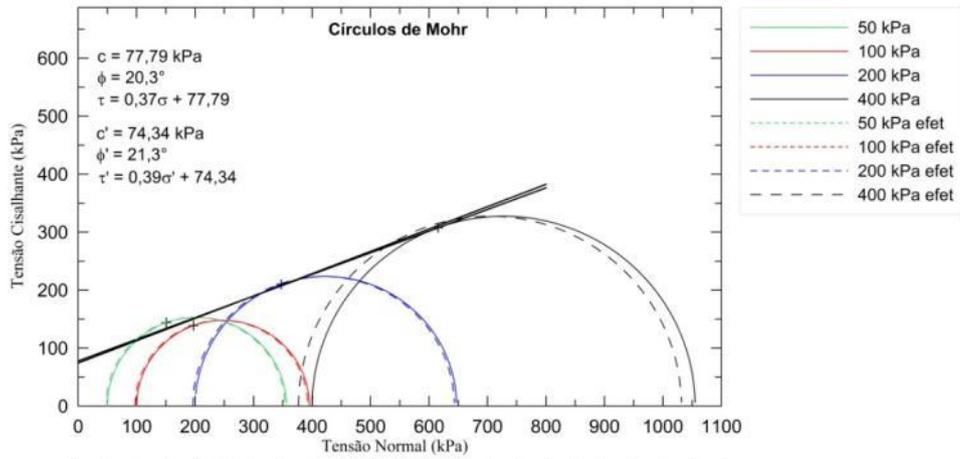
VALADÃO, G. E. S. *Separação Sólido-Líquido*. Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

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

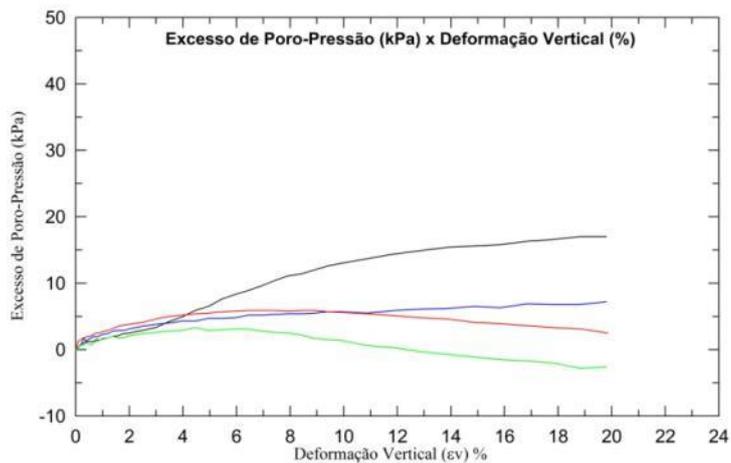
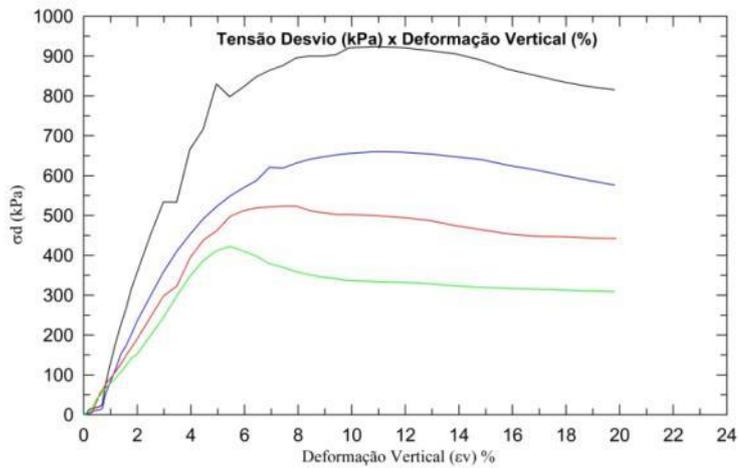
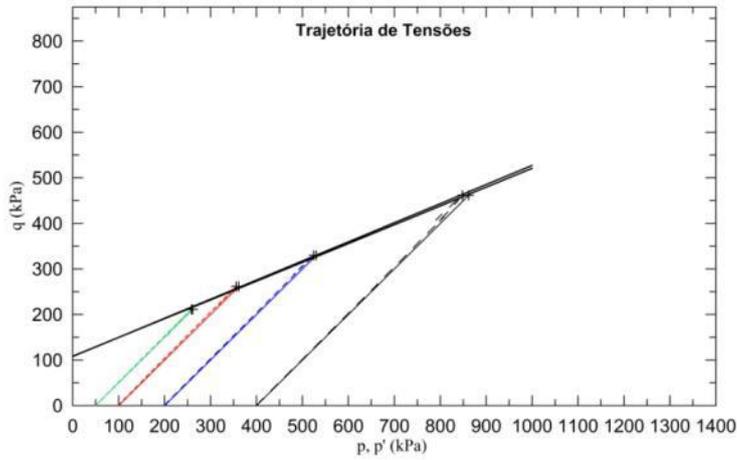
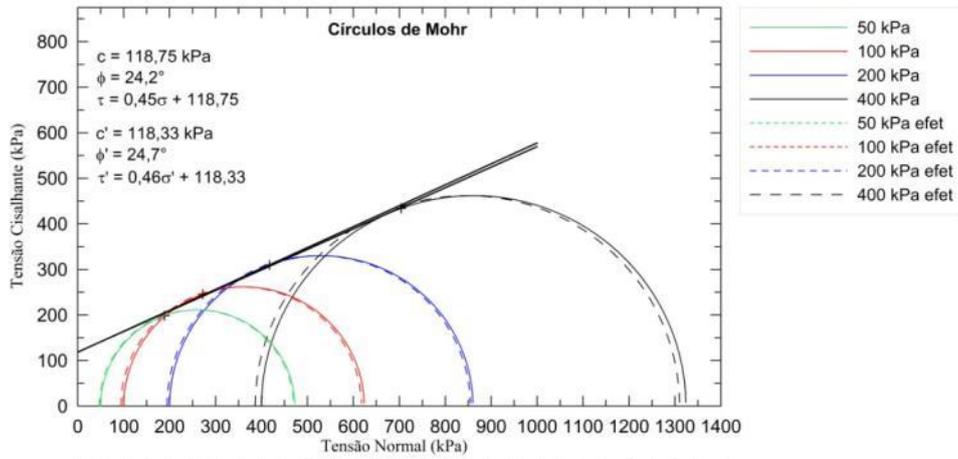
## **ANEXO A**

**A.1 Círculos de Mohr, trajetórias de tensões e gráficos da tensão desvio versus deformação e excesso de poropressão versus deformação obtidos dos ensaios triaxiais UU.**

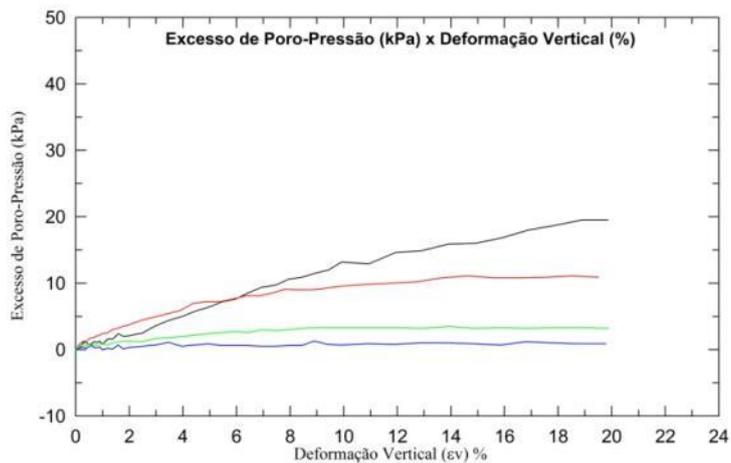
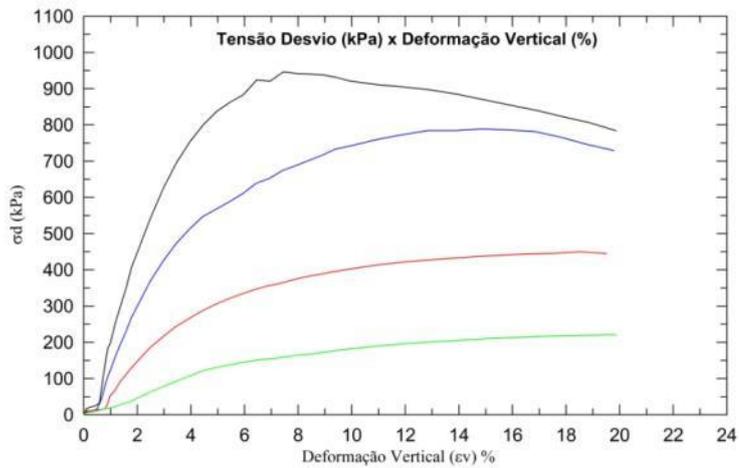
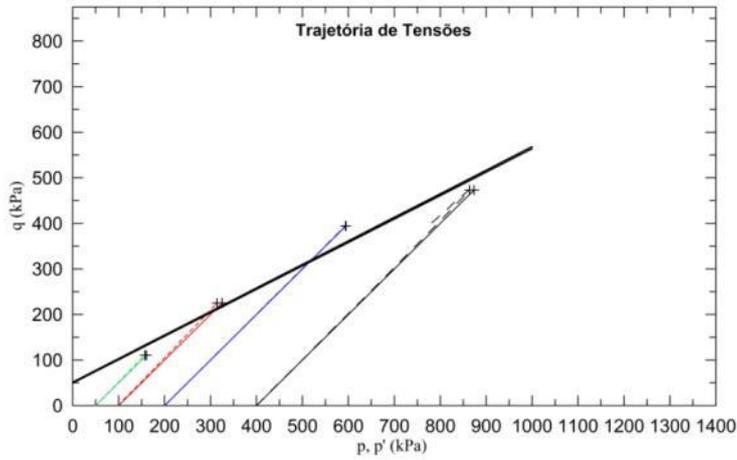
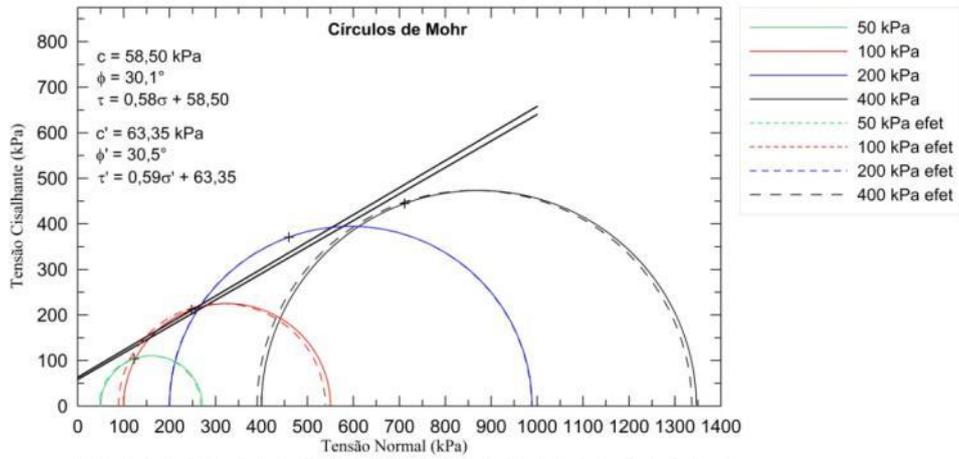
TRIAXIAL UU - Bloco 8 passadas



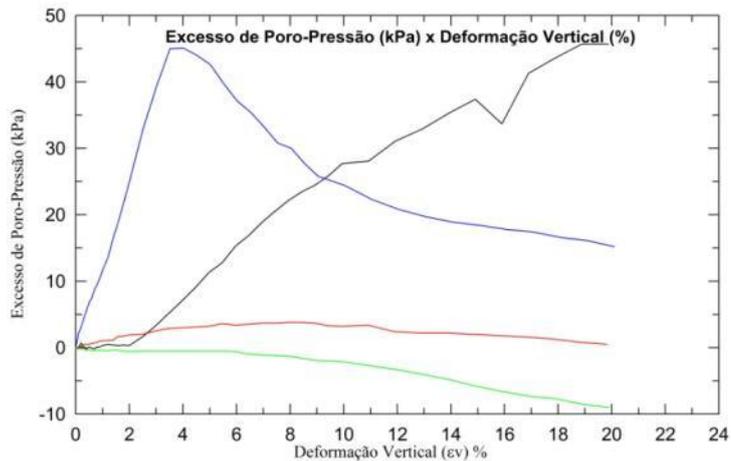
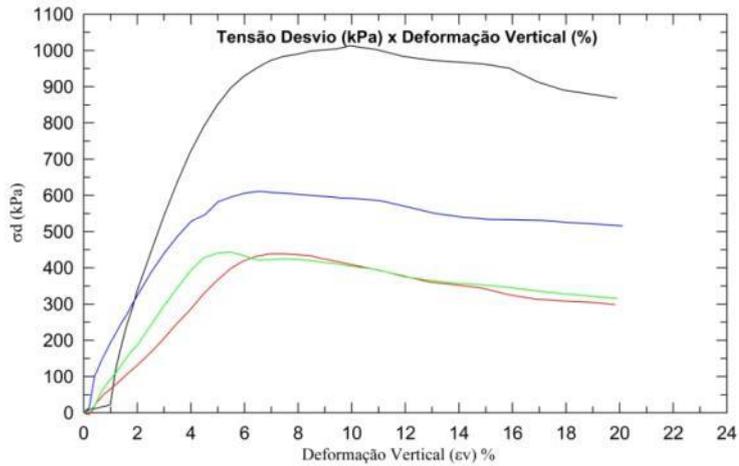
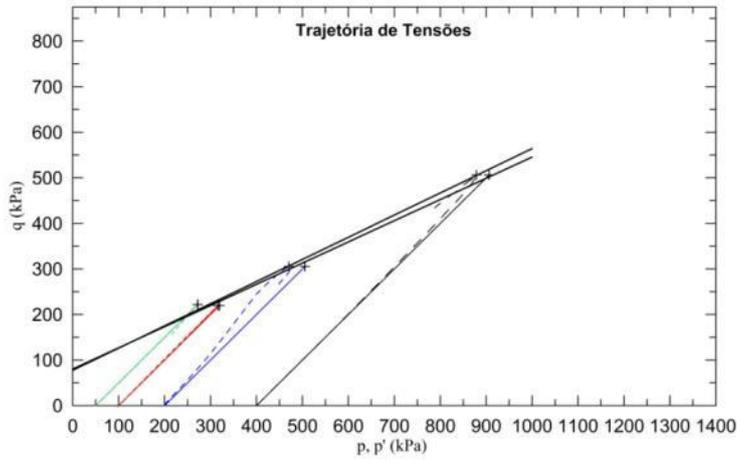
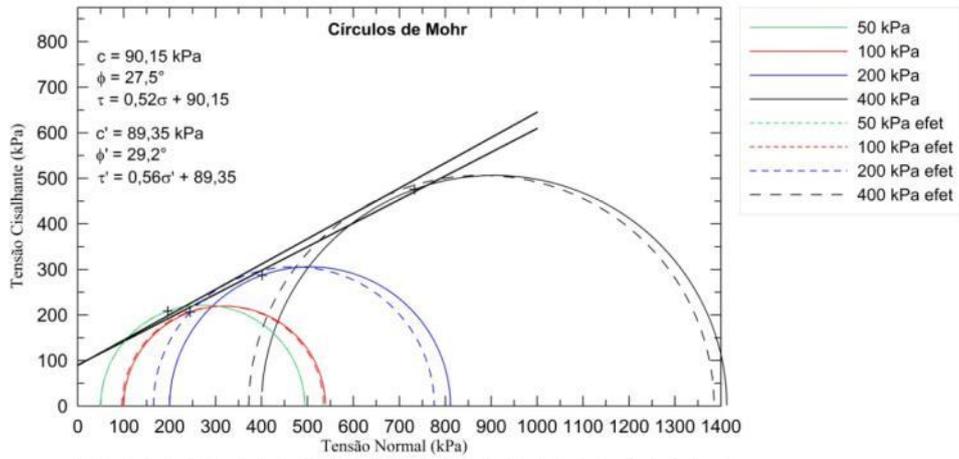
TRIAXIAL UU - Bloco 10 passadas



