

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE DO PROCESSO DE RECONSTITUIÇÃO DE
AMOSTRAS PARA CARACTERIZAÇÃO DO
COMPORTAMENTO DE BARRAGENS DE REJEITOS DE
MINÉRIO DE FERRO EM ATERRO HIDRÁULICO**

JOICE GONÇALVES MILONAS

**ORIENTADOR: LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, DSc
CO-ORIENTADOR: ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

BRASÍLIA - DF, SETEMBRO DE 2006

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE DO PROCESSO DE RECONSTITUIÇÃO DE AMOSTRAS PARA
CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE BARRAGENS DE REJEITOS
DE MINÉRIO DE FERRO EM ATERRO HIDRÁULICO**

JOICE GONÇALVES MILONAS

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

APROVADA POR:

**PROF. LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, DSc (UnB)
(ORIENTADOR)**

**PROF. ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD (UnB)
(CO-ORIENTADOR)**

**PROF. ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**PROF. SERGIO TIBANA, DSc (UENF)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

BRASÍLIA/DF, 29 DE SETEMBRO DE 2006.

FICHA CATALOGRÁFICA

MILONAS, JOICE GONÇALVES

Análise do Processo de Reconstituição de Amostras para Caracterização do Comportamento de Barragens de Rejeitos de Minério de Ferro em Aterro Hidráulico xxii, 146 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2006).

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Rejeito

2. Aterro Hidráulico

3. Amostras Indeformadas

4. Parâmetro de Resistência

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MILONAS, J.G. (2006). Análise do Processo de Reconstituição de Amostras para Caracterização do Comportamento de Barragens de Rejeitos de Minério de Ferro em Aterro Hidráulico. Dissertação de Mestrado. Publicação G.DM-148/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 146 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Joice Gonçalves Milonas

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Análise do Processo de Reconstituição de Amostras para Caracterização do Comportamento de Barragens de Rejeitos de Minério de Ferro em Aterro Hidráulico.

GRAU /ANO: Mestre / 2006

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Joice Gonçalves Milonas
Rua Darcy Máximo Pimenta, No. 106
Vale do Jatobá – 30666-180
Belo Horizonte/MG – Brasil
joice.milonas@yahoo.com.br

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais, Ailmar e Ilma Milonas,
que com grande sabedoria, esforço e dedicação
apoiaram toda minha caminhada até o alcance desta meta.*

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus pais, Aimar e Ilma, pelo exemplo, amor e dedicação em todos os momentos da minha vida. Aos meus irmãos Andréia e Ailmar pelo carinho brindado durante a minha ausência. Sem vocês eu não teria chegado tão longe. Ainda ao meu pai pela confecção dos amostradores, essenciais no desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Rodrigo, apoio e presença constante durante o desenvolvimento desta dissertação. Um agradecimento especial a todo este carinho e compreensão que me incentivou e me tornou muito mais feliz. Obrigado ainda, por todo o tempo dedicado às ilustrações deste trabalho.

Ao Prof. Luís Fernando Martins Ribeiro pela orientação da dissertação e importantes discussões durante todo o trabalho, em particular pelo apoio durante a realização dos ensaios e acima de tudo pela valiosa amizade e confiança.

Ao Prof. André Assis pela atenção e apoio, e pelos valiosos ensinamentos ao longo desta pesquisa.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Geotecnia da UnB pelos ensinamentos transmitidos, pelas contribuições na minha pesquisa e o apoio nos momentos necessários.

Aos professores do Departamento de Geotecnia da Universidade Federal de Minas Gerais por terem despertado em mim o interesse pela área e pela pesquisa.

A todos os amigos que me incentivaram a ingressar no curso de pós-graduação, me animaram, me fortaleceram, em especial Ângelo Zenôbio e Daniela Moreira que lançaram as primeiras sementes, e também ao Paulo Lemos e Wagner Castro pelas constantes conversas e pela atenção dedicada. A Nery por todo carinho e amizade.

As amigos conquistados no curso de mestrado em especial Priscila, Wallace, Marianna, Isabella, James, Sandra e Jenny, foi um privilégio ser da turma de vocês, obrigado por todos os momentos e por toda a amizade e companheirismo. Brasília na companhia de vocês se tornou mais divertida e amiga.

Aos amigos e familiares de BH, que torceram por mim durante todo o tempo em que estive ausente, pelas mensagens de apoio e pelos fins de semana de descanso e descontração.

Ao Eleonardo, fundamental para os meus primeiros ensaios triaxiais e ao Hector por toda a disponibilidade, principalmente no ESDH, e por fornecer referências bibliográficas importantes para a pesquisa.

Aos técnicos do laboratório de Geotecnia da UnB, em especial Vanilson por ter me auxiliado nos ensaios de simulação de deposição Hidráulica, ao Ricardo, Oswaldo e Thiago, pelo apoio em tantos ensaios, contribuindo para o bom rendimento da pesquisa.

Ao Sr. José Gonçalves, do CME (Centro de Manutenção de Equipamentos da UnB), que me ajudou na manutenção do equipamento, pela eficiência, pelo exemplo de apego à profissão, pela amizade e consideração.

À Universidade de Brasília, ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e ao CNPq, pelo suporte financeiro.

À todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para execução e finalização deste trabalho.

ANÁLISE DO PROCESSO DE RECONSTITUIÇÃO DE AMOSTRAS PARA CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE BARRAGENS DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO EM ATERRO HIDRÁULICO

RESUMO

As barragens de rejeito construídas com a técnica de aterro hidráulico apresentam uma grande variabilidade nas características geotécnicas ao longo da praia. O mapeamento das características geomecânicas em função dessas variações deposicionais é de grande importância para a compreensão do comportamento das estruturas de contenção de rejeito e garantir sua estabilidade. A literatura revela a grande utilização de amostras reconstituídas para quantificar os parâmetros de resistência destas estruturas. Visando analisar o processo de reconstituição de amostras para a caracterização do comportamento das barragens de rejeito foi realizada uma campanha de ensaios triaxiais em amostras reconstituídas com características semelhantes às condições de deposição em campo (densidade, umidade, granulometria, etc.), e em amostras indeformadas. As amostras indeformadas de rejeitos granulares de minério de ferro foram obtidas utilizando depósitos formados a partir de ensaios de simulação de deposição hidráulica em laboratório e metodologia de obtenção de amostra específica. Neste trabalho foram apresentados os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica e ensaios triaxiais drenados, que possibilitaram avaliar o efeito da segregação, da densidade e da não uniformidade granulométrica que ocorrem em uma condição semelhante ao processo de deposição em campo. Em geral, as amostras indeformadas apresentaram os melhores resultados para os parâmetros de resistência em relação às amostras reconstituídas, da ordem de 10%, evidenciando a influência do processo de deposição no comportamento geomecânico deste rejeito de minério de ferro. Ressalta-se, contudo que este trabalho buscou fornecer uma idéia inicial a respeito do comportamento dos aterros hidráulicos e sua representatividade por meio de amostras reconstituídas. Finalmente, verificou-se que a metodologia empregada na obtenção das amostras indeformadas associada ao processo de deposição hidráulica mostrou ser um importante avanço na avaliação do comportamento geotécnico das barragens de rejeitos.

**ANALYSIS OF THE SAMPLE RECONSTITUTION PROCESS FOR THE
BEHAVIOR CHARACTERIZATION OF IRON TAILINGS DAMS BUILT BY
HYDRAULIC FILL TECHNIQUE**

ABSTRACT

Tailing dams built with hydraulic fill techniques present a great variability in the geotechnical characteristics along the shore. The mapping of the geomechanical characteristics in function of these disposal variations has a great relevance for the comprehension of the tailings dam behavior and to ensure its stability. The literature reveals a wide used of reconstituted sample to evaluate the strength of these structures. In order to analyze the process of sample reconstitution for the evaluation of the tailing dams behavior, a programme of triaxial tests was carried out in reconstituted samples, representing some field conditions (density, water content and grain size distribution), and in undisturbed samples. The undisturbed samples of the iron ore granular tailings, were obtained using deposits that were formed from large-scale laboratory test (hydraulic deposition simulation test) and a specific sampling methodology. In this work the results of the geotechnical characterization and drained triaxial tests were presented, allowing to understand the evolution of the segregation, density effects and grain size distribution, which occur in the same conditions of the field deposition process. In general, the undisturbed samples yielded best results for the strength parameters in comparison with the reconstituted ones, in the order of 10%, due to the influence of the deposition process in the iron ore tailing geomechanical behavior. It should be emphasized that, this work attempted contributed to the initial idea of analyzing the hydraulic fill behavior based on reconstituted samples. Finally, it can be concluded that the method used for obtaining undisturbed samples from hydraulic deposition simulation tests proved to be an important tool in the evolution of the understanding the tailings dam geotechnical behavior.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	4
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	5
2	CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE SISTEMAS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS	6
2.1	REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO	6
2.2	DISPOSIÇÃO DE REJEITOS	7
2.2.1	PROJETO E CONTROLE CONSTRUTIVO DO SISTEMA DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS	10
2.3	ATERROS HIDRÁULICOS	12
2.3.1	MECANISMOS FÍSICOS DO PROCESSO DE DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA	15
2.3.2	CARACTERÍSTICAS DOS ATERROS HIDRÁULICOS	17
2.3.3	ENSAIOS DE SIMULAÇÃO DE DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA	19
2.4	CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DOS ATERROS HIDRÁULICOS DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO	21
2.5	RECONSTITUIÇÃO DE AMOSTRAS EM SOLOS GRANULARES	31
2.5.1	PLUVIAÇÃO NO AR	31
2.5.2	PLUVIAÇÃO NA ÁGUA	33
2.5.3	COMPACTAÇÃO	34
2.6	CONGELAMENTO DE SOLOS GRANULARES PARA OBTENÇÃO DE AMOSTRAS INDEFORMADAS	34
2.7	CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O COMPORTAMENTO DRENADO DOS MEIOS GRANULARES	36
3	CARACTERÍSTICAS DO REJEITO DA MINA DO COMPLEXO DE ÁGUA LIMPA E METODOLOGIA DE OBTENÇÃO DE AMOSTRAS	39
3.1	CARACTERÍSTICA DO REJEITO DA MINA DO COMPLEXO DE ÁGUA LIMPA	39
3.2	EQUIPAMENTO DE SIMULAÇÃO DE DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA (ESDH)	44
3.3	METODOLOGIA PARA A REALIZAÇÃO DE ENSAIO NO ESDH E OBTENÇÃO DE AMOSTRAS	47
3.3.1	ENSAIO DE SIMULAÇÃO DE DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA	47
3.3.2	OBTENÇÃO DE AMOSTRAS INDEFORMADAS	51
3.3.3	AMOSTRAS DEFORMADAS E PROCESSO DE RECONSTITUIÇÃO	56
4	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO	60
4.1	TEOR DE UMIDADE, MASSA ESPECÍFICA NATURAL E MASSA ESPECÍFICA APARENTE SECA	60
4.2	MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS E TEOR DE FERRO DO MATERIAL	62

4.3	DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA	64
4.4	DETERMINAÇÃO DOS PARAMETROS DE RESISTÊNCIA.....	67
4.4.1	PROCESSO DE SATURAÇÃO DAS AMOSTRAS	67
4.4.2	ADENSAMENTO	68
4.4.3	CISALHAMENTO DOS CORPOS DE PROVA	68
4.4.4	RESULTADOS DOS ENSAIOS TRIAXIAIS DRENADOS	70
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	75
5.1	CARACTERÍSTICAS DO FLUXO.....	75
5.2	ANÁLISE DA VARIABILIDADE DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS EM FUNÇÃO DO PROCESSO DE DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA.....	76
5.3	PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA	85
5.3.1	RELAÇÃO ENTRE O ÂNGULO DE ATRITO DE PICO E O ÂNGULO DE ATRITO A VOLUME CONSTANTE DAS AMOSTRAS INDEFORMADAS	93
6	CONCLUSÕES.....	96
6.1	INTRODUÇÃO	96
6.2	PRINCIPAIS CONCLUSÕES	97
6.3	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	100
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
	APÊNDICE A	108
	APÊNDICE B	113
	APÊNDICE C	117
	APÊNDICE D	134

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Métodos construtivos de barragens de rejeitos.....	10
Figura 2.2 - Grupos de materiais de empréstimo segundo a SNIP-II-53-73 (Moretti & Cruz, 1996).....	13
Figura 2.3 - Seções típicas de barragens propostas pela norma soviética. (modificado - Morgenstern & Küpper, 1998).....	14
Figura 2.4 - Gráfico de Hjulström mostrando a variação da velocidade crítica em função do tamanho das partículas (Ribeiro, 2000).....	16
Figura 2.5 - Gráfico esquemático da velocidade de sedimentação em relação ao diâmetro do sedimento (modificado – Selley, 1988).....	16
Figura 2.6 - Esquema geométrico da praia de aterro hidráulico (Ribeiro, 2000).....	18
Figura 2.7 - Imagens dos rejeitos obtidas do MEV em uma aproximação de 100 vezes: (a) Barragem do Doutor; (b) Cava do Germano (Pereira, 2005).....	20
Figura 2.8 - Variação do diâmetro D_{50} das partículas com a distância ao ponto de descarga - concentração aproximada de 14% e vazão variável (Ribeiro 2000)	22
Figura 2.9 - Variação da densidade relativa (Gs) para concentração aproximada de 14% e vazão variável (Ribeiro 2000)	22
Figura 2.10 - Variação da inclinação global do depósito com a concentração (Ribeiro, 2000).	23
Figura 2.11 - Variação da inclinação global do depósito com a vazão (Ribeiro, 2000).	23
Figura 2.12 - Variação do ρ_d para a concentração aproximada de 14% e vazão variável (Ribeiro 2000)	24
Figura 2.13 - Tendência de correlação entre teor de ferro e a condutividade hidráulica realizada através de ensaios com a bomba de fluxo para amostras do ESDH e ensaios de infiltração realizados em campo (modificado – Santos, 2004)	25
Figura 2.14 - Relação entre a massa específica dos grãos e o teor de ferro nos materiais de rejeito de minério de ferro (dados - Espósito, 2000 e Lopes, 2000).	26
Figura 2.15 - Relação de dependência do ângulo de atrito com a porosidade e a granulometria (modificado – Lopes 2000)	27
Figura 2.16 - Curva característica do Índice de Porosidade Relativa (IPR) x Ângulo de atrito para o rejeito da Pilha do Xingu (Lopes, 2000)	27
Figura 2.17 - Relação entre o ϕ'_{pico} , a porosidade e a %Fe (modificado - Hernandez, 2002) ..	28
Figura 2.18 - Tendência de correlação entre o teor de ferro e o ângulo de atrito (modificado - Presotti, 2002)	29
Figura 2.19 - Layout de um Pluviador de areia tradicional (modificado - Los Prestti et al., 1993).....	32
Figura 2.20 - Esquema do método de pluviação na água (modificado – Ratton, 1993)	33

Figura 2.21 - Amostra de rejeito congelado com índice de vazios inicial de 0,818 e grau de saturação de 100% (Hernandez, 2005).....	35
Figura 2.22 - Mudança dos dados no índice de vazios, em função do grau de saturação, após o processo de congelamento (Hernandez, 2005).....	35
Figura 2.23 - Relações de comportamento para areias densas e fofas: (a) Tensão vs deformação; (b) Índice de vazios vs deformação; (c) Volume vs deformação.....	37
Figura 3.1 - Localização da Mina do Morro Agudo do Complexo de Água Limpa.....	40
Figura 3.2 - Pilha de Rejeito do Monjolo (Ribeiro, 2000).....	41
Figura 3.3 - Vista do talude de jusante da pilha do Monjolo (Santos, 2004).....	41
Figura 3.4 - Curva granulométrica típica do rejeito da Mina de Água Limpa (Ribeiro, 2000).	42
Figura 3.5 - Microscopia ótica realizada no rejeito da Pilha do Monjolo (Espósito, 2000)	43
Figura 3.6 - Grãos de quartzo de variados tamanhos cimentados por óxido de ferro (Espósito, 2000).....	44
Figura 3.7 - Concreção de goethita englobando cristal de quartzo (Espósito, 2000).....	44
Figura 3.8 - Esquema do Equipamento de Simulação de Deposição Hidráulica (RIBEIRO, 2000).....	45
Figura 3.9 - Vista Geral do Equipamento (Ribeiro, 2000).....	47
Figura 3.10 - Detalhe da altura do depósito à distância de 3,0 m do ponto de descarga	50
Figura 3.11 - Esquema dos pontos de obtenção das amostras no Canal do ESDH: (a) Seção longitudinal; (b) Planta.....	51
Figura 3.12 - Molde bipartido para obtenção de amostras indeformadas	52
Figura 3.13 - Processo de obtenção das amostras indeformadas: (a) Preparação do canal; (b) Posicionamento dos cilindros em um dos pontos de amostragem; (c) e (d) Desbaste lateral do corpo de prova.....	53
Figura 3.14 - Extração e nivelamento do corpo de prova: (a) Nivelamento do topo do corpo de prova; (b) Retirada da amostra do ESDH; (c) Nivelamento da base do corpo de prova.	54
Figura 3.15 - Embalagem, identificação e acondicionamento dos corpos de prova: (a) Embalagem; (b) Identificação e acondicionamento.....	55
Figura 3.16 - Amostra indeformada para realização dos ensaios triaxiais: (a) 2,8 m do ponto de descarga; (b) 0,1m do ponto de descarga.	55
Figura 3.17 - Estratificações ocorridas na região a 2,0 m do ponto de descarga, indicando a possível variação do teor de ferro ao longo da seção transversal.....	57
Figura 3.18 - Equipamentos utilizados no processo de reconstituição (a) e detalhe da transferência do rejeito com auxílio da colher (b).....	58
Figura 3.19 - Compactação com auxílio de haste (a) e posterior compactação com soquete (b)	59

Figura 3.20 - Amostra reconstituída para realização de ensaios triaxiais – Amostra 0,1 ^a	59
Figura 4.1 - Teor de ferro versus massa específica dos grãos – Dados Pilha do Monjolo (Espósito, 2000)	63
Figura 4.2 - Distribuição granulométrica das amostras a 2,0 m do ponto de descarga.....	65
Figura 4.3 - Distribuição granulométrica média referente a cada região ao longo do Canal de deposição.....	66
Figura 4.4 - Vista geral do equipamento triaxial com sistema automático de aquisição de dados.....	70
Figura 4.5 - Amostra indeformada 1,0 m do ponto de descarga (a) Curva tensão vs deformação (b) Variação volumétrica vs deformação e (c) Trajetórias de Tensões Totais	71
Figura 4.6 - Amostra reconstituída 1,0 m do ponto de descarga (a) Curva tensão vs deformação (b) Variação volumétrica vs deformação e (c) Trajetórias de Tensões Totais	72
Figura 4.7 - Envoltória de ruptura da amostra indeformada obtida a 1,0 m do ponto de descarga.....	73
Figura 4.8 - Envoltória de ruptura da amostra Reconstituída referente à 1,0 m do ponto de descarga.....	74
Figura 5.1 - Padrão de fluxo na superfície do aterro, com formação de ilhas mais a esquerda e processo erosivo a direita do controlador de fluxo.	76
Figura 5.2 - Estratificações e variações deposicionais ocorridas em alguns pontos do depósito: (a) Região da crista; (b) Região a 1,0 m do ponto de descarga; (c) Região a 2,0 m do ponto de descarga; (d) Região a 2,8 m do ponto de descarga.	77
Figura 5.3 - Variação das características granulométricas com a distância do ponto de descarga.....	79
Figura 5.4 - Variação do percentual de ferro das partículas depositadas com distância do ponto de descarga	80
Figura 5.5 - Relação entre o D ₅₀ do material e seu percentual de ferro	81
Figura 5.6 - Variação da massa específica aparente seca com a distância do ponto de descarga	81
Figura 5.7 - Variação da porosidade com a distância do ponto de descarga.....	82
Figura 5.8 - Variação do coeficiente de não uniformidade com a distância do ponto de descarga.....	83
Figura 5.9 - Variação da porosidade com relação ao teor de ferro das amostras.....	84
Figura 5.10 - Variação da porosidade com relação ao teor de ferro das amostras.....	84
Figura 5.11 - Aspecto após o cisalhamento do corpo de prova obtido a 2,8 m do ponto de descarga e submetido a tensão de confinamento de 100 kPa: (a) amostra indeformada, (b) amostra reconstituída.....	86

Figura 5.12 - Gráfico com os valores de ângulos de atrito em função da porosidade (Russo, 2005).....	87
Figura 5.13 - Variação do ângulo de atrito efetivo com a porosidade para amostras indeformadas e reconstituídas.	87
Figura 5.14 - Variação do ângulo de atrito efetivo com o coeficiente de não uniformidade (C_u) para amostras indeformadas e reconstituídas	88
Figura 5.15 - Variação do ângulo de atrito efetivo com relação ao teor ferro para amostras indeformadas e reconstituídas	89
Figura 5.16 - Relação entre o ângulo de atrito efetivo, a porosidade e o teor de ferro	91
Figura 5.17 - Relação entre o ângulo de atrito efetivo, a porosidade e o teor de ferro	91
Figura 5.18 - Variação do intercepto de coesão efetiva com a porosidade para as Amostras indeformadas e reconstituídas	92
Figura 5.19 - Variação do ângulo de atrito efetivo com a porosidade, parâmetros de pico e a grandes deformações para amostras indeformadas	94
Figura 5.20 - Variação do ângulo de atrito efetivo com o teor de ferro, parâmetros de pico e a grandes deformações para amostras indeformadas.....	95
Figura 5.21 - Variação do intercepto de coesão efetiva com a porosidade, parâmetros de pico e residual para amostras indeformadas	95
Figura B.1 - Distribuição granulométrica das amostras a 2,8m do ponto de descarga.....	114
Figura B.2 - Distribuição granulométrica das Amostras a 2,0m do ponto de descarga.....	114
Figura B.3 - Distribuição granulométrica das Amostras a 1,0m do ponto de descarga.....	115
Figura B.4 - Distribuição granulométrica das Amostras a 0,1m do ponto de descarga.....	115
Figura B.5 - Distribuição granulométrica média ao longo do Canal de deposição	116
Figura B.6 - Distribuição granulométrica geral das amostras coletadas no ESDH.	116
Figura C.1 - Curva tensão desviadora vs deformação axial das amostra indeformada à 2,8 m do ponto de descarga.....	119
Figura C.2 - Curva variação volumétrica vs deformação axial das amostra indeformada à 2,8 m do ponto de descarga.....	119
Figura C.3 - Trajetória de tensões das amostra indeformada à 2,8 m do ponto de descarga. .	120
Figura C.4 - Envoltória de ruptura de pico das Amostra indeformada à 2,8 m do ponto de descarga.....	120
Figura C.5 - Envoltória de Ruptura residual das Amostra indeformada à 2,8 m do ponto de descarga.....	121
Figura C.6 - Curva tensão desviadora vs deformação axial das amostra indeformada à 2,0 m do ponto de descarga.....	123

Figura C.7 - Curva variação volumétrica vs deformação axial das amostra indeformada 2,0 m do ponto de descarga.....	123
Figura C.8 - Trajetória de tensões das amostra indeformada à 2,0 m do ponto de descarga..	124
Figura C.9 - Envoltória de ruptura de pico das amostra indeformada à 2,0 m do ponto de descarga.....	124
Figura C.10 - Envoltória de ruptura residual das amostra indeformada à 2,0 m do ponto de descarga.....	125
Figura C.11 - Curva tensão desviadora vs deformação axial das amostra indeformada à 1,0 m do ponto de descarga.....	127
Figura C.12 - Curva variação volumétrica vs deformação axial das amostra indeformada à 1,0 m do ponto de descarga.....	127
Figura C.13 - Trajetória de tensões das amostra indeformada à 1,0 m do ponto de descarga	128
Figura C.14 - Envoltória de ruptura de pico das amostra indeformada à 1,0 m do ponto de descarga.....	128
Figura C.15 - Envoltória de ruptura residual das amostra indeformada à 1,0 m do ponto de descarga.....	129
Figura C.16 - Curva tensão desviadora vs deformação axial das amostra indeformada à 0,1 m do ponto de descarga.....	131
Figura C.17 – Curva variação volumétrica vs deformação axial das amostra indeformada à 0,1 m do ponto de descarga.....	131
Figura C.18 - Trajetória de tensões das amostra indeformada à 0,1 m do ponto de descarga	132
Figura C.19 - Envoltória de ruptura de pico das amostra indeformada à 0,1 m do ponto de descarga.....	132
Figura C.20 - Envoltória de ruptura residual das amostra indeformada à 0,1 m do ponto de descarga.....	133
Figura D.1 - Curva tensão desviadora vs deformação axial das amostras reconstituídas referente à 2,8 m do ponto de descarga.....	136
Figura D.2 - Curva variação volumétrica vs deformação axial das amostra reconstituídas referentes à 2,8 m do ponto de descarga.....	136
Figura D.3 - Trajetória de tensões das amostras reconstituídas referente à 2,8 m do ponto de descarga.....	137
Figura D.4 - Envoltória de ruptura das amostras reconstituídas referente à 2,8 m do ponto de descarga.....	137
Figura D.5 - Curva tensão desviadora vs deformação axial das amostras reconstituídas referente à 2,0 m do ponto de descarga.....	139
Figura D.6 - Curva variação volumétrica vs deformação axial das amostras reconstituídas referente à 2,0 m do ponto de descarga.....	139
Figura D.7 - Trajetória de tensões das amostras reconstituídas referente à 2,0 m do ponto de descarga.....	140

Figura D.8 - Envoltória de ruptura das amostras reconstituídas referente à 2,0 m do ponto de descarga.....	140
Figura D.9 - Curva tensão desviadora vs deformação axial das amostras reconstituídas referente à 1,0 m do ponto de descarga.....	142
Figura D.10 - Curva variação volumétrica vs deformação axial das amostras reconstituídas referente à 1,0 m do ponto de descarga.....	142
Figura D.11 - Trajetória de tensões das amostras reconstituídas referente à 1,0 m do ponto de descarga.....	143
Figura D.12 - Envoltória de ruptura das amostras reconstituídas referente à 1,0 m do ponto de descarga.....	143
Figura D.13 - Curva tensão desviadora vs deformação axial das amostras reconstituídas referente à 0,1 m do ponto de descarga.....	145
Figura D.14 - Curva variação volumétrica vs deformação axial das amostras reconstituídas referente à 0,1 m do ponto de descarga.....	145
Figura D.15 - Trajetória de tensões das amostras reconstituídas referente à 0,1 m do ponto de descarga.....	146
Figura D.16 - Envoltória de ruptura das amostras reconstituídas referente à 0,1 m do ponto de descarga.....	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Influência do formato dos grãos e da granulometria sobre o ângulo de atrito nos materiais granulares (Lambe e Whitman, 1972)	38
Tabela 3.1 - Características do Rejeito da Mina de Água Limpa	42
Tabela 3.2 - Equivalência entre minerais e cores.....	43
Tabela 3.3 - Teor de umidade higroscópica do rejeito total e quantidade de material por ensaio.....	49
Tabela 4.1 - Características das amostras indeformadas.....	61
Tabela 4.2 - Características de moldagem das amostras reconstituídas.....	62
Tabela 4.3 - Massa específica dos grãos (ρ_s) e teor de ferro (%Fe) das amostras extraídas ao longo do canal do ESDH.....	64
Tabela 4.4 - Parâmetros obtidos das curvas granulométricas	66
Tabela 4.5 - Parâmetros de resistência dos rejeitos de minério de ferro	73
Tabela 5.1 - Valores médios e desvios padrão dos dados granulométricos das amostras equidistantes do ponto de lançamento.....	78
Tabela 5.2 - Valores médios e desvios padrão das características de densidade das amostras equidistantes do ponto de lançamento.....	78
Tabela 5.3 - Valores médios e desvios padrão da porosidade, do teor de ferro e do coeficiente de não uniformidade (C_u) das amostras equidistantes do ponto de lançamento.	78
Tabela 5.4 – Comparação entre o ângulo de atrito estimado com a utilização da Equação 5.1 em função da porosidade e do teor de ferro e os obtidos via ensaios triaxiais drenados em amostras reconstituídas	89
Tabela A.1 – Determinação da massa específica dos Grãos para as amostras a 2,8m do ponto de descarga.....	109
Tabela A.2 - Determinação da massa específica dos Grãos para as amostras a 2,0m do ponto de descarga.....	110
Tabela A.3 - Determinação da massa específica dos Grãos para as amostras a 1,0m do ponto de descarga.....	111
Tabela A.4 - Determinação da massa específica dos Grãos para as amostras a 0,1m do ponto de descarga.....	112
Tabela C.1 - Dados das amostras indeformadas extraídas do ESDH à 2,8m do ponto de lançamento	118
Tabela C.2 - Dados das amostras indeformadas extraídas do ESDH à 2,0m do ponto de lançamento	122
Tabela C.3 - Dados das amostras indeformadas extraídas do ESDH à 1,0m do ponto de lançamento	126

Tabela C.4 - Dados das amostras indeformadas extraídas do ESDH à 0,1m do ponto de lançamento.....	130
Tabela D.1 - Dados das amostras reconstituídas, material referente à 2,8m do ponto de lançamento.....	135
Tabela D.2 - Dados das amostras reconstituídas, material referente à 2,0m do ponto de lançamento.....	138
Tabela D.3 - Dados das amostras reconstituídas, material referente à 1,0 m do ponto de lançamento.....	141
Tabela D.4 - Dados das amostras reconstituídas, material referente à 0,1m do ponto de lançamento.....	144

LISTA DE ABREVIACÕES, NOMEMCLATURAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
Al_2O_3	Óxido de Alumínio;
c	Concentração;
c'	Coessão efetiva;
CD	Consolidado Drenado;
CIU	Consolidado anisotropicamente não drenado
cm	Centímetro;
C_v	Coeficiente de variação;
C_u	Coeficiente de uniformidade;
CVRD	Companhia Vale do Rio Doce;
D	Diâmetro;
D_{10}	Diâmetro efetivo;
D_{50}	Diâmetro médio;
D_{60}	Diâmetro equivalente para o qual passa 60% do material obtido da curva granulométrica;
D_{90}	Diâmetro equivalente para o qual passa 90% do material obtido da curva granulométrica;
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral;
e	Índice de vazios;
e_{min}	Índice de vazios mínimo;
e_{max}	Índice de vazios máximo;
ESDH	Equipamento de Simulação de Deposição Hidráulica;
F	Fator de Formação;
Fe	Ferro;
Fe_2O_3	Óxido de ferro;
g	Grama;
G_s	Densidade relativa das partículas sólidas;
h	Hora;
H	Horizontal;
H_0	Altura inicial do corpo de prova;

I _d	Índice de densidade relativa ;
IPR	Índice de Porosidade Relativa;
k	Coeficiente de permeabilidade;
kg	Quilograma;
km	Quilômetros;
kN	Quilo Newton;
kPa	Quilo Pascal;
l	Litro;
m	Metro;
MEV	Microscópio eletrônico de varredura;
min	Mínimo;
min	Minuto;
mm	Milímetro;
M	Massa úmida;
m ²	Metro quadrado;
m ³	Metro cúbico;
MA	Morro Agudo;
MBR	Minerações Brasileiras Reunidas;
MRN	Mineração Rio Norte;
Ms	Massa seca;
M _s	Massa dos sólidos;
n	Porosidade;
n _{max}	Porosidade máxima;
n _{min}	Porosidade mínima;
N.A.	Nível de água;
NBR	Norma Brasileira;
PVC	Policloreto de Vinila;
p	$(\sigma_1 + \sigma_3)/2$
q	$(\sigma_1 - \sigma_3)/2$
Q	Vazão;
R\$	Unidade monetária - Real;
s	Segundo;
S	Grau de Saturação;

s^2	Desvio Padrão;
SiO_2	Óxido de silício (Sílica);
t	Tempo;
t_{100}	Tempo de ocorrência de 100% do recalque;
t_f	Tempo para atingir a resistência de pico;
u	Poropressão
u_{cp}	Contrapressão;
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto;
UnB	Universidade de Brasília;
v	Velocidade do ensaio de cisalhamento;
V	Vertical;
V_f	Volume final;
V_i	Volume inicial;
w	Umidade;
w	Umidade higroscópica;
W_s	Peso de sedimentos;
W_t	Peso total ($W_s + W_w$);
W_w	Peso da água;
ΔH	Redução da altura do corpo;
ΔV	Diferença de volume;
ε	Deformação;
ε_f	Deformação especificada na resistência de pico;
ϕ	Ângulo de atrito;
ϕ'	Ângulo de atrito efetivo;
ϕ'_{pico}	Ângulo de atrito avaliado na envoltória de resistência de pico;
ϕ'_{res}	Ângulo de atrito avaliado na envoltória de resistência residual;
ϕ_u	Ângulo de atrito entre partículas;
γ_w	Peso específico da água;
ρ	Massa específica in-situ;
ρ_d	Massa específica aparente seca;
ρ_s	Massa específica dos grãos;
σ	Tensão;

σ'	Tensão efetiva;
σ_1	Tensão principal maior;
σ_3	Tensão principal menor;
τ	Tensão cisalhante;
%	Porcentagem;
%Fe	Porcentagem de partículas de ferro;
°	Graus.
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;

1 INTRODUÇÃO

A mineração compreende um conjunto complexo de atividades necessárias para a extração econômica de bens minerais da crosta terrestre. Esta atividade é um dos segmentos da economia que muito contribui para o desenvolvimento de um país gerando riquezas e viabilizando tecnologias que promovem o bem estar e a melhoria da qualidade de vida do homem.

O Brasil produz uma grande quantidade de substâncias minerais. Em termos de participação na produção mundial de matérias-primas de origem mineral em 2004, o país deteve uma posição privilegiada ressaltando a posição do nióbio (91,4%), primeiro lugar, seguidos pelo ferro (20,8%), tantalita (20,1%), e alumínio (13,4%) que ocupam a segunda posição no ranking mundial (DNPM, 2005).

Com relação ao minério de ferro, o Brasil possui 7,2% das reservas mundiais e está em quinto lugar entre os países detentores de maiores quantidades de minério. Em termos de metal contido nas reservas, o país ocupa um lugar de destaque no cenário mundial. Isto ocorre devido aos altos teores de ferro em seus minérios (50 a 60% nos itabiritos e 60 a 69% nas hematitas). Com relação à distribuição das reservas no território brasileiro têm destaque os estados de Minas Gerais, Pará, e Mato Grosso do Sul.

Segundo o DNPM (2005), a produção brasileira de minério de ferro em 2004 atingiu 262 milhões de toneladas, aumentando 11,7% em relação ao ano anterior, com um valor estimado de R\$9,9 bilhões. As exportações de bens primários de ferro (minério e pelotas) e o consumo interno de minério de ferro (concentrado na indústria siderúrgica e nas usinas de pelotização) também apresentaram aumento significativo. Estes dados revelam a grande importância da produção de minério de ferro para a economia do país.

Dentro do contexto da produção de minério, a produção de resíduos é inevitável. Durante a operação de lavra são gerados os estéreis, rocha ou solo sem valor econômico que ocorre dentro do corpo de minério ou externamente ao mesmo. A disposição desses materiais tem

demandado de maneira crescente a aplicação de princípios geotécnicos, tanto pelo grande porte que os sistemas de disposição tem assumido como pelas restrições ambientais. Na fase de concentração, são gerados os rejeitos, partículas sólidas sem valor econômico ou pouco atrativas economicamente. Com o aprimoramento das técnicas de lavra e beneficiamento, motivado pela necessidade de redução dos custos de produção, a mineração vem aproveitando jazidas com teores cada vez menores, resultando no aumento do porte dos empreendimentos e, com isso, gerando mais rejeitos (Abrão & Oliveira, 1998).

Tendo em vista a grande quantidade de rejeitos gerados nas atividades mineradoras cresce a necessidade por melhorar a qualidade e segurança dos sistemas de disposição. No Brasil os rejeitos são mais comumente depositados na superfície, sendo a técnica de aterro hidráulico preferida pelas mineradoras por razões de ordem prática e econômica.

No país existem barragens para contenção de rejeito com alturas de cerca de 100 m e com grandes áreas de acumulação. Porém, foi a partir dos anos 70 que surgiram números mais expressivos de barragens para contenção de rejeitos de mineração que agregavam as técnicas disponíveis na Engenharia Civil para obras similares (Franco & Mascarenhas, 1995). A elaboração de legislações ambientais em todo o mundo, acrescido dos impactos negativos decorrentes da eventual ruptura dessas barragens, implicou a necessidade de grandes investimentos por parte das empresas de mineração para o atendimento das especificações e normas reguladoras (Fahey et al., 2002).

No país a atividade mineradora é dirigida e fiscalizada pelo Departamento Nacional da Produção Mineral, órgão vinculado ao ministério das Minas e Energia através do Código de Mineração. Em 2001 foram implantadas as Normas Reguladoras de Mineração (DNPM, 2001) com a finalidade de complementar a legislação mineira, dotando o Código de Mineração do instrumental técnico, necessário ao ordenamento e disciplinamento da atividade mineradora no país. Essa Norma apresenta em seu conteúdo um capítulo dedicado exclusivamente a deposição de estéril, rejeitos e produtos. Em complementação às Normas Reguladoras da Mineração, existem as normas técnicas para os diversos setores da atividade mineradora, particularmente o meio ambiente (ABNT, 1992, 1993a, 1993b e 1993c). Estas normas passaram por várias reformulações, sendo esperadas ainda para o ano de 2006 versões atualizadas.

Apesar do empenho dos órgãos fiscalizadores, ainda não existe no Brasil uma legislação específica para a segurança de barragens, conforme apresentado por Veesaert et al. (2005). Segundo esses autores, conseguir uma engenharia de projeto, operação e manutenção de barragens totalmente isenta de riscos, com relação à segurança de barragens, é impossível, devido às incertezas associadas com as condições de fundações, propriedade dos materiais e condições externas de carregamento. A segurança do barramento é função, também, do projeto, construção e manutenção ao longo do tempo. Os autores relatam que a maioria das perdas por ruptura de barragem durante o século passado foi provocada por falha humana e negligência, podendo ser acrescentado aqui o empirismo utilizado durante anos para a construção dessas estruturas.

As barragens de rejeito projetadas com a técnica de Aterro Hidráulico apresentam grandes problemas relacionados aos aspectos construtivos e de segurança, pois existem poucas especificações relacionadas a este tipo de estrutura. De uma maneira geral o material é lançado de forma quase aleatória não sendo estabelecido nenhum controle das variáveis que afetam o processo de deposição (Ribeiro, 2000). Neste sentido, a técnica de aterro hidráulico foi utilizada, durante anos, com projetos desenvolvidos por princípios intuitivos e baseados em especificações relacionadas às experiências anteriores, sendo reportado na literatura inúmeros insucessos. Atualmente, muitos estudos têm sido desenvolvidos visando melhorar a qualidade dos projetos e métodos construtivos associados a este tipo de estrutura.

A proteção do meio ambiente é um problema atual e envolve questões relacionadas à engenharia geotécnica, principalmente no que diz respeito a garantir a estabilidade dos taludes para a contenção dos rejeitos e evitar a ocorrência de migração de contaminantes, minimizando os impactos de poluição das águas. Em vista do potencial de contaminação e dos problemas de segurança, os projetos para disposição segura de rejeitos já é uma realidade das mineradoras, que em sua maioria tem buscado o aperfeiçoamento de técnicas e métodos de controle que compatibilizem segurança e economia no lançamento dos seus resíduos.

O controle geotécnico da construção de barragens via aterro hidráulico passa necessariamente pelo conhecimento dos parâmetros de resistência dos materiais de construção, que por sua vez são dependentes de suas características geotécnicas, como composição mineral, distribuição granulométrica, porosidade etc. No caso específico do rejeito de minério, as características desses materiais são condicionadas pelo processo de beneficiamento empregado, pelas

características mineralógicas das jazidas exploradas e pelo processo de deposição desses rejeitos em campo.

Além disso, a maioria dos materiais utilizados em aterros hidráulicos são solos granulares, não-coesivos. Estes solos são tradicionalmente complexos sob o ponto de vista de amostragem e inspeção. Em vista disto, a avaliação dos parâmetros de resistência são realizados em amostras reconstituídas de rejeito por meio de técnicas especiais de moldagem, considerando principalmente a densidade desses depósitos em campo. Sabe-se porém que, o processo de deposição hidráulica pode gerar depósitos com vários padrões de acamamentos e estratificações em virtude do tamanho e densidade das partículas e da velocidade de fluxo. Essas características estruturais típicas das amostras depositadas hidraulicamente são difíceis de serem reproduzidas em laboratório pelas técnicas de moldagem de solos granulares encontradas na literatura.

1.1 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Tendo em vista as possíveis incertezas geradas nos processos de reconstituição de amostras de rejeitos, este trabalho busca validar o processo de reconstituição das amostras, por meio da análise comparativa entre corpos de prova indeformados e reconstituídos. Neste sentido, é proposta uma metodologia para obtenção de amostras indeformadas de rejeitos granulares usando depósitos formados a partir de ensaios de simulação de deposição hidráulica em laboratório e amostras reconstituídas para os mesmos parâmetros. Para análise desta metodologia foram propostos ensaios triaxiais drenados objetivando avaliar os efeitos de segregação, densidade e uniformidade granulométrica gerados durante o processo de reconstituição e efeitos da deposição hidráulica nas amostras indeformadas.

É importante ressaltar que este tipo de análise se mostra importante devido às características particulares da maioria dos rejeitos de minério de ferro.

Embora o principal objetivo desta pesquisa esteja associado à análise dos efeitos da reconstituição de amostras na caracterização dos sistemas de disposição de rejeitos, a campanha experimental objetivou, ainda, avaliar a variabilidade dos parâmetros geotécnicos em função do processo de deposição hidráulica e suas conseqüências no comportamento global dos aterros hidráulicos.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação foi estruturada em capítulos. O presente capítulo apresenta uma introdução englobando algumas considerações sobre a atividade mineral, os produtos gerados pela extração de minérios e a importância da disposição segura dos resíduos. O objetivo desta dissertação também é apresentado neste capítulo, juntamente com a estrutura da dissertação.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica onde são abordados alguns conceitos relacionados com o processo de mineração de ferro, as formas de disposição dos rejeitos, as características gerais dos aterros hidráulicos associadas aos processos de deposição e aos parâmetros hidráulicos. É discutida a importância de realização de ensaios de simulação de deposição hidráulica para a caracterização geotécnica de rejeitos de minério de ferro, as técnicas empregadas para a reconstituição de amostras em solos granulares, e a técnica de congelamento para a obtenção de amostras indeformadas. É apresentada ainda, uma breve discussão a respeito do comportamento drenado dos meios granulares.

No capítulo 3 é feita a descrição das características do rejeito de minério de ferro utilizado na pesquisa, do equipamento para a realização dos ensaios de simulação de deposição hidráulica e da metodologia adotada para realização do mesmo. São descritas também, as metodologias empregadas para a obtenção das amostras indeformadas e para o processo de reconstituição das amostras deformadas.

O Capítulo 4 apresenta os resultados dos ensaios e as metodologias utilizadas para a caracterização do rejeito ao longo do canal de deposição hidráulica e para a determinação dos parâmetros de resistência.

No Capítulo 5 são discutidos e analisados os resultados dos ensaios de caracterização e a influência destas características nos parâmetros de resistência. São apresentadas também as características do fluxo dos rejeitos no canal do ESDH.

O capítulo 6 apresenta as conclusões principais da pesquisa, as recomendações e sugestões relativas aos trabalhos futuros e relacionados ao tema estudado.

As referências bibliográficas da pesquisa estão apresentadas logo após o capítulo 6. Em seguida, figuras adicionais e tabelas para o entendimento dos resultados obtidos estão apresentadas nos apêndices.

2 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE SISTEMAS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS

2.1 REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO

Os rejeitos de mineração são os subprodutos das atividades de extração das riquezas minerais. O minério extraído durante a operação de lavra não apresenta uma concentração adequada para ser comercializado, estando composto por minerais úteis (ferro concentrado) e minerais de ganga, que corresponde a porção mineral sem valor econômico ou com pequeno valor econômico que ocorrem agregados ao mineral-minério.

O beneficiamento é responsável pela redução e regularização da granulometria, remoção dos minerais associados sem valor econômico e aumento da qualidade do produto final. O beneficiamento inicia-se com a fragmentação do mineral por meio de processos físicos de britagem e moagem. Durante estas etapas é utilizado um grande volume de água com a finalidade de resfriar o calor gerado pela energia das quebras dos blocos, sendo o produto desse processo apresentado em forma de lama. A lama, produzida na moagem, é submetida a diversos processos físicos e químicos visando a separação do produto final com características de mercado, dos materiais economicamente pobres (rejeito). Entre esses processos podem ser citados: a separação gravimétrica, a separação magnética, a flotação, a dissolução e a pirólise, entre outros. A determinação do melhor método é função das características das jazidas exploradas e da qualidade final esperada para os minérios extraídos.

Os rejeitos de mineração são os resíduos gerados diretamente na planta de beneficiamento de minérios e resultam como sem valor econômico. Estes materiais podem exibir características mineralógicas, geotécnicas e físico-químicas variáveis, dependendo das características das jazidas e do processo de exploração e beneficiamento ao qual os minérios são submetidos. Como a maioria dos processos de beneficiamento são por via úmida, os rejeitos em geral se apresentam em forma de polpa com uma fração sólida e uma fração aquosa contendo diferentes partículas minerais em suspensão e/ou íons dissolvidos (Sánchez, 1995). Além

disso, nenhum processo de concentração tem uma recuperação de 100%, desta forma, os rejeitos sempre apresentam um determinado percentual de minério útil que pode eventualmente ser recuperado no futuro, quando uma nova tecnologia permita seu aproveitamento ou ainda quando ocorrerem mudanças nas condições de mercado.

Do ponto de vista geotécnico, os rejeitos de minério de ferro são na maioria considerados granulares, apresentando baixa deformabilidade e boas condições de drenagem e resistência. Com relação ao potencial poluidor os rejeitos de minério de ferro são considerados inertes. Para avaliar o potencial de contaminação desses materiais, Pires et al. (2003) realizaram ensaios de lixiviação e solubilização, que podem ser interpretados pela quantidade de material poluidor que pode ser mobilizado para o sistema hídrico. Estes autores constataram que o rejeito de minério de ferro se enquadra na classe III, inerte, segundo a NBR 10004 (ABNT 1987) e os testes realizados mostraram a grande capacidade deste material na retenção de metais pesados e de cromo.

2.2 DISPOSIÇÃO DE REJEITOS

Os rejeitos podem ser descartados da unidade de beneficiamento na forma sólida (pasta ou granel) ou líquida (polpa – sólidos e água). O rejeito em pasta é comumente transportado por meio de caminhões e correias transportadoras, e a polpa por meio de tubulações, bombeada ou por gravidade, sendo este caso mais comum devido ao menor custo envolvido (Abrão, 1987).

A disposição dos rejeitos pode ser feita em superfície, em cavidades subterrâneas ou em ambientes subaquáticos. A disposição subaquática, via de regra, tem sido condenada por razões ambientais devido aos impactos negativos que provoca nos ecossistemas aquáticos. Um exemplo é o caso da mina de bauxita de Trombetas, da empresa Mineração Rio do Norte (MRN), situada no coração da floresta Amazônica, em Oriximiná, estado do Pará, que durante muitos anos dispôs seus rejeitos no lago Batata, causando inúmeros danos ecológicos (Mello et al., 1987). Estes autores acrescentam que, a solução técnica adotada para o problema foi a transferência da planta de lavagem da área do porto para a área de mina, viabilizando assim sua deposição nas próprias áreas já lavradas, minimizando os danos ambientais.

A disposição em cavidades subterrâneas pode ser considerada uma opção econômica e ecologicamente correta, desde que atenda aos requisitos de projeto e segurança necessários. O rejeito pode ser disposto em minas abandonadas ou em operação, existindo métodos de

exploração subterrânea que exigem, inclusive, o preenchimento dos vazios com material competente. Neste sentido, o rejeito por ser utilizado com a finalidade de prover suporte às paredes e ao teto da cavidade, controle da subsidência, fornecimento de uma plataforma de trabalho etc., otimizando a recuperação do minério. Alternativamente, visando melhorar as propriedades mecânicas e dinâmicas dos rejeitos como material de preenchimento, pode ser recomendada a associação com estéreis da mina, cimento, cinzas volantes etc.

A disposição a céu aberto é a mais comum dentre as formas de disposição de rejeitos, podendo ocorrer a formação de pilhas de rejeito, no caso de descarte na forma sólida; deposição em reservatórios contidos por diques (áreas planas ou com pequenas inclinações) ou barragens (vales); ou na própria mina, em cavas e/ou áreas já lavradas. A disposição na mina compatibiliza a disposição dos rejeitos com a recuperação das áreas degradadas. Como exemplo pode ser citado a disposição de rejeitos na cava exaurida de Germano, da Samarco Mineração SA, no município de Mariana em Minas Gerais (Gomes et al., 1999a e 1999b) e também a Mineração Rio do Norte, na mina de bauxita de Trombetas, citada anteriormente (Mello et al., 1987).

Na disposição em superfície o método mais difundido é a disposição em reservatórios formados por barragens de rejeito, que em geral, barram vales com pequenas bacias de drenagem, minimizando o aporte de sedimentos naturais. Os rejeitos de granulometria fina (argilas) são comumente dispostos em barragens convencionais, no qual ocorre a deposição subaquática dos grãos. Essas barragens se assemelham às barragens para contenção de água, podendo ser construídas com solo argiloso ou em enrocamento com núcleo argiloso, provenientes de áreas de empréstimo e eventualmente com o estéril da mina. Os custos de construção são altos no início da obra, visto que ocorrem em uma única etapa.

Ainda em relação aos rejeitos argilosos, as experiências pioneiras da Alcan na Jamaica introduziram novos métodos de deposição que se baseiam na secagem por evaporação, após o pré-adensamento da lama em estruturas tipo silo, conforme exposto por Ávila et al. (1995). Segundo estes autores, o lançamento do rejeito com secagem permite obter maiores densidades, rápida recuperação ambiental, podem ser feito com diques simples para a contenção e não oferecem risco de fluir para jusante, causando danos ambientais. Resultados promissores têm sido obtidos na Mineração Rio do Norte (MRN), na mina de Trombetas, desenvolvendo experiências semelhantes de secagem de lama de rejeitos argilosos (Ávila et al., 1995).

Os rejeitos granulares (areias) favorecem a construção de barragens por aterro hidráulico, podendo ser utilizados com matéria prima para a construção dos alteamentos. A técnica de aterro hidráulico viabiliza a construção de alteamentos sucessivos, de acordo com as necessidades das mineradoras, possibilitando a distribuição dos investimentos ao longo da vida útil da barragem.

A predominância de frações de areias finas a médias (partículas > 0,074 mm), sem características de plasticidade, garante uma elevada permeabilidade e resistência ao cisalhamento e também a baixa compressibilidade nestes materiais. Porém, o uso do rejeito granular como principal material de construção requer a utilização de princípios geotécnicos nas fases de projeto e construção, visto que o comportamento dos aterros hidráulicos é dependente das propriedades mecânicas dos rejeitos, e também das características de deposição.

Quanto aos métodos construtivos de barragens com alteamentos sucessivos, três tipos clássicos podem ser citados: método de montante, método de jusante e método da linha de centro (Figura 2.1). Os três métodos iniciam-se com a construção de um dique inicial em material compactado. A diferença entre eles é função do sentido do alteamento em relação ao dique de partida. Dentre esses, o método de montante é muito empregado pelas mineradoras, sendo considerado o mais econômico e de maior facilidade executiva. Contudo, este método apresenta como desvantagem a dificuldade de implantação de drenagem interna, podendo causar problemas de estabilidade e *piping*, se houver surgência de água no talude. Além disso, os rejeitos lançados hidraulicamente favorecem a segregação hidráulica e a formação de estruturas fofas potencialmente sujeitas à liquefação. Neste sentido, o método de linha de centro tem sido também alternativamente utilizado e visa prover um maior controle geotécnico a estas estruturas.

Os processos de lançamento por via hidráulica mais comumente utilizados são os sistemas com um ou mais canhões e os hidrociclones. Quando os rejeitos não possuem resistência e permeabilidade adequadas conforme são produzidos, podem ser tratados para adquirir tais características. Neste sentido, o processo de ciclonagem de rejeitos tem sido uma prática comum onde se objetiva aumentar a porcentagem da fração grossa, eliminando parte da fração fina. Do material ciclonado, a porção mais grossa (“*underflow*”) é utilizada como material de construção para os alteamentos e a porção fina (“*overflow*”) é depositada nos reservatórios. No entanto, vale ressaltar que a eficiência dos hidrociclones pode ser comprometida se o

rejeito for composto por partículas com diferentes valores de densidade dos grãos. Neste caso, o peso das partículas interfere na separação dos grãos, podendo ocorrer “*underflow*” com partículas menores, porém, de maiores densidades (Ribeiro, 2000 e Cavalcante, 2000). Este tipo de situação pode ocorrer com frequência na ciclonagem dos rejeitos de minério de ferro.

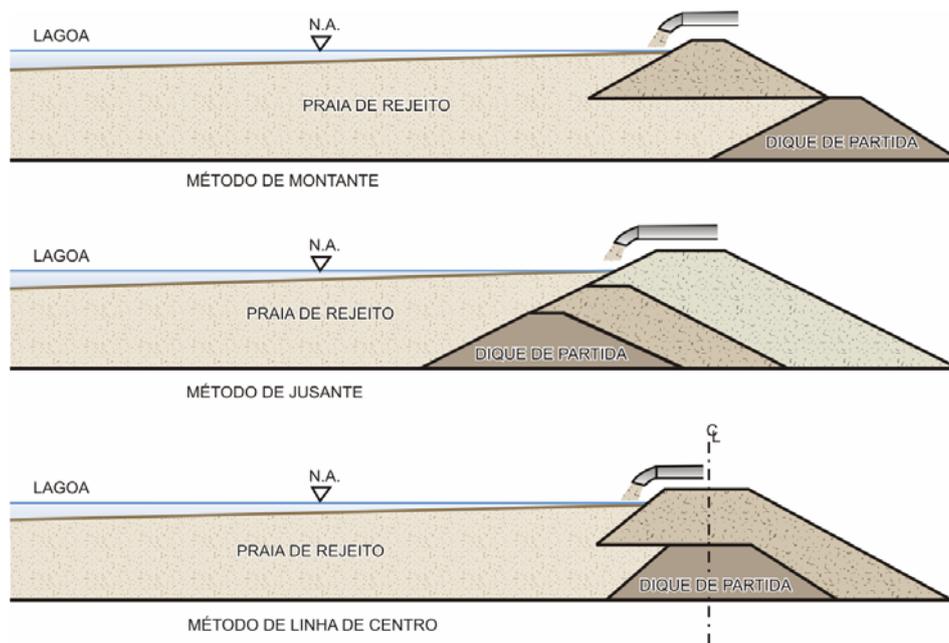


Figura 2.1 - Métodos construtivos de barragens de rejeitos.

2.2.1 PROJETO E CONTROLE CONSTRUTIVO DO SISTEMA DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS

Para a implantação de projetos e exploração mineral, deve-se dedicar cuidado especial e constante à conservação e recuperação do ecossistema regional, devendo ser destinados parte dos investimentos em programas de pesquisa, recuperação e conservação do meio ambiente e em ações de apoio ao desenvolvimento socioeconômico. Dentro do contexto de preservação ambiental, a fim de conter o rejeito de processamento de minério de ferro, deve-se dispor de um sistema adequado de disposição de resíduos.

A identificação das áreas potencialmente exploráveis, tanto do ponto de vista mineiro como do ponto de vista ambiental, já é uma realidade com as técnicas de Ordenamento Territorial Mineiro, onde a utilização de cartas interpretativas de zoneamento geotécnico permite, entre outros, indicar as áreas mais favoráveis para a disposição segura dos rejeitos. Liporaci &

Zuquette (1995) mostram a utilização e funcionalidade de uma carta interpretativa de zoneamento geral, elaborada para município de Poços de Caldas, MG, região rica em recursos hidrotermais. A carta elaborada a partir dos documentos básicos de mapeamento geotécnico da região indica áreas cujo conjunto de condições apresentadas pelo meio físico, são mais propícias para a disposição de resíduos e rejeitos, minimizando os perigos de poluição e contaminação dos recursos naturais da região.

