

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

**APLICABILIDADE DOS REJEITOS DE MINERAÇÃO DE FERRO  
PARA UTILIZAÇÃO EM FILTROS DE BARRAGENS**

**JULIETA ECHEVERRI VERGARA**

**ORIENTADOR: LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: G.DM-209**

**BRASILIA DF/ JULHO 2012**

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

**APLICABILIDADE DOS REJETOS DE MINERAÇÃO DE FERRO PARA  
UTILIZAÇÃO EM FILTROS DE BARRAGENS**

**JULIETA ECHEVERRI VERGARA**

**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:**

---

**LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, MsC (UnB)  
(ORIENTADOR)**

---

**ANDRÉ PACHECO ASSIS, PhD (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**TEREZINHA DE JESUS ESPÓSITO, MsC (UFMG)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

ECHEVERRI, JULIETA

Aplicabilidade dos Rejeitos de Mineração de Ferro para Utilização em Filtros de Barragens.  
[Distrito Federal] 2012.

xii, 112p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2012)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília.

Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil

1. Resíduos

3. Permeabilidade

2. Filtros

4. Densidade

I. ENC/FT/UnB

II. Título série ()

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

ECHEVERRI, J. (2012). Aplicabilidade dos Rejeitos de Mineração de Ferro para Utilização em Filtros de Barragens. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-209, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 112p.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: Julieta Echeverri Vergara

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Aplicabilidade dos Rejeitos de Mineração de Ferro para Utilização em Filtros de Barragens.

GRAU / ANO: Mestre / 2012

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

---

Julieta Echeverri Vergara  
SCLN413 bloco C apto 215  
CEP: 70876-530 Brasília/DF - Brasil

“A EDUCAÇÃO É UMA COISA ADMIRÁVEL, MAS É BOM RECORDAR QUE NADA  
DO QUE VALE A PENA SABER PODE SER ENSINADO”

Óscar Wilde

*Ao povo brasileiro, quem me acolheu  
nesse maravilhoso país*

## **AGRADECIMENTOS**

A meu companheiro de vida, Alejandro...

À minha mãe Berta Cecilia e meu irmão Daniel, pelo acompanhamento incondicional nesses dois anos, por eles que me fazem a vida mais fácil.

Ao professor Luís pela orientação, ajuda, compreensão e paciência em todo momento.

Aos docentes do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia pelo conhecimento técnico fornecidos nesses dois anos

Ao CNPq pelo apoio financeiro

À equipe de Laboratório da Microsonda Eletrônica, do Instituto de Geociências pela orientação com os ensaios.

Ao laboratório de Microscopia Raios X do Instituto de Geociências pelo fornecimento do equipamento para a realização dos ensaios.

Mathilde Tibana, com a sua fortaleza aprendi que, com um sorriso pode-se enfrentar os momentos mais difíceis da vida.

Sandra Tibana, pela amizade e incondicionalidade, a sua companhia reconforta a alma.

À Caroline Barbosa, pela amizade e incessante ajuda com a língua portuguesa.

## RESUMO

O crescente aumento do volume de resíduos gerados nas atividades de mineração tem incrementado a possibilidade de reaproveitamento desses resíduos em aplicações geotécnicas. Devido, principalmente, à redução dos impactos ambientais e, em alguns casos, à redução dos custos, a reciclagem e o reaproveitamento de materiais oriundos da extração mineral tem desempenhado um papel decisivo na recuperação das estradas, melhoria e reforço de solos, construção de barragens, etc. Entretanto, estas aplicações necessitam de uma avaliação criteriosa que possa justificar a viabilidade técnica do aproveitamento desses resíduos. Neste contexto, o presente trabalho objetiva avaliar o uso de resíduos de mineração de ferro como filtro em obras de terra, principalmente para barragens, em substituição a areia natural encontrada nos rios e dunas. Neste contexto, são apresentados os resultados obtidos a partir do estudo desses resíduos considerando suas características físicas, químicas e mineralógicas avaliando principalmente a composição granulométrica, compactidade, durabilidade, permeabilidade em condições específicas de confinamento e alterações químicas. Adicionalmente, foram realizados ensaios de permeabilidade saturada simulando diferentes condições de confinamento e compactidade. A proposta principal desta pesquisa foi justificar as possíveis alterações no comportamento destes resíduos a partir da análise da sua compatibilidade física, química e mineralógica neste tipo de utilização. Assim, os resultados obtidos permitiram avaliar as potencialidades do uso do resíduo de minério de ferro como alternativa ambientalmente viável em aplicações como filtros de barragens.

## **ABSTRACT**

The enormous volume of waste generated in mining has increased the possibility to reuse these materials in geotechnical applications. Due to, primarily, the reduction of environmental impacts as well as cost reduction, the recycling of mining's materials has been played a decisive role in the rehabilitation of roads, soil enhancement and dams construction, etc. However, these applications require a thorough evaluation of these wastes to display its technical feasibility utilization. This study aims to evaluate the use of iron mine waste as the main component of embankment dam filters in replace of natural sand from rivers dunes. The results obtained from the evaluation of these wastes considering their physical, chemical and mineralogical properties associated with particle size, compactness, durability and chemical changes. Additionally, some saturated permeability tests were performed to simulate different conditions of confining and compactness. The main purpose of this research was to analyze possible changes in these waste materials by the analysis of their physical, chemical and mineralogical compatibility. In addition, the obtained results allowed to evaluate the potential use of iron mine waste as an environmentally viable alternative for embankment dam filter applications.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	OBJETIVO GERAL.....	4
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	4
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>6</b>
2.1	TIPOS DE BARRAGENS.....	6
2.2	BARRAGENS DE TERRA.....	6
2.2.1	Barragens homogêneas.....	8
2.2.2	Barragens homogêneas com filtros .....	9
2.2.3	Tipos de fundações associadas às barragens de terra.....	10
2.3	BARRAGENS ZONEADAS .....	11
2.4	BARRAGENS DE ENROCAMENTO .....	11
2.4.1	Tipos de fundações associadas às barragens de enrocamento.....	13
2.5	HIDRÁULICA DOS MEIOS GRANULARES .....	15
2.5.1	Condutividade hidráulica e permeabilidade .....	15
2.5.2	Lei de Darcy .....	18
2.6	ENSAIOS DE LABORATÓRIO PARA AVALIAÇÃO DA PERMEABILIDADE.....	19
2.6.1	Permeômetros do tipo cilindro de compactação.....	20
2.6.2	Permeômetros tipo célula de consolidação.....	21
2.6.3	Permeômetros tipo tubo de amostragem .....	21
2.7	MÉTODO DE REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS .....	23
2.7.1	Ensaio de carga constante .....	23
2.7.2	Ensaio de carga variável.....	24
2.7.3	Ensaio de permeabilidade saturada com a bomba de fluxo .....	25
2.8	FATORES QUE INFLUENCIAM O COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE SOLOS GRANULARES .....	26
2.8.1	Índice de vazios:.....	26

2.8.2	Temperatura .....	27
2.8.3	Estrutura de solo:.....	28
2.8.4	Grau de saturação .....	28
2.8.5	Composição mineralógica:.....	29
2.9	<b>SISTEMAS DE DRENAGEM INTERNA DE BARRAGENS.....</b>	<b>29</b>
2.9.1	Filtros chaminé (vertical ou inclinados).....	30
2.9.2	Filtros horizontais (tapetes drenantes).....	31
2.9.3	Poços de alívio .....	31
2.9.4	Drenos de pé.....	32
2.9.5	Filtros de geotêxtil.....	32
2.10	<b>COLMATAÇÃO NOS FILTROS DE BARRAGENS.....</b>	<b>34</b>
2.11	<b>DIMENSIONAMENTO DOS FILTROS.....</b>	<b>36</b>
2.12	<b>FILTROS DE BARRAGENS, CRITÉRIOS DE PROJETO.....</b>	<b>38</b>
2.12.1	Critérios para projeto de filtros em barragens usando materiais granulares: .....	40
2.12.2	Critérios para projeto de filtros de barragens usando materiais finos .....	45
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>51</b>
3.1	<b>CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS.....</b>	<b>51</b>
3.2	<b>MÉTODOS.....</b>	<b>53</b>
3.2.1	Granulometria a laser .....	54
3.2.2	Índice de vazios.....	55
3.2.3	Permeabilidade em carga constante .....	58
3.2.4	Análise mineralógica.....	61
3.2.5	Microscopia ótica com lupa .....	62
3.2.6	Difratometria de Raio-X.....	62
3.2.7	Microsonda eletrônica. ....	63
3.2.8	Análises químicas.....	65
3.2.9	Permeabilidade na célula triaxial .....	66

3.2.10	Preparação da amostra.....	67
3.2.11	Processo de saturação.....	70
3.2.12	Fase de adensamento.....	70
3.2.13	Passagem de fluxo através das amostras.....	71
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>72</b>
4.1	MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS DOS REJEITOS.....	72
4.2	ENSAIOS GRANULOMÉTRICOS.....	73
4.3	ENSAIOS DE ÍNDICE DE VAZIOS MÁXIMO E MÍNIMO.....	75
4.4	DESCRIÇÃO MINERALÓGICA DOS RESÍDUOS.....	76
4.4.1	Difratometria de Raio- X.....	78
4.4.2	Microsonda Eletrônica.....	80
4.5	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS RESÍDUOS.....	83
4.6	ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DOS REJEITOS.....	85
4.7	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PERMEABILIDADE DE CARGA CONSTANTE.....	86
4.8	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PERMEABILIDADE NO EQUIPAMENTO TRIAXIAL.....	88
4.8.1	Avaliação dos rejeitos nos critério de projeto de filtros.....	98
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....</b>	<b>104</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>108</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Barragem homogênea .....	8
Figura 2.2. Barragem homogênea com filtro de pé.....	9
Figura 2.3. Barragem homogênea com filtro horizontal .....	9
Figura 2.4. Barragem homogênea com filtros vertical e horizontal.....	9
Figura 2.5. Barragens de Terra Zoneada – Barragem de São Simão (MOREIRA 1981, tomado de AZEVEDO 2005).....	11
Figura 2.6. Barragem de enrocamento com membrana externa impermeável.....	12
Figura 2.7. Barragem de enrocamento com núcleo impermeável.....	12
Figura 2.8. Barragem Edson Queiroz (fonte: <i>dnocs.gov.br</i> data de acesso 17/05/2012) .....	13
Figura 2.9. Vala corta-águas ou “cut-off” .....	14
Figura 2.10. Valas corta-águas parcial .....	14
Figura 2.11. Permeâmetro tipo molde de compactação com anel de prolongamento (DANIEL 1994, modificado de ALONSO 2005). .....	20
Figura 2.12. Permeâmetro que utiliza amostrador de parede fina (DANIEL 1994, modificado de ALONSO 2005).....	21
Figura 2.13. Permeâmetro de parede flexível (DANIEL et. al. 1984, modificado de ALONSO 2005).....	22
Figura 2.14. Ensaio de carga constante (Modificado – POWRIE, 1997, modificado de SANTOS, 2004).....	24
Figura 2.15. Ensaio de carga variável (Modificado – POWRIE, 1997, tomado de SANTOS, 2004).....	25
Figura 2.16. Variação da condutividade hidráulica com a modificação de índice de vazios para alguns solos, modificado de LAMBE AND WHITMAN (1969) .....	27
Figura 2.17. Condutividade hidráulica versus grau de saturação para uma argila compactada, OLSON & DANIEL 1994, tomado de ALONSO 2005.....	29
Figura 2.18. Seção com filtro inclinado e horizontal .....	30
Figura 2.19. Seção com filtro horizontal e enrocamento de pé; tomado de Assis 2003 .....	31
Figura 2.20. Detalhe da localização do dreno de pé em uma barragem de terra, fonte: <i>atlasdasaguas.ufv.br</i> , acesso 27/05/2012.....	33
Figura 2.21. Arranjo de esferas a) arranjo fofo; b) arranjo compacto (WITTMAN 1979, citado por CRUZ 1996).....	39
Figura 2.22. Faixas granulométricas de areias e cascalhos (SHERARD 1984-b) .....	44

Figura 2.23. Relação entre $d_{85}$ do solo-base e $D_{15}$ do filtro, (SHERARD 1984) .....	46
Figura 2.24. Dimensão de partículas passantes ou retidas por um filtro vs. permeabilidade do filtro (VAUGHAN & SOARES, 1982).....	47
Figura 2.25. Ensaio de permeabilidade – curava granulométrica- ensecadeira U.H. Canoas (Cortesia CESP, 1992. tomado de CRUZ 1996) .....	49
Figura 3.1. Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero (modificado de Alkim & Marshak; 1998, tomado de Chicarino <i>et al</i> , 2009 ) .....	52
Figura 3.2. Detalhe do equipamento granulômetro laser .....	55
Figura 3.3. Detalhe de funil usado para a pluviação seco .....	57
Figura 3.4. Mesa vibratória e cilindro utilizado no ensaio do índice de vazios máximo e mínimo .....	57
Figura 3.5. Detalhe do permeâmetro de parede rígida utilizado no ensaio de permeabilidade a carga constante .....	58
Figura 3.6. Permeâmetro, equipamento utilizado para a realização do ensaio de permeabilidade a carga constante.....	59
Figura 3.7. Detalhe de um microscópio ótico, fonte: <a href="http://www.flickr.com/photos/ewumeyer/4648152080">http://www.flickr.com/photos/ewumeyer/4648152080</a> acesso 17/05/2012/.....	63
Figura 3.8. DRX (Difração de Raios X), fonte: <i>emal.engin.umich.edu</i> , acesso 17/05/2012 ...	64
Figura 3.9. Detalhe do tubo e montagem tipo moeda das amostras.....	64
Figura 3.10. Equipamento de Microsonda Eletrônica .....	64
Figura 3.11. Equipamento usado no ensaio de permeabilidade a diferentes tensões de confinamento.....	66
Figura 3.12. Prensa usada para a compactação estática das camadas dos C.P.....	69
Figura 3.13. Detalhe do corpo de prova para a realização dos ensaios de permeabilidade no equipamento triaxial.....	69
Figura 3.14. Colocação dos <i>o-rings</i> e da membrana de látex no corpo de prova .....	70
Figura 4.1. Resultados da análise granulométrica do rejeito AM 01 .....	73
Figura 4.2. Resultados da análise granulométrica do rejeito AM 02 .....	74
Figura 4.3. Curvas granulométricas dos dois rejeitos .....	74
Figura 4.4. Detalhe dos minerais de quartzo do resíduo AM 01, (lente 100x) .....	76
Figura 4.5. Detalhe dos minerais de ferro do resíduo AM 01, (lente 100x) .....	77
Figura 4.6. Detalhe dos minerais presentes no resíduo AM 02, (lente 100x) .....	78
Figura 4.7. Difratoograma correspondente ao rejeito AM 01 .....	79
Figura 4.8. Difratoograma correspondente ao rejeito AM 02 .....	80

Figura 4.9. Detalhe dos locais onde foram feitas as leituras dos elementos químicos correspondentes à amostra AM 01 .....	81
Figura 4.10. Espectrogramas dos elementos químicos presentes nos pontos da amostra AM 01. a) ponto 001, b) ponto 002, c) ponto 003, d) ponto 004.....	82
Figura 4.11. Detalhe dos locais onde foram feitas as leituras dos elementos químicos correspondentes à amostra AM 02 .....	82
Figura 4.12. Espectrogramas dos elementos químicos presentes nos pontos da amostra AM 02. a) ponto 001, b) ponto 002, c) ponto 003.....	83
Figura 4.13. Curva de coeficiente de permeabilidade versus índice de vazios para os dois rejeitos.....	87
Figura 4.14. Curvas de adensamento para a densidade máxima do rejeito AM 01 .....	89
Figura 4.15. Curvas de adensamento para a densidade intermediária do rejeito AM 01 .....	89
Figura 4.16. Curvas de adensamento para a densidade mínima do rejeito AM 01 .....	90
Figura 4.17. Curvas de adensamento para a densidade máxima do rejeito AM 02 .....	90
Figura 4.18. Curvas de adensamento para a densidade intermediária do rejeito AM 02.....	91
Figura 4.19. Curvas de adensamento para a densidade mínima do rejeito AM 02.....	91
Figura 4.20. Curvas de permeabilidade em relação a variação do índice de vazios para o rejeito AM 01.....	92
Figura 4.21. Curvas de permeabilidade em relação a variação do índice de vazios para o rejeito AM 02 .....	94
Figura 4.22. Relação das tensões confinantes e os coeficientes de permeabilidade para cada uma das compacidades do rejeito AM 01.....	95
Figura 4.23. Relação das tensões confinantes e o coeficientes de permeabilidade para cada uma das compacidades do rejeito 2.....	96
Figura 4.24. Curva granulométrica do resíduo 1 e a faixa granulométrica para filtros arenosos segundo SHERARD.....	99
Figura 4.25. Curva granulométrica do resíduo 2 e a faixa granulométrica para filtros arenosos segundo SHERARD.....	100
Figura 4.26. Variação permeabilidade em função dos valores do diâmetro dos poros para o rejeito AM 01 .....	101
Figura 4.27. Variação da permeabilidade em função dos valores do diâmetro dos poros para o rejeito AM 02 .....	102
Figura 4.28. Avaliação do rejeito AM 01 como filtro para o caso da Barragem de Canoas. 103	
Figura 4.29. Avaliação do rejeito AM 02 como filtro para o caso da Barragem de Canoas... 103	

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1. Produção anual brasileira em toneladas de areia e brita (DNPM, 2007) .....	3
Tabela 2.3. Permeabilidade e diâmetros modificado de CRUZ (1996) .....	16
Tabela 2.4. Intervalo aproximado do coeficiente de permeabilidade (k), para diversos tipos de solos, modificado de MARSAL & RESÉNDIZ (1975).....	17
Tabela 2.5. Critério de retenção para filtros de geotêxtil (modificado - GIROUD, 1994, citado por GARDONI, 1995).....	34
Tabela 2.6. Resultado dos ensaios de critérios de filtros modificado de VAUGHAN & SOARES (1982).....	48
Tabela 3.1. Metodologia de classificação e caracterização aplicada para cada resíduo .....	54
Tabela 3.2. Dados iniciais dos corpos de prova para os ensaios de permeabilidade a carga constante.....	61
Tabela 3.3. Dados iniciais dos corpos de prova na execução dos ensaios de permeabilidade na célula triaxial .....	68
Tabela 4.1. Massa específica dos grãos dos rejeitos .....	72
Tabela 4.2. Caracterização física dos rejeitos em função da análise granulométrica .....	75
Tabela 4.3. Valores dos índices de vazios máximo e mínimo correspondentes a cada rejeito	75
Tabela 4.4. Minerais presentes nos dois resíduos .....	80
Tabela 4.5. Elementos químicos presentes nas amostras .....	81
Tabela 4.6. Resultados químicos correspondentes ao rejeito AM 01 .....	84
Tabela 4.7. Resultados químicos correspondentes ao rejeito AM 02 .....	84
Tabela 4.8. Valores de condutividade hidráulica saturada em ensaios de carga constante para o rejeito AM 01 .....	86
Tabela 4.9. Valores de condutividade hidráulica saturada em ensaios de carga constante para o rejeito AM 02 .....	86
Tabela 4.10. Valores da permeabilidade em relação ao índice de vazios e tensões confinantes do rejeito AM 01. ....	93
Tabela 4.11. Valores da permeabilidade em relação ao índice de vazios e tensões confinantes do rejeito AM 02 .....	93
Tabela 4.12. Comparação entre os valores da permeabilidade obtidos nos ensaios de carga variável e célula triaxial para o rejeito AM 01 .....	97
Tabela 4.13. Comparação entre os valores da permeabilidade obtidos nos ensaios de carga variável e célula triaxial para o rejeito AM 02.....	97

Tabela 4.14. Valores do diâmetro dos poros para os dois resíduos segundo a metodologia de ATTERBERG e WITHMAN.....	101
--	-----

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AASHO – American Association of State Highway

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AM 01 – Amostras do rejeito 1

AM 02 – Amostras do rejeito 2

ASTM -American Society for Testing and Materials

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CP – Corpos de Prova

Cu - coeficiente de uniformidade

D - Diâmetro característico;

D<sub>10</sub>- Diâmetro a 10 %;

D<sub>15</sub>- Diâmetro a 15 %;

D<sub>50</sub> - Diâmetro a 50 %;

D<sub>60</sub>- Diâmetro a 60 %;

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral

DR – Densidade Relativa

e - Índice de vazios;

e<sub>max.</sub> – Índice de vazios máximo

e<sub>min.</sub> – Índice de vazios mínimo

G<sub>s</sub> – Densidade dos grãos

h – Carga hidráulica

k – Coeficiente de permeabilidade intrínseca

kPa - Quilo Pascal;

kT°C - Condutividade hidráulica a T°C

$K_{20^{\circ}\text{C}}$  - Condutividade hidráulica a  $20^{\circ}\text{C}$

max - Máximo;

min - Mínimo

NBR - Norma Brasileira;

n - Porosidade;

$\gamma_d$  - Massa específica aparente seca

$\gamma_s$  - Massa específica dos sólidos

$\gamma_w$  - Massa específica da água

$p_{av}$  - Tamanho dos poros do material granular

Q - Vazão

SUCS - Sistema Unificado de Classificação dos solos

V - Volume da amostra

$\Delta u$  - Poro pressão

% - Portentagem

w - Umidade

$\eta_{20^{\circ}\text{C}}$  - Viscosidade dinâmica de um fluido a  $20^{\circ}\text{C}$

$\eta_{T^{\circ}\text{C}}$  - Viscosidade dinâmica de um fluido a  $T^{\circ}\text{C}$

# 1 INTRODUÇÃO

A civilização humana sempre dependeu dos recursos naturais para o seu desenvolvimento. À matéria-prima mineral é atribuída importância fundamental no processo evolutivo da humanidade, sempre associada ao domínio e ao uso de suas propriedades com vistas ao atendimento das necessidades do mercado e do progresso mundial. Assim, os bens minerais são abordados como a parte inicial de uma cadeia de produção na qual são destacadas as características que tornam o seu uso desejável para garantir o desempenho em uma dada aplicação (Nery, 2009). Destaca-se ainda que a indústria da mineração esteja presente em aproximadamente 1.500 cidades no Brasil e de acordo com o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), esses municípios apresentam Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) maior do que o de seus respectivos estados.

No Brasil são movimentadas anualmente cerca de 550 milhões de toneladas entre minério e estéril nas diversas minas de ferro localizadas principalmente nos estados de Minas Gerais, Pará e em menor escala em Goiás e Bahia.

Os rejeitos gerados na mineração a céu aberto e no processamento dos bens aproveitados representam um volume muito maior do que aquele gerado pelo processamento dos bens aproveitados através de técnicas de lavra subterrânea. Considerando-se o contexto da disposição dos rejeitos de mineração, pode-se dizer que os métodos como o preenchimento de cavidades subterrâneas sejam mais utilizados no contexto de países com maiores restrições ambientais que o Brasil. Entretanto, esses métodos já são empregados no Brasil, mais especificamente quando as condições de aplicação são favoráveis ou existem restrições para o licenciamento de novas áreas.

Assim, os rejeitos da mineração podem produzir impactos ambientais devido à deposição inadequada, pelo risco de contaminação de lençóis freáticos e pelas perdas de água de processo por falta do seu tratamento e do seu reúso. Neste sentido, todo cuidado é pouco durante as fases de lavra e beneficiamento de minérios para que os resíduos/rejeitos não sejam lançados no sistema de drenagem (Ministério de Minas e Energia, 2010).

Neste contexto, os rejeitos de usinas de beneficiamento de minérios podem se constituir em uma expressiva fonte de poluição ambiental. Além da carga sólida, geralmente há contaminantes físico-químicos, com solução de metais tóxicos, radiativos, acidez, etc., tornando-se então imperiosa a sua contenção criteriosa ou tratamento adequado (ABRÃO, 1987). Neste contexto, os resíduos podem ser classificados segundo as normas NBR 10004 (ABNT 2004):

- a) Resíduos classe I - Perigosos;
- b) Resíduos classe II – Não perigosos;
- c) Resíduos classe II A – Não inertes.
- d) Resíduos classe II B – Inertes.

Assim, considerando as características dos resíduos, estes podem ser submetidos a processos de reutilização e reciclagem. A reutilização ocorre quando o resíduo é reaplicado sem nenhum processo de transformação, e reciclagem é o reaproveitamento de um resíduo após ter sido submetido a algum tipo de transformação (CONAMA, 2002).

Para a obtenção Os agregados geralmente obtidos no mesmo local da obra ou nas regiões circundantes, tentando sempre minimizar custos com transporte, eles podem ser encontrados como material particulado nos leitos aluviais ou produzidos por processos de britagem das rochas. Devido ao crescimento desmedido da exploração desses materiais para serem empregados na construção civil (rodovias, barragens, estruturas de contenção, etc.) a escassez é cada vez maior, aumentando o preço de materiais oriundos do processo de exploração de pedreiras (brita areia, cascalho, etc.) nos últimos anos. Segundo o DNPM (2007) a produção dos agregados para a construção civil alcançou um total de 279 milhões de toneladas de Rocha Britada ao fim de 2007. Na Tabela 1.1, apresenta-se a quantidade total de areia e brita produzida por ano, de 2001 até 2007. Neste período a participação média dos agregados no valor da produção mineral nacional situou-se próximo de 18%. Os agregados apresentam o maior volume físico de comercialização, sendo os mais demandados dentre todos os produtos da indústria mineral.

Na atualidade, visando reduzir os impactos ambientais devido ao armazenamento dos resíduos gerados no beneficiamento de minérios, as empresas de mineração têm

buscado utilizar novas alternativas para disposição dos resíduos e assim minimizar os impactos ambientais e garantir a qualidade técnica e a segurança destas estruturas.

Apesar de não possuírem valor econômico, os rejeitos de mineração têm sido nos últimos anos, empregados para diversos fins da engenharia. A maioria das aplicações tem sido voltadas a utilização dos resíduos em componentes asfálticos, em misturas com solo em materiais de base e sub-base e como agregados para construção da camada de revestimento.

**Tabela 1.1.** Produção anual brasileira em toneladas de areia e brita (DNPM, 2007)

Bem mineral	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Areia (10 <sup>6</sup> t)	244,40	240,80	214,10	201,00	238,00	255,00	279,00
Brita (10 <sup>6</sup> t)	190,60	189,80	168,80	187,00	172,00	199,00	217,00
Total (10 <sup>6</sup> t)	435,00	430,60	382,90	388,00	410,00	454,00	496,00

Neste sentido, o presente trabalho objetiva avaliar as potencialidades dos resíduos de minério ferro para serem aplicados como material alternativo em filtros de barragens de terra e enrocamento. Essas barragens são construídas usando grandes volumes de materiais argilosos, arenosos e silicosos conformando assim o maciço, as fundações, os sistemas de filtros, etc. Neste sentido, devido ao grande volume de resíduos gerados a utilização deste material desde que bem analisado poderia ser utilizados em aplicações desta natureza.

No desenvolvimento desta pesquisa propõe-se a realização de análises da viabilidade técnica dos resíduos com filtros de barragens com base na classificação dos materiais considerando alguns diferentes critérios de projeto filtros. Serão utilizados dois resíduos de minério de ferro, oriundos de duas mineradoras do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais, como materiais aptos do ponto de vista da granulometria, da permeabilidade e a consequente compatibilidade química.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal da dissertação consiste na caracterização e avaliação mecânica, física, química e mineralógica de dois resíduos de ferro, provenientes de duas minas de extração de rochas metamórficas do Quadrilátero Ferrífero do estado de Minas Gerais, como material alternativo para filtros de barragens, atendendo os diferentes critérios de projeto. Para o desenvolvimento do trabalho foram realizadas as seguintes etapas:

Caracterização física e mecânica dos resíduos por meio de ensaios de granulometria, massa específica e índice de vazios máximo e mínimo.

Avaliação da permeabilidade dos resíduos para diferentes estados de compactação e condições de confinamento.

Análise química e mineralógica dos materiais por meio de Difração de Raios X (DRX), Microsonda Eletrônica (ME), microscopia de lupa, pH dos resíduos, Capacidade de Troca Catiônica (CTC), análises de compostos químicos, etc.

Análise dos resíduos para os diferentes critérios de classificação para filtros de barragens.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos conforme descrito a seguir:

No capítulo 1 apresenta-se a introdução, os objetivos e escopo do trabalho.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, onde são descritos os diferentes tipos de barragens, as condições hidráulicas dos materiais granulares e os diferentes critérios de projeto para filtros de barragens.

O capítulo 3 descreve a metodologia que foi utilizada para a execução de cada uma das etapas da pesquisa, os tipos de materiais e os ensaios geotécnicos, químicos e mineralógicos envolvidos na pesquisa.

O capítulo 4 refere aos resultados obtidos durante a etapa experimental no laboratório. Neste capítulo são discutidas as mudanças na permeabilidade devido às variações na compactação e na pressão confinante, bem como a classificação dos materiais segundo os diferentes critérios de projeto para filtros de barragens.

O capítulo 5 menciona as conclusões e recomendações a partir dos resultados obtido se discussões para pesquisas futuras.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

Este capítulo visa abordar algumas considerações sobre os critérios de projeto de filtros de barragens. Para isso será feita uma breve explicação sobre as barragens de terra e enrocamento, obras nas quais são usados diversos tipos de filtros e sua finalidade, descrevendo as diferentes seções típicas, os métodos construtivos e os diferentes materiais normalmente utilizados. Também será feita uma abordagem sobre as diferentes características dos materiais granulares do ponto de vista da permeabilidade e compatibilidade química que influenciam no seu ótimo desempenho.

### **2.1 TIPOS DE BARRAGENS**

As barragens são utilizadas para formação de reservatórios (lagos) para atender demandas de abastecimento de água, geração de energia elétrica e para acúmulo de rejeitos industriais (MOREIRA, 1981). ASSIS (2003) divide as barragens, quanto a suas finalidades, em dois grupos: Barragens de Regularização e Barragens de Retenção. O primeiro grupo visa regularizar o regime hidrológico de um rio, ou seja, armazenar água no período de influência em relação à demanda. Estes tipos de barragens têm finalidades específicas como o aproveitamento hidroelétrico, navegação e abastecimento d' água. O segundo grupo tem a finalidade de reter água, amortecendo a onda de cheias para evitar inundações.

### **2.2 BARRAGENS DE TERRA**

As barragens de terra são uma das estruturas mais antigas das construções humanas. Os métodos a que se utilizavam na fase de projeto eram empíricos, havendo conseqüentemente um grande número de insucessos ou de superdimensionamento. Atualmente, para o projeto e construção de uma barragem de terra em um determinado local, há previamente uma série de estudos atendendo a múltiplos fatores como, por exemplo, a análise sobre a sua finalidade, as condições locais (topográficas, geotécnicas e geológicas) e os problemas econômicos que permitem a escolha do local e o tipo de barragem (ESTEVEZ, 1964). A construção de uma barragem é o resultado de um estudo detalhado de todos esses fatores.

Para GERALDES (2008) a estrutura das barragens de terra deve assegurar:

Uma impermeabilização tal que impeça a perda de água através do maciço da barragem;

O projeto deve garantir a respectiva estabilidade;

O talude à montante deve ser protegido contra ondas;

Sistemas de drenagem eficazes que protejam as barragens das poro-pressões;

Controle dos assentamentos da barragem ao longo do tempo.

A construção de barragens de terra e enrocamento são apropriadas para locais onde haja disponibilidade de solo argiloso, arenoso e siltoso, além da facilidade de situar o vertedouro em uma das margens, utilizando o solo escavado para construção da barragem, evitando, sempre que possível, o bota-fora de material. Segundo (GERALDES 1998) o corpo da barragem de terra e enrocamento é uma estrutura trapezoidal homogênea ou zonada e está constituído por diversos materiais que cumprem funções distintas. De forma geral, o corpo de uma barragem de terra ou enrocamento está constituído por um núcleo em material argiloso que impede a percolação da água, dois maciços estabilizadores situados a montante e a jusante do núcleo que garantem a estabilidade da barragem, um conjunto de drenos e filtros que visam dotar a barragem de zonas de escoamento da água que circula por infiltração e reduzir também os riscos de “*piping*”, uma proteção do talude de montante que está sob o efeito direto da ação da água, e uma proteção do talude de jusante contra a ação da chuva e do vento.

Do ponto de vista da escolha do local destinado à construção de uma barragem deverá, sempre que possível, recair sobre uma garganta estreita situada próxima do local a ser beneficiado pela construção, a fim de diminuir os custos e também a utilização da água armazenada. A escolha do local onde será projetada uma barragem deverá atender as necessidades da região (seja energia, fornecimento de água, controle de alagamentos, etc) por meio da realização de estudos geológicos e topográficos da zona, conhecimento hidráulico dos afluentes, cálculo de custos aproximados, etc. e assim determinar o local mais adequado da construção da obra

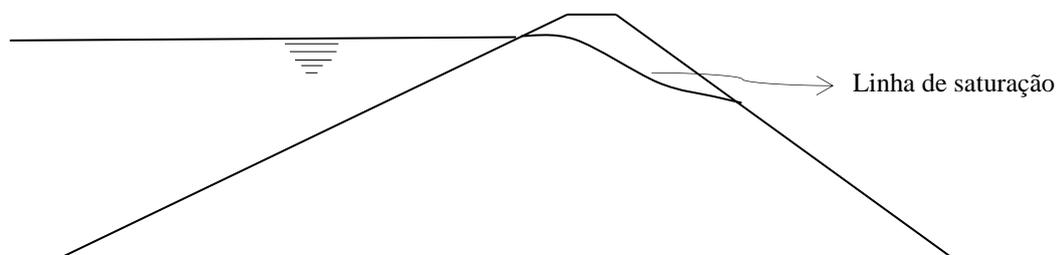
Existindo locais topográfica e geologicamente adequados, é recomendável a construção de pequenos diques em cotas inferiores à do coroamento da barragem para que, na

ocorrência de cheias excepcionais, possam os mesmos romper, funcionando como descarregadores auxiliares, impedindo o transbordamento no maciço e sua conseqüente destruição (diques fusíveis).

As características da seção de uma barragem de terra e enrocamento dependem da disponibilidade dos materiais (solos e rochas) presentes no local, das propriedades mecânicas, da topografia, o sistema hídrico e as condições geológicas. Segundo CRUZ(1996) a escolha do tipo da barragem sempre deve atender para dois elementos fundamentais: a parte vedante e a parte que confere a estabilidade. A seguir são descritas as diferentes seções típicas usadas na construção das barragens homogêneas e as razões principais que influenciam na sua escolha.

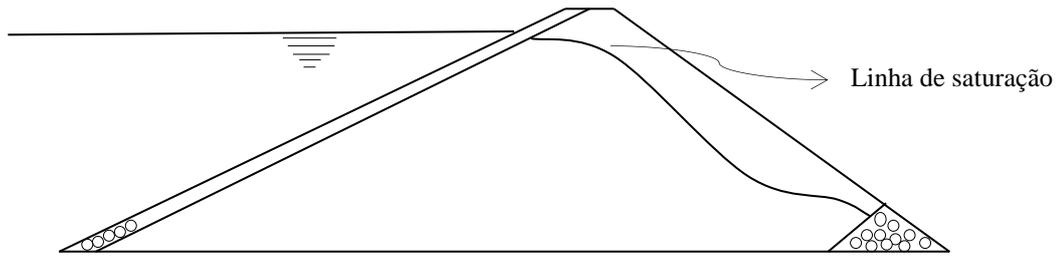
### 2.2.1 Barragens homogêneas

Para MARSAL & RESÉNDIZ (1975), este tipo de barragem é construída quase exclusivamente com terra compactada, tem pelo menos uma proteção contra a ocorrência de ondas no talude de montante (Figura 2.1). Esta seção foi o tipo usual de estruturas adotada no século passado.