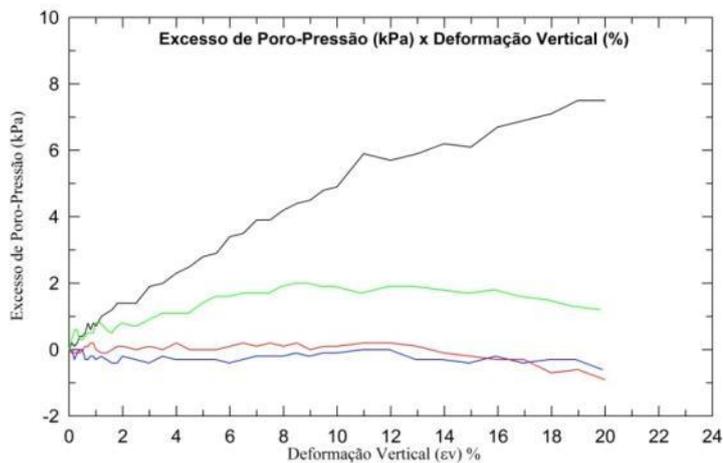
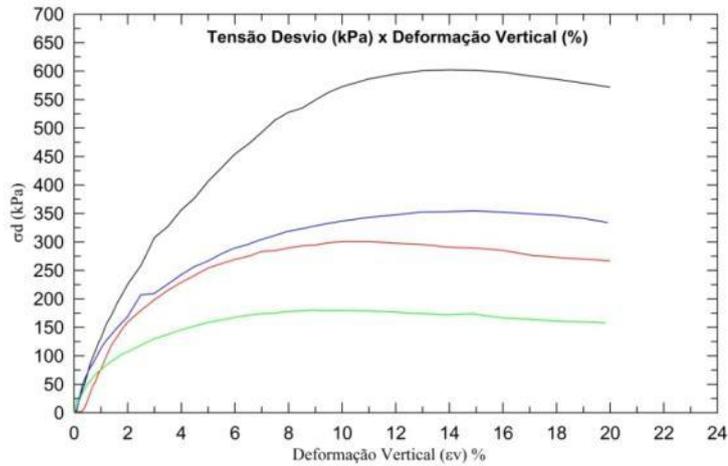
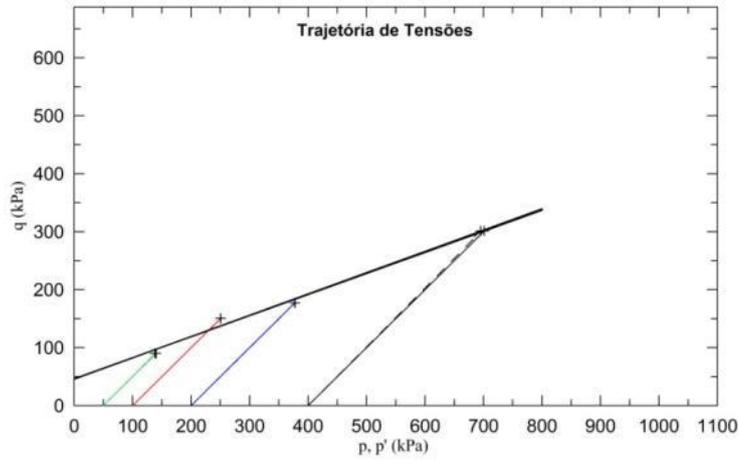
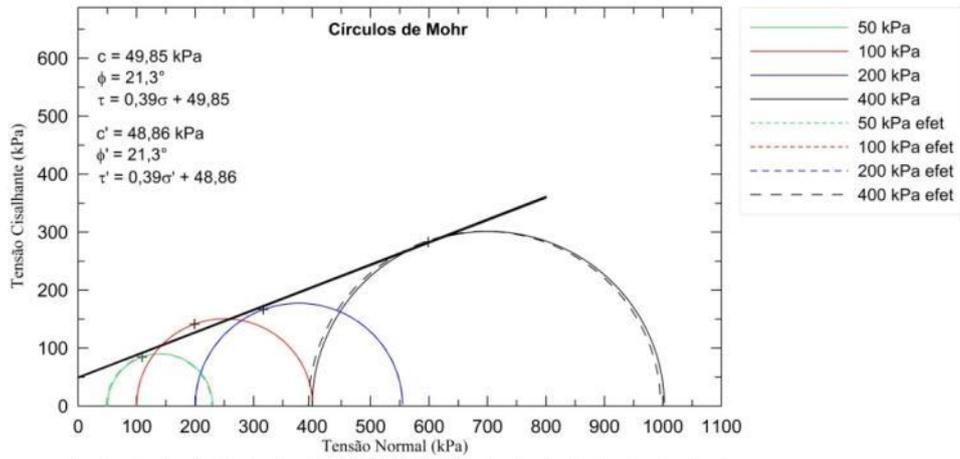
TRIAXIAL UU - Bloco 12 passadas



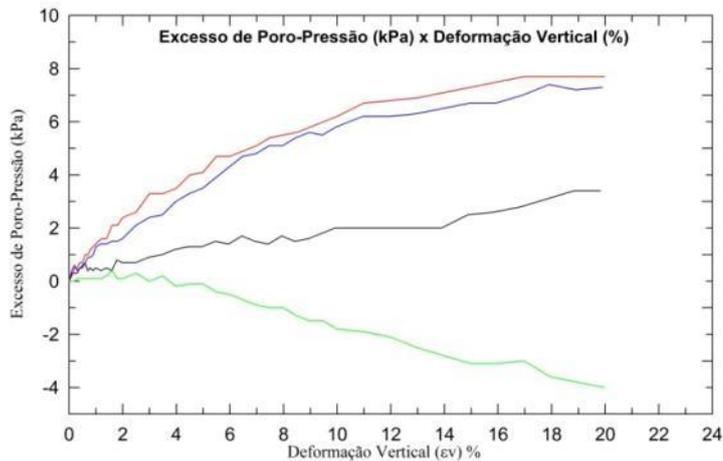
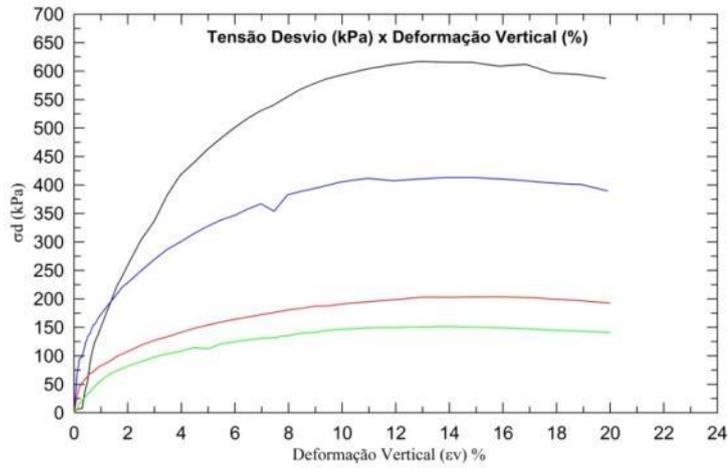
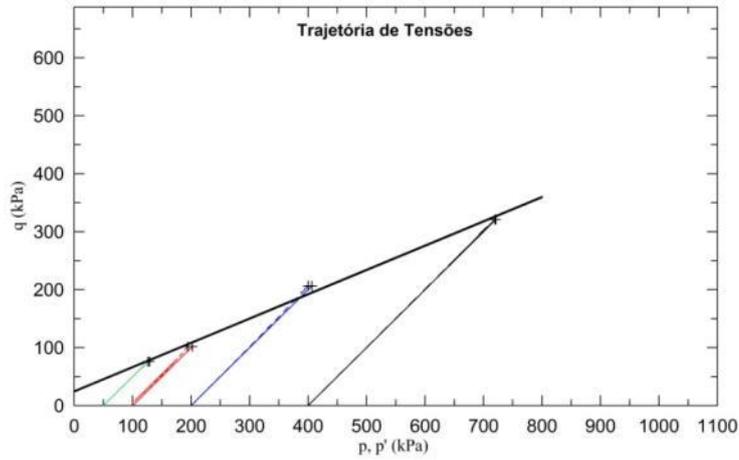
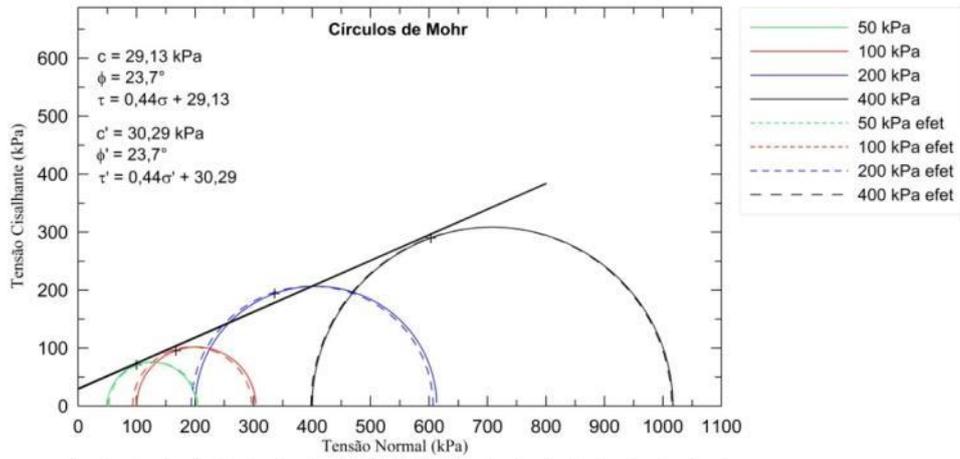
TRIAXIAL UU - Bloco 14 passadas