O tipo de barramento deve ser definido e implantado tendo em vista a maximização do potencial topográfico, geológico e geotécnico existente na região favorável para a disposição dos resíduos, devendo ser considerado também a finalidade a que se destinam, de forma a garantir a segurança das estruturas e minimizar os impactos ambientais. Cavalcante et al. (1998) e Giovannini & Amaral (1999) apresentam algumas soluções geotécnicas para a contenção de efluentes sólidos para minerações de ferro. Vale ressaltar a importância dos estudos hidrogeológicos, responsável pelo dimensionamento do aporte natural dos sedimentos que deverá ser contido juntamente com os resíduos da mineração.

O método de descarga também apresenta um papel importante, visto que a qualidade de um aterro alteado hidraulicamente depende, em grande parte, das suas características de deposição. Estes métodos devem ser determinados em projeto em função do tipo de seção prevista para a barragem e dos parâmetros geotécnicos estimados.

Além de todos estes fatores, é imperioso o acompanhamento e controle das estruturas na fase de projeto e operação. Como forma de controle podem ser citados: acompanhamento piezométrico e de marcos superficiais, inspeções ambientais, geotécnicas e hidráulicas, manutenções constantes, levantamentos batimétricos, entre outros.

Mais recentemente, tem sido estudada a evolução do preenchimento das barragens ao longo dos anos, via recursos de geoprocessamento. Por meio dos parâmetros técnicos do material depositado, dados de produção, localização dos pontos de descarga e batimetria da barragem, pode-se visualizar a situação da barragem ao longo do tempo. Esta tecnologia permite otimizar a deposição de rejeitos e aumentar a vida média das barragens evitando obras de engenharia muitas vezes precipitadas e onerosas, além de evitar a intervenção desnecessária no meio ambiente (Oliveira et al., 2005). Um trabalho semelhante foi desenvolvido para a CVRD, onde a crescente produção de minério de ferro apresentado pelas minas da CVRD,

Carajás, PA, fomentou a necessidade de efetuar um controle rigoroso do preenchimento das barragens de rejeito (Oliveira et al., 2005).

2.3 ATERROS HIDRÁULICOS

As barragens construídas pela técnica de hidromecanização (aterros hidráulicos) são obras de terra cujo processo está associado à exploração, transporte e distribuição de material por via úmida. Segundo Moretti & Cruz (1996) há registros do emprego de hidromecanização desde os antigos egípcios. Em épocas mais recentes pode-se citar barragens na Califórnia no século XIX, associada à mineração, sendo esta técnica estendida a outros campos de aplicação. Inúmeras barragens foram construídas nos Estados Unidos entre meados do século XIX e a década de 1930. Estas obras foram construídas com os mais diversos materiais sendo o projeto e a construção desenvolvidos por princípios intuitivos e especificações relacionadas às experiências anteriores, ocorrendo inúmeros insucessos. Porém, a ruptura da Barragem de Fort Peck, no fim da década de 30, paralelamente ao desenvolvimento da indústria pesada de equipamentos de transporte e compactação, levou os americanos a preferirem o aterro compactado como solução para construção de barragens. Este fato contribuiu para o abandono da técnica de hidromecanização na prática ocidental.

No Brasil, a técnica de hidromecanização representou um recurso utilizado para a construção das barragens na primeira metade do século XX, seguindo basicamente o modelo norte americano. Estas estruturas apresentavam altura máxima de 30 m e foram formadas, de modo geral, a partir de um núcleo de argila siltosa e espaldares de areia lançados hidraulicamente (Moretti & Cruz, 1996)

O grande desenvolvimento da tecnologia de construção de aterros hidráulicos ocorreu a partir de 1936 nos países da ex-União Soviética, se tornando o país mais experiente e evoluído nesta técnica de construção de barragens. Entre 1947 e 1973 foram construídas cerca de 100 barragens na Rússia e demais repúblicas da antiga União Soviética, correspondendo a nada menos que 800 milhões de metros cúbicos de aterro hidráulico. A grande maioria destas barragens foram construídas com areia e apresentaram bom desempenho, sendo algumas rupturas, não significativas, verificadas em algumas delas durante a fase de construção (Moretti & Cruz, 1996 e Morgenstern & Küpper, 1998). A experiência soviética gerou suas próprias recomendações para a construção de barragens via hidromecanização, baseado nestas

recomendações a norma soviética considera que a mais importante característica refere-se à distribuição granulométrica do material de empréstimo.

Neste contexto, a norma russa SNIP-II-53-73 divide os solos em cinco classes distintas, cada uma delas associada a um tipo específico de seção (Figura 2.2). Esta norma recomenda que sejam preferencialmente utilizados os solos dos grupos I e II. Os solos do grupo I utilizados em aterros homogêneos e os do grupo II em aterros heterogêneos. Os materiais do grupo V somente devem ser utilizados para a execução de espaldares e os do grupo IV como material de núcleo. Com relação aos solos do grupo III, algumas restrições e cuidados devem ser tomados, principalmente com relação a velocidade de lançamento (Moretti & Cruz, 1996 e Ribeiro, 2000).

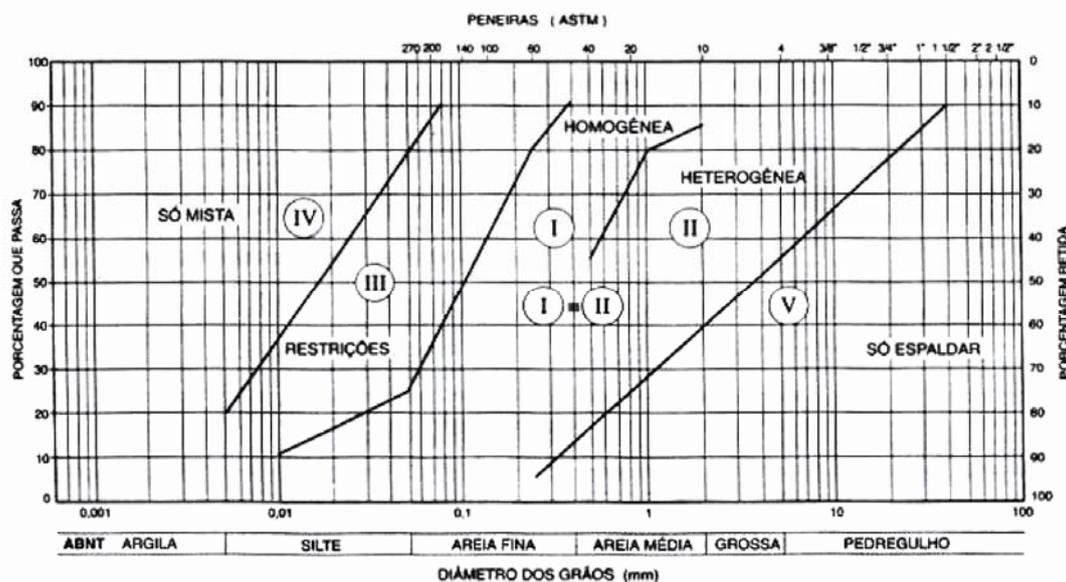


Figura 2.2 - Grupos de materiais de empréstimo segundo a SNIP-II-53-73 (Moretti & Cruz, 1996)

No que se refere aos tipos de seções propostas pelas normas soviéticas, existem três tipos principais: as de seção homogênea construídas com materiais com coeficiente de não uniformidade (C_u) menor que 2; as de seção heterogênea com núcleo central e espaldares em areia, construídas com materiais com C_u maior que 3 e; a de seção mista, com espaldares compactados e o centro preenchido com material lançado hidráulicamente com C_u entre 2 e 3 (Figura 2.3).

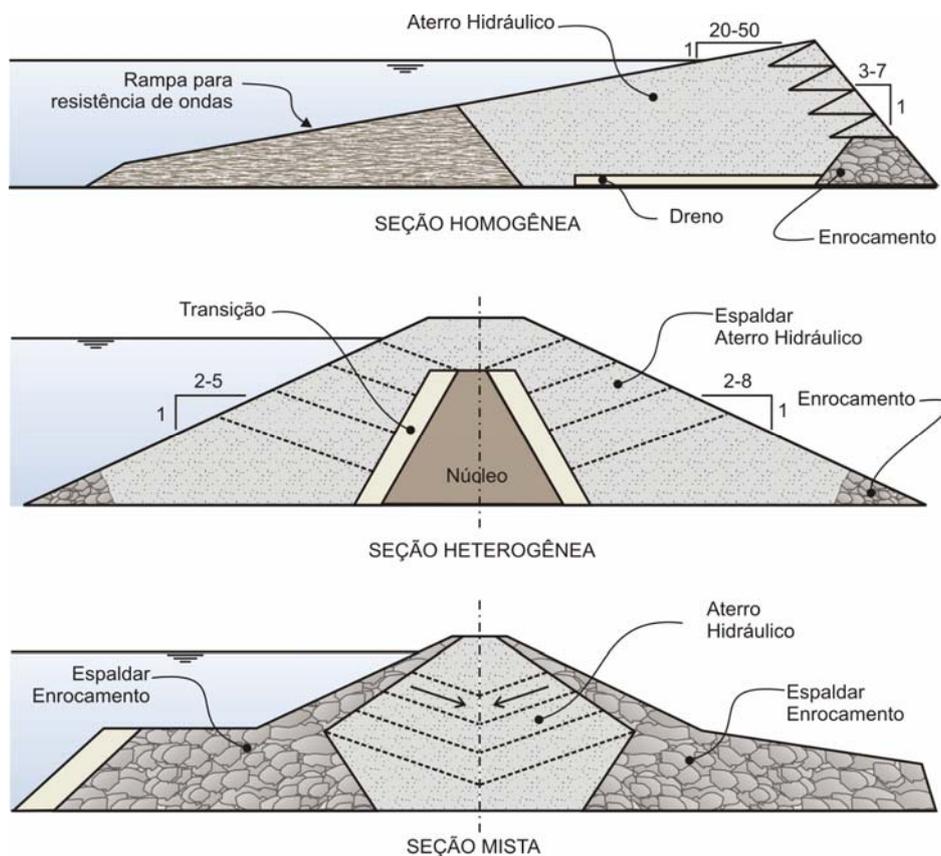


Figura 2.3 - Seções típicas de barragens propostas pela norma soviética. (modificado - Morgenstern & Küpper, 1998).

O potencial de ruptura de barragens devido à liquefação em areias lançadas hidráulicamente é freqüentemente considerado o maior inconveniente para o uso desta técnica construtiva. Isto é particularmente verdadeiro em áreas com atividades sísmicas e existem muitos casos reportados na literatura de liquefação em aterros hidráulicos granulares. Entretanto, existem também casos de rupturas de aterros hidráulicos reportados na literatura atribuídos ao potencial de liquefação mesmo em condições estáticas (Been et al., 1998). A ruptura da barragem de Fort Peck, em 1938, por exemplo, foi atribuída à liquefação do espaldar de montante envolvendo uma massa de 8.000.000 m³, não sendo notificada a ocorrência de nenhum evento sísmico associado (Moretti & Cruz, 1996). Neste contexto, o processo de liquefação pode ocorrer devido a alteamentos muito rápidos, vibração devido a desmonte por fogo próximo as estruturas, entre outros fatores.

Apesar das restrições, a técnica de aterro hidráulico tem sido muito utilizada, principalmente na construção de barragens de rejeito, diques de contenção, recuperação de áreas submersas e

ilhas artificiais. Neste sentido, muitos estudos têm sido realizados atualmente visando melhorar a qualidade dos projetos e métodos construtivos associados aos aterros hidráulicos.

2.3.1 MECANISMOS FÍSICOS DO PROCESSO DE DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA

Os mecanismos dos processos de deposição hidráulica são governados pelas diversas leis da física. O comportamento dos sólidos granulares em movimento com os fluidos tem sido estudado extensivamente, principalmente no campo da hidráulica e mecânica dos fluidos, e também, sob o ponto de vista geológico onde os estudos são baseados na descrição das estruturas sedimentares resultantes da deposição (Ribeiro, 2000).

No processo de deposição hidráulica, os grãos tendem a depositar ou fluir próximo à superfície do aterro sob diferentes regimes de fluxo, estabelecendo uma interação entre o fluxo de sedimentos e o material presente na camada. Estas interações geram alterações na camada superficial em virtude dos processos erosivos e/ou pelo próprio acúmulo de sedimentos. Os sedimentos se movem e criam uma organização estrutural entre si, resultando em diferentes formas de acamamento (Ribeiro et al., 1998 e Ribeiro, 2000).

Para que a movimentação dos grãos se estabeleça é necessária a existência de uma velocidade de fluxo. Esta velocidade é função do comportamento do fluido em escoamento, sendo por sua vez, função das variáveis contidas nas equações de Reynolds (escoamento laminar ou turbulento) e de Froude (escoamento sub ou super-crítico) e do tamanho e peso das partículas. A movimentação dos grãos ocorre quando as tensões cisalhantes ao longo da camada plana de escoamento excedem um valor crítico que corresponde a velocidade crítica que provoca o movimento das partículas. Segundo Ribeiro (2000), numerosos experimentos e estudos teóricos têm sido realizados para determinar a velocidade crítica para vários tamanhos de sedimentos. Estes estudos mostram que a velocidade crítica aumenta como o tamanho da partícula, exceto para o caso de leitos de argilas coesivas, que devido a sua resistência inercial é necessária uma velocidade alta para iniciar o movimento (Figura 2.4).

Selley (1988) mostra que para materiais com características mineralógicas diferentes, o padrão do comportamento de sedimentação ocorre considerando a densidade dos grãos. Desta forma, partículas pequenas, porém mais pesadas se movem com a mesma velocidade que os grãos de quartzo (Figura 2.5). Este tipo de comportamento justifica a presença de minerais finos e pesados em regiões de alta energia de deposição disseminados com partículas maiores e mais leves (Ribeiro, 2000).

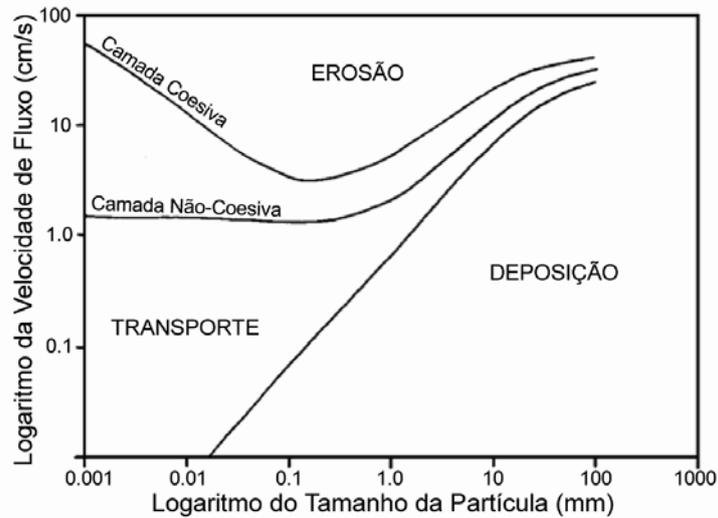


Figura 2.4 - Gráfico de Hjulström mostrando a variação da velocidade crítica em função do tamanho das partículas (Ribeiro, 2000)

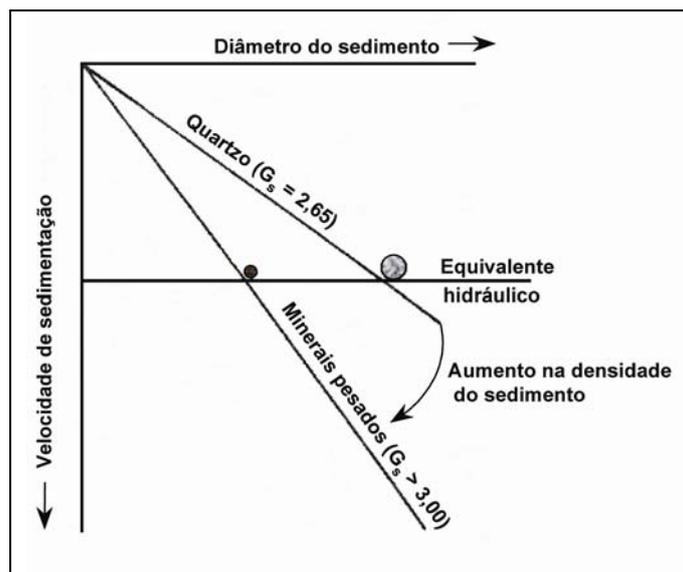


Figura 2.5 - Gráfico esquemático da velocidade de sedimentação em relação ao diâmetro do sedimento (modificado – Selley, 1988)

Após ultrapassar o valor crítico da velocidade, o fluxo provoca um movimento na partícula podendo gerar depósitos com vários padrões de acamamentos e estratificações em virtude do tamanho e densidade das partículas e velocidade de fluxo. Neste contexto, o material granular depositado hidraulicamente desenvolve estruturas sedimentares bastante distintas apresentando, como consequência, diferentes características geotécnicas. Desta forma, vários

estudos têm mostrado a necessidade de uma correta avaliação dos projetos e metodologias construtivas destas estruturas (Kupper, 1991; Ribeiro, 2000).

2.3.2 CARACTERÍSTICAS DOS ATERROS HIDRÁULICOS

A principal característica dos aterros hidráulicos, relacionada ao regime de fluxo, é a segregação das partículas ao longo da trajetória de fluxo, que por sua vez gera significativo efeito na densidade, na geometria da praia e na distribuição granulométricas do depósito. As características dos aterros hidráulicos dependem da composição da mistura (características e densidades dos grãos e viscosidade do fluido) e do método de deposição.

A composição da mistura interfere de forma direta no processo de segregação hidráulica, gerando condições distintas de deposição. Em lamas não segregáveis, a água e os grãos se comportam como um fluido único, produzindo praias mais íngremes com características granulométricas constantes e relativamente baixas densidades. Em lamas segregáveis, o fluido e as partículas sólidas se comportam como fases independentes, produzindo depósitos mais planos, apresentando praias mais densas com distribuição granulométrica média variando com a distância do ponto de descarga (Espósito, 2000). A composição da mistura atua na variabilidade estrutural do depósito, e conseqüentemente no desempenho do aterro, devendo ser considerado em projeto. Já o método de deposição de aterros hidráulicos, envolve parâmetros tais como velocidade de descarga, vazão, concentração da lama, e o espaçamento, altura, inclinação e número de canhões de lançamento, que determinam as condições de fluxo afetando as propriedades do aterro. Diante da sua importância nas características do depósito, as técnicas de descarga também devem ser previstas em projeto.

Morgenstern & Küpper (1988) relatam que a segregação hidráulica gera um processo de deposição, em que partículas de diferentes tamanhos são depositadas em diferentes distâncias em relação ao ponto de descarga. Segundo esses autores, para sedimentos de mesma densidade dos grãos ou características mineralógicas, as partículas mais grossas tendem a se depositar próximo ao ponto de lançamento e a fração fina mais afastada deste ponto, sendo carregadas pelo fluxo. Essas características do processo de segregação reforçam a concepção clássica para a permeabilidade dos aterros hidráulicos para materiais similares apresentada por Vick (1983), onde ocorre a existência de uma zona de alta permeabilidade das areias próximas do ponto de descarga, uma zona de permeabilidade baixa situada distante do ponto de lançamento e uma zona de permeabilidade intermediária situada entre estes dois pontos.

Ainda considerando sedimentos com mesma densidade dos grãos ou características mineralógicas, tem-se que a geometria típica de uma praia de aterro hidráulico é definida por um perfil côncavo mais inclinado próximo ao ponto de descarga e tornando mais suave na parte final da praia (Figura 2.6). O decréscimo da inclinação com a distância pode ser explicado pela separação das partículas que ocorre sobre a praia (Ribeiro, 2000, citando Melent'ev, 1973; Blight & Bentel, 1983; Blight et al, 1985 e Blight, 1994). A praia é inclinada na região próxima ao ponto de descarga, onde as partículas mais grossas são depositadas, e mais suave longe desta região, onde as partículas mais finas são predominantes.

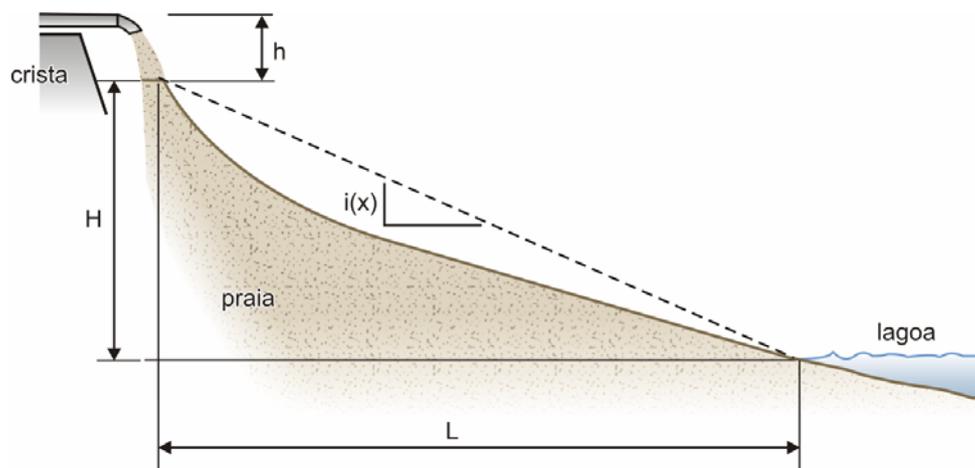


Figura 2.6 - Esquema geométrico da praia de aterro hidráulico (Ribeiro, 2000).

A configuração final do talude é determinada pelas características da fração sólida e pelos parâmetros de descarga, tendendo a ser mais suave para elevadas vazões de descarga e mais íngremes para elevadas concentrações de sólidos na mistura. A inclinação média do talude determina o comprimento da praia e é necessária na avaliação do tamanho e localização da lagoa de decantação. Da mesma forma, a configuração do talude global influencia no arranjo físico geral da estrutura e na área ocupada pelo aterro. Além disso, a determinação do perfil real da praia, associado à densidade da mesma, permite estimar os custos relativos ao projeto, tempo de construção, tamanho do dique de partida, vida útil da barragem, capacidade de armazenamento, etc.

Outro aspecto de fundamental importância é a densidade desses aterros hidráulicos. Segundo Küpper (1991) e Ribeiro (2000), a densidade do material do aterro é o ponto mais crítico para os aterros hidráulicos, pois é uma medida indireta da estrutura do solo apresentando reflexos nos parâmetros de resistência, permeabilidade e deformabilidade. A obtenção de uma

densidade relativamente alta é essencial para a estabilidade da estrutura, tanto sob condições estáticas como dinâmicas sendo importante maximizar seu valor no campo. Küpper (1991) relata que apenas algumas recomendações empíricas são encontradas na literatura soviética para se conseguir maiores densidades. Estas recomendações baseiam-se na utilização de lamas com baixa concentração de sólidos, baixas velocidades de lançamento e alteamentos com baixas taxas de preenchimento. Entretanto, essas recomendações não têm sido muito discutidas e nem difundidas no mundo ocidental.

Como apresentado anteriormente, o material granular depositado hidraulicamente desenvolve estruturas sedimentares bastante distintas provocadas pelas diferentes velocidades de fluxo e taxas de transporte de sedimentos. Desta forma, a obtenção de uma condição ótima de fluxo, associada a parâmetros de descarga apropriados, poderia maximizar a densidade do aterro. Neste contexto, o entendimento dos mecanismos de deposição tem se baseado na simulação do processo de deposição hidráulica em laboratório, visando criar condições similares às de campo e avaliar de forma rápida e econômica seu comportamento geotécnico.

2.3.3 ENSAIOS DE SIMULAÇÃO DE DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA

A deposição de rejeitos em barragem pode apresentar uma total variabilidade nas características geotécnicas ao longo da praia. Para o caso de barragens de rejeito de minério de ferro a mistura (sólidos mais água) é formada por um percentual considerável do próprio minério (10 a 50%), cuja densidade relativa dos grãos (G_s) é da ordem de 5,25, e o restante é constituído por partículas de quartzo (G_s entre 2,65 e 2,70). Associado a esse fato tem-se que os rejeitos apresentam arranjos texturais distintos relacionados principalmente ao processo de beneficiamento do minério de ferro.

Pereira (2005) analisou imagens fornecidas pelo MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) em amostras provenientes de seis diferentes sistemas de contenção de rejeitos, localizados em diferentes pontos do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais, confirmando esta variabilidade textural. A Figura 2.7 apresenta as imagens de dois arranjos texturais característicos dos rejeitos estudados pelo autor, a mesma distância do ponto de lançamento. Os grãos de quartzo (fase escura) da Figura 2.7(a) possuem tamanhos consideravelmente superiores aos grãos de hematita (fase clara), evidenciando a natureza mal graduada do rejeito da barragem do Córrego do Doutor (Complexo de Timbopeba, em Ouro Preto, MG). No caso da amostra do rejeito da Cava do Germano (Mariana/MG), mostrado na Figura 2.7(b), o material apresenta

uma melhor graduação, inclusive com grãos de quartzo compostos por diversas dimensões. Ainda com relação ao conjunto de imagens analisadas por Pereira (2005), e de acordo com Cavalcante (2004) o diâmetro D_{50} do minério de ferro é geralmente menor do que o diâmetro D_{50} das partículas de quartzo.

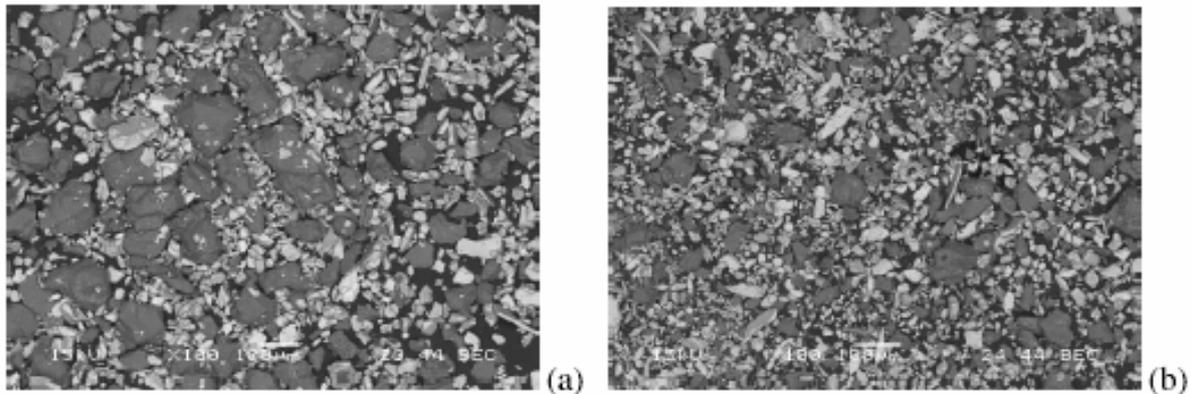


Figura 2.7 - Imagens dos rejeitos obtidas do MEV em uma aproximação de 100 vezes: (a) Barragem do Doutor; (b) Cava do Germano (Pereira, 2005).

As características dos rejeitos associadas aos processos de deposição podem gerar estruturas deposicionais variáveis, fomentando a necessidade de estudos para analisar tais comportamentos.

Morgenstern & Küpper (1988), Küpper (1991), Küpper et al. (1992), Ribeiro et al. (1998), Ribeiro & Assis (1999) e Ribeiro (2000), relatam a importância dos estudos dos processos de deposição em laboratório, por meio da utilização de ensaios de simulação de deposição hidráulica (“*flumes*”), em que as variáveis que afetam o comportamento desses depósitos podem ser controladas e avaliadas. Nesse sentido Ribeiro & Assis (1999) e Ribeiro (2000) propõe a simulação do processo de deposição hidráulica em laboratório. Para tal, foi desenvolvido um equipamento de simulação de deposição hidráulica (ESDH) capaz de simular o efeito das variáveis de lançamento, vazão e concentração no processo de formação dos aterros hidráulicos. Como objetivo de validar e aferir o ESDH foram realizados diversos ensaios utilizando um rejeito de minério de ferro.

O programa experimental consistiu na deposição da lama preparada para diferentes valores de concentração em peso, variando entre 5 a 20%, e submetidas a diferentes valores de vazão, entre 5 e 20 l/min, sobre uma camada plana de rejeito pré-depositada no fundo do canal. O fluxo foi direcionado para montante, possibilitando a formação da praia. O rejeito de minério

de ferro utilizado foi proveniente da Pilha do Monjolo, mina de Morro Agudo, complexo minerador de Água Limpa (CVRD).

Ribeiro (2000) apresenta uma descrição detalhada das características de fluxo sobre o depósito pela observação direta do canal de deposição verificando uma profundidade de fluxo bastante pequena e concentração elevada, caracterizando o transporte que ocorre no processo de formação dos aterros hidráulicos. Durante a deposição, o fluxo na praia tende a se concentrar em pequenos canais ou meandros que se desenvolvem ao longo da superfície do aterro em função da velocidade de fluxo. Para baixas velocidades o fluxo tende a se distribuir em canais sinuosos que se separam e se juntam em torno das ilhas e barreiras e, para velocidades mais elevadas o fluxo tende a cobrir a maior parte da superfície do depósito, minimizando a influência das ilhas e barreiras. Estudos sobre o padrão de segregação ocorrido no depósito, variação da densidade, variação da massa específica dos grãos, e configuração do talude foram realizados e são apresentados no item seguinte.

2.4 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DOS ATERROS HIDRÁULICOS DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO

A utilização de rejeitos granulares como principal material de construção de barragens para contenção de rejeitos, associada à técnica de aterro hidráulico, é uma prática que vem se tornando cada vez mais constante entre as empresas de mineração, não só no Brasil como também em outros países, como por exemplo, Canadá, Estados Unidos, Austrália e África do Sul (Espósito, 2000). O uso do rejeito granular como principal material de construção requer a utilização de princípios geotécnicos nas fases de projeto e construção o que reforça a importância de todo e qualquer estudo que implemente ou melhore os procedimentos sistemáticos de controle geotécnico dessas estruturas. Dentro dessa concepção, muitos trabalhos vêm sendo desenvolvidos com o objetivo de avaliar o comportamento geotécnico das estruturas formadas a partir de rejeito de minério de ferro. Muitos desses trabalhos pertencem à linha de pesquisa Geotecnia Aplicada a Mineração da UnB.

Ribeiro (2000), por meio de ensaios de simulação de deposição hidráulica, verificou a ocorrência de um padrão de segregação atípico influenciado pelo peso das partículas de minério de ferro. Neste sentido, foi evidenciada no canal de deposição projetada uma região próxima ao ponto de descarga com partículas mais finas, porém mais densas de minério de ferro, uma região intermediária, com partículas de quartzo mais grossas e mais leves que as

partículas de minério de ferro e, uma região mais afastada, com partículas de sólidos mais leves e mais finas de quartzo (Figura 2.8). Devido à particularidade do processo de segregação em função do peso, foram feitas análises da massa específica dos grãos em relação ao ponto de descarga (Figura 2.9), verificando uma boa concordância com as proposições apresentadas anteriormente a respeito da segregação granulométrica.

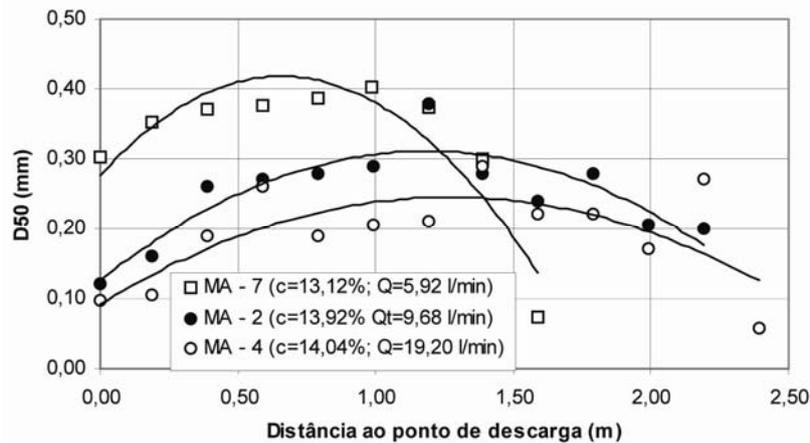


Figura 2.8 - Variação do diâmetro D₅₀ das partículas com a distância ao ponto de descarga - concentração aproximada de 14% e vazão variável (Ribeiro 2000)

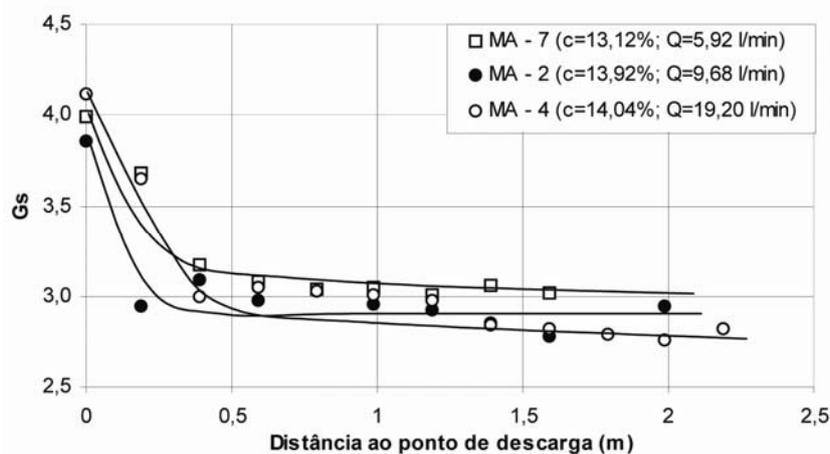


Figura 2.9 - Variação da densidade relativa (Gs) para concentração aproximada de 14% e vazão variável (Ribeiro 2000)

Ribeiro (2000) apresenta também a influência da concentração e da vazão nas características geométricas do talude obtido, sendo esse côncavo e de baixa inclinação. Não foi verificada a existência de uma inclinação acentuada próxima ao ponto de descarga, como previsto para sedimentos com mesma densidade dos grãos ou características granulométricas (Ribeiro, 2000, citando Melent'ev, 1973; Blight & Bentel, 1983; Blight et al, 1985 e Blight, 1994). Este

fato ocorreu devido ao processo de segregação das partículas de rejeito de minério de ferro, que não possibilitou a concentração de partículas mais grossas nessa região. No caso do rejeito analisado, a inclinação foi bastante uniforme ao longo do perfil, tornando-se mais abatida na porção final, região de maior concentração de partículas finas. De uma forma geral o perfil tendeu a ser mais íngreme com o aumento da concentração e se tornou mais abatido como o aumento da vazão, conforme apresentado na Figura 2.10 e na Figura 2.11.

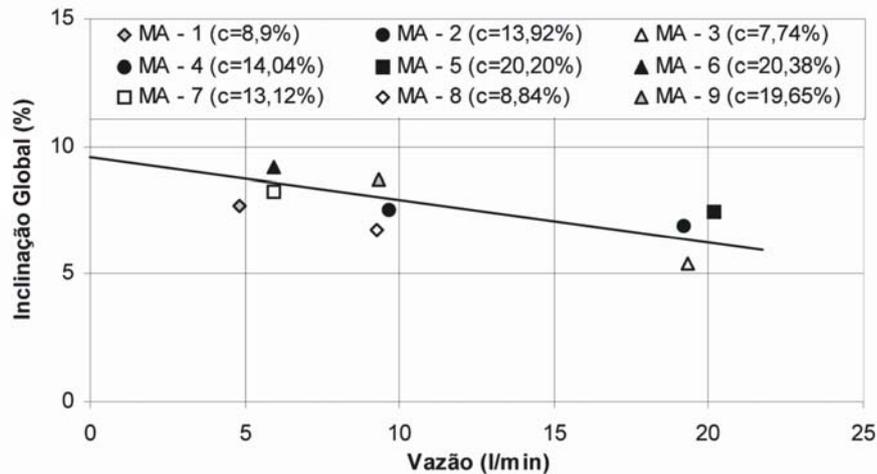


Figura 2.10 - Variação da inclinação global do depósito com a concentração (Ribeiro, 2000).

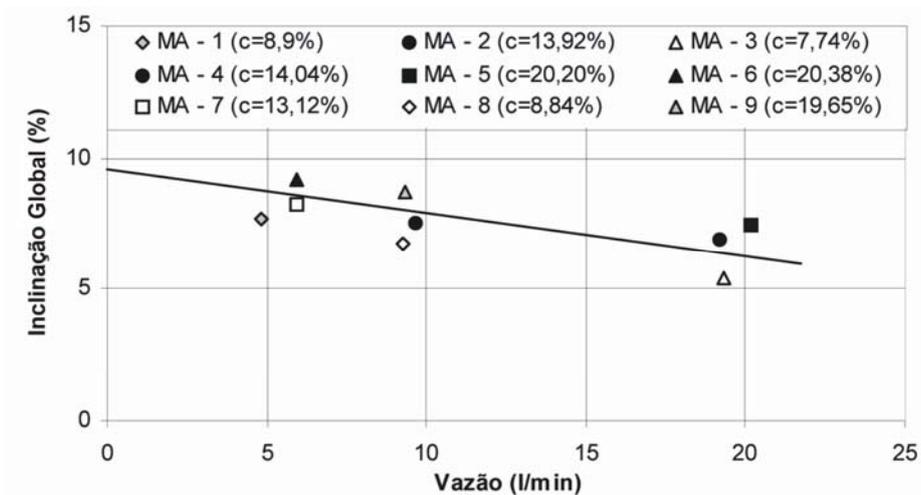


Figura 2.11 - Variação da inclinação global do depósito com a vazão (Ribeiro, 2000).

Com relação à densidade, Ribeiro (2000) apresenta que, de modo geral, o depósito tendeu a apresentar altos valores de massa específica seca perto do ponto de descarga, coincidindo com a região de maior concentração de partículas de ferro, decrescendo em direção a extremidade final do depósito, tendendo a estabilizar em valores próximos de $1,7 \text{ g/cm}^3$ (Figura 2.12).

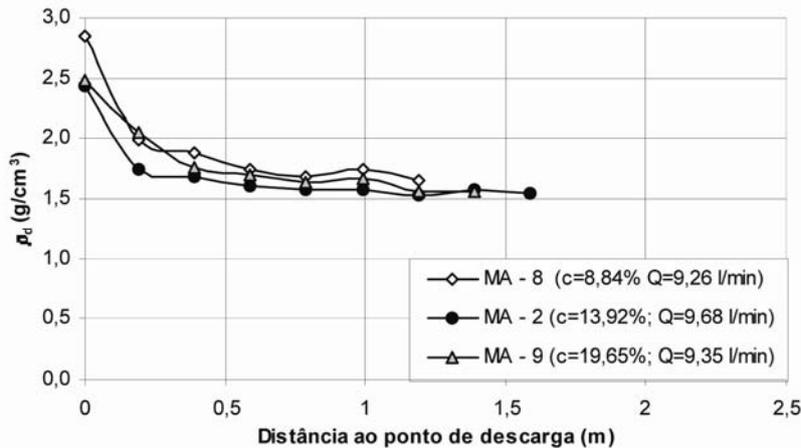


Figura 2.12 - Variação do ρ_d para a concentração aproximada de 14% e vazão variável (Ribeiro 2000)

No que diz respeito à permeabilidade ao longo do canal de deposição do ESDH, Hernandez (2005) e Cavalcante (2000) relatam que seu comportamento é função das variáveis que controlam o processo de segregação hidráulica e reflete o padrão granulométrico das partículas ao longo do canal. As partes iniciais e finais da praia, que têm uma maior presença de materiais finos, têm permeabilidades menores do que a zona central, rica em materiais de diâmetros de partículas maiores.

Cavalcante (2000) e Cavalcante & Assis (2000), estudando os efeitos do gradiente de permeabilidade ao longo da praia de deposição, ou seja, do perfil de segregação hidráulica e do alteamento da barragem, implementaram um modelo numérico-analítico. Esse estudo mostrou a importância da poropressão logo após o período de deposição, o que pode ser crítico numa análise de estabilidade em curto prazo. Em longo prazo, devido à rápida dissipação da poropressão, esse fenômeno não é relevante, pelo contrário, existe um ganho de resistência com o alteamento da barragem uma vez que esse processo diminui os índices de vazios, e conseqüente, aumenta os parâmetros de resistência da barragem de rejeito.

Considerando ainda o efeito do gradiente de permeabilidade ao longo da praia de deposição, Santos (2004) realizou ensaios de infiltração em campo e de permeabilidade em laboratório utilizando amostras homogêneas, reconstituídas a partir de material deformado proveniente do ESDH. Este autor observou as relações entre as variáveis de deposição e a condutividade hidráulica saturada com base nas características do depósito formado (granulometria, densidade e principalmente o teor de ferro). Considerando os ensaios de condutividade hidráulica foi verificada a influência da porcentagem de ferro presente tanto nas amostras

reconstituídas quanto nos ensaios de campo, onde o aumento do teor de ferro tende a gerar uma redução no valor da condutividade hidráulica saturada conforme ilustrado na Figura 2.13. Entretanto, este fato é peculiar de alguns tipos de rejeitos estando associada às dimensões das partículas, onde variações na granulometria podem mudar este comportamento.

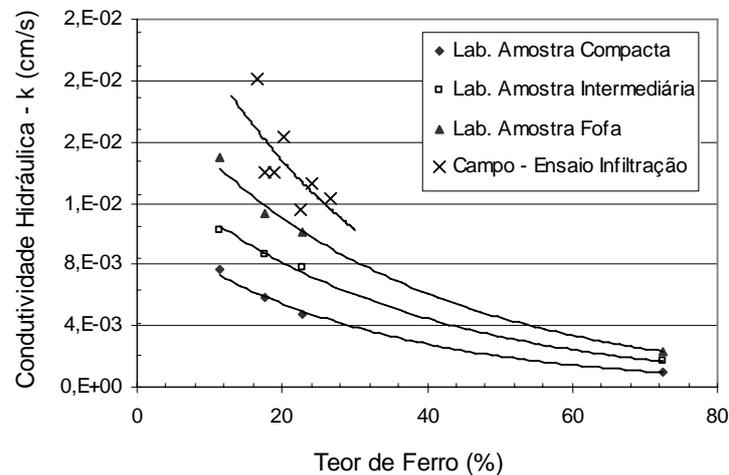


Figura 2.13 - Tendência de correlação entre teor de ferro e a condutividade hidráulica realizada através de ensaios com a bomba de fluxo para amostras do ESDH e ensaios de infiltração realizados em campo (modificado – Santos, 2004)

Assis & Espósito (1995), Espósito (1995), Espósito et al. (1997), Espósito & Assis (1998 e 1999) e Espósito (2000) mostraram, por meio de mapeamento de campo em barragens de rejeito, a variabilidade da densidade in situ e densidade real dos grãos ao longo da praia de rejeitos. Estes autores apresentaram um método probabilístico acoplado ao método observacional aplicado ao controle de qualidade da construção de barragens de rejeitos construídas com a técnica de aterro hidráulico. A proposta da metodologia consistiu em minimizar os impactos ambientais e melhorar os aspectos de segurança e desempenho geotécnico, tendo em vista as variabilidades encontradas nos parâmetros de resistência (coesão efetiva e ângulo de atrito efetivo) e permeabilidade em função da porosidade. Os valores de resistência em função da variabilidade da porosidade do material em campo (campanha de ensaio realizada nas Minas de Alegria e de Morro Agudo), apresentaram acréscimos no valor do ângulo de atrito efetivo (ϕ') para decréscimos da porosidade (n).

Sabe-se, contudo, que os parâmetros geotécnicos de uma barragem de rejeito não dependem unicamente da porosidade in situ, sendo condicionados também por suas características

granulométricas e composição mineral. Neste contexto, Lopes (2000) e Lopes & Assis (2000), estudaram a influência dessas características nos parâmetros de resistência dos rejeitos de minério de ferro, por meio da definição de uma relação entre porosidade e ângulo de atrito para várias faixas granulométricas e diferentes composições químicas.

Lopes (2000) e Lopes & Assis (2000), por meio de ensaios realizados em amostras representativas de um dos diques da pilha do Xingu, confirmou a hipótese que o valor da densidade real dos grãos aumenta com o aumento da porcentagem de ferro (Figura 2.14), sendo apresentada a forte tendência dos maiores teores de ferro concentrarem mais próximos do ponto de lançamento. Porém, com relação à distribuição granulométrica, o material apresentou certa dependência do tamanho das partículas com o percentual de ferro das amostras. De modo geral, a medida em que se aumenta o teor de ferro maior se torna o D_{50} do rejeito, fato este que não pode ser generalizado para outros estudos tendo em vista que os rejeitos apresentam arranjos texturais distintos e que o D_{50} do ferro é geralmente menor que o D_{50} da sílica.

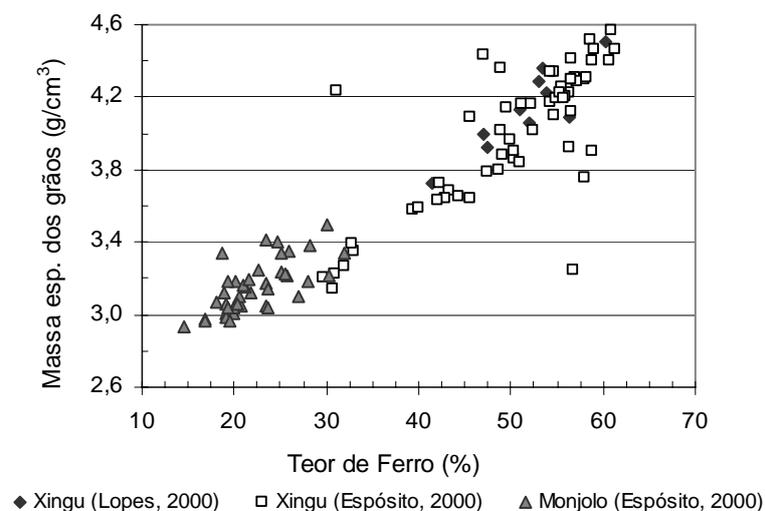


Figura 2.14 - Relação entre a massa específica dos grãos e o teor de ferro nos materiais de rejeito de minério de ferro (dados - Espósito, 2000 e Lopes, 2000).

Com relação aos parâmetros de resistência, foi verificada a dependência do ângulo de atrito com a granulometria, onde o ângulo de atrito aumenta juntamente com o crescimento do valor de D_{50} do material (Figura 2.15), porém sua relação com a resistência pode ser normalizada pelo Índice de Porosidade Relativa (Figura 2.16) o que facilita a aplicação da metodologia proposta por Espósito (2000).

O Índice de Porosidade Relativa é definido como a relação entre a porosidade e os seus valores máximo e mínimo, e expresso pela equação a seguir:

$$IPR = \frac{(n_{\max} - n)}{(n_{\max} - n_{\min})} \quad (2.1)$$

onde:

IPR = Índice de Porosidade Relativa (adimensional);

n_{\max} = porosidade máxima em porcentagem;

n_{\min} = porosidade mínima em porcentagem;

n = porosidade do ponto para o qual se deseja determinar o IPR em porcentagem.

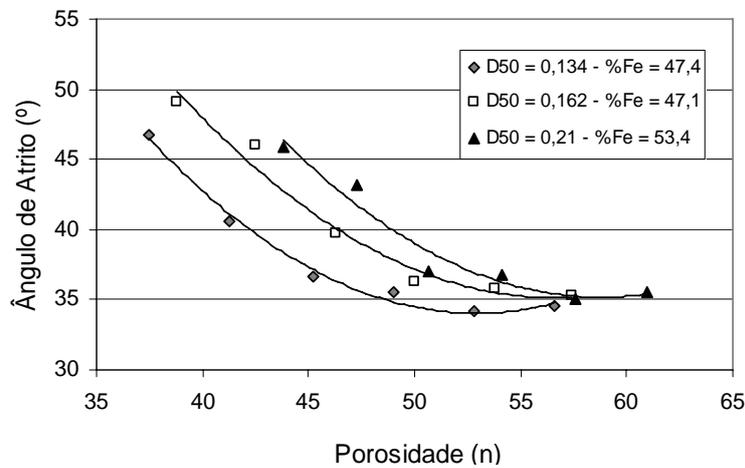


Figura 2.15 - Relação de dependência do ângulo de atrito com a porosidade e a granulometria (modificado – Lopes 2000)

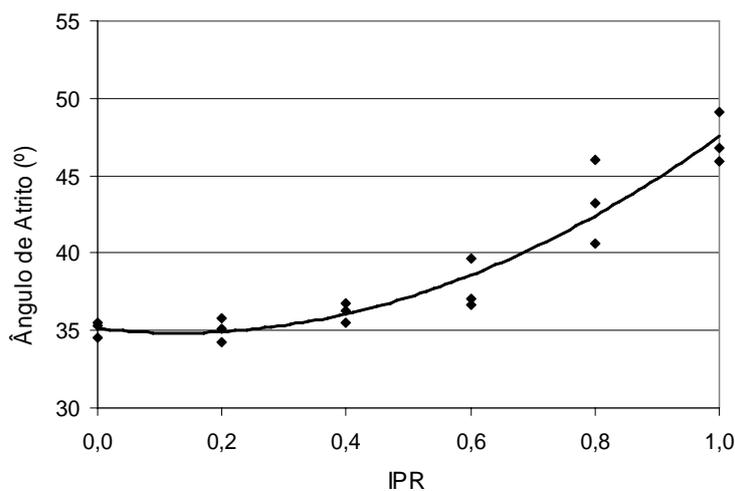


Figura 2.16 - Curva característica do Índice de Porosidade Relativa (IPR) x Ângulo de atrito para o rejeito da Pilha do Xingu (Lopes, 2000)

Considerando a relação existente entre o percentual de ferro e o ângulo de atrito para o material em estudo, Lopes (2000) relatou que amostras com maiores teores de ferro apresentam maiores ângulos de atrito. Contudo, este autor não avaliou a relação entre os parâmetros de resistência e o teor de ferro presentes na amostra. Neste sentido, Hernandez (2000) e Hernandez & Assis (2002a e 2002b) avaliaram a influência do teor de ferro no comportamento mecânico do rejeito por meio de amostras provenientes do processo de separação magnética a partir do rejeito total, obtendo materiais com diferentes teores de ferro e distribuições granulométricas semelhantes, minimizando os efeitos deste último parâmetro. Os autores observaram acréscimos no ângulo de atrito de pico (ϕ'_{pico}) em função de acréscimos nos teores de ferro. A Figura 2.17 representa graficamente a variação do ângulo de atrito, em função da porosidade para os diferentes materiais com teores de ferro distintos.

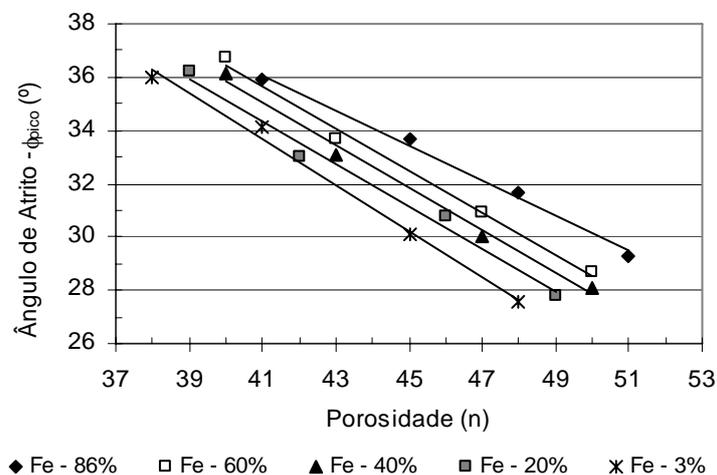


Figura 2.17 - Relação entre o ϕ'_{pico} , a porosidade e a %Fe (modificado - Hernandez, 2002)

Presotti (2002) também avaliou a influência da variação do teor de ferro nos parâmetros de resistência, porém utilizando amostras deformadas provenientes do processo de deposição hidráulica em laboratório utilizando o ESDH desenvolvido por Ribeiro (2000). As amostras, coletadas em diferentes pontos com relação ao ponto de descarga, apresentavam diferentes teores de ferro, diferenciando das amostras de Hernandez (2002) por apresentarem também diferentes características granulométricas. Presotti (2002) também verificou que o aumento do teor de ferro tende a aumentar o valor do ângulo de atrito efetivo, sendo apresentado na Figura 2.18 o efeito do teor de ferro nos parâmetros de resistência para grupos da amostras com mesma porosidade inicial.

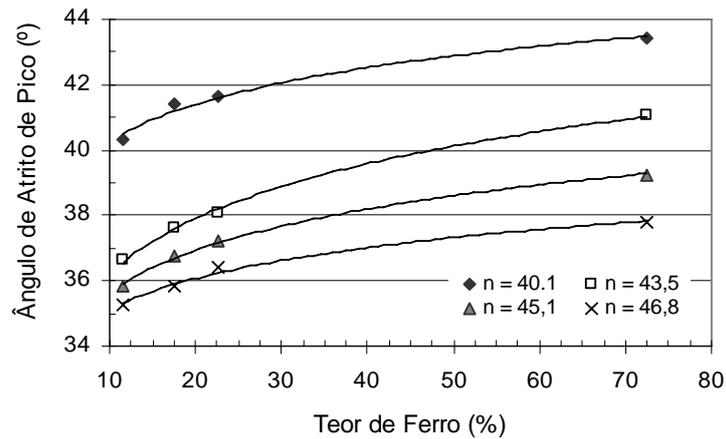


Figura 2.18 - Tendência de correlação entre o teor de ferro e o ângulo de atrito (modificado - Presotti, 2002)

Hernandez (2005) avaliou o potencial de utilização do método geofísico de resistividade na caracterização das propriedades dos depósitos hidráulicos de rejeito de minério de ferro avaliando a influência do grau de saturação, da porosidade e do teor de ferro na variação desta propriedade. Este autor apresenta uma relação entre a porosidade e saturação no Fator de Formação, na qual é levado em conta o efeito das mudanças no teor de ferro do material de rejeito de minério de ferro. O Fator de Formação (F) relaciona a resistividade do meio saturado com a resistividade do fluido presente nos poros do solo, sendo a equação para estimativa deste Fator apresentada a seguir:

$$F = \left(\frac{0,92 - Fe}{0,05} \right) \left(n^{\frac{Fe+0,2}{0,5}} \cdot S^{-0,223} \right) \quad (2.2)$$

onde:

F = Fator de Formação;

Fe = Porcentagem de Ferro;

n = Porosidade da amostra;

S = Grau de Saturação.

A Equação 2.2 é válida para o intervalo de dados utilizados para a sua elaboração ($0,015 \leq Fe \leq 0,75$; $0,37 \leq n \leq 0,48$; $0,0 \leq S \leq 0,90$), e sua aplicabilidade em aterros hidráulicos de rejeitos de minério de ferro ainda está sendo avaliada.

É importante ressaltar que a grande maioria do comportamento de rejeito apresentada aqui se refere ao rejeito da Pilha do Monjolo do Complexo de Água Limpa (CVRD), o qual será

utilizado na presente pesquisa, porém, o comportamento desse rejeito não pode ser generalizado para todos os resíduos de minério de ferro. Reforça-se mais uma vez que as características dos rejeitos é função do processo de beneficiamento e do tipo de minério que os originaram. Como exemplo, são apresentadas as características de rejeitos de duas minas distintas. O primeiro é o resíduo da Mina da Mutuca, localizada em Nova Lima, explorada pela MBR – Minerações Brasileiras Reunidas, originando rejeito de hematita, classificado como silto-argiloso de baixa plasticidade e baixa permeabilidade. Estudos nesse material revelaram comportamento não esperado para materiais não coesivos (Gumiere et al., 1998). O segundo resíduo é proveniente da Mina do Germano, localizada em Mariana e explorada pela Samarco Mineração SA, originando rejeito de itabirito. Este material foi classificado com areia fina de baixa permeabilidade pelos mesmos autores citados anteriormente.

Gumiere et al. (1995) avaliaram o potencial de liquefação, sob ação de cargas estáticas, considerando resultados de ensaios triaxiais realizados a tensão controlada, em corpos de prova consolidados anisotropicamente e originados dos dois rejeitos típicos de mineração de ferro mencionados anteriormente, sendo um de itabirito e outro de hematita. Para o rejeito silto argiloso da Mina da Mutuca, foi verificado que o material apresenta baixa resistência ao cisalhamento e elevadas poropressões quanto cisalhado, porém, insuficientes para causar a ruptura por liquefação. Já para o resíduo da Mina do Germano, verificou-se alta resistência ao cisalhamento e poropressões negativas sendo, portanto, não susceptíveis a liquefação.