**Figura 2.1.** Barragem homogênea

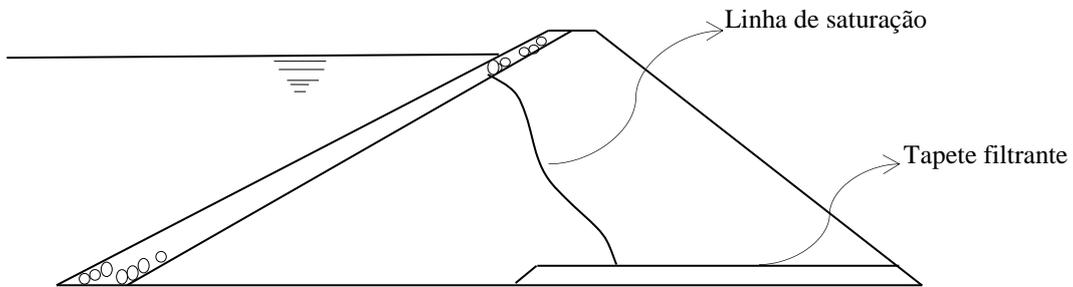
Deve-se notar que para uma barragem homogênea a linha freática atinge o talude de jusante, neste sentido é importante dispor de zonas de materiais permeáveis, por exemplo, filtros de pé e tapetes drenantes no sentido de garantir a estabilidade da barragem (Figura 2.2 e Figura 2.3)



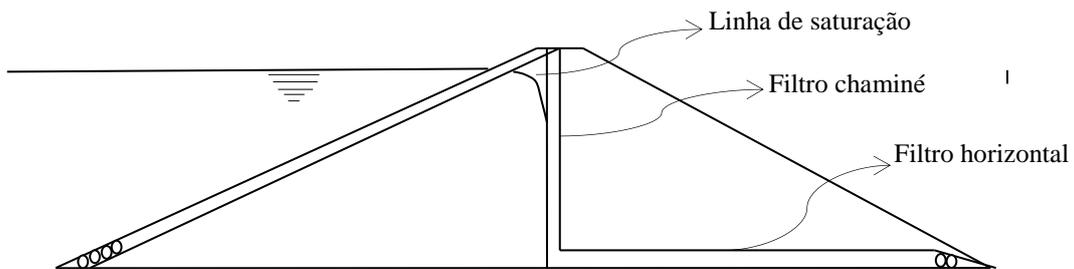
**Figura 2.2.** Barragem homogênea com filtro de pé

### 2.2.2 Barragens homogêneas com filtros

Com o objetivo de que o fluxo de água através do maciço não intercepte o talude de jusante, essa barragem tem na base do aterro um filtro formado por areia bem graduada. O comprimento deste elemento podem variar de projeto mediante estudos de fluxo no maciço de terra (Figura 2.3). Quando os materiais que se empregam no maciço e nas transições são sensíveis ao trincamento e os materiais da fundação são compressíveis pode-se incluir um filtro vertical ou chaminé (Figura 2.4) que se conecta com o filtro horizontal. As trincas transversais se interceptam com as transições e a água que flui por elas é levada pelos filtros até a jusante, diminuindo o risco de uma perigosa erosão interna no maciço.



**Figura 2.3.** Barragem homogênea com filtro horizontal



**Figura 2.4.** Barragem homogênea com filtros vertical e horizontal

A escolha da seção típica de uma barragem depende fundamentalmente dos materiais que conformam a fundação. CRUZ(1996) relaciona alguns critérios e restrições para materiais da fundação mais encontrados no Brasil.

### 2.2.3 Tipos de fundações associadas às barragens de terra

Neste item serão descritos os diferentes tipos de materiais presentes na fundação de uma barragem de terra.

*Fundações em rocha:* quase a totalidade dos maciços rochosos, mesmo as rochas brandas, não tem influência na estabilidade global da barragem nem nas deformações. No caso da ocorrência de juntas, fraturas ou feições descontínuas de baixa resistência haverá problemas de permeabilidade. Neste sentido, para permeabilidades com valores superiores a  $5 \times 10^{-4}$  cm/s, são necessários tratamentos para a sua redução, geralmente são feitas cortinas de injeções de argamassa de cimento etc.

*Fundações em areia pura:* se a fundação corresponde a areias finas uniformes com uma compactidade tal que o índice de vazios seja superior ao índice de vazios críticos, pode ocorrer o fenômeno de liquefação quando saturadas. Para areias grossas com pedregulhos o problema mais comum é a estanqueidade. Alguns tratamentos podem ser realizados visando a redução da vazão pela fundação por meio de uma cortina ou “*cut-offs*” ou construção de um tapete impermeável a montante.

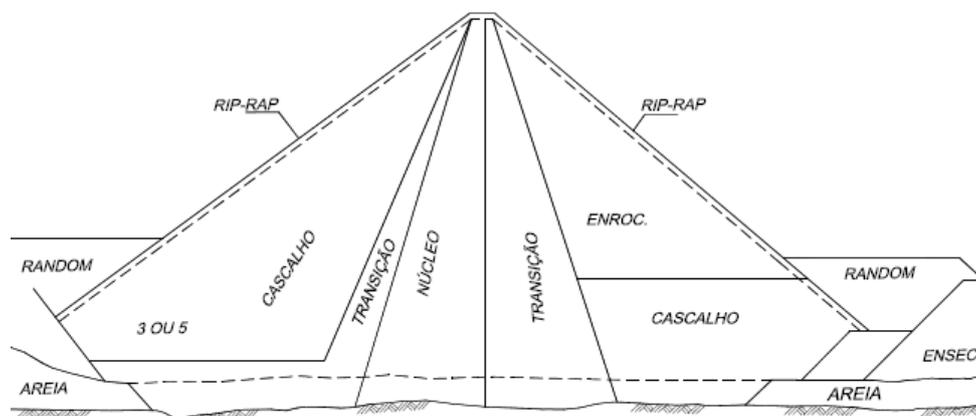
*Fundação em solos moles (aluviões):* Estes materiais devem ser homogêneos e não devem apresentar um S.P.T. menor que 7. Com a finalidade de garantir a presença de lentes de areia ou de argila mole, o tratamento mínimo consiste na remoção da camada superficial. Em muitos casos, quando o solo apresenta uma espessura pequena é removido totalmente até a rocha ou uma camada de material fino. Se o solo é espesso são removidos os 20% correspondentes à altura total da barragem, por meio de valas a serem preenchidas com material compactado ou concreto, com a finalidade de impedir as águas de infiltração ou integrar o maciço à fundação

*Fundações em solos residuais:* os solos residuais e/ou saprolíticos são adequados como fundação do ponto de vista dos deslocamentos, mas quando saturados podem apresentar

elevada sensibilidade (perda de estrutura por amolgamento com a consequente perda de resistência).

### 2.3 BARRAGENS ZONEADAS

Esta denominação é usada para barragens nas quais não há um único material predominante no maciço. GERALDES (2002) descreve as funções dos diferentes materiais presentes neste tipo de seção, por exemplo, o material argiloso do núcleo impede a percolação da água, os dois maciços estabilizadores situados a montante e a jusante do núcleo que pretendem garantir a estabilidade da obra, um conjunto de drenos e filtros que visam a captar as águas de infiltração e uma proteção do talude de montante constituído por materiais de enrocamento para diminuir os efeitos da ação da água (Figura 2.5). Este tipo de barragens não apresenta uma vantagem marcante sobre as barragens de terra homogêneas, a escolha de uma seção típica ou outra depende fundamentalmente do tipo de solos existente no local, da topografia e da geologia, do regime hidrológico, etc. ASSIS (2003) determina a escolha entre seção homogênea ou zoneada pela presença de materiais de construção disponíveis e seus respectivos custos.



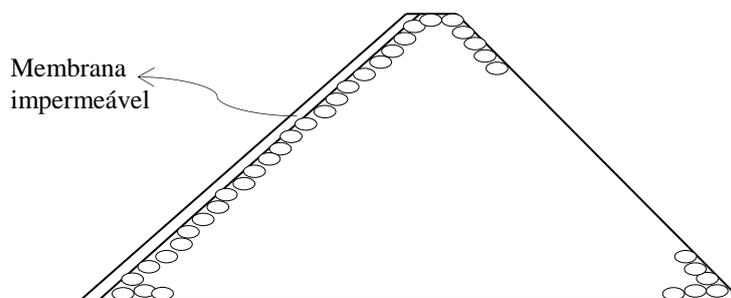
**Figura 2.5.** Barragens de Terra Zoneada – Barragem de São Simão (MOREIRA 1981, tomado de AZEVEDO 2005)

### 2.4 BARRAGENS DE ENROCAMENTO

A ideia de facear uma barragem de terra ou enrocamento com uma capa impermeável é muito antiga, o emprego de geomembranas a montante tem ganhado aceitação em barragens de mineração e em reservatórios de água para consumo nos últimos 15 a 20 anos. Essa capa impermeável consiste numa face “delgada” de placas de concreto

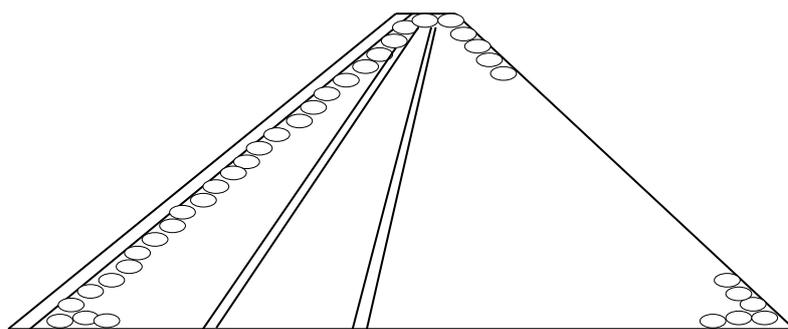
armado, com juntas somente no sentido longitudinal, apoiadas sobre uma face compactada de material granular fino, por vezes tratado com emulsão asfáltica (CRUZ 1996). (concreto, asfalto, entre outros, (Figura 2.6); com núcleo impermeável interno (Figura 2.7)).

Para CRUZ (1996) uma das grandes vantagens das barragens de enrocamento com face de concreto em relação a barragens com núcleo de argila compactada é a flexibilidade construtiva e a possibilidade de trabalhar em condições de chuva. Em regiões de clima frio e chuvoso, com chuvas intermitentes ao longo do ano, como ocorre, por exemplo, na região sul do Brasil, os trabalhos de compactação ficam bastante dificultados, ocorrendo períodos com muito baixa produtividade.



**Figura 2.6.** Barragem de enrocamento com membrana externa impermeável

A barragem Edson Queiroz (Figura 2.8) localizada no estado de Ceará é um exemplo de barragens de enrocamento com núcleo impermeável. A utilização deste tipo de barragens foi consequência dos estudos de mecânica de solos e de rochas com base em critérios econômicos para a obtenção de estruturas que melhor satisfaçam as finalidades do projeto e o cumprimento dos requerimentos mínimos de segurança sancionados pela experiência prévia neste tipo de obras.



**Figura 2.7.** Barragem de enrocamento com núcleo impermeável



**Figura 2.8.** Barragem Edson Queiroz (fonte: *dnocs.gov.br* data de acesso 17/05/2012)

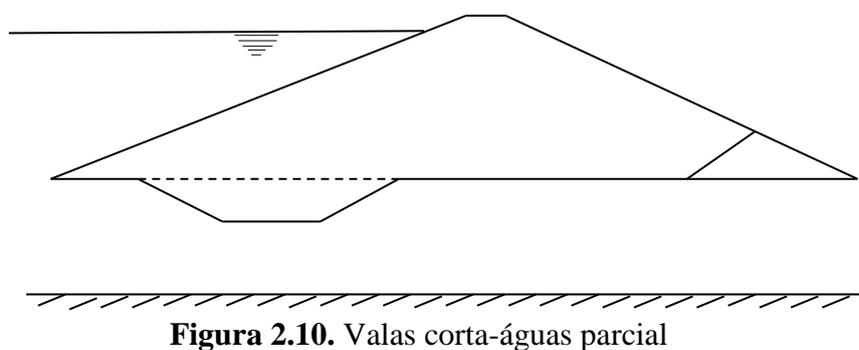
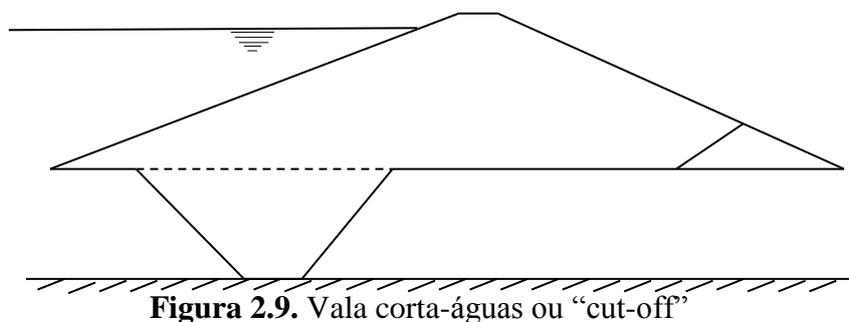
#### *2.4.1 Tipos de fundações associadas às barragens de enrocamento*

A continuação serão descritos os diferentes tipos de fundação e seu tratamento de impermeabilização para barragens de enrocamento

*Fundações em rocha:* As fundações em rocha normalmente não apresentam problemas em relação à resistência. As questões principais referem-se às perdas de água que podem causar erosões perigosas, nas juntas e fraturas presentes nas rochas, por isso deve se recorrer a tratamentos de impermeabilização (muros de concreto ou injeções). Se a rocha se encontra muito alterada pode-se adotar um muro de concreto. As injeções podem ser injeções de impermeabilização que objetivam preencher as juntas, fraturas e orifícios maiores presentes nas rochas e as injeções de consolidação que visam diminuir a compressibilidade e a permeabilidade da rocha com uma calda resistente aplicada a alta pressão preenchendo as fraturas.

*Fundações em solos permeáveis:* Para ESTEVES (1964) estes tipos de fundações apresentam duas condições fundamentais: possibilidade de perdas excessivas de água e a possibilidade de ruptura por “piping”. Neste caso, são propostas algumas soluções para este tipo de material presente na fundação como a instalação de valas impermeáveis ou “cut-offs” que podem ser de face inclinada ou verticais. Este é o método considerado mais seguro de evitar o “piping” através da fundação, em que estas valas podem chegar até a camada impermeável ou rocha ou pode ser uma vala parcial que não atinge os materiais impermeáveis da fundação (Figura 2.9 e

**Figura 2.10).** É importante considerara que esta solução deve ser instalada a montante do eixo da barragem, onde a resistência à percolação do maciço seja igual à oferecida pela vala. Segundo ASSIS (2003) a principal dificuldade deste tratamento é do lençol freático, que exige muitas vezes onerosas instalações de rebaixamento



*Construção de tapete impermeável a montante:* ESTEVES (1964) descreve este tipo de solução como uma banquetta de material impermeável que se prolonga à montante, é usada quando a camada impermeável se encontra a grande profundidade do leito do rio, esta solução consegue aumentar o caminho de percolação, diminuindo por tanto o fluxo de água na fundação pela redução da vazão.

*Aplicação de injeções:* este tipo de solução consiste na penetração de uma calda no material permeável da fundação, dificultando a passagem das águas de percolação. ASSIS (2003) descreve que as injeções em meios aluvionares apresentam efeito duplo: aumenta o caminho de percolação forçando a água a contornar estes inúmeros planos injetados e diminui a própria permeabilidade do meio entre estes planos

*Construção de tapetes filtrantes:* esta solução é empregada no maciço a jusante, e objetiva diminuir o caminho de percolação aumentando as perdas por infiltração. O

comprimento do tapete pode ser determinado recorrendo-se à rede de fluxo correspondente à fundação. CRUZ (1996) considera os tapetes como uma solução simples e de baixo custo para o controle de fluxo pela fundação. O principal problema destes tapetes filtrantes é o fissuramento por ressecamento e por recalques diferenciais no pé de montante da barragem. Assim, devem ser tomados alguns cuidados na implantação e avaliação desta solução no sentido de garantir a sua eficiência e a consequente funcionalidade. a.

## 2.5 HIDRÁULICA DOS MEIOS GRANULARES

O comportamento geotécnico dos rejeitos granulares de uma maneira geral pode ser avaliado a partir da análise do comportamento dos solos arenosos. Esta consideração baseia-se na similaridade entre as propriedades destes materiais. Os rejeitos granulares possuem pequena concentração de finos plásticos e o efeito da densidade relativa justificam a adoção de técnicas de avaliação, metodologias de ensaios semelhantes às utilizadas para solos tipicamente arenosos. Contudo, vale ressaltar que algumas características mineralógicas os diferem dos solos arenosos, principalmente a presença de partículas de ferro, justificando assim uma comparação cuidadosa. No entanto, são apresentadas algumas características básicas de comportamento de solos granulares que tendem a servir de base para a análise do comportamento geotécnico de rejeitos granulares.

O comportamento hidráulico do solo representa um fator importante para análise da intensidade do deslocamento da água no solo para meios granulares e o valor dessa intensidade depende de diversos fatores que serão explicados neste capítulo.

### 2.5.1 *Condutividade hidráulica e permeabilidade*

CRUZ (1996) diferencia o termo condutividade hidráulica do termo permeabilidade, conceituando condutividade hidráulica como a facilidade ou dificuldade que apresenta um meio confinado à passagem de fluxo, a esse meio confinado faz referência às fraturas ou fissuras rochosas e as juntas presentes em maciços rochosos. No caso da permeabilidade este meio se refere aos materiais porosos ou meios não confinados.

Na Tabela 2.1 CRUZ (1996) relaciona alguns materiais de interesse a análise do fluxo da água em solos, como rochas, concreto, solos compactados, enrocamentos, areias siltes etc.

**Tabela 2.1.** Permeabilidade e diâmetros modificado de CRUZ (1996)

MATERIAL	UNIDADE	
	d <sub>15</sub> (cm)	k (cm/s)
Rochas maciças		10 <sup>9</sup> a 10 <sup>10</sup>
Concreto		10 <sup>9</sup>
Argilas marinhas		10 <sup>8</sup>
Solos compactados		10 <sup>-7</sup> (k <sub>vert</sub> )
Siltitos		10 <sup>-6</sup> a 10 <sup>-7</sup>
Siltes		10 <sup>-6</sup>
Rochas alteradas		10 <sup>-6</sup>
Areias finas	1,5x10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>
Siltes grossos		10 <sup>-5</sup>
Arenitos		10 <sup>-4</sup>
Areias grossas	1,0x10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup> a 5x10 <sup>-2</sup>
Areias médias	5,0x10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>
Pedregulho		10 <sup>-1</sup>
Brita		10 <sup>0</sup> a 10 <sup>-1</sup>
Enrocamento sem finos		10 <sup>0</sup>

A permeabilidade e a condutividade de solos e rochas são influenciadas basicamente pela dimensão e pela forma dos vazios presentes. De uma forma geral, pode-se prever que solos porosos sejam mais permeáveis que solos densos, bem como que feições rochosas abertas tenham condutividades hidráulicas maiores do que feições preenchidas, mesmo que parcialmente. (CRUZ 1996).

O coeficiente de permeabilidade, k, tem unidade [L/T] e pode ser interpretado fisicamente como a velocidade de descarga correspondente a um gradiente hidráulico unitário, na Tabela 2.2, se apresentam os intervalos aproximados de k para diversos solos. (MARSAL & RESÉNDIZ, 1975)

**Tabela 2.2.** Intervalo aproximado do coeficiente de permeabilidade (k), para diversos tipos de solos, modificado de MARSAL & RESÉNDIZ (1975)

<i>Tipo de solo</i>	<i>Intervalo k em (cm/s)</i>
Pedregulhos	100 a 1
Areias limpas	1 a $10^{-3}$
Areias muito finas, limos e misturas de areia e silte	$10^{-3}$ a $10^{-7}$
Argilas	$10^{-7}$ a $10^{-9}$

Vários autores têm procurado obter relações entre permeabilidade e condutividade hidráulica. Estas relações levam em conta as dimensões dos vazios, a porosidade, a granulometria etc. É importante notar que a maioria destas relações são válidas somente para materiais granulares (inertes), fraturas rochosas, rugosidades e aberturas. As Equações 2.1, 2.2, e 2.3 apresentam alguns exemplos dessas relações:

$$k = Ad^2 = 100(d_{10})^2 \quad (\text{ref...}) \quad (2.1)$$

$$k_L = 8,175 e^2 \frac{1}{[1+B(k'/2e)^{1,5}]} \quad (\text{ref...}) \quad (2.2)$$

$$k_T = C\sqrt{e} \log \frac{D}{k'/2e} \quad (\text{ref...}) \quad (2.3)$$

Onde,

$k_L$  = permeabilidade no fluxo laminar;

$k_T$  = permeabilidade no fluxo de transição ou turbulento;

$k'$  = rugosidade relativa de uma fratura rochosa;

$e$  = abertura média da fratura;

$d$  = diâmetro do material;

$d_{10}$  = diâmetro efetivo

- Alguns autores considerando o caso das fraturas rochosas sem preenchimento avaliaram as constantes relacionadas nas equações anteriores. Desta forma, LOUIS (1969) obteve  $B= 8,8$ ,  $C= 4$ ,  $D= 1,9$  e QUADROS (1982)  $B= 25$ . É importante considerar que as constantes  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$  foram obtidas experimentalmente para materiais arenosos  $A=100$  e  $d=d_{10}$ (diâmetro nominal).

Para o caso dos rejeitos de mineração, SANTOS (2004) avaliou a condutividade hidráulica média dos resíduos de minério de ferro. Segundo este autor os valores podem variar de  $10^{-2}$  cm/s para os rejeitos arenosos até  $10^{-9}$  cm/s para rejeitos argilosos finos e bem consolidados.

MITTAL & MORGESTERN (1975) citado por SANTOS (2004) ressaltam que a condutividade hidráulica média para rejeitos arenosos pode ser estimada com base no valor do diâmetro efetivo do material obtido através de análise granulométrica utilizando a formulação proposta por HAZEN (1920) para solos granulares:

$$K = C \cdot D_{10}^2 \quad (2.4)$$

Onde:

K = condutividade hidráulica (cm/s),

$D_{10}$  = diâmetro efetivo (em milímetros);

C = coeficiente que varia entre 90 e 120.

BLIGHT (1994) também relata que a condutividade hidráulica dos rejeitos arenosos pode ser avaliada em função da sua distribuição granulométrica. Assim, pode-se determinar o valor da sua condutividade hidráulica através da equação de SHERARD (1984):

$$K = 0,35 \cdot D_{15}^2 \quad (2.5)$$

Onde:

K = condutividade hidráulica (cm/s);

$D_{15}$  = diâmetro correspondente a 15% (mm).

### 2.5.2 *Lei de Darcy*

O escoamento de um líquido pode ocorrer segundo dois estados característicos: escoamento laminar e escoamento turbulento. As leis fundamentais que determinam as condições de ocorrência de tais estados foram determinadas por Reynolds (LAMBE, & WHITMAN, (1979)). No caso de solos, o escoamento pode ser considerado laminar ainda que em certos solos, constituídos por grãos muito grossos, ele possa ser

turbulento. Nos problemas usuais da engenharia civil o que interessa é o escoamento global através de um elemento de volume, suficientemente grande para representar bem o solo como um todo.

A perda de carga  $\Delta h$  entre duas seções qualquer em um tubo de fluxo pode ser obtida por meio da equação diferencial:

$$v = -k \frac{dh}{ds} = ki \quad (2.6)$$

Onde:

$v$  = velocidade de descarga,

$i$  = gradiente hidráulico

$ds$  = distância ao longo da trajetória média de fluxo

$$v = k_T i^n \quad (2.7)$$

Sendo:

$k_L$  = permeabilidade no fluxo laminar

$k_T$  = condutividade no fluxo de transição ou turbulento

$n$  = tende a 0,57 no fluxo turbulento, em fraturas rochosas

Há uma fronteira superior e uma inferior da velocidade  $v$  que limitam o intervalo de validade da lei de Darcy (BARRON, 1948); mas pode considerar que na maioria dos problemas da engenharia civil, entre eles as barragens, a velocidade de descarga decresce no intervalo de fluxo. O escoamento da água através dos solos é então governado pela lei de Darcy, assumindo, portanto especial importância o valor do coeficiente de permeabilidade,  $k$ . No caso de barragens de terra, um dos exemplos de escoamento refere-se ao das águas do reservatório através do corpo da barragem e das fundações

## 2.6 ENSAIOS DE LABORATÓRIO PARA AVALIAÇÃO DA PERMEABILIDADE

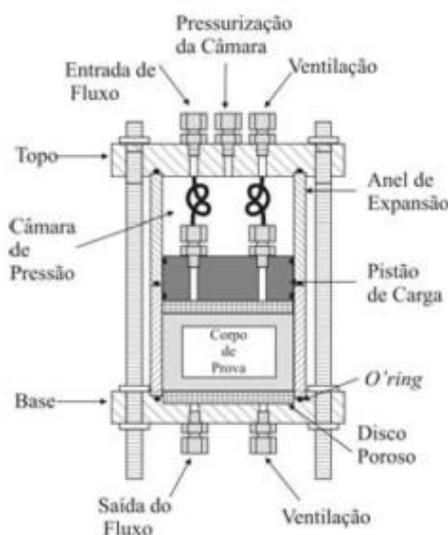
Coeficiente de permeabilidade dos solos pode ser determinado recorrendo a ensaios de laboratório ou ensaios de campo. As determinações em campo visam fundamentalmente à obtenção de um valor do coeficiente de permeabilidade para a realização dos trabalhos

de impermeabilização da barragem na fase de execução. Em laboratório, o valor do coeficiente de permeabilidade é obtido por meio de ensaios conduzidos em permeômetros. Nestes ensaios mede-se a quantidade de água que em um determinado intervalo de tempo e sob certas condições de carga hidráulica atravessa uma amostra de solo (ALONSO 2005).

Existem diversos tipos de equipamentos para investigação da condutividade hidráulica de solos em laboratório. Estes equipamentos são denominados de permeômetros, e são classificados em permeômetros de parede rígida e parede flexível. DANIEL (1994) descreve quatro tipos de permeômetros de parede rígida descritos a seguir:

### 2.6.1 Permeômetros do tipo cilindro de compactação

O processo de fluxo é feito utilizando cilindro de compactação em que normalmente é moldado o corpo de prova. Na maioria destes permeômetros o molde de compactação é encaixado entre placas porosas. O fluxo preferencial entre a parede do permeômetro e o corpo de prova é minimizado devido à compactação do material no próprio corpo do permeômetro. A vedação entre os encaixes é garantida por anéis do tipo O-rings. A Figura 2.11 apresenta um esquema deste tipo de permeômetro.



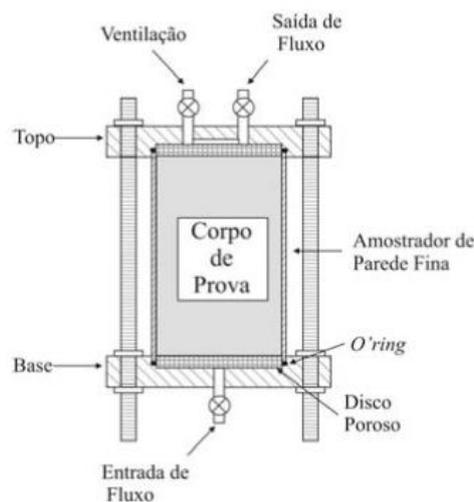
**Figura 2.11.** Permeômetro tipo molde de compactação com anel de prolongamento (DANIEL 1994, modificado de ALONSO 2005).

### 2.6.2 Permeâmetros tipo célula de consolidação

Neste tipo de equipamento a tensão sobre a amostra é aplicada de cima para baixo no solo através de um pistão, proporcionando sua consolidação. O ensaio pode ser executado de duas maneiras: o solo pode ser consolidado e o valor da condutividade hidráulica será computado a partir da taxa de consolidação imposta; e no outro caso o valor da condutividade hidráulica é obtido pela imposição de um fluxo aplicado diretamente ao solo. Este tipo de ensaios permite o controle de tensões no corpo de prova e são geralmente usados para solos argilosos que não contenham pedregulhos ou areia grossa.

### 2.6.3 Permeâmetros tipo tubo de amostragem

Este permeâmetros são utilizados para a determinação da condutividade hidráulica de materiais indeformados. O corpo de prova (amostra) é obtida por a cravação do tubo de parede fina no solo e posteriormente este tubo é encaixado diretamente no permeâmetro. Um problema frequente neste ensaio é o fluxo preferencial entre a parede do permeâmetro e a amostra, o que pode levar a resultados não reais de condutividade hidráulica. Figura 2.12.



**Figura 2.12.** Permeâmetro que utiliza amostrador de parede fina (DANIEL1994, modificado de ALONSO 2005).

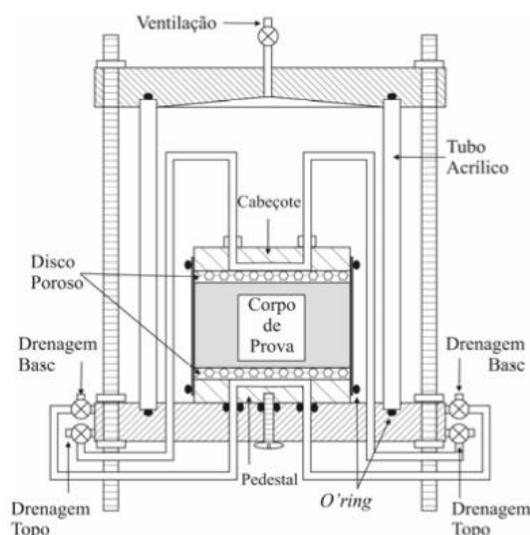
### 2.6.4 Permeâmetros de parede flexível

Os permeâmetro de parede flexível são equipamentos utilizados para a determinação da condutividade hidráulica de materiais porosos, cujo valor seja menor ou igual que  $10^{-3}$  cm/s (ASTM 1990). Pelas características deste equipamento o fluxo preferencial nas

paredes do permeâmetro pode ser eliminado e o tempo necessário para a saturação da amostra é menor .

O permeâmetro de parede flexível é composto por uma câmara onde é posicionado o corpo de prova envolto em uma membrana flexível e entre duas pedras porosas (Figura 2.13). A câmara é preenchida com água e permitindo a aplicação da pressão confinante no seu interior que pressiona a membrana flexível contra o corpo de prova, evitando a ocorrência de fluxo preferencial entre a membrana e o corpo de prova . Ao mesmo tempo em que se aumenta a pressão na câmara aplica-se uma pressão interna na amostra, denominada contra - pressão, sendo que a diferença entre a pressão interna e externa do corpo de prova constitui a tensão efetiva durante o ensaio. Este procedimento de aumento da pressão confinante e contra - pressão tem como objetivo promover a saturação da amostra e é conhecido como saturação por contra - pressão. Assim, o ar oculto nos poros da amostra ensaiada dissolve-se na fase líquida e, depende principalmente da matriz do solo (DANIEL 1994).

Algumas limitações deste equipamento podem estar associadas ao adensamento do corpo de prova durante a saturação e o possível crescimento de microrganismos em ensaios de longa duração (ALONSO 2005):



**Figura 2.13.** Permeâmetro de parede flexível (DANIEL et. al. 1984, modificado de ALONSO 2005).

## 2.7 MÉTODO DE REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Os ensaios de condutividade hidráulica realizados em laboratório são mais utilizados na avaliação de solos compactados durante a fase de projeto, devido os baixos custos comparados com ensaios de campo. Os resultados destes ensaios ajudam na seleção de materiais, normalmente mais indicados como camada impermeabilizante de fundações, núcleos de barragens sistemas de drenagem e projetos de aterros sanitários. Estes ensaios são realizados em células chamadas permeâmetros, no seu interior é colocado o corpo de prova para execução do ensaio. Existem duas categorias de permeâmetros usados em laboratório, os permeâmetros de parede flexível e os permeâmetros de parede rígida que foram descritos anteriormente. Entretanto, em função do método de execução os ensaios podem ser denominados; ensaio de carga constante, ensaio de carga variável e ensaio com vazão constante.

### 2.7.1 Ensaio de carga constante

No ensaio de carga constante, mostrado na

Figura 2.14, a carga hidráulica  $h$  é mantida constante em uma amostra de comprimento  $L$  e área  $A$  durante um determinado tempo  $t$ . A determinação da condutividade hidráulica é realizada quando se verifica um fluxo contínuo e constante dentro da amostra. Por meio da medida do volume escoado em um determinado tempo a condutividade hidráulica é determinada utilizando a relação, onde:

$$K = \frac{V \cdot L}{h \cdot A \cdot t} \quad (2.8)$$

Onde:

$K$  = condutividade hidráulica do solo;

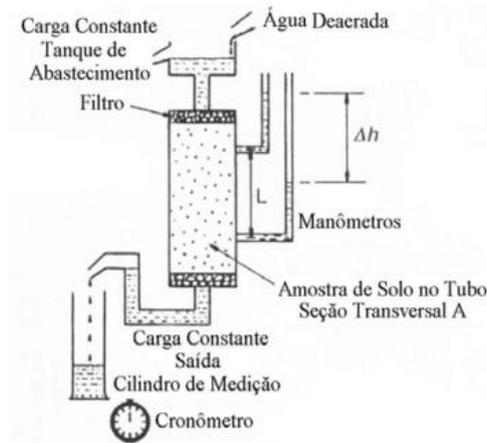
$Q$  = vazão escoada através da amostra;

$L$  = comprimento da amostra;

$h$  = carga hidráulica;

$A$  = área da seção transversal da amostra;

$t$  = tempo de escoamento.



**Figura 2.14.** Ensaio de carga constante (Modificado – POWRIE, 1997, modificado de SANTOS, 2004)

### 2.7.2 Ensaio de carga variável

Este ensaio é realizado para materiais finos (solos argilosos e siltsos), o ensaio com carga constante torna se inviável, devido à baixa permeabilidade destes materiais há pouca percolação de água pela amostra, dificultando a avaliação precisa do volume percolado e a consequente determinação do coeficiente de permeabilidade. Neste ensaio o gradiente hidráulico varia com o tempo assim, as cargas  $h_1$  no tempo  $t_1$  e  $h_2$  no tempo  $t_2$  são determinadas através de pipetas, buretas ou outro dispositivo qualquer de mensuração de altura, à medida que o fluxo atravessa uma amostra de área  $A$ . O esquema de montagem deste ensaio é apresentado na Figura 2.15. A condutividade hidráulica é determinada por meio das expressões:

$$K = \frac{a.L}{A.t} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (2.8)$$

Ou

$$K = 2,3 \frac{a.L}{A.t} \log \frac{h_1}{h_2} \quad (2.90)$$

onde:

$K$  – condutividade hidráulica do solo;

$a$  – área da seção transversal do dispositivo de mensuração de cargas;

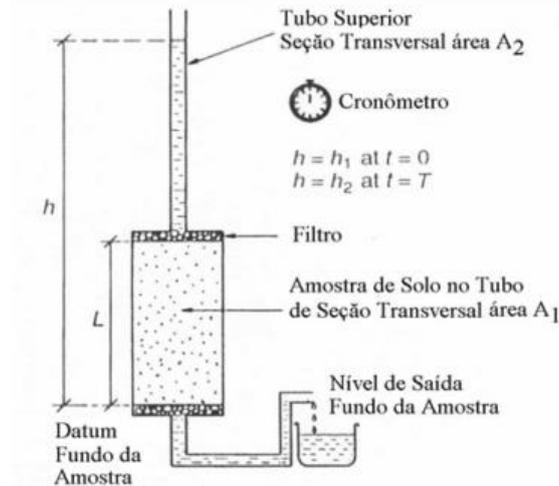
$L$  – comprimento da amostra;

$A$  – área da seção transversal da amostra;

$t$  – tempo de escoamento;

$h_1$  – carga hidráulica inicial;

$h_2$  – carga hidráulica final.



**Figura 2.15.** Ensaio de carga variável (Modificado – POWRIE, 1997, tomado de SANTOS, 2004).

### 2.7.3 Ensaio de permeabilidade saturada com a bomba de fluxo

Segundo BOTELHO (2001) citado por SANTOS (2004) a realização deste ensaio consiste na manutenção de uma velocidade de fluxo constante através da amostra de solo e na medição da diferença de carga hidráulica ao longo da mesma. O controle da velocidade de fluxo é realizado através do bombeamento do líquido percolante através da amostra sob uma vazão controlada. O ensaio é finalizado quando a diferença de pressão encontra-se estável, assim, a condutividade hidráulica é constante.