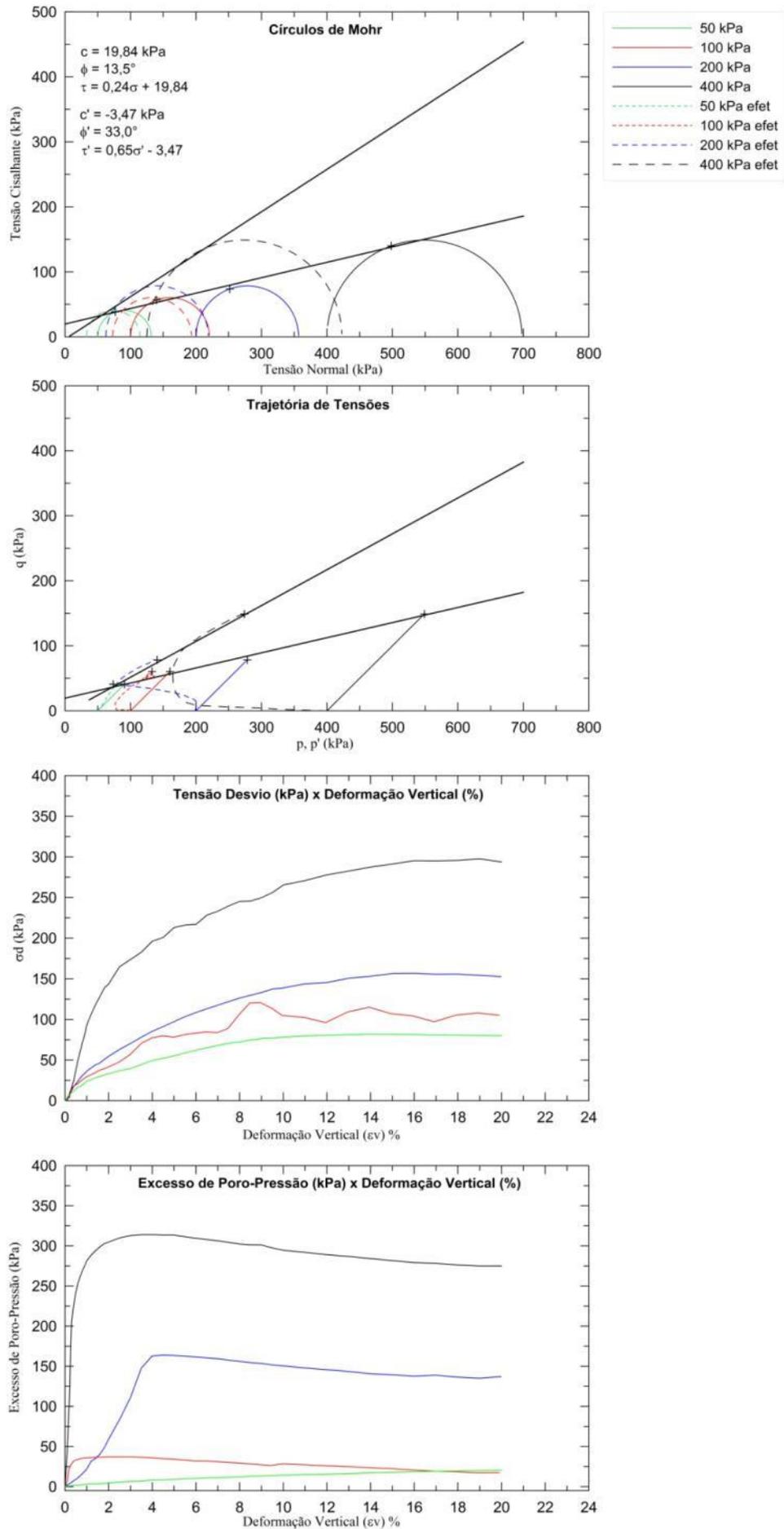
TRIAXIAL UU - GC=90% wót-5%



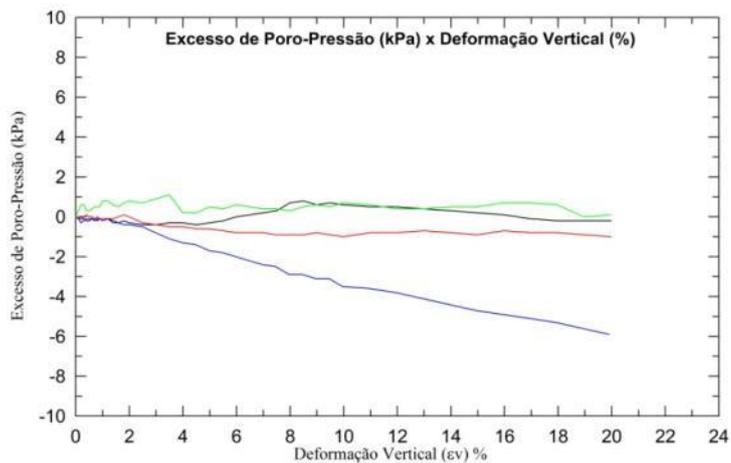
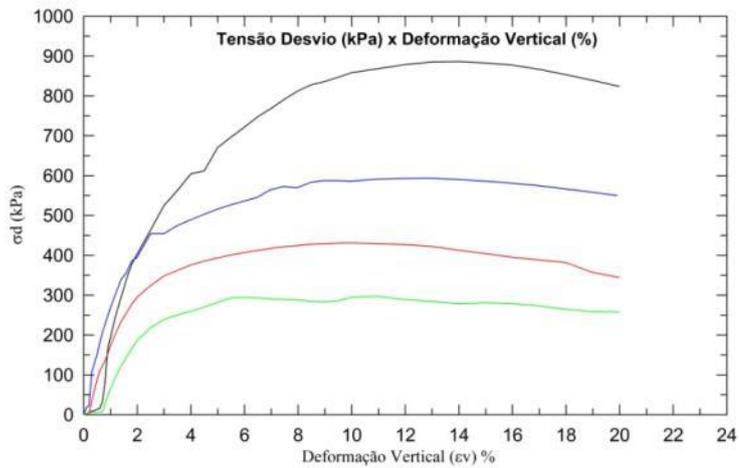
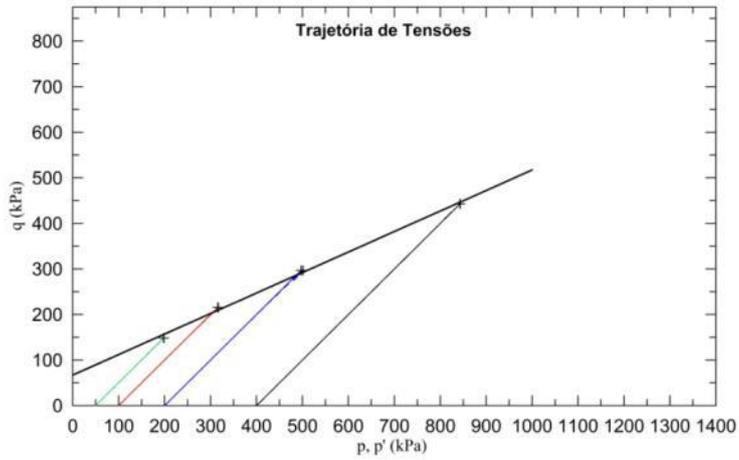
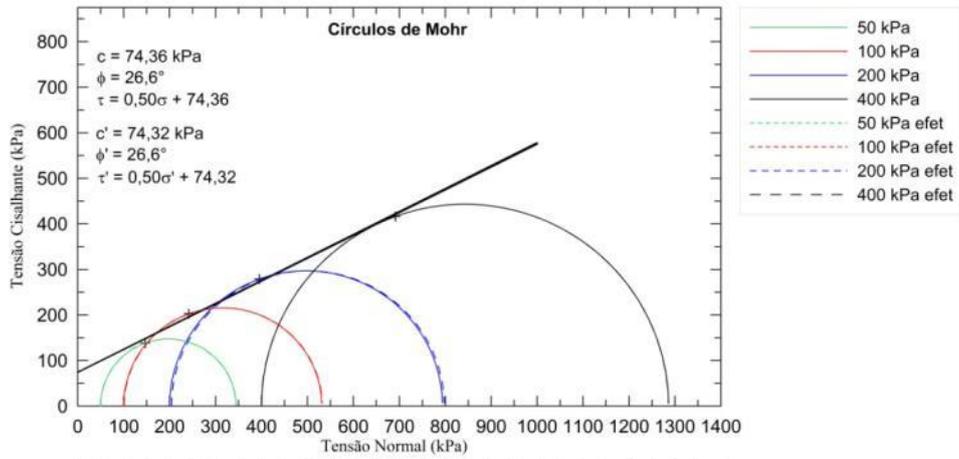
TRIAXIAL UU - GC=90% wót



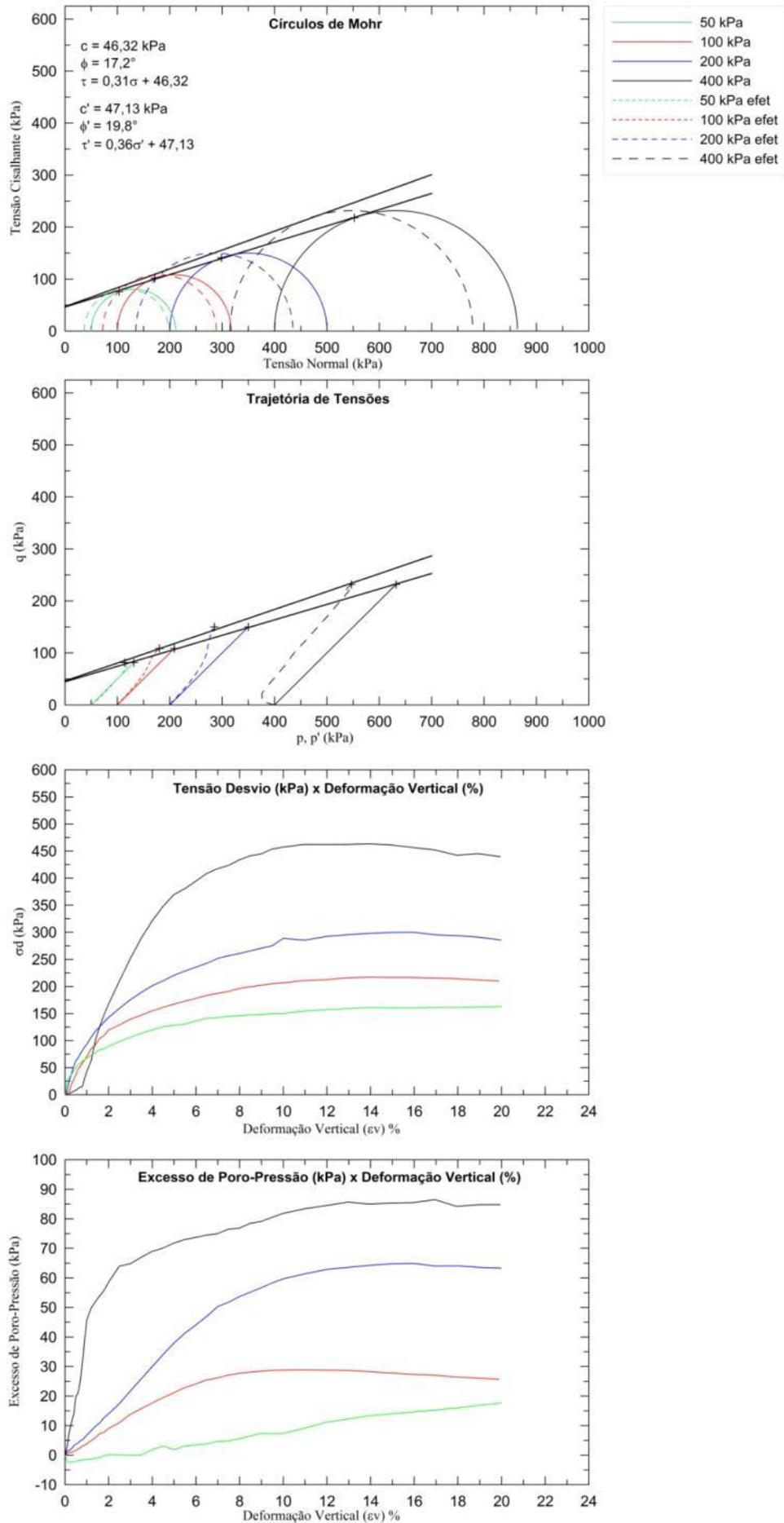
TRIAXIAL UU - GC=90% wót+5%



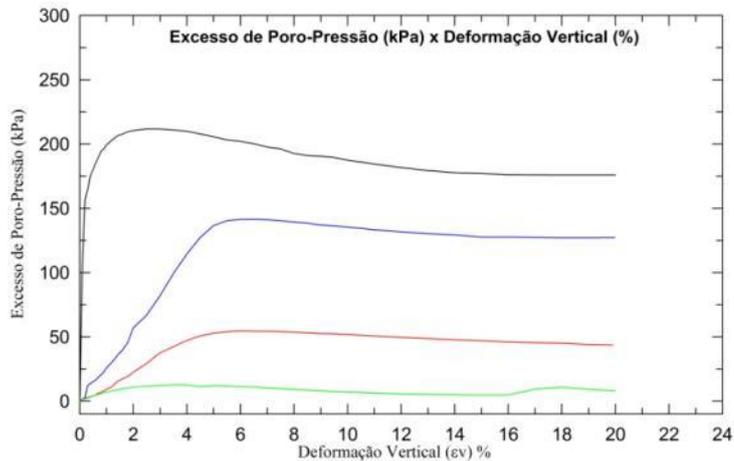
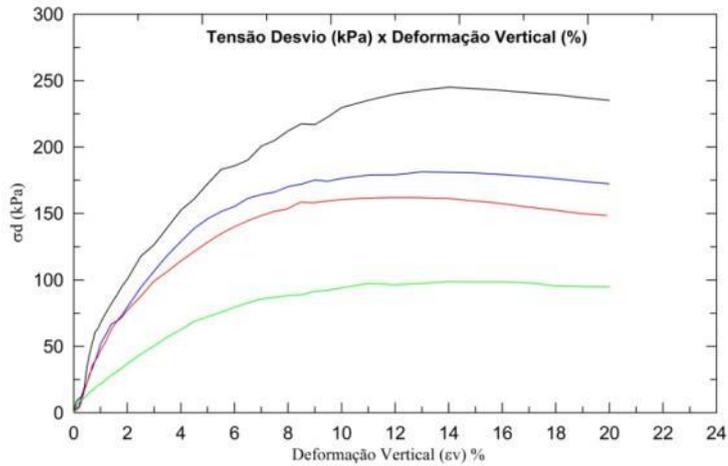
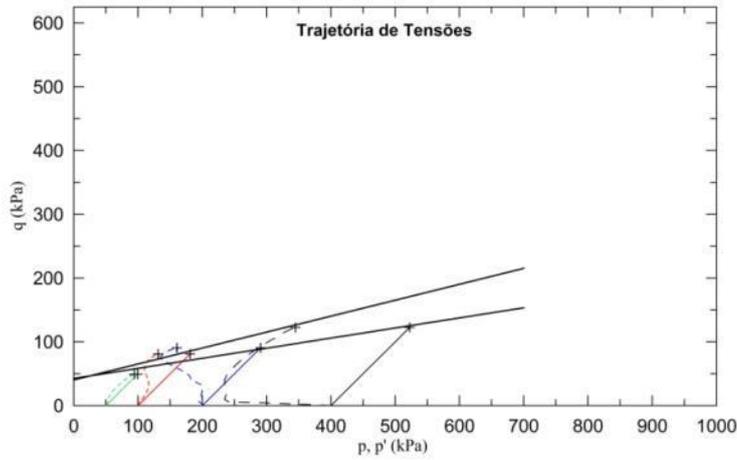
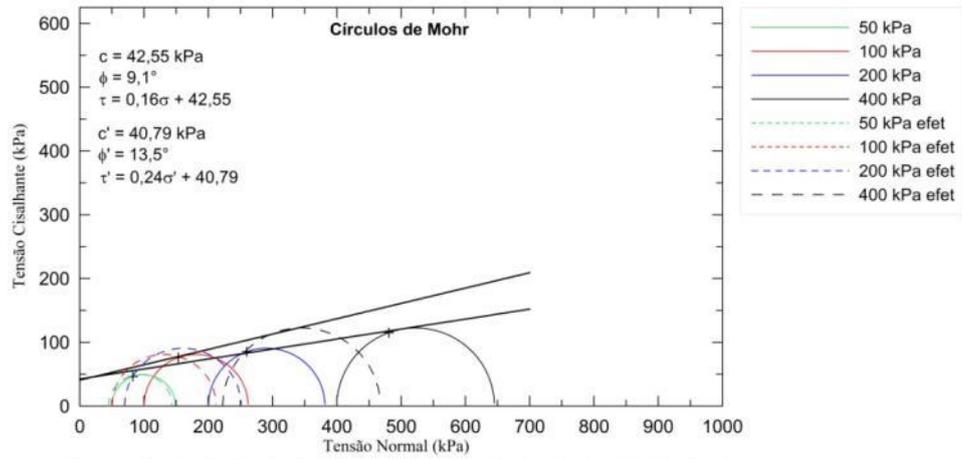
TRIAxIAL UU - GC=95% wót-5%