Apesar de ocorrerem alguns estudos sobre o potencial de liquefação em rejeitos granulares sob condições estáticas, acredita-se que a prática de projetos geotécnicos aplicados às barragens de rejeitos granulares de mineração, por exemplo, tem negligenciado a liquefação estática como possível mecanismo ou critério de ruptura. A freqüente busca de outros mecanismos como causas de rupturas é, em muitos casos, reflexo direto de um dogmatismo relacionado à impossibilidade de ocorrência do fenômeno sob condições estáticas de carregamento (Pereira, 2005). Neste contexto, Pereira (2005), buscou estabelecer uma sistemática geral de análise, com a implementação de diversas metodologias para a avaliação do fenômeno da liquefação em rejeitos de minério de ferro. As metodologias foram baseadas no comportamento dos rejeitos através de ensaios triaxiais tipo CIU (adensado isotropicamente e não-drenado), associado às suas características intrínsecas, sendo utilizados materiais oriundos de seis diferentes sistemas de contenção de rejeitos de minério de ferro da região do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais. Os procedimentos experimentais envolveram várias amostras ensaiadas sob diferentes tensões confinantes, com densidades relativas (D_r) próximas da

condição de densidade mínima (e_{max}) para os diferentes rejeitos de minério de ferro em estudo. Na avaliação do potencial de liquefação foi observada uma diversidade de comportamentos entre esses rejeitos, evidenciando, para alguns, a susceptibilidade à liquefação.

Cabe ainda ressaltar que todos trabalhos mencionados anteriormente (item 2.4) utilizaram amostras de rejeito de minério de ferro reconstituídas em laboratório.

2.5 RECONSTITUIÇÃO DE AMOSTRAS EM SOLOS GRANULARES

Tendo em vista a grande dificuldade de obtenção de amostras indeformadas em materiais granulares e as incertezas da representatividade destas amostras, várias técnicas de reconstituição de amostras já foram desenvolvidas procurando simular a ação da natureza na formação desses depósitos (Ratton, 1993). As técnicas para preparação de amostras em areias secas e saturadas têm sido descritas em diversas pesquisas (Oliveira Filho, 1987; Vaid & Negussey, 1988; Ratton, 1993; Los Prestti et al., 1993, Presotti, 2002). Com o objetivo de adequar tais metodologias a realidade dos materiais normalmente estudados, modificações nos procedimentos comumente adotados têm sido propostas na literatura. É importante considerar que a maioria das alterações, aqui estudadas, tem sido sugerida em pesquisas utilizando rejeitos de minério de ferro, como é o caso das considerações feitas nas pesquisas realizadas por Espósito (2000), Lopes (2000), Hernandez (2002), Presotti (2002) e Pereira (2004).

As principais técnicas de reconstituição de amostras de material granular reportadas na literatura são pluviação no ar, pluviação na água ou sedimentação, apiloamento ou compactação com uso de soquete, compactação com auxílio de uma haste e compactação com uso de um vibrador.

2.5.1 PLUVIAÇÃO NO AR

Na pluviação no ar o material granular seco é moldado com auxílio de funil que direciona e controla a velocidade de deposição do material. A densidade dos corpos de provas é dependente da altura de queda e da velocidade de deposição. As maiores alturas de queda resultam em maiores energias de deposição e conseqüentemente corpos de provas mais densos. Esse método permite cobrir uma extensa faixa de densidade relativa, porém, apresenta problema de segregação quando o material granular é bem graduado, com coeficiente de

uniformidade maior que 5, ou quando apresenta partículas com densidades distintas. Ratton (1993) considera que a pluviação no ar permite uma adequada reconstituição de depósitos naturais formados pelo vento que normalmente se constituem de areias ou siltes de granulometria bem uniforme.

Para a técnica de pluviação ao ar também é proposto na literatura a utilização pluviadores de areias (“Sand Pluviators”) para reconstituição de amostras de pequenas dimensões, tendo em vista o grau de uniformidade espacial de densidade e distribuição granulométrica gerados. O equipamento é composto por um funil de alimentação por onde a areia escoar por gravidade através de um ou mais bocais de diâmetros variáveis. A chuva de areia é distribuída mais ou menos uniformemente sobre área de interesse passando por um conjunto de peneiras. A Figura 2.19 ilustra esquematicamente o pluviador de areia tradicional.

Los Prestti et al. (1993) citam as vantagens da utilização de pluviadores de areia móveis. Neste equipamento, o funil de alimentação se movimenta para trás e para frente sobre a área de interesse, o bocal de saída apresenta forma retangular com abertura variável, sendo desnecessário o conjunto de peneiras. Os resultados de testes em laboratório em pluviadores móveis mostraram um grau de uniformidade espacial em termos de densidade e distribuição granulométrica superiores aos encontrados nos pluviadores tradicionais.

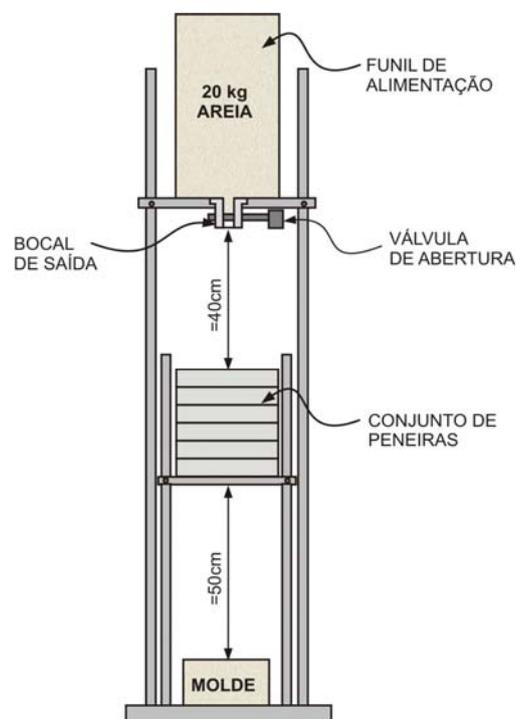


Figura 2.19 - Layout de um Pluviador de areia tradicional (modificado - Los Prestti et al., 1993)

2.5.2 PLUVIAÇÃO NA ÁGUA

A pluviação na água consiste basicamente na deposição da areia saturada em moldes cheios de água deaerada com auxílio de uma colher. Este procedimento favorece a obtenção de amostras fofas independente da altura de queda, devido à baixa velocidade de queda que os grãos atingem na água. Para obter maiores densidades, recomenda-se a utilização de vibradores após o processo de pluviação (Vaid & Negussey, 1988).

Ratton (1993) cita algumas adaptações a esta metodologia, descritas por Chaney & Mulilis (1978), onde em substituição a colher para depositar a areia saturada, é utilizado um frasco de Ehlermeyer. Nesse frasco é colocada uma quantidade determinada de areia seca, sendo adicionada água deaerada. O conjunto passa por um processo de fervura e aplicação de vácuo, quanto então, é completamente cheio de água e vedado com uma rolha onde é introduzido um tudo de vidro de pequeno diâmetro. Na base da câmara triaxial é preparado o molde tripartido para recepção do material sendo a membrana de látex fixada com *o-rings* devidamente succionada. Como molde cheio de água deaerada, inverte-se o frasco Ehlermeyer permitindo a sedimentação da areia até completar o molde. A Figura 2.20 ilustra este método de deposição.

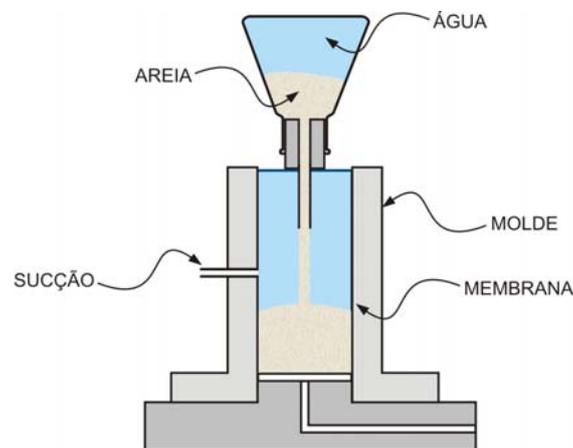


Figura 2.20 - Esquema do método de pluviação na água (modificado – Ratton, 1993)

Ratton (1993) considera que a pluviação na água simula a deposição de areias em ambientes naturais aquáticos e nos aterros hidráulicos. Esse método também apresenta problema de segregação devendo ser consideradas as mesmas condições apresentadas no método de pluviação no ar.

2.5.3 COMPACTAÇÃO

Na compactação com o uso do soquete ou apiloamento, os corpos de prova são obtidos compactando camadas sucessivas do material seco, úmido ou saturado. A força, frequência e espessura das camadas são determinadas em função da densidade desejada. O mesmo ocorre na compactação com auxílio de haste, onde o soquete é substituído pelo uso de uma haste para executar a compactação. No método de apiloamento molhado obtém-se a melhor reconstituição de arranjo dos grãos em aterros e pode-se obter corpos de prova parcialmente saturados de compactidade muito fofa a densa, porém, tendem a apresentar não uniformidade em relação a densidade (Ratton, 1993).

Presotti (2002), citando Tatsuoka (1979), relata que a compactação por meio de golpes na parede lateral do molde pode ser realizada em material seco ou saturado, devendo a direção dos golpes variar para evitar uma orientação preferencial das partículas. Na compactação com uso do vibrador, o recipiente contendo o material granular recebe movimentos de vibração que podem ser verticais ou horizontais, sendo a densidade dos corpos de prova, obtidos por esta técnica, função do tempo, do tipo e da frequência de vibração empregada.

2.6 CONGELAMENTO DE SOLOS GRANULARES PARA OBTENÇÃO DE AMOSTRAS INDEFORMADAS

Como dito anteriormente, os solos não-coesivos são tradicionalmente complexos sob o ponto de vista de amostragem e inspeção. Diante da dificuldade de obtenção de amostras indeformadas em solos granulares, o fenômeno de congelamento dos solos tem sido estudado por diversos pesquisadores, com o intuito de favorecer a obtenção deste tipo de amostra de forma representativa do solo. Contudo, o grande desafio é entender o comportamento da água presente na amostra durante o processo de congelamento, pois sabe-se que a água quando congelada sofre expansão volumétrica, podendo alterar significativamente a estrutura interna do solo.

De acordo com Kinisita (1979), a movimentação da água na parte não congelada do solo, durante o processo de congelamento, se dá no sentido da frente de congelamento, onde é retida na forma de lentes de gelo. Este processo é explicado pelo estreitamento dos vazios, devido à formação de lentes de gelo, que induzem no solo o acréscimo de sucção, alimentando com mais água a formação de novas lentes e conseqüente aumento da expansibilidade da massa de solo (Hernandez, 2005).

Visando explorar a técnica de amostragem por congelamento para obtenção de amostras representativas na avaliação dos parâmetros de resistência dos depósitos hidráulicos, Hernandez (2005) realizou ensaios para avaliar o processo de congelamento em amostras de rejeito de minério de ferro, moldadas em laboratório com porcentagem de saturação variando de 5 a 100%. As observações feitas durante o processo de extração das amostras e os resultados obtidos da medição dos corpos de prova permitiram a confirmação do fenômeno de expansão dos solos congelados. As mudanças na estrutura do solo foram mais evidentes para as amostras com grau de saturação maiores, onde se verificou a concentração da maior parte da deformação no centro da amostra, devido basicamente a falta de confinamento nesta região (Figura 2.21).



Figura 2.21 - Amostra de rejeito congelado com índice de vazios inicial de 0,818 e grau de saturação de 100% (Hernandez, 2005)

A Figura 2.22 apresenta os resultados das mudanças no índice de vazios nos testes de congelamento. Observa-se variações do índice de vazios da ordem de 5,0%, quanto o percentual de saturação é superior a 70%.

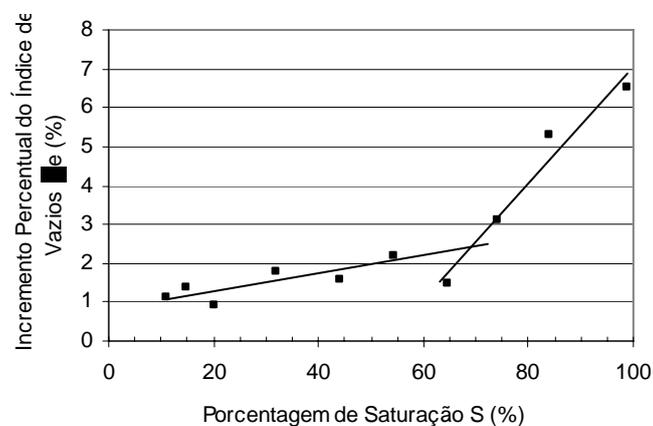


Figura 2.22 - Mudança dos dados no índice de vazios, em função do grau de saturação, após o processo de congelamento (Hernandez, 2005).

2.7 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O COMPORTAMENTO DRENADO DOS MEIOS GRANULARES

A resistência ao cisalhamento dos solos granulares é um tema bem discutido na literatura clássica de mecânica dos solos (Taylor, 1966; Lambe & Whitman, 1972; Terzaghi & Peck, 1986). Os materiais granulares, como as areias e pedregulhos, tem como características importantes a alta permeabilidade e conseqüentemente se comportam com características de drenagem livre. Para representar seu comportamento em laboratório é comum a utilização do ensaio drenado, excetuando os casos de carregamentos transientes ou cíclicos, como os de efeitos de sismos, em que pode haver acréscimos de poropressão e liquefação de areias finas e fofas (Ortigão, 1995). Neste sentido, será apresentada neste subitem uma breve discussão a respeito do comportamento drenado dos meios granulares.

De uma forma geral, a resistência drenada das areias é governada por três componentes: o atrito entre a superfície dos grãos, que depende da composição mineral e do tamanho das partículas; a energia necessária para rearranjar e reorientar os grãos e a energia requerida para causar a dilatância do material (Ratton, 1993). Estas duas últimas componentes são dependentes da compactidade do material. Como conseqüência desses conceitos, a compactidade inicial das amostras tem uma grande influência sobre o comportamento dos materiais arenosos. Esta influência pode ser observada nas curvas tensão vs. deformação em ensaios triaxiais e de cisalhamento direto. Amostras ensaiadas em estado fofo apresentam um comportamento do tipo dúctil, onde se observa que as tensões crescem lentamente com a deformação, atingindo um valor limite para deformações relativamente altas. Já as amostras ensaiadas em estado compacto apresentam comportamento frágil, onde a tensão atinge um valor máximo com deformações relativamente pequenas e posteriormente diminui com o aumento das deformações, tendendo a um valor último equivalente ao obtido para o mesmo material na condição fofo (Figura 2.23a).

O estado último corresponde ao índice de vazios crítico em que a areia sofre deformações sem variação de volume e ocorre devido as mudanças no índice de vazios durante o cisalhamento (Figura 2.23b). As amostras densas aumentam de volume gradativamente tendendo no final do ensaio a estabilização. O comportamento dilatante é explicado pela tendência dos grãos deslocarem uns sobre os outros. A areia fofo, ao contrário, apresenta inicialmente uma pequena diminuição de volume e depois o volume praticamente não varia até o fim do ensaio (Figura 2.23c).

Vaid e Sivathayalan (1996) ressaltam a importância da estrutura e dos diferentes processos de formação ou deposição das areias. Esses autores relatam que diferentes arranjos de grãos são passíveis de ocorrer para solos com um mesmo índice de vazios, apresentando comportamentos distintos de um arranjo para o outro. De uma forma geral, um aumento no grau de imbricamento entre as partículas provoca também um aumento no ângulo de atrito da areia.

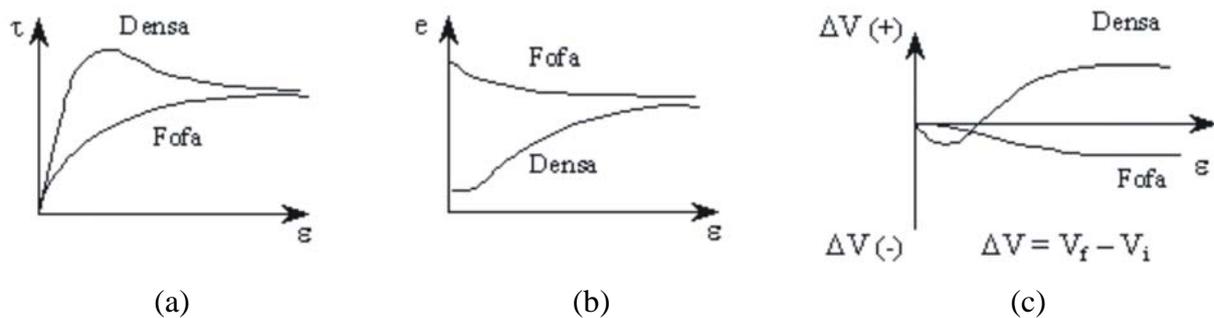


Figura 2.23 - Relações de comportamento para areias densas e fofas: (a) Tensão vs deformação; (b) Índice de vazios vs deformação; (c) Volume vs deformação.

A composição granulométrica é outro fator que apresenta influência significativa no comportamento dos meios granulares. Vários autores relatam que quanto maior o coeficiente de não uniformidade (C_u) ou seja, quanto melhor distribuída é uma areia, melhor é o entrosamento entre as partículas, conseqüentemente, maior o ângulo de atrito (ϕ). Além disso, um solo bem graduado sofre uma redução menor no valor de ϕ com o aumento das tensões confinantes. O tamanho médio das partículas, por si só, apresentam pouca influência na resistência das areias. Lambe & Whitman (1972) relatam que areias com mesmo C_u e granulometrias diferentes, para uma mesma energia de compactação alcançam diferentes índices de vazios, no entanto o ângulo de atrito é aproximadamente análogo para todas. A influência do maior entrosamento inicial das areias com as partículas mais grossas é compensada pelo maior grau de fraturamento destas partículas, devido basicamente às maiores pressões de contato presente. Outro aspecto a ser considerado é o formato dos grãos. Solos granulares constituídos por grãos angulares apresentam um maior entrosamento entre as partículas e resistência drenada superior aos solos constituídos por grãos arredondados. A Tabela 2.1 apresenta a influência do formato dos grãos e da granulometria sobre o ângulo de atrito nos materiais granulares nos estados de compactidade fofa e compacta.

Tabela 2.1 - Influência do formato dos grãos e da granulometria sobre o ângulo de atrito nos materiais granulares (Lambe e Whitman, 1972)

Formato dos Grãos e Granulometria	Fofa	Compacta
Arredondados, uniforme	30°	37°
Arredondados, bem graduada	34°	40°
Angular, uniforme	35°	43°
Angular, bem graduada	39°	45°

O aumento da pressão de confinamento também exerce influência sobre os parâmetros de resistência dos materiais arenosos. O ângulo de atrito efetivo (ϕ') de solos granulares geralmente sofre decréscimos com o aumento da tensão confinante. Este efeito é mais significativo em areias densas, sendo o ϕ' pouco afetado em areias fofas. A redução no valor de ϕ' é explicado por mudanças no comportamento dilatante das areias, uma vez que o material inicialmente denso apresenta uma redução gradual na tendência de expansão, chegando, sob altas tensões confinantes, a diminuir de volume durante o ensaio.

A medida da resistência dos solos pode ser obtida por ensaios de laboratório convencionais como os de cisalhamento direto e os de compressão triaxial. Segundo Head (1986), o ensaio de cisalhamento direto é o mais simples, direto e antigo procedimento para medir a resistência ao cisalhamento dos solos. Já o ensaio de compressão triaxial é considerado o ensaio convencional mais versátil para a determinação das propriedades de tensão-deformação do solo. O ensaio permite o controle da magnitude da tensão principal, o controle da drenagem e a medição das poropressões geradas no processo.

3 CARACTERÍSTICAS DO REJEITO DA MINA DO COMPLEXO DE ÁGUA LIMPA E METODOLOGIA DE OBTENÇÃO DE AMOSTRAS

Os rejeitos de minério de ferro apresentam em sua constituição grande quantidade de quartzo moído e mineral de ferro, apresentando granulometria e comportamento similar aos solos arenosos. Em geral, esses materiais apresentam pequenas concentrações de finos, sendo esses não plásticos. Dentro deste contexto, a amostragem e inspeção nesses materiais são complexas e a avaliação dos parâmetros de resistência são normalmente realizadas utilizando amostras reconstituídas, considerando principalmente a densidade dos depósitos em campo. Sabe-se, porém, que o processo de deposição hidráulica dos rejeitos de minério de ferro geram depósitos estratificados e essas características têm apresentado dificuldades em serem reproduzidas em laboratório pelas técnicas de moldagem de solos granulares encontradas na literatura.

Na tentativa de avaliar o processo de reconstituição das amostras de rejeito de minério de ferro foram realizados ensaios para determinação dos parâmetros de resistência em amostras reconstituídas e indeformadas. Para a obtenção das amostras indeformadas foi proposta uma metodologia, resguardando suas características deposicionais como a segregação gerada durante o processo de deposição, estratificações e acamamentos.

Neste capítulo são descritas as características do rejeito de minério de ferro utilizado na pesquisa, o equipamento para a realização dos ensaios de simulação de deposição hidráulica (ESDH) e a metodologia adotada na realização deste ensaio. São descritos também, os procedimentos empregados para a obtenção das amostras indeformadas e para o processo de reconstituição das amostras.

3.1 CARACTERÍSTICA DO REJEITO DA MINA DO COMPLEXO DE ÁGUA LIMPA

O material utilizado em todos os ensaios realizados é proveniente do processo de beneficiamento do minério de ferro na Mina do Complexo de Água Limpa, pertencente à

Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), localizada no município de Rio Piracicaba, MG, aproximadamente 140 km de Belo Horizonte. A Figura 3.1 apresenta um esquema de localização da Mina.

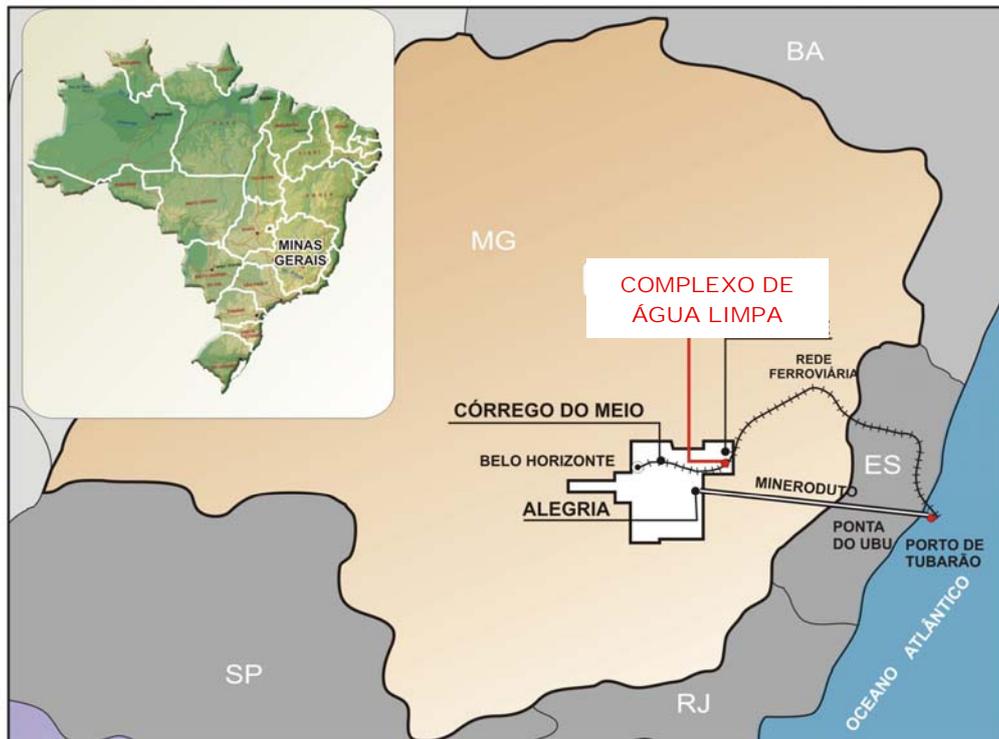


Figura 3.1 - Localização da Mina do Morro Agudo do Complexo de Água Limpa

A mina do Complexo de Água Limpa (CVRD), em operação desde 1963, produz minério de ferro sob forma de finos e granulados, a partir de rochas itabiríticas. No decapeamento da lavra são gerados estéreis sistematicamente dispostos em pilhas. Para a concentração do minério de ferro é utilizado o processo de espirais, gerando, além do produto final, lama e rejeito silicoso. A lama é disposta em barragens e a disposição do rejeito é feita por meio da técnica de aterro hidráulico na Pilha de Rejeito do Monjolo, sendo o rejeito transportado inicialmente por gravidade e atualmente por bombeamento através de tubulações e lançado a partir da crista por canhões (spigots). O projeto desta pilha consta de um dique de partida com enrocamento de pé (cota 800) e alteamentos sucessivos, a cada 10 m, com o próprio rejeito até a cota 900, sendo os alteamentos realizados para montante. Os taludes de jusante são retrabalhados mantendo uma inclinação de 1V:2H, com berma de 8 m de largura. O projeto apresenta dreno de fundo de 150 m de extensão instalado na base da barragem e sistema extravasor posicionado de jusante à montante com tomada de água tipo flauta. Ressalta-se que o processo de concentração por espiras consome um grande volume de água, sendo toda a

água procedente da pilha de rejeito reaproveitada no beneficiamento (Cavalcante, 1998; Giovannini & Amaral, 1999; Ribeiro, 2000 e Espósito, 2000). A seção transversal típica da Pilha de rejeito do Monjolo é apresentada na Figura 3.2.

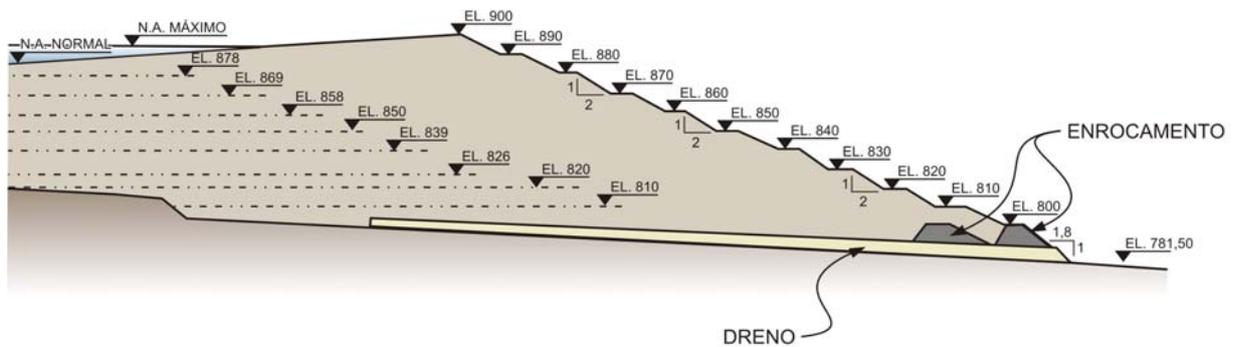


Figura 3.2 - Pilha de Rejeito do Monjolo (Ribeiro, 2000)

Em função do processo de lançamento contínuo de rejeitos, atualmente, após sucessivos alteamentos, a Pilha do Monjolo encontra-se próxima à cota 900 m e em seu 8º alteamento, conforme reportado por Santos (2004). A Figura 3.3 apresenta uma visão do talude de jusante da Pilha do Monjolo.



Figura 3.3 - Vista do talude de jusante da pilha do Monjolo (Santos, 2004)

Algumas pesquisas, utilizando os rejeitos dispostos na Pilha do Monjolo, já foram realizadas ou estão em andamento no Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de

Brasília (UnB) e da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), e visam avaliar basicamente o comportamento das barragens de rejeito.

Espósito (2000) e Ribeiro (2000) apresentam as características do rejeito produzido na mina do Complexo de Água Limpa, sendo a granulométrica situada na faixa das areias médias e finas, massa específica dos grãos média de $3,13 \text{ g/cm}^3$ e composição química média de 23% de ferro, 67% de SiO_2 e 0,4% de Al_2O_3 . Esses autores observaram que, apesar da variabilidade que normalmente ocorre nas características básicas do rejeito devido, principalmente, ao processo de beneficiamento, a granulometria e a porcentagem de ferro do rejeito total não apresentaram variações significativas nas amostras coletadas em campo em períodos diferentes durante o desenvolvimento de suas pesquisas. A Tabela 3.1 apresenta o resumo das características típicas do rejeito total da Mina do Complexo de Água Limpa, e a Figura 3.4 apresenta a curva granulométrica típica deste rejeito. As curvas apresentadas na Figura 3.4 referem-se aos dois tipos de análise granulométrica realizadas, com o granulômetro a laser e pelo método convencional de peneiramento e sedimentação, mostrando uma excelente correspondência entre os dois métodos (Ribeiro, 2000).

Tabela 3.1 - Características do Rejeito da Mina de Água Limpa

D_{10} (mm)	D_{50} (mm)	D_{90} (mm)	Cu	G_s	Fe (%)	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)
0,06	0,19	0,48	4	3,13	23	67	0,40

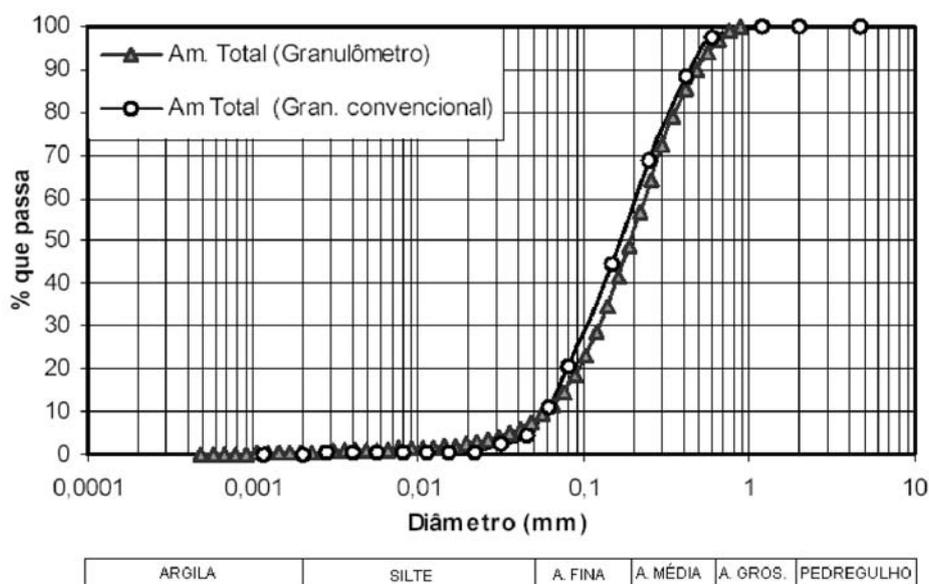


Figura 3.4 - Curva granulométrica típica do rejeito da Mina de Água Limpa (Ribeiro, 2000).

A análise da microscopia realizada neste rejeito revela a existência de três tipos básicos de partículas: minerais de ferro, minerais de quartzo e minerais de quartzo associados com pequenas partículas de ferro. De uma forma geral, as partículas de quartzo puro apresentam uma granulometria levemente superior à do ferro, contudo, as amostras de quartzo associadas com o ferro são sensivelmente mais grossas (Ribeiro, 2000). Os ensaios de microscopia realizados por Espósito (2000), no mesmo rejeito, possibilitam observar a presença de pequenos pontos escuros (minerais de ferro) nas partículas de coloração clara que representam o quartzo, reforçando o proposto por Ribeiro (2000) quanto a existência de minerais de quartzo associados com partículas de ferro (Figura 3.5). Espósito (2000) observou ainda a presença de óxido de ferro e goethita cimentando os grãos de quartzo (Figura 3.6 e Figura 3.7). Para a melhor interpretação das fotos, a Tabela 3.2 apresenta a equivalência entre os minerais encontrados e as cores adotadas para diferenciá-los.

Tabela 3.2 - Equivalência entre minerais e cores

Cores	Minerais
Azul	Poros
Preto	Hematita
Branco	Quartzo
Laranja	Goethita

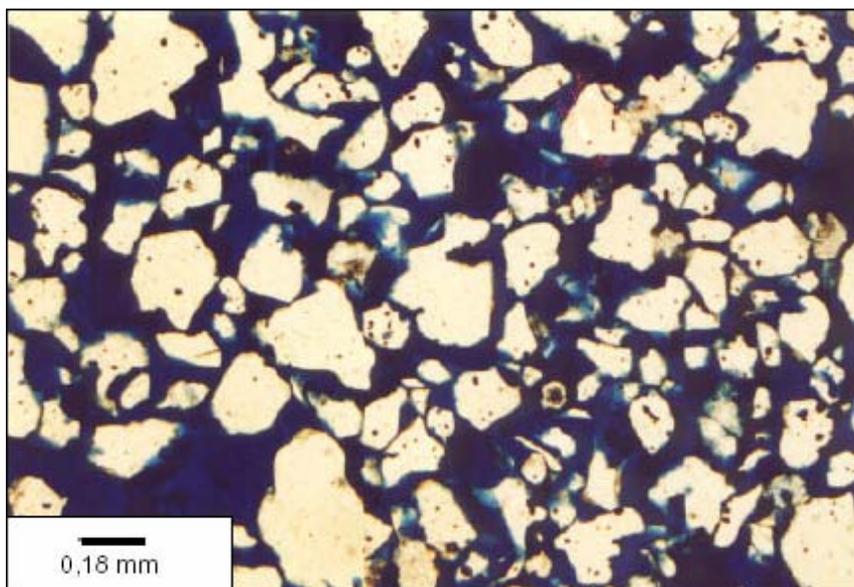


Figura 3.5 - Microscopia óptica realizada no rejeito da Pilha do Monjolo (Espósito, 2000)

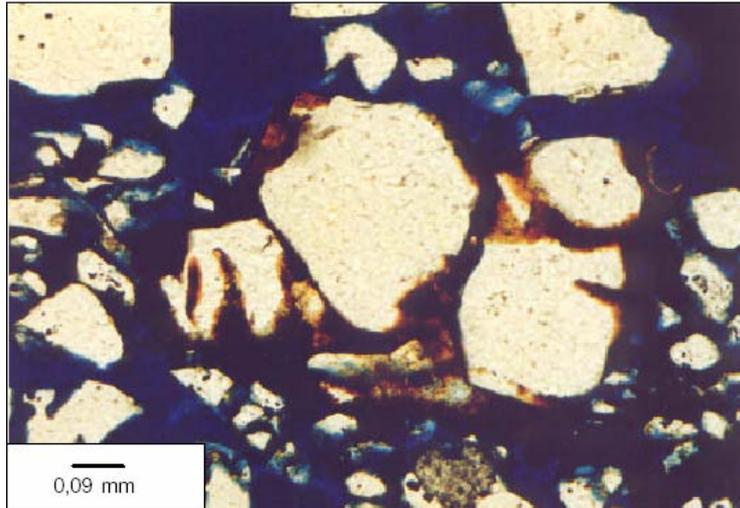


Figura 3.6 - Grãos de quartzo de variados tamanhos cimentados por óxido de ferro (Espósito, 2000)

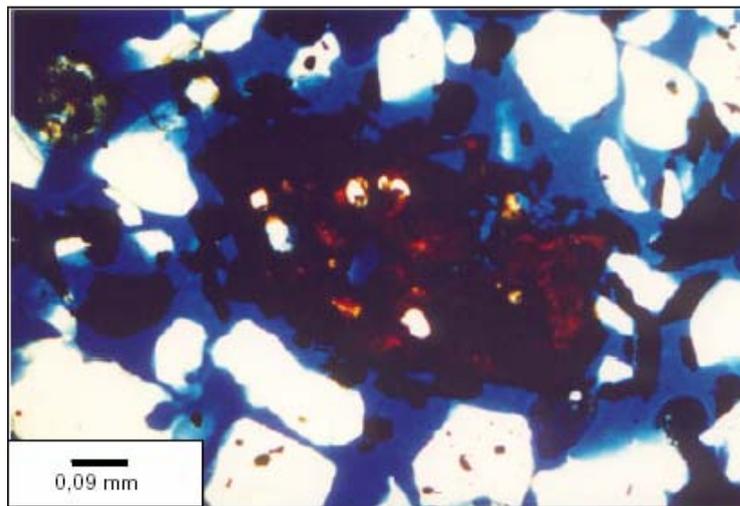


Figura 3.7 - Concreção de goethita englobando cristal de quartzo (Espósito, 2000)

3.2 EQUIPAMENTO DE SIMULAÇÃO DE DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA (ESDH)

O ESDH foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, em convênio com a Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) por Ribeiro (2000). O objetivo principal deste equipamento é simular os mecanismos de deposição hidráulica em laboratório e avaliar o comportamento geotécnico destes depósitos com relação às variáveis que afetam o processo de deposição hidráulica, como a vazão e a concentração da lama. O ensaio permite obter amostras representativas do material depositado favorecendo a obtenção de parâmetros geotécnicos mais próximos dos que ocorrem no campo.

Para a construção do equipamento, Ribeiro (2000) realizou um extenso estudo na literatura relacionado à simulação do processo de deposição hidráulica em laboratório e às características básicas dos modelos reduzidos. Neste contexto foi estabelecido o modelo físico para construção do equipamento baseado no processo de semelhança proposto por Hooke (1968), em que os sistemas de simulação em laboratório são tratados como sistemas reduzidos independentes, semelhantes ao modelo real. Segundo Ribeiro (2000) a proposta de Hooke de adotar sistemas independentes é uma boa alternativa para contornar os formalismos de escala, bastante difíceis de serem satisfeitos nesses tipos de simulações. A adoção desse modelo físico de simulação em laboratório tem se mostrado uma importante ferramenta na avaliação e no entendimento qualitativo do processo de formação e das propriedades dos aterros hidráulicos. Apesar do modelo físico utilizado nas simulações de laboratório fornecerem parâmetros qualitativos, o mesmo tem demonstrado boas correlações com os dados obtidos em campo.

O ESDH consiste basicamente de três partes fundamentais que funcionam de forma integrada durante todo o período de realização dos ensaios, provendo a manutenção dos parâmetros de fluxo e as condições necessárias para um processo controlado de deposição hidráulica, sendo eles o canal de deposição, parte principal do ESDH, o sistema de alimentação e o sistema de descarga (Ribeiro, 2000). A Figura 3.8 apresenta um esquema do ESDH.

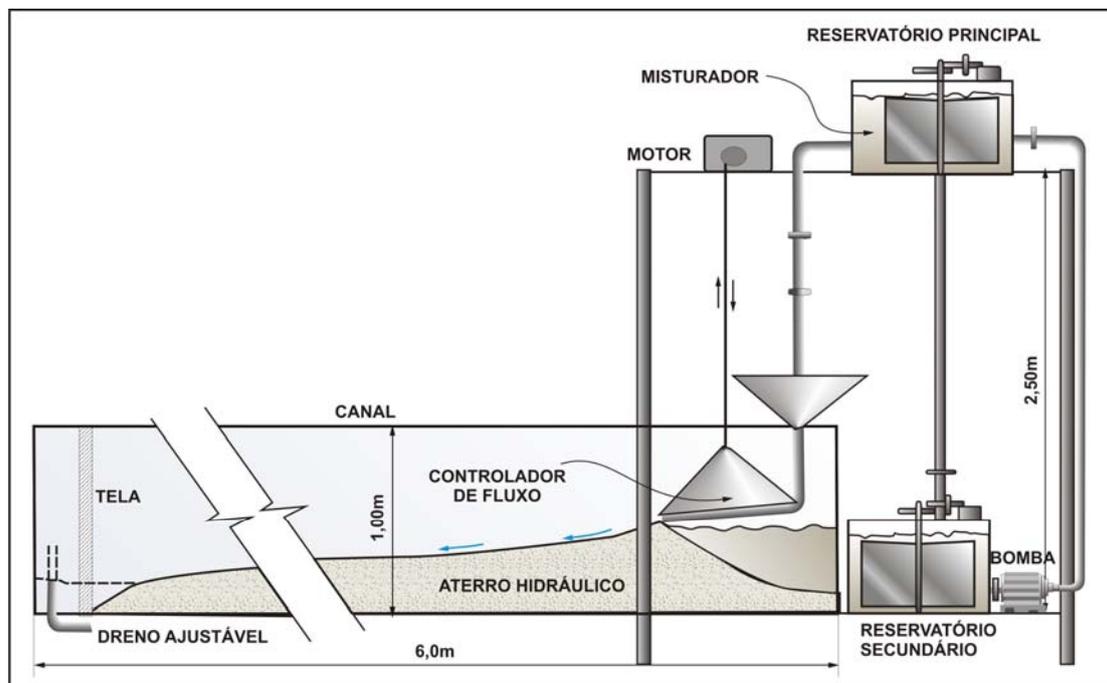


Figura 3.8 - Esquema do Equipamento de Simulação de Deposição Hidráulica (RIBEIRO, 2000).

O canal de deposição, construído em paredes de vidro temperado de 10 mm de espessura, possui 6,0 m de comprimento, 0,40 m de largura e 1,00 m de altura, possibilitando visualizar o processo de deposição ao longo do canal. A base do canal é constituída por uma chapa metálica a qual é revestida com uma manta de geotêxtil não-tecido de gramatura 600g/m², objetivando manter a estabilidade do material da camada pré-depositada no fundo e uniformizar o processo de drenagem na base do depósito.

O sistema é alimentado por dois reservatórios, um principal localizado na parte superior do canal e um outro secundário localizado ao lado do equipamento onde é feita a preparação da mistura. Os dois reservatórios são interligados por meio de um sistema composto por uma bomba de sucção especial para sólidos e válvulas para liberação do fluxo. Esse sistema garante a recirculação da mistura (rejeito e água) durante a realização do ensaio. Para manter as partículas em suspensão e a concentração da mistura constante, cada um dos reservatórios é dotado de um sistema de agitação, constituído de pás metálicas vazadas, rotacionando com velocidades controladas de 60 rpm.

A descarga da lama no canal é realizada por meio de um controlador de fluxo que direciona a lama paralela às paredes do canal, garantindo um fluxo uniforme e minimizando os possíveis efeitos provocados pelas paredes. O controlador de fluxo foi construído em acrílico transparente permitindo visualizar o processo de descarga em seu interior, sendo acoplado a um sistema de elevação que possibilita sua ascensão em função da velocidade de subida da crista do aterro.

Na porção final do canal existe um sistema de drenos para manter o nível da lagoa de decantação constante e eliminar a concentração excessiva de água. Este sistema é protegido por uma tela plástica revestida por ma manta de geotêxtil para contenção das partículas finas.

Para possibilitar os trabalhos no interior do canal de deposição (obtenção de amostras, realização de ensaios, nivelamento da camada de fundo etc.) sem tocar a praia evitando perturbar o depósito, foi acoplada ao mesmo uma plataforma móvel com uma palheta niveladora instalada na base. A plataforma pode mover-se livremente ao longo do canal por meio de rolamentos, e na posição vertical por meio de um sistema de ascensão automático. O arranjo geral do equipamento pode ser observado na Figura 3.9.



Figura 3.9 - Vista Geral do Equipamento (Ribeiro, 2000)

3.3 METODOLOGIA PARA A REALIZAÇÃO DE ENSAIO NO ESDH E OBTENÇÃO DE AMOSTRAS

3.3.1 ENSAIO DE SIMULAÇÃO DE DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA

O ensaio de Simulação de Deposição Hidráulica ainda não está normalizado, sendo a metodologia de ensaio adotada semelhante à descrita por outros autores que desenvolveram suas pesquisas no mesmo equipamento (Ribeiro, 2000 e Hernandez, 2005).

Sabe-se que as características dos aterros hidráulicos são fortemente influenciadas pelo regime de fluxo, que por sua vez é dependente da concentração da mistura e da vazão. As variações desses fatores podem formar estruturas sedimentares bastante distintas e conseqüentemente com diferentes características geotécnicas. Porém, para analisar o efeito da reconstituição de amostras de rejeito de minério de ferro na determinação de parâmetros geotécnicos e para a definição de uma metodologia para a retirada de amostras indeformadas no material arenoso depositado no canal do ESDH, foram realizados ensaios de simulação para um único valor de concentração e vazão, visando atingir os objetivos propostos.

Inicialmente, foram definidos os valores para a vazão e concentração a serem utilizados nas simulações do processo de deposição. Optou-se por adotar valores médios para esses dois

parâmetros em relação às simulações já realizados com o rejeito de minério de ferro pelos autores anteriormente citados. Desta forma, foi utilizada uma concentração da ordem de 15% e vazão da ordem de 15 l/min.

A primeira etapa de trabalho do programa experimental consistiu na limpeza e preparação do canal de deposição e limpeza e remoção de eventuais materiais nos demais componentes do equipamento, principalmente nos reservatórios principal e secundário. Como havia uma espessa camada do mesmo rejeito depositada no canal, optou-se por aproveitar parte do material para compor a camada de fundo. Após a retirada do excesso de material do canal, o rejeito correspondente à camada de fundo se encontrava bem revolvido sendo levemente densificado. A superfície da camada foi nivelada com auxílio da palheta niveladora instalada na base da plataforma móvel e com o uso régua niveladoras. A verificação do nivelamento foi realizada por meio de um nível de bolha, instalado em uma barra de madeira de largura aproximada a do canal, nas direções paralela e perpendicular as paredes de vidro. O nivelamento foi auxiliado pelo controle da espessura da camada de fundo (18 cm) através de leituras em régua graduadas pelo lado externo das paredes do canal. Com o equipamento pronto para realização dos ensaios procedeu-se a preparação da mistura.

A concentração adotada nesse programa experimental foi obtida a partir da relação entre os pesos de água e sólidos considerando a seguinte equação:

$$c = \frac{W_s}{W_t} \times 100\% \quad (3.1)$$

Onde:

c = concentração da mistura;

W_s = peso de sedimentos;

W_t = peso total ($W_s + W_w$);

W_w = peso da água.

Para facilitar a preparação da mistura, o peso da água foi inicialmente considerado igual a 800 kg, correspondente à capacidade parcial de um terceiro reservatório (auxiliar) que servia unicamente para acumular e liberar água para o sistema. Em função da concentração foi determinado o peso dos sólidos, sendo o solo pesado e separado previamente em sacos de aproximadamente 10 kg. É importante ressaltar que foram considerados os teores de umidade do material do rejeito para possíveis correções, porém, o material se encontrava praticamente

seco e as correções em função do teor de umidade natural foram muito pequenas. A Tabela 3.3 apresenta a umidade higroscópica encontrada para o rejeito total, assim como a quantidade de material necessária para a obtenção da concentração desejada.

Tabela 3.3 - Teor de umidade higroscópica do rejeito total e quantidade de material por ensaio.

Umidade Higroscópica (%)	Peso de sedimentos (kg)	Peso de água (kg)
0,09	141,3	800

Peso de sedimentos - considerando correção de umidade;

Peso específico da água (γ_w) adotado = 10 kN/m³

A mistura foi preparada no reservatório inferior (secundário) onde inicialmente foi adicionada a água por meio do reservatório auxiliar. Com o sistema de pás metálicas em rotação foram adicionados os materiais sólidos. Após a homogeneização completa da mistura, procedeu-se o acionamento da bomba de sucção e abertura das válvulas para liberação do fluxo para o reservatório principal localizado na parte superior do equipamento. O sistema de bombeamento promove a recirculação da polpa entre os dois reservatórios e mantém o nível de material constante no reservatório principal. A recirculação da mistura associada ao processo de rotação das pás metálicas existente nos dois reservatórios garante a manutenção das partículas sólidas em suspensão.

Após a estabilização da concentração nos reservatórios a vazão de descarga foi ajustada com auxílio das válvulas de descarga na saída do reservatório principal e posteriormente descartadas no canal por meio do controlador de fluxo. A velocidade de ascensão do controlador de fluxo foi ajustada visando garantir uma deposição constante sempre próxima à superfície do aterro. A verificação da vazão de descarga foi realizada utilizando um recipiente de volume conhecido (Becker de 2,0 l), sendo cronometrado o tempo necessário para seu enchimento (8 s). Esse procedimento foi repetido em intervalos de tempo para verificar e controlar a vazão, que se mostrou pouco variável, porém, estável em torno de 15 l/min, sendo realizados pequenos ajustes nas válvulas de descarga para garantir a vazão desejada.

Foram coletados materiais na saída do tubo de descarga em intervalos de tempo ao longo do ensaio para a verificação da concentração. Esse parâmetro apresentou variações em torno de 4% nos momentos iniciais e finais do processo de deposição, mantendo-se estável em torno de 15% nos demais intervalos de realização do ensaio. Esse fato poderia ser justificado pelas

altas concentrações de sólidos nas tubulações que descarregavam a lama no controlador, dificultando o fluxo e possivelmente devido à variação do nível de material no reservatório secundário, alterando o desempenho dos misturadores.

Outro fator que mereceu atenção foi o sistema de drenagem, onde se teve um cuidado especial para manter o sistema trabalhando com eficiência, permitindo a deposição subaquática somente no trecho final do canal de deposição.

Para obtenção das amostras indeformadas em um trecho representativo da praia de deposição formada, conforme será detalhado no item 3.3.2, foram realizados 5 ensaios de simulação de deposição hidráulica, sendo dois duplos e um simples, cada ensaio correspondente a um volume de 800 l de água. O objetivo era obter uma camada mínima de 10 cm de espessura (altura da amostra indeformada), no ponto situado a aproximadamente 3,0 m do ponto de descarga (Figura 3.10).

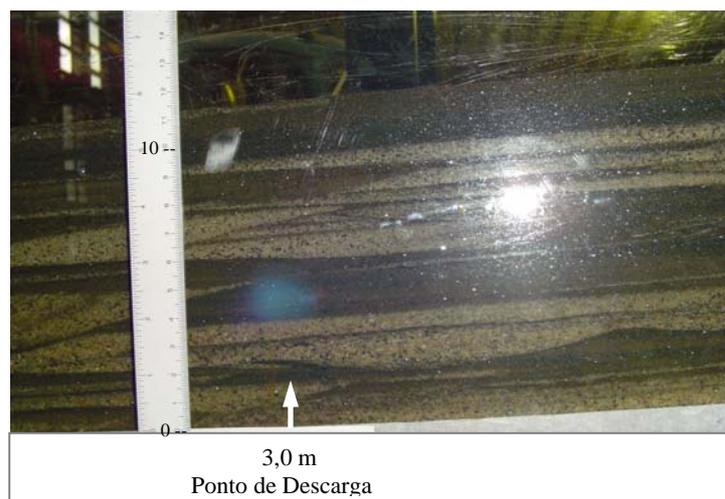


Figura 3.10 - Detalhe da altura do depósito à distância de 3,0 m do ponto de descarga

Nos ensaios duplos foi necessário o reabastecimento dos reservatórios. Desta forma, o ensaio era paralisado por um pequeno intervalo de tempo, necessário para a preparação e homogeneização da mistura e conseqüente restabelecimento das condições iniciais, com a liberação do fluxo para o sistema. Finalizado o ensaio, o canal era deixado em repouso, para preparação de novos materiais devidamente pesados e embalados em sacos de aproximadamente 10 kg para o ensaio seguinte. Os demais ensaios de deposição mencionados foram realizados sobre a praia já formada.

Atingida a camada de altura aproximada de 10 cm de espessura a 3,0 m do ponto de descarga, o canal de deposição foi deixado em repouso por aproximadamente 24 h para permitir a drenagem do excesso de água na praia e garantir boas condições de amostragem.

Vale ressaltar que a metodologia de ensaio empregada seguiu o proposto por Ribeiro (2000) e algumas adaptações propostas por Hernandez (2005).

3.3.2 OBTENÇÃO DE AMOSTRAS INDEFORMADAS

As amostras foram coletadas ao longo do canal do ESDH em quatro pontos pré-fixados, espaçados de aproximadamente 1,0 m, a partir do ponto inicial de descarga. Para cada ponto foram coletadas três amostras indeformadas para realização de ensaios triaxiais, e suas respectivas amostras deformadas para realização dos ensaios de caracterização geotécnica. A Figura 3.11 ilustra os pontos de coleta das amostras no canal de deposição do ESDH. Estes pontos foram selecionados visando mapear e analisar as possíveis variações estruturais do depósito em função do processo de segregação hidráulica.

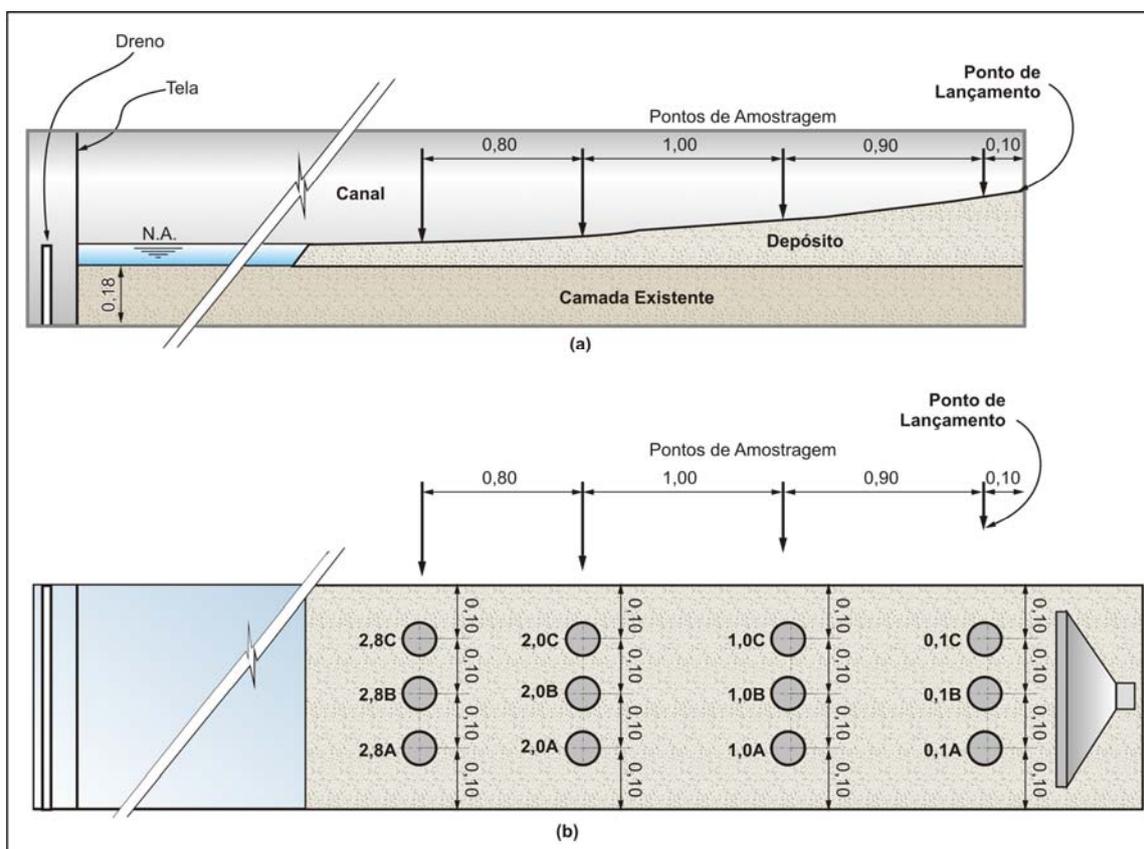


Figura 3.11 - Esquema dos pontos de obtenção das amostras no Canal do ESDH: (a) Seção longitudinal; (b) Planta.

A definição do número de amostras por linha de amostragem foi função da largura do canal (40 cm) e do diâmetro do amostrador (4,7 cm), sendo estabelecida uma distância mínima das paredes do canal para evitar possíveis interferências da mesma no fluxo de sedimentos. Além disso, foi considerado, também, um espaçamento entre os pontos de coleta para garantir a trabalhabilidade e a obtenção de material deformado em quantidade suficiente para os ensaios de caracterização geotécnica. Desta forma, foi possível a retirada de apenas três amostras por linha de amostragem.

Para retirada das amostras indeformadas foi utilizado um cilindro metálico bi-partido de paredes finas com a extremidade biselada. Este cilindro, projetado especialmente para esta finalidade, possui diâmetro interno aproximado, altura e espessura de 47, 100 e 1,2 mm, respectivamente. O diâmetro e a altura foram definidos considerando as dimensões da base da célula do equipamento triaxial e as paredes delgadas do amostrador foram adotadas visando minimizar o efeito do amolgamento do corpo de prova durante o processo de amostragem. A Figura 3.12, apresenta um esquema do amostrador utilizado para obtenção das amostras indeformadas.