O gradiente hidráulico é determinado por meio da análise das poro-pressões medidas nos transdutores diferenciais de pressão. Um controlador de fluxo é o equipamento responsável pela imposição do fluxo na amostra. Na fase inicial do ensaio o regime de fluxo é transiente e avaliado em função do tempo e eventualmente se estabiliza para uma condição de equilíbrio. O ensaio para determinação da condutividade hidráulica inicia-se quando, mantendo uma pressão constante no topo da amostra, o controlador de fluxo promove a retirada de água pela base provocando uma diferença de pressão entre o topo e base, e gerando, conseqüentemente, um fluxo descendente. O ensaio continua até que a diferença de pressão gerada atinja o equilíbrio (regime permanente). O correspondente valor da condutividade hidráulica é calculado no estado de equilíbrio de acordo com a lei de Darcy (SANTOS 2004).

Como vantagens da utilização deste ensaio pode-se citar a maior facilidade e precisão na medição da diferença de pressão do que a medição da variação de volume, o que possibilita a imposição de uma gradiente hidráulico muito menor que nos outros tipos de ensaios; o fato do sistema ser fechado evita problemas comuns associados a formação de meniscos e evaporação; as velocidades de fluxo muito pequenas impostas ao corpo de prova podem ser mantidas pelo controlador de fluxo; o tempo de ensaio é menor quando comparado com um ensaio convencional . As desvantagens estão no alto custo do equipamento e a possibilidade de desenvolvimento de gradientes hidráulicos muito altos (BOTELHO 2001).

## 2.8 FATORES QUE INFLUENCIAM O COMOPORTAMENTO HIDRÁULICO DE SOLOS GRANULARES

A permeabilidade é uma das propriedades do solo com maior faixa de variação de valores e é função de diversos fatores, dentre os quais pode-se citar o índice de vazios, temperatura, estrutura do solo, grau de saturação e composição mineralógica.

### 2.8.1 *Índice de vazios:*

A equação de Taylor correlaciona o coeficiente de permeabilidade com o índice de vazios do solo, Quanto mais poroso o solo, mais permeável ele é, o índice de vazios ou porosidade de um solo, apresenta uma influência substancial na condutividade hidráulica. Segundo MARSAL & RESÉNDIZ (1973) a variação de  $k$  com o índice de vazios pode se expressa empiricamente por meio da equação:

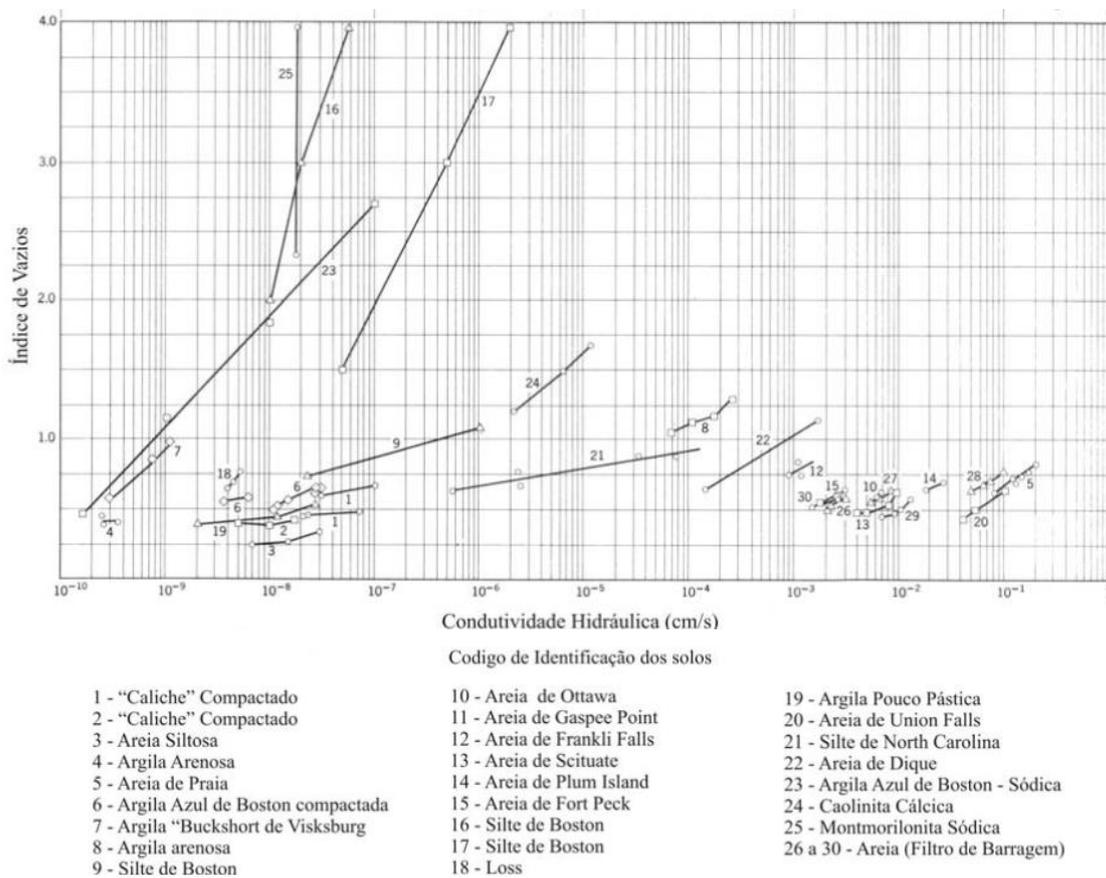
$$k = k' (e - e_0)^2 \quad (2.10)$$

Onde  $k'$  e  $e_0$  são características do solo. Para solos não plásticos (areias e pedregulhos limpos)  $e_0 = 0$ , e para siltes e argilas  $e_0$  varia entre 0,1 e 0,3.

Segundo SANTOS (2004) um acréscimo no valor do índice de vazios conduz a um acréscimo na porcentagem da área da seção transversal para o escoamento, que por sua vez resulta em um aumento no valor da condutividade hidráulica. Além disto, estes valores podem expressar a densidade de um solo em função do tamanho das partículas e do arranjo estrutural em consequência de um processo de densificação. Assim, quanto

mais denso o solo, menor é seu índice de vazios e menor será sua condutividade hidráulica.

Para LAMBE & WHITMAN (1981) quanto maiores forem os canais para um determinado volume de vazios, maior será a permeabilidade. Os solos com estrutura interna “floculada” apresentam grandes canais disponíveis para o fluxo. A percolação através de um canal grande é maior que através de vários canais pequenos, de mesma seção total. LAMBE & WHITMAN (1969) apresentam uma relação da condutividade hidráulica e índice de vazios para alguns tipos de solos (Figura 2.16).



**Figura 2.16.** Variação da condutividade hidráulica com a modificação de índice de vazios para alguns solos, modificado de LAMBE AND WHITMAN (1969)

### 2.8.2 Temperatura

Quanto maior for a temperatura, menor a viscosidade da água e, portanto, mais facilmente ela escoá pelos vazios do solo com correspondente aumento do coeficiente

de permeabilidade. Logo,  $k$  é inversamente proporcional à viscosidade da água. Por isso, os valores de  $k$  são sempre relacionados à temperatura de 20°C.

$$k_{20} = k_T * \frac{\eta_T}{\eta_{20}} = k_T * C_v \quad (2.11)$$

Onde:

$k_T$ : o valor de  $k$  para a temperatura do ensaio;

$\eta_{20}$ : é a viscosidade da água a temperatura de 20°C;

$\eta_T$ : é a viscosidade a temperatura do ensaio;

$C_v$ : relação entre as viscosidades

### 2.8.3 Estrutura de solo:

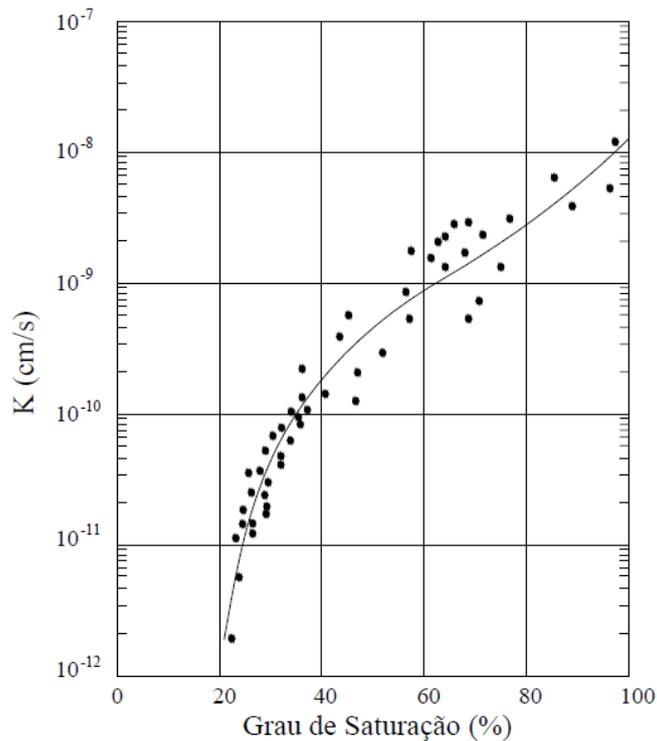
A heterogeneidade e a anisotropia ocorrida em grandes massas de solos em estado natural exercem uma grande influência no valor da condutividade hidráulica. Estas propriedades podem resultar na presença de estratificações e laminações. As estratificações e laminações tendem a orientar o fluxo de água no subsolo, caracterizando-se pela elevação do valor da condutividade hidráulica na direção perpendicular a estratificação, tornando-a superior à condutividade hidráulica na direção paralela a estratificação. Para solos arenosos estas propriedades tendem a apresentar como resultado uma relação de variação da condutividade hidráulica pouco significativa. Já para argilas esta relação entre a condutividade hidráulica horizontal e vertical pode alcançar até a ordem de 100 vezes tornando difícil sua avaliação em grandes massas de solo (SANTOS 2004).

### 2.8.4 Grau de saturação

O coeficiente de permeabilidade de um solo não saturado é menor do que o que ele apresentaria se estivesse totalmente saturado. Essa diferença não pode, entretanto ser atribuída exclusivamente ao menor índice de vazios disponível, pois as bolhas de ar existentes, contidas pela tensão superficial da água, são um obstáculo para o fluxo.

Para SANTOS (2004) a perda de saturação gera um acúmulo de ar nos poros. Esta concentração de ar nos vazios do solo gera um aumento na sucção mátrica, conduzindo

a uma subsequente redução nos caminhos preferenciais de fluxo reduzindo o valor da condutividade hidráulica do solo. OLSON & DANIEL, como pode ser observado na Figura 2.17, concluíram que para uma argila compactada o incremento da condutividade hidráulica depende diretamente do aumento do grau de saturação do solo ()



**Figura 2.17.** Condutividade hidráulica versus grau de saturação para uma argila compactada, OLSON & DANIEL 1994, tomado de ALONSO 2005

### 2.8.5 Composição mineralógica:

Os solos são materiais formados a partir de processos erosivos e do intemperismo das rochas. As características químicas e mineralógicas das partículas dos solos irão depender da composição da rocha matriz e do clima da região. Estas propriedades, por sua vez, irão influenciar o comportamento mecânico e hidráulico do solo. Assim, pode-se dizer que para solos conformados por elementos argilosos ou argilo-minerais a condutividade hidráulica tende a ser menor devido fatores como a capacidade de troca catiônica e maior área de superfície específica.

## 2.9 SISTEMAS DE DRENAGEM INTERNA DE BARRAGENS

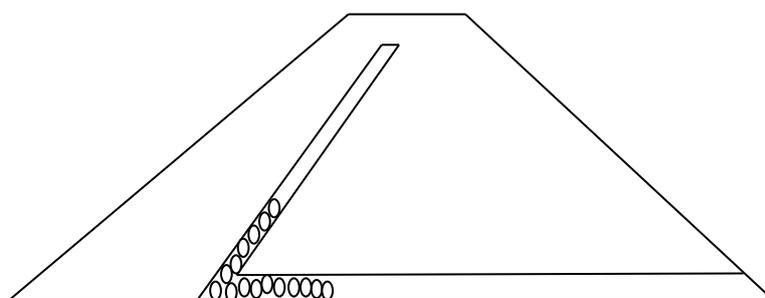
No projeto de drenagem interna das barragens de terra, diferentes elementos devem ser projetados no sentido de garantir o bom funcionamento e estabilidade do maciço.

Ressalta-se ainda que no projeto destes sistemas de drenagem alguns cuidados como a capacidade e eficiência de drenagem, devem ser tomados para garantir a segurança das obras. Com relação a esses sistemas, ASSIS (2003) destaca os filtros tipo chaminé, os drenos horizontais.

### 2.9.1 Filtros chaminé (vertical ou inclinados)

A função fundamental desses filtros é evitar que o material seja carregado de montante para jusante. DE MELLO (1977), demonstrou que a adoção de um filtro inclinado apresenta vantagens significativas sobre o dreno vertical, pois proporciona menor risco de uma ruptura do talude de jusante na fase de operação. Como exemplo de adoção deste tipo de estrutura de drenagem pode se citar as barragens de Salto Santiago, Emborcação e Tucuruí. Este autor, ainda indica o posicionamento do filtro inclinado para montante, pois este tipo de configuração proporciona menor risco de uma ruptura do talude de jusante na fase de operação (Figura 2.18). A adoção do dreno inclinado para montante gera um maior peso na porção jusante e tende a melhorar as suas condições de estabilidade.

Pode se considerar ainda que esses filtros têm função “cicatrizante”, no caso da ocorrência de uma trinca no maciço perto da zona de filtro em que os materiais finos do filtro tende a migrar para dentro da fratura ocasionando uma condição de selante e evitando o desenvolvimento e a propagação da mesma. Desta forma podem ser projetados com largura mínima construtiva uma vez que, normalmente, sua capacidade de vazão é grande em relação à vazão de percolação através do maciço compactado. Atualmente o emprego de formas deslizantes para construção destes filtros tem proporcionado a obtenção de larguras de 0,80 m (ASSIS 2003)

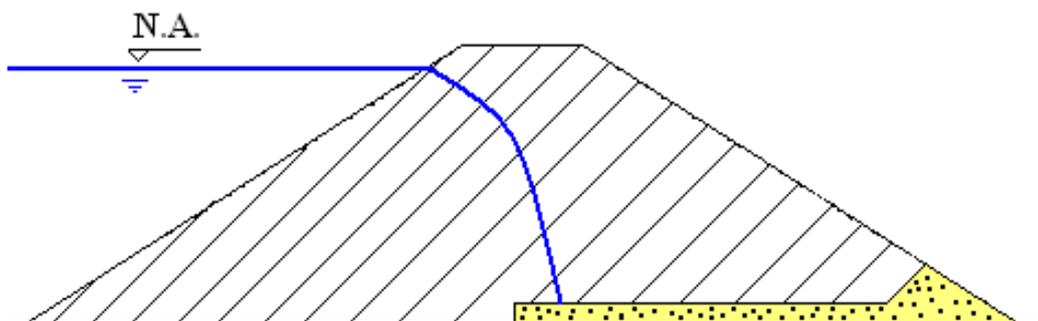


**Figura 2.18.** Seção com filtro inclinado e horizontal

### 2.9.2 Filtros horizontais (tapetes drenantes)

Os drenos horizontais (Figura 2.19) têm a função de dar vazão à água que percola pelo maciço da barragem além de controlar o fluxo da água através da fundação. Por esta razão, os drenos horizontais devem ser contínuos e revestir toda área da fundação, leito do rio e ombreiras, até pelo menos o nível freático do reservatório. Neste tipo de filtros, a gradiente deve ser baixa e para que as pressões piezométricas sejam “nulas”. Assim, é necessário que a permeabilidade do dreno seja suficientemente elevada para proporcionar uma vazão de fluxo sob gradientes muito baixos (CRUZ 1996).

Algumas alternativas para construção da drenagem horizontal têm sido a execução de “filtros-sanduíche” (areia e brita), a vantagem deste procedimento é proporcionar maior capacidade drenante e diminuição nas espessuras do filtro e, por conseguinte do seu volume. Como exemplo da adoção deste tipo de filtros pode-se citar as barragens de Água Vermelha, Rosana, Itumbiara e Três Irmãos (ASSIS 2003)



**Figura 2.19.** Seção com filtro horizontal e enrocamento de pé; tomado de Assis 2003

### 2.9.3 Poços de alívio

Quando as fundações permeáveis são cobertas por uma camada impermeável de espessura que se torna tecnicamente desaconselhável o uso de valas drenantes, recomenda-se a construção de poços de alívio. HRADILEK (2002) cita algumas indicações básicas para a construção destes poços. Segundo este autor os poços devem atravessar a camada impermeável, atingindo a zona permeável, até uma profundidade que não se atinja a condição de levitação (“uplift”), isto é, a gradiente hidráulico deve ser inferior ao gradiente hidráulico crítico, sendo geralmente satisfatória uma profundidade do poço igual à profundidade do reservatório. Acrescenta ainda que o espaçamento entre poços deve ser tal que intercepte a descarga freática, possibilitando a

sua completa drenagem e, conseqüentemente, aliviando as sub-pressões. De uma maneira geral é recomendável um espaçamento inicial de 15 a 30m.

Finalmente, HRADILEK (2002) recomenda que os poços devam oferecer resistência mínima à descarga freática em que o diâmetro interno mínimo do poço deva ser igual a 0,15m. Desta forma, pode-se assegurar pequenas perdas de cargas na coleta da descarga freática pelo poço. Além disso, durante a construção, não devem ser utilizados materiais do filtro para o preenchimento total dos poços, pois este procedimento tende a diminuir substancialmente a capacidade de vazão

#### *2.9.4 Drenos de pé*

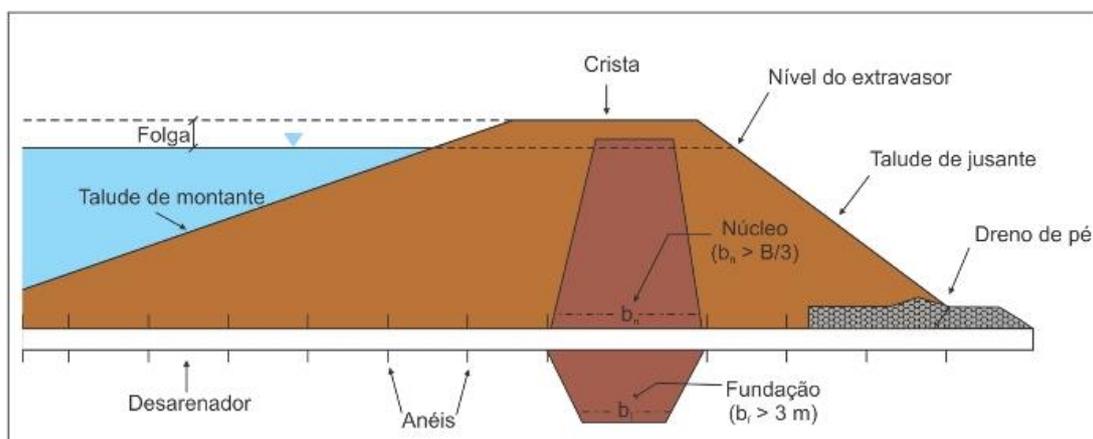
Juntamente com os tapetes drenantes, os drenos de pé desempenham o papel de coletores das águas freáticas, conduzindo-as ao leito do rio (Figura 2.20). Para os sistemas de condução de água deverão ser utilizadas tubulações furadas, com diâmetro interno mínimo de 0,15m. Este dimensionamento deve ser realizado em acordo com a área a ser drenada. De uma maneira geral, os drenos aumentam progressivamente de seção até o coletor de condução das águas ou até o leito do rio. O dreno deverá ser instalado numa vala de profundidade mínima de 1m, preenchido com material filtrante para evitar o carregamento dos materiais do maciço e/ou da fundação. Uma possível alternativa para os drenos de pé, especialmente nos casos de barragens homogêneas, é o enrocamento de pé, protegido com camadas de filtros. (HRADILEK 2002)

#### *2.9.5 Filtros de geotêxtil*

O geotêxtil apresenta múltiplas aplicações na engenharia, mas quando usado em filtração e drenagem deve atender os critérios de permeabilidade e impedir a passagem de partículas de solo através dele. GARDONI (1995) descreve o filtro de geotêxtil como um catalisador que provoca a formação de um filtro natural no solo, na zona próxima ao geotêxtil, onde as partículas finas migram através do solo e atravessam o geotêxtil. Com o bloqueio das aberturas por causa das partículas retidas o filtro vai se formando a partir do geotêxtil.

GARDONI (1995) aponta dois requisitos básicos que devem ser analisados para que o filtro de geotêxtil tenha um ótimo desempenho: o primeiro está relacionado ao período

de instabilidade que ocorre durante a formação do filtro natural no solo adjacente ao geotêxtil, em que a permeabilidade do sistema deve permanecer constante com o tempo e após este período inicial de ocorrência de piping no solo, devido à formação do filtro natural, o solo não deve mais se movimentar através do sistema de filtro.



**Figura 2.20.** Detalhe da localização do dreno de pé em uma barragem de terra, fonte: *atlasdasaguas.ufv.br*, acesso 27/05/2012

GARDONI (1995) apresentou no seu trabalho os diferentes critérios de retenção para filtros de geotêxtil, os quais foram estudados por outros autores e centros de pesquisas como o U.S Corps of Engineers, Federal Highway Administration (FHWA), Universidade de Grenoble e Escola Politécnica de Montreal, GIROUD (1982 e 1988), etc. Os critérios de retenção para filtros de geotêxtil adotados por GIROUD (1994) são apresentados na Tabela 2.3.

PALMEIRA e GARDONI (2000), citado por BEIRIGO (2005), agregaram alguns dos critérios de projeto existente para o uso de geotêxtil não tecidos em dispositivos de filtração e drenagem. Estes critérios, em sua maioria, são pautados em relações empíricas comparando as dimensões típicas de grãos do solo adjacente ao filtro com abertura de filtração do geotêxtil.

$$O_{95} = X \cdot d_j \quad (2.13)$$

Onde:

$O_{95}$  = abertura de filtração do geotêxtil (mm);

$d_j$  = diâmetro característico do solo adjacente ao filtro (mm)

$X$  = critério de correlação do critério de projeto.

**Tabela 2.3.** Critério de retenção para filtros de geotêxtil (modificado - GIROUD, 1994, citado por GARDONI, 1995)

Solos	Densidade Relativa	$1 < C_u < 3$	$C_u > 3$
Solo estado fofo	<35%	$O_{95} < [C_u]^{0,3} * d_{85}$	$O_{95} < \frac{9}{[C_u]^{1,7}} * d_{85}$
Solo estado meio denso	35-60%	$O_{95} < 1,5[C_u]^{0,3} * d_{85}$	$O_{95} < \frac{13,5}{[C_u]^{1,7}} * d_{85}$
Solo estado denso	>65%	$O_{95} < 2[C_u]^{0,3} * d_{85}$	$O_{95} < \frac{18}{[C_u]^{1,7}} * d_{85}$

Nota:  $O_{95}$  = tamanho de abertura do geotêxtil,  $d_{85}$  = tamanho da partícula de solo,  $C_u = d_{60}/d_{10}$

Para os ensaios de filtragem com geotêxtil, VIDAL (1991) mostrou que o uso de “pó de pedra” (granulometria de silte) e geotêxtil, favoreceu a estabilização da passagem dos finos após poucas horas na condição de fluxo descendente. Já na condição de fluxo ascendente, o processo tendeu a continuar por vários dias, não havendo estabilização. No ensaio foi utilizado o geotêxtil OP-20, (não – tecido agulhado de filamentos de poliéster), com abertura de filtração 170  $\mu\text{m}$ , obtida pelo método hidromecânico. “O pó de pedra” utilizado tinha  $d_{90} = 43\mu\text{m}$ ,  $d_{50} = 19\mu\text{m}$  e  $d_{10} = 8\mu\text{m}$ .

## 2.10 COLMATAÇÃO NOS FILTROS DE BARRAGENS

A colmatação dos filtros de barragens corresponde a uma das incertezas nos projetos convencionais de filtros e de drenos, por isso adotam-se fatores de segurança em relação à vazão que variam de 10 a 100. O estudo da colmatação química dos filtros vem sendo realizado no Brasil somente a partir dos últimos 20 anos. Trata-se de um processo cujos mecanismos geoquímicos apresentam estrita relação com os processos de laterização, típicos de regiões equatoriais tropicais e subtropicais.

A obstrução de sistemas de drenagem de barragens ocorre devido à precipitação de ferro transportado na forma de íon pelas águas percolantes, que passando de um meio redutor para outro oxidante, perde sua solubilidade e precipita-se na forma de óxido ou hidróxido. O acúmulo desses compostos estáveis, que evolui ao longo do tempo, tende a preencher os vazios dos filtros e drenos de uma barragem diminuindo sua permeabilidade, alterando suas características originais e provocando um aumento das sub-pressões com a consequente redução da estabilidade dos taludes de jusante da barragem (NOGUEIRA 1986).

Para a determinação da susceptibilidade à colmatção em filtros de barragens NOGUEIRA (1986) propôs uma metodologia para a investigação da colmatção. Esta metodologia depende fundamentalmente se a barragem se encontra em operação ou na fase de projeto, e desta forma as medidas adotadas são de caráter corretivo ou preventivo respectivamente.

A proposta apresentada por NOGUEIRA (1986) baseia-se em uma metodologia preventiva e considera o caso de barragens que se encontram em fase de projeto. Neste tipo de abordagem, os estudos devem, portanto, dividir-se em três etapas:

*Caracterização ambiental:* Consiste na realização da análise químicas, mineralógicas e biológicas sobre os solos, rochas e águas da região.

*Ensaio de campo:* estes ensaios são de vital importância para o estudo da colmatção e sua realização fornece informações sobre a influência das águas provenientes da fundação. Os ensaios devem ser realizados em trincheiras de dimensões tais que permitam a construção de filtros e drenos na mesma proporção e com os mesmos materiais que serão adotados na construção da barragem. O acompanhamento com amostragens periódicas na região de oscilação do nível freático dentro do filtro permite a observação da evolução do fenômeno de colmatção. Sobre as amostras coletadas e a água que percola pelo material granular devem ser realizadas também as análises químicas, mineralógicas e biológicas.

*Ensaio de laboratório:* Deve ser realizada uma análise química completa das águas do reservatório, do solo utilizado para a construção do maciço da terra da barragem, dos

materiais da fundação e da água e compostos de ferro do sistema drenante. Deve-se analisar as concentrações de  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$ , óxidos, sulfatos, nitratos, carbonatos, cátions, sílica, alumínio, sódios em suspensão e elementos traço. Para os materiais da fundação devem ser medidos os valores de pH e Eh. Adicionalmente, deve ser realizada a análise mineralógica dos materiais da fundação, do material utilizado para a fundação, do material utilizado para a construção do maciço da barragem e dos precipitados de ferro, incluindo difratometria de Raio X, análise térmica diferencial e Microscopia Eletrônica de Varredura para a identificação dos minerais de argila e de ferro. As análises e ensaios anteriores têm como finalidade verificar se os elementos de ferro se encontram em estado de suspensão, solução ou em estado de precipitação, e assim avaliar a susceptibilidade à colmatção dos materiais que compõem o filtro.

## 2.11 DIMENSIONAMENTO DOS FILTROS

Segundo ELETROBRÁS (2003) para barragens de terra de seções homogêneas, o sistema de drenagem interna deverá ser constituído por filtros verticais ou inclinados e sub-horizontais conjugados, além de drenos de pé. O filtro vertical ou inclinado deverá ter seu topo na cota correspondente ao nível d'água máximo do reservatório. Alguns casos excepcionais, envolvendo sistemas favoráveis de solicitação e/ou de menor risco, como por exemplo, barragens de pequeno porte, poderão dispensar os filtros vertical e/ou sub-horizontal contínuos podendo ser substituídos por um sistema de drenos de pé e de fundação. Ressalta-se, entretanto a importância dos filtros verticais nos diques de selas, mesmo que de pequena altura.

No caso de barragens de seção mista, o sistema de drenagem interna será constituído por camadas filtrantes e o espaldar de enrocamento de jusante. Os sistemas de drenagem na fundação consistirão, onde pertinente, de trincheiras drenantes e poços de alívio espaçados regularmente a jusante, além do próprio filtro ou dreno sub-horizontal do maciço, com o objetivo de controlar gradientes hidráulicos de saída na parte jusante da barragem e de reduzir as sub-pressões.

A espessura e distribuição das camadas drenantes deverão ser verificadas para a vazão obtida nas análises de percolação considerando um coeficiente de segurança de no mínimo 10. A segurança adicional poderá ser introduzida também por meio da

majoração dos valores dos parâmetros de permeabilidade dos extratos de fundação associada à minoração dos valores de permeabilidade dos materiais drenantes.

Para o caso do filtro/dreno sub-horizontal em contato com a fundação a vazão a ser considerada incluirá a contribuição dos fluxos pelo maciço e pela fundação. Segundo ELETROBRÁS (2003), por razões construtivas, os seguintes valores podem ser considerados como mínimos para os dispositivos de drenagem:

- filtro vertical ou inclinado: espessura de 0,60m
- filtro sub-horizontal: espessura de 0,25m
- trincheira drenante de fundação: largura 0,60m
- poços de alívio: diâmetro de 0,10m

Para as transições a jusante de núcleo:

- largura de 0,60m
- transições em drenos de pé: largura de 0,40m

O dimensionamento hidráulico do filtro sub-horizontal será efetuado aplicando-se diretamente a lei de Darcy, ou considerando a teoria de Dupuit (1966). Poderá também ser utilizado *softwares* com base no Método dos Elementos Finitos (MEF) incorporando o próprio filtro nas análises de percolação.

$$Q = \frac{K \cdot h^2}{2L} \quad (2.14)$$

Onde:

$K$ : Permeabilidade do filtro;

$h$ : Altura da linha de saturação no limite montante do filtro-dreno é igual á espessura do filtro

$L$ : Comprimento do filtro

$Q$ : vazão total pelo maciço e fundação

É importante ressaltar que três hipóteses estão envolvidas nesta equação: a área drenante tende à zero na saída do dreno; a linha de saturação não se eleva acima da superfície

superior do tapete e o fluxo d'água (vazão total do maciço e da fundação) penetra inteiramente através do limite de montante do tapete.

Em qualquer condição a posição da linha de saturação do filtro sub-horizontal terá influência nas análises de estabilidade do talude de jusante. Caso necessário poderão ser utilizados filtros horizontais de camadas múltiplas (filtro “sanduíche”) de materiais de diferentes granulometrias e devidamente dimensionados. No dimensionamento final, as espessuras requeridas pela capacidade drenante serão adicionadas espessuras que serão consideradas contamináveis pelo material de base (material a ser protegido)

## 2.12 FILTROS DE BARRAGENS, CRITÉRIOS DE PROJETO

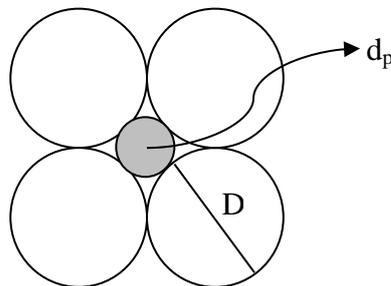
Até o começo do século XX eram desconhecidas as causas da erosão interna, ainda que fossem frequentes as rupturas por ela ocasionadas. Uma das primeiras tentativas de análise de casos de erosão interna resultou em uma série de regras baseadas na admissão de que a única causa deste fenômeno era devida a erosão que ocorria ao longo da superfície de contato entre a base da barragem e a fundação (ESTEVES 1964).

Assim, o material constituinte do filtro deve ser suficientemente fino para que evite o carregamento de partículas do solo através dele e por outro lado, deve ter granulometria grossa para que as forças de percolação desenvolvidas no seu interior sejam pequenas. Desta forma, têm sido estabelecidos vários critérios de projeto de filtro para atender aos seus requisitos. O que se observa, entretanto, que os materiais para filtro devem satisfazer os critérios aparentemente antagônicos. Por um lado evitar a erosão interna (“*piping*”) em que os vazios dos filtros devem ser suficientemente pequenos para impedir que partículas do solo, que se deseja proteger, migrem através dos filtros e por outro lado à permeabilidade onde os vazios dos filtros devem ser suficientemente grandes para permitirem a passagem livre do fluxo e, desta forma, possibilitar o controle de sub-pressões.

O dimensionamento das partículas dos materiais que compõem o filtro é de extrema importância para as análises de filtragem, partindo, efetivamente, do princípio que um filtro é concebido como um meio poroso capaz de reter partículas em suspensão que estão sendo transportadas pela água que precisa passar pelo filtro (CRUZ 1996). Neste

sentido, para partículas do filtro esféricas e do mesmo tamanho, o diâmetro dos vazios tende a variar conforme o arranjo das partículas (WITTMAN 1979). A Figura 2.21 apresenta a formação de um vazio gerado pela disposição de 4 e 3 esferas

O mecanismo de filtragem é, porém mais complexo do que a análise de vazios apresentada por WITTMAN (1979) e envolve: A mobilidade das partículas argilosas; a tortuosidade e variação na dimensão dos vazios nas areias dos filtros; a colmatação progressiva dos vazios do filtro, pelas maiores partículas ou grumos do solo; e a formação de um pré-filtro no solo.

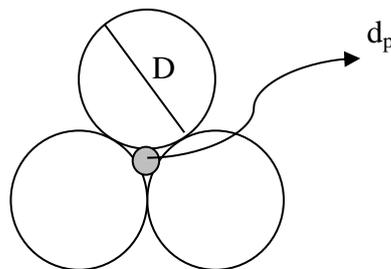


$$d_p = (\sqrt{2} - 1) \times D = 0,4142D$$

$$D/d_p = 2,414$$

$$n = 0,4764$$

a) Solto



$$d_p = (2/3\sqrt{2} - 1) \times D = 0,1547D$$

$$D/d_p = 6,464$$

$$n = 0,25595$$

b) Denso

**Figura 2.21.**Arranjo de esferas a) arranjo fofo; b) arranjo compacto (WITTMAN 1979, citado por CRUZ 1996)

ATTERBERG (1908) citado por GARDONI (1995) relaciona, para sistemas adensados, o tamanho das partículas esféricas do filtro com o diâmetro dos vazios, por meio da seguinte equação:

$$p_{av} = 0,2 * D_{10} \quad (2.12)$$

Onde:

$p_{av}$  é a medida do tamanho dos poros do material granular e  $D_{10}$  é o diâmetro da partícula do solo correspondendo a 10% em peso tem diâmetro menor.

WITTMAN (1980) citado por GARDONI (1995), utilizando um modelo estatístico de partículas esféricas com granulometrias e densidades diferentes, estabeleceu uma equação empírica para avaliação do diâmetro dos poros

$$p_{av} = 0,455 * e * D_{17} * [U]^{\frac{1}{6}} \quad (2.13)$$

Onde:

$e$ = índice de vazios do solo

$D_{17}$ = diâmetro das partículas correspondentes a 17% passante

$U$ = coeficiente de uniformidade do solo

### 2.12.1 Critérios para projeto de filtros em barragens usando materiais granulares:

Os estudos de TERZAGHI (1922) sobre o comportamento de filtros em barragens permitiram o estabelecimento de certas relações, onde são consideradas as relações granulométricas entre o material da base, o material circundante do filtro (maciço, fundações, transições, etc.) e o material do filtro e garantindo assim segurança para efeitos dos critérios de filtro dos materiais granulares.

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} < 4 \quad \text{"piping"} \quad (2.14)$$

$$\frac{D_{15}}{d_{15}} > 4 \quad \text{Permeabilidade} \quad (2.15)$$

Onde:  $D_n$ =diâmetro do filtro em que n% em peso tem diâmetro menor,  
 $d_n$ = diâmetro do material a ser protegido, em que n% em peso tem diâmetro menor.