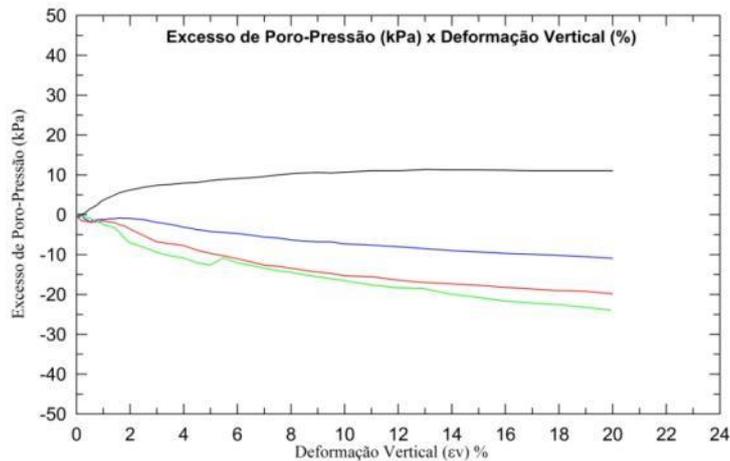
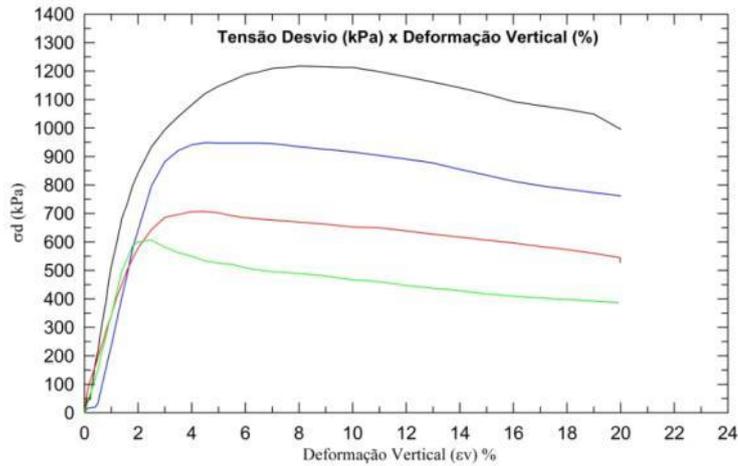
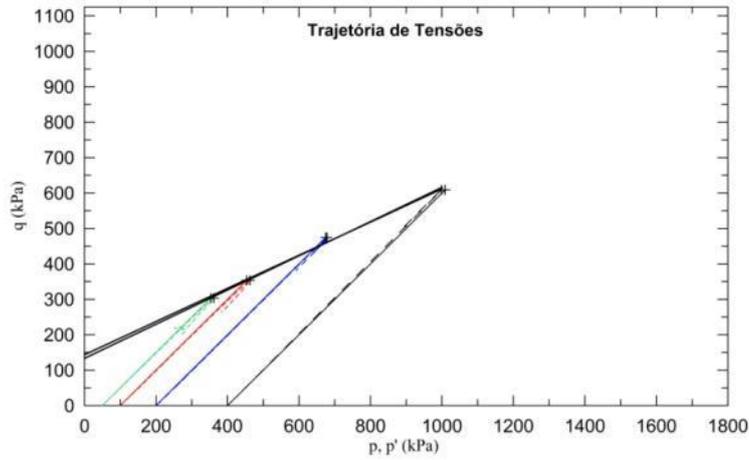
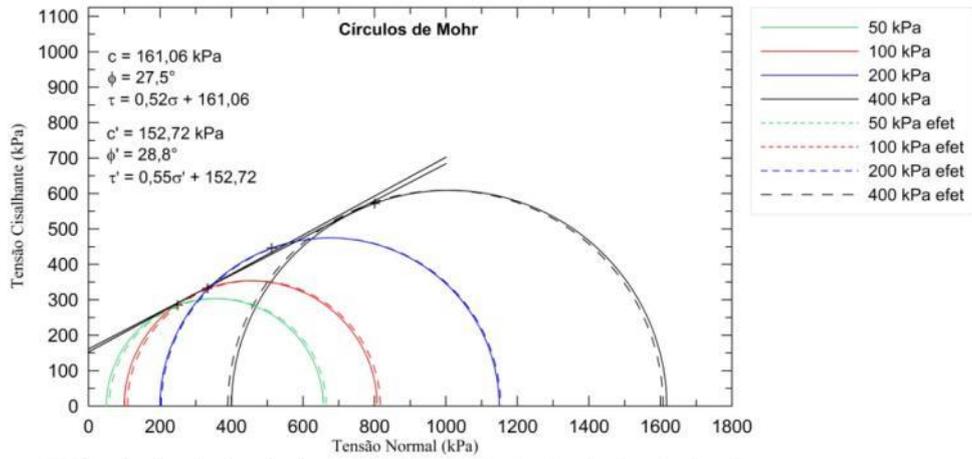
TRIAXIAL UU - GC=95% wót



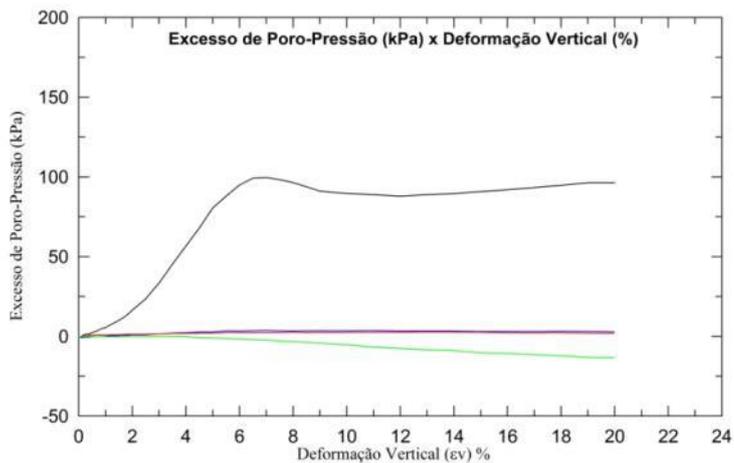
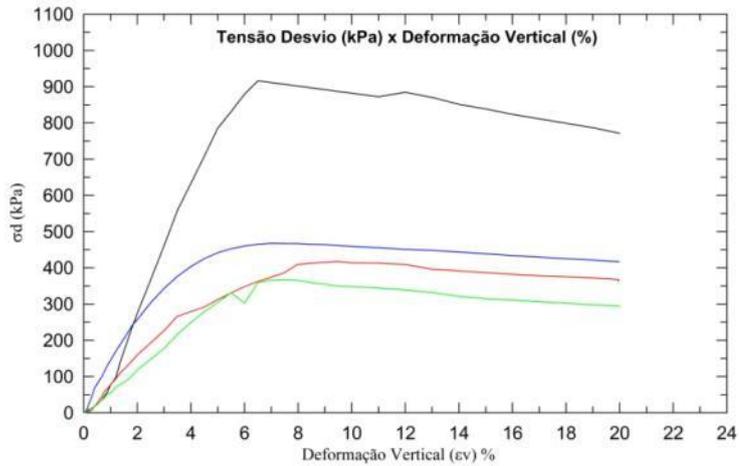
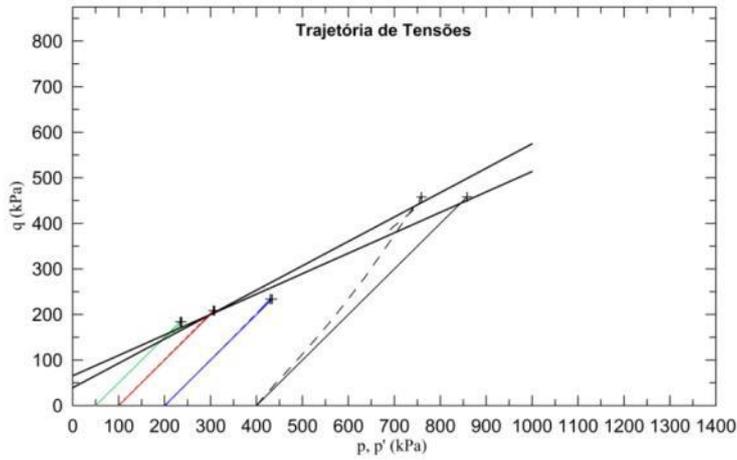
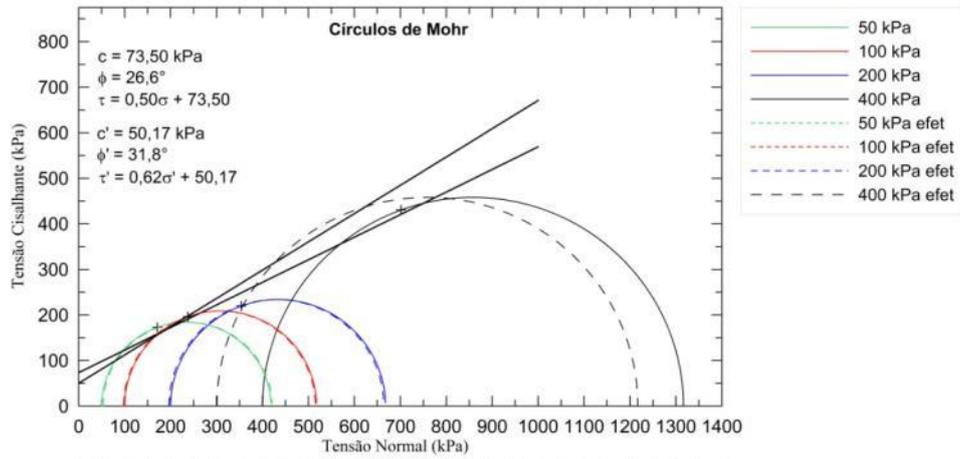
TRIAXIAL UU - GC=95% wót+5%