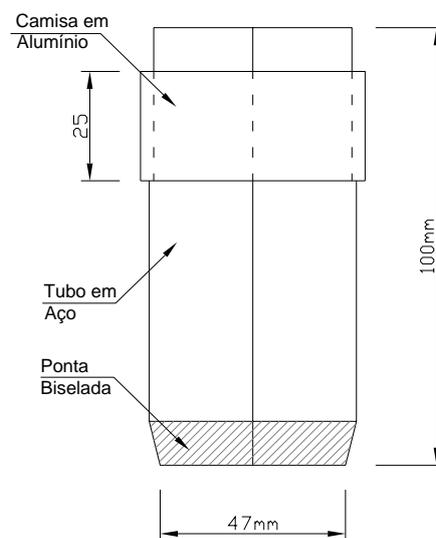


Figura 3.12 - Molde bipartido para obtenção de amostras indeformadas

A metodologia para obtenção das amostras indeformadas pode ser descrita de forma sucinta pelas seguintes etapas: preparação e nivelamento da região do canal a ser amostrada; posicionamento dos cilindros e desbaste lateral do corpo de prova; cravação cuidadosa do cilindro; retirada das amostras do ESDH; embalagem, identificação e acondicionamento das amostras obtidas em câmara úmida.

Inicialmente, procedeu-se a preparação da região do canal a ser amostrada de forma a possibilitar os trabalhos de talhagem dos corpos de prova. Esta etapa consistiu na abertura de duas valas situadas antes e após a região definida para a retirada do conjunto de três amostras para a realização dos ensaios triaxiais (Figura 3.13a). A largura das valas foi convencionada igual à aproximadamente 10 cm, com o intuito de gerar uma cavidade que favorecesse o processo de obtenção das amostras indeformadas. Estas valas objetivaram também, minimizar a destruição do depósito formado, uma vez que poderia ser necessária a obtenção de outras amostras em uma região bem próxima, caso houvesse perda de algum corpo de prova.

Após a abertura das valas os cilindros bi-partidos foram posicionados em linha para delimitar a área em redor de cada amostra (Figura 3.13b). Na seqüência foi realizado o desbaste lateral da região do cilindro, eliminando o material em torno da região onde seria obtido o corpo de prova (Figura 3.13c e d). O processo de desbaste lateral associado à utilização de um cilindro de paredes finas foi definido com o intuito de minimizar as perturbações provocadas pelo processo de cravação.

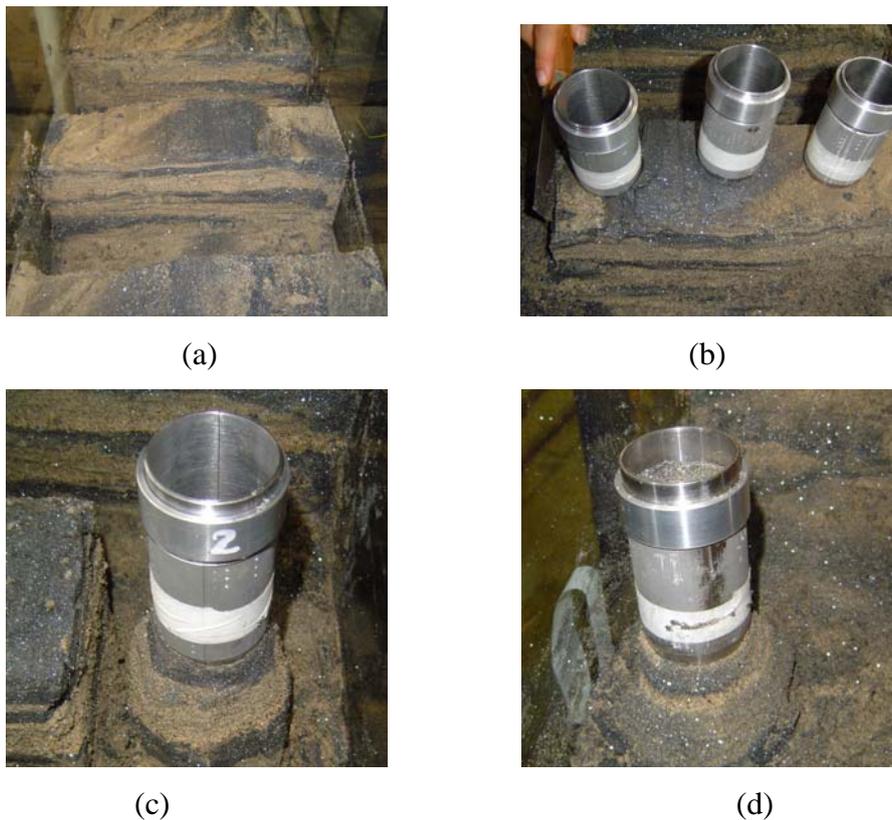


Figura 3.13 - Processo de obtenção das amostras indeformadas: (a) Preparação do canal; (b) Posicionamento dos cilindros em um dos pontos de amostragem; (c) e (d) Desbaste lateral do corpo de prova.

O desbaste lateral seguido da cravação foi cuidadosamente realizado até que o material no interior do cilindro se apresentasse à aproximadamente 5 mm acima da borda do cilindro, sendo realizado in situ o corte para o nivelamento do topo da amostra (Figura 3.14a). Após o nivelamento da parte superior do cilindro o mesmo foi retirado do canal de deposição (Figura 3.14b), sendo colocado sobre uma base lisa de acrílico, permitindo inverter o sentido do corpo de prova, sem danificar a parte superior, para a realização do nivelamento da base da amostra (Figura 3.14c).



(a)



(b)



(c)

Figura 3.14 - Extração e nivelamento do corpo de prova: (a) Nivelamento do topo do corpo de prova; (b) Retirada da amostra do ESDH; (c) Nivelamento da base do corpo de prova.

Após a extração da amostra indeformada, a mesma foi devidamente embalada em saco plástico hermeticamente fechado (Figura 3.15a), identificada e acondicionada em recipiente de isopor (Figura 3.15b). A adoção do isopor visou proporcionar o transporte das amostras coletadas no ESDH ao Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília, sem que houvesse troca de temperatura com o ambiente e, conseqüente perda de umidade. Imediatamente após extração foram realizados ensaios para a determinação do teor de

umidade e os corpos de prova obtidos foram armazenados em câmara úmida até o momento de serem utilizados nos ensaios triaxiais.



Figura 3.15 - Embalagem, identificação e acondicionamento dos corpos de prova: (a) Embalagem; (b) Identificação e acondicionamento.

As características estruturais típicas do processo de deposição, tais como, estratificações, acamamentos etc., reproduzidos pelas amostras indeformadas, podem ser observados na Figura 3.16.

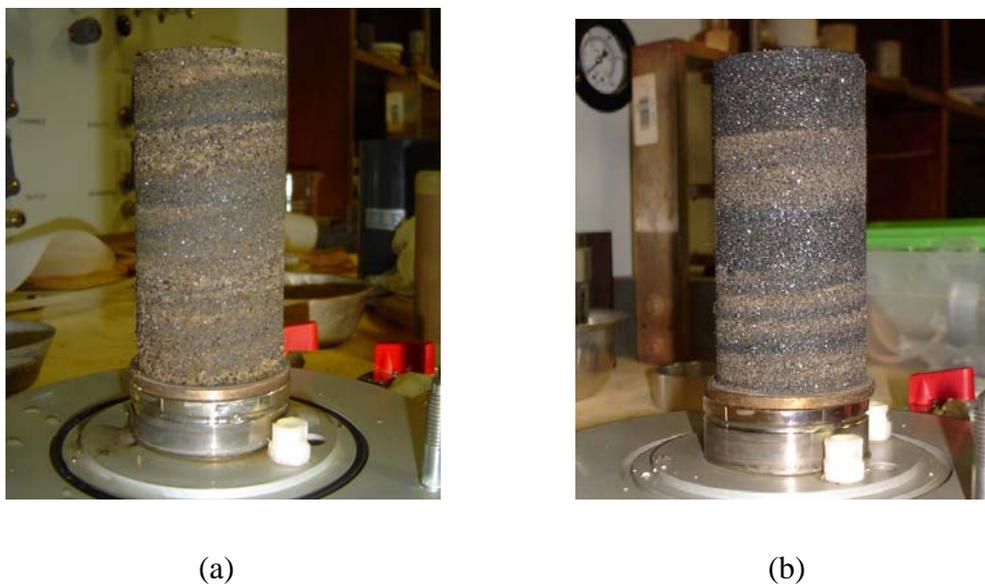


Figura 3.16 - Amostra indeformada para realização dos ensaios triaxiais: (a) 2,8 m do ponto de descarga; (b) 0,1m do ponto de descarga.

Para a identificação das amostras adotou-se um código baseado na distância de coleta em relação ao ponto de lançamento e na ordem de retirada das amostras no canal de deposição.

Desta forma, os algarismos caracterizam o ponto de coleta, em termos de distância ao ponto de descarga no canal de deposição do ESDH e a letra final da identificação corresponde a seqüência de retirada das amostras. Tomando com base o sentido do fluxo no ESDH, as letras A, B e C se referem às amostras extraídas da lateral esquerda, centro e lateral direita, respectivamente. Com relação à realização dos ensaios triaxiais, as amostras caracterizadas como A, B e C foram ensaiadas nos níveis de tensões de 50, 100 e 200 kPa, respectivamente. A identificação adotada pode ser visualizada na Figura 3.11, apresentada anteriormente.

3.3.3 AMOSTRAS DEFORMADAS E PROCESSO DE RECONSTITUIÇÃO

As amostras deformadas foram coletadas para realização dos ensaios de caracterização e para a reconstituição de corpos de provas a serem utilizados comparativamente nos ensaios triaxiais.

Durante o processo de obtenção das amostras indeformadas foi verificado a possibilidade de ocorrência de materiais com características distintas, principalmente no que se refere a porcentagem de ferro e granulometria para amostras localizadas em regiões equidistantes do ponto de lançamento. As características deposicionais formadas no canal do ESDH serão discutidas no Capítulo 5, porém, cabe comentar que foi verificada a presença de estratificações com concentrações de ferro intercaladas por faixas de partículas de quartzo. Estas estratificações não se mostraram uniformes ao longo da seção transversal sendo evidenciadas regiões com maiores teores de ferro. Além disso, considerando as diferenças granulométricas entre os minerais de quartzo e ferro, podem ocorrer, também, diferentes características granulométricas. A Figura 3.17 ilustra esta situação onde se observa uma coloração mais escura, correspondente às partículas de ferro, na lateral direita em relação às demais regiões da seção apresentada.

Neste contexto, a idéia inicial para a coleta de amostras deformadas era a extração de um único material representativo para cada conjunto de três amostras indeformadas. Contudo, diante das variações deposicionais observadas, foi convencionado a retirada de material deformado para cada amostra indeformada obtida pela metodologia descrita no item 3.3.2, visando uma melhor aproximação das características geotécnicas dessas amostras durante o processo de reconstituição. Desta forma, durante o desbaste lateral do corpo de prova indeformado todo material retirado era recolhido, acondicionado em sacos plásticos bem vedados e identificados.



Figura 3.17 - Estratificações ocorridas na região a 2,0 m do ponto de descarga, indicando a possível variação do teor de ferro ao longo da seção transversal

Para moldar os corpos de prova, a partir das amostras deformadas para serem utilizadas no ensaio triaxial drenado, foi adotada uma metodologia específica de reconstituição. Esta metodologia teve por objetivo criar condições de repetibilidade, visto que era necessário um procedimento padrão para subsidiar a comparação do comportamento entre amostras deformadas e indeformadas. Além disso, era importante tentar reproduzir as condições semelhante às encontradas no canal de deposição de ESDH, como a densidade e o teor de umidade. Neste sentido, foi empregada a técnica de compactação dinâmica com uso de soquete ($D = 23 \text{ mm}$; peso = 257 g) em material úmido, precedida por compactação com auxílio de haste. Esta técnica procurou estabelecer a altura de queda, o número de golpes e a intensidade dos mesmos para alcançar a densidade desejada, sendo a metodologia testada até se conseguir uma repetibilidade na moldagem. Somente a partir daí foram moldados os corpos de prova a serem utilizados nos ensaios triaxiais.

No processo de reconstituição utilizou-se primeiramente o rejeito seco ao ar em quantidades determinadas entre 400 e 500 g. Para cada amostra foi adicionado água suficiente para alcançar a umidade igual a encontrada no ESDH para a amostra indeformada considerada equivalente. O material (rejeito + água) foi homogeneizado em saco plástico e deixado em repouso em câmara úmida por aproximadamente 24 h para obter uniformidade no teor de umidade. A quantidade de material foi sempre superior à necessária para preencher os moldes nas densidades especificadas possibilitando a coleta de material para determinação e verificação do teor de umidade.

O cilindro de compactação foi o mesmo utilizado para a obtenção das amostras indeformadas e a compactação dinâmica foi realizada em camadas, sendo definido a compactação em quatro camadas de 2,5 cm. Como a densidade específica natural (ρ) e volume do cilindro já eram conhecidos, foi determinada a massa úmida necessária para a confecção do corpo de prova, sendo a mesma dividida em quatro porções iguais para a composição das camadas. O procedimento de transferência das frações de rejeito para o molde bipartido foi realizado com o auxílio de uma pequena colher que possibilitou a deposição do material no fundo do molde evitando assim, os efeitos da segregação. A Figura 3.18 ilustra os equipamentos utilizados no processo de reconstituição e o processo de transferência das frações do rejeito.



(a)



(b)

Figura 3.18 - Equipamentos utilizados no processo de reconstituição (a) e detalhe da transferência do rejeito com auxílio da colher (b)

Para atingir a densidade desejada, primeiro foi realizada a compactação com auxílio de haste que iniciou o processo de densificação e proveu o nivelamento da superfície para a compactação com uso de soquete (Figura 3.19). A cada camada foi realizada a verificação da altura com paquímetro para aferir a densidade da camada, seguida da escarificação para permitir um bom entrosamento e homogeneidade com a camada seguinte.



Figura 3.19 - Compactação com auxílio de haste (a) e posterior compactação com soquete (b)

Depois de confeccionado, o conjunto corpo de prova e cilindro, era pesado e em seguida levado para a prensa triaxial para realização do ensaio. Com o excedente do material utilizado no processo de compactação foi determinado o teor de umidade. Caso fossem verificadas anormalidades no corpo de prova, tanto no processo de compactação quanto no momento de extração do cilindro, o mesmo era descartado e confeccionado novamente.

No processo de reconstituição adotado, as características estruturais típicas do processo de deposição não foram reproduzidas, sendo o perfil apresentado pelas amostras homogêneo (Figura 3.20).



Figura 3.20 - Amostra reconstituída para realização de ensaios triaxiais – Amostra 0,1^a

4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO

A técnica de aterro hidráulico durante anos foi utilizada com projetos desenvolvidos por princípios intuitivos e baseados em especificações relacionadas às experiências anteriores, sendo reportado na literatura inúmeros insucessos. Atualmente, muitos estudos têm sido desenvolvidos visando melhorar a qualidade dos projetos e métodos construtivos associados a este tipo de estrutura. O controle geotécnico da construção de barragens via aterro hidráulico passa necessariamente pelo conhecimento dos parâmetros de resistência dos materiais de construção que por sua vez são dependentes de suas características geotécnicas, como tipo de mineral, distribuição granulométrica, porosidade etc.

A possibilidade de associar os parâmetros de resistência ao processo de deposição de rejeitos foi a base do programa experimental proposto. Neste contexto, foi estabelecido um programa de ensaios triaxiais em amostras reconstituídas e em amostras indeformadas, obtidas via ensaios de simulação de deposição hidráulica em laboratório, para permitir a comparação dos parâmetros geomecânicos. A justificativa para a realização de ensaios em amostras granulares indeformadas de rejeito de minério de ferro depositadas hidraulicamente foi devido a impossibilidade de reconstituição das características estruturais típicas destas amostras de forma convencional em laboratório e, diante da importância de se conhecer em que essas características deposicionais podem afetar os parâmetros geomecânicos.

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios e as metodologias utilizadas para a caracterização do rejeito ao longo do canal de deposição hidráulica e para a determinação dos parâmetros de resistência.

4.1 TEOR DE UMIDADE, MASSA ESPECÍFICA NATURAL E MASSA ESPECÍFICA APARENTE SECA

A presença de água em condições de não saturação, em solo granular, gera uma parcela de resistência ao cisalhamento devido à tensão capilar da água que atrai as partículas. Este ganho

de resistência não só é temporário, desaparecendo quando o solo é saturado ou totalmente seco, como tem pequeno valor e pouco influi na resistência total. Este fenômeno, denominado coesão aparente, foi quem possibilitou a obtenção das amostras indeformadas por meio de uma metodologia simples de cravação de cilindro e desbaste lateral de solo sem a necessidade de empregar técnicas mais avançadas e complexas como o congelamento de solos.

Assim, visando preservar todos os parâmetros físicos, imediatamente após a retirada das amostras indeformadas do canal de deposição hidráulica, foram determinados os teores de umidade e a massa de solo úmido contida no cilindro bi-partido utilizado no processo de cravação. Com esses dados foram então determinados a massa específica natural (ρ) e a massa específica aparente seca (ρ_d) das amostras indeformadas coletadas no ESDH que, juntamente com o teor de umidade, nortearam o processo de reconstituição. A Tabela 4.1 apresenta as características das amostras indeformadas e também os valores calculados para o índice de vazios (e) e para a porosidade (n), sendo o valor da massa específica dos grãos, utilizado na obtenção desses índices, apresentado no item 4.2.

Tabela 4.1 - Características das amostras indeformadas

Amostra	w (%)	ρ (g/cm³)	ρ_d (g/cm³)	e	n (%)
0,1A	12,1	2,36	2,11	0,73	42,3
0,1B	12,4	2,51	2,24	0,73	42,3
0,1C	12,7	2,31	2,05	0,79	44,0
1,0A	14,9	2,29	1,99	0,74	42,5
1,0B	12,2	2,50	2,23	0,68	40,5
1,0C	12,7	2,13	1,89	0,70	41,1
2,0A	15,2	2,09	1,82	0,71	41,5
2,0B	14,6	2,10	1,83	0,62	38,2
2,0C	15,4	1,92	1,66	0,75	42,8
2,8A	12,6	2,06	1,83	0,63	38,6
2,8B	10,7	1,89	1,71	0,67	40,0
2,8C	14,3	2,04	1,79	0,61	37,9

Conforme discutido no item 3.3.3, o processo de reconstituição utilizou rejeito seco ao ar sendo adicionada água para a obtenção da umidade desejada e, realizado a compactação para atingir uma porosidade semelhante a da amostra indeformada. A Tabela 4.2 apresenta as características de moldagem das amostras reconstituídas.

Tabela 4.2 - Características de moldagem das amostras reconstituídas

Amostra	w (%)	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n
0,1A	11,9	2,36	2,11	0,73	42,4
0,1B	12,3	2,50	2,23	0,74	43,5
0,1C	12,6	2,31	2,05	0,79	44,0
1,0A	14,7	2,27	1,98	0,75	42,8
1,0B	12,0	2,49	2,22	0,69	40,8
1,0C	12,4	2,12	1,88	0,71	41,3
2,0A	15,2	2,10	1,82	0,71	41,5
2,0B	14,7	2,10	1,83	0,62	38,2
2,0C	15,1	1,92	1,67	0,74	42,4
2,8A	12,5	2,05	1,82	0,64	38,9
2,8B	10,0	1,88	1,71	0,67	40,0
2,8C	14,4	2,02	1,77	0,63	38,5

Como observado na Tabela 4.2 foram obtidos valores bastante semelhantes aos das amostras indeformadas. Neste contexto, considerou-se satisfatório o processo de reconstituição dos corpos de prova para realização dos ensaios triaxiais.

4.2 MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS E TEOR DE FERRO DO MATERIAL

O comportamento das areias tipicamente quartzozas é pouco influenciado pela variação da massa específica dos grãos (ρ_s), uma vez que a variação dessa característica geotécnica é muito pequena para este tipo de material. A massa específica dos grãos correspondente ao quartzo puro se encontra na faixa entre 2,6 e 2,7 g/cm³, valor comumente encontrado na literatura para a maioria dos solos estudados cuja composição mineralógica é bastante semelhante. No entanto, para os rejeitos de minério de ferro o ρ_s é bastante variável, sendo este comportamento função do teor ferro do rejeito e do processo de segregação hidráulica.

A hematita, o mineral de ferro típico do rejeito do Complexo de Água Limpa, possui um valor da massa específica dos grãos excessivamente mais alto que os apresentados pelos grãos de quartzo, sendo da ordem de 5,5 g/cm³. Esta característica apresenta uma influência direta no peso específico dos grãos do material do rejeito onde uma pequena variação no teor de ferro pode causar modificações significativas no valor da massa específica dos grãos desses materiais. Estudos têm demonstrado que o comportamento dos rejeitos, produto da extração de ferro, é influenciado pela variação da densidade real dos grãos, tendo em vista a grande

variabilidade desta característica geotécnica (Espósito, 1995; Espósito 2000; Lopes 2000). Para o rejeito da pilha do Monjolo, objeto de estudo nesta pesquisa, Espósito (2000), observou a evidência de uma relação linear crescente entre a massa específica dos grãos e o teor de ferro. Para a determinação do teor de ferro, Espósito (2000) realizou análises químicas por espectrometria de plasma de argônio induzido. A Figura 4.1 ilustra esta relação e a equação seguinte, proposta por Espósito (2000), relaciona estas duas grandezas:

$$\rho_s = 0,025 \text{ FE} + 2,60 \quad (4.1)$$

onde:

ρ_s = massa específica dos grãos do rejeito;

Fe = porcentagem de ferro em cada ponto amostrado.

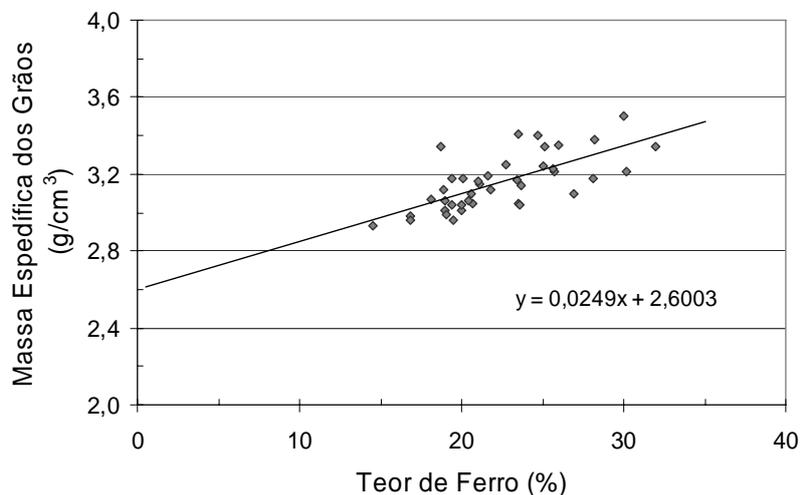


Figura 4.1 - Teor de ferro versus massa específica dos grãos – Dados Pilha do Monjolo (Espósito, 2000)

Santos (2004) realizou análises químicas adicionais nesse rejeito para a determinação do teor de ferro (método de redução por cloreto de titânio III) possibilitando verificar e reforçar a correlação proposta por Espósito (2000), ressaltando sua aplicabilidade no caso do rejeito oriundo da Pilha do Monjolo.

Hernandez (2002) e Presotti (2002) avaliaram a influência da variação do teor de ferro nos parâmetros de resistência verificando que o aumento do teor de ferro tende a aumentar o valor do ângulo de atrito efetivo. Esse fato reforça, mais uma vez, a importância de conhecer, ou ao menos estimar, a porcentagem de ferro presente nos materiais ensaiados.

Para a determinação da massa específica dos grãos foram realizados ensaios conforme especificação da Norma Brasileira NBR 6508 (ABNT, 1984b) e o teor de ferro foi obtido por meio da Equação 4.1. Os valores obtidos para os doze pontos ensaiados são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Massa específica dos grãos (ρ_s) e teor de ferro (%Fe) das amostras extraídas ao longo do canal do ESDH

Amostra	ρ_s (g/cm³)	Fe (%)
0,1A	3,66	42,4
0,1B	3,88	51,2
0,1C	3,66	42,4
1,0A	3,46	34,4
1,0B	3,75	46,0
1,0C	3,21	24,4
2,0A	3,11	20,4
2,0B	2,96	14,4
2,0C	2,90	12,0
2,8A	2,98	15,2
2,8B	2,85	10,0
2,8C	2,88	11,2

Cabe aqui ressaltar que foram utilizadas as amostras deformadas extraídas do ESDH para obtenção da massa específica dos grãos, sendo os parâmetros obtidos referentes as amostras indeformadas e reconstituídas. As tabelas com os resultados desses ensaios se encontram no Apêndice A.

4.3 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

O conhecimento das características granulométricas de um material é de grande importância para a realização de qualquer trabalho de engenharia, visto que o tamanho e a distribuição das partículas condicionam um grande número de propriedades geotécnicas como a resistência, a permeabilidade, as características de compactação, entre outros. Estudos com rejeito de minério de ferro revelaram a influência desta característica nos parâmetros de resistência, sendo verificados aumento no valor do ângulo de atrito com o crescimento do valor de D_{50} do material. Neste contexto, o conhecimento da granulometria do material utilizado nesta

pesquisa, pode ser de grande importância para a compreensão do comportamento global deste rejeito.

Para a determinação da distribuição granulométrica foram realizados ensaios de análise granulométrica em todas as amostras deformadas coletadas no ESDH, considerando as recomendações preconizadas pela Norma Brasileira, NBR 6457 (ABNT, 1986) para preparação das amostras e NBR 7181 (ABNT, 1984a) para o peneiramento. O processo de sedimentação foi substituído pela análise no granulômetro a laser, com base na boa correlação obtida entre o método convencional de peneiramento e sedimentação e a utilização do granulômetro a laser para o rejeito da Pilha do Monjolo, conforme apresentado na Figura 3.4 do capítulo anterior.

A Figura 4.2 apresenta as curvas granulométricas obtidas para as amostras coletadas a 2,0 m do ponto de descarga. Para este ponto verificou-se uma maior variação na granulometria entre as três amostras coletadas em linha. Os conjuntos de curvas granulométricas para os demais pontos amostrados se encontram no Apêndice B. A classificação granulométrica foi realizada segundo a Norma Brasileira NBR 6502 (ABNT, 1995).

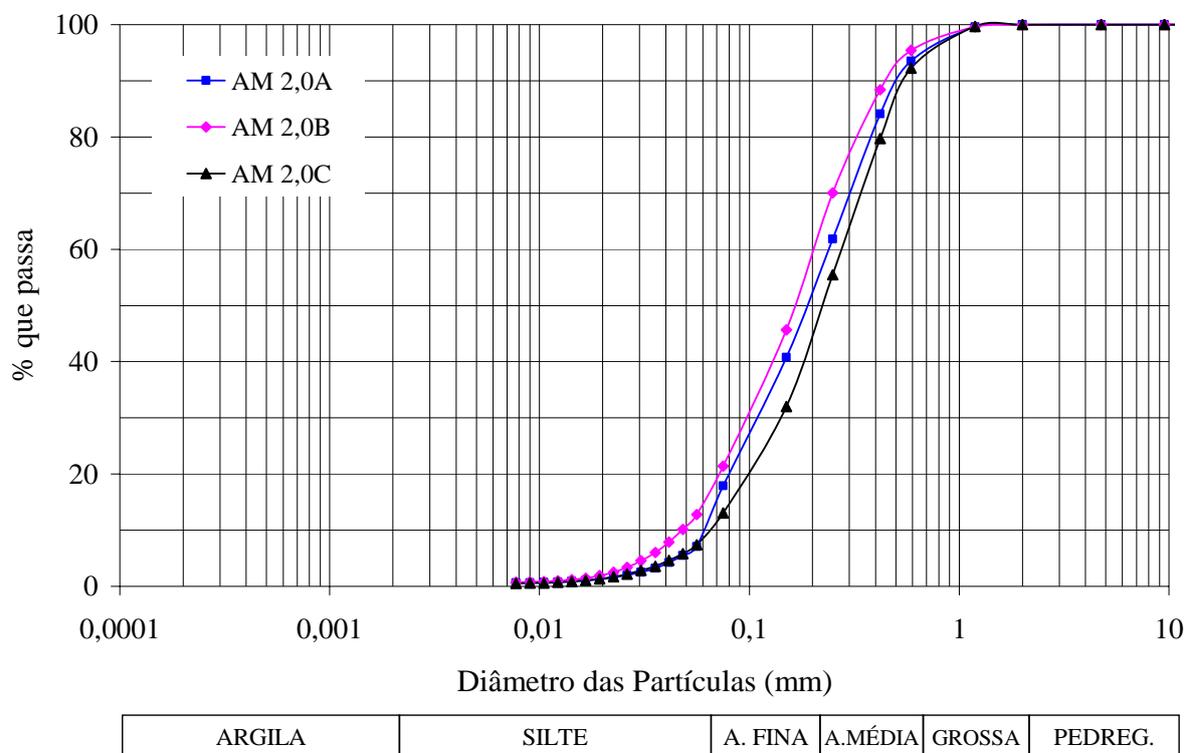


Figura 4.2 - Distribuição granulométrica das amostras a 2,0 m do ponto de descarga

A partir do conjunto de amostras relativas a cada ponto amostrado, foi determinada uma curva granulométrica média, visando facilitar a visualização do comportamento desta característica ao longo do canal. A Figura 4.3 apresenta as curvas médias obtidas ao longo do canal de deposição.

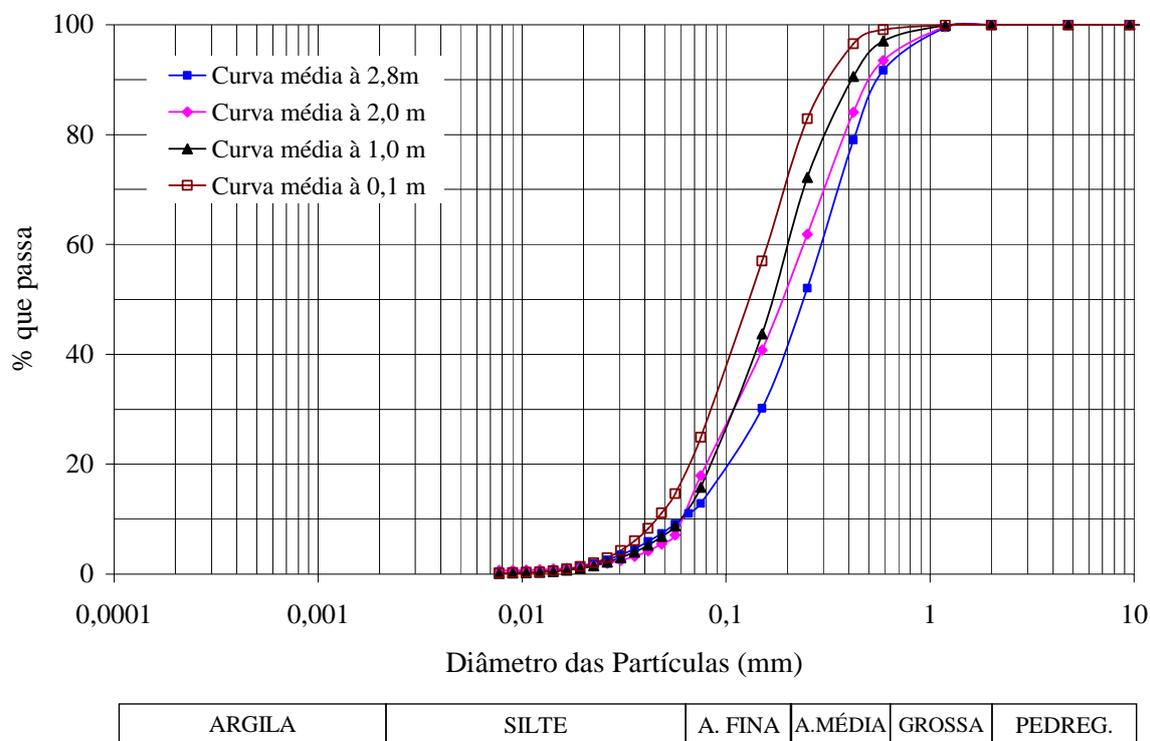


Figura 4.3 - Distribuição granulométrica média referente a cada região ao longo do Canal de deposição

Observando as curvas verifica-se uma maior concentração de finos próximo ao ponto de descarga e um acréscimo do diâmetro médio dos grãos na porção média do depósito. A Tabela 4.4 apresenta os parâmetros obtidos, a partir das curvas granulométricas, correspondente as amostras obtidas ao longo do canal de deposição.

Tabela 4.4 - Parâmetros obtidos das curvas granulométricas

Amostra	D ₁₀	D ₅₀	D ₆₀	D ₉₀	C _U
0,1A	0,055	0,130	0,160	0,305	2,82
0,1B	0,055	0,120	0,150	0,290	2,73
0,1C	0,047	0,130	0,160	0,305	3,30
1,0A	0,060	0,140	0,180	0,405	3,00
1,0B	0,058	0,160	0,200	0,405	3,45
1,0C	0,050	0,170	0,205	0,410	4,10

Continua...

Tabela 4.4 - Parâmetros obtidos das curvas granulométricas (*Continuação*)

Amostra	D₁₀	D₅₀	D₆₀	D₉₀	C_U
2,0A	0,060	0,170	0,220	0,500	3,67
2,0B	0,048	0,190	0,200	0,430	4,17
2,0C	0,062	0,210	0,270	0,520	4,35
2,8C	0,060	0,230	0,290	0,550	4,83
2,8B	0,070	0,250	0,305	0,600	4,36
2,8C	0,070	0,220	0,290	0,600	4,14

4.4 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA

Para a determinação dos parâmetros de resistência no rejeito de minério de ferro, tanto nas amostras representativas do processo de deposição hidráulica extraídas do ESDH (amostras indeformadas) quanto nas amostras homogêneas reconstituídas para os mesmos parâmetros das anteriores, foram realizados ensaios de compressão triaxial adensado drenado (CD) nas tensões de confinamento de 50, 100 e 200 kPa. Os corpos de prova foram saturados, adensados e cisalhados conforme os procedimentos sugeridos por (HEAD, 1986).

Os corpos de prova obtidos pelos métodos descritos nos itens 3.3.2 e 3.3.3 foram transferidos para a célula de compressão triaxial, respeitando as recomendações de colocação de pedras porosas e papel-filtro nas extremidades superiores e inferiores da amostra. Em seguida, o corpo de prova foi envolvido por uma membrana látex, fixada por anéis de borracha, garantindo assim a impermeabilização das amostras para etapas posteriores de saturação, adensamento e cisalhamento, respectivamente.

4.4.1 PROCESSO DE SATURAÇÃO DAS AMOSTRAS

Inicialmente realizou-se a percolação no corpo de prova, que consistiu na passagem de fluxo de água através da amostra no sentido da base para o topo, permitindo assim, eliminar parte do ar existente no solo. Para tal, foi utilizado gradiente de percolação compatível com o material ensaiado suficiente para favorecer o processo de percolação sem, contudo, gerar perturbações na estrutura do material. O gradiente de percolação utilizado para todas as amostras foi de aproximadamente 2, correspondente a altura de coluna d'água do becker contendo água destilada utilizado para alimentar o processo. Foi utilizada, também, uma pressão de confinamento ligeiramente superior ao gradiente aplicado (em torno de 4 kPa) para

garantir a estabilidade da amostra e o fluxo de água entre as partículas e não pelas paredes da membrana de látex. O fluxo era interrompido quando se atingia um volume de percolação igual ou superior ao volume da amostra medido através de uma proveta graduada.

Após esta fase, a saturação foi complementada por contra-pressão em estágios de 25 kPa, até atingir um valor máximo de 200 kPa. A verificação da saturação foi realizada com base na avaliação do parâmetro B de Skempton (1954), sendo considerado saturado os corpos de prova com o valor de B próximo de 1. De uma maneira geral, os valores do parâmetro B obtidos para todas as amostras de rejeito de minério de ferro ensaiadas variaram de 0,97 a 1,00.

4.4.2 ADENSAMENTO

Finalizado o processo de saturação as amostras foram adensadas isotropicamente, submetendo os corpos de prova às suas respectivas tensões confinantes de ensaio (50, 100 e 200 kPa), com drenagem pelo topo. Como se utilizou uma contrapressão (u_{cp}) de 200 kPa para todas as amostras de rejeito, a pressão de célula necessária para atingir as tensões confinantes especificadas foram acrescidas do valor de u_{cp} .

O acompanhamento da variação de volume dos corpos de prova durante esta fase foi realizado através de buretas eletrônicas graduadas conectadas à célula triaxial. O tempo de adensamento verificado foi inferior a 2 min sendo este parâmetro utilizado na definição da velocidade da fase de cisalhamento, conforme metodologia proposta por Head (1986), apresentada a seguir.

4.4.3 CISALHAMENTO DOS CORPOS DE PROVA

O cisalhamento foi realizado em uma prensa de deformação controlada. A velocidade de carregamento no ensaio triaxial drenado deve ser pequena para garantir boas condições de drenagem. Esta condição é satisfeita se 95% da poropressão que poderia se desenvolver durante o carregamento em condições não drenadas, se dissipasse durante o ensaio drenado.

Segundo Head (1986) a velocidade do cisalhamento é calculada em função da deformação referente à resistência de ruptura (ϵ_f), da altura inicial do corpo de prova (H_0) e do tempo mínimo para alcançar a ruptura (t_f). As expressões propostas por Head (1986) para a determinação do t_f para ensaios tipo CD em amostras sem drenos laterais (papel filtro

envolvendo a amostra) e para a determinação da velocidade de deformação do ensaio são apresentadas a seguir:

$$t_f = 0,85t_{100} \quad (4.2)$$

$$v = \frac{\varepsilon_f H_0}{100t_f} \quad (4.3)$$

Onde:

t_{100} = tempo necessário para completar 100% do adensamento;

v = velocidade do ensaio de cisalhamento;

t_f = tempo para atingir a resistência máxima;

H_0 = altura inicial do corpo de prova.

A determinação da taxa de deformação por esta metodologia requer a previsão da deformação correspondente á resistência máxima na ruptura, fortemente influenciada pela natureza do material. Para solos granulares, Head (1986) sugere valores típicos variando entre 5 e 7% para areias compactas e 15 a 20% para areias fofas.

As primeiras amostras ensaiadas foram as indeformadas, e a metodologia de obtenção da velocidade de cisalhamento mostrou-se difícil, considerando principalmente, que o estado de compactidade dos corpos de prova não pôde ser definido antes da realização do ensaio triaxial. Este fato ocorreu devido à necessidade de ensaiar as amostras indeformadas logo após a sua retirada do canal do ESDH visto que o material úmido de rejeito de minério de ferro se oxidava junto às paredes do amostrador projetado, dificultando o processo de retirada do cilindro bi-partido sem danificar a amostra. Desta forma, os ensaios para a determinação da massa específica dos grãos, distribuição granulométrica e o índice de densidade relativa foram realizados após os testes triaxiais nas amostras indeformadas.

Oliveira Filho (1987) e Presotti (2002) relatam também a dificuldade de obtenção da velocidade de carregamento segundo a proposta de Head (1986). Neste sentido, ambos autores adotaram uma metodologia considerando um tempo total para ocorrer uma deformação de 20% e assim estimar a velocidade em função do tempo total de ensaio compatível com a maioria dos solos de comportamento granular. Dentro deste contexto também foi estimada a velocidade de ensaio, sendo considerado um tempo total de 5 h para obter 20% de deformação no corpo de prova. A velocidade estimada e adotada nos ensaios

triaxiais foi de 0,07 mm/min. É importante ressaltar que esta velocidade foi inferior às adotadas por Oliveira Filho (1987) e Presotti (2002), e garantiram boas condições de drenagem sem geração de poropressão.

Todos os ensaios utilizaram um sistema de aquisição automática dos dados, para o registro dos deslocamentos verticais, das variações volumétricas e da carga aplicada (Figura 4.4).

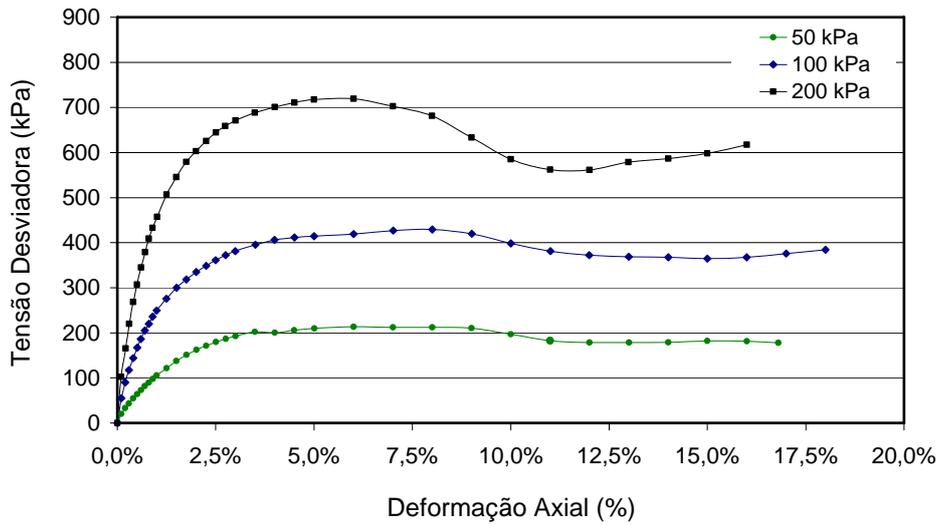
A fase de cisalhamento foi conduzida até atingir uma deformação axial aproximada de 20%, correspondente a uma variação de altura da amostra da ordem de 20 mm. Os dados coletados foram processados via planilha de cálculo sendo geradas as curvas tensão vs. deformação axial e variação volumétrica vs. deformação axial para as diferentes tensões confinantes aplicadas. Os dados obtidos permitiram a construção das envoltórias características para a determinação dos parâmetros de resistência e análise do comportamento das amostras.



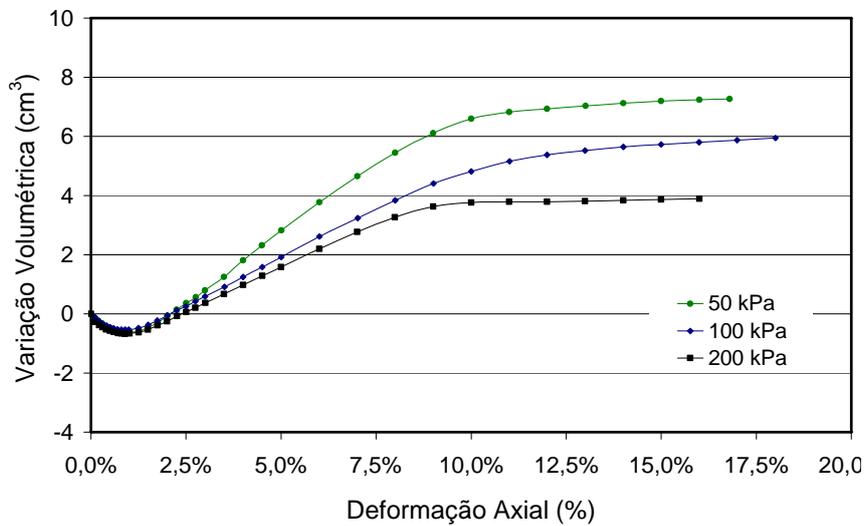
Figura 4.4 - Vista geral do equipamento triaxial com sistema automático de aquisição de dados

4.4.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS TRIAXIAIS DRENADOS

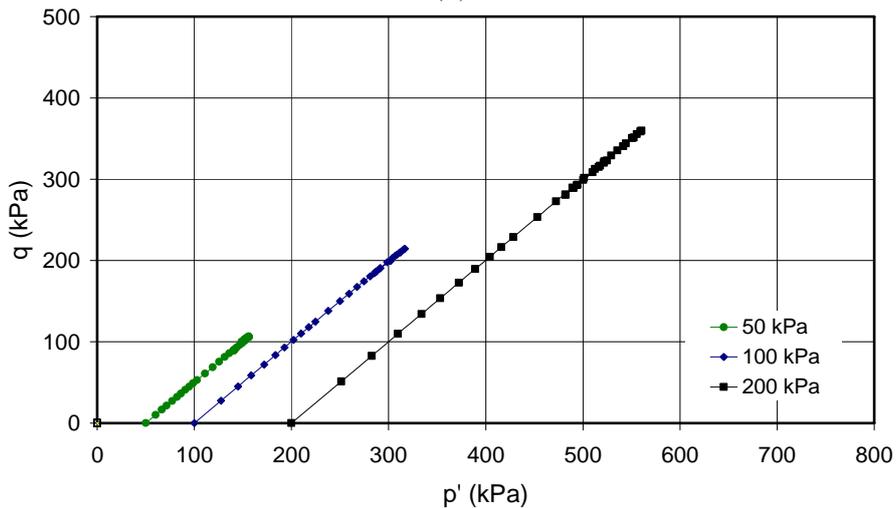
Os resultados dos ensaios triaxiais drenados (CD) são apresentados em termos de tensão desviadora, variação volumétrica, trajetória de tensões totais e círculos de Mohr com sua respectiva envoltória de ruptura. As Figuras 4.5 e 4.6 ilustram o comportamento obtido para um dos pontos amostrados no canal do ESDH. Os demais gráficos gerados são apresentados no Apêndice C (amostras indeformadas) e Apêndice D (amostras reconstituídas).



(a)

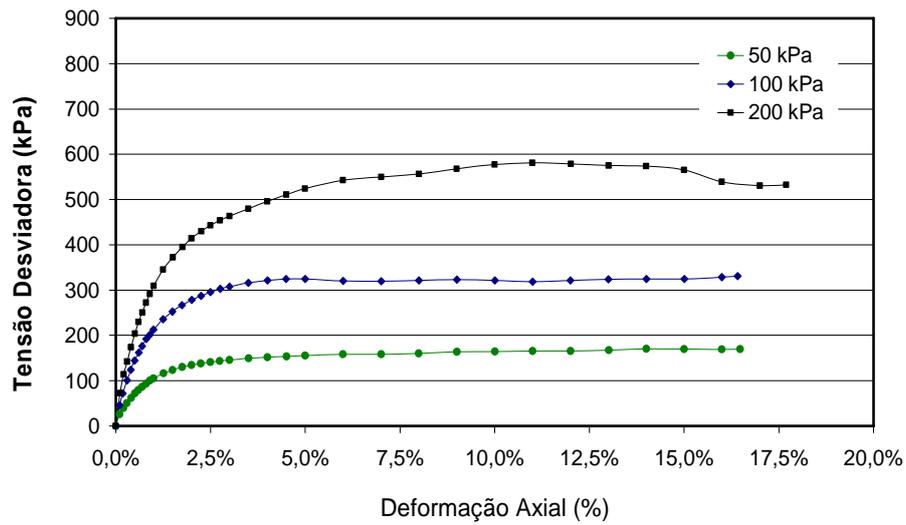


(b)

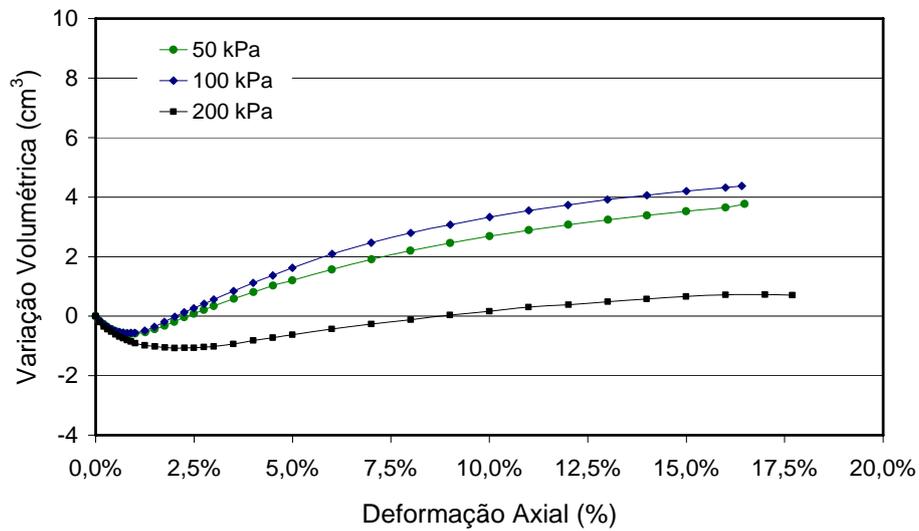


(c)

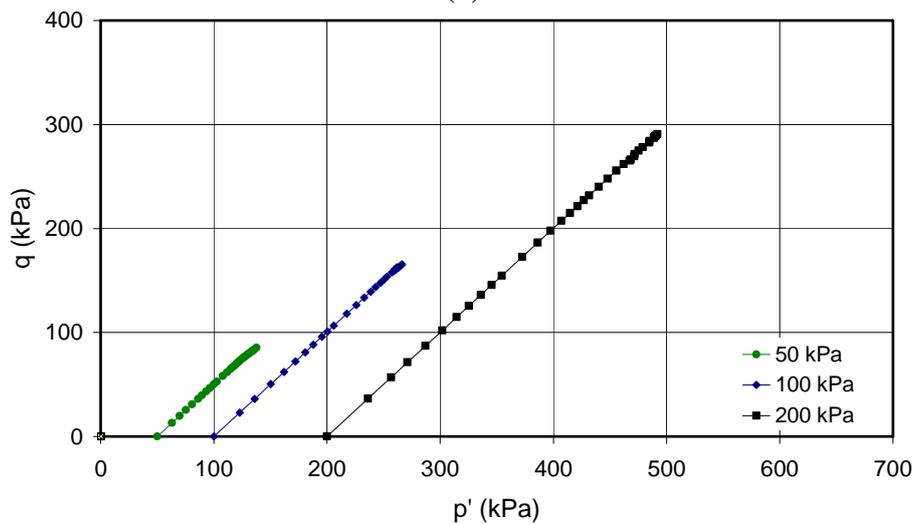
Figura 4.5 - Amostra indeformada 1,0 m do ponto de descarga (a) Curva tensão vs deformação (b) Variação volumétrica vs deformação e (c) Trajetórias de Tensões



(a)



(b)



(c)

Figura 4.6 - Amostra reconstituída 1,0 m do ponto de descarga (a) Curva tensão vs deformação (b) Variação volumétrica vs deformação e (c) Trajetórias de Tensões

Com base no critério de ruptura de Mohr Coulomb ($\tau = c' + \sigma' \text{tg}\phi'$), foram determinados os parâmetros de resistência das amostras reconstituídas e indeformadas. Apesar da composição granular apresentada pelos rejeitos de minério de ferro, o ajuste dos pontos na envoltória de ruptura foi realizado com interpolação livre, sem atribuir a priori valor nulo para o intercepto de coesão principalmente as amostras indeformadas. Alguns pontos ensaiados apresentaram valores significativos para o intercepto de coesão. A Tabela 4.5 apresenta os resultados obtidos para os parâmetros de resistência e as Figuras 4.7 e 4.8 ilustram as envoltórias de ruptura obtidas para as amostras situadas a 1,0 m do ponto de lançamento no ESDH.

Tabela 4.5 - Parâmetros de resistência dos rejeitos de minério de ferro

Ponto de amostragem	n _{média}	Amostra Indeformada				Am. Reconstituída	
		Parâmetros Pico		Parâmetros cv		Parâmetros cv	
		ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)
0,1	0,43	38,3	10,0	38,2	0,8	35,1	2,6
1,0	0,42	38,8	14,0	37,3	3,6	35,3	8,7
2,0	0,41	38,9	16,7	38,9	2,7	36,0	8,0
2,8	0,39	41,6	6,1	38,8	4,5	37,3	0,0

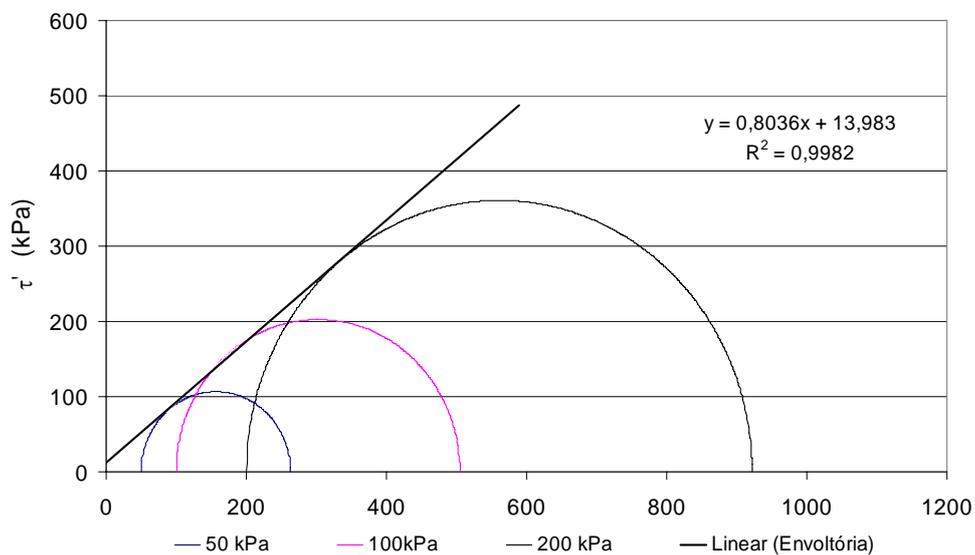


Figura 4.7 - Envoltória de ruptura da amostra indeformada obtida a 1,0 m do ponto de descarga

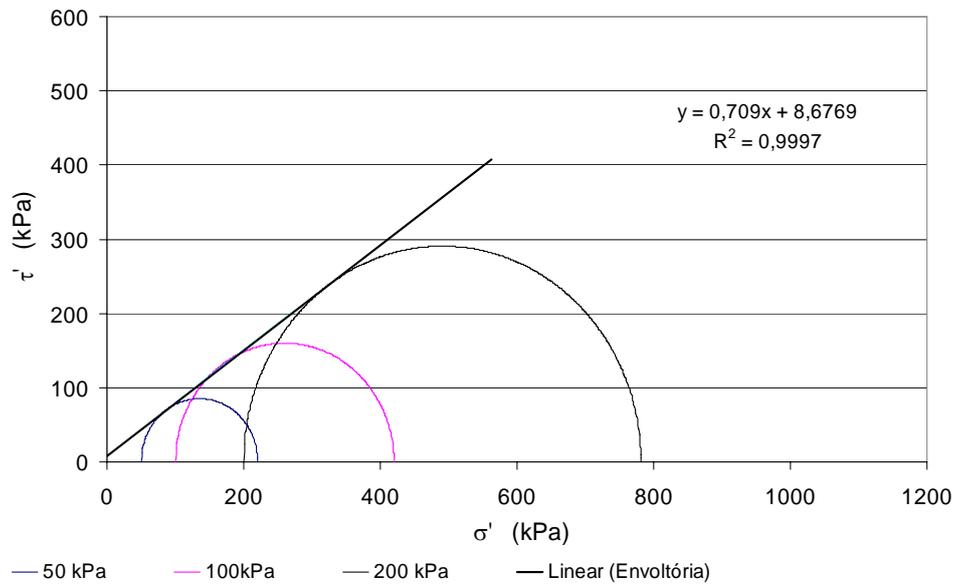


Figura 4.8 - Envoltória de ruptura da amostra Reconstituída referente à 1,0 m do ponto de descarga

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta a análise dos resultados dos ensaios de caracterização do rejeito de minério de ferro ao longo do canal de deposição do Equipamento de Simulação de Deposição Hidráulica (ESDH) e a influência destas características no processo de obtenção de amostras e nos parâmetros de resistência. De forma a interpretar melhor estes resultados são apresentadas também as características do fluxo dos rejeitos no canal do ESDH. Estas características são importantes para compreender o processo de formação dos depósitos e a influência desse processo nos parâmetros geomecânicos dos rejeitos.