Com resultados de análises realizadas com areia de Ottawa e quartzo moído, BERTRAM (1940) passou a fixar em 5 a relação entre os diâmetros do filtro e do material a ser protegido e o critério de filtro proposto por este autor evoluiu para:

$$\frac{D_{15}}{d_{15}} < 5 \quad \text{“piping“} \quad (2.19)$$

$$\frac{D_{15}}{d_{15}} > 5 \quad \text{permeabilidade} \quad (2.16)$$

ESTEVES (1964) considera que o filtro não deve conter mais do que 5% de material mais fino que 0,074 mm (# 200);que a curva granulométrica do material do filtro deve ser aproximadamente paralela à do material a ser protegido e a máxima dimensão das partículas deve ser de 3"

GARDONI (1995) descreve os critérios de filtros de barragens relacionado ao USBR (United States Bureau of Reclamation), os quais podem ser utilizada para diferentes tamanhos de partículas

$$5 < \frac{D_{50}}{d_{50}} < 10 \quad (2.17)$$

Para solos bem graduados, partículas arredondadas do material fino:

$$12 < \frac{D_{50}}{d_{50}} < 58 \quad (2.18)$$

$$12 < \frac{D_{50}}{d_{50}} < 40 \quad (2.19)$$

Para solos bem graduados, partículas angulares do material fino:

$$9 < \frac{D_{50}}{d_{50}} < 30 \quad (2.20)$$

$$6 < \frac{D_{50}}{d_{50}} < 18 \quad (2.21)$$

Os materiais de filtro e transição, quando usados como elementos drenantes, deverão ter permeabilidade compatível com a sua utilização e apresentar percentagem de finos não coesivos passando na peneira 200 inferior a 5%. Além disso, esses materiais deverão, segundo critério sugerido pela ELETROBRÁS (2004) atender também o critério.

$$\frac{D_{15}}{d_{15}} \geq 5 \quad (2.22)$$

Para os materiais nas zonas da transição e de textura argilosa (percentagem que passa na peneira 200 superior a 30%) e filtros formados por materiais arenosos deverão atender aos critérios abaixo:

- Caso de transição entre núcleo de barragem de enrocamento e espaldares:

$$\frac{D_{15}}{d_{15}} \leq 5 \quad (2.23)$$

- Caso de transições situadas em estruturas em posições de baixos gradientes de percolação, entre o núcleo e o espaldar de montante e entre o enrocamento de proteção e o espaldar de montante, poderão aceitar como critério:

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} \leq 9 \quad (2.24)$$

- Para transição entre solos granulares deverá ser atendido o critério:

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} \leq 5 \quad (2.29)$$

Para o USWES (United States Waterways Experiment Station), os critérios de filtros são descritos pelas seguintes equações, GARDONI (1995):

Considerando o efeito de *piping*:

$$D_{15} < 5 * d_{85} \quad (2.25)$$

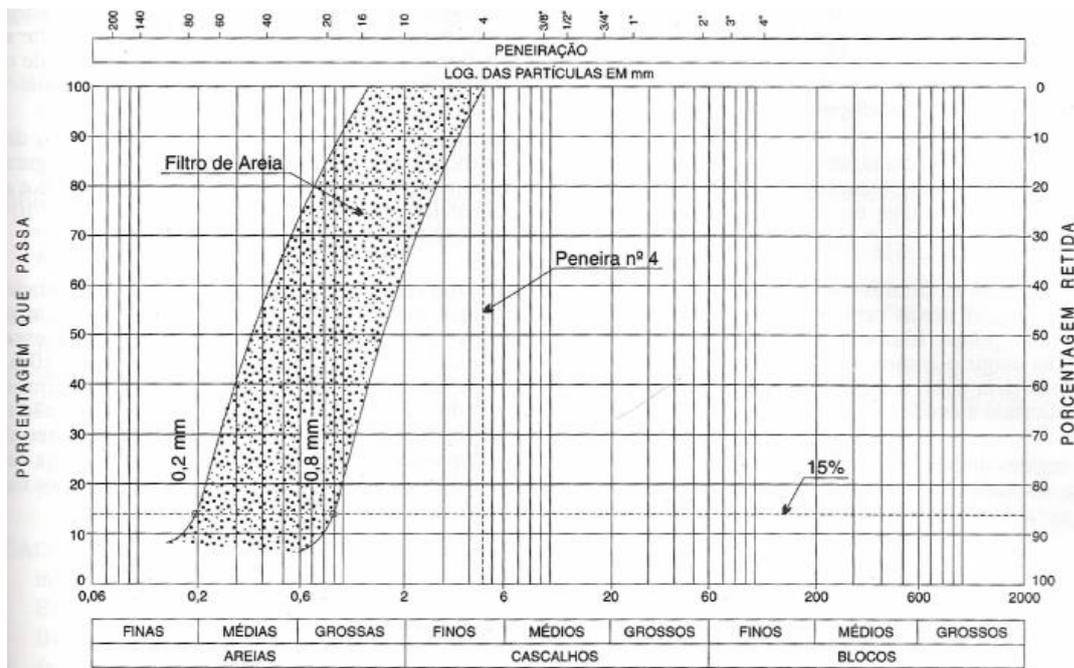
Para a análise da condição de permeabilidade:

$$D_{15} > 5 * d_{15} \quad (2.31)$$

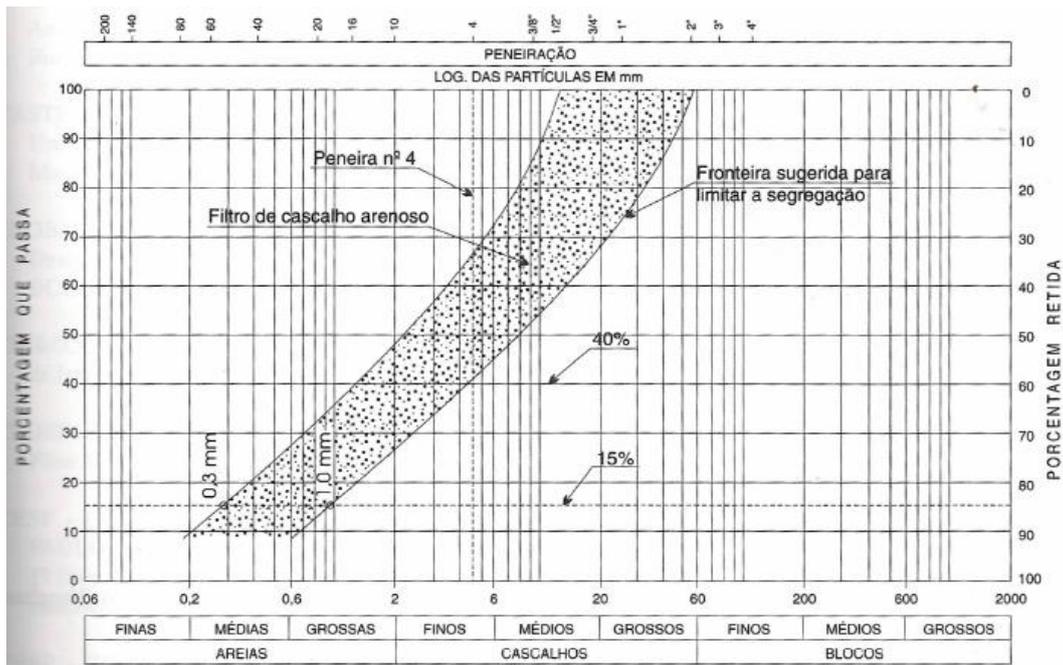
Em relação a uniformidade do material:

$$D_{50} < 25 * d_{50} \tag{2.32}$$

SHERARD (1984) considera que o critério para filtros empregando materiais grossos compostos por partículas angulares é tão satisfatório como os de partículas aluviais arredondadas, não sendo necessário apresentar uma forma semelhante da distribuição de tamanho das partículas do material a ser protegido. Neste sentido, o trabalho de SHERARD (1984-b) relacionado ao projeto da Usina Hidrelétrica de Canoas apresenta as curvas granulométricas de areias e pedregulhos que atendem a condição de filtragem de solos coluvionares arenosos finos e solos residuais de rochas metamórficas presentes no local. Essas curvas são apresentadas na Figura 2.22.



a) Areias



b) Cascalhos.

**Figura 2.22.** Faixas granulométricas de areias e cascalhos (SHERARD 1984-b)

Segundo LAMBE & WHITMAN (1979) o tamanho médio das partículas tem pouca influência na resistência de solos granulares quando são mantidas as outras características, isto é mesmos minerais e curvas granulométricas paralelas, ou seja, mesmo coeficiente de uniformidade. Como por exemplo, o maior entrosamento inicial nas areias com grãos mais grossos é compensado por um maior grau de ruptura e fraturamento destas partículas, devido à presença de maiores pressões de contato.

Neste sentido, a resistência dos solos granulares também é afetada quando os grãos que compõem um solo apresentam diversas formas. OLIVEIRA FILHO (1987) citado por PRESOTTI (2002) separou essas formas em três aspectos: a esfericidade (relação média entre a maior e a menor dimensão), o arredondamento (forma dos cantos) e a rugosidade da superfície. O autor afirmou que as areias constituídas por grãos arredondados apresentam ângulos de atrito sensivelmente menores do que as areias de grãos angulares e ou muito alongados. Isto ocorre em função do atrito entre as partículas em consequência de uma rugosidade superficial menor, ou seja, partículas com menores rugosidades superficiais têm um reduzido o valor de ângulo de atrito global.

No caso do fenômeno do *piping*, o principal problema é quando se obtém uma trinca ou uma perda da ligação entre duas camadas de solo devido a uma deficiência na

compactação. Neste caso, HUMES (1985) concluiu que o *piping* tende a ser regido pela estatística dos extremos, isto é às características de resistência a tração ou coesão do solo, que condicionaria a ocorrência ou não do fenômeno, não a que é determinada por meio de ensaios onde as amostras são homogêneas, bem compactadas, etc. A superfície de contato entre o material de base e filtro nos ensaios é muito irregular ocasionando que, próximo ao filtro, o material coesivo não sofre uma compactação adequada e apresenta-se mais desagregado e mais suscetível ao *piping*.

CRUZ (1996) considera que com o passar do tempo, os critério de filtro incorporaram alguns requisitos adicionais, como certo paralelismo entre a granulometria do filtro e do material base, e a exigência de que a porcentagem de finos fosse inferior a 5% (partículas menores que 0,074 mm ).

CRUZ (1996) nos critérios de projeto sugere que, no dimensionamento de filtro usando materiais de brita ou cascalhos, devem-se adotar as relações descritas pelas seguintes equações:

$$8,5 \leq \frac{d_{15}}{D_{85}} \leq 4 \quad (2.26)$$

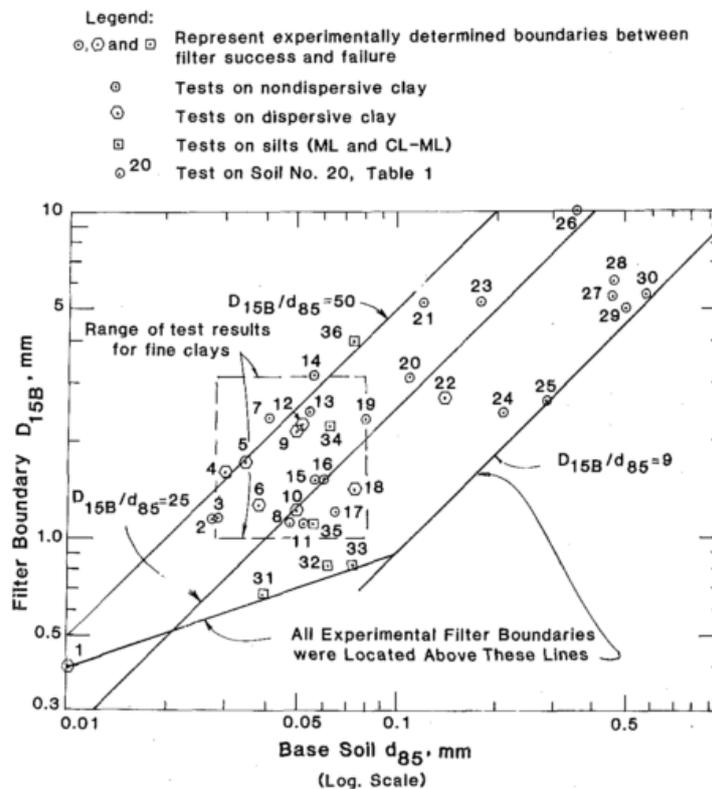
$$6,5 \leq \frac{d_{15}}{D_{85}} \leq 11,5 \quad (2.27)$$

O caso de não poder atender os critérios acima, a solução proposta é atender os critérios de filtros apresentados anteriormente, os critérios propostos pelo Bertram, Attemberg, Sherard, Electrobrás, USBR, etc para o dimensionamento dos materiais granulares.

### 2.12.2 Critérios para projeto de filtros de barragens usando materiais finos

No caso dos materiais finos, também considerados como elementos apropriados para serem usados em filtros de barragens devido ao fato de que as partículas finas podem bloquear partículas provenientes do material da base. Neste sentido, o material é avaliado por meio de ensaios de permeabilidade e também são estendidos os critérios de filtros de materiais mais grossos para estes materiais.

Considerando a aplicabilidade dos critérios de filtro aos solos coesivos, SHERARD (1984-a) analisou os resultados de 197 ensaios de filtragem, envolvendo 36 diferentes solos-base. Estes materiais correspondiam a argilas de alta plasticidade, argilas dispersivas e siltes praticamente sem coesão, todos procedentes de várias regiões dos Estados Unidos. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é mostrada a relação entre  $d_{85}$  do solo-base e  $D_{15}$  do filtro. Como pode ser observado quase todos os pontos encontram-se dentro da faixa de variação de  $D_{15}/d_{85}$ , entre 9 a 50.



**Figura 2.23.** Relação entre  $d_{85}$  do solo-base e  $D_{15}$  do filtro, (SHERARD 1984)

VAUGHAN & SOARES (1982) realizaram ensaios granulométricos para obter critérios de filtro da fração fina (diâmetros menores que a peneira 100) dos solos argilosos utilizados em núcleos de barragens. Estes autores reuniram também dados de ensaios em partículas de quartzo (material inerte). A Tabela 2.4 reproduz os resultados dos ensaios a partir de curvas e índices granulométricos, como também a relação do diâmetro de material da base e o material do filtro. O solo foi submetido a um processo de dispersão mecânica, sendo mais finos que os solos empregados na maioria dos ensaios realizados por SHERARD (1984). Os autores sugerem também um critério de

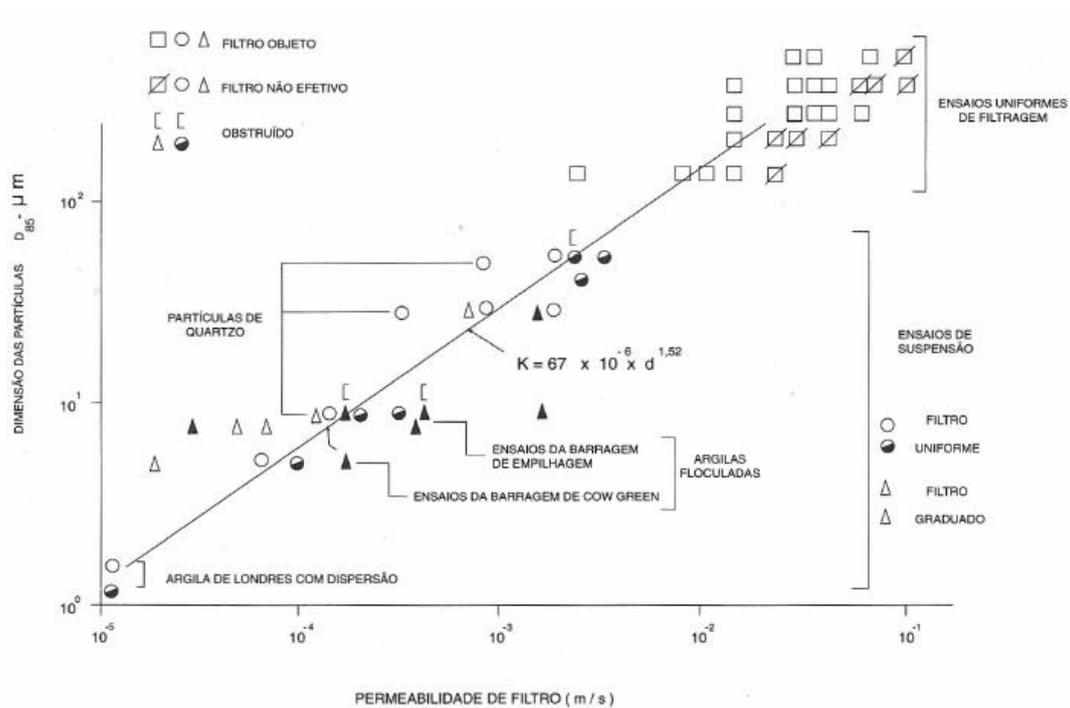
permeabilidade para a escolha do filtro. A Figura 2.24 mostra a relação entre  $d_{85}$  do solo floculado e a permeabilidade obtida para o filtro:

$$k = 6,7 \cdot 10^{-6} d_{85}^{1,52} \quad (2.35)$$

sendo:

$k$  em m/s e  $d_{85}$  em micra;

Mas a equação anterior apresenta limitações requerendo que o solo deva sempre ser tratado com uma solução defloculante para que não ultrapasse 0,10 mm.



**Figura 2.24.** Dimensão de partículas passantes ou retidas por um filtro vs. permeabilidade do filtro (VAUGHAN & SOARES, 1982).

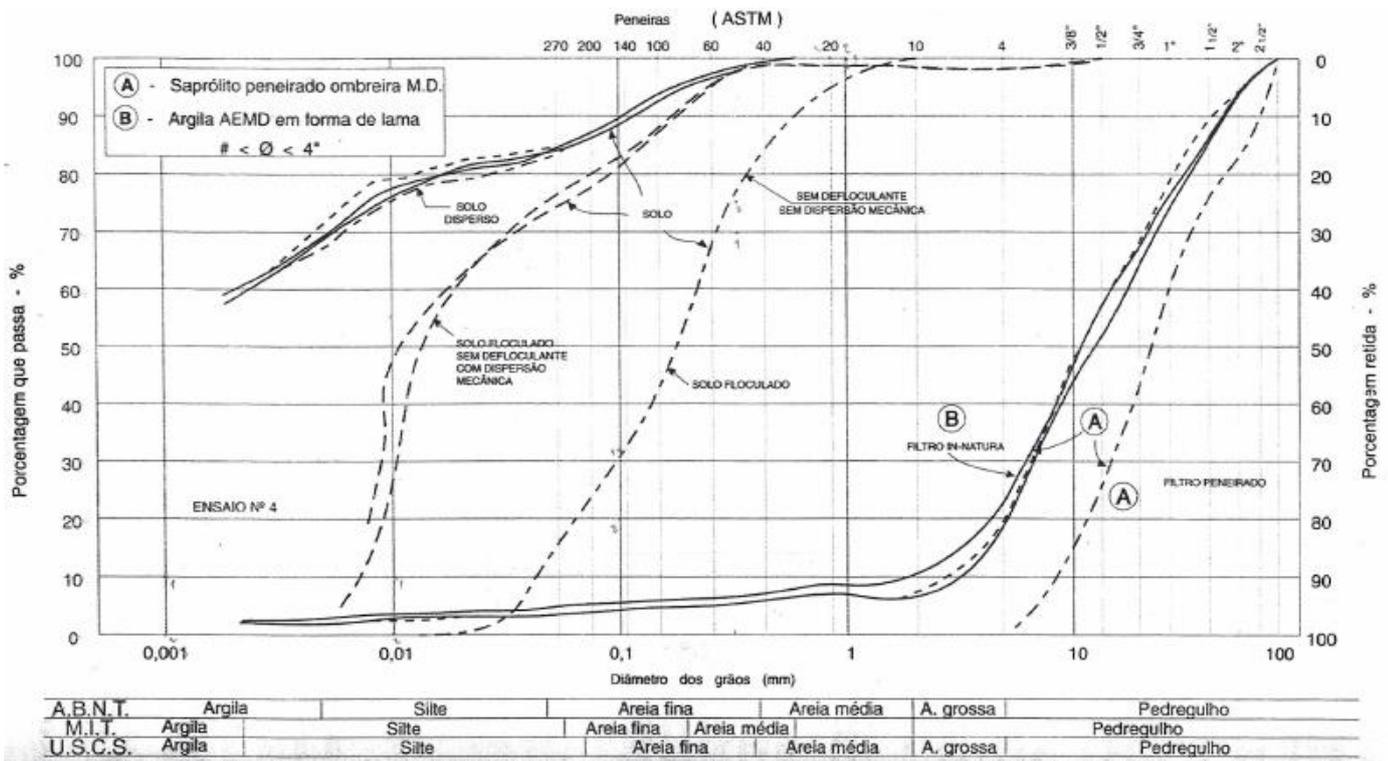
**Tabela 2.4.** Resultado dos ensaios de critérios de filtros modificado de VAUGHAN & SOARES (1982)

SOLO	SOLO BASE (micra)				FILTRO (micra)			$\frac{D_{15F}}{d_{85S}}$	RESULTADO DO ENSAIO	OBSERV
	d <sub>15</sub>	d <sub>50</sub>	d <sub>85</sub>	Cu	d <sub>15</sub>	d <sub>50</sub>	Cu			
COW GREEN	2,5	4,8	5,5	2,5	60	70	1,3	11	EFETIVO	SOLOS FINOS
					80	95	1,4	14,5	EFETIVO	
					110	600	15	20	EFETIVO	
	2,5	4,8	5,5	2,5	160	600	12	29	NÃO EFET.	SOLOS FINOS
					160	200	1,5	29	NÃO EFET.	
					410	500	1,5	74	NÃO EFET.	
EMPINHAM	10	11	12	1,1	140	1000	11	11,6	EFETIVO	AREIA C/FINOS
					160	1100	8,5	13,3	NÃO EFET	AREIA LAVADA
PARTICULAS FINAS QUARTZO EM SUSPENSÃO	7	8	8,5	1,3	110	140	1,5	13	EFETIVO	MATERIAL INERTE
					125	180	1,5	14,7	NÃO EFET	
					200	250	1,5	23,5	NÃO EFET	
					105	350	4,0	12,3	EFETIVO	
					180	550	4,0	21,0	NÃO EFET	
					150	400	4,0	17,6	COLMATAÇÃO	
	18	22	25	1,4	180	350	2,5	21,0	COLMATAÇÃO	
					200	250	1,5	8,0	EFETIVO	
					350	400	1,5	14,0	EFETIVO	
					600	700	1,5	24	NÃO EFET	
					310	700	2,8	12,4	EFETIVO	
	25	32	42	1,5	360	700	2,3	14,4	NÃO EFET	
					350	400	1,5	8,3	EFETIVO	
					600	700	1,5	14,2	EFETIVO	
					800	900	1,5	19,0	NÃO EFET	

As relações  $D_{15}/d_{85}$ , apresentadas na Tabela 2.6 como critério de filtros efetivos variam numa faixa de 8,0 a 14,2, para os ensaios em partículas de quartzo e entre 11 e 20 para os solos argilosos. Para SHERARD (1984-b) essas faixas são menos restritas, as relações variam de 9 a 50.

Para VAUGHAN & SOARES (1982) os requisitos de filtro sugerem à adoção de materiais de menor granulometria, e ressaltam a importância dos finos no bloqueio das partículas ou flocos do material da base. As areias médias e grossas com fração de areias finas seriam os filtros ideais para solos não coesivos. Um exemplo disso é a Usina Hidrelétrica Canoas (SHERARD, 1984), onde os ensaios de granulometria e relação de diâmetro das partículas entre o solo da base e o material do filtro, mostraram que quando o material do filtro, classificado como saprólito, contém finos (curva b da Figura 2.25) os resultados são favoráveis. Entretanto, quando o material do filtro é menor que 0,42 mm (#40), os resultados se mostraram desfavoráveis.

Para materiais inertes como pó de pedra e areias o problema de aglutinamento dos elementos mais finos não ocorre. Situação contrária ao dos solos saprolíticos ou saprolitos, provenientes da alteração de rochas, cujos problemas de filtragem ocorre em relação às partículas inferiores a areia fina (menores que 0,2mm).



**Figura 2.25.** Ensaio de permeabilidade – curava granulométrica- enscadeira U.H. Canoas (Cortesia CESP, 1992. tomado de CRUZ 1996)

A análise dos critérios de filtro usados nesta pesquisa foram realizadas por meio dos ensaios granulométricos se de permeabilidade. Contudo, no caso da análise dos rejeitos de mineração, devido a sua condição particular em relação ao solos convencionais

também são necessárias à realização de ensaios químicos e mineralógicos e assim dar uma visão mais ampla da sua possível aplicabilidade em filtros de barragens, conhecendo o tipo de minerais, a forma que apresentam e a susceptibilidade à colmatação. Ressalta-se aqui a importância destes estudos na análise da viabilidade destes resíduos em aplicações em filtros de barragens.

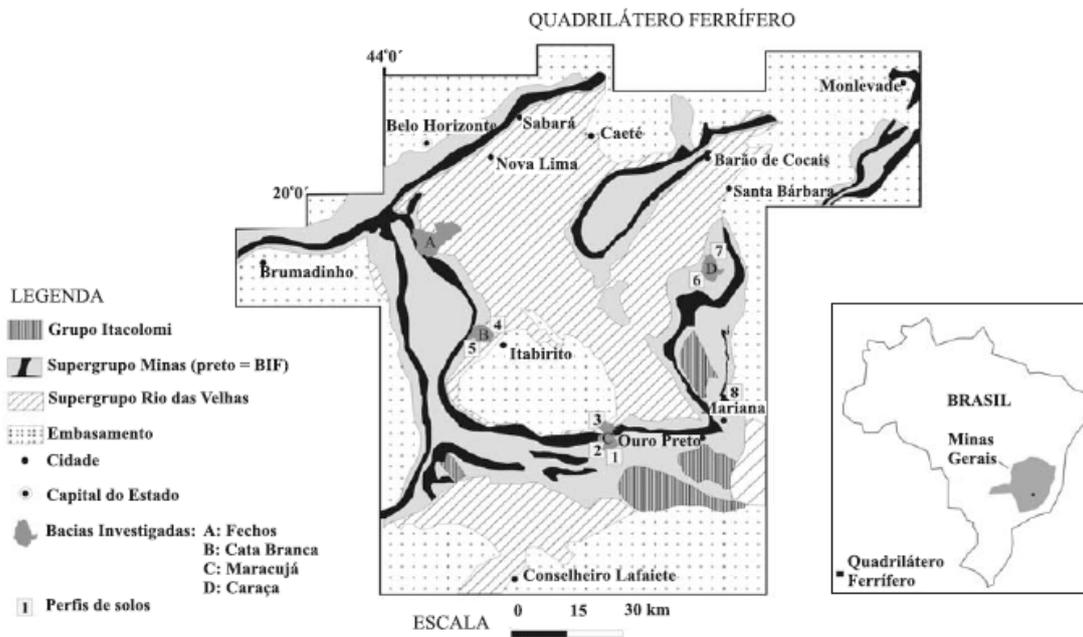
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada para o desenvolvimento desta pesquisa constituiu na investigação dos resíduos de mineração de ferro a fim de evidenciar por meio de ensaios específicos de granulometria e permeabilidade a aplicabilidade destes resíduos como materiais para confecção de filtros de barragens. Deste modo, foram avaliados o possível enquadramento dos rejeitos nos critérios de projeto de filtros de barragens descritos no capítulo 2, como também a sua suscetibilidade à colmatagem, arranjo estrutural e desempenho quanto à manutenção da capacidade de drenagem corroborado por meio de ensaios químicos e mineralógicos. e.

#### 3.1 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

Os materiais analisados nesta pesquisa correspondem a dois resíduos gerados no beneficiamento de minério de ferro, provenientes de duas minerações de ferro do Quadrilátero Ferrífero do estado de Minas Gerais visando sua utilização em filtros de barragens. A região do Quadrilátero Ferrífero (QF) compreende uma extensão de 7500 km<sup>2</sup> dentro do estado de Minas Gerais localizado conforme Figura 3.1 a poucos quilômetros a leste da capital, Belo Horizonte e seus vértices estão nas cidades de Belo Horizonte, Santa Bárbara, João Monlevade, Mariana, Congonhas do Campo e Brumadinho. O Quadrilátero Ferrífero continua sendo a região de maior concentração urbana de Minas Gerais, além de ser uma área de fundamental importância para o desenvolvimento econômico estadual, impulsionando, inclusive, o setor industrial, sobretudo o segmento siderúrgico. A região destaca-se no cenário nacional pela grande riqueza mineral. Entre os vários minérios extraídos do Quadrilátero Ferrífero estão o ouro, o manganês e o ferro. A região é a maior produtora nacional de minério de ferro, correspondendo a 60% da produção brasileira, que é transportado em ferrovias até o porto Tubarão, em Vitória, capital do Espírito Santo.

O Quadrilátero Ferrífero possui importantes depósitos de minério de ferro itabirítico e hematítico de alto teor (Fe > 60%). Rochas metamórficas como filitos, gneisses, quartzitos, xistos etc. compõem geologicamente o QF num aspecto geral, fornecendo um alto conteúdo de ferro e de material quartzoso presente nos resíduos e rejeitos provenientes das atividades de mineração.



**Figura 3.1.** Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero (modificado de Alkim & Marshak; 1998, tomado de Chicarino *et al*, 2009 )

Os rejeitos utilizados foram gerados a partir do beneficiamento úmido do minério de ferro e apresentam características típicas de solos granulares. O rejeito é todo e qualquer material não aproveitável economicamente, gerado durante o processo de beneficiamento do minério, sendo suas características uma função direta do processo de separação utilizado no decorrer do seu tratamento (RUSSO, 2007). O minério passa por processos de britagem, peneiramento e concentração. As duas primeiras fases não geram rejeitos, mas na fase de concentração, onde a fração menor que 0,6mm é tratada são gerados dois tipos de rejeito: o rejeito argiloso como resultado da deslamagem que é feita com hidrociclones, primeiro estágio de concentração, e o rejeito arenoso originado pelo descarte do segundo estágio da concentração de minério e que é feito por separação gravimétrica, separação magnética ou flotação.

No caso desta pesquisa os rejeitos utilizados referem-se aos resíduos obtidos no segundo descarte, normalmente por separação gravimétrica ou magnética que são os rejeitos granulares. Estes rejeitos são predominantemente compostos por partículas de granulometria grossa (acima de 0,074 mm) são denominados “rejeitos arenosos”. Estes materiais apresentam partículas predominantemente nas frações areias finas a médias e, em alguns casos, siltosas, sem características de plasticidade. Devido a essas características, este tipo de rejeito permite após o lançamento nos sistemas de

disposição, um quase imediato tráfego sobre ele e manuseio do material, pois o rejeito adensa e sedimenta rapidamente com a liberação praticamente imediata das águas oriundas da polpa que o originou.

Algumas características químicas e mineralógicas, herdadas da rocha de origem, exercem influência direta no comportamento geotécnico dos rejeitos arenosos. Um exemplo é o teor de ferro que induz o valor da densidade dos grãos destes materiais. A massa específica dos grãos, em determinados casos, assume valores da ordem de 5 g/cm<sup>3</sup>.

A forma de obtenção das amostras foi feita a partir da coleta direta do material na saída do rejeito durante a deposição, na própria tubulação de descarga. O objetivo da coleta neste ponto foi obter amostras representativas do rejeito na forma original, como é produzido durante o beneficiamento, sem possíveis efeitos de segregação caso a coleta fosse realizada em pontos distintos ao longo da praia de deposição.

Neste sentido, os resíduos foram coletados na forma de polpa armazenados em sacos plásticos, sendo retirado o excesso de água e transportados ao laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília. Os rejeitos então foram deixados expostos ao ar para completa evaporação do restante da água e em seguida submetidos aos ensaios de caracterização física e preparados para realização das análises químicas, mineralógicas e ensaios de permeabilidade e demais ensaios relativos ao programa experimental proposto.

### 3.2 MÉTODOS

A seguir serão descritos todos os ensaios de caracterização física, química e mineralógica, assim como os ensaios de permeabilidade realizados na pesquisa (Tabela 3.1).

**Tabela 3.1.** Metodologia de classificação e caracterização aplicada para cada resíduo

AMOSTRAS	ENSAIOS
Resíduo 1 (AM 01)	Granulometria no laser, índice de vazios máximo e mínimo (NBR 12051, ABNT 1990,), permeabilidade a carga constante (NBR 13292, ABNT 1995,), Determinação da massa específica (NBR 7181, ABNT 1984). Difração de Raio X. Microsonda Eletrônica, ensaio químicos, ensaio mineralógicos com lupa, ensaios de permeabilidade no permeâmetro de parede rígida e flexível.
Resíduo 2 (AM 02)	Granulometria no laser, índice de vazios máximo e mínimo (NBR 12051, ABNT 1990), permeabilidade a carga constante (NBR 13292, ABNT 1995,), Determinação da massa específica (NBR 7181, ABNT 1984). Difração de Raio X. Microsonda Eletrônica, ensaio químicos, ensaio mineralógicos com lupa, ensaios de permeabilidade no permeâmetro de parede rígida e flexível.

### 3.2.1 *Granulometria a laser*

A caracterização granulométrica foi realizada usando o granulômetro LASER (Figura 3.2) disponível no laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB). Este equipamento permite a análise de materiais que não estejam disponíveis em quantidades suficientes para o emprego das metodologias convencionais. A distribuição granulométrica obtida se baseia na análise estatística de valores geométricos da amostra a partir do software de análise associado ao equipamento. (BEIRIGO 2005)

O método de espalhamento de luz laser utiliza como princípio, a interação de um feixe de luz com partículas em um meio fluido. O feixe de luz monocromático atinge uma quantidade de partículas, parte desta luz é submetida a um espalhamento, parte é absorvida e parte é transmitida. No espalhamento, a luz pode ser difratada, refratada e refletida. Neste método, um conjunto de lentes, detectores foto-elétricos e um microprocessador irão captar a intensidade da energia espalhada e transformá-la em distribuição volumétrica das partículas, assumindo-se, a princípio, que as partículas têm formato esférico (RAWLE 2002)



**Figura 3.2.** Detalhe do equipamento granulômetro laser

O granulômetro a laser permite que a qualidade de seus resultados seja avaliada por meio de dois parâmetros: o grau de obscuração provocado pelas partículas detectadas na luz laser; e o ajuste feito a partir do modelo estatístico escolhido na análise dos volumes medidos, podendo variar de 0 a 100%. Os valores elevados do grau de obscuração medidos pelo equipamento significam que pode estar ocorrendo sobreposição do sombreamento, provocado por duas ou mais partículas no detector. Valores muito pequenos podem prejudicar as condições de espalhamento da luz refletida pelas partículas, tendo em vista alguns minerais apresentarem algum grau de transparência. Como resultado destas observações é recomendável o controle da quantidade de partículas ensaiada, mantendo o grau de obscuração entre 10 e 30%. (BEIRIGO 2005)

As amostras dos dois resíduos foram analisadas em solução aquosa, aproximadamente 1 g. de cada material foi necessário para as análises no equipamento laser, devido à textura granular dos dois resíduos, segundo a metodologia NBR 7181 (ABNT 1984).

### 3.2.2 *Índice de vazios*

Para a obtenção do índice de vazios máximo e mínimo dos dois rejeitos foi utilizada a norma NBR 12051 (ABNT, 1990)() usando os métodos B.1 para a determinação do índice de vazios máximo e o método B.2 para a determinação do índice de vazios mínimo. A determinação do índice de vazios mínimo também foi realizada usando os materiais úmidos. Este procedimento teve como objetivo avaliar a influência da presença da água na obtenção da densidade mínima dos rejeitos. Além disso, este

procedimento visou subsidiar a metodologia de reconstituição dos corpos de prova utilizados nos ensaios de permeabilidade no permeâmetro e na célula triaxial.

É importante ressaltar que a norma NBR 12051 (ABNT, 1990) adotada na realização destes ensaios restringe a utilização de solos não coesivos com porcentagem de finos superior a 12%. Desta forma, algumas das amostras não poderiam ser utilizadas para a obtenção das porosidades máxima e mínima, por terem esta porcentagem superior a 12%. Uma justificativa para manutenção dos procedimentos preconizados nestas normas para as referidas amostras está nas características particulares das partículas finas deste rejeito que são compostas pelas partículas de ferro as quais não apresentam comportamento coesivo. Por esta razão puderam ser empregadas na execução do ensaio.

No caso do material previamente seco em estufa, o índice de vazios máximo foi realizado usando a pluviação com material seco até o preenchimento total do cilindro com auxílio de um funil (Figura 3.3). Ao final do preenchimento completo, o molde era rasado com o auxílio de uma régua de aço biselada eliminando-se o excesso de material e depois pesado. Com o objetivo de contornar possíveis imprecisões, para determinação do valor do índice de vazios máximo foram realizadas três determinações, sendo o resultado obtido considerando a média dos três ensaios realizados.