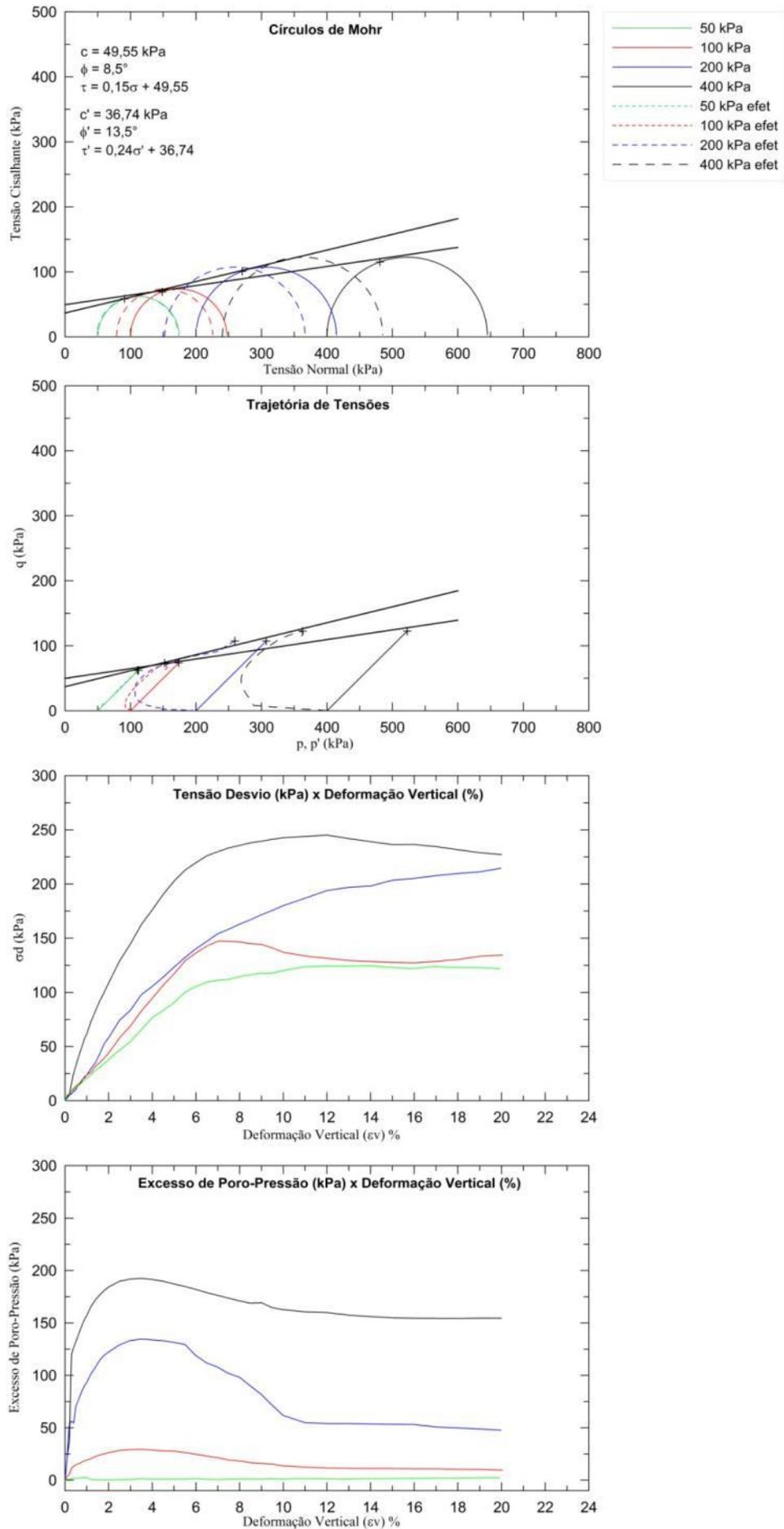
TRIAXIAL UU - GC=100% wót-5%



TRIAXIAL UU - GC=100% wót

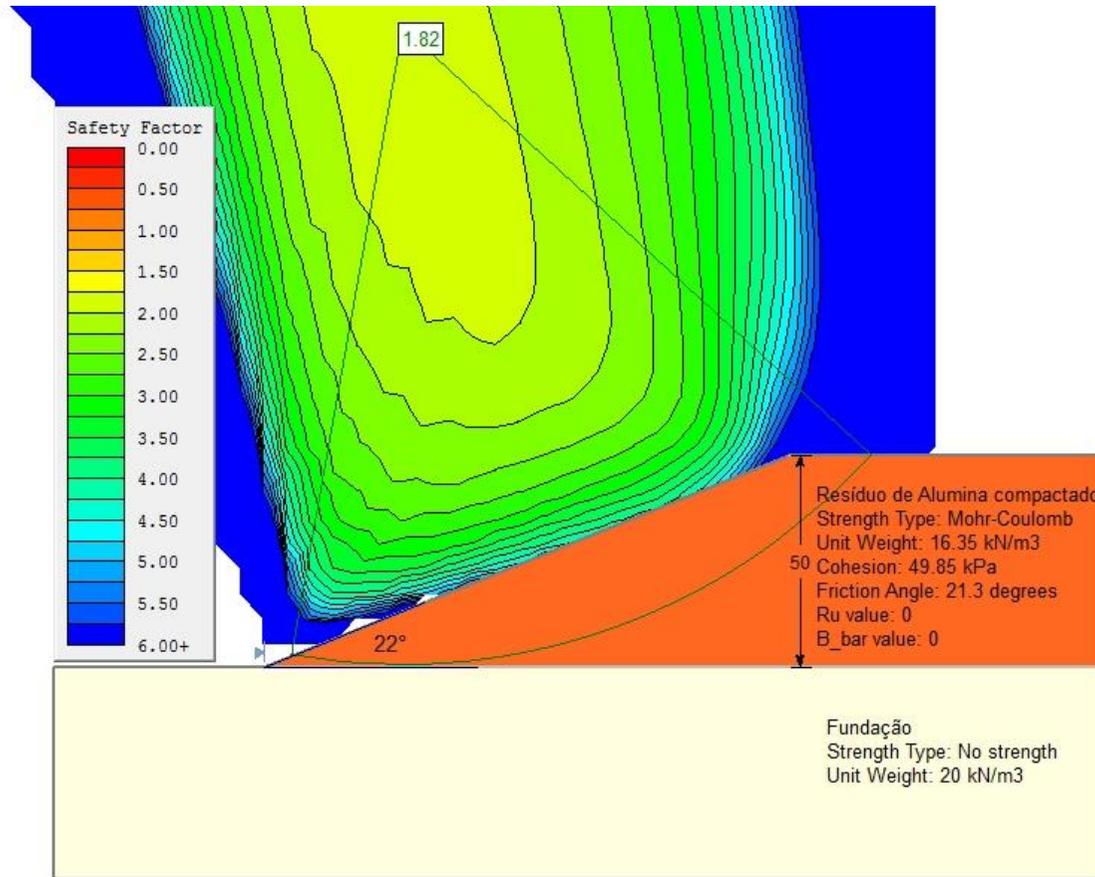


TRIAXIAL UU - GC=100% wót+5%

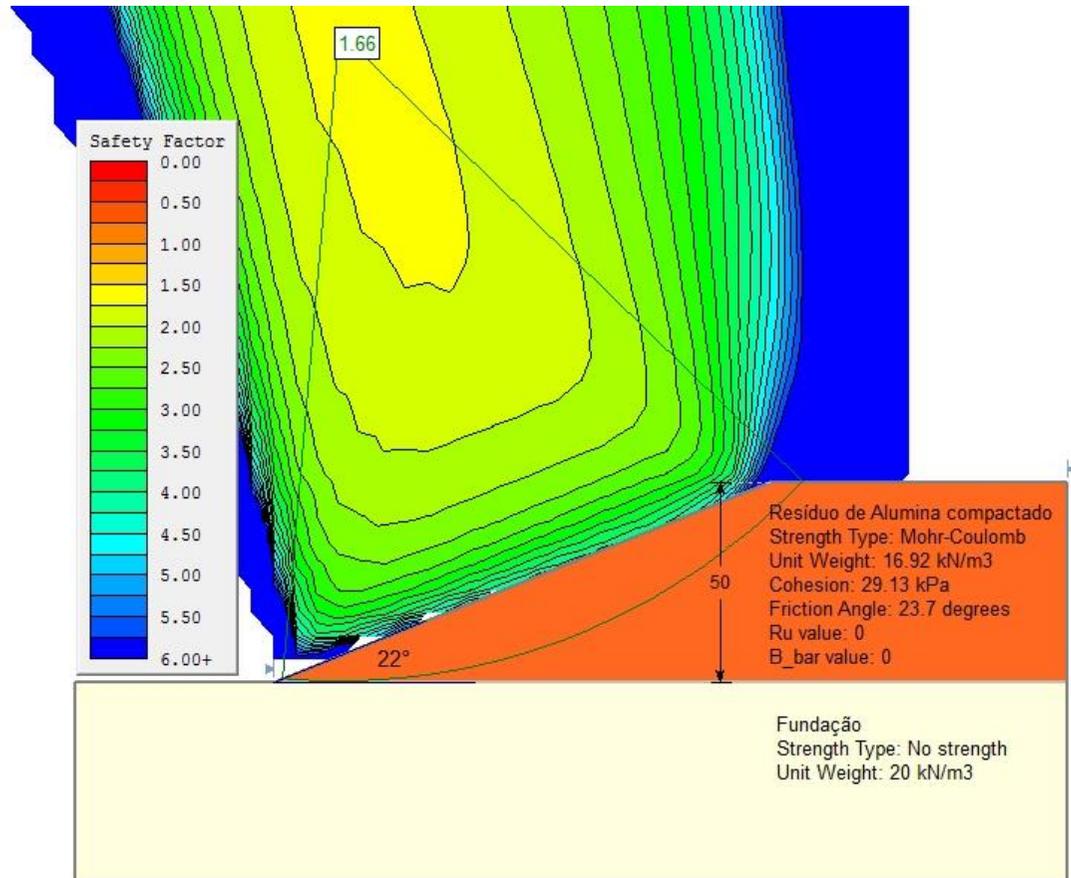


## **ANEXO B**

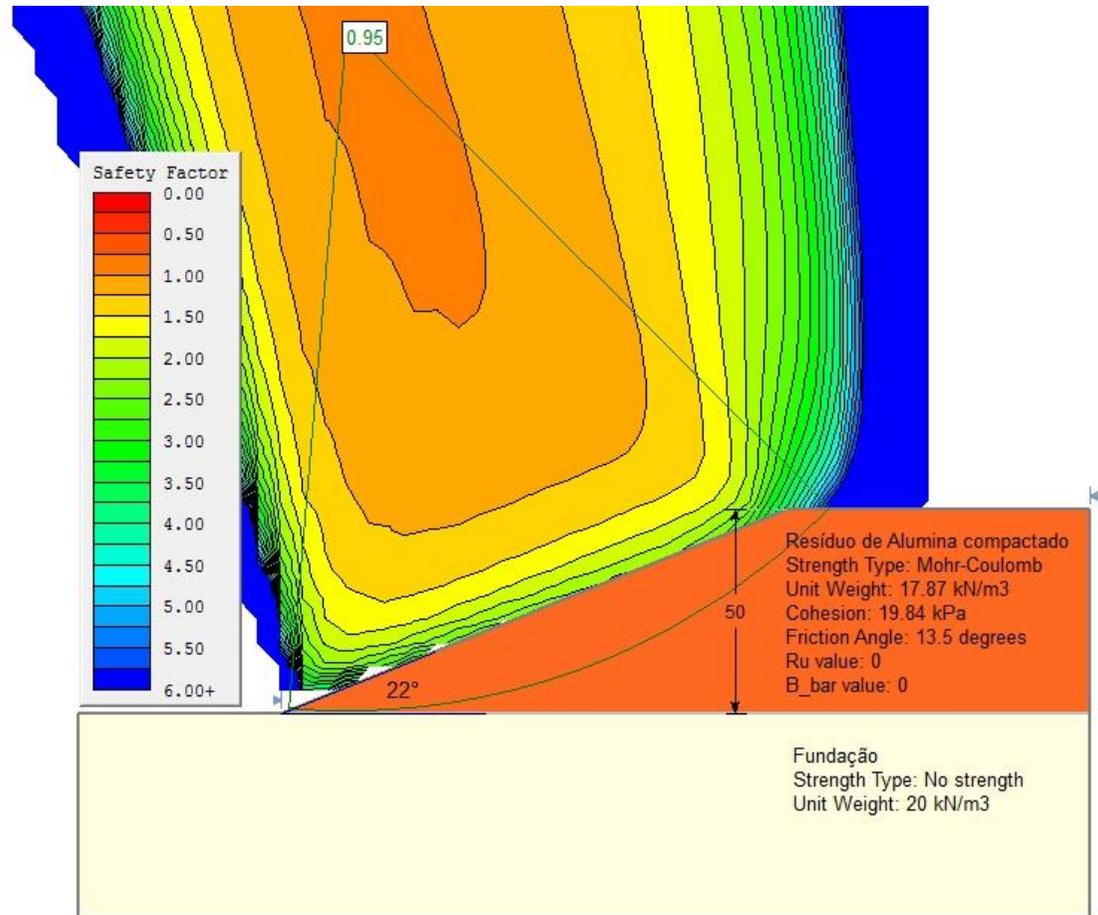
### **B.1 Figuras das análises de estabilidade**



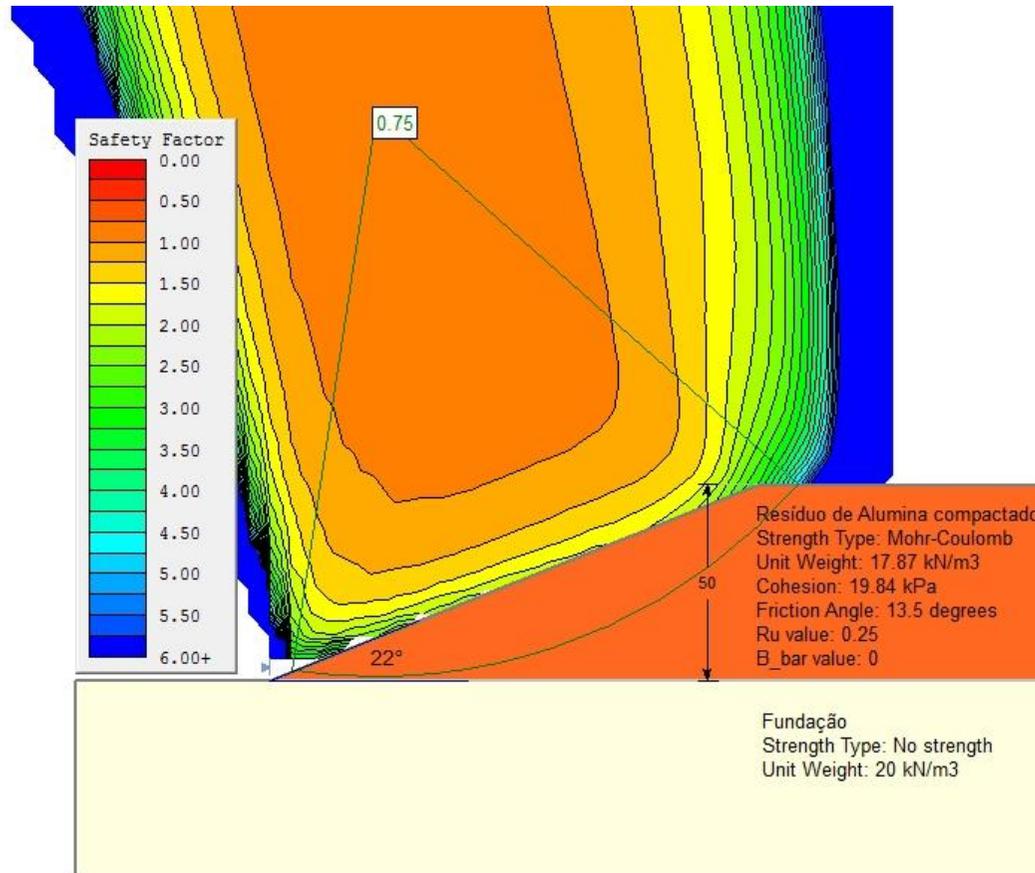
Pilha de resíduo compactado com **GC = 90%** e **w<sub>ót</sub> -5%**, com 50m de altura e inclinação global do talude de 22°.



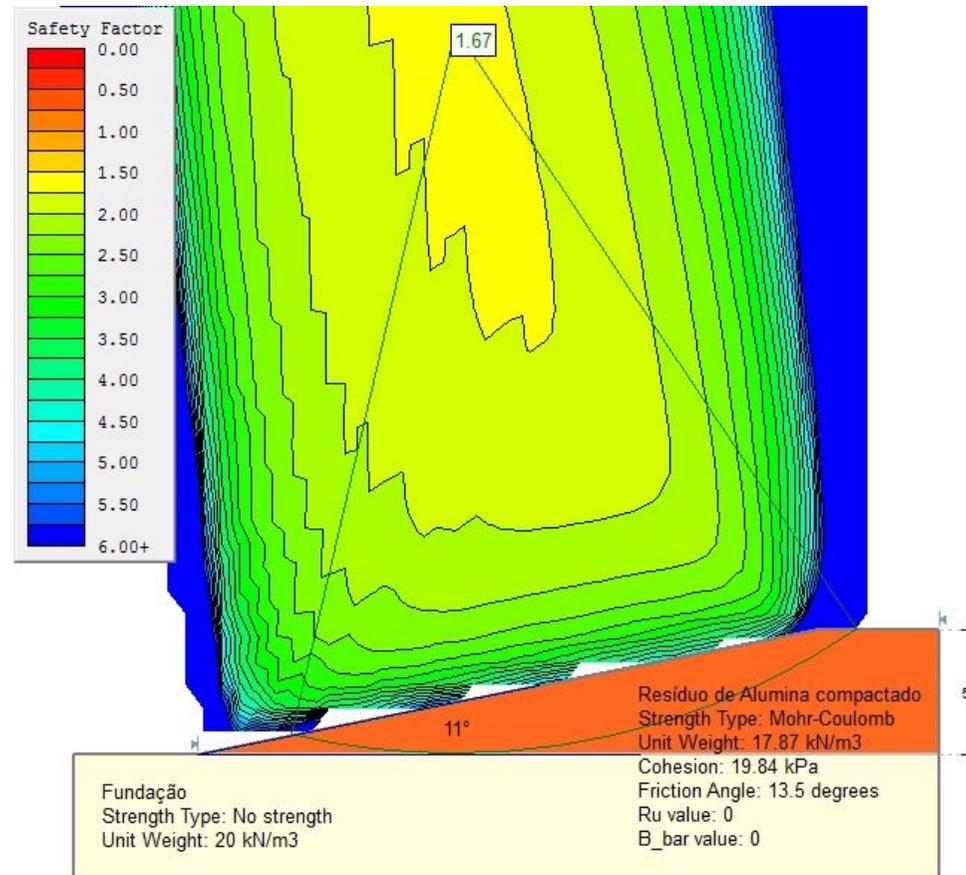
Pilha de resíduo compactado com  $GC = 90\%$  e  $w_{ót}$ , com 50m de altura e inclinação global do talude de  $22^\circ$ .