5.1 CARACTERÍSTICAS DO FLUXO

As características de fluxo representam um aspecto importante no comportamento geotécnico dos aterros hidráulicos. As variações nas condições de descarga tende a alterar a forma como as partículas se depositam ao longo da trajetória de fluxo, influenciando de forma significativa a densidade e a permeabilidade do depósito. O fluxo de sedimentos nos ensaios de simulação de deposição hidráulica realizados foi semelhante ao observado por Ribeiro (2000) em seus ensaios utilizando rejeito de minério de ferro. Segundo este autor, o fluxo, devido ao uso do controlador, é inicialmente bem distribuído ao longo da seção transversal do canal. Contudo, após deixar o controlador, observa-se uma tendência do fluxo de concentrar em pequenos canais ou meandros ao longo da superfície do aterro, formando ilhas ou barreiras e erosões (Figura 5.1). Durante todo o período de deposição hidráulica ocorre um processo contínuo de migração desses canais associados aos eventos de erosão, deposição ou mesmo abandono e retomada de fluxo nos meandros. Este processo contínuo de migração é ocasionado pela busca natural de nivelamento da superfície do canal pelo fluxo de sedimentos com o tempo.



Figura 5.1 - Padrão de fluxo na superfície do aterro, com formação de ilhas mais a esquerda e processo erosivo a direita do controlador de fluxo.

O movimento das partículas no canal de deposição é caracterizado por rolagem e/ou deslizamento ao longo da superfície inclinada do depósito, onde os sedimentos tendem a se mover intermitentemente até encontrar uma barreira ou perder energia na parte mais plana do depósito. O transporte por rolagem e deslizamento é evidenciado pela formação de estratificações paralelas à direção do fluxo (Ribeiro, 2000). A presença de minerais de ferro no rejeito, cujos grãos apresentam coloração escura, possibilitou visualizar estas características deposicionais formadas no canal. A Figura 5.2 ilustra o padrão de estratificação gerado, onde pode ser observada a presença de estratificações compostas por bandas de ferro e quartzo intercaladas. Na Figura 5.2a observa-se o comportamento atípico das estratificações que se apresentam mais inclinadas na região a esquerda do canal e, conseqüentemente, não paralela a direção de fluxo. Já na Figura 5.2c pode ser verificada a presença de pequenos bolsões de coloração mais escura, provavelmente formados em função dos canais, meandros e pequenas depressões que se desenvolvem durante o processo de deposição.

5.2 ANÁLISE DA VARIABILIDADE DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS EM FUNÇÃO DO PROCESSO DE DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA

Inicialmente foi feita uma análise dos resultados obtidos ao longo do canal do ESDH, em função processo de deposição hidráulica. Esta análise foi realizada com o intuito de verificar e confirmar o padrão de segregação hidráulica dos ensaios de simulação realizados em relação aos dados disponíveis na literatura para o mesmo rejeito em estudo. Este fato é importante para aferir a viabilidade dos ensaios de simulação de deposição hidráulica na obtenção das amostras indeformadas.

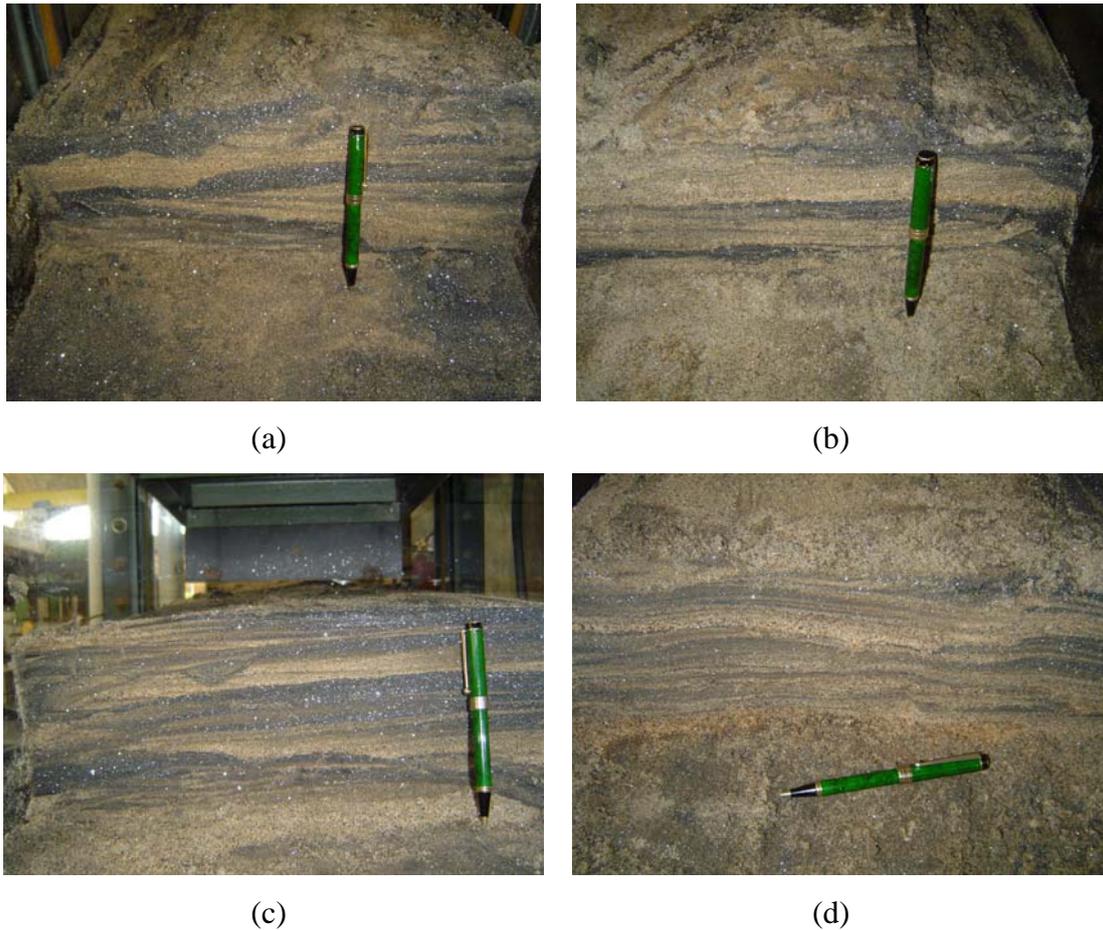


Figura 5.2 - Estratificações e variações deposicionais ocorridas em alguns pontos do depósito: (a) Região da crista; (b) Região a 1,0 m do ponto de descarga; (c) Região a 2,0 m do ponto de descarga; (d) Região a 2,8 m do ponto de descarga.

Para a análise proposta foram determinados os parâmetros médios entre as amostras A, B e C coletadas em regiões equidistantes do ponto de descarga no ESDH. A Tabela 5.1 apresenta a média dos valores referentes às análises granulométricas e seus respectivos desvios padrão. A Tabela 5.2 mostra os valores para as características de densidade e a Tabela 5.3 sumaria os valores de porosidade, teor de ferro e coeficiente de não uniformidade (C_u). Vale ressaltar que para a determinação dos valores médios da densidade (ρ e ρ_d) e porosidade foram considerados todos os valores referentes às amostras indeformadas e reconstituídas.

Ainda considerando a variabilidade dos dados equidistantes do ponto de descarga, foram determinados os coeficientes de variação dos principais parâmetros analisados. O coeficiente de variação (C_v) representa a relação entre o desvio padrão e a média. O seu resultado é uma medida relativa da variabilidade, sendo útil na comparação entre variabilidades de diferentes conjuntos de dados.

Tabela 5.1 - Valores médios e desvios padrão dos dados granulométricos das amostras equidistantes do ponto de lançamento.

Amostra Dist. (m)	D ₁₀ (mm)	Desvio D ₁₀	D ₆₀ (mm)	Desvio D ₆₀	D ₉₀ (mm)	Desvio D ₉₀	D ₅₀ (mm)	Desvio D ₅₀	C _v (%) D ₅₀
0,1	0,052	0,005	0,157	0,006	0,300	0,009	0,127	0,06	4,6
1,0	0,056	0,005	0,195	0,013	0,407	0,003	0,157	0,015	9,8
2,0	0,057	0,008	0,230	0,036	0,483	0,047	0,190	0,02	10,5
2,8	0,067	0,006	0,295	0,009	0,583	0,029	0,233	0,015	6,5

Tabela 5.2 - Valores médios e desvios padrão das características de densidade das amostras equidistantes do ponto de lançamento.

Amostra Dist. (m)	ρ (g/cm ³)	Desvio ρ	C _v (%) ρ	ρ_d (g/cm ³)	Desvio ρ_d	C _v (%) ρ_d	ρ_s (g/cm ³)	Desvio ρ_s	C _v (%) ρ_d
0,1	2,39	0,091	3,8	2,13	0,084	4,0	3,73	0,114	3,0
1,0	2,30	0,166	7,2	2,03	0,156	7,7	3,47	0,242	7,0
2,0	2,04	0,092	4,5	1,77	0,083	4,7	2,99	0,097	3,2
2,8	1,99	0,082	4,1	1,77	0,052	3,0	2,90	0,061	2,1

Tabela 5.3 - Valores médios e desvios padrão da porosidade, do teor de ferro e do coeficiente de não uniformidade (C_u) das amostras equidistantes do ponto de lançamento.

Amostra Dist. (m)	n (%)	Desvio n	C _v (%) n	Fe (%)	Desvio %Fe	C _v (%) %Fe	C _u	Desvio C _u	C _v (%) C _u
0,1	43	0,84	2,0	45,3	5,1	11,2	2,95	0,306	10,4
1,0	42	0,91	2,2	34,9	10,8	30,9	3,52	0,553	15,7
2,0	41	2,06	5,0	15,6	4,3	27,7	4,06	0,352	8,7
2,8	39	0,86	2,2	12,1	2,7	22,4	4,44	0,352	7,9

Com relação às densidades (ρ e ρ_d), os valores do C_v se apresentaram elevados, porém seu reflexo na estrutura do depósito foi pequeno, tendo em vista que o C_v da porosidade (n) foi relativamente baixo, indicando uma boa representatividade do material depositado. Uma exceção é feita para o ponto situado a 2,0 m do ponto de descarga, cujo coeficiente de variação da porosidade foi da ordem de 5%. Os teores de ferro presentes nas amostras se mostraram muito variáveis ao longo da seção transversal chegando a atingir C_v da ordem de 30%.

Conforme apresentado no Capítulo 2, a segregação hidráulica é uma característica importante nos aterros hidráulicos e apresenta um efeito direto na distribuição granulométrica. Este

processo tende a gerar mudanças na estrutura do aterro com reflexos diretos nos parâmetros de resistência, permeabilidade e deformabilidade.

A distribuição granulométrica do material dentro do depósito pode ser visualizada pela análise da relação existente entre os diâmetros característicos dos grãos e a distância do ponto de deposição com relação ao ponto de lançamento do rejeito. Assim, considerando os pontos de coleta das amostras e os valores médios apresentados na Tabela 5.1 foi possível obter a relação apresentada na Figura 5.3, que mostra como os valores de D_{10} , D_{50} , D_{60} e D_{90} se distribuem no canal do ESDH. Pela Figura 5.3 pode-se observar uma nítida tendência do aumento do diâmetro dos grãos até a porção média do canal, correspondente a distância de 3,0 m. Com relação à região final do depósito não foram coletadas amostras para análise, porém, considerando a perda da capacidade de arraste do fluxo ao longo do caminho de deposição, existe uma tendência de diminuição de diâmetro dos grãos na parte final do depósito.

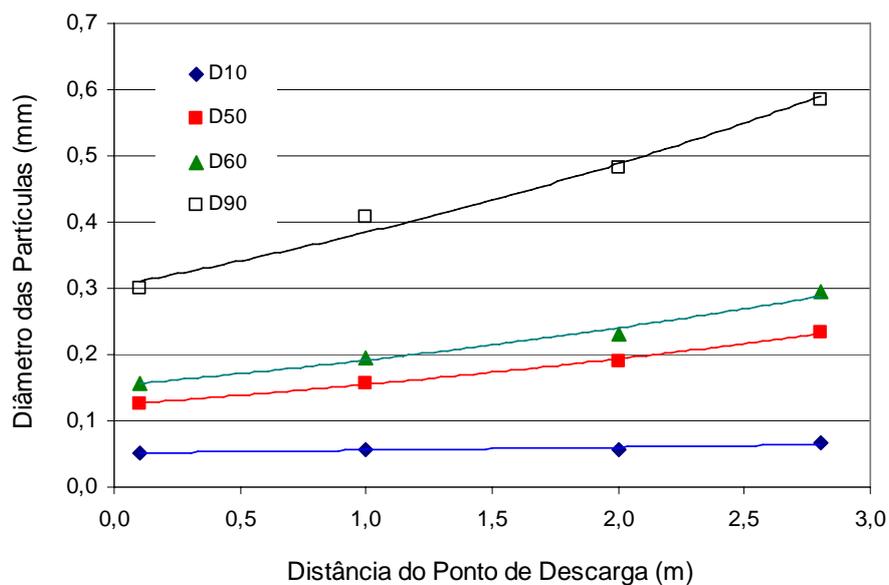


Figura 5.3 - Variação das características granulométricas com a distância do ponto de descarga

Apesar de existir uma boa correlação entre a distância de deposição e o diâmetro dos grãos, para entender o processo de segregação ocorrido é necessário avaliar a influência da não uniformidade dos sedimentos em relação ao peso. No caso do rejeito do Complexo de Água Limpa, contendo cerca de 23% de minerais de ferro, cujo mineral possui um valor de massa específica dos grãos superior aos apresentados pelos grãos de quartzo, não se pode desprezar esse fato. Conforme apresentado no Capítulo 4, a massa específica dos grãos está diretamente

relacionada com a porcentagem de ferro das amostras. Desta forma, entende-se que basta analisar o comportamento de um desses parâmetros em função do ponto de lançamento dos rejeitos. Considerando os pontos de coleta das amostras e os valores médios para a porcentagem de ferro apresentadas na Tabela 5.3, foi estabelecida a relação existente entre o teor de ferro e a distância do ponto de lançamento. A Figura 5.4 mostra claramente a tendência das partículas de ferro depositar próximas do ponto de lançamento dos rejeitos.

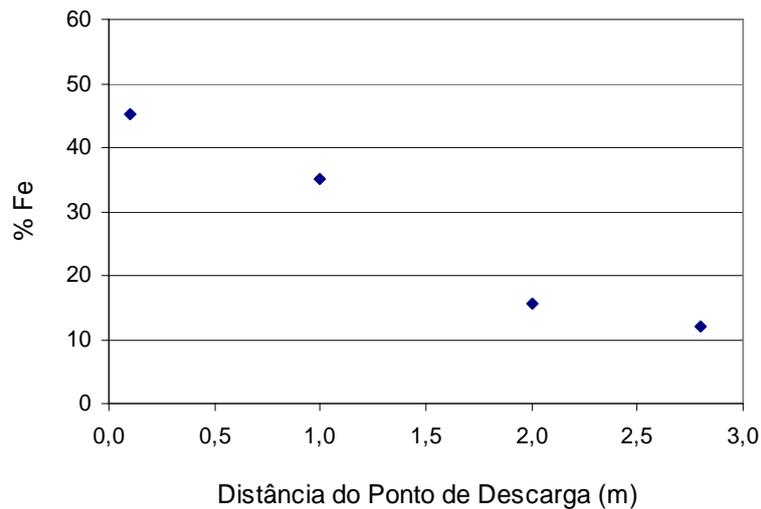


Figura 5.4 - Variação do percentual de ferro das partículas depositadas com distância do ponto de descarga

As análises feitas permitem confirmar a dependência do processo de segregação com a granulometria e com a densidade das partículas. Neste sentido, é importante conhecer a relação entre esses dois fatores, uma vez que essas duas propriedades são características do material e atuam sobre o processo de deposição ao mesmo tempo. Baseado nessas considerações foi realizada a análise da relação existente entre distribuição granulométrica, por meio do D_{50} , e o teor de ferro do rejeito. A Figura 5.5 mostra a relação encontrada para os valores médios de D_{50} e teor de ferro das amostras extraídas ao longo do canal do ESDH. Pela regressão obtida pode-se notar uma dependência do tamanho das partículas e o percentual de ferro das amostras, onde, à medida que se aumenta o percentual de ferro, menor se torna o valor do D_{50} do rejeito. Esta é uma característica particular deste rejeito, cujas partículas de ferro são mais finas que as de quartzo.

Dentro deste contexto, os ensaios de simulação de deposição hidráulica realizados permitiram confirmar o processo de segregação governado pela densidade das partículas sólidas. Neste sentido, foi evidenciada na região próxima ao ponto de descarga a presença de partículas mais

finas, porém mais densas de minério de ferro e na porção intermediária do canal de deposição, partículas de quartzo mais grossas e mais leves que as partículas de minério de ferro. Ressalta-se, mais uma vez, que não foram coletadas amostras para a caracterização da porção final do depósito, não sendo mapeado o processo convencional de segregação por tamanho que normalmente ocorre nesta região.

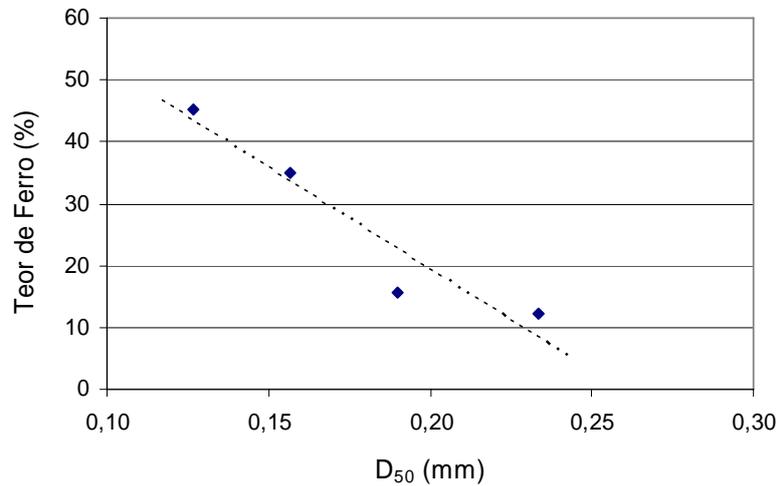


Figura 5.5 - Relação entre o D₅₀ do material e seu percentual de ferro

Conforme apresentado no Capítulo 2 a densidade é um parâmetro importante na avaliação do comportamento geotécnico dos aterros hidráulicos (Küpper, 1991 e Ribeiro, 2000). Desta forma, foi avaliada a variação da massa específica aparente seca (ρ_d) ao longo do canal do ESDH. A Figura 5.6 apresenta os valores de ρ_d em função da distância ao ponto de lançamento. A partir desta figura pode ser verificado um considerável aumento do valor do ρ_d próximo ao ponto de descarga, coincidindo com a região de maior concentração de partículas de ferro.

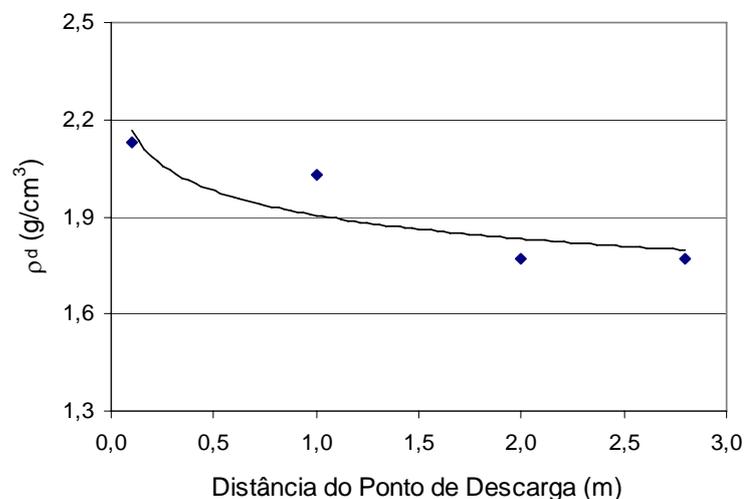


Figura 5.6 - Variação da massa específica aparente seca com a distância do ponto de descarga

Os parâmetros de resistência podem ser diretamente relacionados com a densidade in situ, no caso de materiais homogêneos, ou com a porosidade em caso de materiais com partículas com diferentes densidades relativas (Espósito, 2000). Assim, considerando a variabilidade da massa específica dos grãos constituintes deste rejeito foi realizada a avaliação do valor da porosidade ao longo do depósito. A Figura 5.7 mostra a variação dos valores médios da porosidade com a distância ao ponto de descarga. No trecho investigado o menor valor encontrado para a porosidade média foi igual a 39 à 2,8 m do ponto de lançamento, correspondente a porção intermediária do depósito.

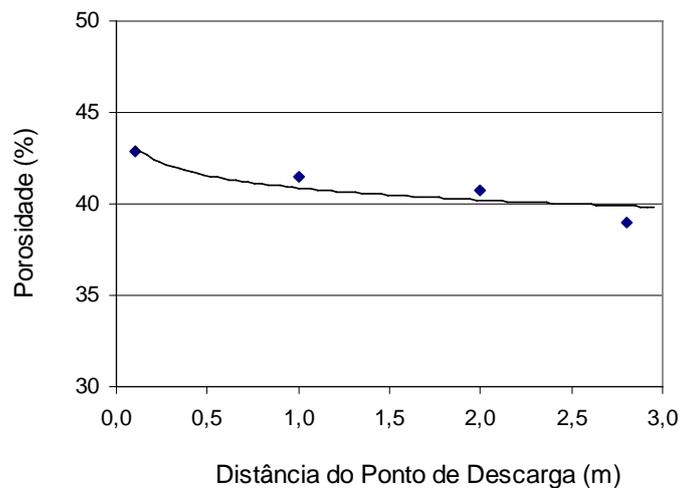


Figura 5.7 - Variação da porosidade com a distância do ponto de descarga

Observa-se uma leve tendência de diminuição da porosidade a medida que se afasta do ponto de lançamento. Verifica-se, ainda, que a porção intermediária do depósito apresenta os menores índices de vazios, correspondente à região de maior concentração de partículas grossas de quartzo e representando provavelmente a região mais estável do depósito. Como explicação para este comportamento, pode-se considerar que a influência do mecanismo de transporte favoreceu este tipo de configuração já que, conforme citado anteriormente, os sedimentos tendem a se mover até encontrar uma barreira ou perder energia na parte mais plana do depósito.

É importante ressaltar que todas as curvas obtidas se apresentaram compatíveis com resultados observados por Ribeiro (2000) em suas simulações no ESDH para rejeito semelhante, porém, deve ser considerado que este autor descreveu toda a praia formada, incluindo a região coincidente com o ponto de descarga e a porção final do depósito. No ponto de lançamento foram observados teores de ferro maiores que os obtidos na região

analisada nesta pesquisa, em torno de 60%, e uma porosidade relativamente menor em relação aos demais pontos amostrados ao longo do canal.

Adicionalmente, foi realizada a avaliação do valor do coeficiente de não uniformidade (C_u) em função da distância do ponto de descarga (Figura 5.8). Pelo C_u é possível avaliar a distribuição das partículas no solo. Quanto maior o C_u mais bem graduado se encontra o solo, ou seja, o material apresenta grãos com diâmetros variados. Do ponto de vista de engenharia, um solo bem graduado as partículas menores tendem a ocupar melhor os vazios criando um maior entrosamento, do qual resulta menor compressibilidade e maior resistência. Analisando os dados da Figura 5.8, observa-se a clara tendência de aumento do C_u com o aumento da distância ao ponto de descarga. Este fato sugere a existência de um maior entrosamento dos grãos na porção intermediária do depósito e confirma a influência dos mecanismos de transporte na distribuição granulométrica e, conseqüentemente, na porosidade ao longo do canal de deposição. Acredita-se que os grãos presentes nessa região tendem a cessar o movimento por encontrar uma barreira formada pela maior variabilidade de diâmetros dos grãos aumentando, portanto, o entrosamento entre eles.

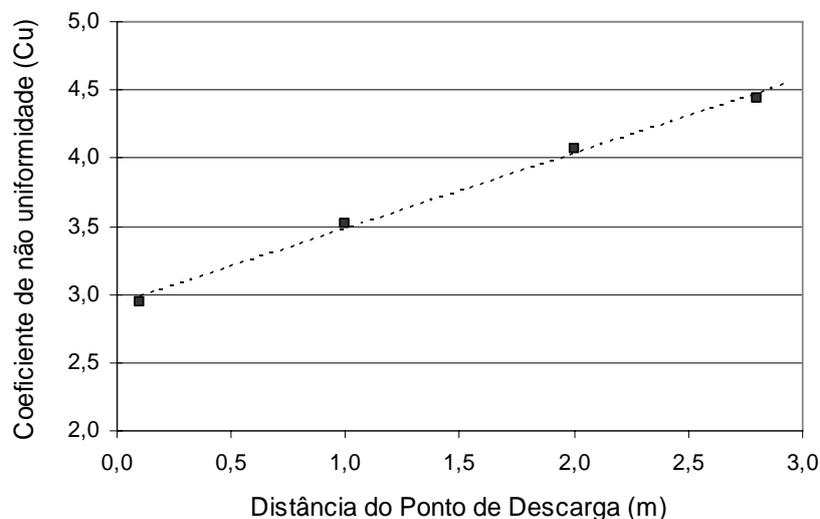


Figura 5.8 - Variação do coeficiente de não uniformidade com a distância do ponto de descarga

Com o intuito de complementar esta análise, foi avaliada também a possibilidade de correlacionar a porcentagem de ferro e a granulometria com a porosidade obtida a partir das amostras extraídas do canal do ESDH, tendo em vista que estas três propriedades influenciam diretamente os parâmetros de resistência do depósito. Além disso, diante do processo definido para a obtenção de amostras, não foi possível avaliar de forma independente a ação de cada

um desses parâmetros, estando eles atuando simultaneamente. A Figura 5.9 ilustra a relação obtida entre a porosidade e o teor de ferro e a Figura 5.10 a relação entre porosidade e o C_u do rejeito. Analisando estas figuras, observa-se um aumento da porosidade com o aumento do teor de ferro e uma diminuição da porosidade com o aumento do valor do C_u . O aumento da porosidade com o teor de ferro tende a ocorrer devido a maior uniformidade dos grãos de ferro e maior concentração dos mesmos na região inicial do depósito. À medida que se afasta do ponto de descarga existe um aumento na porcentagem das partículas de quartzo e o material se apresenta com uma melhor distribuição granulométrica ($>C_u$), favorecendo o entrosamento e a diminuição da porosidade. Este comportamento se mostra coerente com os demais dados apresentados e evidencia o efeito das características de fluxo no comportamento do depósito.

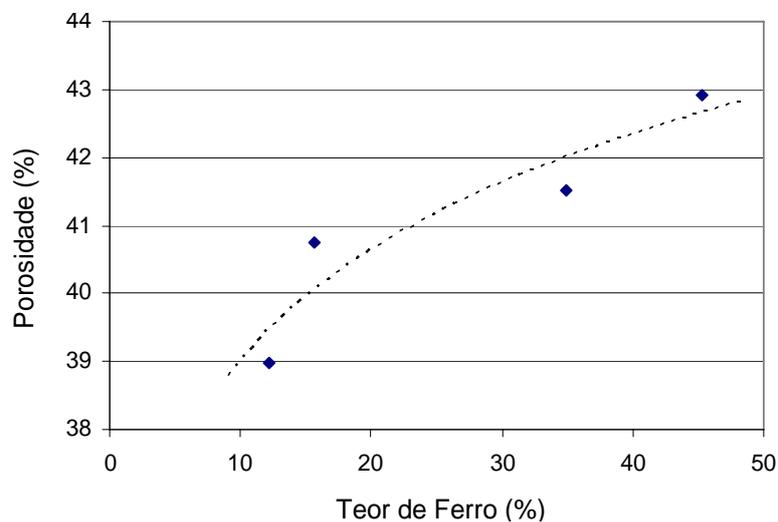


Figura 5.9 - Variação da porosidade com relação ao teor de ferro das amostras

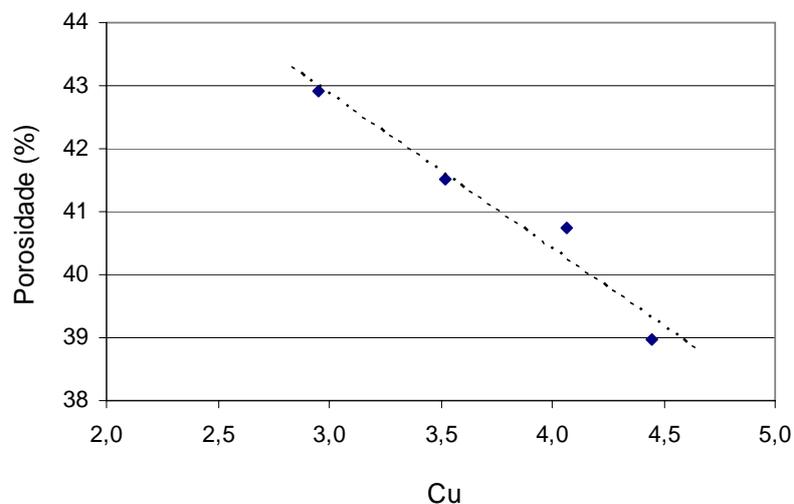


Figura 5.10 - Variação da porosidade com relação ao teor de ferro das amostras

5.3 PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA

O objetivo principal da realização dos ensaios triaxiais foi avaliar como as propriedades geomecânicas dos rejeitos de minério de ferro são influenciadas pelas características deposicionais em campo. Essas características podem ser representadas, entre outros fatores, pelas estratificações formadas e pelo grau de entrosamento dos grãos em virtude das características de fluxo. A forma utilizada para avaliar este comportamento foi por meio de análises comparativas entre os parâmetros de resistência das amostras indeformadas extraídas do canal de deposição do ESDH e das amostras reconstituídas.

As amostras reconstituídas e indeformadas apresentaram semelhanças tanto para as características dos grãos, quanto para as porosidades. Porém, os ensaios triaxiais realizados revelaram uma tendência de comportamento frágil para as amostras indeformadas, e um comportamento do tipo dúctil para as amostras reconstituídas. Este comportamento pôde ser observado nas figuras 4.5 e 4.6 que ilustraram as curvas de tensão vs deformação para os corpos de prova indeformados e reconstituídos respectivamente. Esta característica de comportamento influenciou sobremaneira a tensão máxima de ruptura, sendo observados valores mais elevados para as amostras indeformadas, com reflexos diretos nos parâmetros de resistência.

Ainda neste contexto, as amostras indeformadas, de forma geral, apresentaram um plano de ruptura bem definido e as amostras reconstituídas sofreram um abaulamento na região central do corpo de prova, sem a definição de um plano preferencial de ruptura. A Figura 5.11 ilustra este comportamento das amostras indeformadas e reconstituídas após a fase de cisalhamento dos corpos de prova. Ambas amostras, situadas a 2,8 m do ponto de lançamento, possuem índice de vazios médio de 0,64 o que corresponde, considerando as características do material ensaiado (e_{max} da ordem de 0,76 e e_{min} da ordem de 0,43), a uma areia fofa à medianamente compacta, sendo esperado um comportamento do tipo dúctil para o material ensaiado.

O comportamento do tipo frágil observado para as amostras indeformadas pode estar associado a um maior embricamento alcançado pelos grãos durante o processo de deposição hidráulica, mantendo os encaixados entre si e criando um maior vínculo entre as partículas. Outro fator, como a existência de estratificações paralelas à direção de fluxo poderia explicar também esta diferença de comportamento. Estas características, entretanto, não conseguiram ser reproduzidas durante a reconstituição das amostras, justificando assim estas diferenças.



(a)



(b)

Figura 5.11 - Aspecto após o cisalhamento do corpo de prova obtido a 2,8 m do ponto de descarga e submetido a tensão de confinamento de 100 kPa: (a) amostra indeformada, (b) amostra reconstituída

Em se tratando de solos granulares a porosidade apresenta influência significativa nos parâmetros de resistência desses materiais. A literatura revela uma relação inversa entre essas duas características onde se verifica acréscimos no valor do ângulo de atrito efetivo (ϕ') para decréscimos no índice de porosidade (Lambe & Whitman, 1972; Cornforth, 1973).

Uma tendência de comportamento semelhante a dos solos granulares foi encontrada para os rejeitos de minério de ferro, revelando que a influência da porosidade no ângulo de atrito mostra-se também significativa no comportamento mecânico das barragens de rejeito. Russo (2005) realizou um trabalho de análise dos dados existentes na literatura relativos aos parâmetros de resistência obtidos para os rejeitos de minério de ferro provenientes da pilha de rejeito do Monjolo (Mina do Complexo de Água Limpa) e da pilha do Xingu (Complexo da Mina da Alegria). A Figura 5.12 mostra a compilação dos dados estudados por Russo (2005) e comprova a tendência semelhante para a relação entre porosidade e ângulo de atrito efetivo de solos granulares e de rejeitos de minério de ferro.

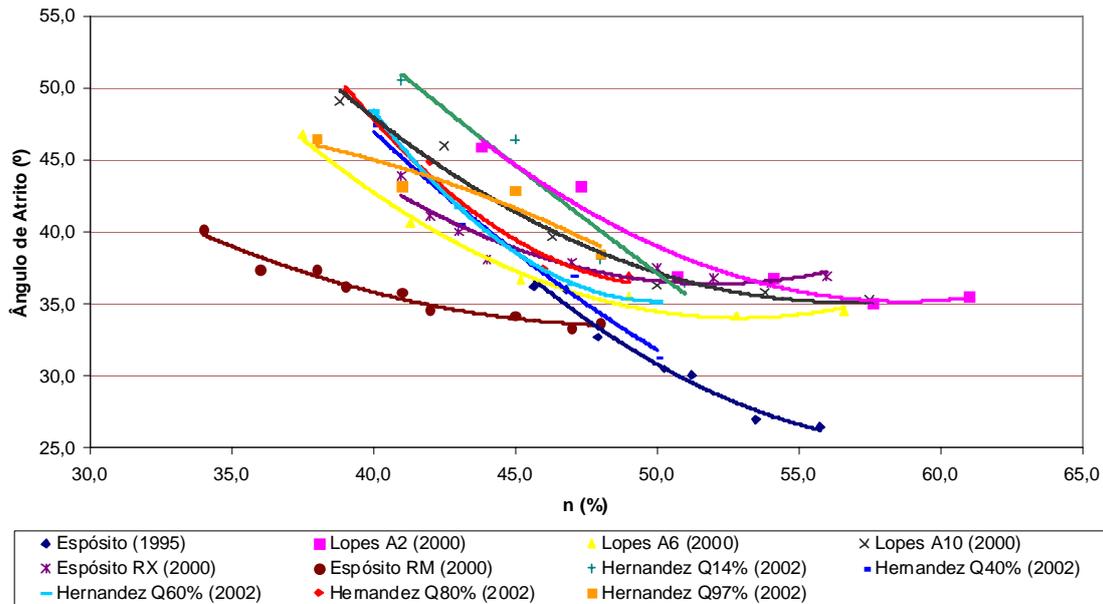


Figura 5.12 - Gráfico com os valores de ângulos de atrito em função da porosidade (Russo, 2005)

Analisando a variação do ângulo de atrito efetivo (ϕ') com a variação da porosidade média (Figura 5.13) para os ensaios realizados com as amostras indeformadas e reconstituídas, observa-se, como esperado, um decréscimo dos valores de ϕ' exponencialmente com o aumento da porosidade. O ângulo de atrito obtido para as amostras indeformadas apresentou um pequeno acréscimo em relação às amostras reconstituídas, na faixa de 3,0 a 4,0°.

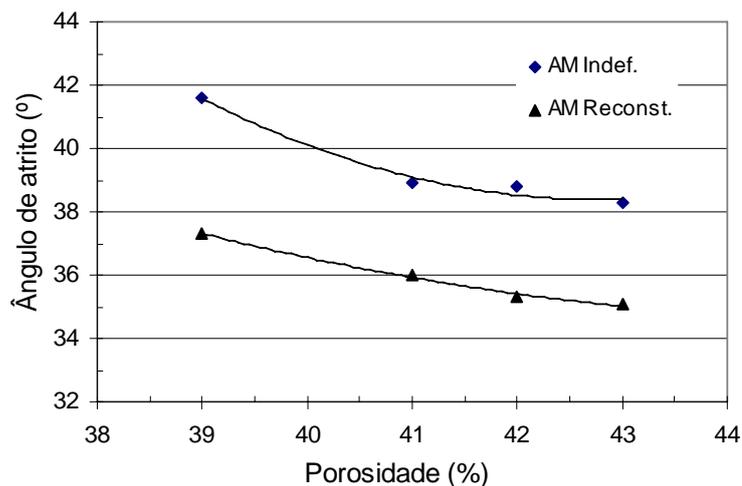


Figura 5.13 - Variação do ângulo de atrito efetivo com a porosidade para amostras indeformadas e reconstituídas.

A variação do ângulo de atrito com o coeficiente de não uniformidade também apresentou resultados concordantes com a literatura, com maiores valores de ϕ' para C_u mais elevados (Figura 5.14). A hipótese da região situada a 3,0 m do ponto de descarga representar a região mais estável da porção do depósito pôde ser novamente confirmada pela análise das Figuras 5.13 e 5.14, sendo esta região coincidente com os maiores valores do ângulo de atrito efetivo (ϕ').

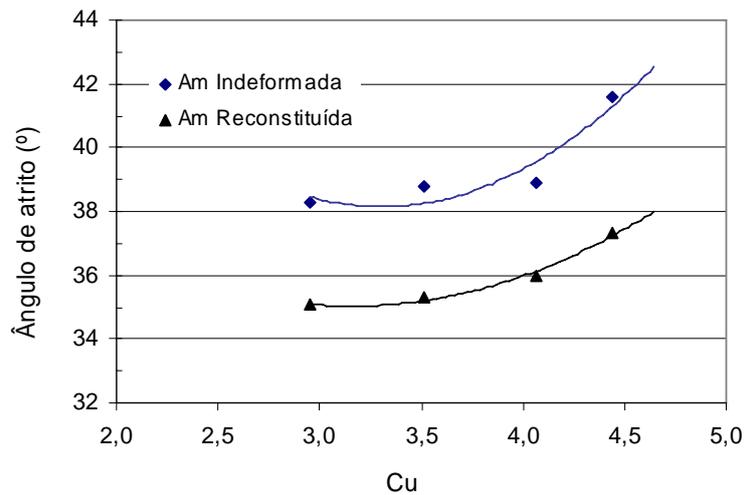


Figura 5.14 - Variação do ângulo de atrito efetivo com o coeficiente de não uniformidade (C_u) para amostras indeformadas e reconstituídas

Com relação ao teor de ferro, conforme citado no Capítulo 2, Presotti (2002) e Hernandez (2002), verificaram que o aumento do teor de ferro tende a aumentar o ângulo de atrito efetivo para materiais com mesmas condições iniciais de porosidade. Para avaliar o comportamento do ângulo de atrito em função do teor de ferro, foi obtida a Figura 5.15. O ângulo de atrito efetivo se mostrou decrescente como incremento no teor de ferro das amostras. Este comportamento não é normalmente esperado para a maioria dos rejeitos de minério de ferro (Lopes, 2000; Presotti, 2002; Hernandez, 2002).

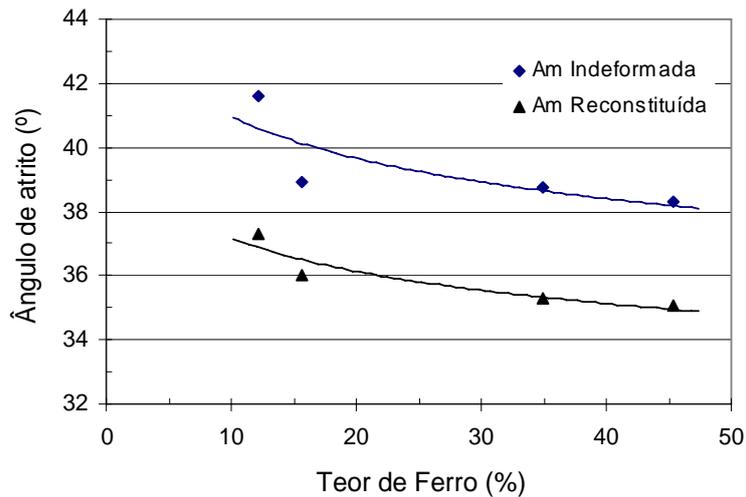


Figura 5.15 - Variação do ângulo de atrito efetivo com relação ao teor ferro para amostras indeformadas e reconstituídas

Com o intuito de justificar o comportamento inverso entre o teor de ferro e o ângulo de atrito efetivo foi verificada a possibilidade de utilizar uma correlação para a estimativa do ângulo de atrito efetivo em função da porosidade e do teor de ferro. A correlação utilizada foi proposta por Hernandez (2002) para o rejeito da Pilha do Monjolo. A equação proposta é apresentada a seguir e valida para as faixas de porosidade entre 37 e 52% e de teor de ferro entre 3 e 86%:

$$\phi' = -\left(0,4709 \cdot (100 - Fe)^{0,1287}\right) \cdot n + 56,751 \cdot (100 - Fe)^{0,04224} \quad (5.1)$$

A Tabela 5.4 apresenta os valores teóricos obtidos para o ϕ' de acordo com a Equação 5.1, os valores obtidos via ensaios triaxiais drenados para as amostras reconstituídas e a diferença entre ambos.

Tabela 5.4 – Comparação entre o ângulo de atrito estimado com a utilização da Equação 5.1 em função da porosidade e do teor de ferro e os obtidos via ensaios triaxiais drenados em amostras reconstituídas

Distância (m)	Porosidade (%)	Teor Fe (%)	ϕ' Teórico (°)	ϕ' Triaxial CD (°)	$\Delta\phi'$ (°)
0,1	43	45,3	33,4	34,8	1,4
1,0	42	34,9	34,3	35,3	1,0
2,0	41	15,6	34,5	36,0	1,5
2,8	39	12,1	35,9	37,3	1,4

Analisando os dados da Tabela 5.4 verifica-se que os valores de ϕ' obtidos a partir de ensaios triaxiais drenados em amostras reconstituídas se apresentam ligeiramente superiores aos estimados pela equação teórica. Este fato pode ser explicado pela diferença dos ensaios a partir do qual foram obtidos os parâmetros, ressaltando que a Equação 5.1 proposta por Hernandez (2002) foi obtida a partir de ensaios de cisalhamento direto, para amostras reconstituídas em laboratório. Outro fator possível é a dispersão dos resultados obtidos, fato este que deverá ser melhor analisado futuramente por meio de análises estatísticas.

Adicionalmente, cabe mencionar, que Espósito (2000) realizou ensaios triaxiais drenados e de cisalhamento direto no rejeito da Pilha do Monjolo, constatando valores ligeiramente superiores para o ϕ' nos ensaios triaxiais em relação ao ensaio de cisalhamento direto. Neste sentido considera-se coerente a relação encontrada na Tabela 5.4 para os valores de ϕ' , considerando os valores teóricos correspondente a ensaios de cisalhamento direto e os demais valores obtidos via ensaios triaxiais drenados em amostras reconstituídas.

Vale ressaltar que, para as amostras indeformadas, os valores teóricos são discordantes com os resultados dos ensaios triaxiais drenados, indicando mais uma vez a diferença no comportamento destas amostras em relação as reconstituídas.

Ainda considerando a equação proposta por Hernandez (2002), foram plotadas nas Figuras 5.16 e 5.17 as curvas para os quatro índices de porosidade médias obtidos no canal de deposição do ESDH, relacionando o teor de ferro e o ângulo de atrito efetivo (ϕ') e a porosidade e o ϕ' respectivamente. Foram plotados também os valores pontuais para o ϕ' obtidos via ensaios triaxiais em amostras reconstituídas e via cálculos teóricos, em função do teor de ferro e da porosidade.

Por meio das Figuras 5.16 e 5.17 é possível compreender o comportamento dos valores de ϕ' para as amostras ensaiadas com diferentes teores de ferro e porosidade. É importante mencionar que os valores correspondentes aos resultados triaxiais drenados realizados nas amostras reconstituídas se encontram mais elevados, possivelmente devido ao tipo de ensaio que deu origem aos parâmetros de resistência. Pode ser considerada também, uma pequena influência da granulometria dos materiais ensaiados, já que este fator não foi considerado por Hernandez (2002) no desenvolvimento da equação teórica.

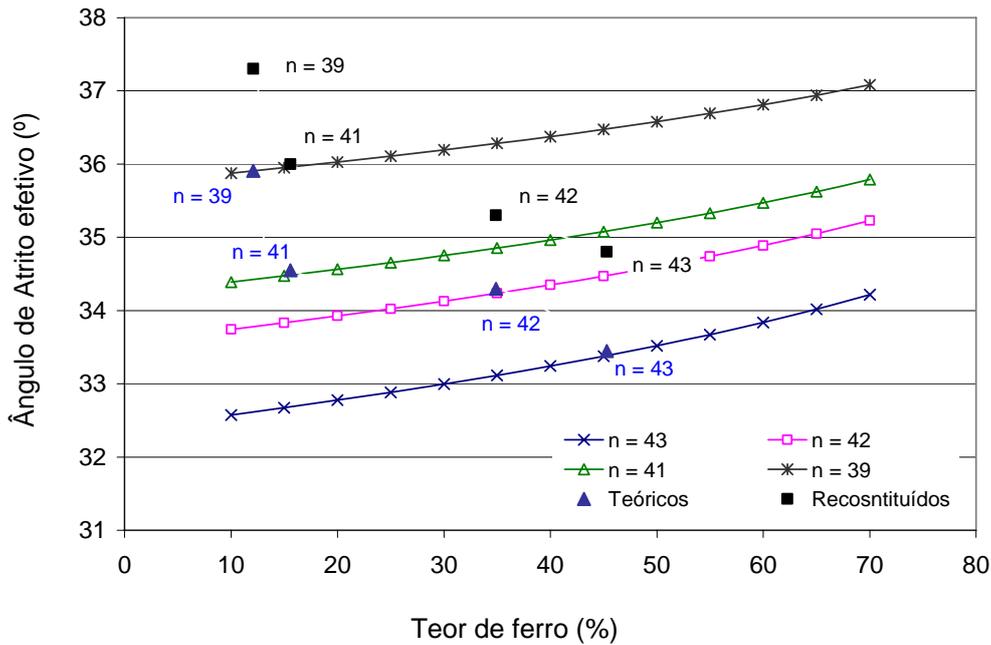


Figura 5.16 - Relação entre o ângulo de atrito efetivo, a porosidade e o teor de ferro

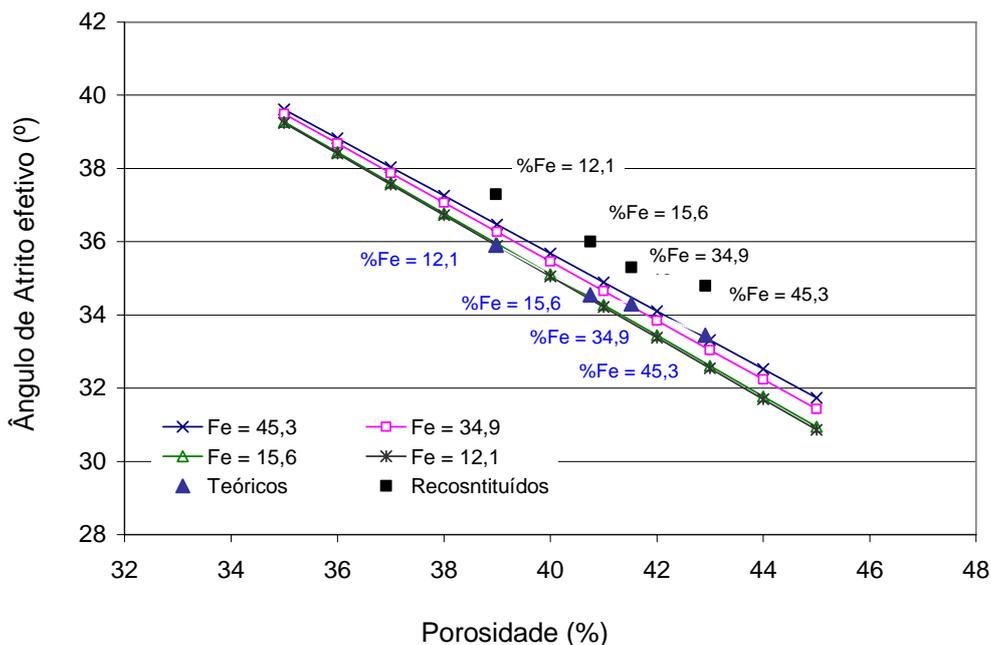


Figura 5.17 - Relação entre o ângulo de atrito efetivo, a porosidade e o teor de ferro

Os materiais granulares não apresentam coesão, se desestruturando sob pressão confinante nula e certas condições específicas de umidade. Contudo, conforme mencionado no Capítulo 4, o ajuste dos pontos na envoltória de ruptura foi realizado com interpolação livre e sendo obtidos interceptos de coesão significativos. A Figura 5.18 mostra a relação encontrada para os valores de intercepto de coesão e porosidade observados para as amostras indeformadas e reconstituídas. Mais uma vez foram verificados pequenos acréscimos nessa parcela de

resistência para as amostras indeformadas em relação às amostras reconstituídas, correspondente a faixa de 6 a 8 kPa.

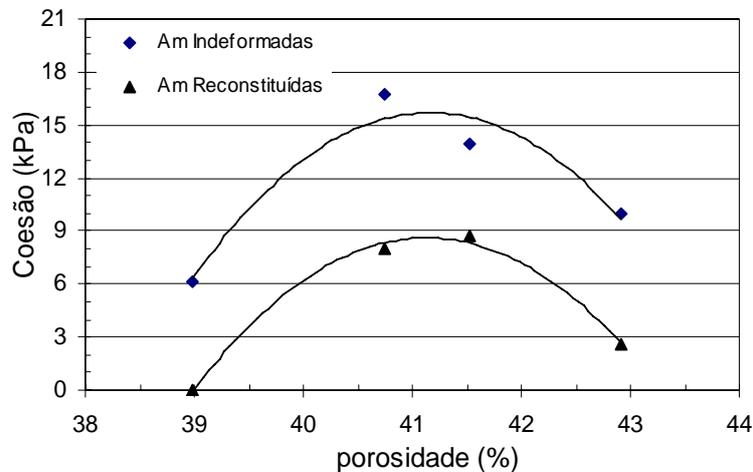


Figura 5.18 - Variação do intercepto de coesão efetiva com a porosidade para as Amostras indeformadas e reconstituídas

Na tentativa de entender o comportamento deste rejeito em relação à coesão foram feitas algumas considerações pertinentes a estes ensaios. As tensões confinantes utilizadas nos ensaios de 50, 100 e 200 kPa, foram relativamente pequenas para justificar a existência de uma envoltória curva, que poderia conduzir a valores para o intercepto de coesão no momento do ajuste da envoltória linear. Entretanto, os valores elevados para a parcela de coesão podem estar associados à dispersão dos ensaios realizados sobre corpos de provas com diferentes características, principalmente no que se refere ao teor de ferro e em alguns casos as porosidade.

Analisando a Figura 5.18 verifica-se os maiores valores de coesão para as amostras situadas a 1,0 e 2,0 m do ponto de descarga. Exatamente os conjuntos de amostras situadas nessas regiões do canal apresentaram os maiores valores para o desvio padrão da porcentagem de ferro e da porosidade. Estas regiões apresentaram, também, os maiores valores para o coeficiente de variação (Tabela 5.3). Diante das variações consideráveis obtidas nestas amostras durante o processo de deposição hidráulica admite-se a possibilidade de valores diferentes de ϕ' para cada um dos corpos de prova ensaiados a 50, 100 e 200 kPa, cuja determinação de uma envoltória linear de ruptura ajustando os três pontos levou a obtenção dos interceptos de coesão encontrados.

Diante do exposto, uma envoltória curva, com coesão igual a zero, representaria bem o comportamento das amostras granulares de rejeito. Porém, o ajuste dos pontos na envoltória de ruptura com interpolação livre visou, inicialmente, verificar se poderia existir alguma diferença entre o comportamento das amostras indeformadas e reconstituídas também com relação à parcela de coesão.

A percepção da existência de materiais com características distintas nas regiões equidistantes do ponto de lançamento, durante o processo de coleta das amostras indeformadas, induziu a utilização de materiais específicos no processo de reconstituição. Neste sentido, o material utilizado na reconstituição dos corpos de prova foi semelhante ao constituinte das amostras indeformadas, com exceção das características específicas do processo de deposição.

5.3.1 RELAÇÃO ENTRE O ÂNGULO DE ATRITO DE PICO E O ÂNGULO DE ATRITO A VOLUME CONSTANTE DAS AMOSTRAS INDEFORMADAS

As amostras indeformadas apresentaram dois estados de ruptura. O primeiro caracterizado pelo valor máximo da tensão desviadora favorecendo a obtenção de parâmetros de resistência de pico. O segundo a volume constante, fornecendo parâmetros a grandes deformações. Os valores máximos de tensão desviadora foram mais pronunciados nas amostras obtidas a 2,8 e 1,0 m do ponto de descarga, conforme pode ser observado nos gráficos apresentados no Apêndice C.

O valor da resistência a grandes deformações é independente do índice de vazios inicial em amostras com características semelhantes. Hernandez (2002) e Presotti (2002) estudaram o rejeito de minério de ferro e confirmam esta tendência, embora estes autores tenham verificado a existência de pequenas dispersões nos resultados.

Na Tabela 4.5 foram apresentados os resultados da estimativa do ângulo de atrito efetivo a volume constante para as amostras indeformadas. Os valores estimados para o ϕ' apresentaram pequena dispersão sendo a média obtida de 38,3° e desvio padrão de 0,7°. Vale ressaltar que se trata de um conjunto de amostras com características distintas no que se refere ao teor de ferro e diferentes valores de porosidades. A Figura 5.19 mostra a relação entre a porosidade e o ângulo de atrito a volume constante, onde pode ser observada a dispersão dos dados encontrados e a tendência assintótica para valores de ângulo de atrito independente da variação da porosidade.

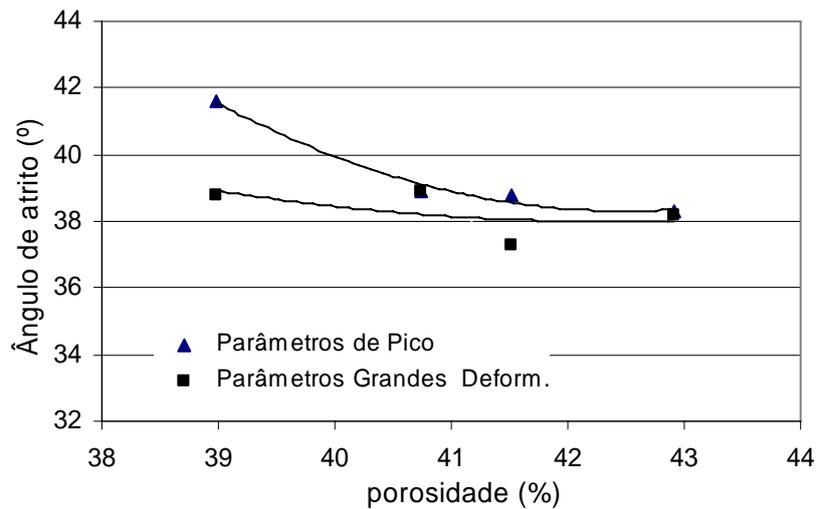


Figura 5.19 - Variação do ângulo de atrito efetivo com a porosidade, parâmetros de pico e a grandes deformações para amostras indeformadas

Rowe e Barden em 1964, citado por Presotti (2002), relatam que os ensaios que apresentam um valor de pico para a tensão desviadora, embora possam ser continuados, podem não representar as características do estado a grandes deformações. Isso ocorre porque o desenvolvimento da ruptura dentro de zonas limitadas geralmente conduz a um colapso prematuro do corpo de prova e faz com que a resistência seja função, dentre outros fatores, do estado de tensões e da deformação existente nas referidas zonas de ruptura. Além disso, podem ser citadas também as razões operacionais como: a capacidade do equipamento e resistência das membranas, que impedem a continuidade dos ensaios por um período mais prolongado. Neste sentido, alguns ensaios foram paralisados após os corpos de prova atingirem valores constantes para a tensão desviadora, porém, sem a constatação efetiva de variações volumétricas nulas (Apêndices C e D).