Para o ensaio de índice de vazios mínimo foi realizado o processo de vibração no material seco que preenchia o cilindro. O tempo e a intensidade de vibração foi determinado segundo as recomendações da norma de modo a obter a máxima compactação. Da mesma forma que no ensaio de  $e_{\max}$  foram feitas três determinações e obtido como resultado final a média das três determinações. Para o caso úmido, foi inicialmente preparada uma amostra a partir do material seco em estufa, ao qual se acrescentou água suficiente para umedecê-lo totalmente. Esta condição foi avaliada visualmente e evitando assim proporcionar um acréscimo excessivo de água à amostra. A amostra preparada foi suficiente para preenchimento do cilindro e todo excedente da água gerado durante a colocação do material no cilindro foi removido com ajuda de um pano. Após o preenchimento completo do cilindro foi realizada a etapa de vibração vertical na mesa.



**Figura 3.3.** Detalhe de funil usado para a pluviação seco

Na fase de vibração eram colocados o disco base e a sobrecarga sobre o cilindro, submetendo o conjunto à mesa vibratória por dez minutos. Estes procedimentos foram repetidos três vezes. O cilindro foi pesado em cada processo, sendo o resultado obtido considerando a média dos três ensaios realizados. A relação da massa contida no cilindro e o volume do mesmo possibilitaram determinar a densidade máxima úmida e o índice de vazios mínimo úmido.

O equipamento utilizado nestes ensaios foi o recomendado pela norma, sendo composto por um cilindro de diâmetro de 15,09 cm e uma altura de 12,8 cm, um tubo guia com dispositivo de fixação ao molde, mesa vibratória e sobrecarga de seção circular que auxilia na compactação do material durante um tempo determinado (Figura 3.4)



**Figura 3.4.** Mesa vibratória e cilindro utilizado no ensaio do índice de vazios máximo e mínimo

### 3.2.3 Permeabilidade em carga constante

Para realização dos ensaios de permeabilidade nos rejeitos foi utilizado o equipamento de permeabilidade de carga constante. O equipamento utilizado foi um permeômetro de parede rígida com 11,43 cm de diâmetro e 15,0 cm de altura (Figura 3.5) acoplado a um sistema de alimentação e manutenção de carga através de um reservatório ligado diretamente a um reservatório de água. A célula de permeabilidade (permeômetro) é conectada a um painel onde se encontra instalado o reservatório dotado de um extravasor que permite a manutenção do nível d'água máximo constante e assim mantendo constante a carga hidráulica aplicada na amostra. Este equipamento contém um sistema de tubos manométricos acoplado a uma escala graduada em milímetros, que permite a medição das cargas hidráulicas. (Figura 3.6)



**Figura 3.5.** Detalhe do permeômetro de parede rígida utilizado no ensaio de permeabilidade a carga constante

Para obtenção dos corpos de prova submetidos aos ensaios de permeabilidade foram utilizados os valores de índice de vazios máximo, mínimo e intermediário. Estes valores foram baseados nos resultados obtidos dos ensaios de  $e_{\max}$  e  $e_{\min}$  realizados para cada rejeito. Neste sentido, para moldagem dos corpos de prova foi determinada a massa de material necessária para preencher completamente o cilindro do ensaio (permeômetro) sendo relacionado com o índice de vazios a ser obtido em cada simulação. A relação adotada para obtenção da massa seca a ser utilizada para obtenção das diferentes densidades é apresentada a seguir:

$$\rho_d = \frac{M_d}{V} \quad (3.1)$$

Onde:

$\rho_d$  – Massa específica aparente seca

$M_d$  – Massa seca

V – Volume do cilindro (permeômetro)



**Figura 3.6.** Permeômetro, equipamento utilizado para a realização do ensaio de permeabilidade a carga constante

Desta forma, a confecção dos corpos de prova variou em função da densidade requerida para cada ensaio. Para os corpos de prova densos foi usada a técnica de compactação dinâmica com o material seco, para os corpos de prova fofos foi utilizada a técnica de pluviação a seco e para as condições de densidade intermediária a obtenção do corpo de prova foi realizada por meio de compactação usando golpes nas paredes laterais do cilindro.

Para os corpos de prova compactos a massa do material seco foi dividida em três partes iguais visando o preenchimento do permeômetro em três camadas de mesma espessura. O lançamento do material correspondente a cada camada foi realizado com auxílio de

uma colher e logo depois de acomodado o primeiro terço de material iniciava-se o processo de compactação dinâmica por meio de um soquete de borracha. Este procedimento era realizado igualmente para cada camada. Antes do lançamento do material correspondente à camada seguinte procedia-se a uma leve escarificação da parte superior da camada recém-compactada.

Para as densidades intermediárias o material também foi dividido em três camadas usando a técnica de golpes na parede lateral do permeâmetro até atingir a densidade requerida. Igualmente ao caso da reconstituição relativa aos corpos de provas densos, para o caso intermediário a técnica utilizada foi a de pluviação a seco.

A técnica de pluviação a seco foi também utilizada para a moldagem de corpos de prova na condição fofa. O método de pluviação utilizado consistiu em verter o rejeito, previamente seco em estufa, através de um funil com 1,5 cm de diâmetro desde o fundo do cilindro e mantendo-se sempre a altura de queda bem próxima à superfície do material recém-depositado até preencher todo molde. No caso da reconstituição dos corpos de prova nesta condição, o material foi integralmente depositado com auxílio do funil, sem a separação em camadas. Neste caso, todo o peso de solo seco foi colocado cuidadosamente no cilindro até seu preenchimento completo.

A aferição da densidade final obtida foi feita avaliando a altura final do corpo de prova em relação à quantidade da material necessária para atingir a referida densidade. No caso denso compactações adicionais eram realizadas de forma a manter a altura requerida de cada camada e no caso fofo se evitava ao máximo vibrar o cilindro e assim manter a densidade mínima requerida. A Tabela 3.2 apresenta os dados iniciais de cada corpo de prova submetido ao ensaio de permeabilidade a carga constante.

A determinação do coeficiente de permeabilidade no permeâmetro de carga constante foi feita com base na metodologia preconizada na norma NBR 13292 (ABNT, 1995). É importante considerar que a aplicação deste método é restrita a solos granulares, caso específico dos rejeitos estudados. A avaliação da permeabilidade foi feita a partir da avaliação do volume total de água percolada nas amostras em função de um tempo pré-determinado, sendo este tempo adotado igualmente para todos os ensaios nas três densidades (máxima, intermediária e mínima). Como preconizado na norma foram

realizadas três determinações da variação de volume e o resultado final foi obtido considerando a média dos três valores. O coeficiente de permeabilidade obtido foi expresso em cm/s para uma temperatura de 20° C

**Tabela 3.2.** Dados iniciais dos corpos de prova para os ensaios de permeabilidade a carga constante

Amostras	Estado	Índice de vazios	DR	$\rho_d$ seca (g/cm <sup>3</sup> )	Umidade(%)
AM 01	Denso	0,59	0,95	2,17	13,60
	Intermediário	0,72	0,46	1,98	0
	Fofo	0,85	0	1,84	0
AM 02	Denso	0,87	0,14	1,54	26,06
	Intermediário	1,00	0,90	1,41	0
	Fofo	1,53	0	1,25	0

### 3.2.4 Análise mineralógica

Os resíduos de minério de ferro apresentam uma ampla variação mineralógica já que depende diretamente da geologia local, tipo de rocha ou depósito dos quais estão sendo explorados e em alguns casos dos processos de beneficiamento. Contudo, o que se observa é que geralmente os minerais associados a este tipo de rejeito é a sílica e o ferro, formando os minerais de quartzo e óxidos de ferro (hematita).

Neste sentido, visando avaliar as características mineralógicas dos rejeitos estudados foram realizadas análises mineralógicas considerando os seguintes procedimentos e metodologias:

- Microscopia ótica com lupa ou microscópio
- Microsonda Eletrônica (ME)
- Difração de Raios – X (DRX)

Para as análises das frações finas (material passante da peneira 40) foram utilizados os métodos de Difractometria de Raios-X e da Microsonda Eletrônica. Estes métodos representam uma das principais técnicas para a caracterização química de materiais

crystalinos, obtendo como resultado os minerais e elementos químicos presentes nos rejeitos.

Estes ensaios foram feitos nos laboratório de Difractometria de Raios-X e no laboratório da Microssanda no Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (UnB). E o ensaio de Microscopia com lupa foi realizado, tomando a fração grossa dos dois resíduos, visando obter uma caracterização do tipo de forma que apresentam os grãos dos minerais.

### *3.2.5 Microscopia ótica com lupa*

Para as análises das frações grossas foi utilizado o microscópio de lupa: ProScope HR (Figura 3.7). Este equipamento é utilizado para reconhecimento de minerais, tamanho e forma. O microscópio é composto por 4 tipos de lentes com diferentes resoluções, 50x; 100x, 200x e 400x.

As amostras foram coletadas diretamente nos sacos plásticos onde se encontravam os resíduos, tendo um peso aproximado de 2 g. Baseado no princípio de aleatoriedade e evitando assim obter uma amostra pouco representativa do rejeito total, o material existente nos sacos foi previamente misturado. Este procedimento objetivou a mistura completa dos minerais de ferro localizados nas zonas mais baixas, agregando-os aos demais minerais e assim homogeneizar todo o material.

### *3.2.6 Difractometria de Raio-X*

Os ensaios de Difractometria de Raio-X foram feitos para a determinação dos compostos mineralógicos presentes nos dois resíduos. As amostras foram pulverizadas e compactadas a seco em lâmina de vidro. A análise de Difractometria de Raio – X foram realizada no equipamento RIGAKU ULTIMA-IV (Figura 3.8), operando com tubo de cobre e filtro de níquel, sob voltagem de 35 kv e 15 mA, velocidade de varredura de 2°/minuto, no intervalo 3° a 80° - 2 $\theta$ . O ensaio consiste na irradiação contínua de raios x que quando atingem o material são espalhados elasticamente sem perda de energia pelos elétrons de um átomo. O fóton do raio x após da colisão com o elétron muda a sua trajetória, determinando assim seu ângulo de difração. Este ângulo varia de um

elemento a outro e permite caracterizar e quantificar substâncias que apresentam a mesma fórmula química, como também identificar minerais e estruturas químicas.

### 3.2.7 *Microsonda eletrônica.*

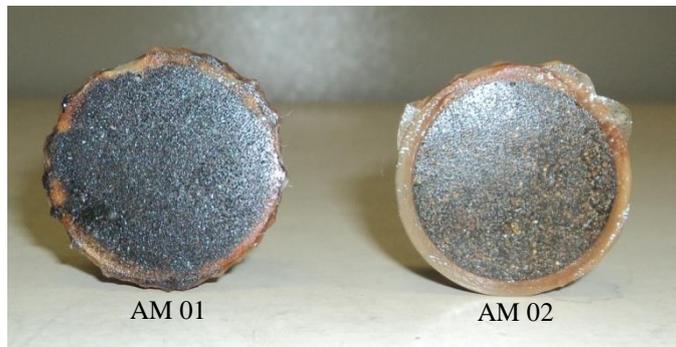
Para a realização do ensaio na microsonda, as amostras compostas pelas frações finas (% menor que 0,42 mm) dos resíduos foram previamente secas na estufa durante 24 horas. Após a secagem foram separadas 2 g de material para serem misturadas com 3 cm<sup>3</sup> de resina. Essa resina permite o endurecimento e a estabilidade física do material durante o ensaio. A mistura foi colocada em um tubo de ensaio de 2.5 cm de diâmetro e 0,8 cm de altura, formando assim uma montagem tipo moeda (Figura 3.9). As amostras já secas foram passadas na polidora utilizando pó de diamante para desgastar o excesso de resina e assim nivelar com a altura do tubo. Com as amostras já prontas iniciou-se a análise no equipamento (Figura 3.10).



**Figura 3.7.** Detalhe de um microscópio ótico, fonte: <http://www.flickr.com/photos/ewumeyer/4648152080> acesso 17/05/2012/



**Figura 3.8.** DRX (Difração de Raios X), fonte: *emal.engin.umich.edu*, acesso 17/05/2012



**Figura 3.9.** Detalhe do tubo e montagem tipo moeda das amostras



**Figura 3.10.** Equipamento de Microsonda Eletrônica

### 3.2.8 *Análises químicas*

As análises químicas tiveram como objetivo avaliar o comportamento dos rejeitos, principalmente, devido à percolação de água. Além da associação da mineralogia com o comportamento mecânico do material, algumas alterações de comportamento podem ocorrer devido às reações químicas dos minerais constituintes dos rejeitos quando em contato com outros compostos. Como exemplo o fenômeno da colmatação que pode ocorrer nos filtros de uma barragem em contato direto com a água do reservatório. Neste contexto, ensaios químicos como pH da água do reservatório e dos materiais que compõem o filtro e a Capacidade de Troca Catiônica (CTC) são feitos para o conhecimento da susceptibilidade da ocorrência do fenômeno. Assim, Para os dois resíduos foram analisados os seguintes compostos químicos:  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{TiO}_2$ , P,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . As análises químicas foram realizadas no laboratório de fertilidade do solo e nutrição vegetal de responsabilidade da empresa Campo na cidade de Paracatu do estado de Minas Gerais.

Segundo (SANTOS 2004) o pH do solo pode ser determinado agitando uma porção de solo em água, usando colorimetria ou um potenciômetro. O pH também pode ser medido em soluções salinas, como o KCl. Neste caso, os cátions  $\text{K}^+$  da solução permutam com o hidrogênio e o alumínio trocáveis existentes na superfície dos colóides, passando para a solução. Com a solução de KCl, o hidrogênio e os íons hidróxido de alumínio remanescentes dos colóides orgânicos ou inorgânicos, tornam-se ionizados e substituíveis, formando o  $\text{Al}(\text{OH})_3$  e liberando, dessa forma, locais adicionais de permuta nos colóides minerais. O resultado é o aumento na capacidade de permuta de cátions e, portanto, do pH do solo nessa solução.

A Capacidade de Troca Catiônica(CTC) refere-se á quantidade de cargas negativas dos elementos químicos presentes num material. Por exemplo, os solos tropicais apresentam maior teor de alumínio, eles apresentam uma capacidade de troca catiônica (CTC) baixa. As argilas com alta reatividade podem reter grandes quantidades de cátions e, porém apresentar uma CTC alta devido a decomposição da matéria orgânica ser mais rápida. A CTC varia com o tipo de argila, para BERTELLA et al. (2008) as motmorillonitas, por exemplo, apresentam CTC entre 80 e 200 meq/100g. Já para os solos ácidos e arenosos a CTC é baixa devido ao escasso conteúdo de matéria orgânica evidenciada por uma maior lixiviação de cátions.

### 3.2.9 Permeabilidade na célula triaxial

Este ensaio foi realizado no equipamento triaxial a deformação controlada existente no laboratório de Geotecnia, Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. O equipamento normalmente utilizado para realização de ensaios triaxiais convencionais permite pela configuração da célula triaxial realizar ensaios de permeabilidade por meio da variação da pressão entre o topo e a base da amostra. O sistema de aplicação de pressão consta de três buretas graduadas em milímetros que permite a avaliação do fluxo de água que entra e sai da amostra bem como as variações de volume provocadas pelo efeito do confinamento. A aferição das pressões aplicadas na câmara, no topo e na base é realizada por meio de três transdutores de pressão instalados na base da célula triaxial. A Figura 3.11 apresenta o detalhe do equipamento utilizado na determinação da permeabilidade. A importante aplicabilidade do referido ensaio consiste na possibilidade de variar as pressões de câmara simulando as diferentes condições de confinamento as quais os solos podem estar submetidos em campo.

Para realização dos ensaios foram adotadas tensões de confinamento de 50, 100, 200 e 400 kPa para as diferentes condições de compactidade (densa, fofa e intermediária), objetivando manter as mesmas condições simuladas nos ensaios de carga constante. Os detalhes do processo de reconstituição de amostras e montagem dos corpos de prova na célula triaxial são descritos a seguir.



**Figura 3.11.** Equipamento usado no ensaio de permeabilidade a diferentes tensões de confinamento

### 3.2.10 Preparação da amostra

Para obtenção dos corpos de prova foi utilizado o método de reconstituição por meio de compactação estática. Para este processo foi utilizada uma prensa hidráulica digital (Figura 3.12) dotada de um pistão com secção igual a do corpo de prova que realizava a compressão do material até atingir a densidade requerida. Desta forma, o material, igualmente ao que foi feito para obtenção dos corpos de prova nos permeâmetros convencionais, foi inserido no cilindro de moldagem em três porções iguais, sendo então compactado em três camadas de mesma espessura. Contudo, diferentemente do que foi feito nos ensaios de permeabilidade a carga constante, os corpos de prova utilizados no equipamento triaxial foram moldados com uma umidade inicial de 8%. Este tipo de procedimento objetivou fornecer uma pequena coesão no material, manter a sua estabilidade durante a colocação e montagem na câmara triaxial e evitar sua ruptura após a retirada do molde de compactação.

Os corpos de prova foram moldados em cilindros metálicos bipartidos com 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro e posteriormente transferidos para a célula de compressão triaxial. A quantidade de material necessária para confecção dos corpos de prova foi calculada com base no valor da densidade da amostra. Neste caso, foi calculado o peso de material, com a correção devido à umidade inicial da amostra, necessário para obtenção do índice de vazios requerido em cada simulação. Assim, com a peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) e volume do cilindro já conhecidos, foi determinada a massa úmida de rejeito necessária para a confecção do corpo de prova, sendo a mesma dividida em 3 porções iguais para a composição das camadas. Após a reconstituição e atingida altura final do corpo de prova (Figura 3.13), o conjunto corpo de prova e cilindro bipartido era pesado para aferição da densidade final obtida, sendo em seguida levado para a câmara triaxial para realização do ensaio.

Para a confecção dos corpos de prova densos e intermediários a quantidade de material utilizado foi maior em comparação com o estado fofo, o material pertencente a cada camada foi colocado no cilindro com ajuda de um funil, após da compactação estática de cada camada foi efetuada uma escarificação na superfície do material utilizando uma faca, permitindo assim uma melhor integração entre os grãos de cada camada. Para a confecção dos corpos de prova do material no estado fofo foi utilizado o mesmo processo dos outros dois estados, Contudo, a força de compactação estática efetuada

pela prensa foi menor que a utilizada nos outros dos estados. É importante ressaltar que a simulação do estado fofo dos materiais apresentou uma maior dificuldade no processo de moldagem, os corpos de prova obtidos tinham maior susceptibilidade à formação de trincas devido a composição dos rejeitos estudados ser predominantemente granular e sem presença de plasticidade. O índice de vazios empregado para a preparação de todos os corpos de prova foi ligeiramente maior ao obtido nos ensaios do índice de vazios. A Tabela 3.3 apresenta os dados iniciais dos corpos de prova submetidos aos ensaios de permeabilidade a carga constante.

Para a montagem do ensaio no equipamento triaxial o corpo de prova era posicionado sobre a base da célula triaxial contendo uma pedra porosa de elevada permeabilidade e sobre ela um disco de papel filtro. O corpo de prova foi envolvido por uma membrana de látex fixada por *o-rings* de borracha, garantindo a impermeabilização da amostra (Figura 3.14). Igualmente à configuração adotada na base foi colocado no topo do corpo de prova o disco de papel filtro e sobre ele um disco poroso com as mesmas características do que foi utilizado na base. Para fixação da membrana na parte superior da amostra foi posicionando sobre a pedra porosa o “cap” superior.

**Tabela 3.3.** Dados iniciais dos corpos de prova na execução dos ensaios de permeabilidade na célula triaxial

Amostras	Estado	Índice de vazios	DR	$\rho_d$ seca (g/cm <sup>3</sup> )	Umidade (%)
AM 01	Denso	0,52	0,65	2,30	8
	Intermediário	0,60	0,92	2,00	8
	Fofo	0,74	0,38	1,90	8
AM 02	Denso	0,84	0,76	1,57	8
	Intermediário	1,12	0,70	1,36	8
	Fofo	1,3	0,38	1,26	8

Após a montagem do corpo de prova na célula triaxial procedia-se a fase enchimento da câmara com água para posterior aplicação das pressões de confinamento e avaliação da permeabilidade.



**Figura 3.12.** Prensa usada para a compactação estática das camadas dos C.P.



**Figura 3.13.** Detalhe do corpo de prova para a realização dos ensaios de permeabilidade no equipamento triaxial.



**Figura 3.14.** Colocação dos *o-rings* e da membrana de látex no corpo de prova

### *3.2.11 Processo de saturação*

A saturação dos corpos de prova foi realizada por meio da percolação, 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. O gradiente de percolação utilizado para todas as amostras foi de aproximadamente 6, que corresponde a uma diferença de pressão entre o topo a base do corpo de prova de 6 kPa. Foi utilizada, também, uma pressão de confinamento ligeiramente superior ao gradiente aplicado (acrescentando 5 kPa ao valor do gradiente) para garantir a estabilidade da amostra e condicionar fluxo de água entre as partículas, minimizando o efeito do fluxo entre a amostra e a membrana de látex. O fluxo era interrompido quando se atingia um volume de percolação igual ou superior ao volume total da amostra medido por meio de uma proveta graduada. Com este procedimento foram obtidos valores do parâmetro B da ordem de, 0,98, considerando-se assim que o método de percolação adotado foi suficiente para garantir a saturação da amostra.

### *3.2.12 Fase de adensamento*

Finalizado o processo de saturação as amostras foram submetidas ao processo de adensamento isotrópico, submetendo os corpos de prova às suas respectivas tensões confinantes de ensaio (50, 100 e 200 e 400 kPa). A fase de adensamento foi acompanhada constantemente, sendo medida em intervalos pré-determinado de tempo a variação de volume da amostra devida à tensão de confinamento aplicada. Após a

estabilização completa da variação de volume a fase de adensamento era dada por encerrada. Para todos o corpos de prova ensaiados, antes da fase de saturação, foi aplicada uma contrapressão ( $u_{cp}$ ) de 12 kPa, sendo a pressão de confinamento acrescida deste valor de modo a atingir as tensões confinante especificadas.

O acompanhamento da variação de volume dos corpos de prova durante esta fase foi realizado através de buretas graduadas conectadas ao painel da célula triaxial. O tempo de adensamento relativo às amostras com densidade máxima e intermediárias foi aproximadamente de 4 horas. Para as amostras com densidade mínima o tempo foi de aproximadamente 8 horas.

### *3.2.13 Passagem de fluxo através das amostras*

Depois de encerrada a fase de adensamento iniciou se a passagem do fluxo através das amostras visando a obter o coeficiente de permeabilidade dos rejeitos para cada tensão confinante nos diferentes estados de compactidade. Foram feitas 3 avaliações de volume percolado através da amostras em intervalos de tempo correspondentes a 10 minutos para cada tensão confinante. Oo valor do volume utilizado nos cálculos da permeabilidade foi o correspondente à média dessas três medições realizadas diretamente nas buretas.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios de laboratório descritos no capítulo anterior. Inicialmente serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica, análise química e mineralógica e posteriormente serão apresentadas as análise dos resultados dos ensaios de permeabilidade no permeâmetro carga constante e no equipamento triaxial.

Para a caracterização física dos rejeitos foram realizados ensaios de granulometria sem uso defloculante e densidade dos grãos. As amostras como apresentado anteriormente foram correspondentes aos resíduos oriundos de duas mineradoras de ferro do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais. As amostras foram denominadas AM 01 relacionada ao resíduo mais quartzoso, material com coloração mais clara, e AM 02 relacionada ao resíduo de coloração mais amarelada.

### 4.1 MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS DOS REJEITOS

Com relação às ensaios de determinações da densidade dos grãos dos dois rejeitos estudados a Tabela 4.1 apresenta os resultados das três determinações realizadas para cada resíduo. Nesta tabela, os valores  $G_m$  correspondem à média destes três valores obtidos.

**Tabela 4.1.** Massa específica dos grãos dos rejeitos

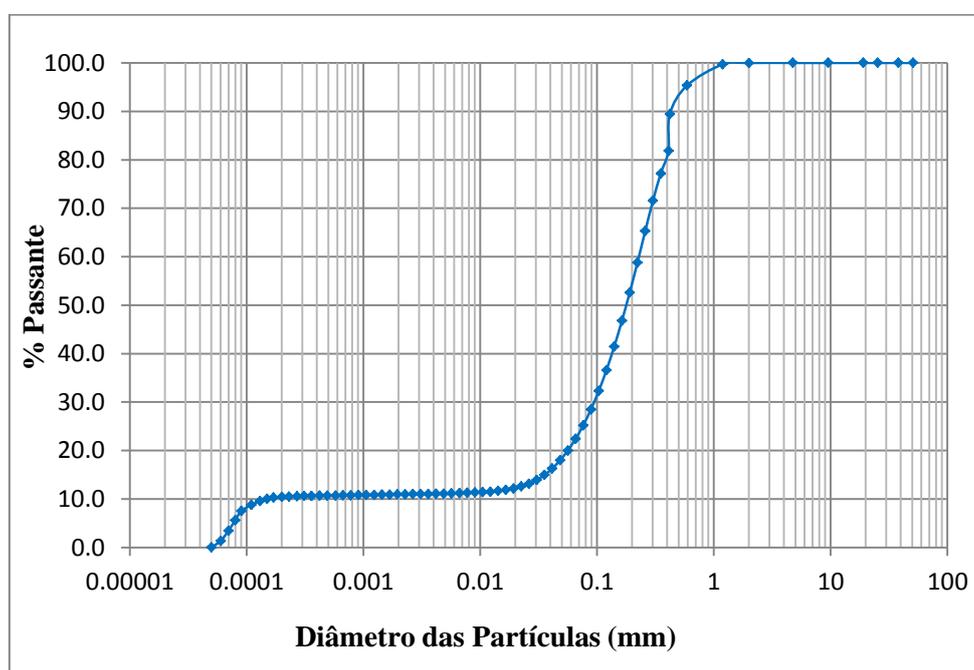
<b>Amostras</b>	<b><math>G_1</math></b>	<b><math>G_2</math></b>	<b><math>G_3</math></b>	<b><math>G_m</math></b>
AM 01	3.40	3.40	3.30	3.40
AM 02	3.29	3.14	3.16	3.15

O valor da massa específica dos grãos para os dos dois rejeitos não apresentou variações significativas durante a realização do ensaio, foi encontrado apenas um valor mais disperso em cada ensaio a associado a cada rejeito, e neste caso optou-se por desconsiderar estes valores. No caso do rejeito AM 01 foi obtido o valor de 3,30 e no rejeito AM 02 o valor obtido foi de 3,29. Observa-se que, os valores obtidos para massa específica dos grãos apresentaram valores representativos da quantidade de partículas de

ferro presente em cada amostra. Este fato será evidenciado na comparação entre estes dois rejeitos com base na análise mineralógica que será apresentada a seguir.

#### 4.2 ENSAIOS GRANULOMÉTRICOS

A Figura 4.1 apresenta a curva granulométrica correspondente a o rejeito AM 01. Com relação à granulometria, o rejeito AM 01 se caracteriza como areia fina, baseado nos parâmetros granulométricos adotados para a classificação das areias trata se uma areia bem graduada. Segundo a metodologia SUCS, o rejeito AM 01 pode ser classificado como SW e pela ABNT como areia media a fina.

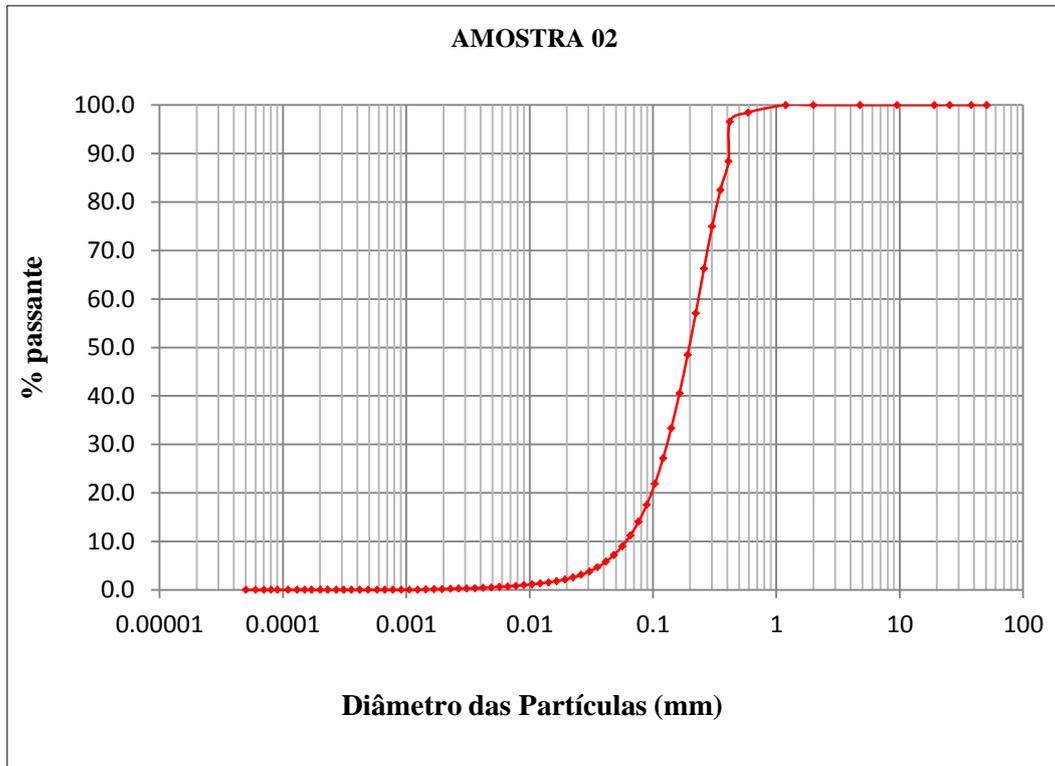


**Figura 4.1.** Resultados da análise granulométrica do rejeito AM 01

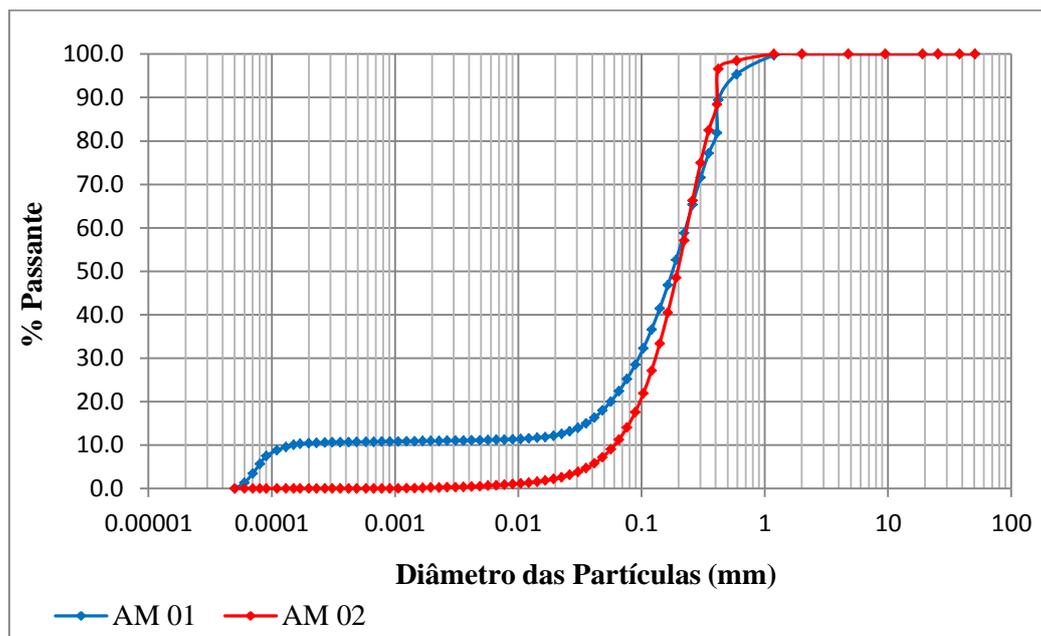
A Figura 4.2 apresenta a curva granulométrica correspondente a o rejeito AM 02. A amostra AM 02 se caracteriza granulometricamente também como uma areia fina. Contudo, este material, baseado nos parâmetros granulométricos adotados para as areias, trata se de uma areia mal graduada. Segundo a metodologia SUCS, o rejeito AM 02 pode ser classificado como SP (areias siltosas, mal graduadas) e pela ABNT, considerando a classificação quanto à textura como uma areia com silte.

Realizando a comparação entre os dois rejeitos (Figura 4.3) observa-se que o rejeito AM 01 apresenta menor quantidade de finos que o rejeito AM 02. Baseado nos índices granulométricos, o rejeito AM 01 é menos uniforme que o rejeito AM 02, devido que o

valor de  $C_U$  do rejeito AM 01 esta mais afastado de 3. A Tabela 4.2 apresenta a caracterização física dos dois rejeitos com base nos resultados obtidos na análise granulométrica.



**Figura 4.2.** Resultados da análise granulométrica do rejeito AM 02



**Figura 4.3.** Curvas granulométricas dos dois rejeitos

**Tabela 4.2.** Caracterização física dos rejeitos em função da análise granulométrica

Amostras	Composição granulométrica da fração (%)								Índices granulométricos	
	Pedregulho Grosso	Pedregulho Médio	Pedregulho Fino	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila	Cu	Cc
	AM 01	0.0	0.0	0.0	4.6	41.0	33.5	11.4		
AM 02	0.0	0.0	0.0	1.5	47.5	41.1	9.7	0.2	4,2	1,5

#### 4.3 ENSAIOS DE ÍNDICE DE VAZIOS MÁXIMO E MÍNIMO

A determinação dos valores dos índices de vazios máximo e mínimo dos dois rejeitos foi de extrema importância para a confecção dos corpos de prova nas análises de permeabilidade no permeâmetro de parede rígida e no permeâmetro de parede flexível (célula triaxial). Estes ensaios visam à obtenção dos valores dos índices de vazios por meio das densidades máxima e mínima apresentados pelos materiais. Estes parâmetros dependem essencialmente da mineralogia, da rugosidade, da forma e do tamanho dos grãos dos materiais.

A Tabela 4.3 apresenta os resultados dos ensaios para determinação dos índices de vazios mínimos para os dois rejeitos.

**Tabela 4.3.** Valores dos índices de vazios máximo e mínimo correspondentes a cada rejeito

Amostras	$\gamma_d \text{ máx. (g/cm}^3\text{)}$	$\gamma_d \text{ inter. (g/cm}^3\text{)}$	$\gamma_d \text{ mín. (g/cm}^3\text{)}$	$e_{\text{min}}$ (seco)	n (seco)	$e_{\text{min}}$ (úmido)	n (úmido)	$e_{\text{max}}$	n
AM 01	2,15	1,98	1,84	0,58	0,36	0,35	0,26	0,84	0,46
AM 02	1,61	1,41	1,25	0,95	0,49	0,63	0,39	1,52	0,60

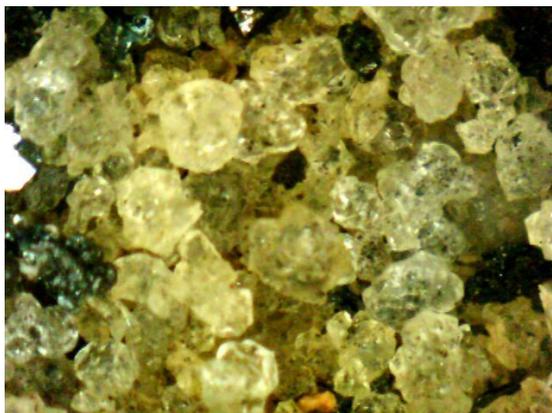
Para as diferentes densidades, o rejeito AM 01 apresentou valores maiores com respeito ao rejeito AM 02. Isto pode ser explicado devido às características do rejeito AM 1 que apresenta um maior teor de elementos de ferro em comparação com o rejeito AM 2. Observa-se, também que a presença de grãos mais finos do rejeito AM 1 ocasionou um arranjo nos grãos de tal forma que minimizaram o volume de vazios entre partículas, aumentando assim a quantidade de material presente no cilindro de ensaio. Como apresentado no Capítulo 3 foi realizado o ensaio de densidade máxima em condições úmidas. Como base nesta metodologia, verificou-se que o valor do índice de vazios

mínimo obtido para os dos dois resíduos foi consideravelmente menor que o mesmo ensaio realizado em condições secas, evidenciando a influência da água no maior entrosamento dos grãos dos rejeitos.