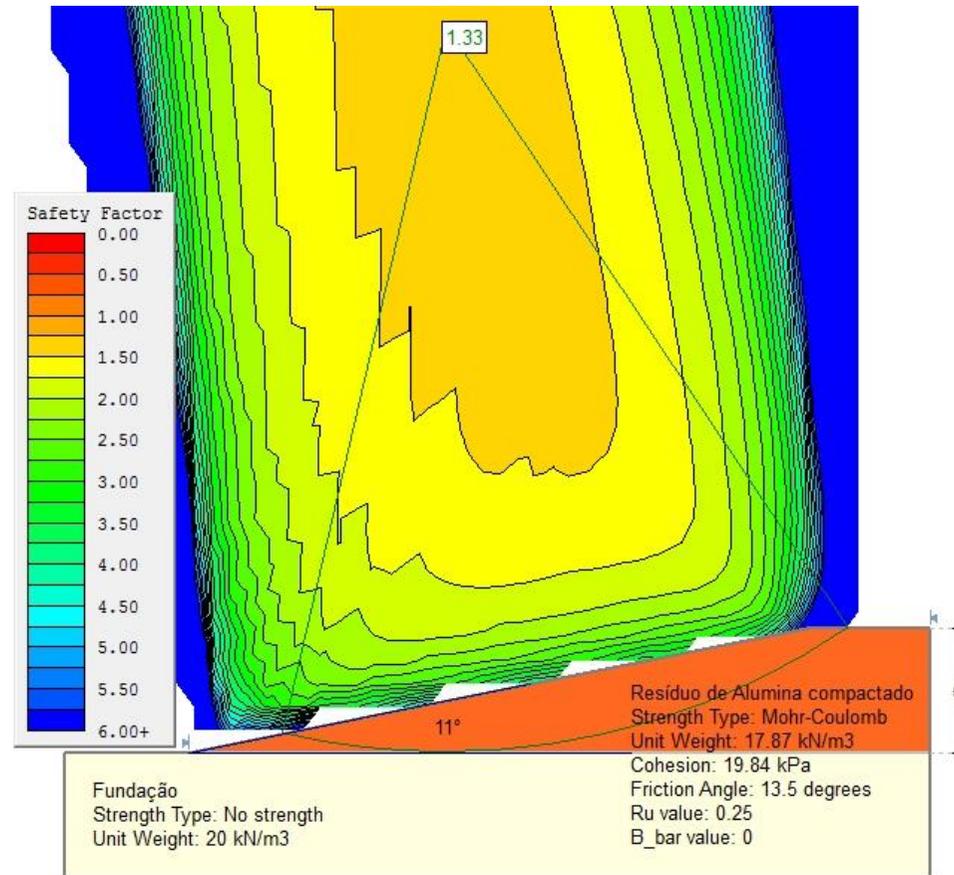
Pilha de resíduo compactado com **GC = 90%** e **w<sub>ót</sub> +5%**, com 50m de altura e inclinação global do talude de 22°.



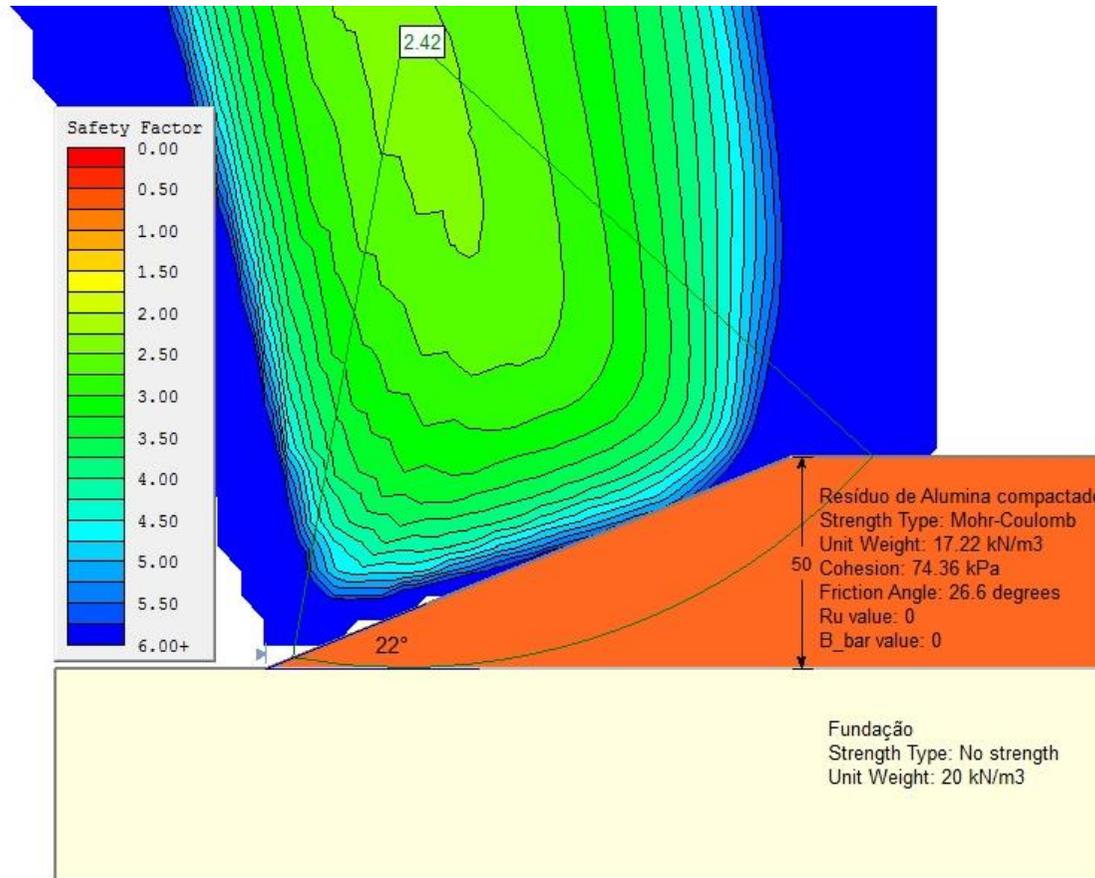
Pilha de resíduo compactado com **GC = 90%** e **w<sub>ót</sub> +5%**, com **ru = 0,25**, com 50m de altura e inclinação global do talude de 22°.



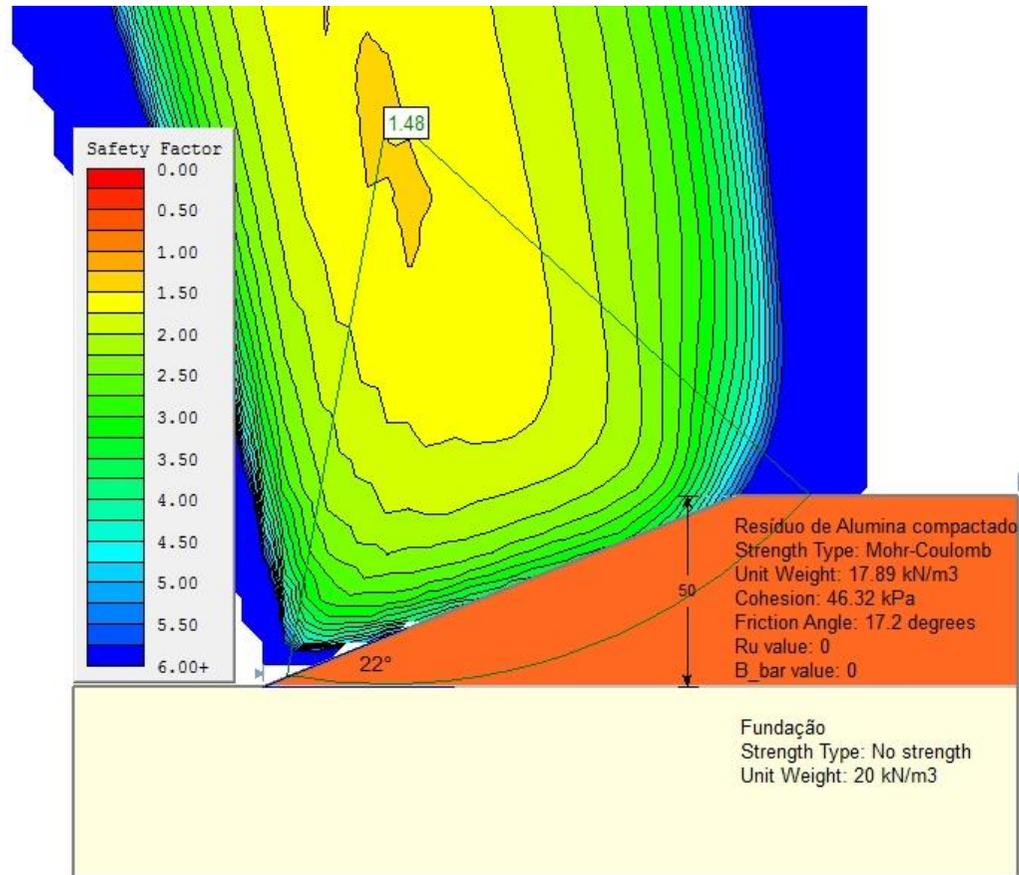
Pilha de resíduo compactado com **GC = 90%** e **w<sub>ót</sub> +5%**, com 50m de altura e inclinação global do talude de 11°.



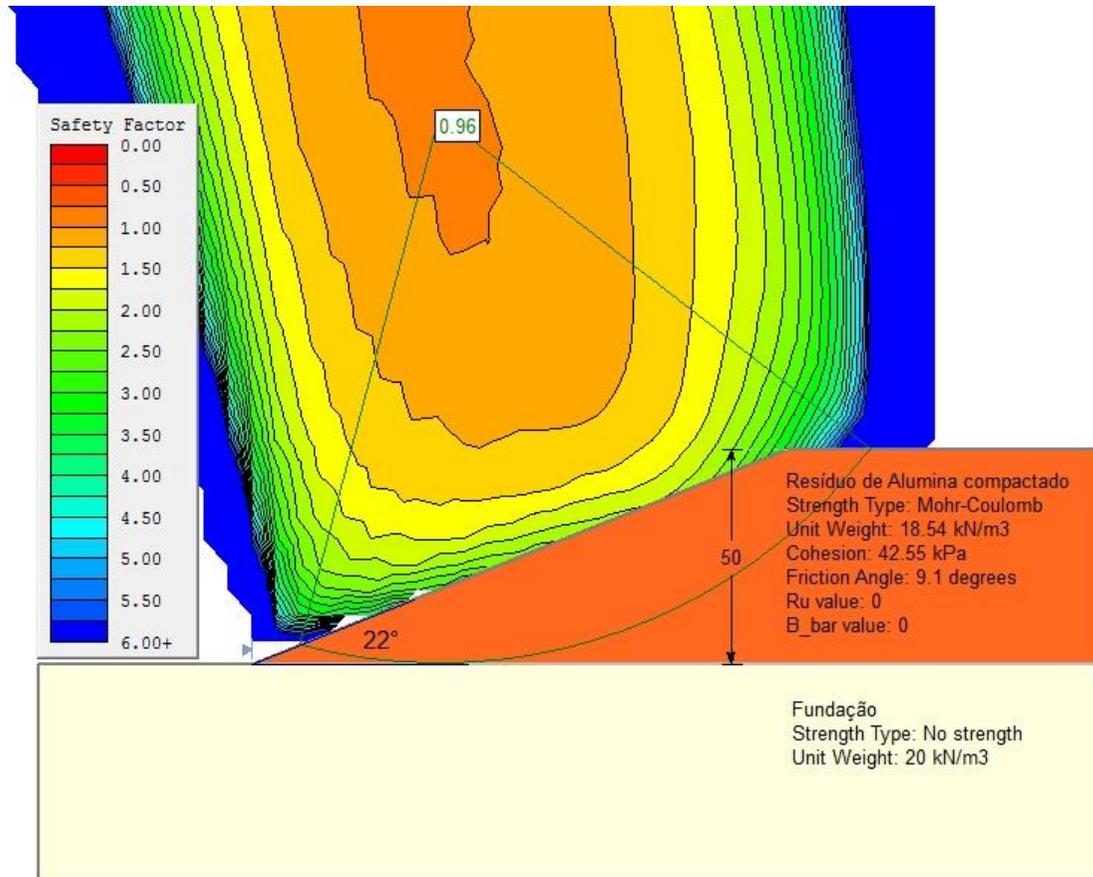
Pilha de resíduo compactado com **GC = 90%** e **w<sub>ót</sub> +5%**, com **ru = 0,25**, com 50m de altura e inclinação global do talude de 11°.