Com o intuito de verificar a influência do teor de ferro no ângulo de atrito efetivo a grandes deformações foi gerada a Figura 5.20. O ângulo de atrito a grandes deformações, mais uma vez não apresentou uma relação crescente com o teor de ferro como reportado em outros trabalhos (Hernandez, 2002 e Presotti, 2002). Contudo, verifica-se que este comportamento discordante não representa um efeito exclusivo da influência do teor de ferro. No caso específico desta pesquisa, a influência da granulometria dos materiais ensaiados é um fator importante no resultado global dos ensaios. Como apresentado anteriormente, a região com menor teor de ferro apresenta o maior coeficiente de não uniformidade e conseqüentemente um melhor entrosamento entre as partículas gerando, um pequeno acréscimo no valor de ϕ' .

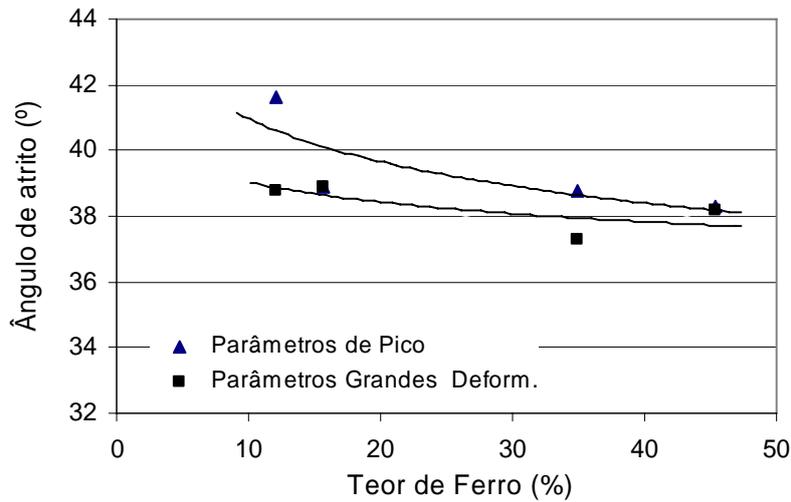


Figura 5.20 - Variação do ângulo de atrito efetivo com o teor de ferro, parâmetros de pico e a grandes deformações para amostras indeformadas

Adicionalmente, foi plotado o gráfico da Figura 5.21 relacionando a porosidade como os valores do intercepto de coesão para as tensões desviadoras máxima e a grandes deformações. O intercepto de coesão obtido a grandes deformações foi sensivelmente inferior aos encontrados para a tensão desviadora máxima na ruptura. Este fato pode estar associado a uma possível mudança da estrutura interna das amostras, que já sofreram colapso. Desta forma, algumas das características típicas do processo de deposição, principalmente relacionadas ao maior entrosamento entre as partículas, já podem ter sido desfeitas. Os valores pequenos encontrados para o intercepto de coesão, em torno de 3 kPa, podem ser decorrentes de não se atingir a condição de variação volumétrica nula e devido também à problemas operacionais.

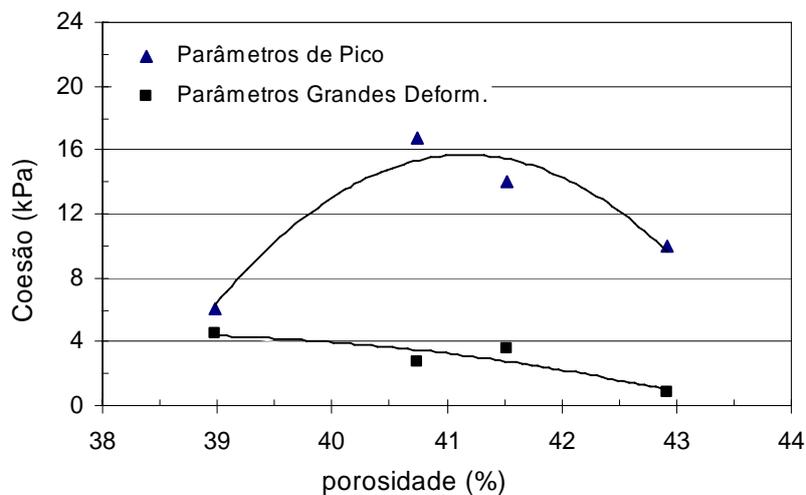


Figura 5.21 - Variação do intercepto de coesão efetiva com a porosidade, parâmetros de pico e residual para amostras indeformadas

6 CONCLUSÕES

6.1 INTRODUÇÃO

O controle geotécnico de barragens construídas pela técnica de aterro hidráulico passa necessariamente pelo conhecimento das propriedades dos materiais a serem estocados. Entretanto, os materiais granulares, normalmente utilizados nos aterros hidráulicos, são tradicionalmente complexos sob o ponto de vista de amostragem e inspeção. Por este motivo, a avaliação de suas propriedades geotécnicas, de uma forma geral, tem sido realizada por meio de amostras reconstituídas e de técnicas especiais de moldagem, reproduzindo principalmente a densidade dos depósitos em campo.

Sabe-se, contudo, que o material granular depositado hidraulicamente tende a gerar depósitos com vários padrões de acamamentos e estratificações em virtude do tamanho e densidade das partículas, da velocidade de fluxo e da concentração da mistura. Além disso, a deposição dos rejeitos pode apresentar uma grande variabilidade nos parâmetros geotécnicos ao longo da praia. Neste contexto, é importante avaliar o comportamento dos rejeitos resguardando suas características deposicionais, como a segregação gerada durante o processo de deposição, as estratificações e os acamamentos.

Para a avaliação do comportamento dos aterros hidráulicos os ensaios de simulação de deposição hidráulica em laboratório têm se mostrado uma ferramenta importante, tendo em vista a capacidade que esses ensaios têm de reproduzir as condições de deposição no campo. A grande maioria dos ensaios já realizados tem demonstrado a eficiência do equipamento desenvolvido na UnB na previsão da geometria, segregação granulométrica, densidade dos sistemas de disposição de rejeitos no campo (Ribeiro, 2000; Ribeiro & Assis, 1999; Cavalcante, 2000 e Cavalcante, 2004). Este fato foi um dos motivos pelo qual o ensaio de simulação em laboratório foi escolhido para representar as características deposicionais e

prover material para o processo de obtenção das amostras indeformadas utilizadas nessa pesquisa.

Algumas tentativas de coleta de amostras indeformadas no campo têm sido realizadas em depósitos de rejeito de mineração. Estes procedimentos se baseiam na utilização de amostradores tipo Shelby, Denison etc., e visam a obtenção de amostras em profundidade. Contudo, alguns problemas relativos à representatividade, dificuldade de cravação e retirada de material, e transporte têm sido evidenciados. Poucos dados têm sido reportados na literatura a respeito e se observa que a maioria das análises em laboratório tem sido feita utilizando os métodos convencionais de reconstituição de amostras.

Considerando a falta de dados relativos a real representatividade dos métodos tradicionais de reconstituição, esta pesquisa buscou analisar as diferenças entre as amostras obtidas diretamente no depósito em função da variabilidade provocada pelo método de deposição.

Dentro desta proposta, as variáveis atuantes durante a fase de deposição foram controladas e um mapeamento do depósito foi realizado visando avaliar a densidade, granulometria e teor de ferro. Com base nestes dados foi possível avaliar o comportamento do depósito e estabelecer as diferenças entre as duas formas de obtenção de amostras. Avaliando os resultados obtidos foi possível estabelecer algumas considerações que são apresentadas a seguir.

6.2 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de simulação realizadas no ESDH se encontram em consonância com a maioria dos estudos reportados na literatura. O talude foi côncavo e de baixa inclinação. O depósito formado apresentou um padrão de segregação atípico influenciado pelo peso das partículas, sendo o processo de deposição condicionado pela presença de minerais de ferro mais densos em relação aos outros minerais constituintes do rejeito. A densidade do depósito foi elevada próximo ao ponto de descarga, decrescendo em direção a porção intermediária do depósito, região limite analisada nesta pesquisa. Já o coeficiente de não uniformidade (C_u) se apresentou crescente em direção a porção média, favorecendo a melhor estruturação nesta região. Por conseguinte, a porosidade se apresentou levemente decrescente, indicando depósitos mais densos, e conseqüentemente mais estáveis, na região a 3,0 m do ponto de descarga.

Adicionalmente ao processo de deposição hidráulica, foi constatada também uma grande variabilidade nos parâmetros geotécnicos ao longo da seção transversal do depósito. Esta variabilidade ainda não havia sido mapeada nas simulações realizadas no ESDH. A maioria dos estudos privilegiava a análise ao longo do caminho de deposição, considerando uma faixa contínua de material ao longo de toda seção transversal. Contudo, esta variabilidade pôde ser visualizada nessa pesquisa, durante a coleta de amostras indeformadas ao longo da faixa equidistante do ponto de lançamento. Como explicação para estas diferenças, pode ser considerada a influência do processo de fluxo que tende a se concentrar em pequenos canais ou meandros, formando ilhas ou barreiras redirecionando o fluxo. O fluxo por sua vez cria processos erosivos e conseqüentemente fomenta a formação de pequenos depósitos com sedimentos de diferentes características. Em virtude deste processo contínuo, a quantificação e a definição de um padrão específico para o processo de segregação ao longo da seção transversal não puderam ser identificados. Esta característica se mostrou bastante importante nestas análises, pois embora o ESDH possibilite um controle das variáveis de descarga o depósito resultante é função de um complexo processo de interação de fluxo de água e partículas. Este fato evidencia a grande variabilidade física dos depósitos formados pela técnica do aterro hidráulico.

Com relação aos procedimentos para a obtenção das amostras, os corpos de prova indeformados foram obtidos por meio de uma metodologia simples de cravação de cilindro e desbaste lateral de solo, sem a necessidade de empregar técnicas mais avançadas e complexas como o congelamento dos solos. O cilindro bi-partido de paredes finas e ponta biselada, projetado especificamente para esta finalidade, se mostrou compatível com a metodologia proposta, garantindo a integridade dos corpos de prova durante o processo de extração dos mesmos. Além disso, o tempo de 24 h adotado para estabilização do depósito foi suficiente para garantir a qualidade da etapa de coleta e proporcionar uma boa estabilidade do corpo de prova durante a retirada do molde. Neste sentido, pode-se concluir que o método de obtenção de amostras proposto se mostrou aplicável a realidade deste tipo de rejeito.

Embora este processo de retirada de amostra exija certo cuidado e critério, visto a necessidade de minimizar os efeitos do amolgamento e se limite a estudos de camadas superficiais, esta metodologia pode ser utilizada para a obtenção de amostras indeformadas em campo para acompanhamento de cada fase de alteamento.

Ainda considerando as amostras indeformadas, foi verificada uma boa representatividade dos corpos de prova extraídos do ESDH em termos de estratificações e acamamentos gerados durante o processo de deposição hidráulica. Pela análise de cada corpo de prova, foi possível avaliar as mudanças nos materiais constituintes das camadas, pontos de maior concentração de partículas de ferro etc. Foi possível confirmar, também, a heterogeneidade da seção transversal do depósito como comentado anteriormente.

Em relação às amostras reconstituídas, o processo de reconstituição foi considerado satisfatório, principalmente relacionado à reprodução da densidade, do teor de ferro e da granulometria. Neste sentido, boa parte das características do material no canal de deposição do ESDH foram reproduzidas, favorecendo a comparação do comportamento entre as amostras indeformadas e reconstituídas. No entanto, vale ressaltar que devido à metodologia de reconstituição os acamamentos e transições de sedimentos evidenciados nas amostras indeformadas não puderam ser reproduzidos. Esta diferença mostrou-se evidente nos resultados dos ensaios realizados com estes dois tipos de amostras.

Os parâmetros de resistência se apresentaram mais elevados nas amostras indeformadas, evidenciando a influência do processo de deposição no comportamento geomecânico deste rejeito de minério de ferro. As curvas tensão vs. deformação obtidas revelaram comportamentos distintos para ambas as amostras, sendo observada a tendência de comportamento frágil para as amostras indeformadas e comportamento dúctil para as reconstituídas. O ângulo de atrito efetivo (ϕ') obtido para as amostras indeformadas situou-se em uma faixa de 3 a 4° acima do ϕ' obtido para as amostras reconstituídas.

Embora o conjunto de amostras que subsidiaram a realização dos ensaios triaxiais tenham apresentado diferença de parâmetros físicos, as envoltórias de resistência se mostraram bem definidas e representaram de maneira global as regiões equidistantes ao ponto de lançamento. Isso provavelmente se deve ao fato da pequena variação da porosidade obtida ao longo da seção transversal em comparação a variação do teor de ferro, o que garantiu estruturas semelhantes às amostras extraídas.

Finalmente, torna-se importante considerar que o objetivo deste trabalho foi fornecer uma primeira idéia a respeito do comportamento dos aterros hidráulicos por meio da análise de amostras indeformadas obtidas nos ensaios de simulação de deposição hidráulica. Assim, esta

proposta objetivou reproduzir as características de deposição semelhantes às de campo, em relação aos processos comumente empregados para a reconstituição de amostras.

Outro fator importante que justificou a utilização do ESDH foi a facilidade e rapidez na realização das diversas simulações e a pequena distância entre o ponto de coleta (ESDH) e o local de realização dos ensaios, facilitando o processo de transferência das amostras para a realização dos ensaios triaxiais e de caracterização. Ressalta-se que em vista da metodologia proposta para a obtenção das amostras indeformadas apresentar ainda um caráter inovador e necessitar de número considerável de amostras para sua aferição, foi necessária a realização de diversas e controladas simulações, o que só seria possível com a utilização do ESDH.

Neste contexto, a metodologia empregada na obtenção das amostras indeformadas associada a estes ensaios de deposição mostrou ser um importante avanço na avaliação do comportamento geotécnico das barragens de rejeito. Contudo, é importante ressaltar que apesar de alguns resultados já evidenciarem este fato, este processo ainda se encontra em fase inicial, sendo necessários ainda maiores estudos para aferir melhor esta metodologia.

6.3 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

As conclusões obtidas anteriormente revelaram a complexidade das análises envolvendo a caracterização e avaliação do comportamento dos aterros hidráulicos. A utilização de amostras indeformadas como alternativa de avaliação do comportamento dos sistemas de disposição de rejeitos revelou de forma mais evidente a variabilidade global destes depósitos devido à influência da forma e característica de deposição. Como visto anteriormente, alguns resultados puderam comprovar estas considerações, mas alguns estudos ainda são necessários com intuito de validar e/ou aferir melhor a proposta desta pesquisa. Baseado nestas premissas são propostas algumas sugestões recomendações para continuidade desta linha de pesquisa.

Com relação às simulações realizadas no ESDH, sugere-se a realização de mais ensaios com diferentes valores de vazão e concentração, de modo a avaliar os efeitos diretos das características de fluxo nas diversas regiões do canal e a homogeneidade ou não destas regiões.

Os resultados obtidos, embora em escala reduzida, revelam uma boa aproximação com a realidade dos mecanismos de deposição que ocorre no campo. Contudo, seria importante realizar análises comparativas utilizando amostras obtidas em campo, nos ensaios no ESDH e

amostras reconstituídas.

Para avaliação da aplicabilidade do método de obtenção de amostras para outros rejeitos, sugere-se a realização de ensaios de simulação (ESDH) com outros tipos de rejeitos e a realização de ensaios utilizando amostras obtidas em campo, nos ensaios no ESDH e amostras reconstituídas.

Com relação aos parâmetros geomecânicos, sugere-se a realização de ensaios para a caracterização da resistência ao cisalhamento dos resíduos de minério de ferro em condições não drenadas (Ensaio triaxiais CIU), avaliando a influência dos acamamentos e estratificações.

Ainda considerando os parâmetros de resistência, sugere-se a investigação da influência do processo de deposição nos corpos de prova adensados segundo trajetórias anisotrópicas (Ensaio triaxiais CK₀U).

Diante da variabilidade observada nas características deposicionais, percebe-se a necessidade de proceder a uma avaliação do comportamento hidráulico da estrutura utilizando amostras indeformadas. Neste sentido devem ser verificados os efeitos das estratificações e acamamentos gerados no processo de deposição hidráulica no coeficiente de permeabilidade dos rejeitos. Desta forma, sugere-se a realização de uma análise das características hidráulicas em ambos os tipos de amostras, de modo a avaliar a representatividade do processo de reconstituição na avaliação deste parâmetro.

Considerando a aplicabilidade dos ensaios de campo para obtenção de parâmetros geomecânicos de barragens de rejeitos, propõe-se a realização de análises comparativas entre esses parâmetros obtidos em campo e laboratório por meio de amostras indeformadas e reconstituídas.

Finalmente, propõe-se um estudo das diferentes metodologias de obtenção de amostras indeformadas utilizadas na rotina das investigações de campo aplicada a barragens de rejeitos em comparação com a metodologia proposta neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1984a). Solo – Análise Granulométrica. NBR-7181, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 13p.
- ABNT (1984b). Grãos de Solo que Passam na Peneira de 4,8mm – Determinação da Massa Específica. NBR-6508, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 8p.
- ABNT (1986). Amostra de Solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização. NBR-6457, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 9p.
- ABNT (1987). Classificação de Resíduos Sólidos. NBR-10004, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 63p.
- ABNT (1992). Caracterização de cargas poluidoras na mineração. NBR-12649, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 8p.
- ABNT (1993a). Elaboração e apresentação de projeto de disposição de rejeitos de beneficiamento, em barramento, em mineração. NBR-13028, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 10p.
- ABNT (1993b). Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril, em pilha, em mineração. NBR-13029, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 9p.
- ABNT (1993c). Elaboração e apresentação de projeto de reabilitação de áreas degradadas pela mineração. NBR-13030, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 4p.
- ABNT (1995). Rochas e Solos. NBR-6502, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 18p.
- ABRÃO, P.C. & OLIVEIRA, S.L. (1998). Mineração. Geologia de Engenharia, Oficina de textos, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, ABGE, São Paulo, SP, pp.431-438.
- ABRÃO, P.C. (1987). Sobre a Deposição de Rejeitos de Mineração no Brasil. Simpósio sobre Barragens de Rejeito e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, REGEO'87, Rio de Janeiro, RJ, pp.1-9.
- ASSIS, A.P. & ESPÓSITO, T.J. (1995). Construção de barragens de rejeito sob uma visão geotécnica. III Simpósio Sobre Barragens de Rejeito e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, REGEO'95, ABMS/ ABGE/ CBGB, Ouro Preto, MG, pp. 259-274.

- ÁVILA, J.P., SOARES, R. & COSTA, L.H.D. (1995). Deposição de Rejeitos Finos pelo Método de Secagem. III Simpósio sobre Barragens de Rejeito e Disposição de Resíduos, REGEO'95, ABMS/ABGE/CBGB, Ouro Preto, MG, pp. 97-108.
- BEEN, K., CROOKS, J.H.A., CONLIN, B.H. & HORSFIELD, D. (1998). Liquefaction of Hydraulically Placed Sand Fill. Specialty Conference on Hydraulic Fill Structures, Hydraulic Fill Structures, ASCE, Fort Collins, USA, pp. 573-590.
- CAVALCANTE, A.L.B. & ASSIS, A.P. (2000). Permeability Gradient and its Influence on Tailings Dams. 5th International Symposium on Environmental Geotechnology and Global Sustainable Development, 5th ISEGGSD, Belo Horizonte, Brazil, 8p.
- CAVALCANTE, A.L.B. (2000). Efeito do Gradiente de Permeabilidade na Estabilidade das Barragens de Rejeito Alteadas pelo Método de Montante. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 190p.
- CAVALCANTE, C.G., ESPÓSITO, T., RIBEIRO, L.F.M. & ASSIS, A. (1998). Contenção de Efluentes Sólidos de uma Mina de Minério de Ferro. XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG, ABMS, Brasília, DF, pp. 1877-1883.
- DNPM (2001). Portaria N° 237, Normas Reguladoras de Mineração. Departamento Nacional de Produção Mineral, DNPM.
- DNPM, (2005). O Setor Mineral – Sumário Executivo 2005. Departamento Nacional de Produção Mineral, DNPM, Brasília, DF, 122p.
- ESPÓSITO, T. & ASSIS, A. (1998). Análise Comparativa da Variabilidade de Parâmetros Geotécnicos entre Diferentes Alteamentos de uma Barragem de Rejeito. XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG, ABMS, Brasília, DF, pp. 1797-1804.
- ESPÓSITO, T. & ASSIS, A. (1999). Método Probabilístico Acoplado ao Método Observacional Aplicado à Barragem de Rejeito. 4º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, Regeo'99, ABMS, São José dos Campos, SP, pp. 187-194.
- ESPÓSITO, T., ASSIS, A. & RIBEIRO, L.F.M. (1997). Calidad de la Construcción de Represas para Escoria, 4º Congreso Chileno de Ingenieria Geotecnica, Chile, pp. 455-468.
- ESPÓSITO, T.J. (1995). Controle Geotécnico da Construção de Barragens de Rejeito - Análise da Estabilidade de Taludes e Estudos de Percolação. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 159 p.
- ESPÓSITO, T.J. (2000). Metodologia Probabilística e Observacional Aplicada a Barragens de Rejeito Construídas por Aterro Hidráulico. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 363p.

- FRANCO, D. & MASCARENHAS, G.R. (1995). Disposição de Rejeitos de Beneficiamento de Minérios no Quadrilátero Ferrífero – Estado Atual. III Simpósio sobre Barragens de Rejeito e Disposição de Resíduos, REGEO'95, ABMS/ABGE/CBGB, Ouro Preto, MG, pp.225-233.
- GIOVANNINI, M. & AMARAL, R.D. (1999). Técnicas para Disposição de Rejeitos. 4º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, REGEO'99, ABMS, São José dos Campos, SP, pp.133-142.
- GOMES, R.C., ARAÚJO, L.G., OLIVEIRA, W.L., RIBEIRO, S.G.S & NOGUEIRA, C.L. (1999b). Concepção e Projeto Básico da Disposição em Pilhas de Rejeitos de Minério de Ferro em Cava Exaurida de Mineração. 4º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, REGEO'99, ABMS, São José dos Campos, SP, pp.153-159.
- GOMES, R.C., OLIVEIRA, W.L., ARAÚJO, L.G., RIBEIRO, S.G.S & NOGUEIRA, C.L. (1999a). Condicionantes Geológico-Geotécnicos de Projetos de Disposição de Rejeitos em Cava Exaurida de Mineração. 4º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, REGEO'99, ABMS, São José dos Campos, SP, pp.153-159.
- GUMIERE, A.G., BUENO, B.S., LIMA, D.C. & MINETTE, E. (1995). Estudo do Potencial de Liquefação de Rejeitos de Mineração de Ferro sob Cargas Estáticas. III Simpósio Sobre Barragens de Rejeito e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, REGEO'95, ABMS/ ABGE/ CBGB, Ouro Preto, MG, pp. 59-68.
- GUMIERE, A.G., BUENO, B.S., LIMA, D.C. & MINETTE, E. (1998). Estudo do Adensamento de Rejeito de Mineração. XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG, ABMS, Brasília, DF, pp. 1823-1827.
- HEAD, K.H. (1986). Manual of Soil Laboratory Testing. London, UK: Pentech Press. Vol.3, 1240p
- HERNANDEZ, H.M. (2002). Caracterização Geomecânica de Rejeitos Aplicada a Barragens de Aterro Hidráulico. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF., 174 p.
- HERNANDEZ, H.M. (2005). Utilização do Equipamento de simulação de Deposição Hidráulica (ESDH) para a Caracterização Geomecânica de Rejeitos Aplicada a Barragens de Aterro Hidráulico. Exame de Qualificação de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF., 50 p.
- HERNANDEZ, H.O.M. & ASSIS, A.P. (2002a). Influência do Conteúdo de Ferro na Resistência de Rejeitos de Minério de Ferro. 10º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia Ambiental, Ouro Preto, MG, 13p.
- HERNANDEZ, H.O.M. & ASSIS, A.P. (2002b). Caracterização Geomecânica de Rejeitos de Minério de Ferro Aplicada a Barragens de Aterro Hidráulico. XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 8p.
- KINOSITA, S. (1979). Effects of Initial Soil-Water Conditions on Frost Heaving Characteristics. Engineering Geology, Amsterdam, 13: pp. 41-52.

- KÜPPER, A.A.G., MORGENSTERN, N.R. & SEGO, D.C. (1992). Laboratory Test to Study Hydraulic Fill. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(3): pp.405-417
- KÜPPER, A.M.A.G. (1991) Desing of Hydraulic Fill. PhD Thesis, Dept of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Canada, 525p.
- LAMBE, W.T. & WHITMAN, R.V. (1972). *Mecanica de Suelos*. Centro Regional de Ayuda Técnica, México/Buenos Aires, 582 p.
- LIPORACI, S.R. & ZUQUETTE, L.V. (1995). Carta de Zoneamento Geotécnico Geral Utilizada para Indicar Áreas Favoráveis a Disposição de Rejeitos. III Simpósio sobre Barragens de Rejeito e Disposição de Resíduos, REGEO'95, ABMS/ABGE/CBGB, Ouro Preto, MG, pp.135-147.
- LO PRESTI, D.C.F., BERARDI, R., PEDRONI, S., and CRIPPA, V (1993). A New Traveling Sand Pluviator to Reconstitute Specimens of Weel-graded Silty Sands. *Geotechnical testing Journal*, GTJODJ, Vol. 16, N0. 1, pp 18-26.
- LOPES, M.C.O. & ASSIS, A.P. (2000). Hydraulic Disposition of Granular Tailings and Influence Upon their Strength Parameters. 5th International Symposium on Environmental Geotechnology and Global Sustainable Development, 5th ISEGGSD, Belo Horizonte, Brazil, 8p.
- LOPES, M.C.O. (2000). Disposição Hidráulica de Rejeitos Arenosos e Influência nos Parâmetros de Resistência. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 157 p.
- MELLO, L.G.F.S., CARDOSO, W.S. & CARRIER III, W.D. (1987). Deposição de Rejeitos da Lavagem da Bauxita de Trombetas nas Próprias Áreas Anteriormente Lavradas. Simpósio sobre Barragens de Rejeito e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, Rio de Janeiro, RJ, pp.111-131.
- MORETTI, M.R. & CRUZ, P.T. (1996). Aterros Hidráulicos e sua Aplicação na Construção de Barragens. 100 Barragens Brasileiras, Casos Históricos, Materiais de Construção, projetos, Oficina de Textos, São Paulo, SP, p. 556-591.
- MORGENSTERN, N.R. & KÜPPER, A.A.G. (1998). Hydraulic Fill Structures – A perspective. Specialty Conference on Hydraulic Fill Structures, Hydraulic Fill Structures, ASCE, Fort Collins, USA, pp. 1-31.
- OLIVEIRA FILHO, W.L. (1987). Considerações Sobre Ensaios Triaxiais em Areias. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ, 266 p.
- OLIVEIRA, J.C., XAVIER, F.V.C., SATO, T. & CAMPOS, J.A. (2005). Sistema de Gestão de Barragens de Rejeitos Utilizando Sistema de Informações Geográficas e Simulação 3D de Preenchimento de Barragens. XXVI Seminário Nacional de Grandes Barragens, CBDB, Goiânia, GO, 9p.

- PEREIRA, E.L. (2005). Estudo do Potencial de Liquefação de Rejeitos de Minério de Ferro sob Carregamento Estático. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 185 p.
- PIRES, J.M.M., LENA, J.C., MACHADO, C.C & PEREIRA, R.S. (2003). Potencial Poluidor de Resíduo Sólido da Samarco Mineração: Estudo de Caso da Barragem de Germano. Revista *Árvore*, vol. 27, nº3, Viçosa, MG.
- PRESOTTI, E.S. (2002). Influência do Teor de Ferro nos Parâmetros de Resistência de um Rejeito de Minério de Ferro. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 153 p.
- RATTON, R.B. (1993). Ensaio Triaxiais em Areia Saturada. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 167 p.
- RIBEIRO, L.F. & ASSIS, A.P, (1999). Modelagem Física do Processo de Deposição Hidráulica Associado a Barragens de Rejeito. 4º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, REGEO'99, ABMS, São José dos Campos, SP, pp.195-202.
- RIBEIRO, L.F. (2000). Simulação Física do Processo de Formação dos Aterros Hidráulicos Aplicado a Barragens de Rejeitos. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 235 p.
- RIBEIRO, L.F.; ASSIS, A. & ESPÓSITO, T.J. (1998). Efeito das Variáveis de Deposição Hidráulica no Comportamento Geotécnico de Barragens de Rejeito. XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG, ABMS, Brasília, DF, pp. 1869-1876.
- RUSSO, F. (2005). Comportamento de Barragens de Rejeito Construídas por Aterro Hidráulico: Caracterização Laboratorial e Simulação Numérica do Processo Construtivo. Exame de Qualificação de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF., 52 p.
- SÁNCHEZ, L.E. (1995). Manejo de Resíduos Sólidos en Minería. II Curso Internacional de Aspectos Geológicos de Protección Ambiental, UNESCO, vol.1, pp.239-250.
- SANTOS, A.G. (2004). Influência do Teor de Ferro na Condutividade Hidráulica Saturada de um Rejeito de Minério de Ferro. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 191 p.
- SELLEY, R.C. (1988). *Applied Sedimentology*. Academic Press Limited, London, UK, 446p.
- TAYLOR, D.W. (1966). *Fundamentals of Soil Mechanics*. John Wiley and Sons, Inc., New York, USA, 700p.
- TERZAGHI, K. & PECK, R.B. (1986). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 2. ed. Wiley and Sons, Inc., New York, USA, 729 p.

- VAID, Y.D. & SIVATHAYALAN, S. (1995). Static and Cyclic Liquefaction Potential of Fraser Delta Sand in Simple Shear and Triaxial Tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 33: 281-289.
- VAID, Y.P., and NEGUSSEY, D (1988). Preparation of Reconstituted Sand Specimens. *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock*, ASTM STP 977, Robert T. Donaghe, Ronald C. Chaney, and Marshall L. Silver, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 405-417.
- VEESAERT, C., CARDIA, R.J.R. & TSUZUKI, A.L.L.Z. (2005). Segurança de Barragens – Questões de Responsabilidade. XXVI Seminário Nacional de Grandes Barragens, CBDB, Goiânia, GO, 11p.
- VICK. S.G. (1983). *Planning, Design and Analysis of Tailings Dams*. Wiley Int., New York, USA.

APÊNDICE
- A -

MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS

Tabela 0.1 – Determinação da massa específica dos Grãos para as amostras a 2,8m do ponto de descarga

Amostra: A	Local: ESDH		Operador: Joice Milonas
Distancia do Ponto de Descarga: 2,80m		Data: 02/02/2006	
Picnômetro N°	9	16	14
Pic.+água+solo (g)	699,1	692,6	679,9
Temperatura (°C)	26,3	26,3	26,3
Pic. + água (g)	659,6	652,8	639,9
Sólidos (g)	60,0	60,0	60,0
Umidade Higroscópica (%)	0,0	0,0	0,0
ρ_s água (g/cm ³)	0,9967	0,9967	0,9967
ρ_s sólidos (g/cm ³)	2,92	2,97	2,99
ρ_s sólidos médio (g/cm ³)	2,98		

Amostra: B	Local: ESDH		Operador: Joice Milonas
Distancia do Ponto de Descarga: 2,80m		Data: 02/02/2006	
Picnômetro N°	12	8	10
Pic.+água+solo (g)	672,1	684,1	697,4
Temperatura (°C)	26,3	26,3	26,3
Pic. + água (g)	633,2	645,1	658,3
Sólidos (g)	60,0	60,0	60,0
Umidade Higroscópica (%)	0,0	0,0	0,0
ρ_s água (g/cm ³)	0,9967	0,9967	0,9967
ρ_s sólidos (g/cm ³)	2,84	2,85	2,87
ρ_s sólidos (g/cm ³)	2,85		

Amostra: C	Local: ESDH		Operador: Joice Milonas
Distancia do Ponto de Descarga: 2,80m		Data: 02/02/2006	
Picnômetro N°	18	13	25
Pic.+água+solo (g)	691,8	690,4	695,4
Temperatura (°C)	26,4	26,4	26,4
Pic. + água (g)	652,7	651,2	656,1
Sólidos (g)	60,0	60,0	60,0
Umidade Higroscópica (%)	0,0	0,0	0,0
ρ_s água (g/cm ³)	0,9967	0,9967	0,9967
ρ_s sólidos (g/cm ³)	2,87	2,88	2,89
ρ_s sólidos (g/cm ³)	2,88		



Resultado não satisfatório - Ponto descartado

Tabela 0.2 - Determinação da massa específica dos Grãos para as amostras a 2,0m do ponto de descarga

Amostra: 01	Local: ESDH		Operador: Joice Milonas
Distancia do Ponto de Descarga: 2,00m		Data: 03/02/2006	
Picnômetro N°	4	5	17
Pic.+água+solo (g)	702,00	698,70	695,00
Temperatura (°C)	26,4	26,4	26,4
Pic. + água (g)	661,20	657,91	655,04
Sólidos (g)	60,00	60,00	58,60
Umidade Higroscópica (%)	0,00	0,00	0,00
ρ_s água (g/cm ³)	0,9967	0,9967	0,9967
ρ_s sólidos (g/cm ³)	3,11	3,11	3,13
ρ_s sólidos médio (g/cm ³)	3,11		

Amostra: 02	Local: ESDH		Operador: Joice Milonas
Distancia do Ponto de Descarga: 1,85m		Data: 03/02/2006	
Picnômetro N°	18	14	9
Pic.+água+solo (g)	693,00	679,70	699,40
Temperatura (°C)	26,2	26,2	26,2
Pic. + água (g)	652,68	639,89	659,58
Sólidos (g)	60,00	60,00	60,00
Umidade Higroscópica (%)	0,00	0,00	0,00
ρ_s água (g/cm ³)	0,9968	0,9968	0,9968
ρ_s sólidos (g/cm ³)	3,04	2,96	2,96
ρ_s sólidos (g/cm ³)	2,96		

Amostra: 03	Local: ESDH		Operador: Joice Milonas
Distancia do Ponto de Descarga: 2,00m		Data: 03/02/2006	
Picnômetro N°	12	8	10
Pic.+água+solo (g)	673,50	684,50	698,00
Temperatura (°C)	26,2	26,2	26,2
Pic. + água (g)	633,20	645,10	658,29
Sólidos (g)	61,36	60,13	60,15
Umidade Higroscópica (%)	0,00	0,00	0,00
ρ_s água (g/cm ³)	0,9968	0,9968	0,9968
ρ_s sólidos (g/cm ³)	2,90	2,89	2,93
ρ_s sólidos (g/cm ³)	2,90		

 Resultado não satisfatório - Ponto descartado

Tabela 0.3 - Determinação da massa específica dos Grãos para as amostras a 1,0m do ponto de descarga

Amostra: 01	Local: ESDH		Operador: Joice Milonas
Distancia do Ponto de Descarga: 1,00m		Data: 04/02/2006	
Picnômetro N°	4	5	17
Pic.+água+solo (g)	699,30	706,10	711,10
Temperatura (°C)	26,2	26,2	26,2
Pic. + água (g)	656,60	663,41	668,55
Sólidos (g)	60,00	60,00	60,00
Umidade Higroscópica (%)	0,00	0,00	0,00
ρ_s água (g/cm ³)	0,9968	0,9968	0,9968
ρ_s sólidos (g/cm ³)	3,46	3,46	3,43
ρ_s sólidos médio (g/cm ³)	3,46		

Amostra: 02	Local: ESDH		Operador: Joice Milonas
Distancia do Ponto de Descarga: 1,00m		Data: 04/02/2006	
Picnômetro N°	25	13	16
Pic.+água+solo (g)	700,20	695,30	696,40
Temperatura (°C)	26,2	26,2	26,2
Pic. + água (g)	656,12	651,20	652,37
Sólidos (g)	60,00	60,00	60,00
Umidade Higroscópica (%)	0,00	0,00	0,00
ρ_s água (g/cm ³)	0,9968	0,9968	0,9968
ρ_s sólidos (g/cm ³)	3,76	3,76	3,75
ρ_s sólidos (g/cm ³)	3,75		

Amostra: 03	Local: ESDH		Operador: Joice Milonas
Distancia do Ponto de Descarga: 1,00m		Data: 04/02/2006	
Picnômetro N°	9	4	5
Pic.+água+solo (g)	701,00	702,60	699,30
Temperatura (°C)	26,2	26,2	26,2
Pic. + água (g)	659,56	661,23	657,94
Sólidos (g)	60,00	60,00	60,00
Umidade Higroscópica (%)	0,00	0,00	0,00
ρ_s água (g/cm ³)	0,9968	0,9968	0,9968
ρ_s sólidos (g/cm ³)	3,22	3,21	3,21
ρ_s sólidos (g/cm ³)	3,21		



Resultado não satisfatório - Ponto descartado

Tabela 0.4 - Determinação da massa específica dos Grãos para as amostras a 0,1m do ponto de descarga

Amostra: 01	Local: ESDH		Operador: Joice Milonas
Distancia do Ponto de Descarga: 0,10m (crista)		Data: 05/02/2006	
Picnômetro N°	8	10	12
Pic.+água+solo (g)	688,7	701,9	676,9
Temperatura (°C)	26,2	26,2	26,2
Pic. + água (g)	645,10	658,29	633,20
Sólidos (g)	60,00	60,00	60,00
Umidade Higroscópica (%)	0,00	0,00	0,00
ρ_s água (g/cm ³)	0,9968	0,9968	0,9968
ρ_s sólidos (g/cm ³)	3,65	3,65	3,67
ρ_s sólidos médio (g/cm ³)	3,66		

Amostra: 02	Local: ESDH		Operador: Joice Milonas
Distancia do Ponto de Descarga: 0,10m (crista)		Data: 05/02/2006	
Picnômetro N°	18	14	11
Pic.+água+solo (g)	697,3	684,4	691,9
Temperatura (°C)	26,2	26,2	26,2
Pic. + água (g)	652,68	639,87	647,32
Sólidos (g)	60,00	60,00	60,00
Umidade Higroscópica (%)	0,00	0,00	0,00
ρ_s água (g/cm ³)	0,9968	0,9968	0,9968
ρ_s sólidos (g/cm ³)	3,89	3,87	3,88
ρ_s sólidos (g/cm ³)	3,88		

Amostra: 03	Local: ESDH		Operador: Joice Milonas
Distancia do Ponto de Descarga: 0,10m (crista)		Data: 05/02/2006	
Picnômetro N°	4	9	5
Pic.+água+solo (g)	704,9	703,2	701,6
Temperatura (°C)	26,4	26,4	26,4
Pic. + água (g)	661,20	659,55	657,91
Sólidos (g)	60,00	60,00	60,00
Umidade Higroscópica (%)	0,00	0,00	0,00
ρ_s água (g/cm ³)	0,9968	0,9968	0,9968
ρ_s sólidos (g/cm ³)	3,67	3,66	3,67
ρ_s sólidos (g/cm ³)	3,66		

APÊNDICE
- B -

CURVAS GRANULOMÉTRICAS

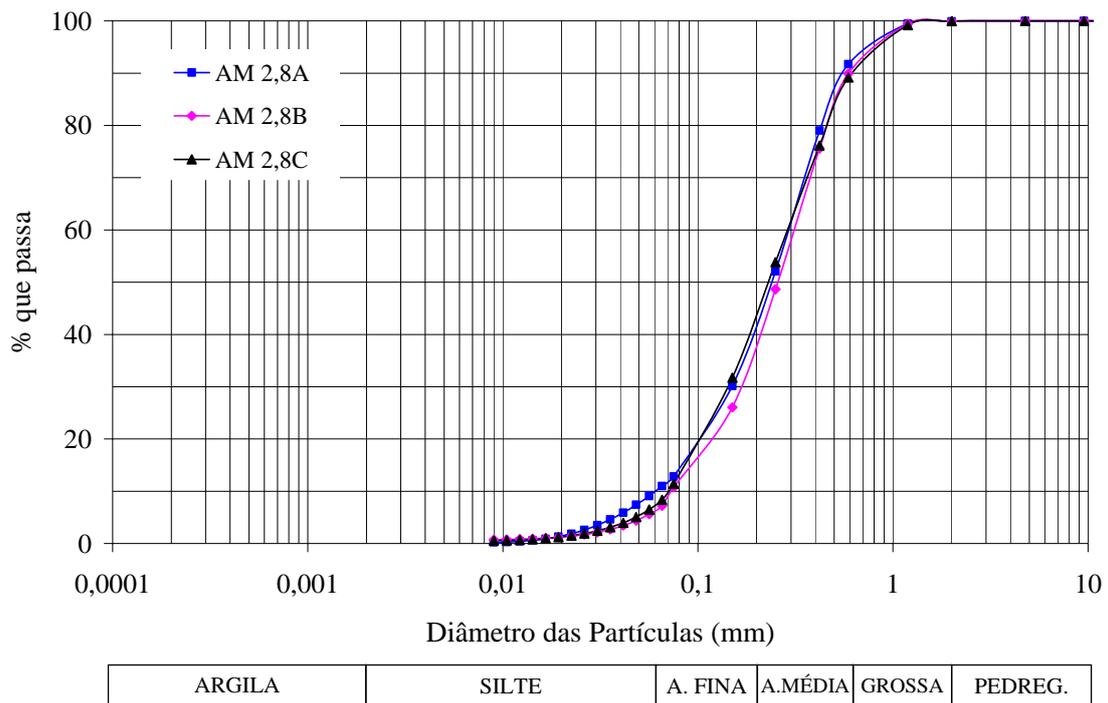


Figura 0.1 - Distribuição granulométrica das amostras a 2,8m do ponto de descarga

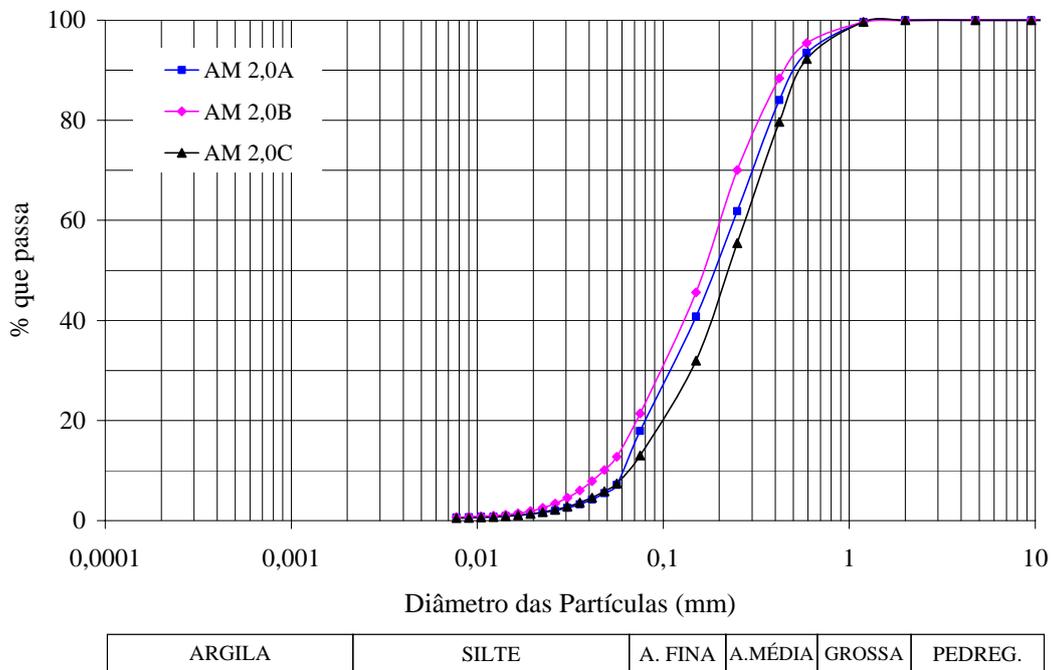


Figura 0.2 - Distribuição granulométrica das Amostras a 2,0m do ponto de descarga

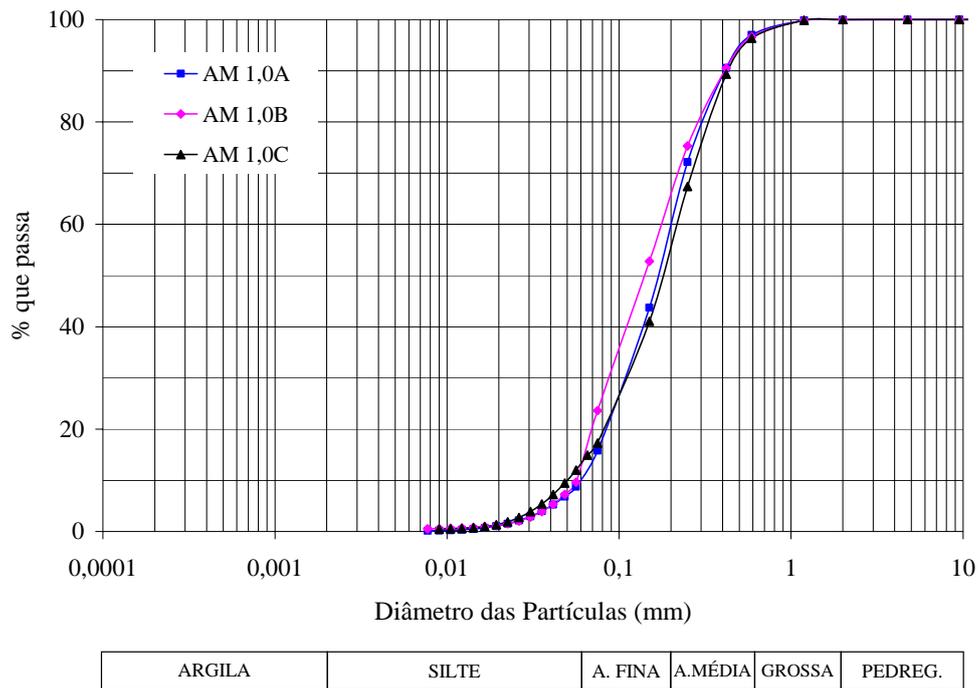


Figura 0.3 - Distribuição granulométrica das Amostras a 1,0m do ponto de descarga

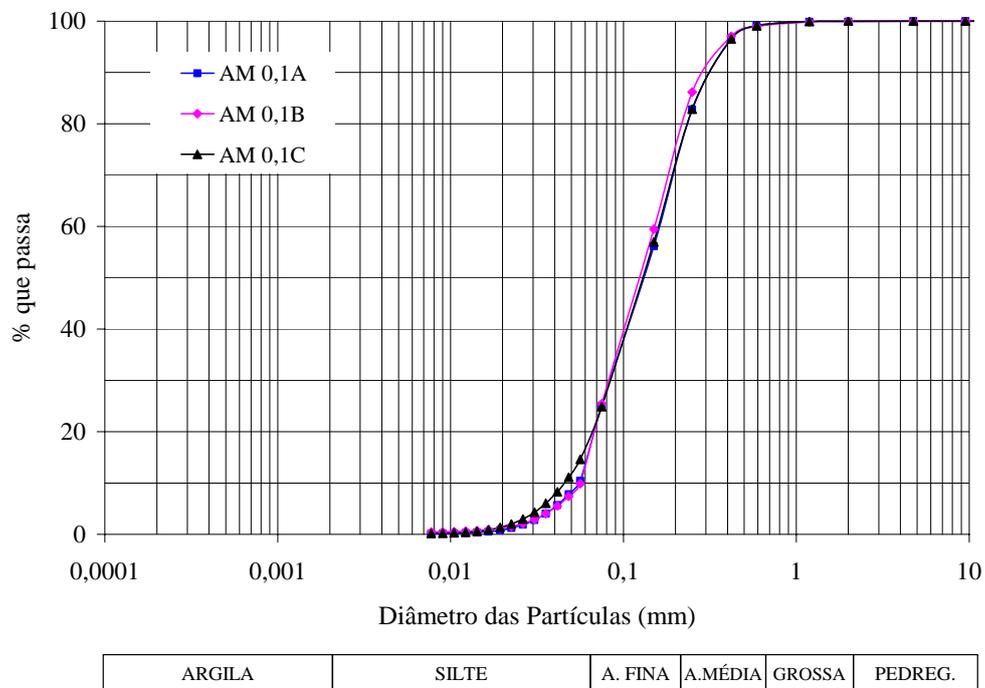


Figura 0.4 - Distribuição granulométrica das Amostras a 0,1m do ponto de descarga

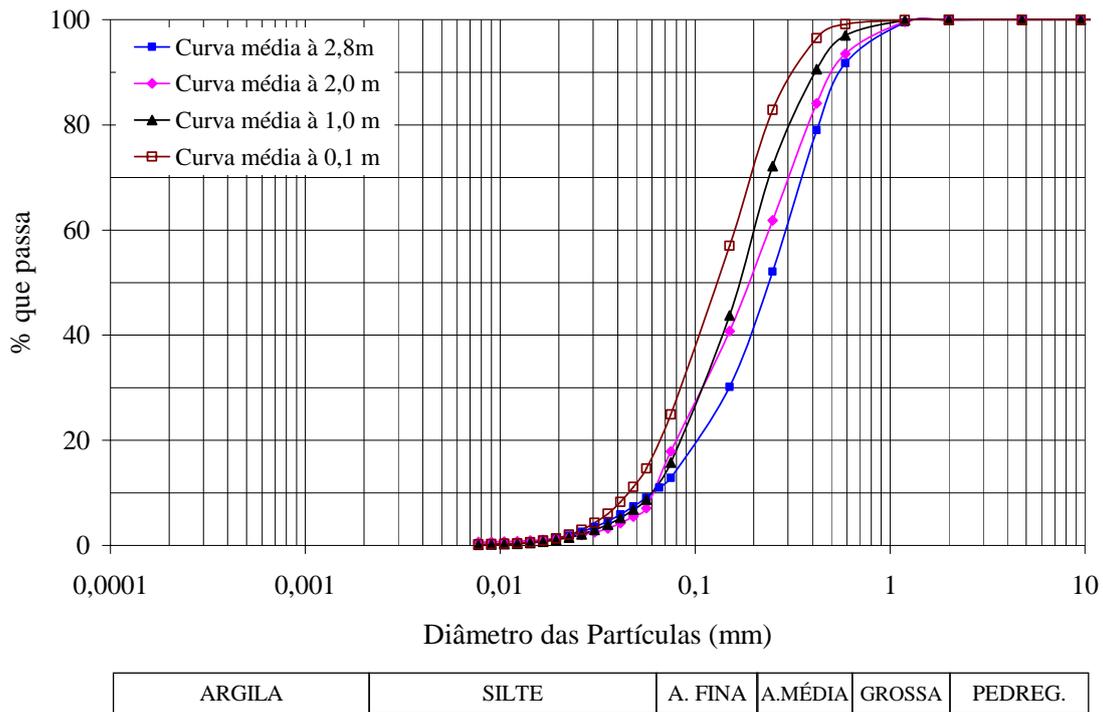


Figura 0.5 - Distribuição granulométrica média ao longo do Canal de deposição

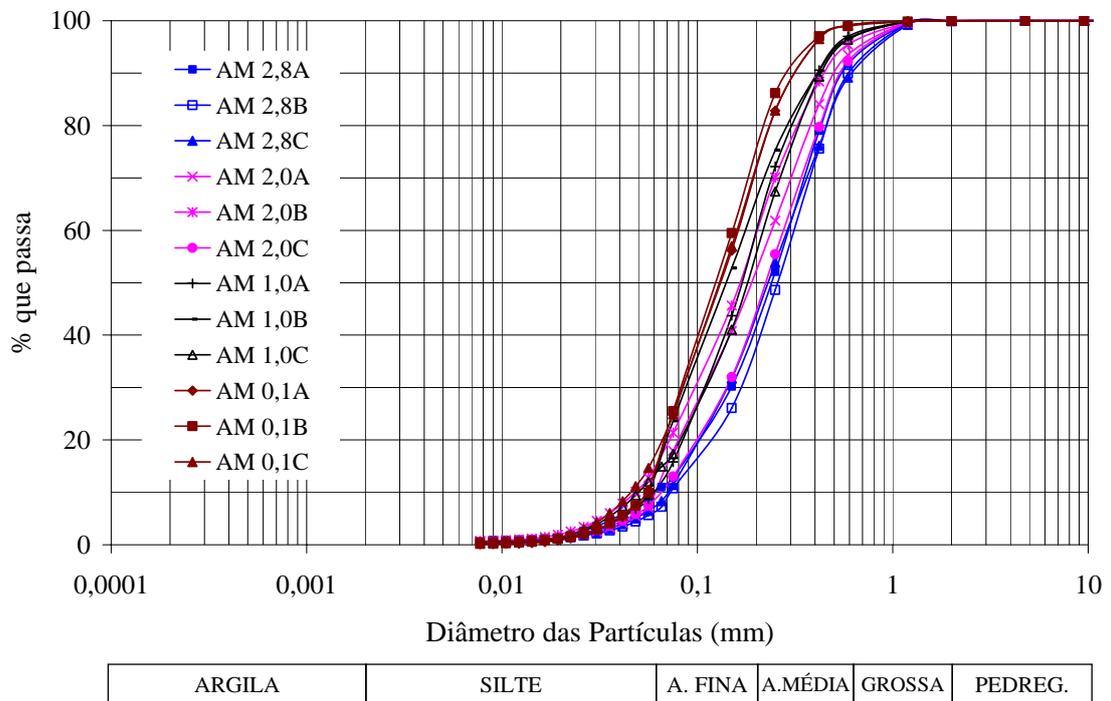


Figura 0.6 - Distribuição granulométrica geral das amostras coletadas no ESDH.