#### 4.4 DESCRIÇÃO MINERALÓGICA DOS RESÍDUOS

Os dois rejeitos foram analisados no microscópio de lupa, em diferentes tipos de ampliação. Para preparação das amostras foi realizada uma mistura prévia em sacos plásticos de forma a homogeneizar cada rejeito e obter amostras representativas.

No rejeito AM 01 observou-se a presença de minerais de quartzo com forma semi redondeada (Figura 4.4). Esta condição pode estar provavelmente associada ao processo de lavra e beneficiamento do minério. Na Figura 4.5 pode-se observar a presença de minerais escuros derivados de composto de ferro. De uma maneira geral, estes minerais de ferro apresentam um tamanho igual aos minerais de quartzo, porém com formas mais angulares, textura granular e presença de oxidação em alguns deles.



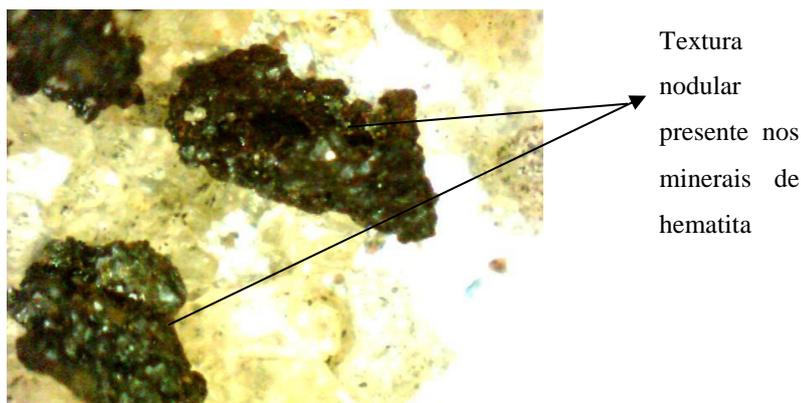
**Figura 4.4.** Detalhe dos minerais de quartzo do resíduo AM 01, (lente 100x)

O quartzo ou dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) pertencente ao grupo dos tectosilicatos é considerado uns dos minerais formadores de rocha. Como condição geral, na natureza, o quartzo possui uma ampla gama de variedades, evidenciadas principalmente nos tamanhos dos grãos que são ou não perceptíveis ao olho humano, variedades macrocristalinas (perceptível ao olho), por exemplo, quartzo cristal de rocha e variedades criptocristalinas (não perceptíveis ao olho), um exemplo desta variedade é a calcedônia. Na amostra observada do rejeito AM 01, pela coloração incolor e fratura concoidal, os minerais de quartzo se apresentam como variedade cristal de rocha. Este

mineral apresenta algumas inclusões internas de outros minerais e pigmentação devido à oxidação dos minerais de ferro. Pela forma semi redondeada pode deduzir que os minerais de quartzo, presentes no rejeito AM 01, foram submetidos a longos períodos de transporte ou a um processo de moagem próprio dos mecanismos de beneficiamento associção a mineração de ferro.

Pelo conteúdo considerável do quartzo presente no rejeito AM 01, o material pode ser considerado de grande aplicabilidade na engenharia como, por exemplo, em materiais para agregados no concreto e como componentes filtrantes por sua resistência e durabilidade.

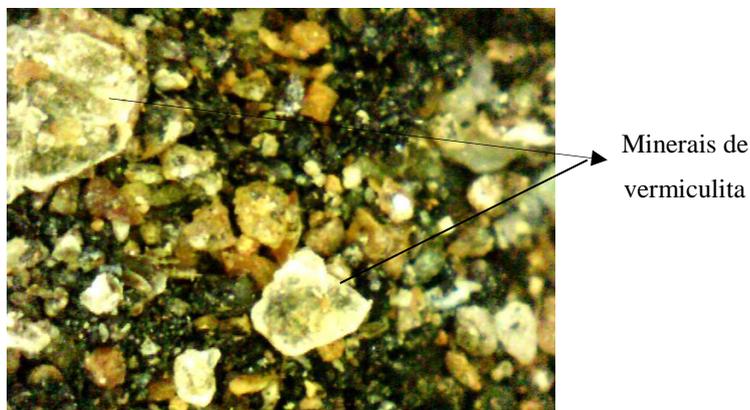
A hematita está definida quimicamente como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , óxido de ferro iii, a amostra analisada na lupa apresenta cores de preto e vermelho e brilho metálico, pode-se observar uma textura nodular (Figura 4.5). Os minerais apresentam aproximadamente o mesmo tamanho de grãos que os minerais de quartzo. Considerando este mineral de forma isolada, pode-se dizer que ele apresenta uma dureza de 6,5 na escala de Mohs, sua densidade é aproximadamente  $5,3 \text{ g/cm}^3$ . Do ponto de vista de utilização a hematita é o principal minério de ferro contendo cerca de 70 % de ferro. O Brasil é o grande produtor mundial de minério de ferro, grande parte proveniente das minas do Quadrilátero ferrífero de Minas Gerais. Na indústria a hematita é usada como pigmento.



**Figura 4.5.** Detalhe dos minerais de ferro do resíduo AM 01, (lente 100x)

O rejeito AM 02 apresenta minerais de vermiculita, quartzo e hematita perceptíveis ao olho nu. A vermiculitas e apresenta na sua forma de cristalização (planar ou basal), o quartzo se apresenta na variedade cristal de rocha, evidenciado pela cor transparente e a

forma apresentada na amostra é semi-angular. A hematita apresenta textura nodular, cor preta e brilho metálico. O conteúdo de vermiculita é consideravelmente maior em comparação aos minerais de quartzo e ferro (Figura 4.6).

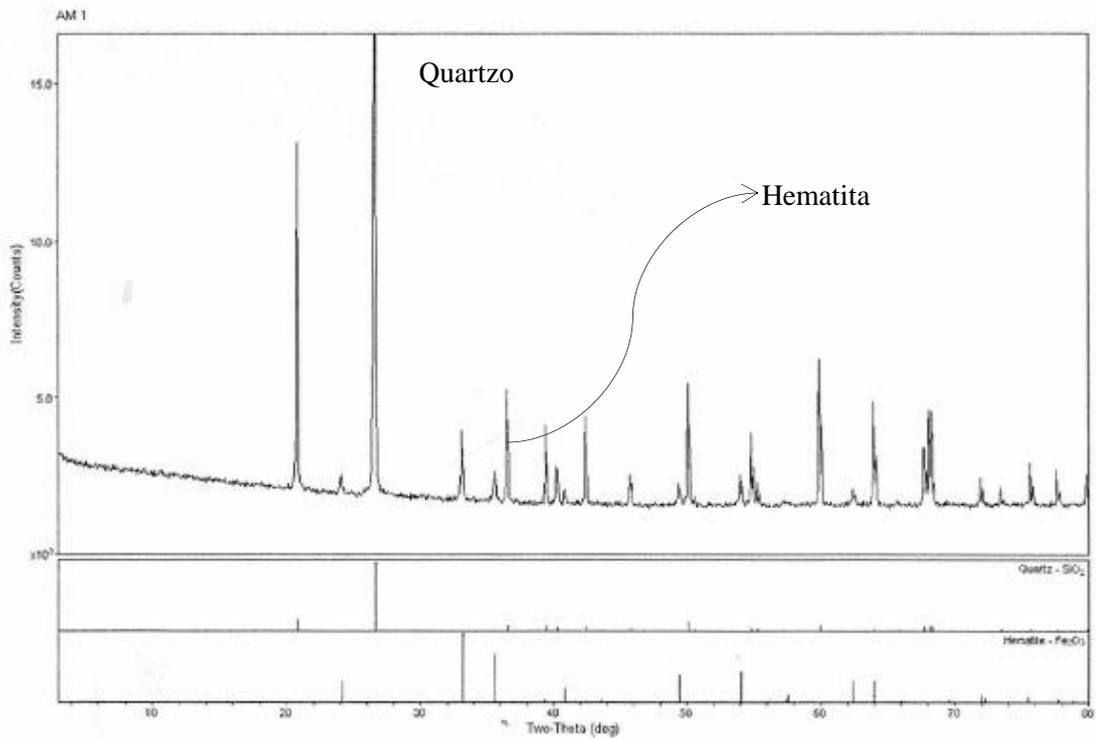


**Figura 4.6.** Detalhe dos minerais presentes no resíduo AM 02, (lente 100x)

A vermiculita é um mineral presente em quantidade consideráveis no rejeito AM 02. Este mineral é formado por silicatos hidratados de alumínio e magnésio, quimicamente se define como:  $(MgFe,Al)_3(Al,Si)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O$ . A vermiculita apresenta coração amarelada em amostras de maior tamanho (5,0 a 15,0 cm de diâmetro), o mineral se esmaga facilmente quando é submetido a qualquer tipo de esforços, apresenta uma expansão em até 15 vezes do seu volume quando é submetido a incrementos de temperatura. Este mineral é semelhante aos minerais de micas devido a sua estrutura lamelar e é considerado inerte já que só reaciona na presença de ácido fluorídrico quente. Pela forma planar e a baixa resistência que apresenta o mineral de vermiculita não é um bom material para ser empregado em filtros de barragens.

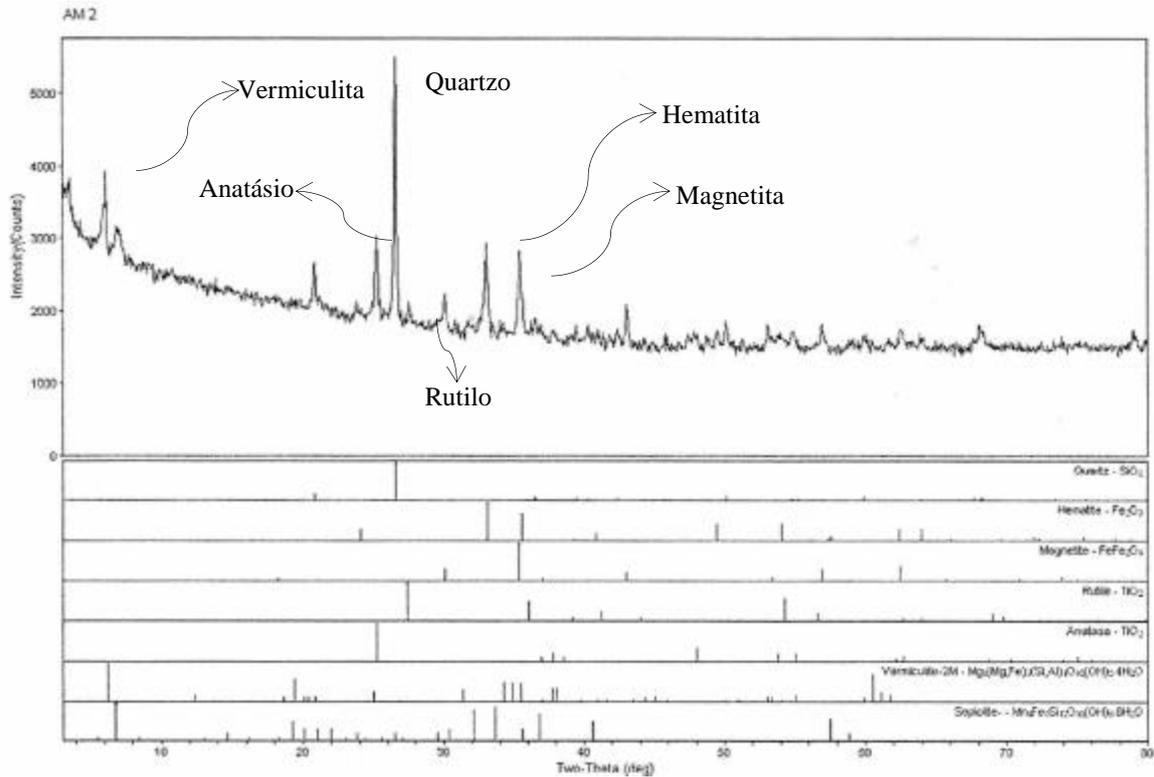
#### 4.4.1 Difractometria de Raio- X

Os resultados do difratograma da amostra correspondente ao rejeito AM 01 demonstraram que o rejeito é composto na sua totalidade por minerais de quartzo e hematita. No difratograma apresentado na Figura 4.7 pode-se observar os picos correspondentes a cada um dos minerais.



**Figura 4.7.** Difratoograma correspondente ao rejeito AM 01

Pela análise da amostra do rejeito AM 02, pode-se observar que este rejeito é constituído predominantemente por quartzo, hematita, magnetita anatásio e vermiculita, sendo Sepiolita e Rutilo elementos traço na amostra. No difratograma da Figura 4.2 pode-se observar os picos correspondente a cada um dos minerais constituintes deste rejeito. A Tabela 4.4 apresenta os minerais presentes em cada rejeito



**Figura 4.8.** Difratoograma correspondente ao rejeito AM 02

**Tabela 4.4.** Minerais presentes nos dois resíduos

<b>Amostra</b>	<b>Minerais</b>	<b>Minerais traços</b>
AM 01	Quartzo e hematita	
AM 02	Vermiculita, quartzo, hematita, magnetita e Anatócio	Sepiolita e rutilo

O rejeito AM 02 apresenta maior variabilidade de minerais de ferro em comparação ao rejeito AM 01. Esta característica tende a gerar uma maior possibilidade de reação química entre os minerais presentes no rejeito AM 02 ao entrar em contato com a água e, por conseguinte uma possível ocorrência do fenômeno da colmatagem. O rejeito AM 01 apresenta em quase sua totalidade minerais de quartzo e hematita, a reação entre esses minerais é quase nula devido a que o quartzo é um mineral inerte. Pelo anterior o rejeito AM 01 tende a apresentar uma maior potencialidade de ser empregados como filtros de barragem, do ponto de vista da mineralogia.

#### 4.4.2 Microsonda Eletrônica

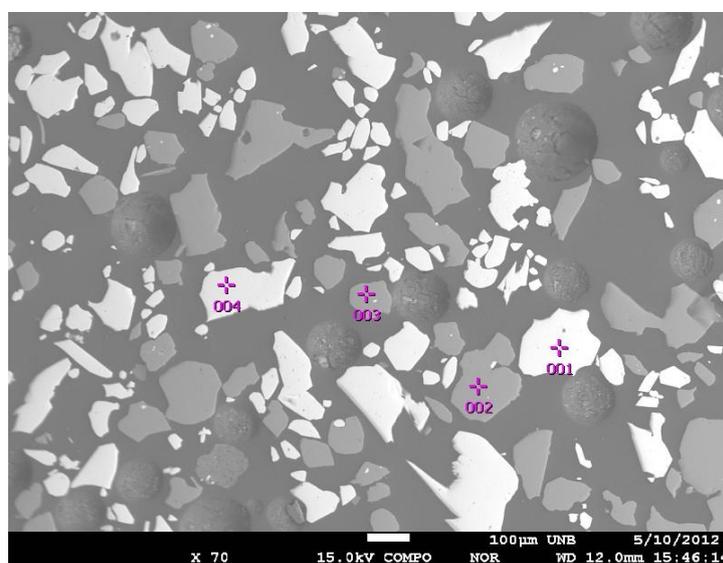
O ensaio qualitativo foi realizado por meio de uma varredura de 10 pontos para cada amostra. Esta varredura visa a fazer a melhor escolha dos minerais do ponto de vista de

forma e visibilidade. A Tabela 4.5 apresenta os elementos químicos presentes nas amostras AM 01 e AM 02. Os elementos químicos encontrados nesta análise correspondem aos minerais encontrados no ensaio de Difratoimetria de Raio-X (Si e Fe). Entretanto, pelo tipo de análise relacionada à microsonda foram detectados outros elementos químicos como Al e elementos traço como P e Ti para a amostra AM 01 quando comparado ao ensaio de DRX.

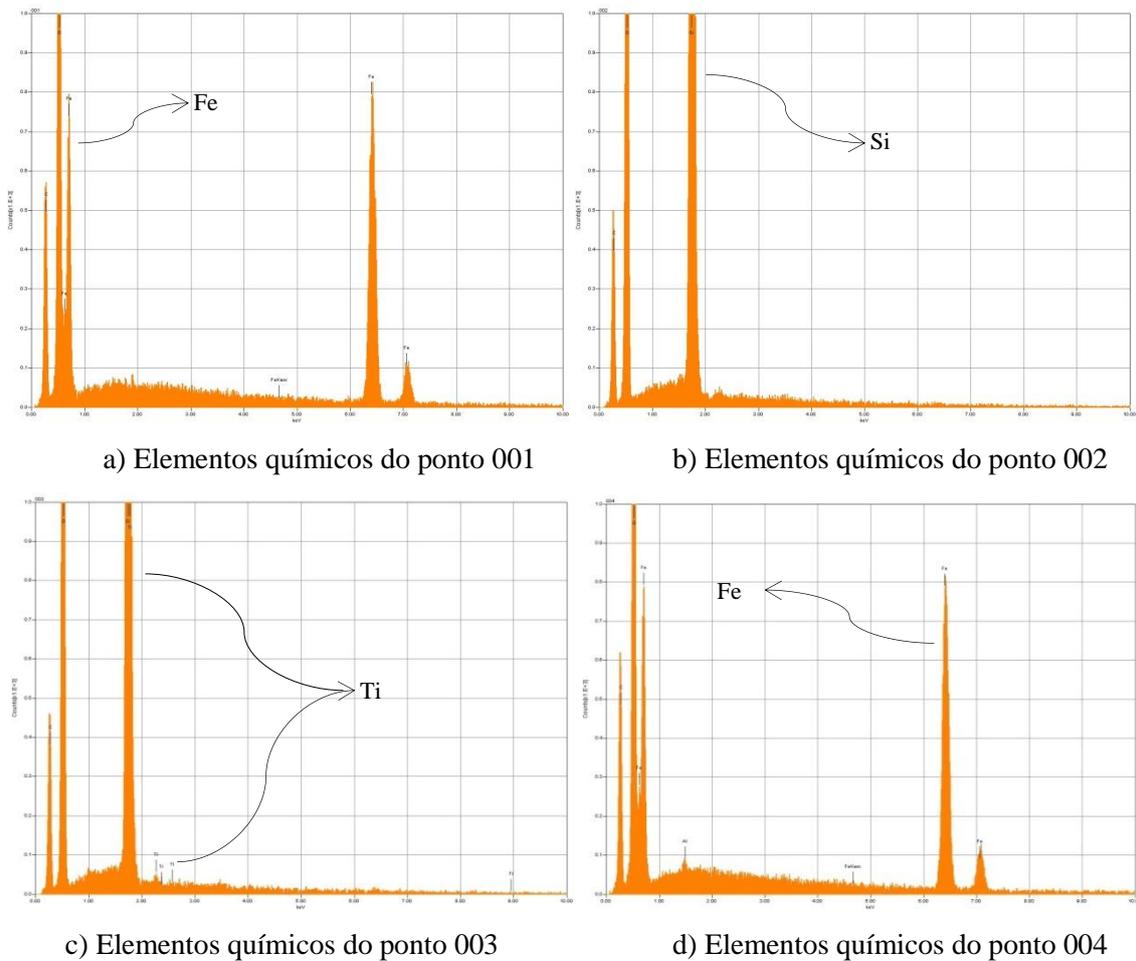
As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam os pontos onde foram realizadas as leituras e os picos correspondentes a cada um dos elementos do rejeito AM 01. Visando obter uma maior informação química das amostras dos dois rejeitos, os pontos de leitura das amostras foram escolhidos segundo a melhor visibilidade de todos os minerais presentes nelas.

**Tabela 4.5.** Elementos químicos presentes nas amostras

Amostra	Elementos químicos	Elementos traço
AM 01	Si, Fe e Al	P, Ti
AM 02	Si, Fe, Ca, Al, Mg, P,	Ti, Mn, Sr

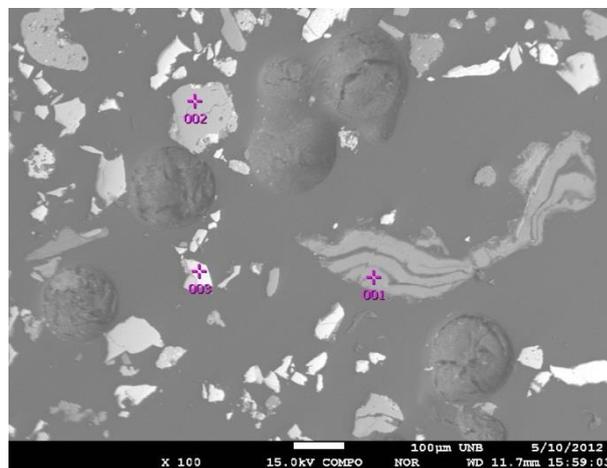


**Figura 4.9.** Detalhe dos locais onde foram feitas as leituras dos elementos químicos correspondentes à amostra AM 01

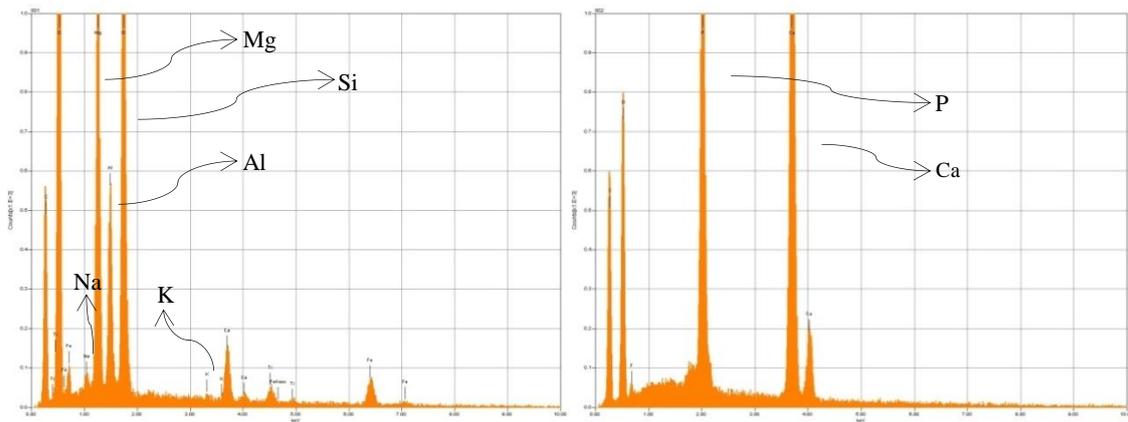


**Figura 4.10.** Espectrogramas dos elementos químicos presentes nos pontos da amostra AM 01. a) ponto 001, b) ponto 002, c) ponto 003, d) ponto 004

Para a amostra AM 02 análise realizada com a microsonda identificou também mais elementos químicos, como P, Na e K e elementos traço como Sr em comparação com o ensaio de DRX. As Figuras 4.11 e 4.12 apresentam os pontos onde foram obtidas as leituras e os picos correspondentes a cada um dos elementos do rejeito AM 02.

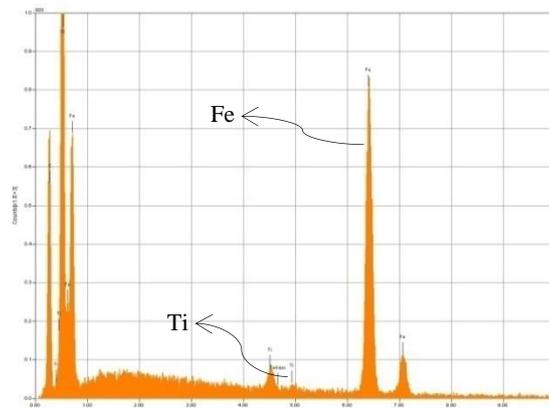


**Figura 4.11.** Detalhe dos locais onde foram feitas as leituras dos elementos químicos correspondentes à amostra AM 02



a) Elementos químicos do ponto 001

b) Elementos químicos do ponto 002



c) Elementos químicos do ponto 003

**Figura 4.12.** Espectrogramas dos elementos químicos presentes nos pontos da amostra AM 02. a) ponto 001, b) ponto 002, c) ponto 003.

A presença de minerais laminares de vermiculita como encontrado no rejeito AM 02 tendem a influenciar nas características de permeabilidade do material devido à estratificação ou laminação que podem ser formadas. Assim, esta estrutura pode orientar o fluxo fazendo com que a condutividade hidráulica aumente. Este indicativo pode habilitar o rejeito AM 02, quanto a composição mineralógica, como um material passível de ser utilizado como material de filtro.

#### 4.5 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS RESÍDUOS

O ferro se solubiliza em condições redutoras, sendo favorecida pela diminuição do pH das água. Entretanto, o ferro se precipita em condições ambientais quando ocorre um aumento no pH da água, aumento de concentração do de ferro ou o meio se torne oxidante.

A presença de sílica e minerais alcalinos e alcalino-terreos no material de filtros é de vital importância para a dinâmica e migração dos elementos de ferro. Neste sentido, são apresentados os valores de pH, Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e compostos químicos dos dois resíduos de ferro. (Tabela 4.6 e 4.7)

**Tabela 4.6.** Resultados químicos correspondentes ao rejeito AM 01

<b>Rejeito AM 01</b>	
P Total	0,428 mg/L
Dióxido de Silício -SiO <sub>2</sub>	1,401 mg/kg
TiO <sub>2</sub>	0,676 mg/kg
pH em KCL	6,4
Trióxido de Ferro III	414,393 mg/kg
Peróxido de Ferro III	400,3301 mg/kg
Óxido de Magnésio	1,177 mg/kg
Trióxido de Alumínio III	12,820 mg/kg
pH em água	7,2
H+Al	0.5 cmolc/dm <sup>3</sup>
CTCtotal	0.7 cmolc/dm <sup>3</sup>

**Tabela 4.7.** Resultados químicos correspondentes ao rejeito AM 02

<b>Rejeito AM 02</b>	
P Total	130,169 mg/L
Dióxido de Silício -SiO <sub>2</sub>	2,700 mg/kg
TiO <sub>2</sub>	25,323 mg/kg
pH em KCL	6,2
Trióxido de Ferro III	683,493 mg/kg
Peróxido de Ferro III	660,2983 mg/kg
Óxido de Magnésio	39,244 mg/kg
Trióxido de Alumínio III	103,218 mg/kg
pH em água	7,8
H+Al	0,66 cmolc/dm <sup>3</sup>
CTCtotal	0.7 cmolc/dm <sup>3</sup>

Analisando os resultados apresentados nas Tabelas 4.6 e 4.7, observa-se que o rejeito AM 02 apresenta maior proporção ferro (peróxido e trióxido de ferro) em comparação com o rejeito AM 01. Com relação aos valores de pH, ambos rejeitos apresentam similitude nos valores tanto em água como em HCl. O rejeito AM 02 apresenta significativamente maior proporção de fósforo em relação ao rejeito AM 01, conformando assim a presença de mineral de apatita. Este fato confirma o resultado obtido no ensaio da microsonda eletrônica, onde é evidente o pico que representa o mineral de apatita e cuja composição química é  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})$ .

Pela análise química pode inferir que o ferro presente nos dois resíduos pode permanecer em solução, e deste modo pouco susceptível a desencadear o efeito de colmatação. Segundo NOGUEIRA (1986) os hidróxidos de ferro se solubilizam com um pH igual ou inferior a 5 ou podem permanecer em solução num meio com pH de até 7,5. Este valor de pH 7,5 deve-se conservar para que o ferro permaneça em solução e não ocorra precipitação.

A Capacidade de Troca Catiônica dos dois resíduos é muito baixa, isto pode ser explicado porque os resíduos não apresentam material orgânico e elementos como ferro, alumínio, sílica, etc. apresentam baixos valores de CTC. É importante o conhecimento do valor da CTC, devido a que os filtros de barragens não podem apresentar material orgânico.

#### 4.6 ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DOS REJEITOS.

Os ensaios de condutividade hidráulica são empregados para avaliação dos materiais normalmente utilizados em filtros de barragens. Nesta pesquisa, como descrito no Capítulo 3, para avaliar o comportamento dos rejeitos de minério de ferro quanto a permeabilidade foram realizados ensaios de condutividade hidráulica utilizando permeômetros de parede rígida a carga constante e permeômetros de parede flexível utilizando a célula triaxial. Os resultados obtidos nestes dois tipos de ensaios para os rejeitos AM 01 e AM 02 encontram-se descritos a seguir.

#### 4.7 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PERMEABILIDADE DE CARGA CONSTANTE

Para obtenção do valor da condutividade hidráulica saturada foi utilizada, conforme descrito no Capítulo 3, a metodologia recomendada pela Norma NBR 13292 (ABNT, 1995). Após a saturação da amostra foi realizada a passagem de fluxo ascendente pela amostra até conseguir pelo menos três medições iguais de volume de água em função do tempo.

Nas Tabelas 4.8 e 4.9 estão representados os valores do coeficiente de permeabilidade saturada determinada em laboratório por meio de ensaios de carga constante para o rejeito AM 01 e AM 02, respectivamente. Nestas tabelas são apresentados os dados relativos às condições de moldagem dos corpos de prova em função da compactidade, isto é, as condições fofa, intermediária e densa.

**Tabela 4.8.** Valores de condutividade hidráulica saturada em ensaios de carga constante para o rejeito AM 01

$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	n (%)	e	DR	$K_{20^\circ C}$ (cm/s)	$G_s$	D50 (mm)
2,13	0,37	0,59	0,95	1.5E-03	3,40	0,19
1,98	0,41	0,72	0,46	5.1E-03		
1,84	0,46	0,85	0,04	5.2E-03		

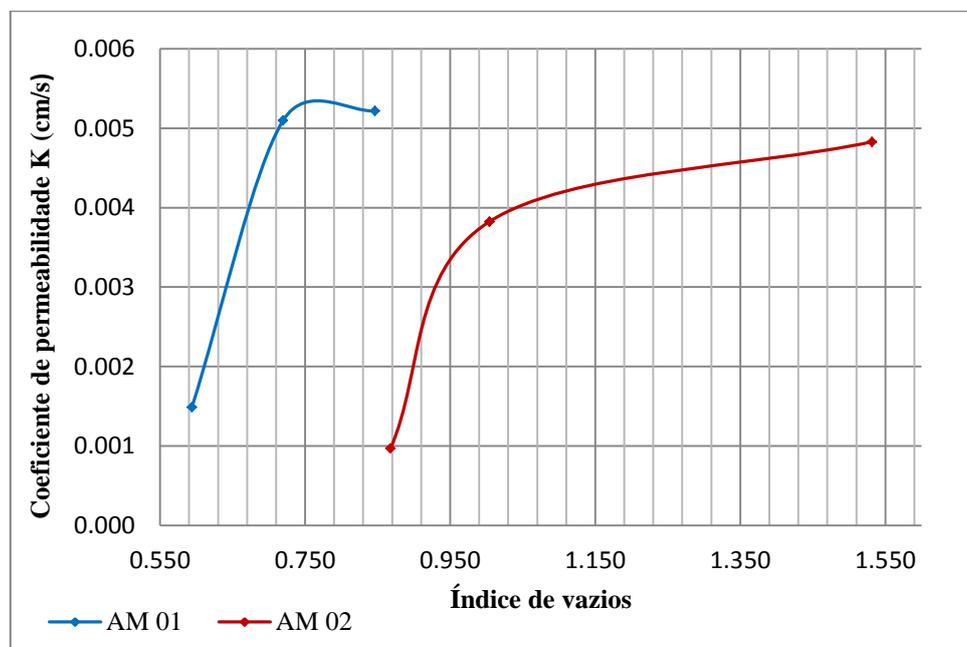
**Tabela 4.9.** Valores de condutividade hidráulica saturada em ensaios de carga constante para o rejeito AM 02

$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	n (%)	e	DR	$K_{20^\circ C}$ (cm/s)	$G_s$	D50 (mm)
1,69	0,49	0,87	0,14	9.7E-04	3,15	0,2
1,57	0,55	1,00	0,90	3.8E-03		
1,34	0,60	1,53	0,02	1.7E-02		

Da tabela anterior pode-se observar que os índices de vazios do rejeito AM 01, apresenta valores menores que o rejeito AM 02, porém a densidade relativa (DR) também é menor, evidenciado um maior estado de compactidade para o rejeito AM 02. O rejeito AM 02, apresentou uma Densidade Relativa (DR) maior que 1 para o estado mais denso, o que representa que o corpo de prova utilizado para o ensaio apresentou um índice de vazios menor que o obtido no ensaio de  $e_{min}$ . Acredita-se que alguma

alteração na condição de umidade durante a moldagem deste corpo prova tenha acarretado esta diferença no estado de compactidade desta amostra.

A Figura 4.13 apresenta a relação entre o coeficiente de permeabilidade e o índice de vazios relativo aos corpos de prova utilizados nos ensaios.



**Figura 4.13.** Curva de coeficiente de permeabilidade versus índice de vazios para os dois rejeitos.

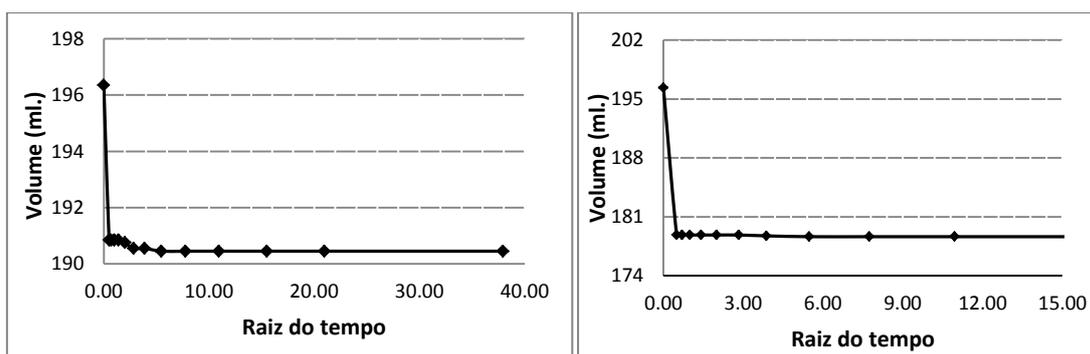
Considerando os resultados obtidos para os dois rejeitos a Figura 4.13 evidencia a variação da permeabilidade em função dos diferentes valores de índices de vazios. Observa-se que para o rejeito AM 01 a permeabilidade aumenta com o aumento do índice de vazios. A permeabilidade correspondente ao índice de vazios máximo apresenta um leve aumento quando comparado ao valor da permeabilidade correspondente ao índice de vazios intermediário. Entretanto, este comportamento pode estar associado à característica do corpo de prova obtido na condição fofa, em que o processo de reconstituição para este grau de compactidade se mostrou bastante difícil, acarretando uma pequena diferença em relação à porosidade obtida na condição intermediária. Este fato provavelmente justifica a pequena diferença encontrada no valor da permeabilidade. Esta condição não se mostrou tão evidente para o rejeito AM 02, onde pode-se verificar uma clara tendência do coeficiente de permeabilidade aumentar à medida que os valores de índice de vazios crescem. Além disso, para este

rejeito, a variação do índice de vazios obtido para cada estado de compactidade foi mais significativa quando comparada ao rejeito AM 01.