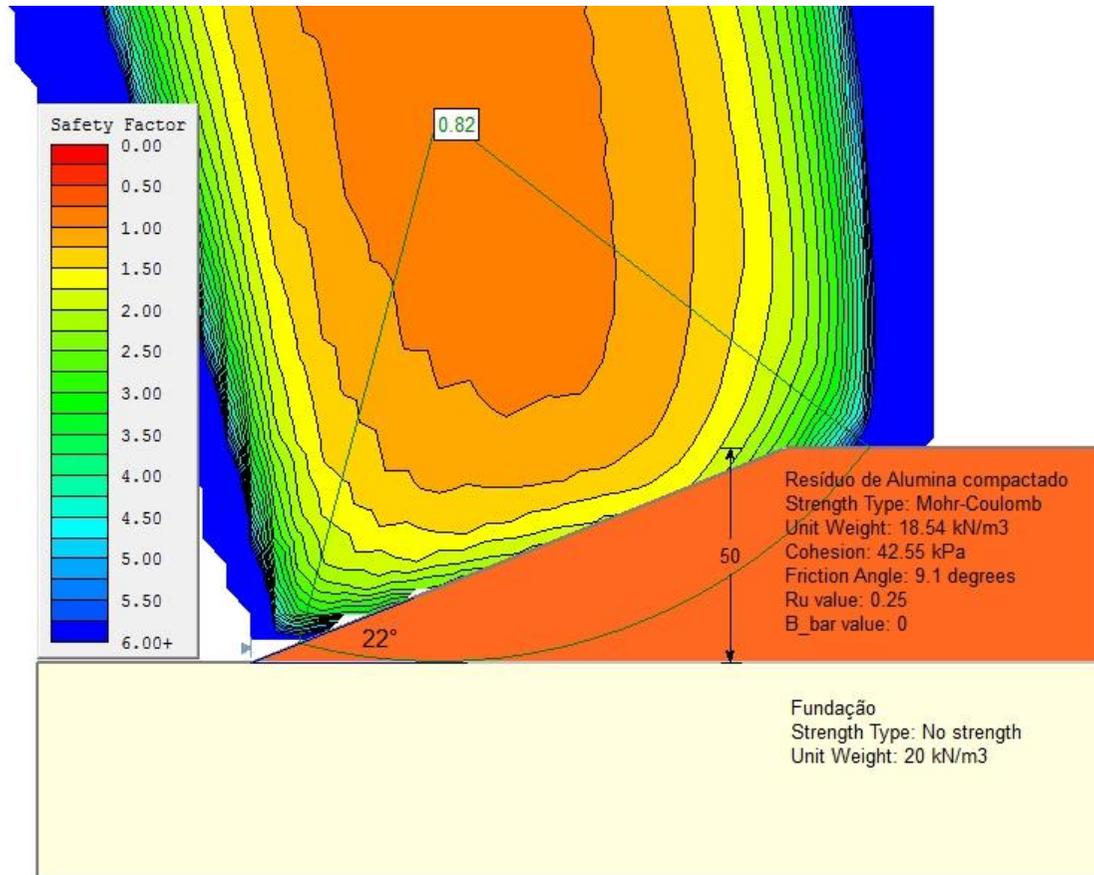
Pilha de resíduo compactado com  $GC = 95\%$  e  $w_{ót} -5\%$ , com 50m de altura e inclinação global do talude de  $22^\circ$ .



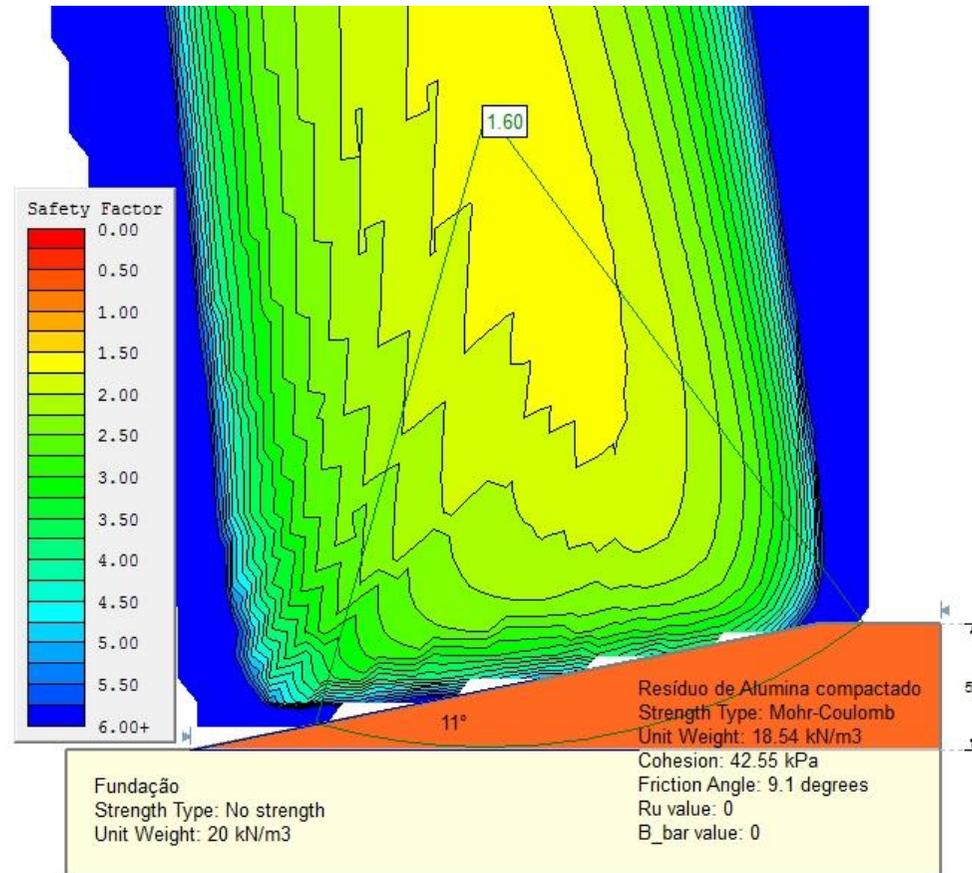
Pilha de resíduo compactado com  $GC = 95\%$  e  $w_{ót}$ , com 50m de altura e inclinação global do talude de  $22^\circ$ .



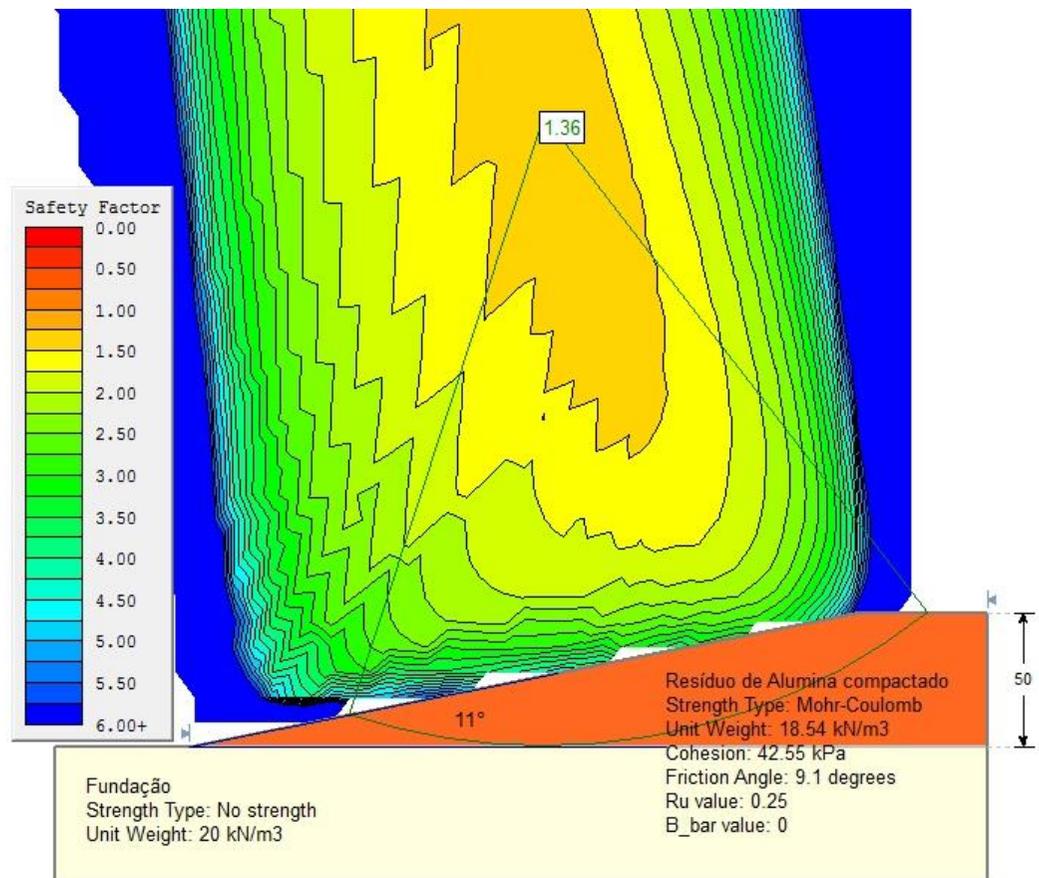
Pilha de resíduo compactado com **GC = 95%** e **w<sub>ót</sub> +5%**, com 50m de altura e inclinação global do talude de 22°.



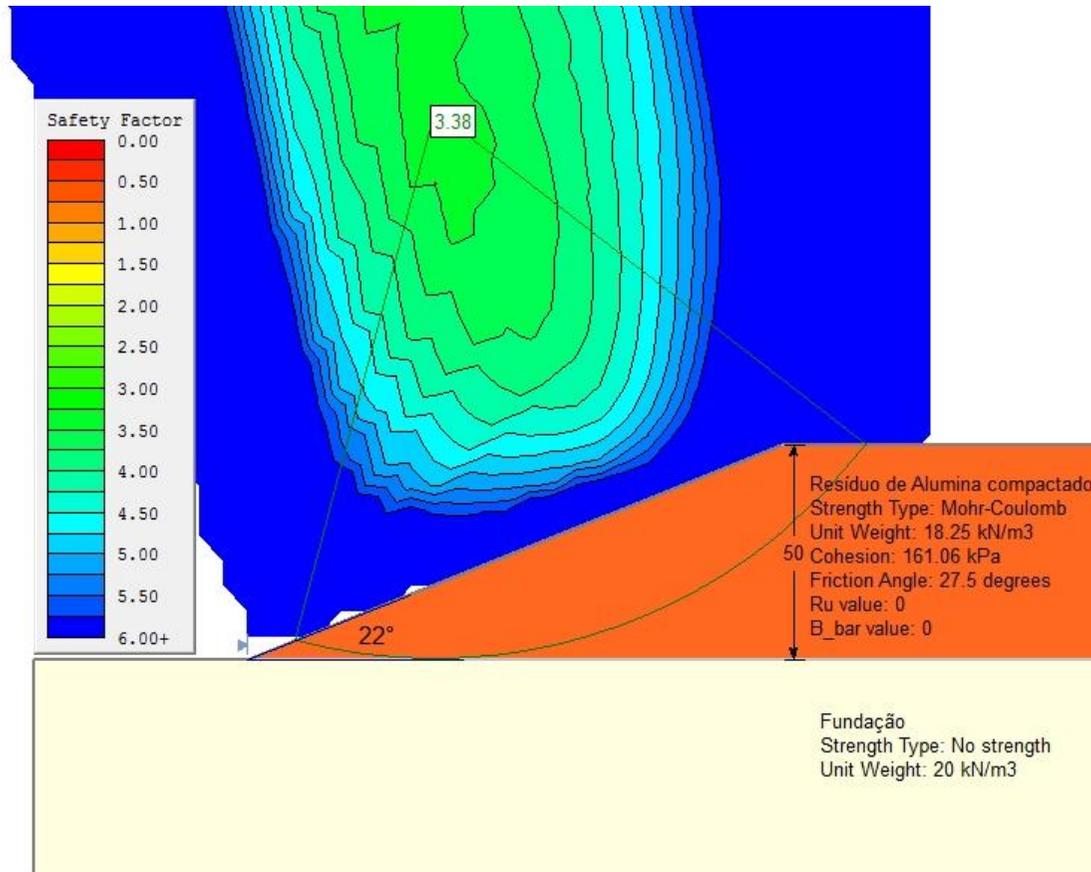
Pilha de resíduo compactado com **GC = 95% e w<sub>ót</sub> +5%**, com **ru = 0,25**, com 50m de altura e inclinação global do talude de 22°.



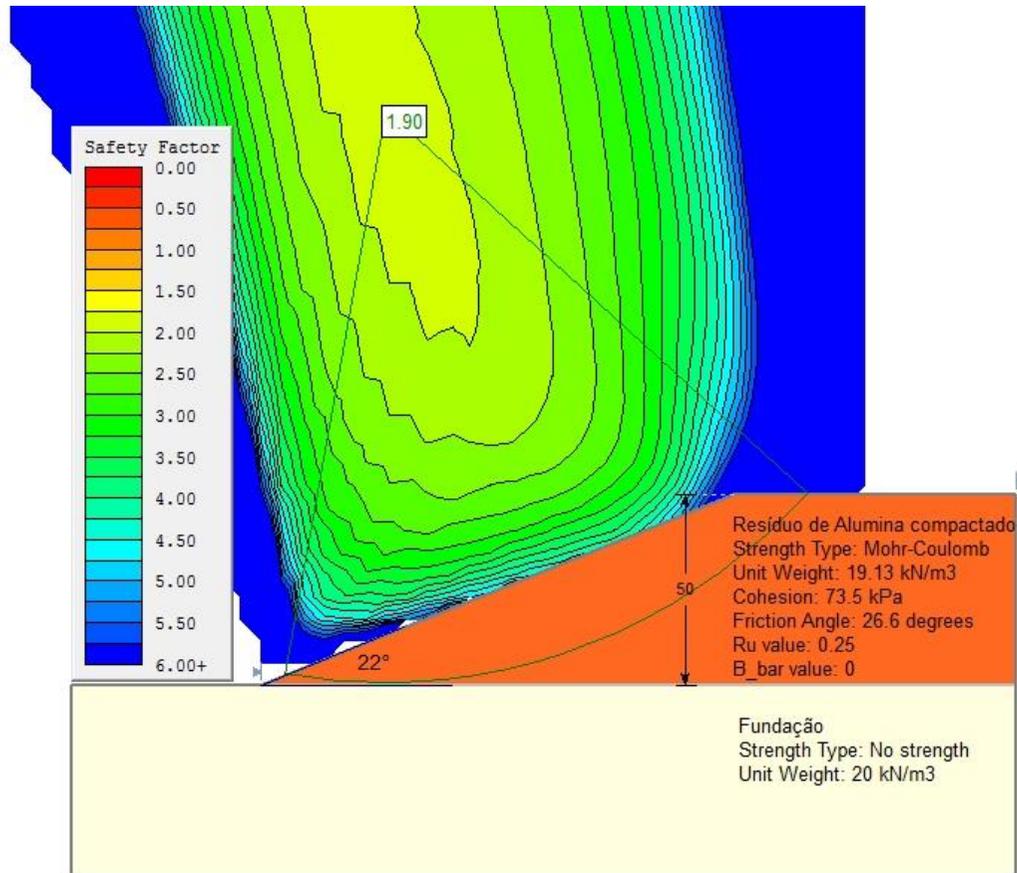
Pilha de resíduo compactado com  $GC = 95\%$  e  $w_{ót} +5\%$ , com 50m de altura e inclinação global do talude de  $11^\circ$ .