APÊNDICE
- C -

RESULTADOS DOS ENSAIOS TRIAXIAIS DRENADOS – AMOSTRAS
INDEFORMADAS

Tabela 0.1 - Dados das amostras indeformadas extraídas do ESDH a 2,8m do ponto de lançamento

CORPO DE PROVA		2,8A			2,8B			2,8C			
TEOR DE UMIDADE	CÁPSULA	010	019	023	06	045	016	09	020	018	
	SOLO ÚMIDO + TARA (g)	77,02	73,53	72,91	65,88	58,40	29,18	34,63	35,34	39,60	
	SOLO SECO + TARA (g)	69,74	66,96	66,16	60,87	54,13	27,08	31,31	31,87	35,55	
	ÁGUA (g)	7,28	6,57	6,75	5,01	4,27	2,10	3,32	3,47	4,05	
	TARA (g)	12,88	13,90	12,34	13,57	13,79	7,66	7,71	7,67	7,78	
	SOLO SECO (g)	56,86	53,06	53,82	47,30	40,34	19,42	23,60	24,20	27,77	
	TEOR DE UMIDADE (%)	12,8	12,4	12,5	10,6	10,6	10,8	14,1	14,3	14,6	
	TEOR DE UMIDADE MÉDIO (%)	12,6			10,7			14,3			
DADOS DOS C. DE PROVA	ALTURA INICIAL (cm)	10,00			10,00			9,83			
	DIÂMETRO INICIAL (cm)	4,71			4,71			4,71			
	ÁREA INICIAL (cm ²)	17,446			17,446			17,423			
	VOLUME (cm ³)	174,46			174,46			171,34			
	CORPO DE PROVA ÚMIDO (g)	360,20			329,30			349,86			
	CORPO DE PROVA SECO (g)	319,96			297,57			306,01			
	MASSA ESP. ÚMIDA (g/cm ³)	2,065			1,888			2,042			
	MASSA ESP. SECA (g/cm ³)	1,834			1,706			1,786			
SATUR	PRESSÃO CONFINANTE FINAL (kPa)	207			206			204			
	PARÂMETRO B	0,97			0,97			1,00			
ADENSAMENTO	PRESSÃO CÉLULA (kPa)	250			300			400			
	CONTRA PRESSÃO (kPa)	200			200			200			
	LEITURA INICIAL BURETA (cm ³)	-0,05			0,07			-0,01			
	LEITURA FINAL BURETA (cm ³)	-1,26			-3,10			-3,77			
	VOLUME APÓS O ADENSAM. (cm ³)	173,25			171,29			167,59			
	ÁREA APÓS O ADENSAM. (cm ²)	17,36			17,23			17,17			
	ALTURA APÓS ADENSAMENTO (cm)	9,98			9,94			9,76			
CONDIÇÕES DE RUPT.	PRESSÃO CONFINANTE (kPa)	50			100			200			
	DEFORMAÇÃO PICO (%)	3,2			8,4			6,6			
	TENSÃO DESVIADORA PICO (kPa)	235,4			413,9			820,1			
	DEFORMAÇÃO CV (%)	7,0			18,2			17,2			
	TENSÃO DESVIADORA CV (kPa)	177,8			370,1			687,0			
	VARIAÇÃO u_{final} (kPa)	0,60			-2,65			-3,40			
	PARÂMETROS RESISTÊNCIA - PICO	Ângulo de Atrito (°) =				41,6		Coesão (kPa) =		6,1	
	PARÂMETROS RESISTÊNCIA - CV	Ângulo de Atrito (°) =				38,8		Coesão (kPa) =		4,5	

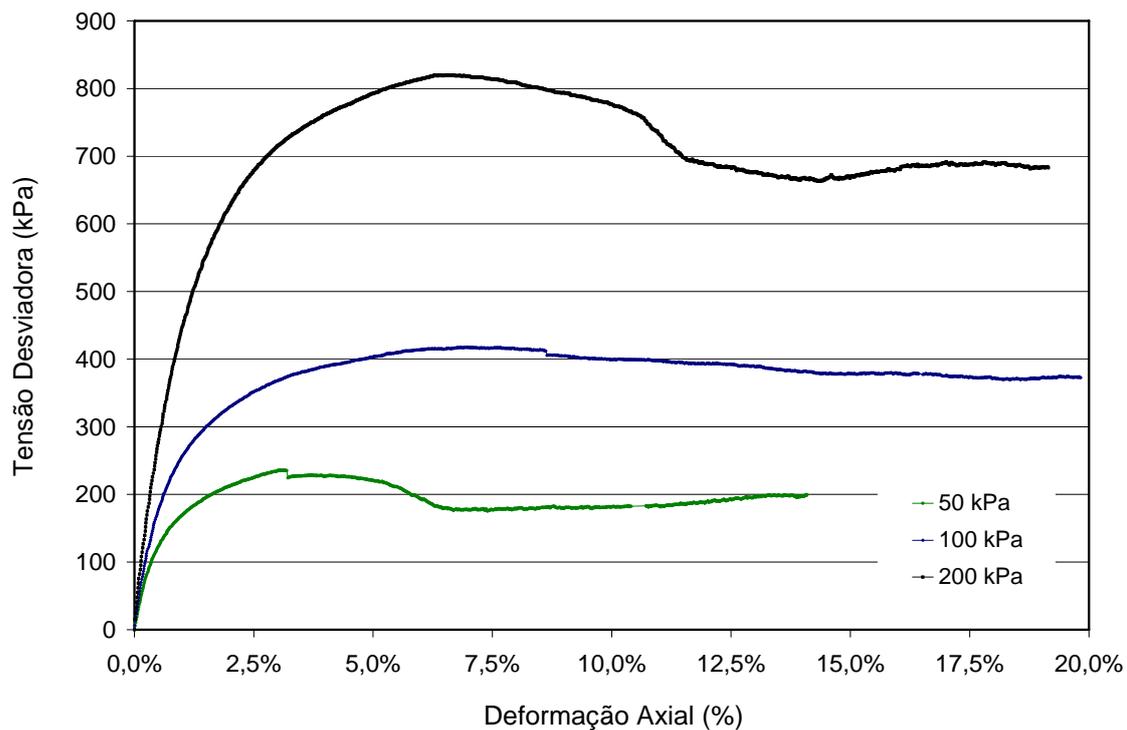


Figura 0.1 - Curva tensão desviadora vs deformação axial das amostras indeformadas a 2,8 m do ponto de descarga.

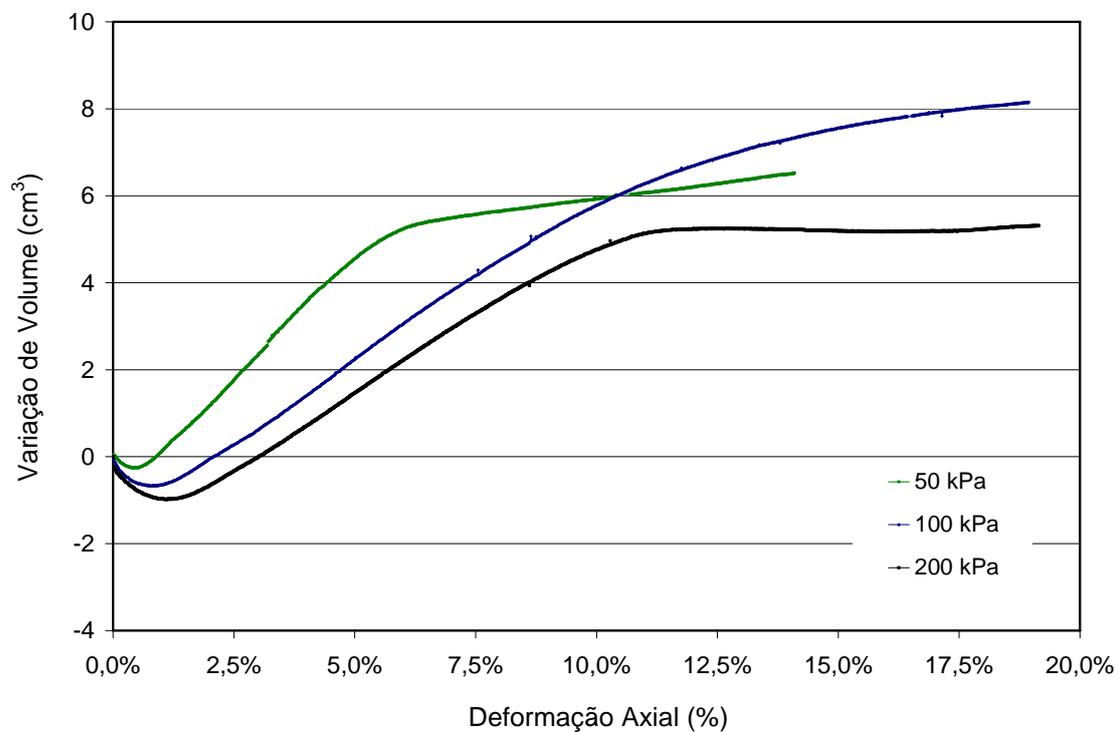


Figura 0.2 - Curva variação volumétrica vs deformação axial das amostras indeformadas a 2,8 m do ponto de descarga

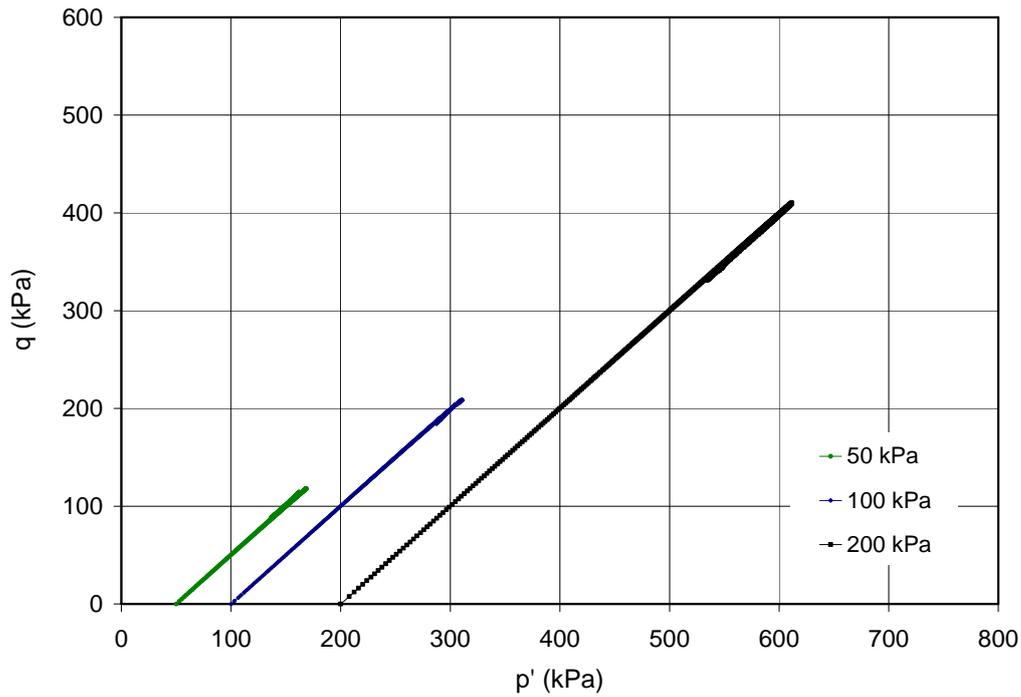


Figura 0.3 - Trajetória de tensões das amostras indeformadas a 2,8 m do ponto de descarga.

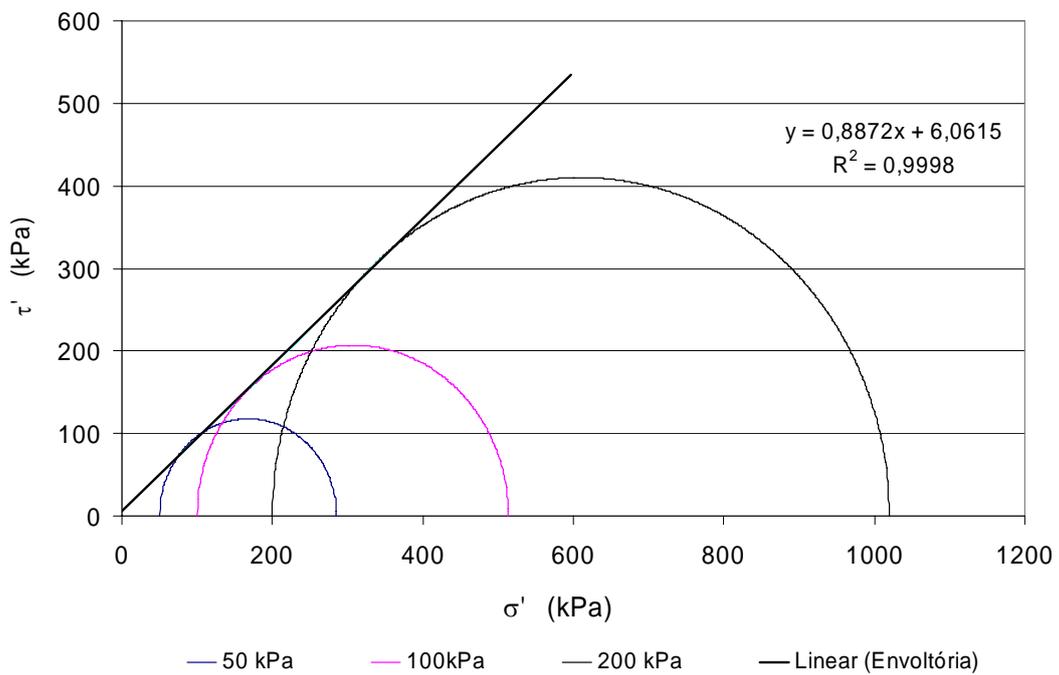


Figura 0.4 - Envoltória de ruptura de pico das Amostras indeformadas a 2,8 m do ponto de descarga

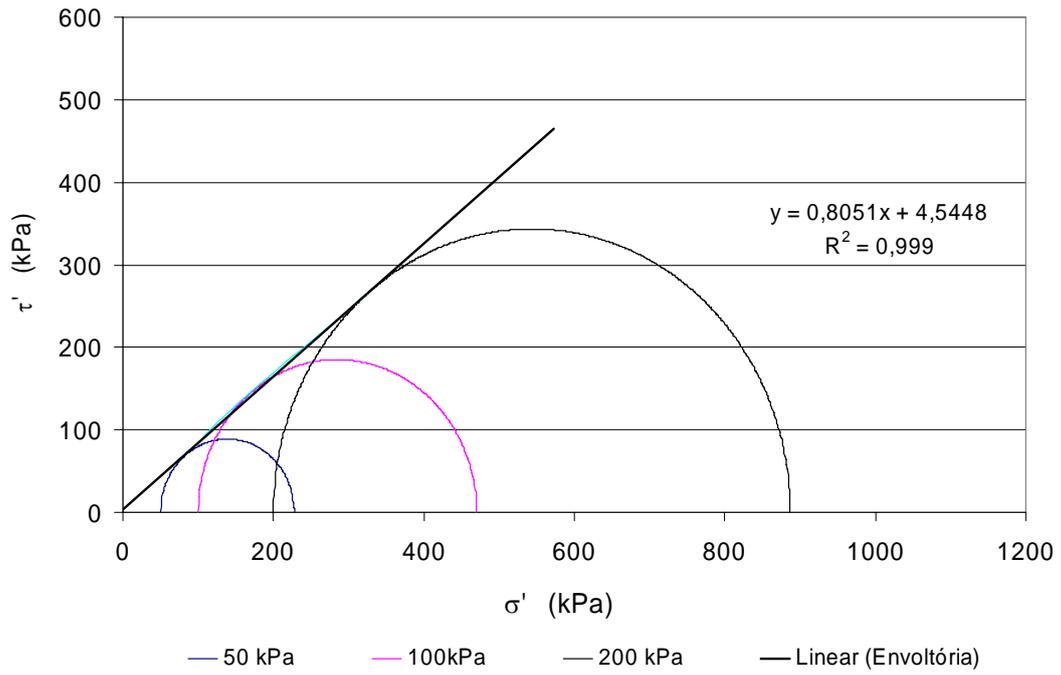


Figura 0.5 - Envoltória de Ruptura a Grandes Deformações das Amostras indeformadas a 2,8 m do ponto de descarga

Tabela 0.2 - Dados das amostras indeformadas extraídas do ESDH a 2,0m do ponto de lançamento

CORPO DE PROVA		2,0A			2,0B			2,0C			
TEOR DE UMIDADE	CÁPSULA	023	019	010	023	019	010	018	020	045	
	SOLO ÚMIDO + TARA (g)	48,49	46,53	41,34	33,48	35,51	35,26	23,73	22,34	44,11	
	SOLO SECO + TARA (g)	43,77	42,29	37,50	30,80	32,73	32,44	21,59	20,41	40,03	
	ÁGUA (g)	4,72	4,24	3,84	2,68	2,78	2,82	2,14	1,93	4,08	
	TARA (g)	12,34	13,90	12,88	12,34	13,90	12,88	7,78	7,67	13,79	
	SOLO SECO (g)	31,43	28,39	24,62	18,46	18,83	19,56	13,81	12,74	26,24	
	TEOR DE UMIDADE (%)	15,0	14,9	15,6	14,5	14,8	14,4	15,5	15,1	15,5	
	TEOR DE UMIDADE MÉDIO (%)	15,2			14,6			15,4			
DADOS DOS C. DE PROVA	ALTURA INICIAL (cm)	10,00			10,00			10,00			
	DIÂMETRO INICIAL (cm)	4,71			4,72			4,71			
	ÁREA INICIAL (cm ²)	17,423			17,490			17,446			
	VOLUME (cm ³)	174,23			174,90			174,46			
	CORPO DE PROVA ÚMIDO (g)	364,66			366,87			334,88			
	CORPO DE PROVA SECO (g)	316,59			320,23			290,20			
	MASSA ESP. ÚMIDA (g/cm ³)	2,093			2,098			1,920			
	MASSA ESP. SECA (g/cm ³)	1,817			1,831			1,663			
SATUR	PRESSÃO CONFINANTE FINAL (kPa)	205			173			206			
	PARÂMETRO B	0,97			1,00			1,00			
ADENSAMENTO	PRESSÃO CÉLULA (kPa)	250			300			400			
	CONTRA PRESSÃO (kPa)	200			200			200			
	LEITURA INICIAL BURETA (cm ³)	-0,20			2,07			-0,03			
	LEITURA FINAL BURETA (cm ³)	-2,74			-2,77			-11,42			
	VOLUME APÓS O ADENSAM. (cm ³)	171,69			170,06			163,07			
	ÁREA APÓS O ADENSAM. (cm ²)	17,25			17,16			16,67			
	ALTURA APÓS ADENSAMENTO (cm)	9,95			9,91			9,78			
CONDIÇÕES DE RUPT.	PRESSÃO CONFINANTE (kPa)	50			100			200			
	DEFORMAÇÃO PICO (%)	5,9			5,2			9,9			
	TENSÃO DESVIADORA PICO (kPa)	245,9			413,0			746,4			
	DEFORMAÇÃO CV (%)	16,8			11,9			18,8			
	TENSÃO DESVIADORA CV (kPa)	219,5			300,0			701,0			
	VARIAÇÃO u_{final} (kPa)	-2,90			1,25			-3,40			
	PARÂMETROS RESISTÊNCIA - PICO	Ângulo de Atrito (°) =				38,9		Coesão (kPa) =		16,7	
	PARÂMETROS RESISTÊNCIA - CV	Ângulo de Atrito (°) =				38,9		Coesão (kPa) =		2,7	

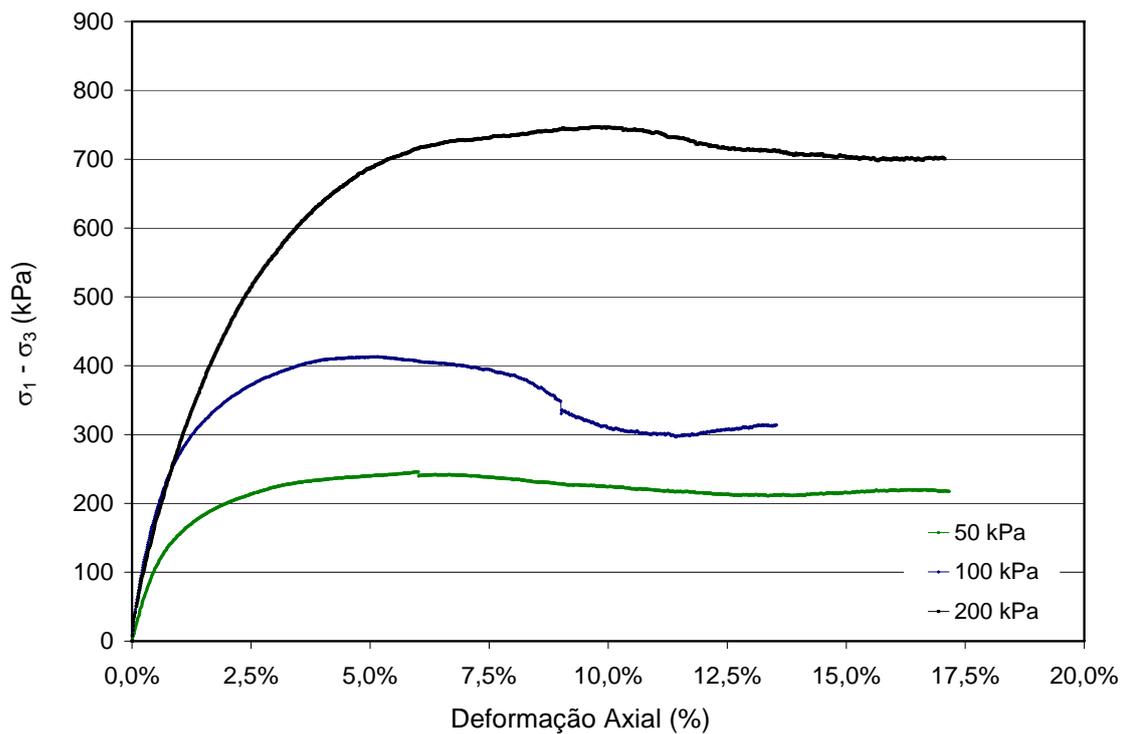


Figura 0.6 - Curva tensão desviadora vs deformação axial das amostras indeformadas a 2,0 m do ponto de descarga

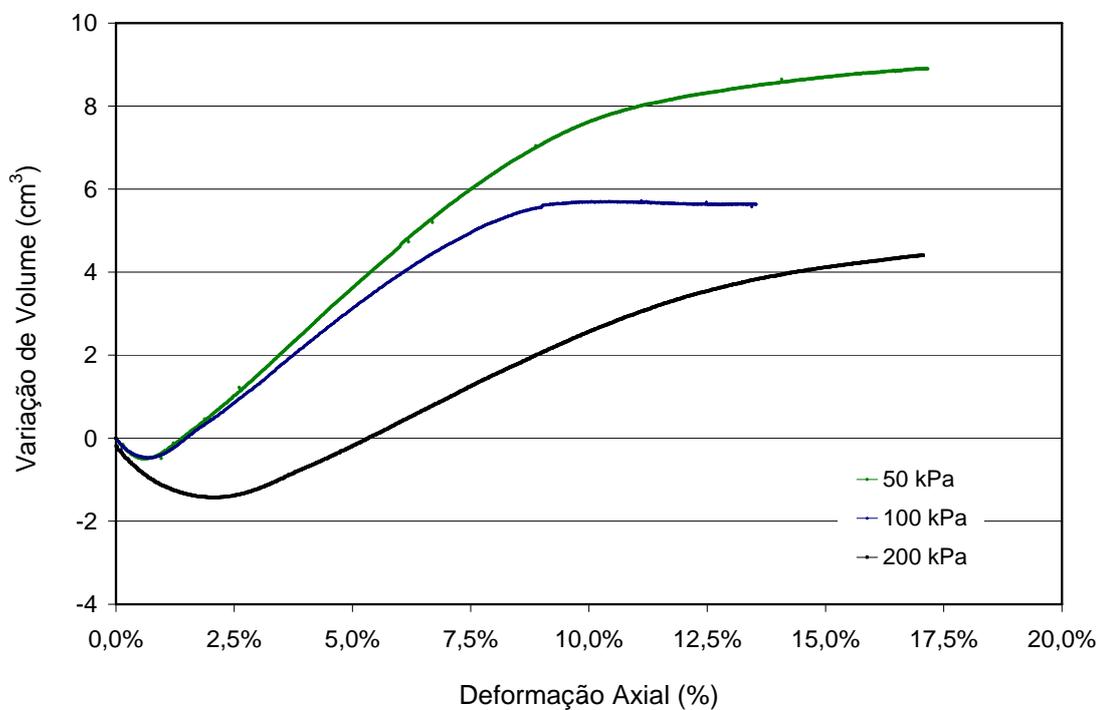


Figura 0.7 - Curva variação volumétrica vs deformação axial das amostras indeformadas a 2,0 m do ponto de descarga

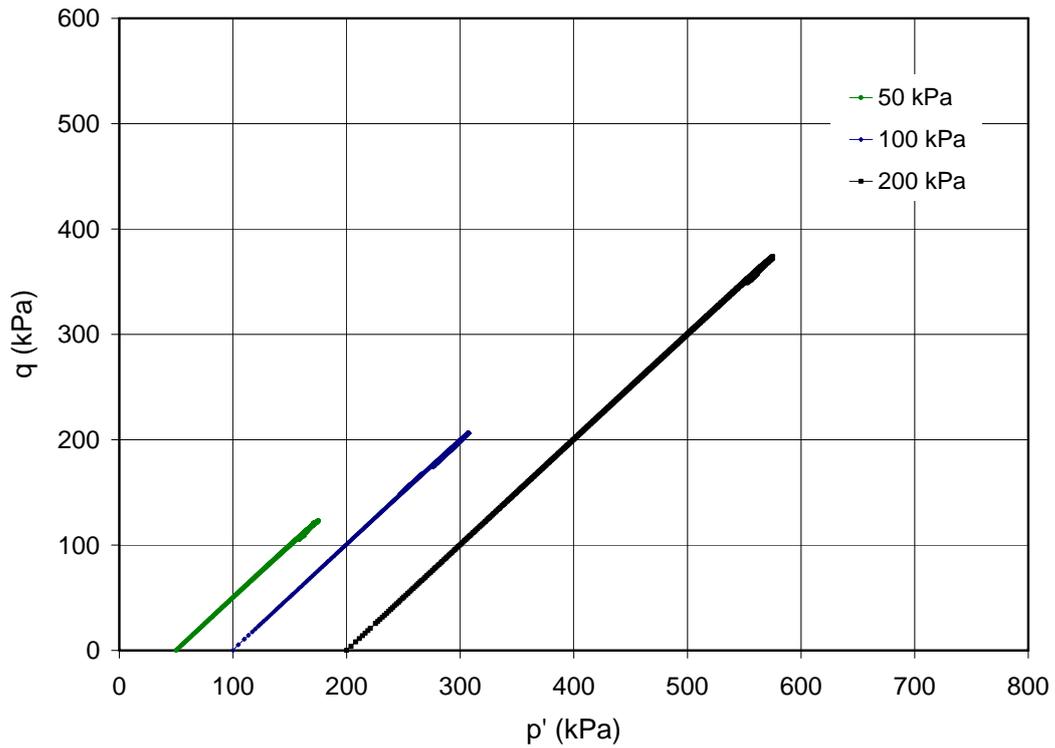


Figura 0.8 - Trajetória de tensões das amostras indeformadas a 2,0 m do ponto de descarga

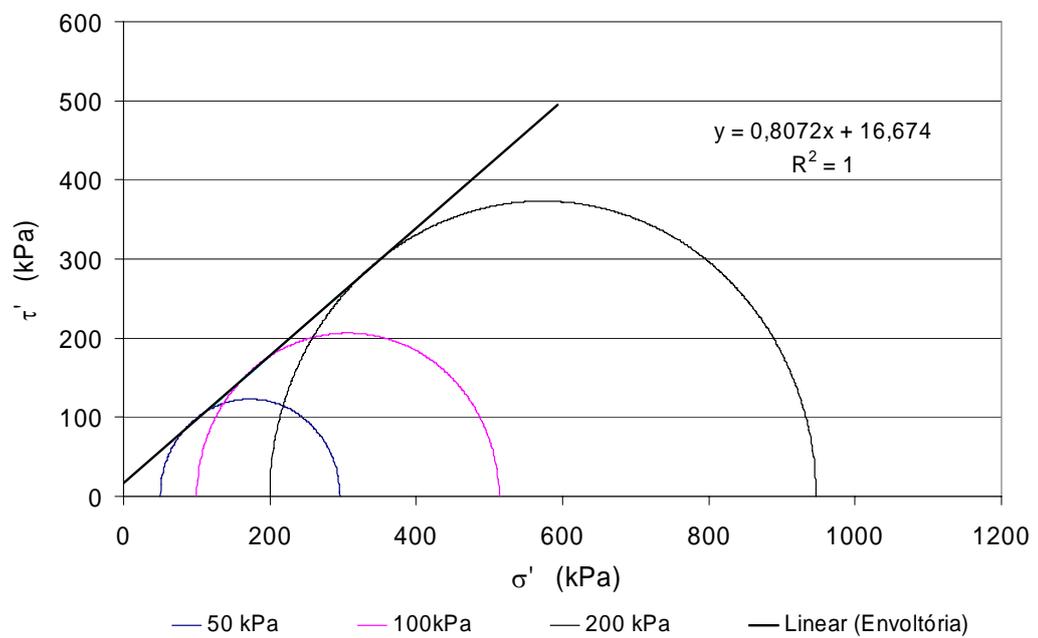


Figura 0.9 - Envoltória de ruptura de pico das amostras indeformadas a 2,0 m do ponto de descarga

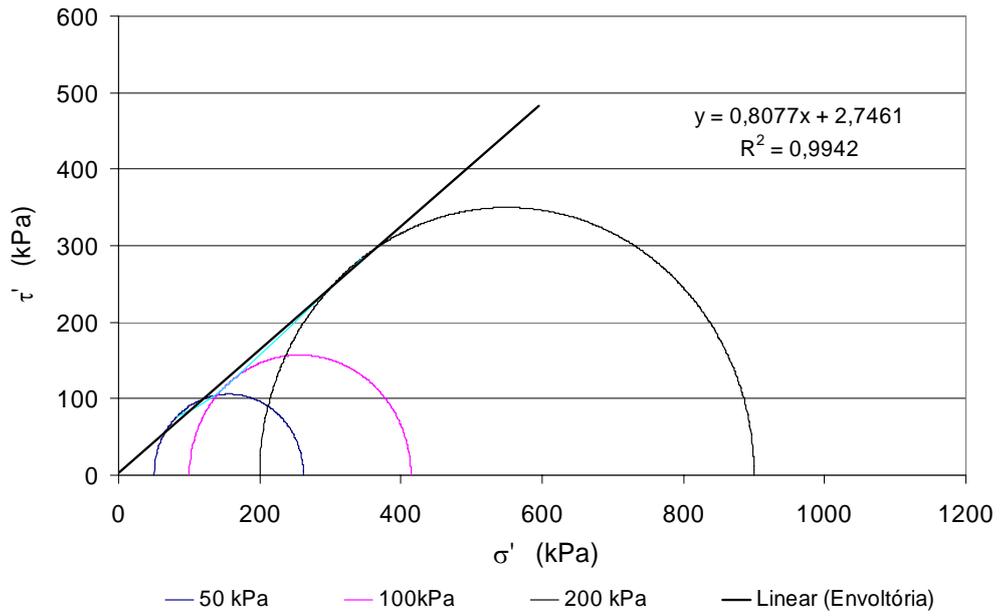


Figura 0.10 - Envoltória de ruptura a grandes deformações das amostra indeformadas a 2,0 m do ponto de descarga

Tabela 0.3 - Dados das amostras indeformadas extraídas do ESDH a 1,0m do ponto de lançamento

CORPO DE PROVA		1A			1B			1C			
TEOR DE UMIDADE	CÁPSULA	023	019	010	06	09	016	018	020	045	
	SOLO ÚMIDO + TARA (g)	42,40	35,37	44,84	43,43	23,04	27,07	26,00	25,67	40,77	
	SOLO SECO + TARA (g)	38,50	32,62	40,65	40,15	21,39	24,95	23,73	23,65	37,70	
	ÁGUA (g)	3,90	2,75	4,19	3,28	1,65	2,12	2,27	2,02	3,07	
	TARA (g)	12,34	13,90	12,88	13,57	7,71	7,66	7,78	7,67	13,79	
	SOLO SECO (g)	26,16	18,72	27,77	26,58	13,68	17,29	15,95	15,98	23,91	
	TEOR DE UMIDADE (%)	14,9	14,7	15,1	12,3	12,1	12,3	-	12,6	12,8	
	TEOR DE UMIDADE MÉDIO (%)	14,9			12,2			12,7			
DADOS DOS C. DE PROVA	ALTURA INICIAL (cm)	10,00			10,00			10,00			
	DIÂMETRO INICIAL (cm)	4,71			4,72			4,72			
	ÁREA INICIAL (cm ²)	17,423			17,490			17,520			
	VOLUME (cm ³)	174,23			174,90			175,20			
	CORPO DE PROVA ÚMIDO (g)	399,16			437,39			373,08			
	CORPO DE PROVA SECO (g)	347,41			389,76			330,92			
	MASSA ESP. ÚMIDA (g/cm ³)	2,291			2,501			2,129			
	MASSA ESP. SECA (g/cm ³)	1,994			2,228			1,889			
SATUR	PRESSÃO CONFINANTE FINAL (kPa)	181			150			175			
	PARÂMETRO B	1,00			1,00			0,99			
ADENSAMENTO	PRESSÃO CÉLULA (kPa)	250			300			400			
	CONTRA PRESSÃO (kPa)	200			200			200			
	LEITURA INICIAL BURETA (cm ³)	-0,38			-0,18			-0,24			
	LEITURA FINAL BURETA (cm ³)	-8,66			-6,08			-4,98			
	VOLUME APÓS O ADENSAM. (cm ³)	165,95			169,00			170,46			
	ÁREA APÓS O ADENSAM. (cm ²)	16,86			17,09			17,20			
	ALTURA APÓS ADENSAMENTO (cm)	9,84			9,89			9,91			
CONDIÇÕES DE RUPT.	PRESSÃO CONFINANTE (kPa)	50			100			200			
	DEFORMAÇÃO PICO (%)	6,0			8,4			5,8			
	TENSÃO DESVIADORA PICO (kPa)	213,2			429,3			721,8			
	DEFORMAÇÃO CV (%)	14,4			15,0			16,9			
	TENSÃO DESVIADORA CV (kPa)	180,4			364,3			628,7			
	VARIAÇÃO u_{final} (kPa)	-1,85			-1,70			-1,60			
	PARÂMETROS RESISTÊNCIA - PICO	Ângulo de Atrito (°) =				38,8		Coesão (kPa) =		14,0	
	PARÂMETROS RESISTÊNCIA - CV	Ângulo de Atrito (°) =				37,3		Coesão (kPa) =		3,6	

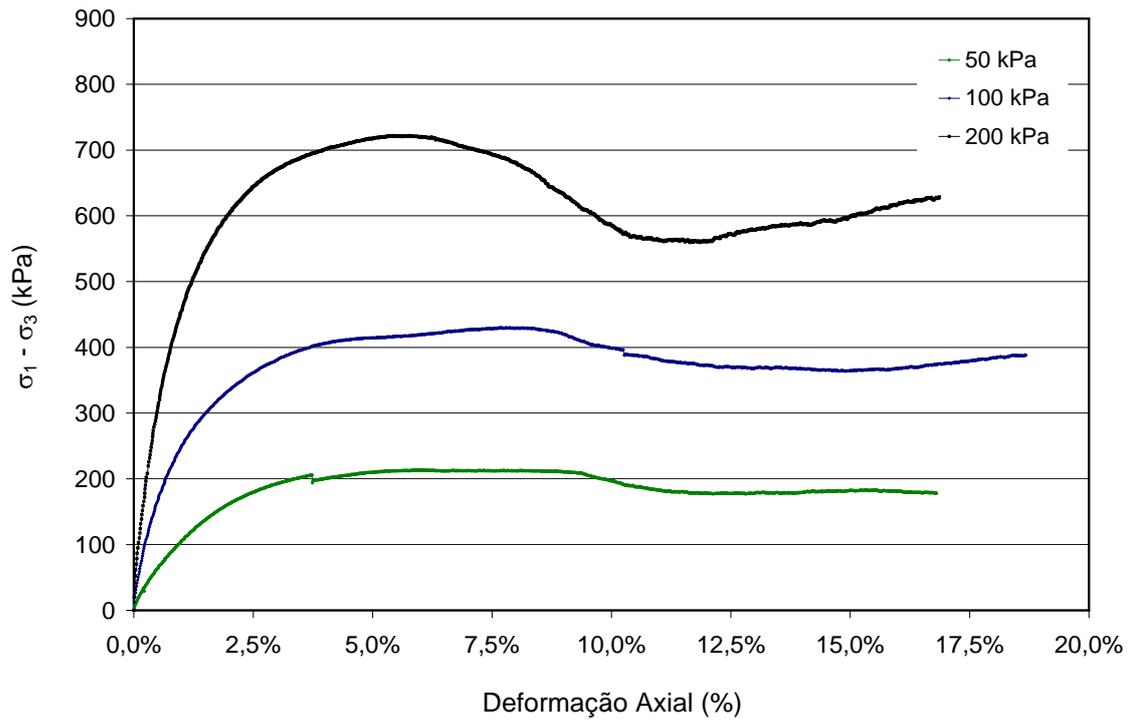


Figura 0.11 - Curva tensão desviadora vs deformação axial das amostras indeformadas a 1,0 m do ponto de descarga

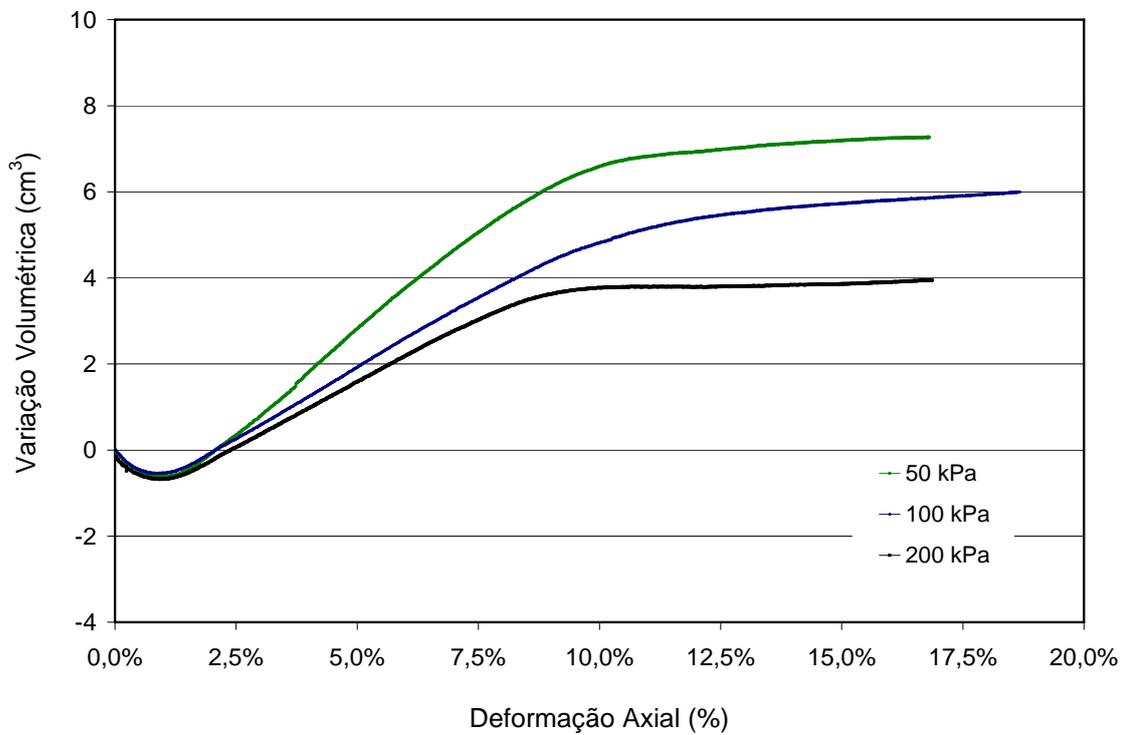


Figura 0.12 - Curva variação volumétrica vs deformação axial das amostras indeformadas a 1,0 m do ponto de descarga

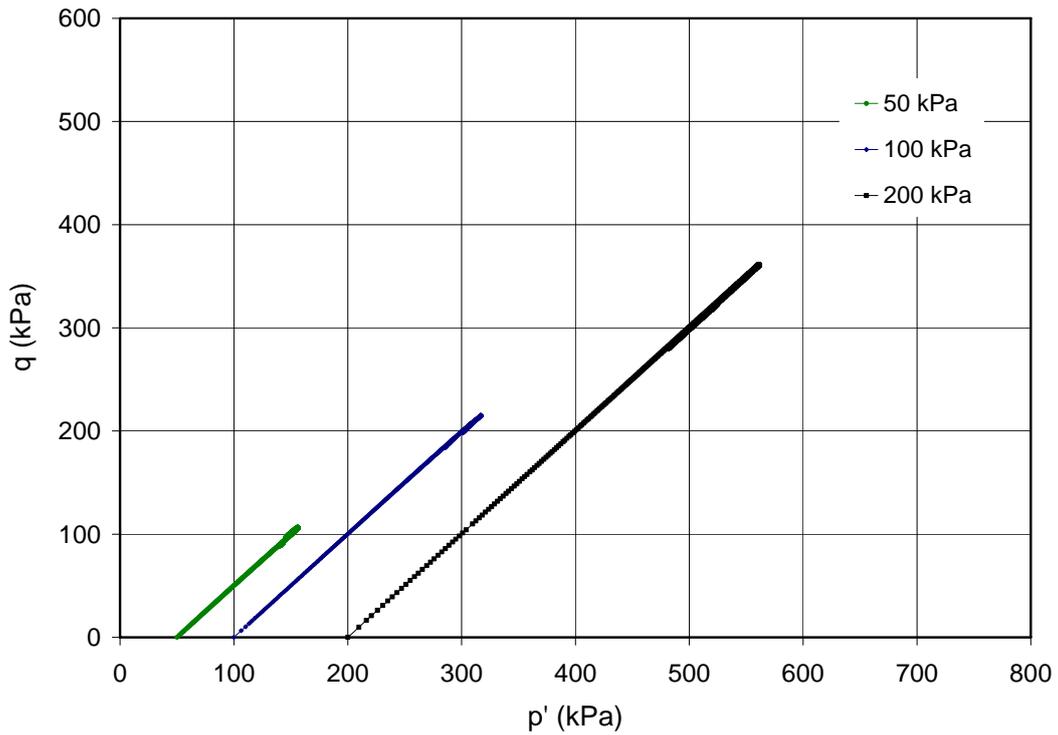


Figura 0.13 - Trajetória de tensões das amostras indeformadas a 1,0 m do ponto de descarga

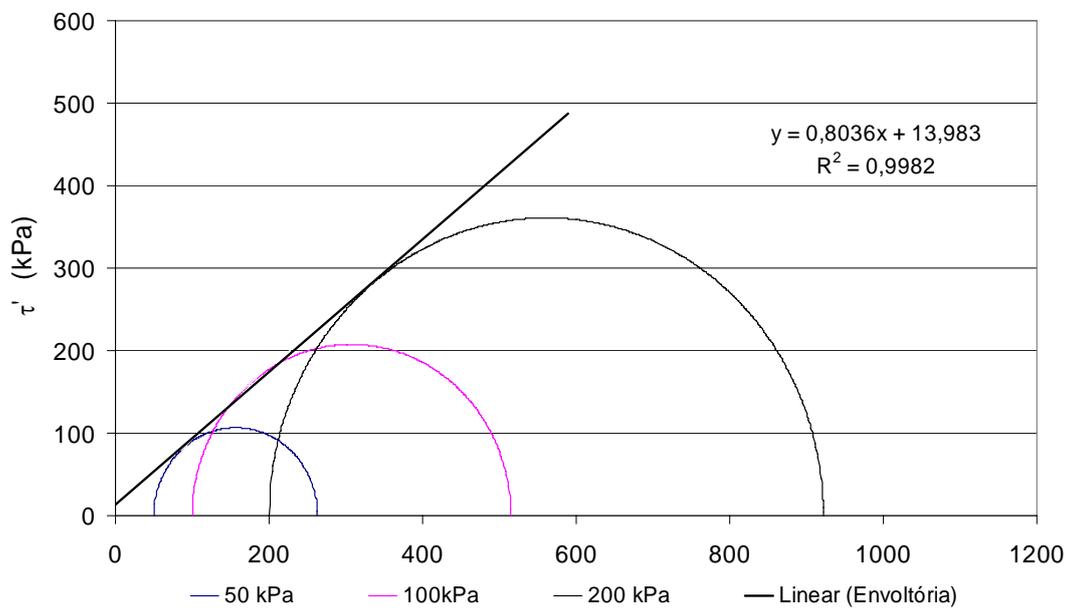


Figura 0.14 - Envoltória de ruptura de pico das amostras indeformadas a 1,0 m do ponto de descarga

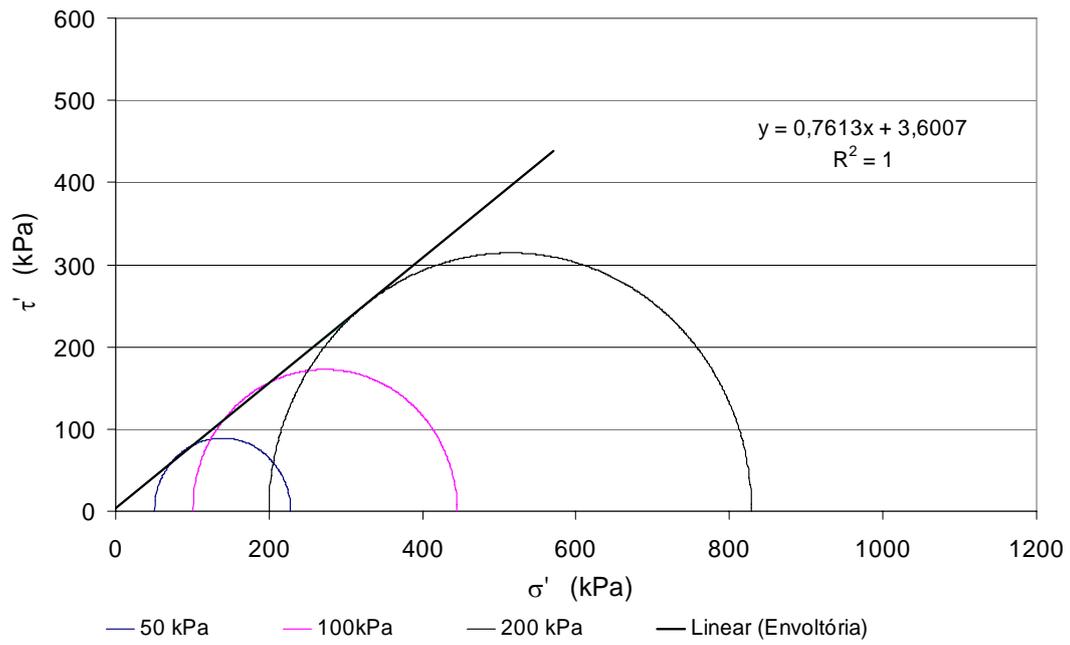


Figura 0.15 - Envoltória de ruptura a grandes deformações das amostras indeformadas a 1,0 m do ponto de descarga

Tabela 0.4 - Dados das amostras indeformadas extraídas do ESDH a 0,1m do ponto de lançamento

CORPO DE PROVA		0,1A			0,1B			0,1C			
TEOR DE UMIDADE	CÁPSULA	023	019	010	06	09	016	018	020	045	
	SOLO ÚMIDO + TARA (g)	36,00	33,83	41,63	47,99	28,79	27,11	27,64	25,55	37,83	
	SOLO SECO + TARA (g)	33,40	31,70	38,58	44,16	26,47	25,00	25,42	23,51	35,17	
	ÁGUA (g)	2,60	2,13	3,05	3,83	2,32	2,11	2,22	2,04	2,66	
	TARA (g)	12,34	13,90	12,88	13,57	7,71	7,66	7,78	7,67	13,79	
	SOLO SECO (g)	21,06	17,80	25,70	30,59	18,76	17,34	17,64	15,84	21,38	
	TEOR DE UMIDADE (%)	12,3	12,0	11,9	12,5	12,4	12,2	12,6	12,9	12,4	
	TEOR DE UMIDADE MÉDIO (%)	12,1			12,4			12,7			
DADOS DOS C. DE PROVA	ALTURA INICIAL (cm)	10,00			10,00			10,00			
	DIÂMETRO INICIAL (cm)	4,71			4,72			4,71			
	ÁREA INICIAL (cm ²)	17,446			17,490			17,423			
	VOLUME (cm ³)	174,46			174,90			174,23			
	CORPO DE PROVA ÚMIDO (g)	411,90			439,50			402,30			
	CORPO DE PROVA SECO (g)	367,57			391,18			357,09			
	MASSA ESP. ÚMIDA (g/cm ³)	2,361			2,513			2,309			
	MASSA ESP. SECA (g/cm ³)	2,107			2,237			2,049			
SATUR	PRESSÃO CONFINANTE FINAL (kPa)	135			-			-			
	PARÂMETRO B	1,00			0,99			0,99			
ADENSAMENTO	PRESSÃO CÉLULA (kPa)	250			300			400			
	CONTRA PRESSÃO (kPa)	200			200			200			
	LEITURA INICIAL BURETA (cm ³)	0,61			-0,03			-0,07			
	LEITURA FINAL BURETA (cm ³)	-2,27			-3,40			-4,98			
	VOLUME APÓS O ADENSAM. (cm ³)	171,57			171,53			169,32			
	ÁREA APÓS O ADENSAM. (cm ²)	17,25			17,26			17,09			
	ALTURA APÓS ADENSAMENTO (cm)	9,94			9,94			9,91			
CONDIÇÕES DE RUPT.	PRESSÃO CONFINANTE (kPa)	50			100			200			
	DEFORMAÇÃO PICO (%)	7,3			8,0			8,1			
	TENSÃO DESVIADORA PICO (kPa)	198,3			399,0			691,4			
	DEFORMAÇÃO CV (%)	11,2			17,6			15,1			
	TENSÃO DESVIADORA CV (kPa)	158,2			348,6			646,5			
	VARIAÇÃO u_{final} (kPa)	-3,00			-1,05			0,10			
	PARÂMETROS RESISTÊNCIA - PICO	Ângulo de Atrito (°) =				38,3		Coesão (kPa) =		10,0	
	PARÂMETROS RESISTÊNCIA - CV	Ângulo de Atrito (°) =				38,2		Coesão (kPa) =		0,8	

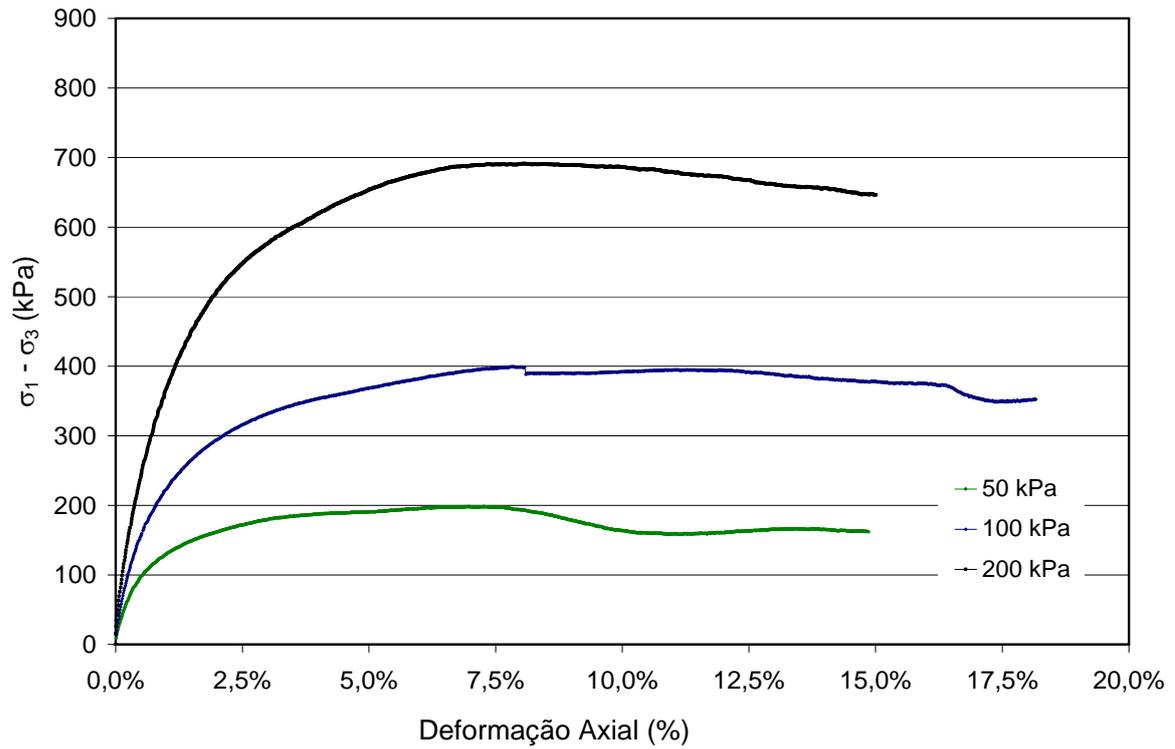


Figura 0.16 - Curva tensão desviadora vs deformação axial das amostras indeformadas a 0,1 m do ponto de descarga

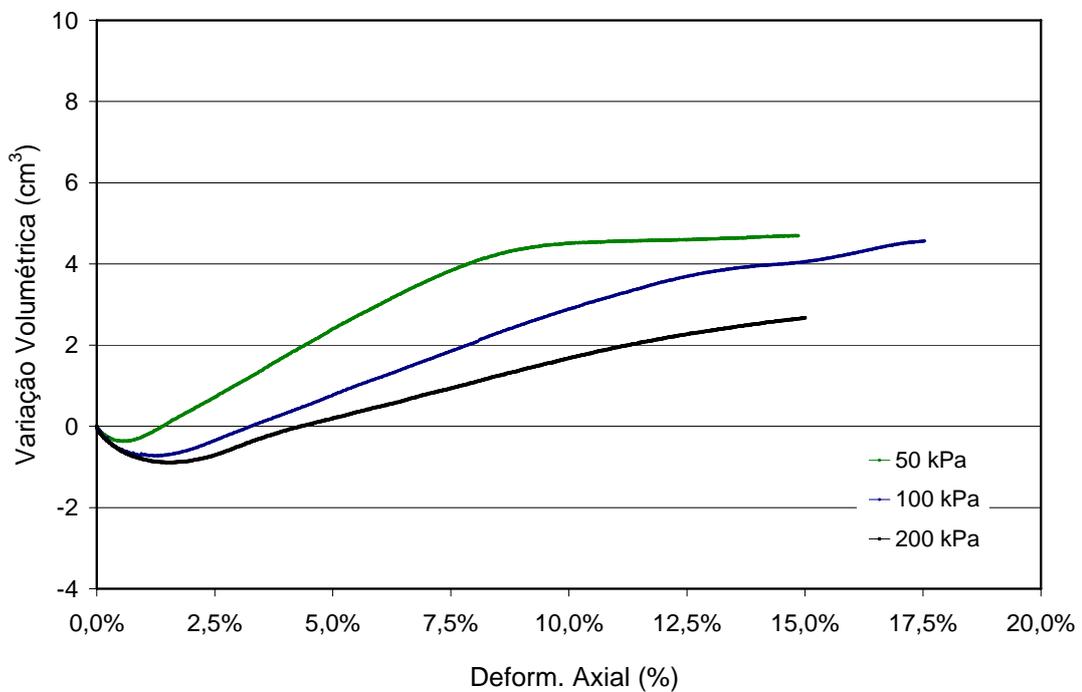


Figura 0.17 - Curva variação volumétrica vs deformação axial das amostras indeformadas a 0,1 m do ponto de descarga

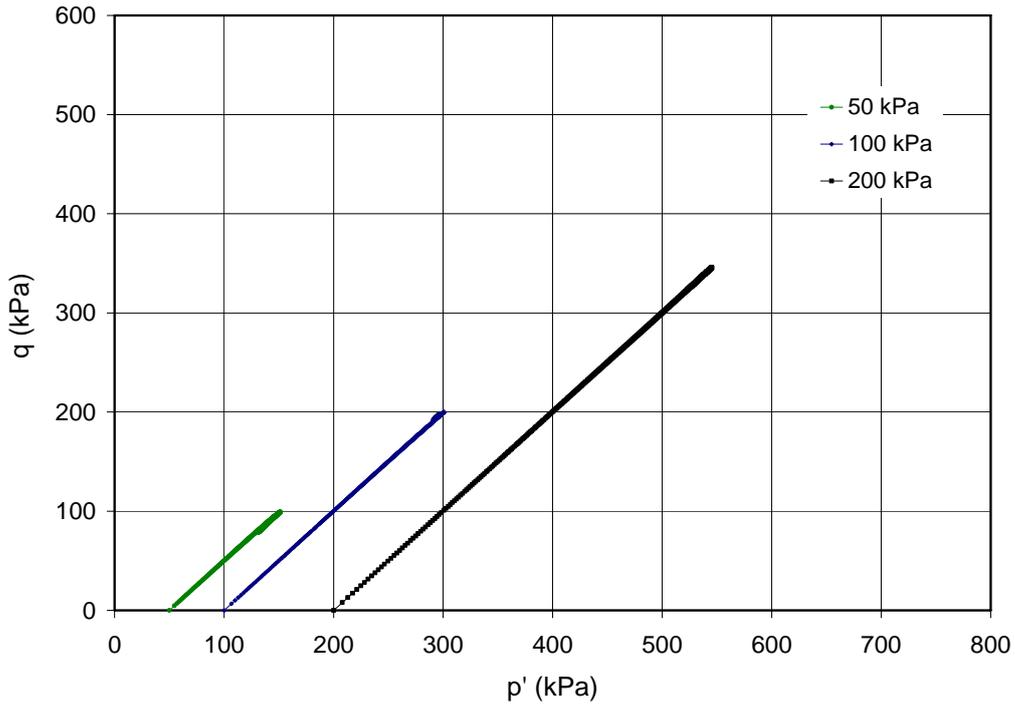


Figura 0.18 - Trajetória de tensões das amostras indeformadas a 0,1 m do ponto de descarga