#### 4.8 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PERMEABILIDADE NO EQUIPAMENTO TRIAXIAL

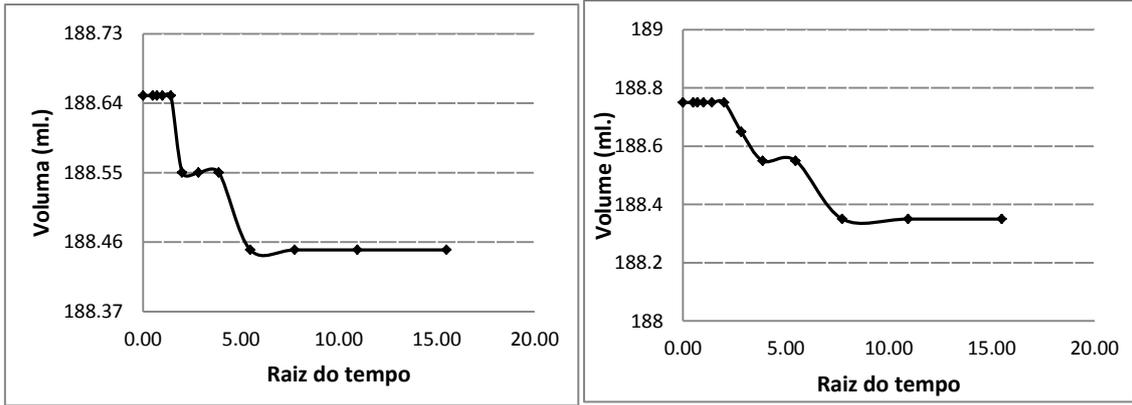
Para obtenção da permeabilidade com o permeâmetro de parede flexível foi utilizada uma célula triaxial. A grande importância deste tipo de ensaio foi a possibilidade de realizar simulações para diferentes condições de confinamento. Neste sentido, os ensaios foram realizados para as mesmas condições de compactidade que os ensaios de permeabilidade a carga constante, porém simulando diferentes condições de confinamento

Para realização dos ensaios, como detalhado no Capítulo 3, foi necessário submeter as amostras as tensões de confinamento de 50, 100, 200 e 400 kPa. As amostras foram inicialmente saturadas e em seguida adensadas para as respectivas tensões de confinamento. As Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 mostram a fase de adensamento correspondente ao rejeito AM 01 nas diferentes condições de compactidade e confinamento adotadas. As Figuras 4.17, 4.18 e 4.19 mostram para o rejeito AM 02 a evolução do processo de adensamento relativo a cada amostra ensaiada nas diferentes condições de compactidade e condições de confinamento.



a) Tensão de 50 kPa

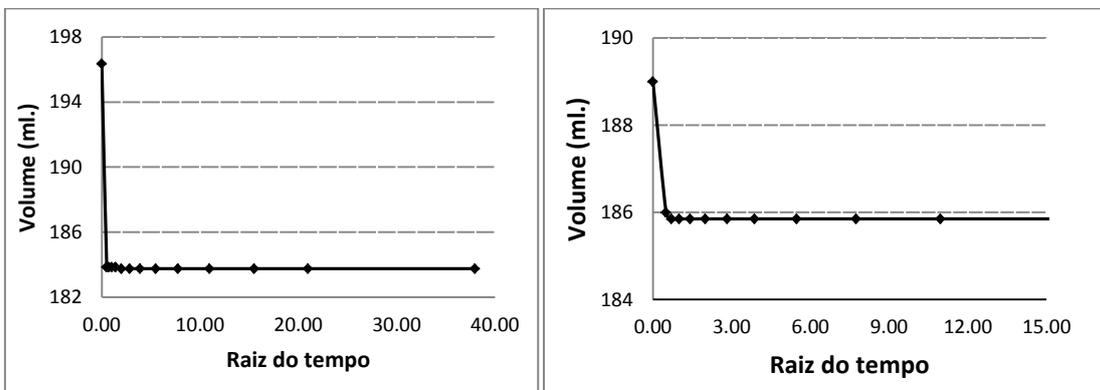
b) Tensão de 100 kPa



c) Tensão de 200 kPa

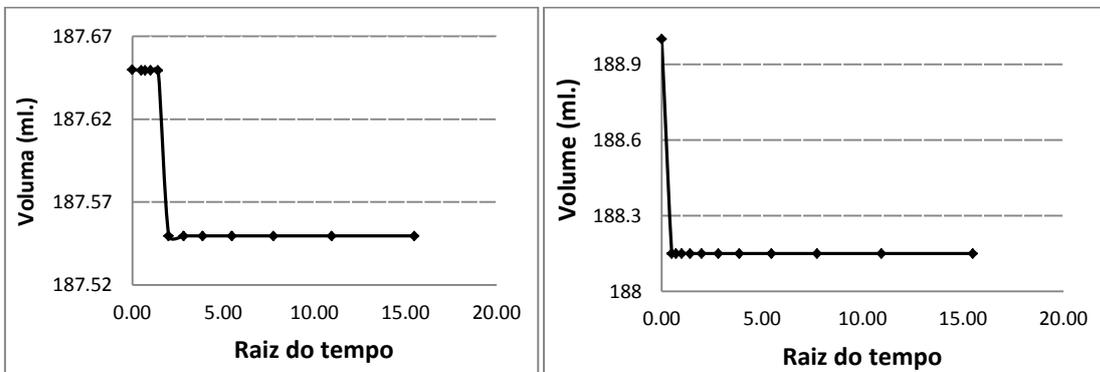
d) Tensão de 400 kPa

**Figura 4.14.** Curvas de adensamento para a densidade máxima do rejeito AM 01



a) Tensão de 50 kPa

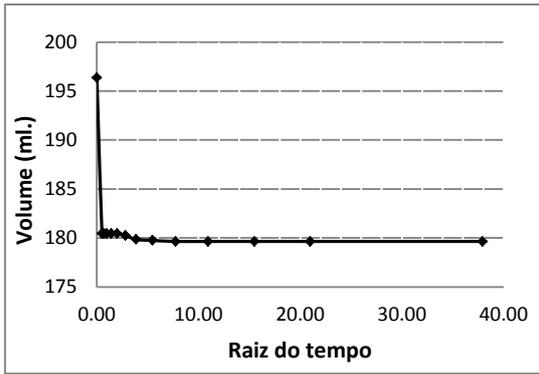
b) Tensão de 100 kPa



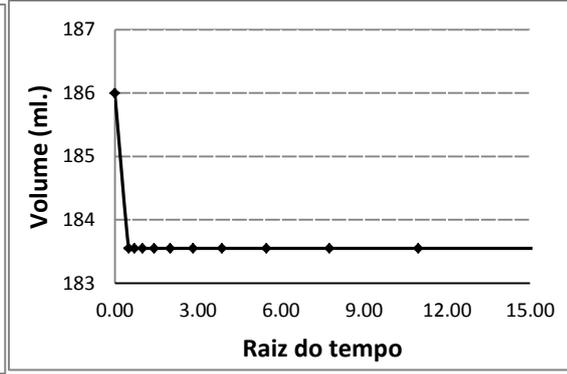
c) Tensão de 200 kPa

d) Tensão de 400 kPa

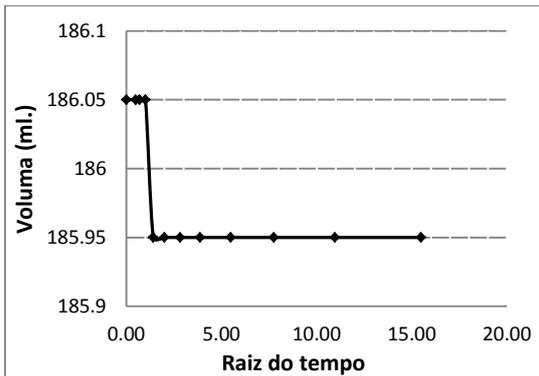
**Figura 4.15.** Curvas de adensamento para a densidade intermediária do rejeito AM 01



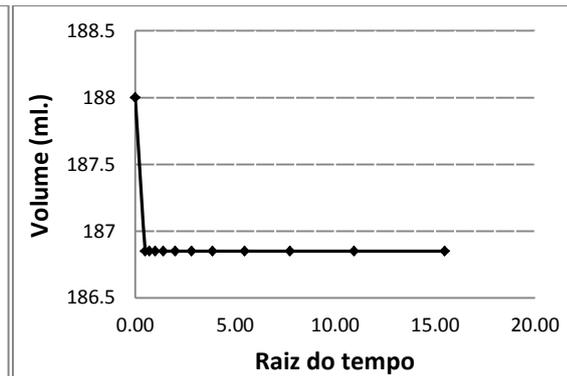
a) Tensão de 50 kPa



b) Tensão de 100 kPa

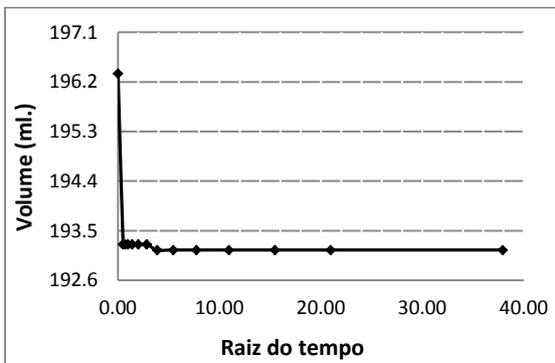


c) Tensão de 200 kPa

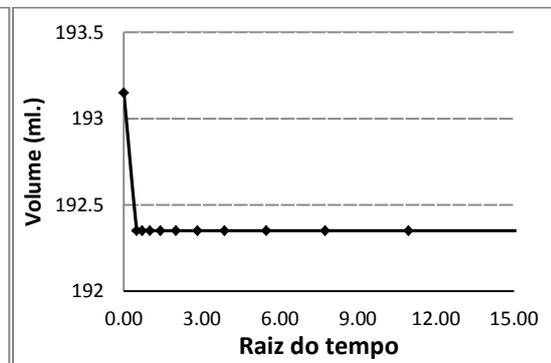


d) Tensão de 400 kPa

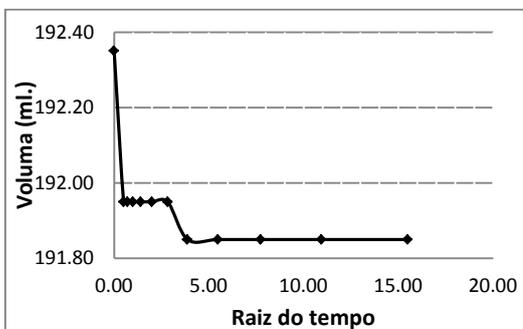
**Figura 4.16.** Curvas de adensamento para a densidade mínima do rejeito AM 01



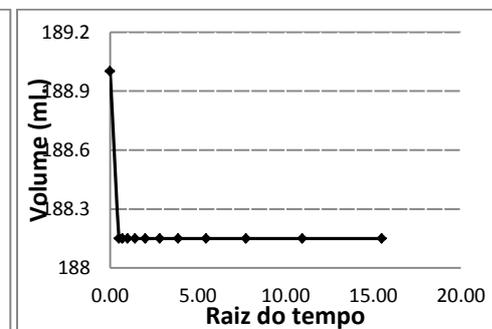
a) Tensão de 50 kPa



b) Tensão de 100 kPa

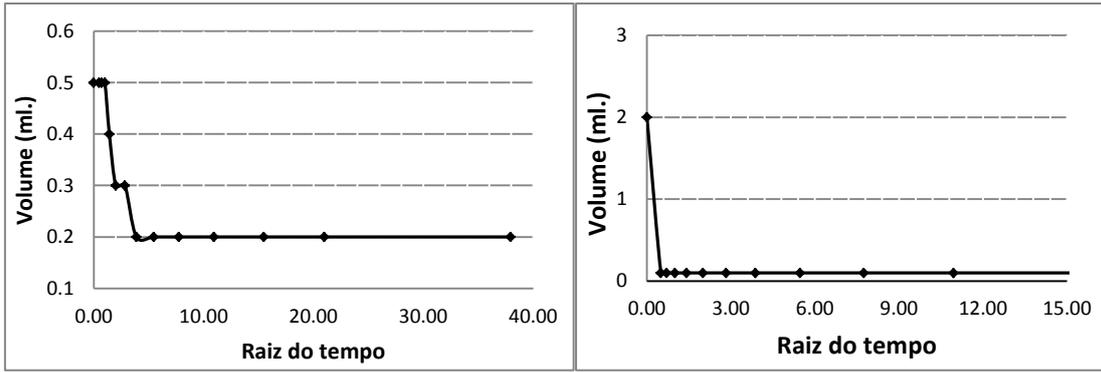


c) Tensão de 200 kPa



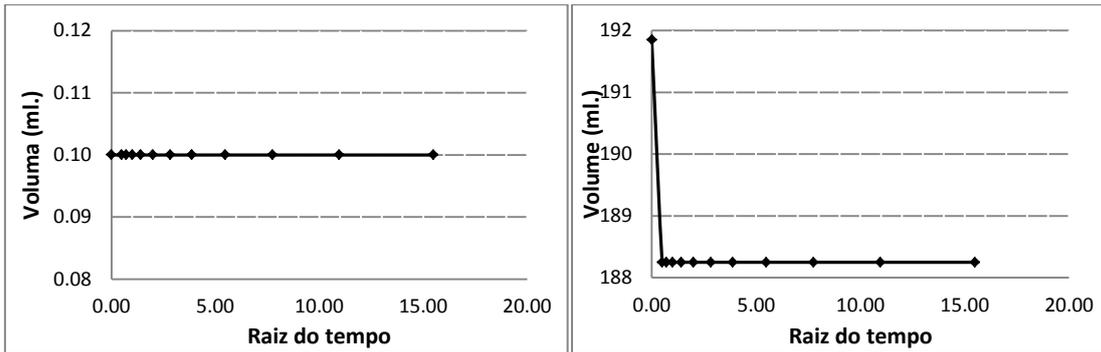
d) Tensão de 400 kPa

**Figura 4.17.** Curvas de adensamento para a densidade máxima do rejeito AM 02



a) Tensão de 50 kPa

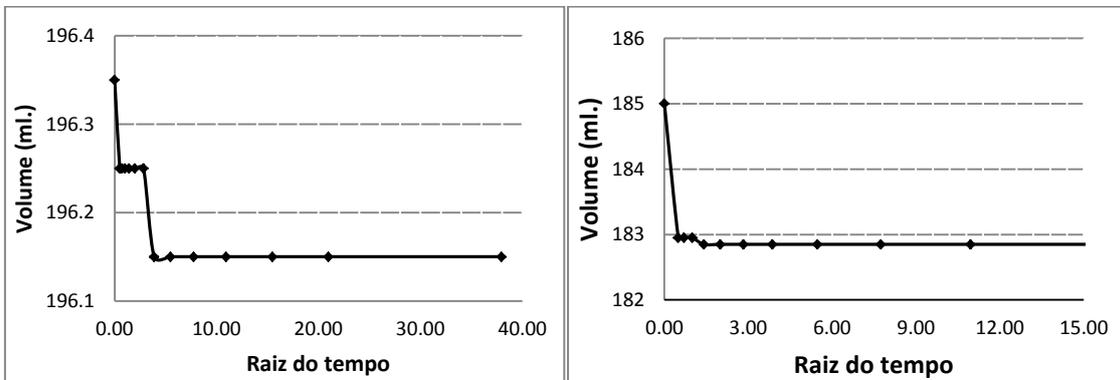
b) Tensão de 100 kPa



c) Tensão de 200 kPa

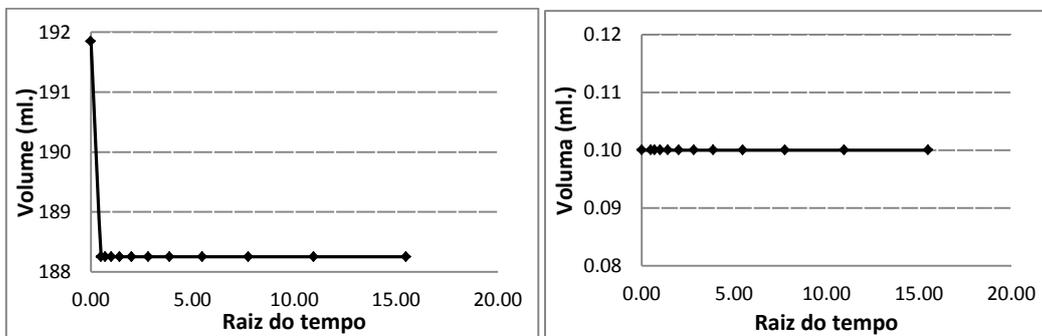
d) Tensão de 400 kPa

**Figura 4.18.** Curvas de adensamento para a densidade intermediária do rejeito AM 02



a) Tensão de 50 kPa

b) Tensão de 100 kPa



c) Tensão de 200 kPa

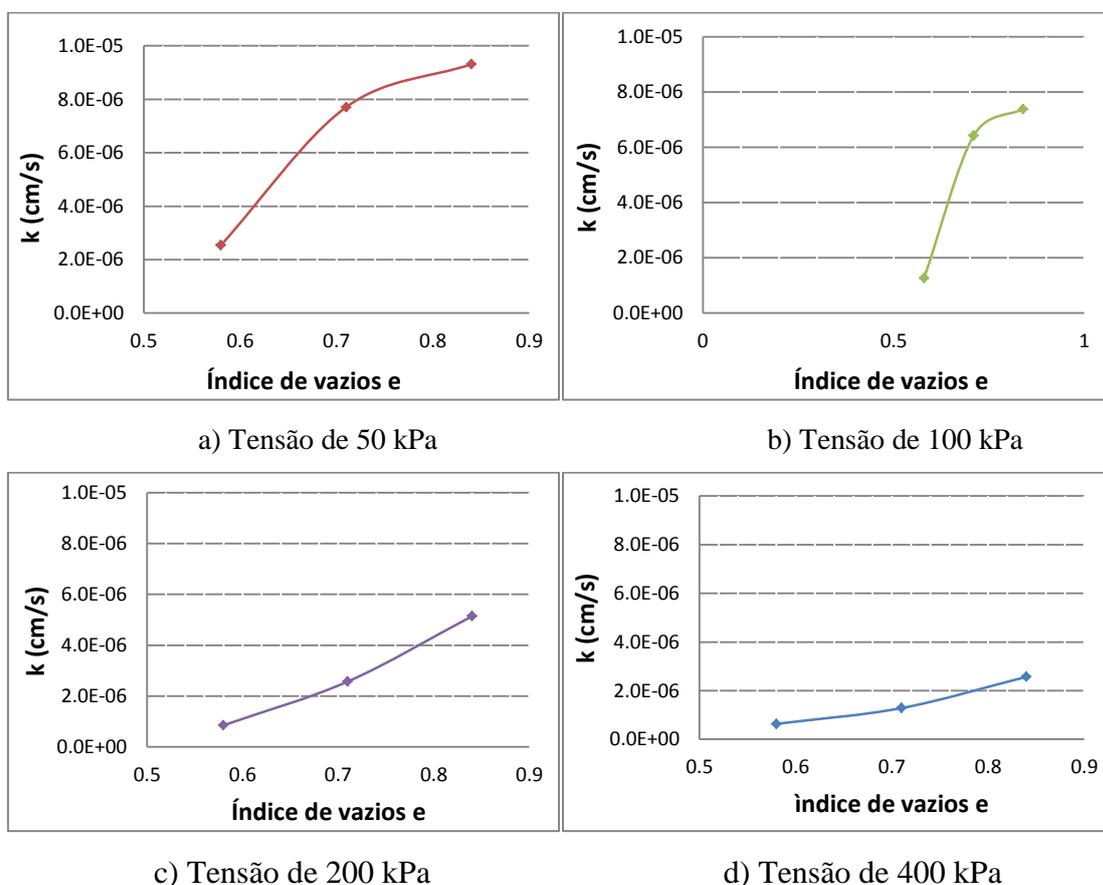
d) Tensão de 400 kPa

**Figura 4.19.** Curvas de adensamento para a densidade mínima do rejeito AM 02

Observa-se que para os dois rejeitos a maioria das curvas apresentou uma significativa variação volumétrica nos primeiros instantes após a aplicação da carga. Este fato já evidencia a propriedade drenante dos rejeitos, uma vez que a dissipação das poropressões geradas pelo confinamento é imediatamente dissipada após a abertura das drenagens no ensaio.

Com relação ao coeficiente de permeabilidade obtido para cada rejeito, as Figura 4.20 e 4.21 apresentam, respectivamente, a variação da permeabilidade com índice de vazios para o rejeito AM 01 e AM 02. Os valores da permeabilidade obtidos nestes ensaios para os dois rejeitos em relação ao estado de compactidade e às respectivas tensões de confinamento encontram-se apresentadas nas Tabelas 4.10 e 4.11.

De uma maneira geral, igualmente ao que foi obtido no permeômetro de carga constante pode-se perceber um aumento no coeficiente de permeabilidade de ambos os rejeitos com o incremento dos índices de vazios para as mesmas tensões de confinamento.



**Figura 4.20.** Curvas de permeabilidade em relação a variação do índice de vazios para o rejeito AM 01.

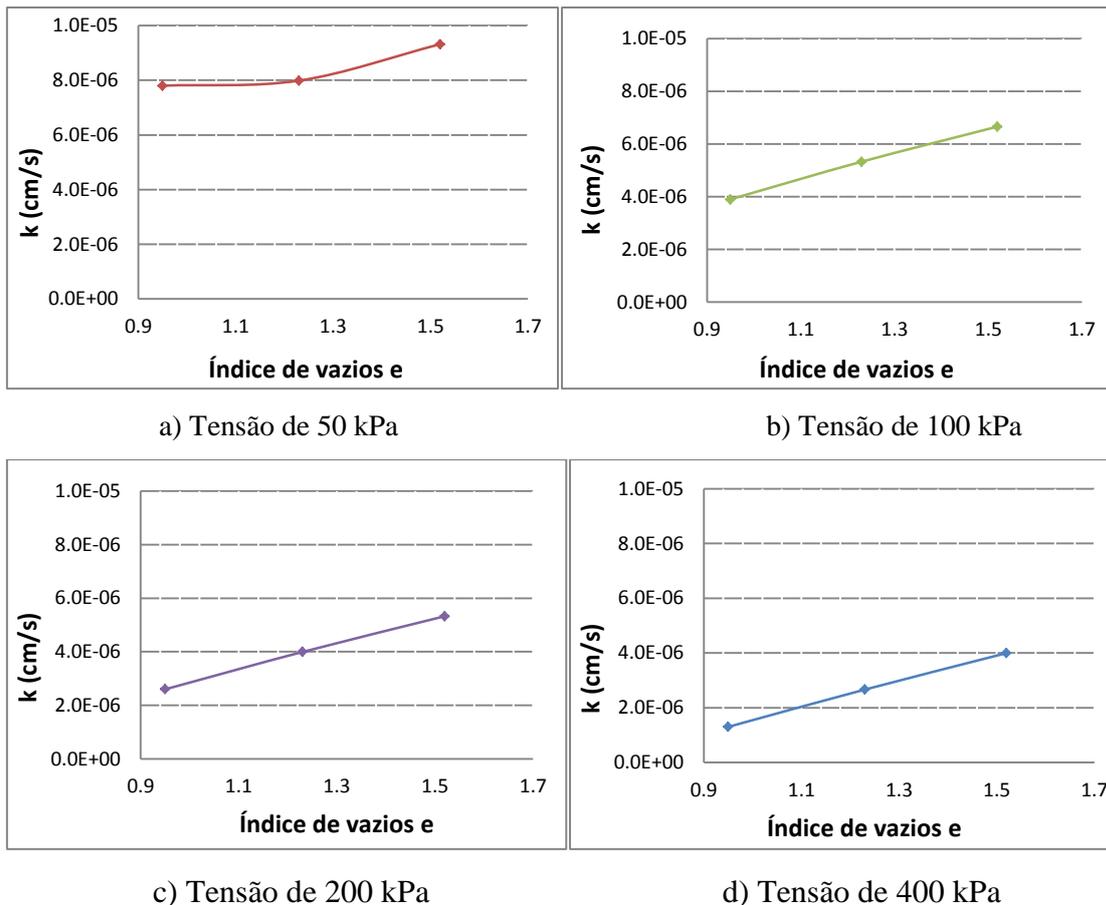
**Tabela 4.10.** Valores da permeabilidade em relação ao índice de vazios e tensões confinantes do rejeito AM 01.

<b>DR</b>	<b>Índice de vazios (e)</b>	<b>Tensão (kPa)</b>	<b>Coefficiente de permeabilidade k (cm/s)</b>
0,65	0,52	50	2,5E-06
		100	1,2E-06
		200	8,4E-07
		400	6,3E-07
0,92	0,60	50	7,7E-06
		100	6,4E-06
		200	2,5E-06
		400	1,2E-06
0,38	0,74	50	9,3E-06
		100	7,3E-06
		200	5,1E-06
		400	2,5E-06

**Tabela 4.11.** Valores da permeabilidade em relação ao índice de vazios e tensões confinantes do rejeito AM 02

<b>DR</b>	<b>Índice de vazios (e)</b>	<b>Tensão (kPa)</b>	<b>Coefficiente de permeabilidade k (cm/s)</b>
0,76	0,84	50	7,8E-06
		100	3,9E-06
		200	2,6E-06
		400	1,3E-06
0,70	1,12	50	7,9E-06
		100	5,3E-06
		200	3,9E-06
		400	2,6E-06
0,38	1,3	50	9,3E-06
		100	6,6E-06
		200	5,3E-06
		400	3,9E-06

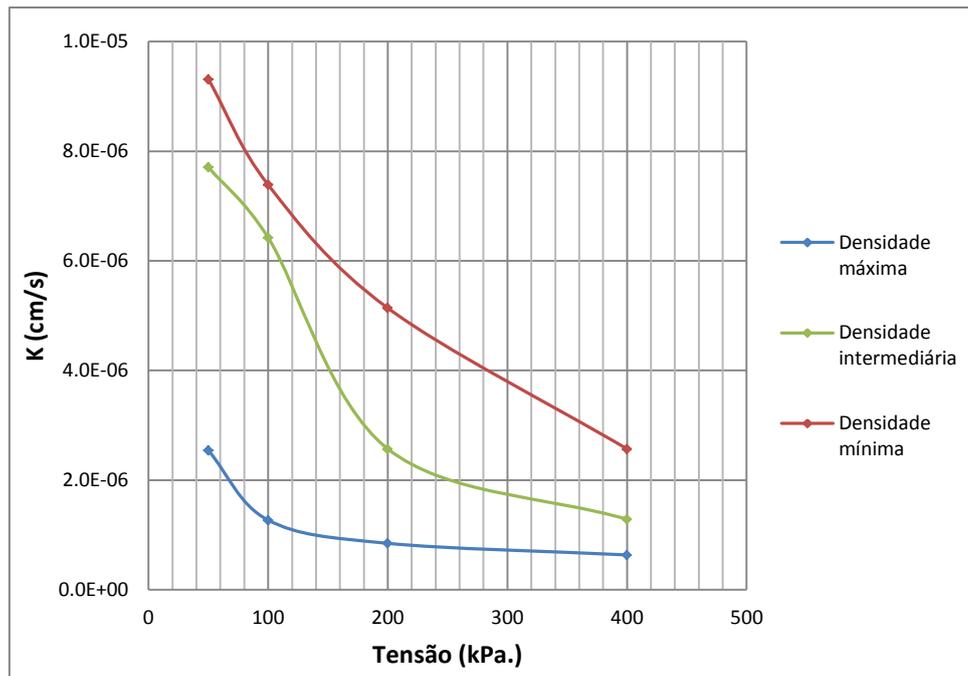
Deste modo, observando as curvas relativas à variação do coeficiente de permeabilidade com índice de vazios para o rejeito AM 01, verifica-se uma tendência comum de variação da permeabilidade com o aumento do índice de vazios para as cada tensão de confinamento adotada. Entretanto, o aumento da tensão de confinamento proporcionou uma redução no valor do coeficiente de permeabilidade. No caso da tensão de 50 kPa o coeficiente de permeabilidade para condição fofa foi de  $9,32 \times 10^{-6}$  cm/s enquanto que para mesma condição de compactidade, mas para a tensão de confinamento de 400 kPa o valor do coeficiente de permeabilidade foi de  $2,57 \times 10^{-6}$  cm/s .



**Figura 4.21.** Curvas de permeabilidade em relação a variação do índice de vazios para o rejeito AM 02

Para o rejeito AM 02 as variações da permeabilidade foram semelhantes às obtidas para o rejeito AM 01. Entretanto, um aspecto importante comparando o rejeito AM 02 com o rejeito AM 01 refere-se ao aspecto das curvas de variação do coeficiente de permeabilidade com a compacidade em função da variação da tensão de confinamento. No caso do rejeito AM 02, diferentemente do que ocorreu com o rejeito AM 01, as variações, exceto para tensão de 50 kPa, foram praticamente lineares. Este fato pode ser explicado pelas diferenças nas características granulométricas e mineralógicas dos dois rejeitos que podem justificar estas diferenças com relação ao comportamento em relação à permeabilidade.

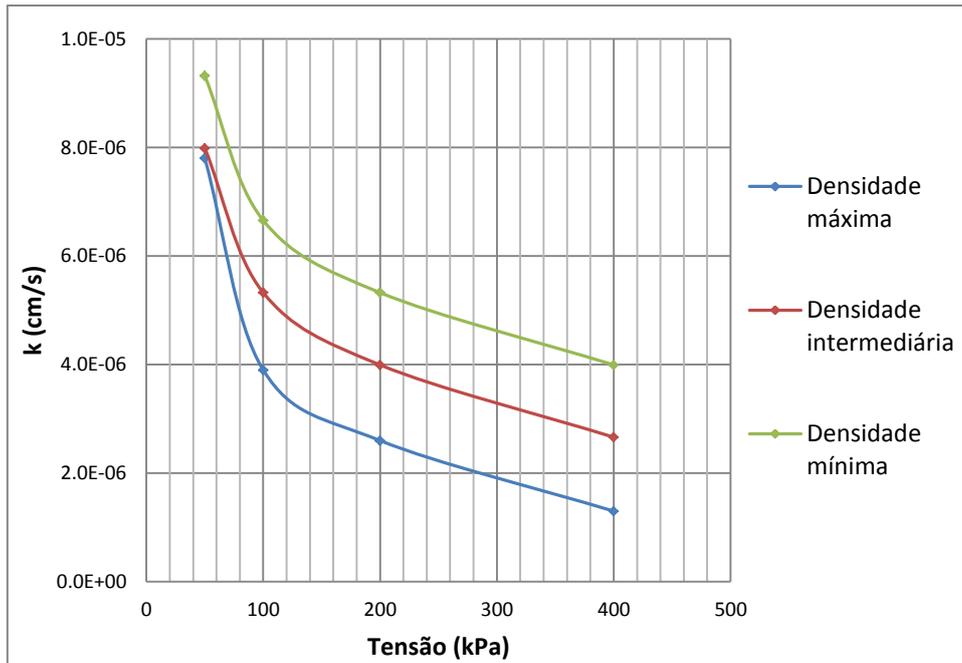
Considerando estas particularidades as Figura 4.22 e 4.23 apresentam a variação do coeficiente de permeabilidade com a tensão confinante para os diferentes graus de compacidade para os rejeitos AM 01 e AM 02 respectivamente.



**Figura 4.22.** Relação das tensões confinantes e os coeficientes de permeabilidade para cada uma das compacidades do rejeito AM 01.

Pela Figura 4.22 pode-se observar que o rejeito AM 01 sofreu um decréscimo na permeabilidade com o aumento da tensão confinante para todos os estados de compactação. A amostra correspondente a densidade máxima experimentou uma menor permeabilidade em comparação com a amostra na condição de densidade intermediária e mínima. As variações no coeficiente de permeabilidade em função do efeito do confinamento foram mais significativas para condições mais fofas quando comparadas com as condições mais densas.

Analisando o rejeito AM 02 (Figura 4.23), observa-se que o rejeito AM 02 sofreu um decréscimo na permeabilidade com o aumento da tensão confinante para todos os estados de compactação. Igualmente ao rejeito AM 01, a densidade máxima apresentou um menor coeficiente de permeabilidade em comparação com as amostras na condição intermediária e fofa. Para a tensão de confinamento de 50 kPa os valores do coeficiente de permeabilidade na condição densa e intermediária convergiram para um valor muito próximo. Um comportamento importante apresentado por este rejeito foi uma condição praticamente constante da permeabilidade com o acréscimo da tensão de confinamento para os diferentes estados de compactação estudados. Este fato pode ser evidenciado pelo certo grau de paralelismo entre as curvas relativas a este rejeito, diferentemente do comportamento apresentado pelo rejeito AM 01.



**Figura 4.23.** Relação das tensões confinantes e o coeficientes de permeabilidade para cada uma das compacidades do rejeito 2.

Comparando ainda os dois resíduos pode-se observar que o valor coeficiente de permeabilidade do rejeito AM 01 no estado de maior compacidade foi menor que o valor obtido para o rejeito AM 02 para o mesmo estado de compacidade. Este comportamento pode ser explicado pela presença de minerais de vermiculita neste rejeito e a possibilidade de ocorrer uma possível estratificação do material conforme aumenta a compacidade do material.

Avaliando os resultados obtidos nos ensaios de permeabilidade no equipamento de carga variável e triaxial verificou-se uma diferença acentuada nos valores das permeabilidades obtidas em ambos rejeitos. As Tabelas 4.12 e 4.13 apresentam a comparação dos valores de k obtidos nos dois tipos de ensaios em condições semelhantes de compacidade para os rejeitos AM 01 e Am 02 respectivamente.

**Tabela 4.122.** Comparação entre os valores da permeabilidade obtidos nos ensaios de carga variável e célula triaxial para o rejeito AM 01

Ensaio de carga variável)		Ensaio na célula triaxial		
e	k (cm/s)	e	Tensão (kPa)	k (cm/s)
0,59	1.5E-03	0,60	50	7,7E-06
			100	6,4E-06
			200	2,5E-06
			400	1,2E-06
0,72	5.1E-03	0,74	50	9,3E-06
			100	7,3E-06
			200	5,1E-06
			400	2,5E-06

**Tabela 4.133.** Comparação entre os valores da permeabilidade obtidos nos ensaios de carga variável e célula triaxial para o rejeito AM 02

Ensaio de carga variável)		Ensaio na célula triaxial		
e	k (cm/s)	e	Tensão (kPa)	k (cm/s)
0,87	9.7E-04	0,84	50	7,8E-06
			100	3,9E-06
			200	2,6E-06
			400	1,3E-06
1,00	3.8E-03	1,12	50	7,9E-06
			100	5,3E-06
			200	3,9E-06
			400	2,6E-06
1,53	1.7E-02	1,30	50	9,3E-06
			100	6,6E-06
			200	5,3E-06
			400	3,9E-06

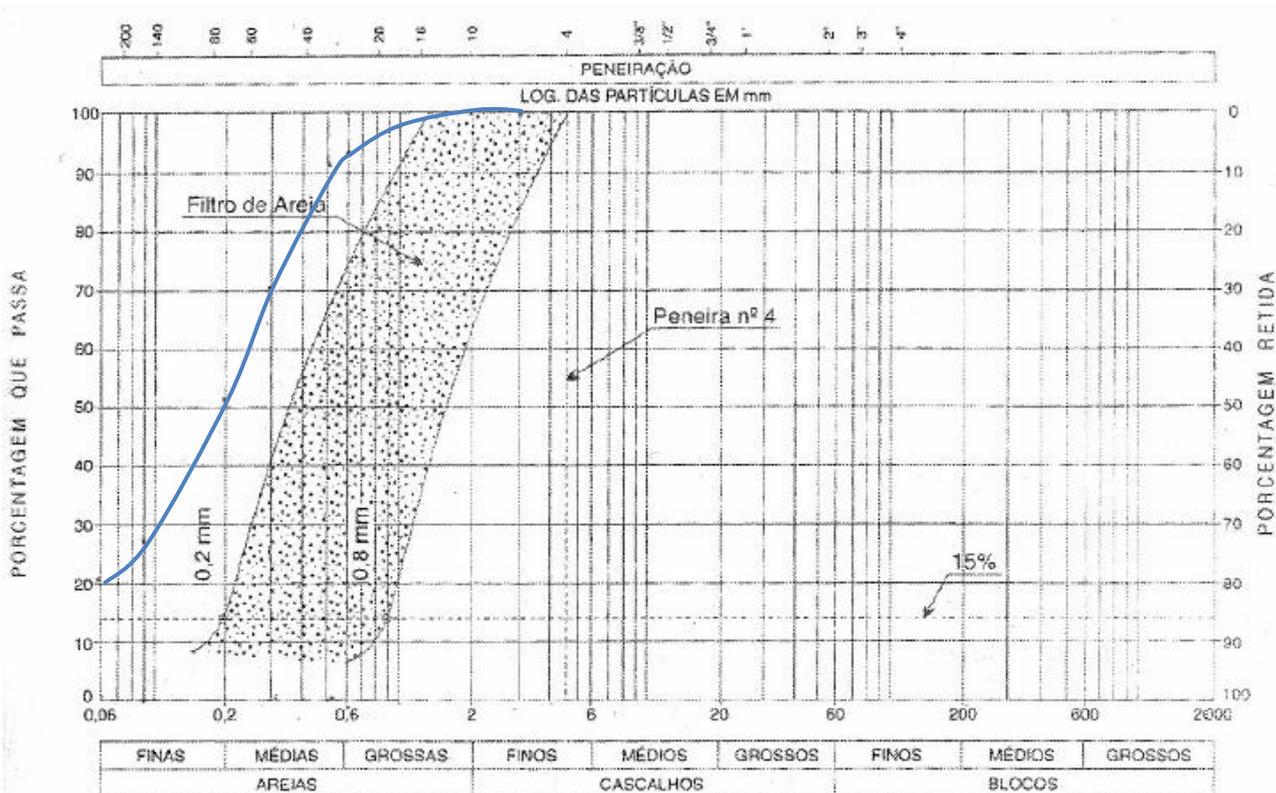
Analisando os resultados apresentados nestas tabelas observa-se que a diferença encontrada entre os dois procedimentos de avaliação da permeabilidade foi independente da condição de confinamento da amostra ou mesmo da condição de compacidade, evidenciando o efeito dos procedimento adotado em cada ensaio. Esta situação sugere a possibilidade de ter ocorrido algum problema nas análises realizadas no equipamento triaxial, em que a avaliação do volume de água percolado nos corpos de prova foi bastante reduzida. Acredita-se que algum tipo de obstrução ocorreu no disco poroso e/ou nas linhas de drenagem durante o ensaio ocasionado possivelmente pela

migração de partículas finas tanto na fase de adensamento quanto na avaliação da permeabilidade. Ressalta-se que várias tentativas foram feitas no sentido de contornar este tipo de problema no equipamento triaxial, mas sem o devido sucesso. Percebe-se, entretanto, que esta situação, como apresentado anteriormente nas análises destes resultados, não invalida a aplicabilidade deste tipo de metodologia na avaliação do efeito do confinamento, pois mesmo com um volume reduzido de fluxo foi possível quantificar o efeito da tensão de confinamento no valor da permeabilidade.