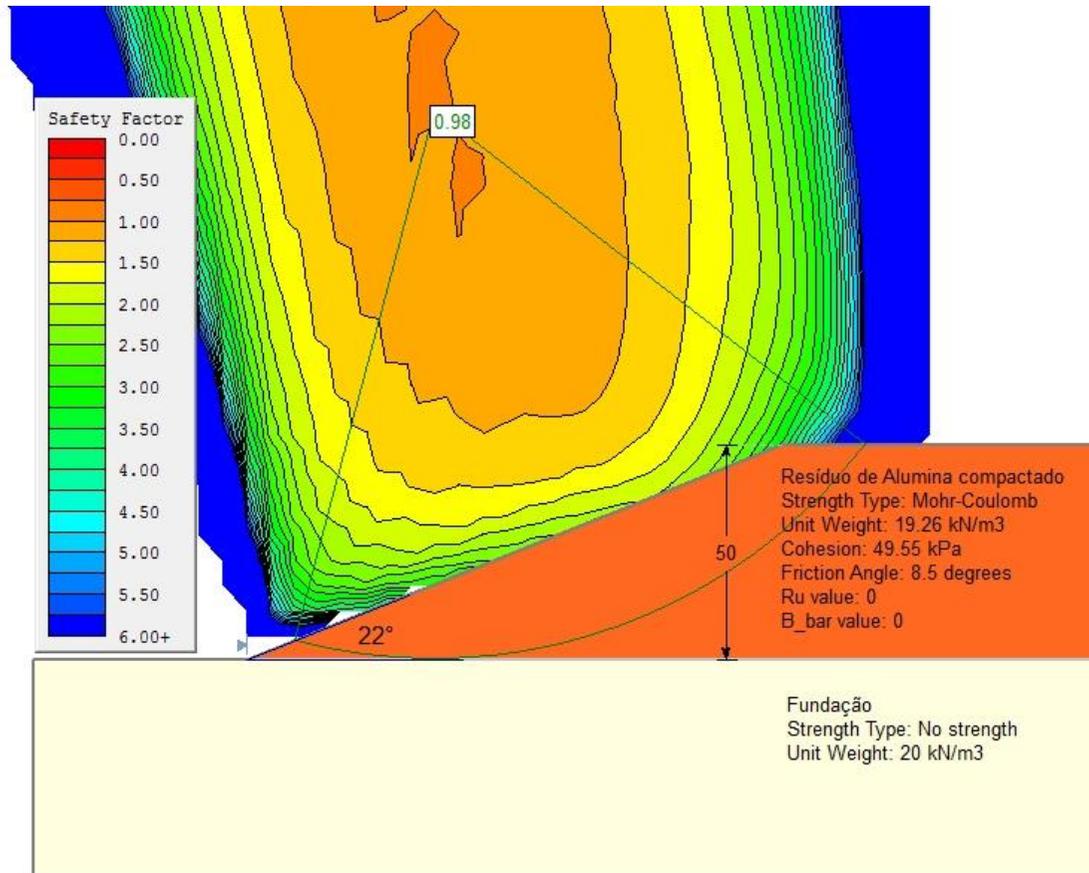
Pilha de resíduo compactado com **GC = 95%** e **w<sub>ót</sub> +5%**, com **ru = 0,25**, com 50m de altura e inclinação global do talude de 11°.



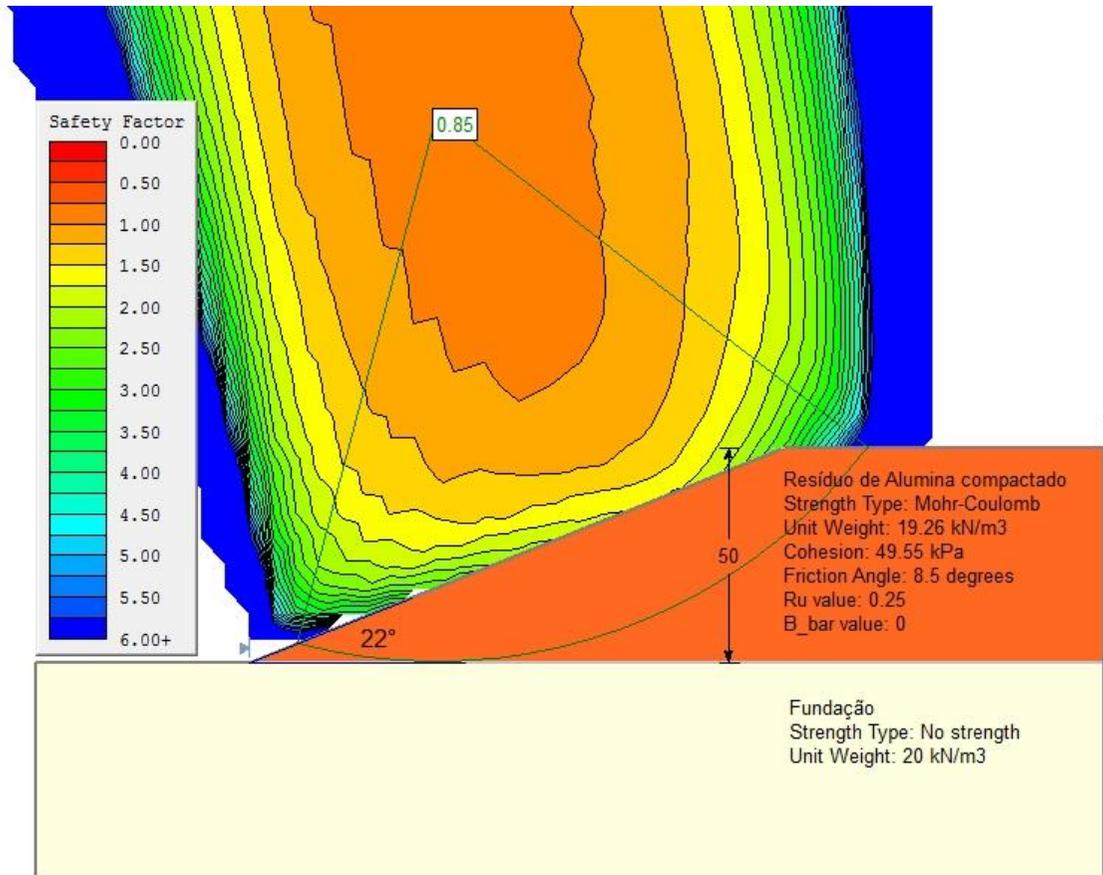
Pilha de resíduo compactado com **GC = 100%** e **w<sub>ót</sub> -5%**, com 50m de altura e inclinação global do talude de 22°.



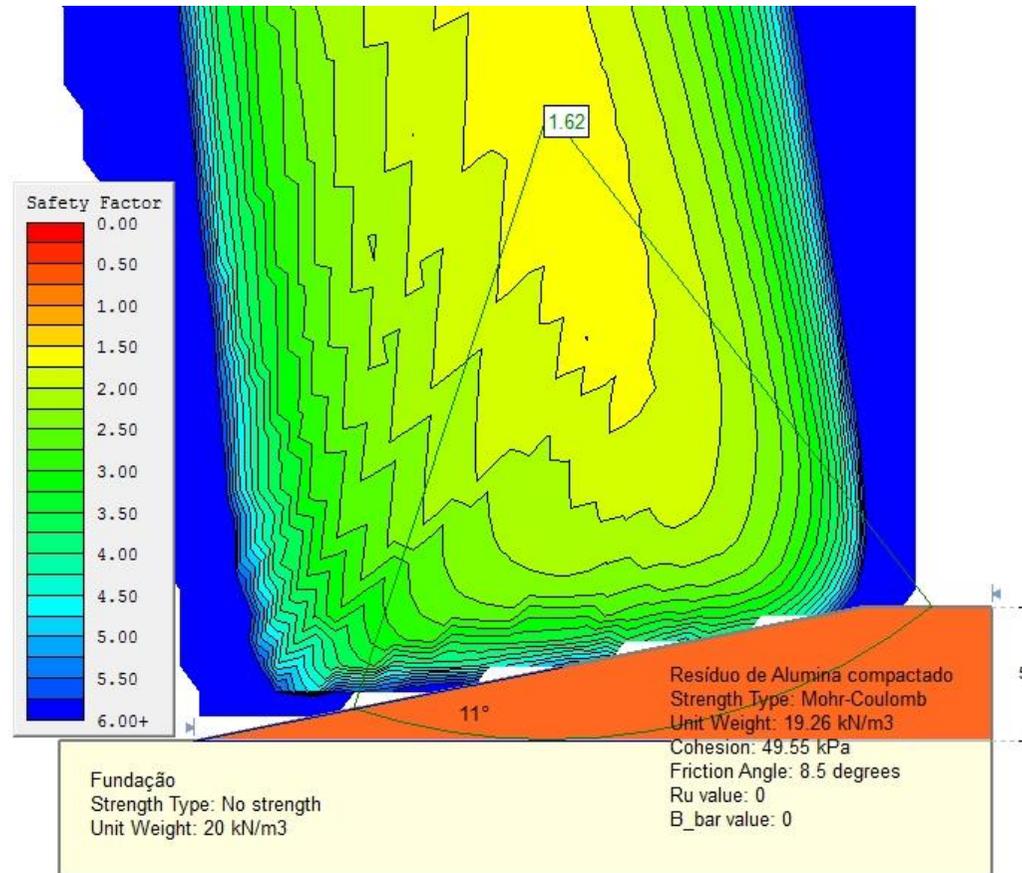
Pilha de resíduo compactado com **GC = 100%** e **w<sub>ót</sub>**, com **ru = 0,25**, com 50m de altura e inclinação global do talude de 22°.



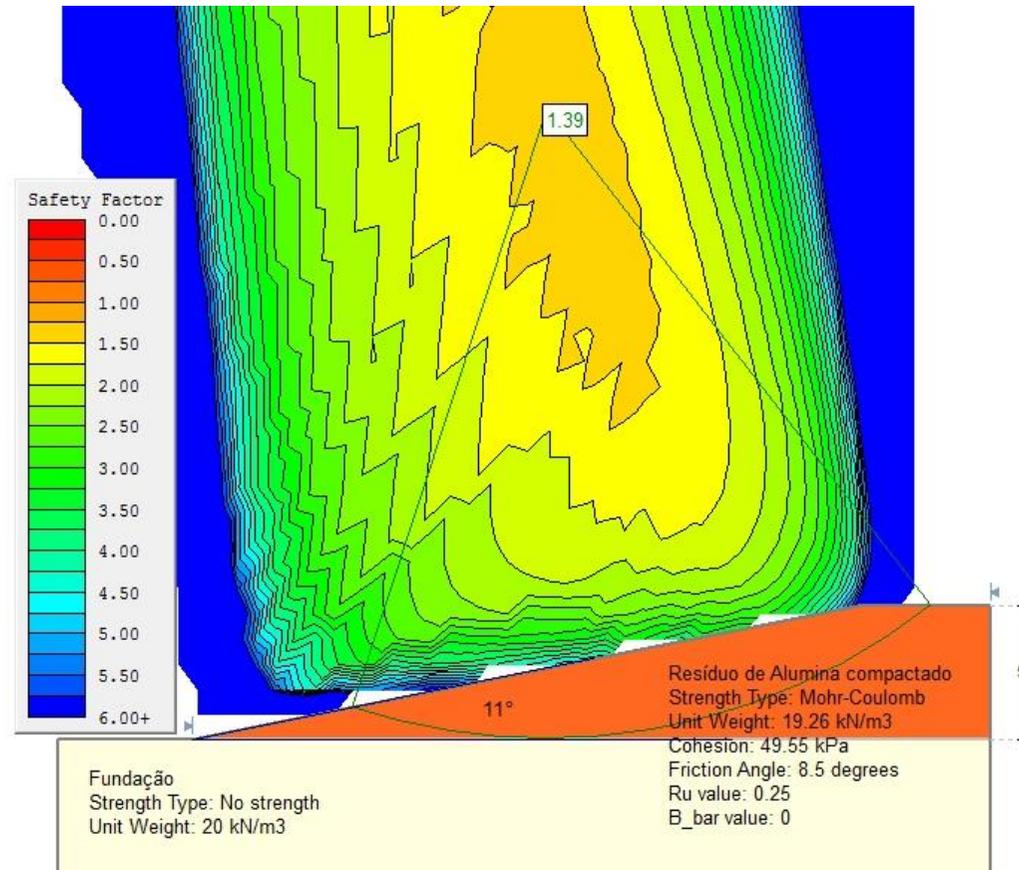
Pilha de resíduo compactado com **GC = 100%** e **w<sub>ót</sub> +5%**, com 50m de altura e inclinação global do talude de 22°.



Pilha de resíduo compactado com **GC = 100%** e **w<sub>ót</sub> +5%**, com **ru = 0,25**, com 50m de altura e inclinação global do talude de 22°.



Pilha de resíduo compactado com **GC = 100%** e **w<sub>ót</sub> +5%**, com 50m de altura e inclinação global do talude de 11°.



Pilha de resíduo compactado com **GC = 100%** e **w<sub>ót</sub> +5%**, com **ru = 0,25**, com 50m de altura e inclinação global do talude de 11°.