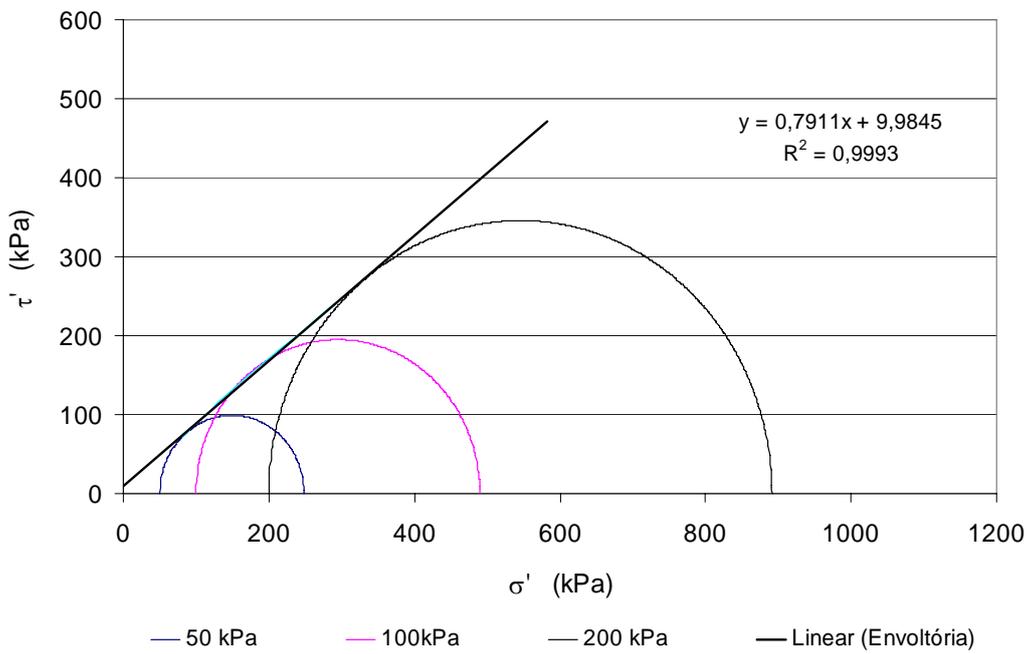


Figura 0.19 - Envoltória de ruptura de pico das amostras indeformadas a 0,1 m do ponto de descarga

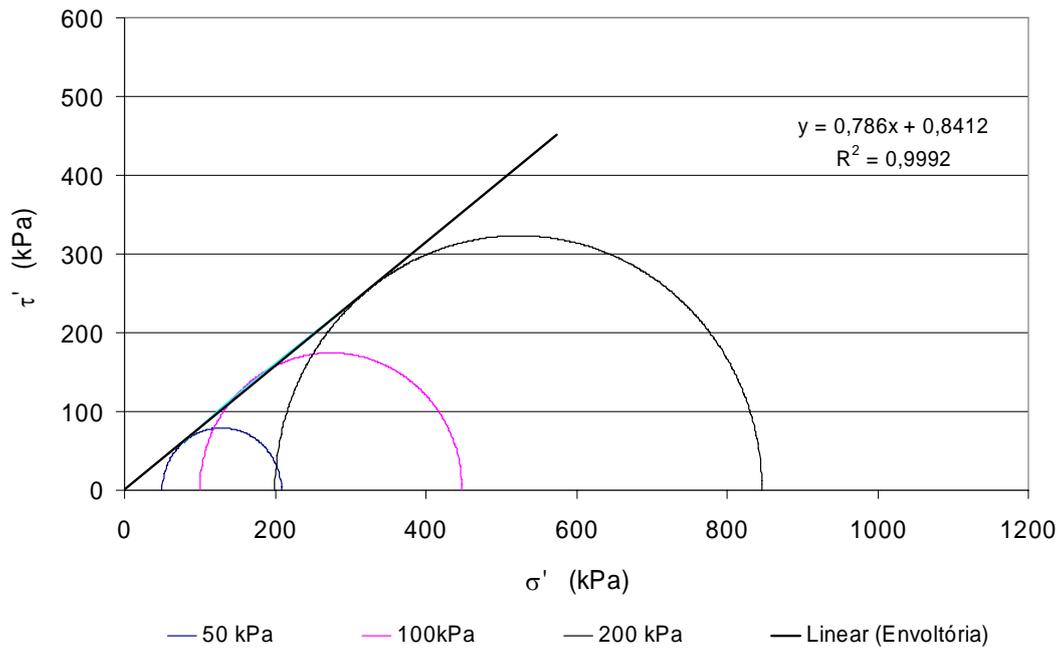


Figura 0.20 - Envoltória de ruptura a grandes deformações das amostras indeformadas a 0,1 m do ponto de descarga

APÊNDICE
- D -

RESULTADOS DOS ENSAIOS TRIAXIAIS DRENADOS – AMOSTRAS
RECONSTITUIDAS

Tabela 0.1 - Dados das amostras reconstituídas, material referente a 2,8m do ponto de lançamento

CORPO DE PROVA		2,8A			2,8B			2,8C		
TEOR DE UMIDADE	CÁPSULA	BJ	AI	C6	EL	P4	JM	BJ	JM	JN
	SOLO ÚMIDO + TARA (g)	7,68	8,55	7,13	6,94	7,65	7,60	8,17	8,09	7,62
	SOLO SECO + TARA (g)	7,31	8,09	6,80	6,69	7,35	7,29	7,69	7,60	7,24
	ÁGUA (g)	0,37	0,46	0,33	0,25	0,30	0,31	0,48	0,49	0,38
	TARA (g)	4,36	4,37	4,16	4,20	4,28	4,23	4,36	4,24	4,55
	SOLO SECO (g)	2,95	3,72	2,64	2,49	3,07	3,06	3,33	3,36	2,69
	TEOR DE UMIDADE (%)	12,5	12,4	12,5	10,0	9,8	10,1	14,4	14,6	14,1
	TEOR DE UMIDADE MÉDIO (%)	12,5			10,0			14,4		
DADOS DOS C. DE PROVA	ALTURA INICIAL (cm)	10,00			10,00			10,00		
	DIÂMETRO INICIAL (cm)	4,71			4,71			4,71		
	ÁREA INICIAL (cm ²)	17,446			17,446			17,423		
	VOLUME (cm ³)	174,46			174,46			174,23		
	CORPO DE PROVA ÚMIDO (g)	356,90			327,90			352,00		
	CORPO DE PROVA SECO (g)	317,33			298,14			307,69		
	MASSA ESP. ÚMIDA (g/cm ³)	2,046			1,880			2,020		
	MASSA ESP. SECA (g/cm ³)	1,819			1,709			1,766		
SATUR	PRESSÃO CONFINANTE FINAL (kPa)	-			-			-		
	PARÂMETRO B	1,00			1,00			1,00		
ADENSAMENTO	PRESSÃO CÉLULA (kPa)	250			300			400		
	CONTRA PRESSÃO (kPa)	200			200			200		
	LEITURA INICIAL BURETA (cm ³)	-0,15			-0,13			-0,03		
	LEITURA FINAL BURETA (cm ³)	-3,32			-8,33			-9,53		
	VOLUME APÓS O ADENSAM. (cm ³)	171,29			166,26			164,73		
	ÁREA APÓS O ADENSAM. (cm ²)	17,23			16,89			16,78		
	ALTURA APÓS ADENSAMENTO (cm)	9,94			9,84			9,82		
CONDIÇÕES DE RUPT.	PRESSÃO CONFINANTE (kPa)	50			100			200		
	DEFORMAÇÃO (%)	14,6			17,0			12,2		
	TENSÃO DESVIADORA (kPa)	157,0			303,0			601,3		
	p' (kPa)	128,9			254,0			501,8		
	q (kPa)	78,8			151,5			300,6		
	VARIAÇÃO u _{final} (kPa)	-0,80			-2,55			-2,25		
	PARÂMETROS RESISTÊNCIA	Ângulo de Atrito (°) =				37,3		Coesão (kPa) =		0,0

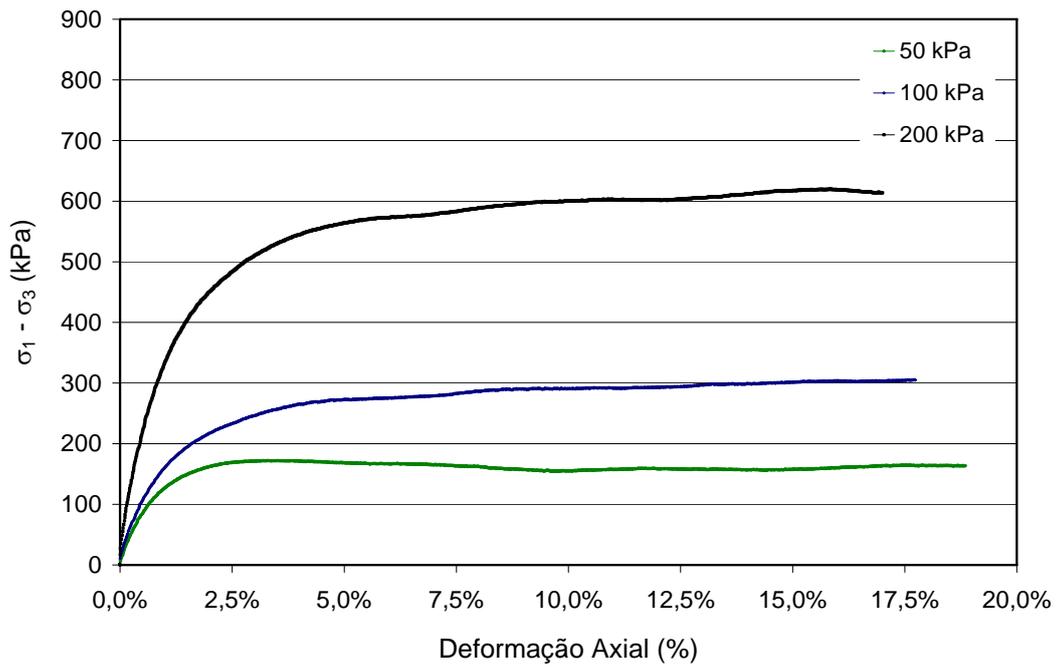


Figura 0.1 - Curva tensão desviadora vs deformação axial das amostras reconstituídas referente a 2,8 m do ponto de descarga

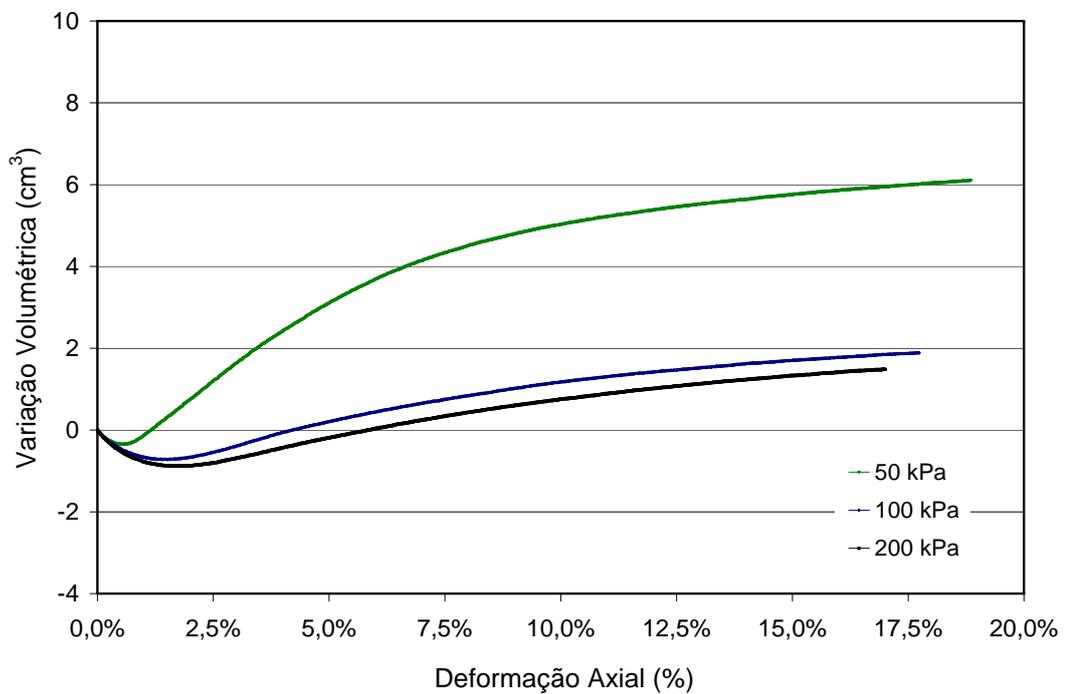


Figura 0.2 - Curva variação volumétrica vs deformação axial das amostra reconstituídas referentes a 2,8 m do ponto de descarga

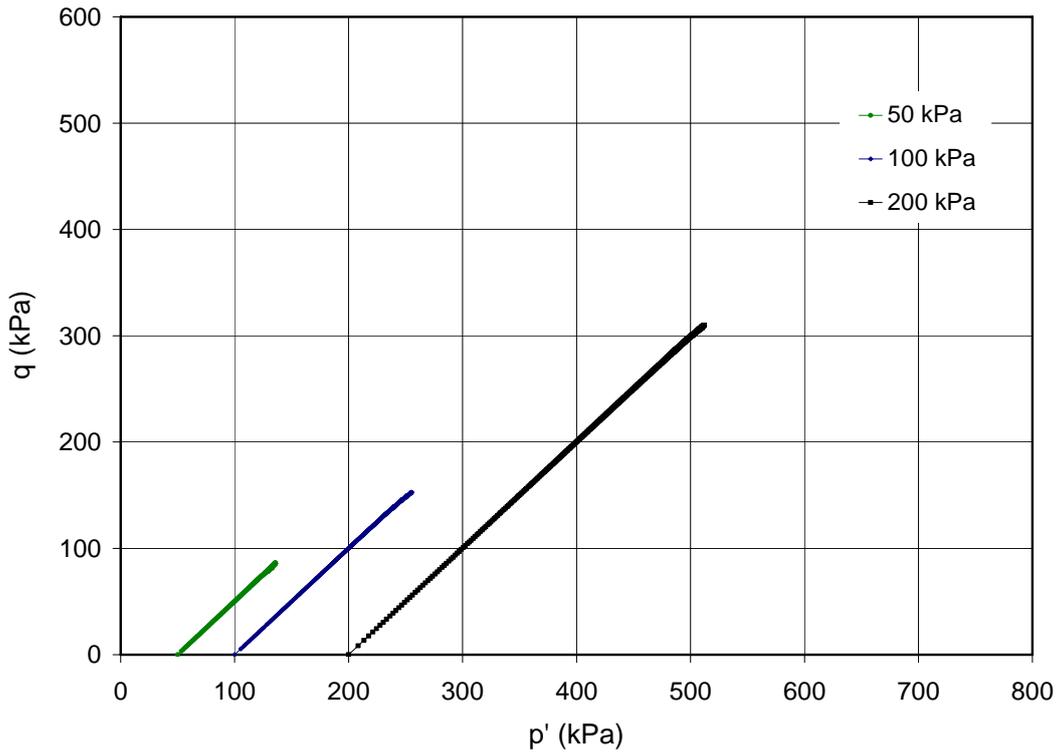


Figura 0.3 - Trajetória de tensões das amostras reconstituídas referente a 2,8 m do ponto de descarga

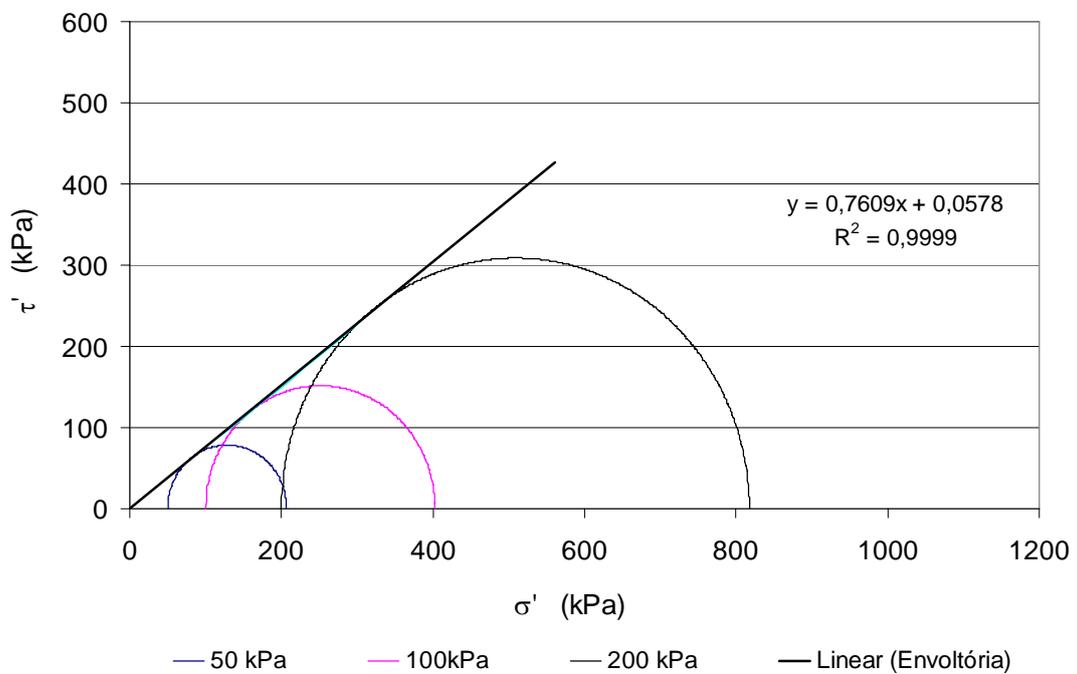


Figura 0.4 - Envoltória de ruptura das amostras reconstituídas referente a 2,8 m do ponto de descarga

Tabela 0.2 - Dados das amostras reconstituídas, material referente a 2,0m do ponto de lançamento

CORPO DE PROVA		2,0A			2,0B			2,0C		
TEOR DE UMIDADE	CÁPSULA	P12	AS	WS	BJ	P11	BF	T13	231	162
	SOLO ÚMIDO + TARA (g)	7,60	8,25	9,19	10,00	7,30	7,85	11,30	15,20	13,76
	SOLO SECO + TARA (g)	7,11	7,72	8,59	9,27	6,92	7,39	10,74	14,26	12,94
	ÁGUA (g)	0,49	0,53	0,60	0,73	0,38	0,46	0,56	0,94	0,82
	TARA (g)	3,88	4,25	4,61	4,36	4,37	4,16	7,02	8,01	7,59
	SOLO SECO (g)	3,23	3,47	3,98	4,91	2,55	3,23	3,72	6,25	5,35
	TEOR DE UMIDADE (%)	15,2	15,3	15,1	14,9	14,9	14,2	15,1	15,0	15,3
	TEOR DE UMIDADE MÉDIO (%)	15,2			14,7			15,1		
DADOS DOS C. DE PROVA	ALTURA INICIAL (cm)	10,00			10,00			10,00		
	DIÂMETRO INICIAL (cm)	4,71			4,71			4,71		
	ÁREA INICIAL (cm ²)	17,423			17,423			17,423		
	VOLUME (cm ³)	174,23			174,23			174,23		
	CORPO DE PROVA ÚMIDO (g)	365,40			365,70			334,20		
	CORPO DE PROVA SECO (g)	317,26			318,91			290,25		
	MASSA ESP. ÚMIDA (g/cm ³)	2,097			2,099			1,918		
	MASSA ESP. SECA (g/cm ³)	1,821			1,830			1,666		
SATUR	PRESSÃO CONFINANTE FINAL (kPa)	175			175			175		
	PARÂMETRO B	1,00			1,00			1,00		
ADENSAMENTO	PRESSÃO CÉLULA (kPa)	250			300			400		
	CONTRA PRESSÃO (kPa)	200			200			200		
	LEITURA INICIAL BURETA (cm ³)	-0,13			-0,08			-0,13		
	LEITURA FINAL BURETA (cm ³)	-7,21			-5,78			-7,42		
	VOLUME APÓS O ADENSAM. (cm ³)	167,15			168,53			166,94		
	ÁREA APÓS O ADENSAM. (cm ²)	16,94			17,04			16,93		
	ALTURA APÓS ADENSAMENTO (cm)	9,864			9,89			9,86		
CONDIÇÕES DE RUPT.	PRESSÃO CONFINANTE (kPa)	50			100			200		
	DEFORMAÇÃO (%)	17,0			17,4			15,2		
	TENSÃO DESVIADORA (kPa)	170,2			335,0			300,3		
	p' (kPa)	135,9			268,1			497,4		
	q (kPa)	85,1			167,5			300,2		
	VARIAÇÃO u _{final} (kPa)	-0,95			-0,70			2,60		
	PARÂMETROS RESISTÊNCIA	Ângulo de Atrito (°) =				36,0		Coesão (kPa) =		8,0

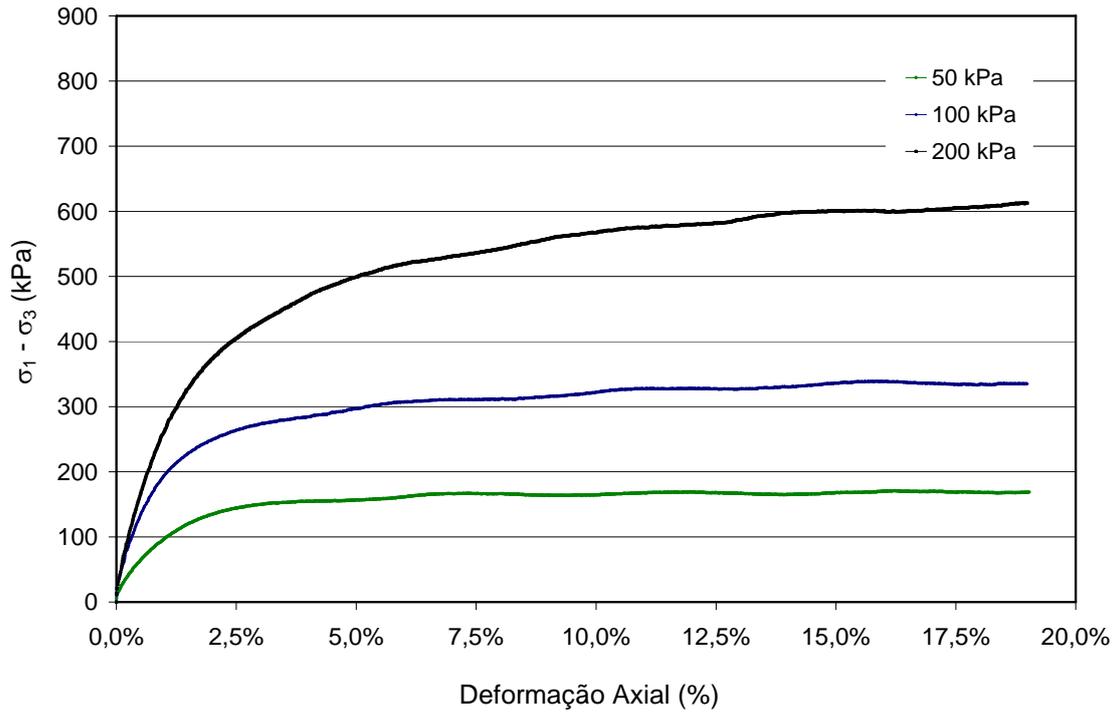


Figura 0.5 - Curva tensão desviadora vs deformação axial das amostras reconstituídas referente a 2,0 m do ponto de descarga

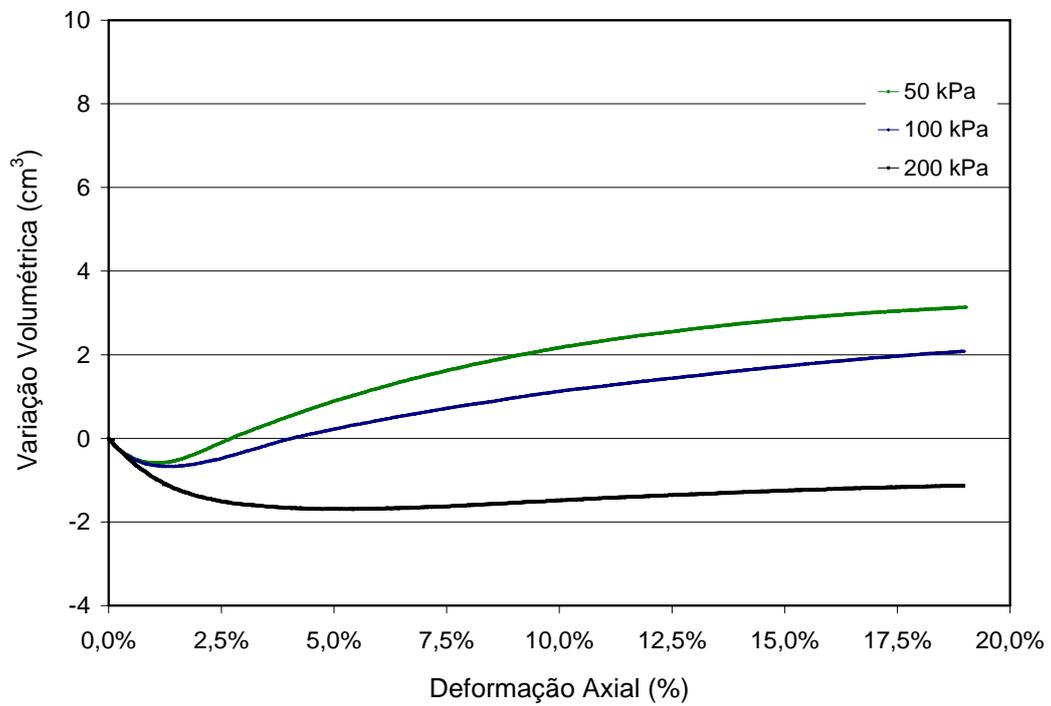


Figura 0.6 - Curva variação volumétrica vs deformação axial das amostras reconstituídas referente a 2,0 m do ponto de descarga

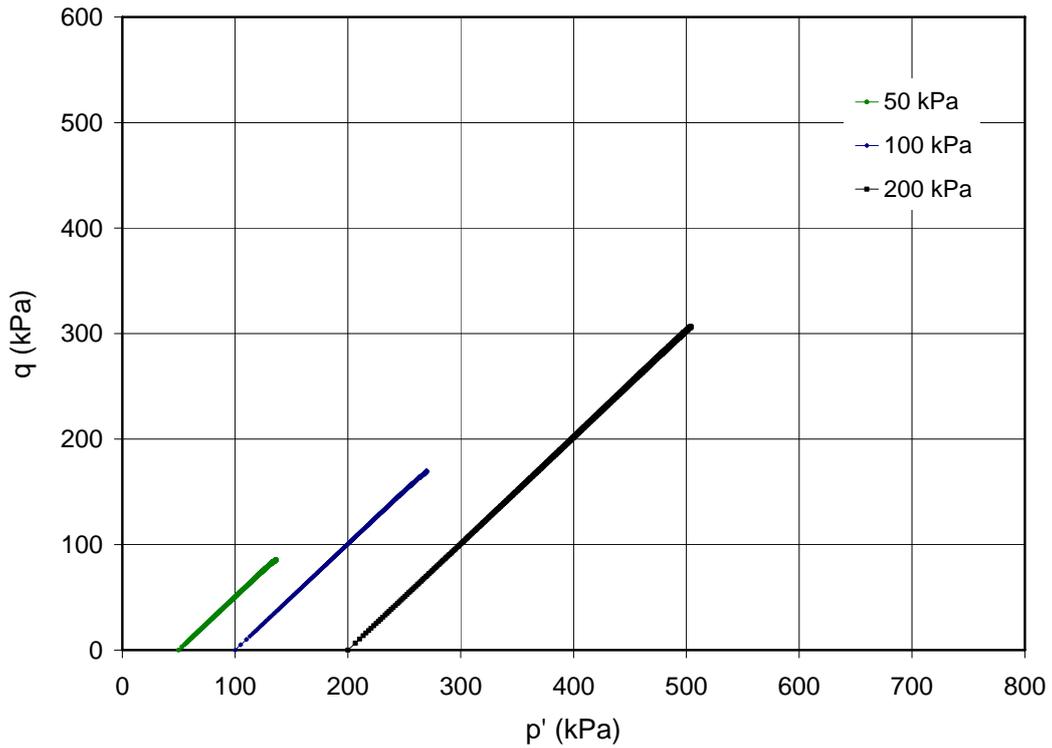


Figura 0.7 - Trajetória de tensões das amostras reconstituídas referente a 2,0 m do ponto de descarga

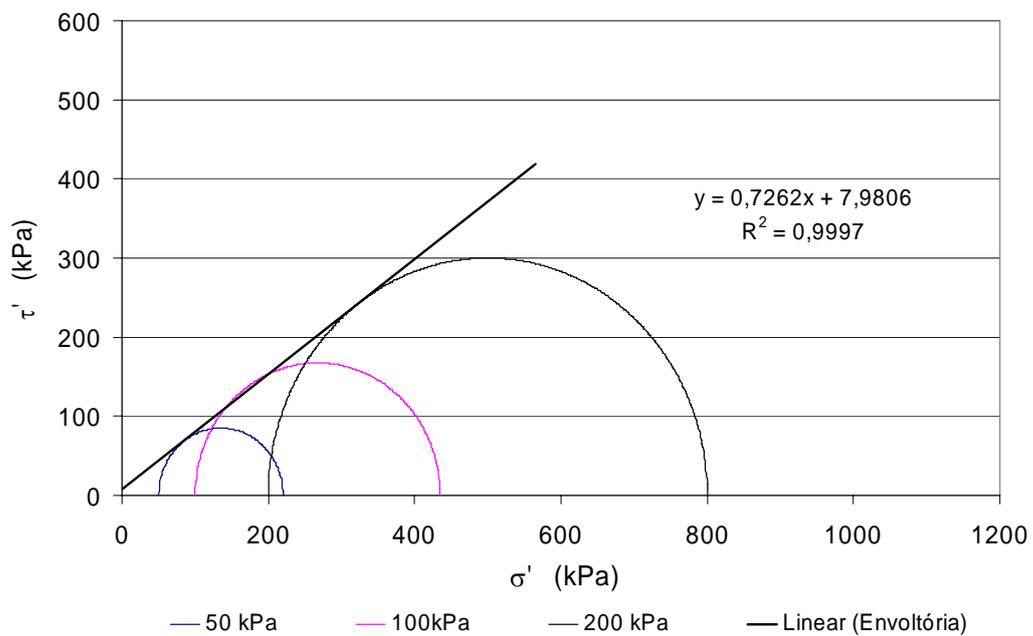


Figura 0.8 - Envoltória de ruptura das amostras reconstituídas referente a 2,0 m do ponto de descarga

Tabela 0.3 - Dados das amostras reconstituídas, material referente a 1,0 m do ponto de lançamento

CORPO DE PROVA		1A			1B			1C		
TEOR DE UMIDADE	CÁPSULA	BF	JG	BJ	BF	JG	BJ	P4	JW	AG
	SOLO ÚMIDO + TARA (g)	10,78	9,03	8,46	8,19	8,58	8,83	9,85	8,81	8,40
	SOLO SECO + TARA (g)	9,97	8,47	7,94	7,79	8,16	8,36	9,23	8,29	7,94
	ÁGUA (g)	0,81	0,56	0,52	0,40	0,42	0,47	0,62	0,52	0,46
	TARA (g)	4,55	4,67	4,36	4,55	4,67	4,36	4,28	4,12	4,21
	SOLO SECO (g)	5,42	3,80	3,58	3,24	3,49	4,00	4,95	4,17	3,73
	TEOR DE UMIDADE (%)	14,9	14,7	14,5	12,3	12,0	11,8	12,5	12,5	12,3
	TEOR DE UMIDADE MÉDIO (%)	14,7			12,0			12,4		
DADOS DOS C. DE PROVA	ALTURA INICIAL (cm)	10,00			10,00			10,00		
	DIÂMETRO INICIAL (cm)	4,71			4,73			4,73		
	ÁREA INICIAL (cm ²)	17,423			17,572			17,572		
	VOLUME (cm ³)	174,23			175,72			175,72		
	CORPO DE PROVA ÚMIDO (g)	395,50			437,20			372,20		
	CORPO DE PROVA SECO (g)	344,71			390,21			331,01		
	MASSA ESP. ÚMIDA (g/cm ³)	2,270			2,488			2,118		
	MASSA ESP. SECA (g/cm ³)	1,978			2,221			1,884		
SATUR	PRESSÃO CONFINANTE FINAL (kPa)	-			-			-		
	PARÂMETRO B	1,00			1,00			1,00		
ADENSAMENTO	PRESSÃO CÉLULA (kPa)	250			300			400		
	CONTRA PRESSÃO (kPa)	200			200			200		
	LEITURA INICIAL BURETA (cm ³)	-0,06			-0,06			-0,03		
	LEITURA FINAL BURETA (cm ³)	-6,19			-7,84			-8,56		
	VOLUME APÓS O ADENSAM. (cm ³)	-4,15			-5,56			-6,64		
	ÁREA APÓS O ADENSAM. (cm ²)	0,32			0,08			0,04		
	ALTURA APÓS ADENSAMENTO (cm)	-13,11			-73,64			-189,06		
CONDIÇÕES DE RUPT.	PRESSÃO CONFINANTE (kPa)	50			100			200		
	DEFORMAÇÃO (%)	13,9			5,1			11,1		
	TENSÃO DESVIADORA (kPa)	170,7			324,5			581,5		
	p' (kPa)	137,9			262,7			492,1		
	q (kPa)	85,3			162,3			290,7		
	VARIAÇÃO u _{final} (kPa)	-2,80			-0,75			-2,30		
	PARÂMETROS RESISTÊNCIA	Ângulo de Atrito (°) =				35,3		Coesão (kPa) = 8,7		

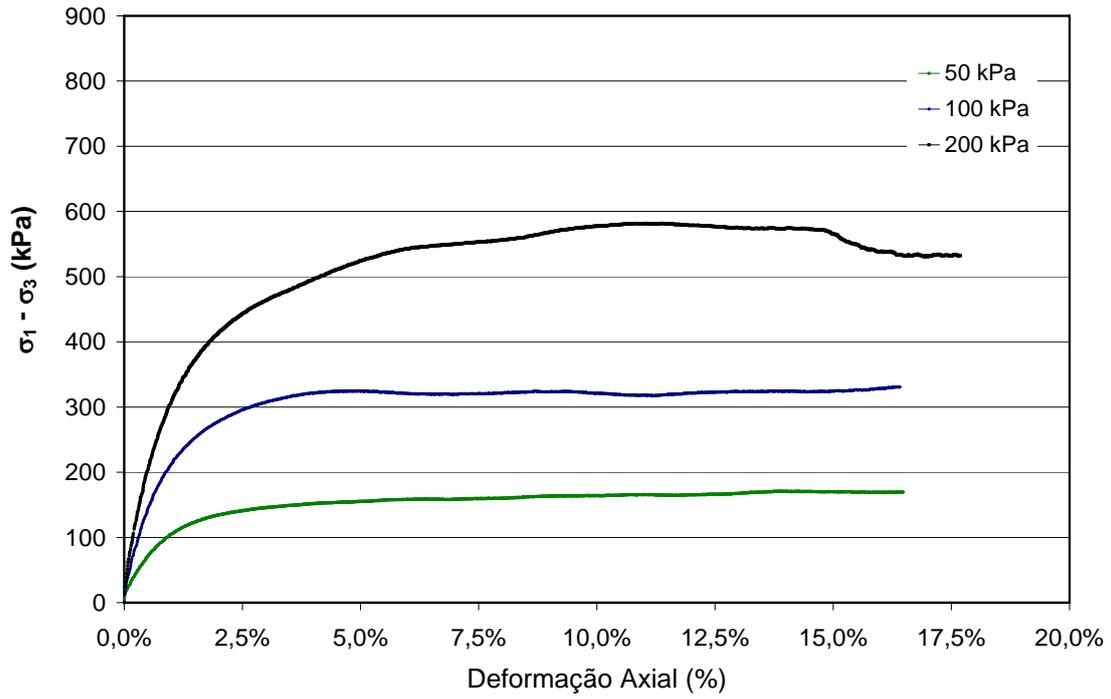


Figura 0.9 - Curva tensão desviadora vs deformação axial das amostras reconstituídas referente a 1,0 m do ponto de descarga

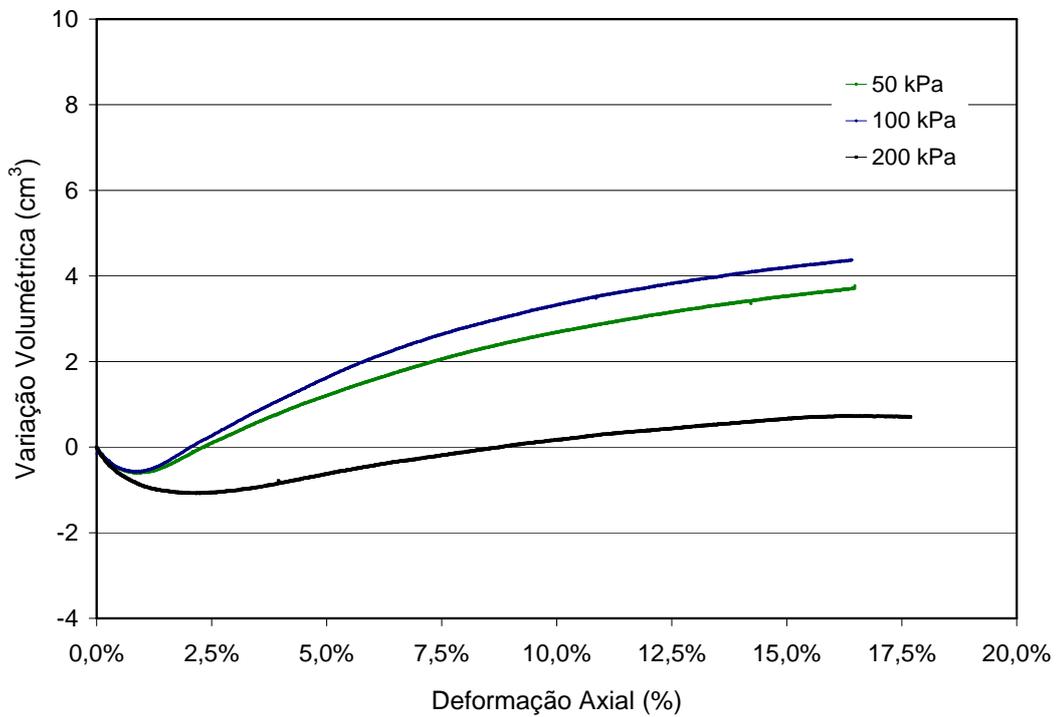


Figura 0.10 - Curva variação volumétrica vs deformação axial das amostras reconstituídas referente a 1,0 m do ponto de descarga

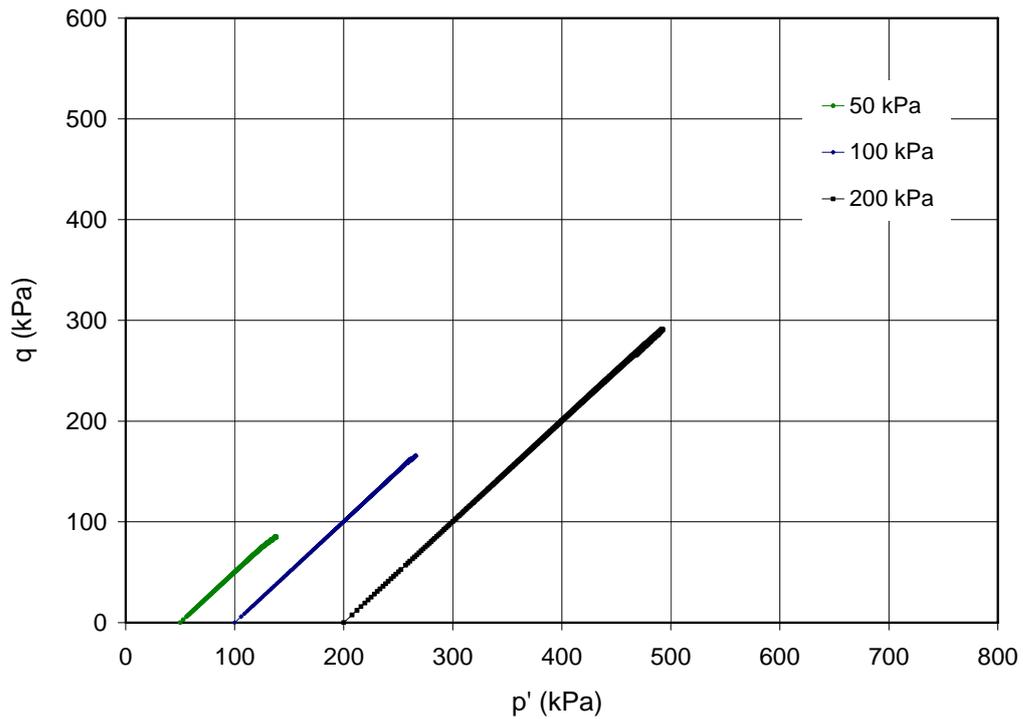


Figura 0.11 - Trajetória de tensões das amostras reconstituídas referente a 1,0 m do ponto de descarga

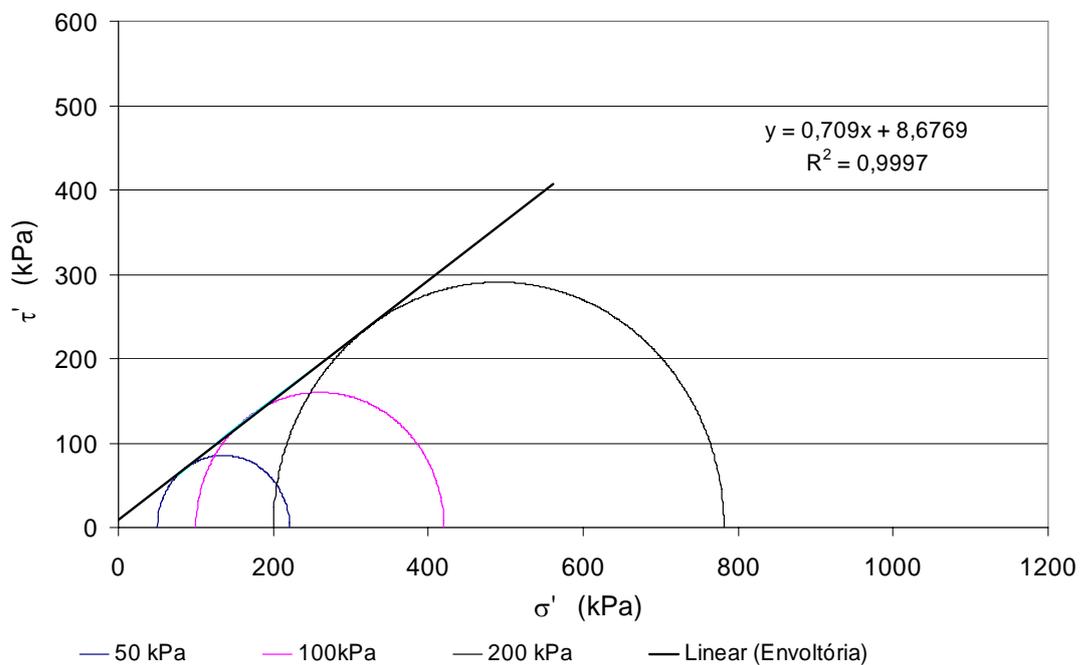


Figura 0.12 - Envoltória de ruptura das amostras reconstituídas referente a 1,0 m do ponto de descarga

Tabela 0.4 - Dados das amostras reconstituídas, material referente a 0,1m do ponto de lançamento

CORPO DE PROVA		0,1A			0,1B			0,1C		
TEOR DE UMIDADE	CÁPSULA	AI	AT	AS	BF	EL	P4	BF	EL	P4
	SOLO ÚMIDO + TARA (g)	9,29	9,11	8,79	9,26	9,14	9,42	9,52	10,42	8,61
	SOLO SECO + TARA (g)	8,76	8,62	8,31	8,74	8,59	8,87	8,97	9,73	8,12
	ÁGUA (g)	0,53	0,49	0,48	0,52	0,55	0,55	0,55	0,69	0,49
	TARA (g)	4,37	4,49	4,25	4,55	4,20	4,29	4,55	4,20	4,29
	SOLO SECO (g)	4,39	4,13	4,06	4,19	4,39	4,58	4,42	5,53	3,83
	TEOR DE UMIDADE (%)	12,1	11,9	11,8	12,4	12,5	12,0	12,4	12,5	12,8
	TEOR DE UMIDADE MÉDIO (%)	11,9			12,3			12,6		
DADOS DOS C. DE PROVA	ALTURA INICIAL (cm)	10,00			10,00			10,00		
	DIÂMETRO INICIAL (cm)	4,71			4,72			4,71		
	ÁREA INICIAL (cm ²)	17,446			17,490			17,423		
	VOLUME (cm ³)	174,46			174,90			174,23		
	CORPO DE PROVA ÚMIDO (g)	411,20			437,31			402,77		
	CORPO DE PROVA SECO (g)	367,41			389,36			357,79		
	MASSA ESP. ÚMIDA (g/cm ³)	2,357			2,500			2,312		
	MASSA ESP. SECA (g/cm ³)	2,106			2,226			2,054		
SATUR	PRESSÃO CONFINANTE FINAL (kPa)	-			-			-		
	PARÂMETRO B	1,00			1,00			1,00		
ADENSAMENTO	PRESSÃO CÉLULA (kPa)	250			300			400		
	CONTRA PRESSÃO (kPa)	200			200			200		
	LEITURA INICIAL BURETA (cm ³)	-0,09			2,87			12,40		
	LEITURA FINAL BURETA (cm ³)	-9,57			-7,71			1,40		
	VOLUME APÓS O ADENSAM. (cm ³)	164,98			164,32			163,23		
	ÁREA APÓS O ADENSAM. (cm ²)	16,80			16,77			16,67		
	ALTURA APÓS ADENSAMENTO (cm)	9,82			9,80			9,79		
CONDIÇÕES DE RUPT.	PRESSÃO CONFINANTE (kPa)	50			100			200		
	DEFORMAÇÃO (%)	15,2			15,2			11,8		
	TENSÃO DESVIADORA (kPa)	150,8			311,3			552,3		
	p' (kPa)	124,4			255,9			474,0		
	q (kPa)	75,4			155,6			276,1		
	VARIAÇÃO u _{final} (kPa)	0,65			-0,55			1,30		
	PARÂMETROS RESISTÊNCIA	Ângulo de Atrito (°) =			35,1			Coesão (kPa) = 2,6		

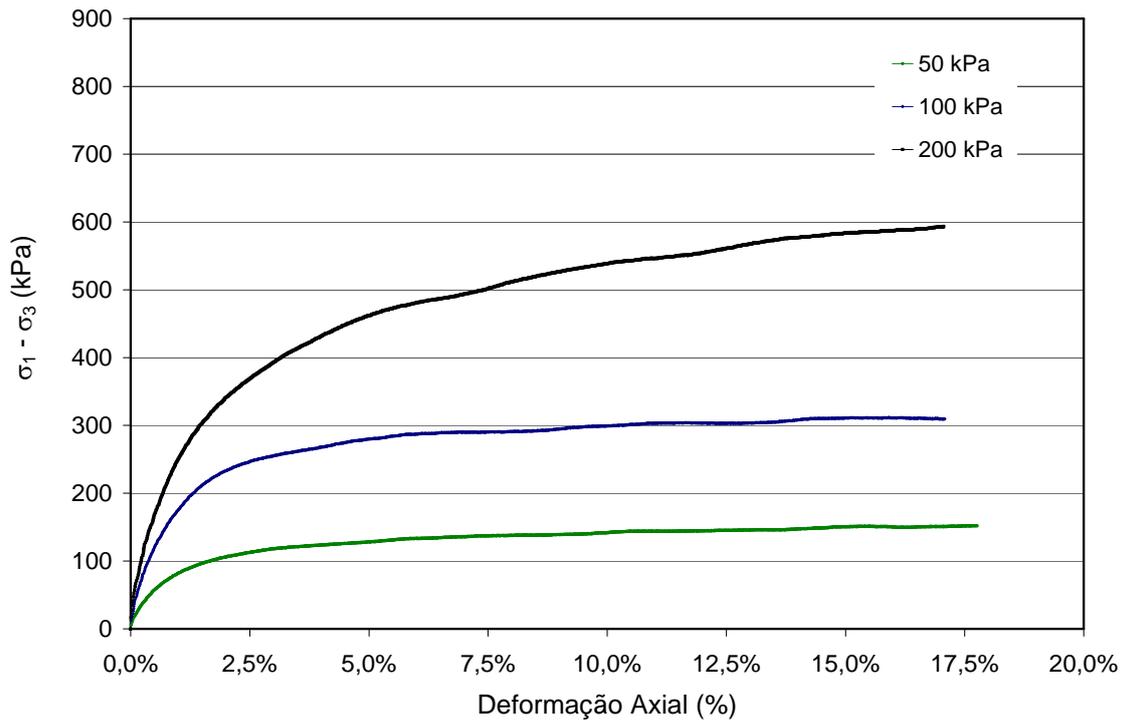


Figura 0.13 - Curva tensão desviadora vs deformação axial das amostras reconstituídas referente a 0,1 m do ponto de descarga

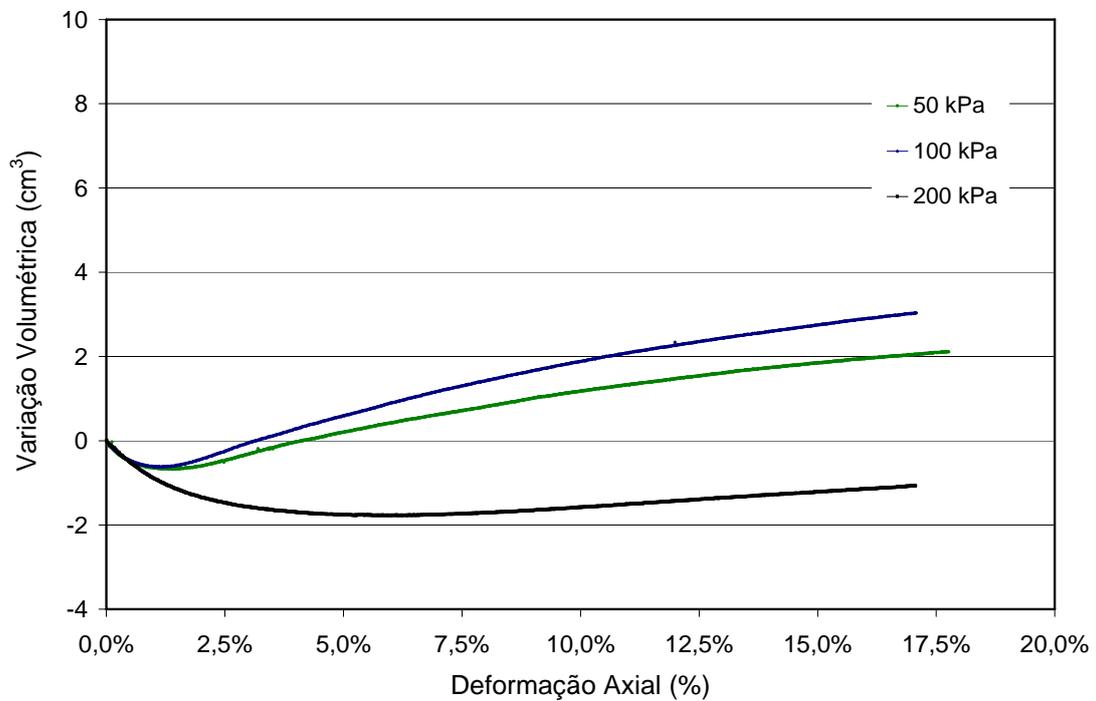


Figura 0.14 - Curva variação volumétrica vs deformação axial das amostras reconstituídas referente a 0,1 m do ponto de descarga

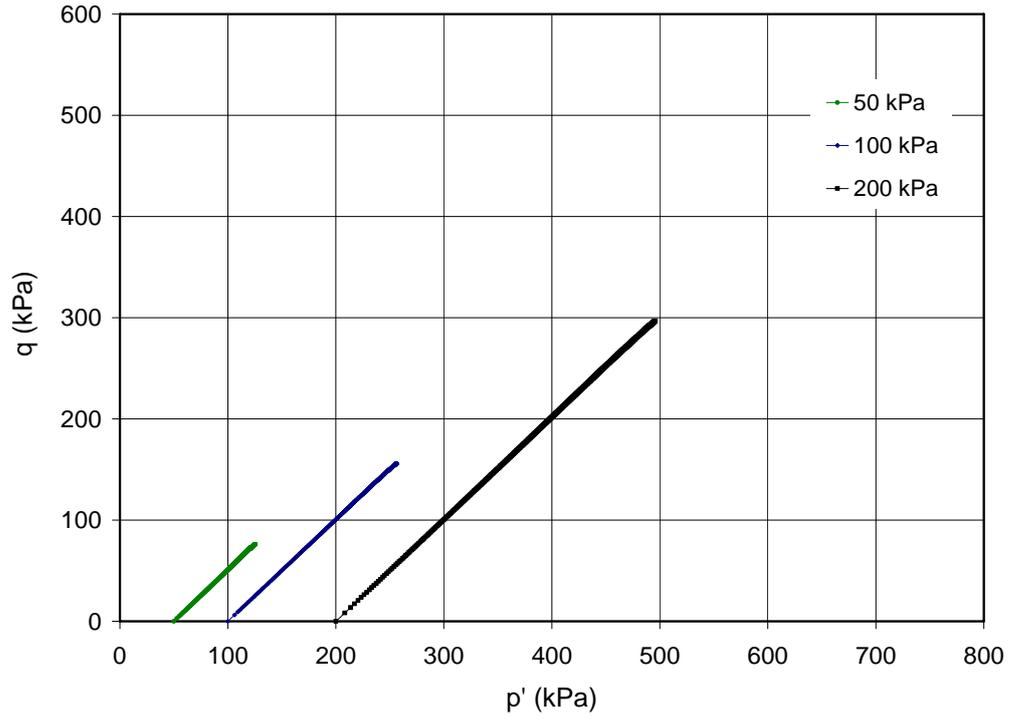


Figura 0.15 - Trajetória de tensões das amostras reconstituídas referente a 0,1 m do ponto de descarga

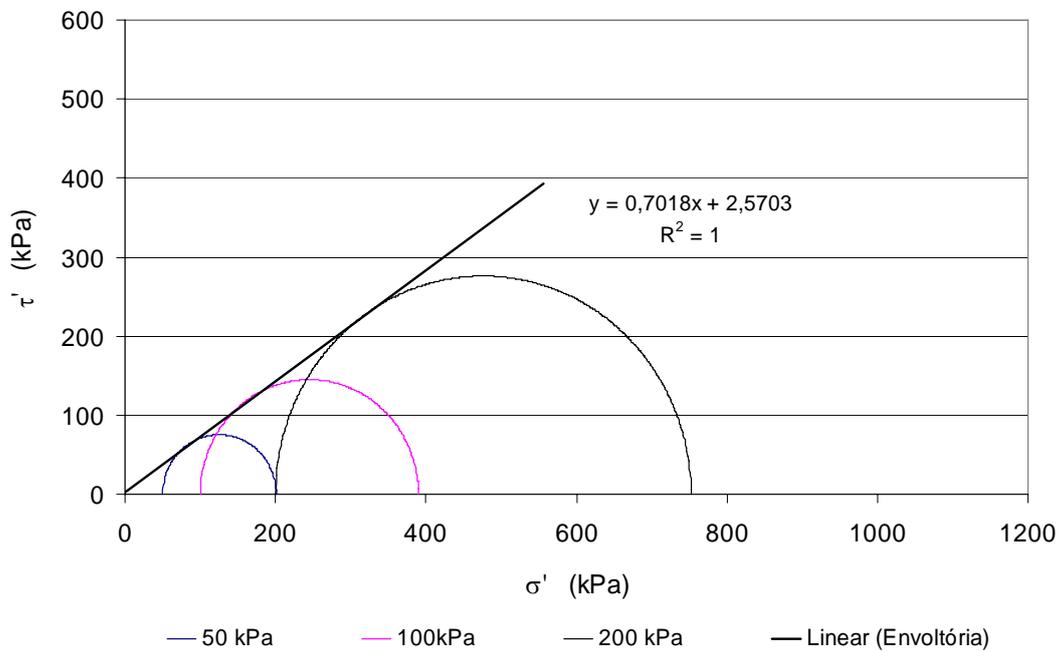


Figura 0.16 - Envoltória de ruptura das amostras reconstituídas referente a 0,1 m do ponto de descarga