#### *4.8.1 Avaliação dos rejeitos nos critério de projeto de filtros*

Para avaliação do comportamento dos dois rejeitos quando utilizados como materiais constituintes de um filtro de barragem foram feitas algumas considerações a respeito do seu enquadramento dentro de alguns critérios de filtro. Ressalta-se que estas análises foram realizadas com base nos dados granulométricos obtidos para cada rejeito sem contudo obter uma relação com os materiais adjacentes, devido basicamente se tratar de uma pesquisa envolvendo somente a avaliação das características dos rejeitos. A proposta desta análise objetivou simplesmente verificar como os rejeitos se enquadrariam nestes critérios em comparação aos materiais granulares comumente utilizados em filtros de barragens.

Neste contexto, observa-se que o rejeito AM 01 não se ajusta ao critério de projeto para filtros de areia proposto por SHERARD (1984), o rejeito apresenta uma granulometria típica de areias finas e medias e a granulometria proposta pelo autor para este critério corresponde a areias médias e grossas. A Figura 4.24 apresenta a faixa granulométrica proposta para material de filtro e a curva granulométrica correspondente ao rejeito AM 01.

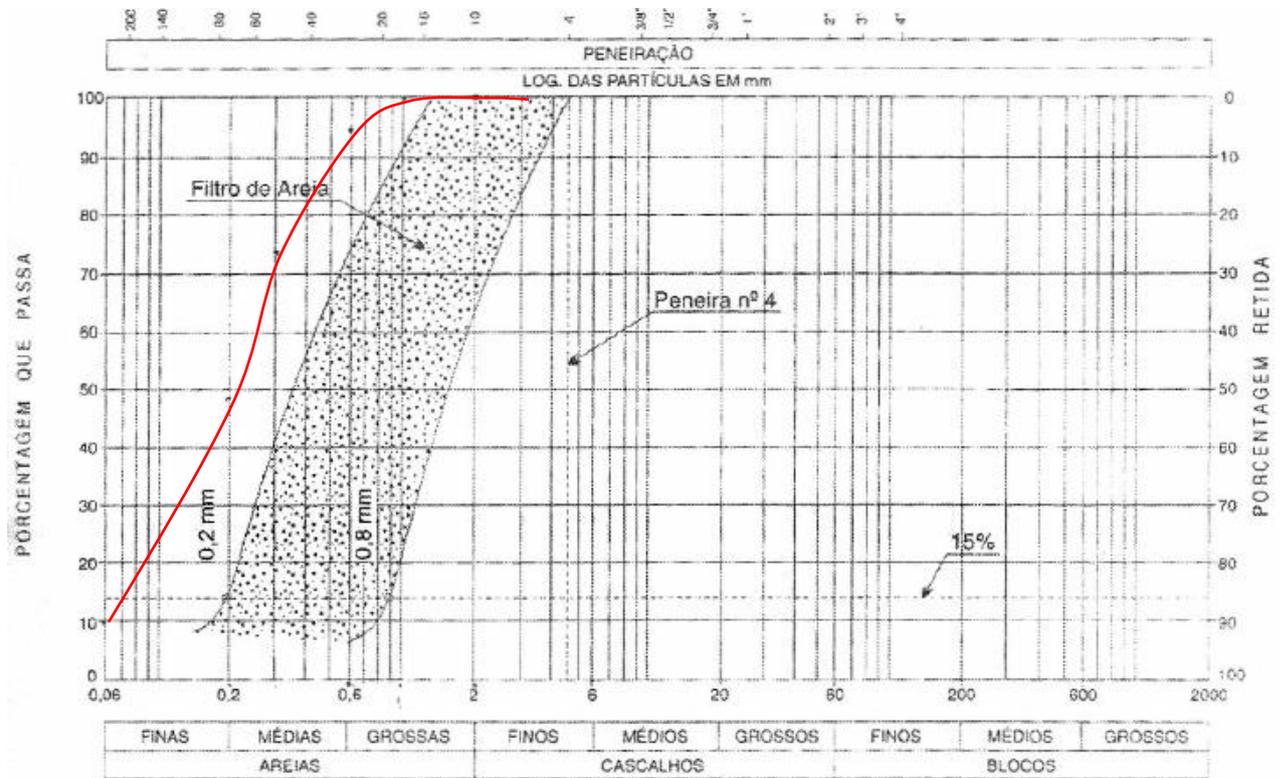


**Figura 4.24.** Curva granulométrica do resíduo 1 e a faixa granulométrica para filtros arenosos segundo SHERARD

Igualmente ao que ocorreu com o rejeito AM 01 aconteceu com o rejeito AM 02, o material não se ajusta ao critério de projeto para filtros de areia proposto por SHERARD (1984). O rejeito AM 02 apresenta uma granulometria de areias finas e medias enquanto a faixa proposta por este mesmo autor corresponde a faixa de areia media a grossa . A Figura 4.25 apresenta a faixa granulométrica proposta para o material granular a ser utilizado no filtro e a curva granulométrica do rejeito AM 02. Contudo, vale ressaltar que o rejeito não deve ser analisado puramente pelas suas características granulométricas, pois se tratando de material oriundo de um intenso processo de britagem apresenta partículas mais finas, mas não necessariamente com comportamento comum a estes tamanhos de grãos. Assim, mesmo com dimensões reduzidas os rejeitos granulares tendem a apresentar baixa ou nenhuma plasticidade e altos valores de coeficiente de permeabilidade.

Esta condição pode ser evidenciada pela comparação dos valores de permeabilidade obtidos para os dois rejeitos no equipamento de parede rígida com o intervalo aproximado do coeficiente de permeabilidade para diversos tipos de solos apresentado por MARSAL & RESÉNDIZ (1975) em que o coeficiente de permeabilidade

correspondente a arenas limpas. Infelizmente devido aos problemas evidenciados na avaliação do coeficiente de permeabilidade no equipamento de parede flexível esta avaliação foi prejudicada.



**Figura 4.25.** Curva granulométrica do resíduo 2 e a faixa granulométrica para filtros arenosos segundo SHERARD

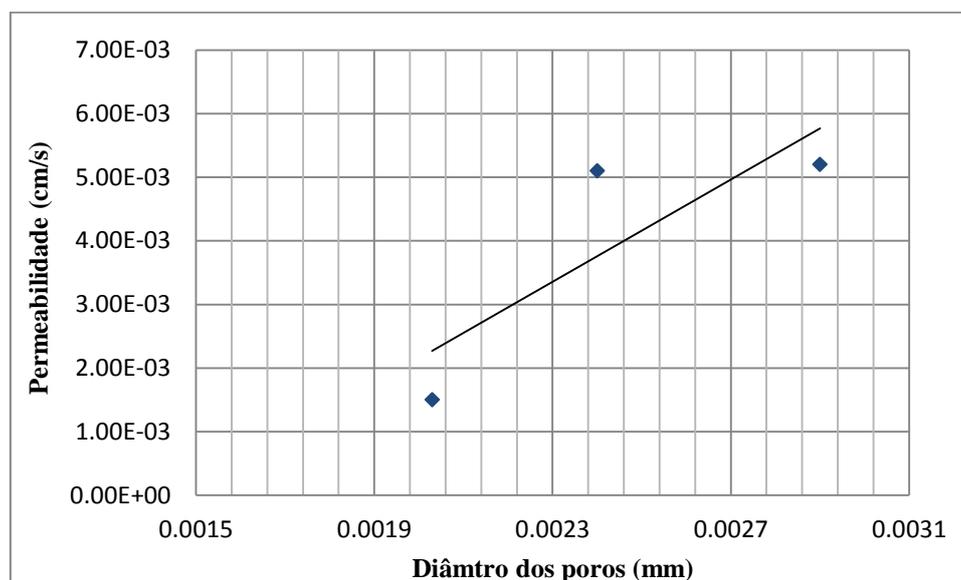
Com relação à avaliação do diâmetro dos poros dos rejeitos, foi avaliada a metodologia proposta por ATTERBERG (1908) para determinação dos poros do material (Equação 2.16). Assim, para o rejeito AM 01 o valor de  $p_{av}$  foi  $3,0e-3$  mm e para o rejeito AM 02 o valor de  $p_{va}$  foi  $0,012$  mm.. Considerando o critério proposto por WITHMAN (1980) para determinação do diâmetro de poros (Equação 2.17) a os valores obtidos foram  $12,1e-3$  mm para o rejeito AM 01 e  $0,06$ mm para o rejeito AM 02. A Tabela 4.14 apresenta os valores do diâmetro dos poros para os diferentes graus de compactação adotados para ambos os rejeitos.

**Tabela 4.14.** Valores do diâmetro dos poros para os dois resíduos segundo a metodologia de ATTERBERG e WITHMAN

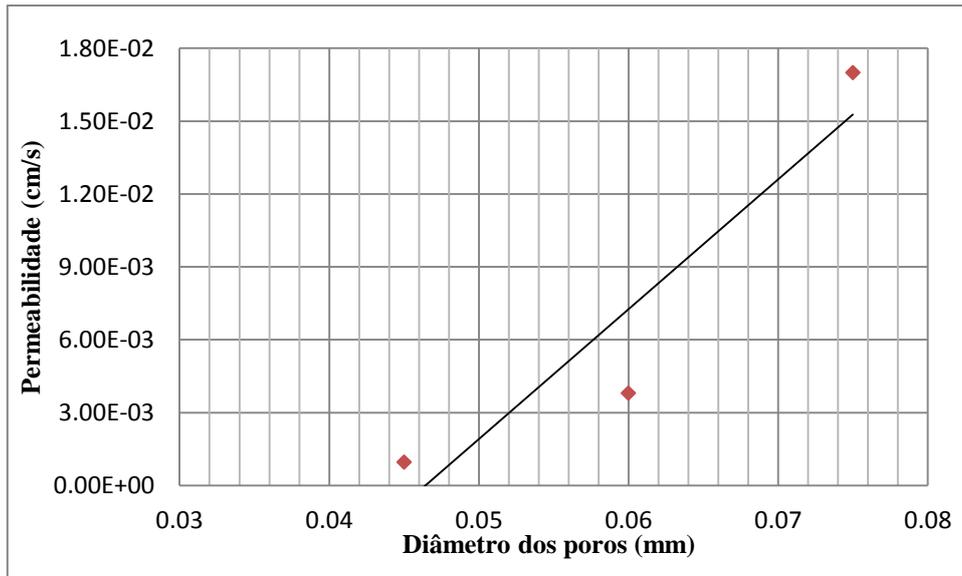
Amostras	Diâmetro dos poros (mm) Atterberg (1908)	Diâmetros dos poros (mm) Withman (1980)		
		Fofo	Intermediária	Denso
AM 01	$3 \times 10^{-5}$	$2,9 \times 10^{-3}$	$2,4 \times 10^{-3}$	$2,03 \times 10^{-3}$
AM 02	0,012	0,075	0,060	0,045

Observ-se que o rejeito AM 02 apresenta um maior valor do diâmetro dos poros para os diferentes estados de compacidade em comparação com o rejeito AM 01.

Complementando esta análise as Figura 4.26 e 4.27 apresentam a relação entre a permeabilidade e o diâmetro dos poros dos dois rejeitos.



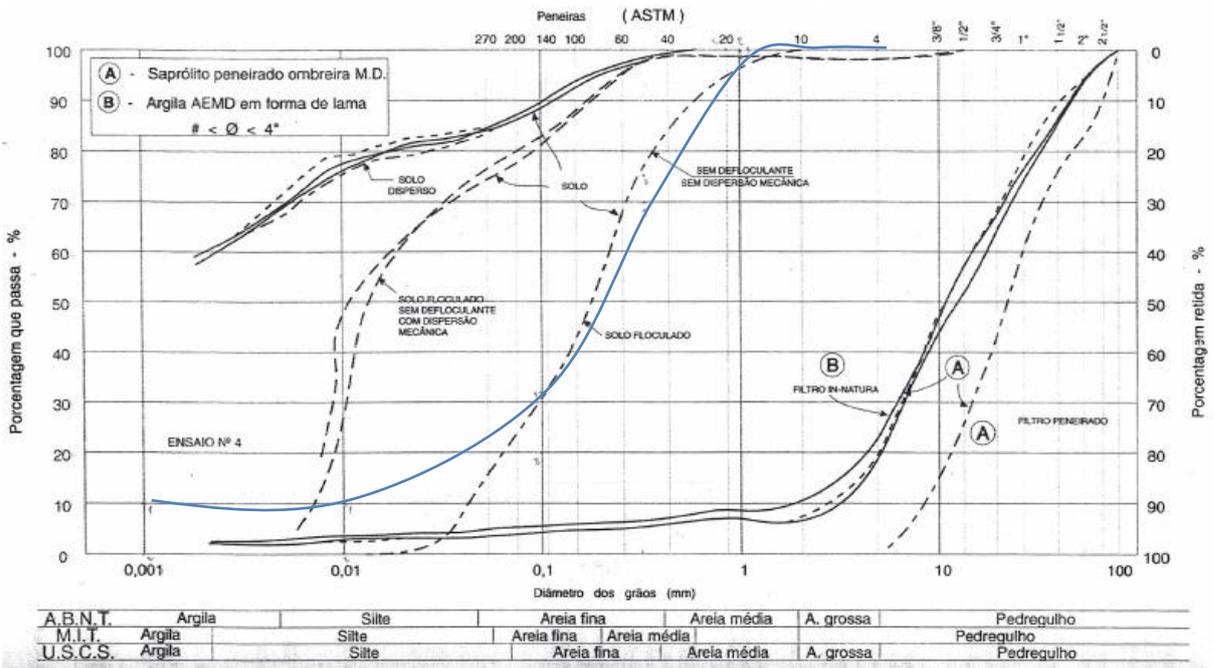
**Figura 4.26.** Variação permeabilidade em função dos valores do diâmetro dos poros para o rejeito AM 01



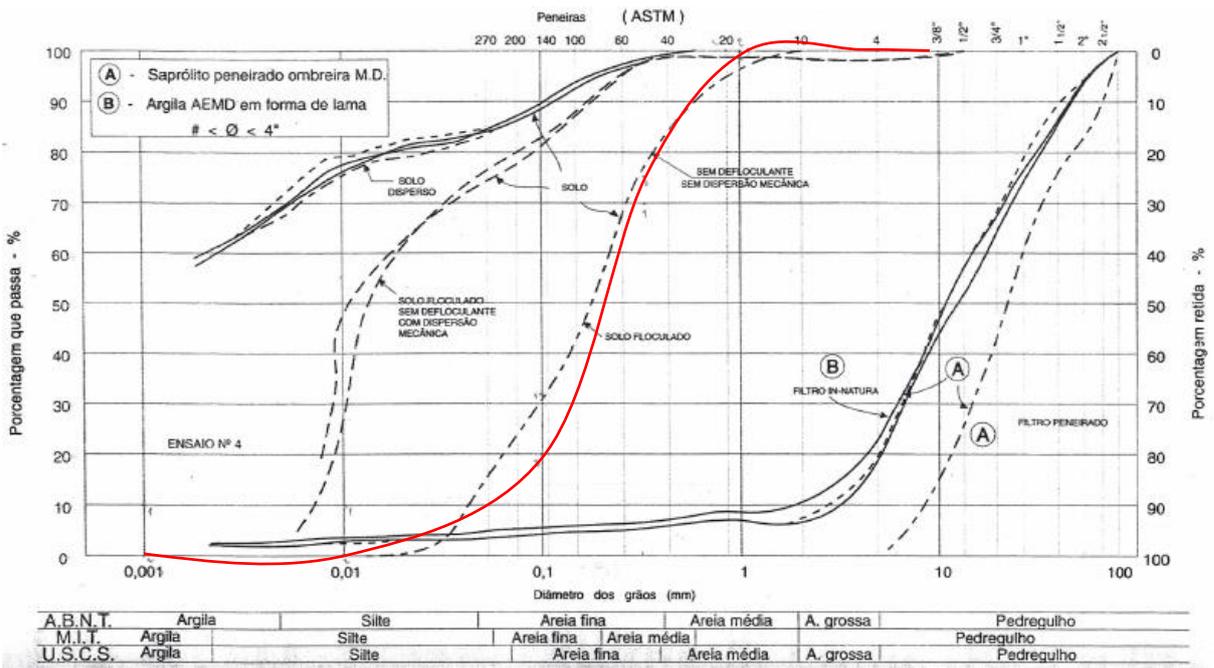
**Figura 4.27.** Variação da permeabilidade em função dos valores do diâmetro dos poros para o rejeito AM 02

Pelas figuras pode-se verificar que o rejeito AM 01 apresenta menores variações no valor do diâmetro de poros e por consequência menores alterações no valor do coeficiente de permeabilidade quando comparado com o rejeito AM 02. Além disso, percebe-se que pelas características físicas e mineralógicas do rejeito AM 02 o diâmetro dos poros foi relativamente alto em comparação aos obtidos para o rejeito AM 01.

Finalmente, com uma tentativa de avaliar a aplicabilidade destes rejeitos como material de filtro de barragem, foi realizada uma análise destes materiais como elemento de filtro na Barragem de Canoas (CRUZ 1996). Ressalta-se que este tipo de análise visou avaliar a compatibilidade dos rejeitos com os materiais adjacentes comumente adotados. No caso específico da Barragem de Canoas os materiais adjacentes são caracterizados por solos coesivos e satisfazem os requerimentos granulométricos de permeabilidade conforme pode ser avaliado nas Figuras 4.28 e 4.29. Estas figuras evidenciam o paralelismo entre as curvas granulométricas dos materiais que compõem a barragem e os materiais filtrantes conformados pelos rejeitos AM 01 e AM 02 respectivamente.



**Figura 4.28.** Avaliação do rejeito AM 01 como filtro para o caso da Barragem de Canoas



**Figura 4.29.** Avaliação do rejeito AM 02 como filtro para o caso da Barragem de Canoas

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A referida pesquisa objetivou a avaliar o potencial de utilização de rejeitos de mineração de ferro como material de filtro de barragens de terra, com base nos resultados obtidos foi possível avaliar o desempenho dos rejeitos neste tipo de proposta.

Considerando os índices granulométricos avaliados, o Rejeito AM 01 corresponde a um material menos uniforme que o rejeito AM 02. Esta condição reflete a existência de uma menor quantidade de finos associadas ao rejeito AM 01 que no rejeito AM 02. Segundo a classificação proposta pela ABNT verificou-se que o rejeito AM 01 possui granulometria típica de areia fina, em quanto o rejeito AM 02 foi considerado como um material areno-siltoso mal graduado.

Embora os valores do peso específico dos grãos dependam do conteúdo de minerais de ferro presentes em cada amostra o valor para o rejeito AM 01 foi levemente superior ao obtido para o rejeito AM 02. Com relação à plasticidade, os dois rejeitos foram classificados como não-plásticos. Apesar do rejeito AM 01 apresentar uma porcentagem considerável de partículas finas, esta condição não se traduz no aumento da plasticidade deste rejeito.

Com relação aos valores dos índices de vazios máximos e mínimos, o rejeito AM 01, devido as suas características granulométricas, apresentou um compacidade máxima maior o rejeito AM 02.

Nas análises microscópicas, os dos dois rejeitos apresentaram minerais formadores de rocha, como o quartzo, que são resultado de processos geológicos onde se tem excesso de sílica. Esta característica foi confirmada pelas análises mineralógicas e químicas realizadas para avaliação destes materiais.

As análises mineralógicas e químicas apresentaram os mesmos componentes relativos aos dois materiais, hematita e quartzo. Alguns minerais traço evidenciados pelos ensaios da microsonda para o rejeito AM 01 como o quartzo e vermiculita e para o rejeito AM 02 como o fósforo e o titânio.

O coeficiente de permeabilidade dos dois rejeitos tendeu a aumentar com o aumento do valor do índice de vazios. . Para a densidade intermediária, ambos resíduos apresentaram o mesmo valor no coeficiente de permeabilidade, para uma tensão de confinamento de 400 kPa.

Embora com pouca variação, o efeito da tensão de confinamento foi percebido na avaliação da permeabilidade. Assim, para as tensões de confinamento de 200 e 400 kPa a permeabilidade tendem a apresentar um decréscimo. De uma maneira geral, os dois rejeitos apresentaram uma diminuição no coeficiente de permeabilidade com o aumento da tensão confinante na câmara triaxial

Os critérios de filtro baseiam se nas características granulométricas dos materiais do filtro, da fundação e dos materiais de proteção. Pela análise realizada verifica-se que estes materiais são determinantes para a classificação dos resíduos nos critérios estabelecidos. Desta forma, análise realizada utilizando a metodologia proposta por ATTERBERG (1908) para determinação dos diâmetros dos grãos, o rejeito AM 01 apresentou um valor de :  $p_{av} = 3,0e-3$  mm e  $p_{va}$  0,012 mm para o rejeito AM 02. Segundo a proposta de WITHMAN (1980) a determinação dos diâmetros dos poros obtido para o rejeito AM 01 foi  $1,2e-3$  mm para o rejeito AM 02 foi de 0,06mm.

Baseados na metodologia de VAUGHAN&SOAREZ (1982) o rejeito AM 01 seria classificado como material efetivo para utilização como filtro em barragens de terra. Embora essa classificação dependa dos materiais circundantes, a curva granulométrica do rejeito AM 01 é semelhante com a proposta pelos autores para areias com finos. A diferença é que este rejeito 1 apresenta uma maior quantidade de material fino.

A fundação é o principal meio de migração dos elementos de ferro numa barragem, normalmente mais permeável que o maciço. Devido às baixas permeabilidades do maciço argiloso a migração de ferro se torna extremamente lenta no corpo da barragem, sendo menos preocupante a colmatação em filtros verticais em comparação com os filtros horizontais e drenos, que recebem as águas efluentes da fundação.

As granulometrias de areias médias e finas propostas por VAUGHAN & SOARES (1982) atendem as condições de filtragem dos dois rejeitos, sempre que o material adjacente seja coesivo. Pode se observar, pelas análises realizadas, que embora os rejeitos cotejem granulometria menor à proposta por estes autores para a barragem de Canoas as curvas granulométricas apresentam um paralelismo evidenciando potencial destes rejeitos como materiais de filtro.

Embora os resultados da permeabilidade do rejeito AM 02 tenham sido maiores em relação aos associados ao rejeito AM 01, pode-se dizer que o rejeito AM 02 apresenta uma melhor condutividade hidráulica apresentando um bom desempenho como material filtrante e drenante numa barragem.

Entretanto, do ponto de vista mineralógico, o rejeito AM 02 apresenta elementos que favorecem que a água percolada seja direcionada por caminhos preferenciais, mudando a capacidade hidráulica de um ponto do material ao outro. Em contrapartida para o rejeito AM 01, a presença de quartzo e hematita com formas semi-redondeadas a água percolada não apresentaria linhas de fluxo preferenciais. Assim, pelo conteúdo considerável de quartzo presente no rejeito AM 01 e suas propriedades de resistência e durabilidade este rejeito pode ser considerado como um bom material para ser empregado em filtros de barragens.

Finalmente vale ressaltar a dificuldade encontrada na avaliação da permeabilidade na célula triaxial, evidenciada principalmente por algum tipo de problema relacionado à montagem e desempenho das linhas de drenagem. Mas mesmo com estes contratempos foi possível mostrar a aplicabilidade desta metodologia na avaliação do efeito do confinamento na permeabilidade.

Como sugestão para pesquisas futuras propõe-se trabalhar ainda mais no fenômeno da colmatação por meio de ensaios de laboratório onde seja simulado este fenômeno. Acrescente-se ainda, a realização de ensaios na célula triaxial no sentido de verificar os problemas relacionados à migração de finos nas linhas drenagem no sentido de avaliar este efeito na avaliação efetiva do coeficiente de permeabilidade.

Com relação à aplicabilidade dos rejeitos neste tipo de aplicação sugere-se a realização de investigações semelhantes com outros tipos de rejeitos. A avaliação da segregação granulométrica que normalmente ocorre com estes materiais durante a deposição ou na execução do filtro.

Em respeito às alterações químicas provocadas pelo contato direto e constante da água com estes rejeitos, propõe-se também uma avaliação do efeito oxidação destes resíduos com o tempo e a migração das partículas de ferro com efeito do processo de fluxo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (1984-a). Solo – Análise Granulométrica. NBR 7181. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 13 p.

ABNT. (1984-b). Grãos de solo que passam na peneira de 4,8mm - Determinação da massa específica. NBR 6508, Rio de Janeiro, RJ, 8 p.

ABNT. (1990). Solo – Determinação do índice de vazios máximo e mínimo de solos não coesivos. NBR 12051, Rio de Janeiro, RJ, 6 p.

ABNT (1995). Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. NBR 13292, Rio de Janeiro, RJ, 13 p.

ABGE, SC. Considerações de filtros empregando materiais de mineração. Florianópolis, tema 7: 2041- 2052

ABRÃO P. C. (1987). Sobre a Deposição de Rejeitos de Mineração no Brasil, Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, Rio de Janeiro, 1: 14-17

ALMEIDA, H., SERNA, D.L., 2000. Agregados para a Construção Civil., Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, Diretoria de Desenvolvimento e Economia Mineral – Didem, Brasil, 11: 5p.

ALONSO, T.D.P., (2005). Condutividade Hidráulica De Solos Compactados em Ensaio Com Permeômetro de Parede Flexível, Dissertação de Mestrado, Departamento de Geotecnia EESC/USP, Escola de Engenharia de São Paulo, SP, 120p.

AMORIM, N. R. & PORTO, L. F. & COSTA, A. G. D. (1995). Avaliação da Segurança de Barragens de Rejeitos em Operação. Caso da Barragem do Germano. Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, REGEO 95, ABMS / ABGE / CGGB, Ouro Preto, MG, pp. 251-258.

ASSIS, A., HERNANDEZ, H.M., COLMANETTI, J.P (2003), Notas de Aula. Disciplina de Barragens, G.AP-AA006/0285-141, Brasília, DF, 85-141

BASTOS, C. Notas de Aula. Resistência ao cisalhamento dos solos

BEIRIGO, E. A. (2005) Comportamento Filtro Drenante de Geotêxteis em Barragens de Rejeitos de Mineração, Tese de Mestrado, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. p 192

BERTELLA F., ACORSI, M., BIESEKI, L., ROBISON P., PENHA, F., SIBELE, G., (2000) Estudo da temperatura de secagem e caracterização de amostras de argila esmectita para posterior aplicação. Perspectiva (Erexim), v. 32: 27-35, 200

BERTRAM, G. E., (1940). An experimental investigation of protective filters”. Harvard University. Cambridge. vol 267

PERGHER, B. C., HELIO, C. M., LENGLER (2008). Determinação da capacidade de troca catiônica em argilas. XVI Encontro de Química da Região Sul (16-SBQSul), 1-1.

BLIGHT, G.E.; THOMSON, R.R. & VORSTER, K. (1985). Profiles of hydraulic fill tailings beaches and seepage trough hydraulically sorted tailings. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* 85(5): 157-161.

BOTELHO, A. P. D. (2001). Implementação de metodologias de ensaios para determinação de relações constitutivas de processos de fluxo em solos com a utilização da bomba de fluxo. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 254 p.

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.

CHAMMAS, R. (1989). Barragens de Contenção de Rejeitos. Curso de Especialização em Engenharia de Barragens (CEEBA), UFOP, Ouro Preto, MG, 29 p.

CONAMA (2002). Resolução CONAMA 307 Dispõe sobre gestão dos resíduos da construção civil, 3-8 p.

CRUZ, C. P. (1996). 100 Barragens Brasileiras, Casos Históricos, Materiais de Construção Projeto, Oficina de Textos, São Paulo, 330 p.

DANIEL, D. E. (1994). State of the art: laboratory hydraulic conductivity tests for saturated soils. ASTM/STP 1142, Philadelphia, 30-78.

DE OLIVEIRA R.N., (2010). Análise das propriedades físicas e mecânicas de dois resíduos finos de pedra para utilização de pavimentos rodoviários. Publicação G.DM-187/10. Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF

DNER (1994d). DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Compactação em equipamento miniatura, solos, método de ensaio. DNER - ME 228/94. Rio de Janeiro: 14p

DUPUIT, F., (1966). Groundwater flow over a sloping impermeable layer: 1. Application of the Dupuit - Forchheimer assumption, *Journal of Geophysical Research*, 71: 2895- 2902

ESTEVESSA. V.P. (1964). Barragens de Terra, Universidade da Paraíba, Escola Politécnica de Campinha Grande. 103-109

FREITAS, E.F. (2008), Estudo do Comportamento Mecânico de Rejeitos de Minério de Ferro Reforçados com Fibras Sintéticas. Dissertação de Mestrado Núcleo de Geotecnia na Escola de Minas (NUGEO), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG,

GALVÃO T.C.B., 1995. Propriedades dos solos residuais tropicais. Publicação 057/95, Departamento de Transportes e Geotecnia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 32 p.

GARDONI, M. G., 1995. Avaliação da Aplicabilidade de Ensaios de Laboratório e Critérios de Filtro para Utilização de Geotêxteis em Solos do Distrito Federal. 177 p.

GERALDES, F. 2002. Planejamento da Construção de Barragens de Terra. Dissertação de Mestrado da Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia (FEUP). 176 p.

GERMANI, D.J., 2002. A Mineração no Brasil Relatório Final, RJ, 7 p.

HOYOS, F.P., 2004. Soil Residual Tropical (in spanish). Hombre nuevo, Medellín Colombia, 235 p.

HRADILEK, P. 2002. Avaliação de Pequenas Barragens. Bureau of Reclamation, Brasília DF, 21 p.

HUMES. C. 1985. Porosimetria de filtros de proteção : uma análise de critérios de filtro para materiais granulares - Escola Politecnica de São Paulo, Programa de Pós graduação em Engenharia Civil São Paulo, 340 P.

LOUIS, C. (1969). Étude des écoulements de l' eau dans le roche fissuré et leur influences sur la stabilité des massifs rochers. *Bulletin de la Direction des Études ET Recherche*, Sene A. (Thèse présentée à l' Université de Kolsruhe), Paris, 4 p

MARAGON M., MOTTA L.M.G, POLIVANOV H., BATISTA C.P.J. (2005). Avaliação da caracterização química, mineralógica e pedológica e classificações geotécnicas de solos de comportamento laterítico. 11º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia Ambiental, Santa Catarina, Brasil, 1-1

MARSAL, R.J., RESÉNDIZ D.R. (1975). Earth and Earth-Rock Dams (in Spanish). Limusa, Ciudad de Mexico, Mexico, 38 p

MELLO, V.F.B. (1977). Reflections on Design Decisions of Practical Signification to Embankment Dams. 17<sup>th</sup> Rankine Lecture. *Géotechnique*, .27, 3- 17

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, Brasil: 111-131.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2004. Disposição do Rejeito, Brasil, 1-5

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2010. Desempenho do Setor Mineral, Brasil, 1-302.

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, Brasil, pp 556-591

- MITTAL H. K. & MORGENSTERN, N. R. (1975). Parameters for design of tailings dam. *Canadian Geotechnical Journal*, Edmonton, Canada, 12: 235-261.
- MITTAL H. K. & MORGENSTERN, N. R. (1976). Seepage control in tailings dams. *Canadian Geotechnical Journal*, Edmonton, Canada, 13: 277-293.
- NERY, M.A.C., (2009). *Economia Mineral do Brasil.*, Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, Diretoria de Desenvolvimento e Economia Mineral – Didem, Brasil, 5 p.
- NOGUEIRA, J. (1986) Colmatação Química dos Drenos de Barragens por Compostos de Ferro, 10: 1-20
- OLSON, R. E. AND DANIEL, D. E. (1981). Measurement of the Hydraulic Conductivity of Fine-Grained Soils, Permeability and Groundwater Contaminant Transport, ASTM STP 746, T. F. Zimme and C. O. Riggs, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 18 p.
- PALMERA , E.M. & GARDONI, M. G. A. (2002) Propriedades Físicas e Hidráulicas de Geotêxteis não tecidos sob-pressão. *Solos e Rochas*, 20 (2): 69-78
- PARSONS A.W., 1976. The rapid measurement of the moisture condition of earthworkmaterial, Transport and Road Research Laboratory, 2 p.
- PEREIRA G, FERREIRA M, DA COSTA L, FÉLIX N, 2006. Estéreis e Rejeito da Mineração de Ferro. , 36(1), pp.45-52.
- 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). Influencia do teor de ferro nos parâmetros de resistência de um rejeito de minério de ferro, Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Programa de Pós Graduação do Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 153 p
- QUADROS, E. F. 1982. Determinação das Características do Fluxo de Água em Fraturas de Rochas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Universidade de São Paulo, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, 100 p
- RAWLE A. (2002) – The importance of Particle Size Analysis in the Pharmaceutical Industry. Malvern. Spring Lane South, 2002. p.1-43
- RIBEIRO, F., 2006. Estudo Da Aplicação do agregado reciclado na base de um pavimento flexível. Publicação R484e. Escola de Engenharia Civil Programa de Pós-graduação em Engenharia do Meio Ambiente, Universidade Federal de Goiás, GO, 41 p.

RUFO, R.C., 2009. Misturas de fosfogesso, solo tropical e cal para fins de pavimentação. Escola de Engenharia Civil Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente, Universidade Federal De Goiás, GO, pp7 – 132

SANTOS, A. (2004). Influência do Teor de Ferro na Condutividade Hidráulica Saturada de um Rejeito de Minério de Ferro. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 191 p.

SILVA, S.R., QUEIROZ, T.F.N. & DIAS, L.E., 2004. Seção ix - Poluição do Solo e Qualidade Ambiental., 3: 189-196.

SIMONE, L.D., MOREIRA P., 2010. Drenagem Ácida e Gestão de Resíduos Sólidos de Mineração. pp 1- 2

SOUZA, R.A.de., 2007. Estudo comparativo dos ensaios de CBR e Mini-CBR para solos de Uberlândia, MG.Publicação N° 032. Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia.

SHERARD, J.L., DUNNIGAN, L.P. & TALBOT, J.R., (1984a). Basic Properties of Sand and Gravel Filters. *Journal of Geotechnical Engineering*, 110(6).

SHERARD, J.L. 1984b. Filters for silts and clays. *Journal of Geotechnical Engin. Division ASCE*, v.110

VAUGHAN, P.R. 1982. Desing of filters for cly cores of dams. ASCE, vol 108.

VAUGHAN, P. R., SOAREZ (1982) Desing of Filters for Cly Cores of Dams. ASCE, vol 108

VIDAL (1991) Projeto: Ensino de Filtração de Longa Duração. Relatório Interno de Pesquisa do Convênio ITA/RHODIA RH-1 (89/90)

VIDAL, D. (2001) Apostila de Geossintéticos na Engenharia Civil: Curso Básico. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte MG.

WITTMAN, L. 1979. The process of soil filtration its physis and the approach in engineering practice. Proc. Of the conf. on Desing Parameters in Geotechnical Engineering, BGS.

LAMBE, W.T. & WHITMAN, R.V. (1979). Soil Mechanics, SI Version. John Wiley & Sons, New York, USA, 553 p.