

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

**COMPORTAMENTO FILTRO-DRENANTE DE GEOTÊXTEIS EM  
BARRAGENS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO**

**ELDER ANTÔNIO BEIRIGO**

**ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA  
CO-ORIENTADORA: MARIA DAS GRAÇAS GARDONI ALMEIDA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: G.DM-140/05**

**BRASÍLIA / DF: OUTUBRO/2005**

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

**COMPORTAMENTO FILTRO-DRENANTE DE GEOTÊXTEIS EM  
BARRAGENS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO**

**ELDER ANTÔNIO BEIRIGO**

**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:**

---

**ENNIO MARQUES PALMEIRA, Ph.D. (UnB)  
(ORIENTADOR)**

---

**MARIA DAS GRAÇAS GARDONI ALMEIDA, DSc. (UFMG)  
(CO-ORIENTADORA)**

---

**LUIS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, DSc. (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**EVALDO MATHEUS, DSc. (MMA)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 28 DE OUTUBRO DE 2005.**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

BEIRIGO, ELDER ANTÔNIO

Comportamento Filtro-Drenante de Geotêxteis em Barragens de Rejeitos de Mineração. [Distrito Federal] 2005.

xxv, 192 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2005)

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

1. Geotêxteis	2. Barragens de Rejeitos
3. Filtração	4. Ensaio de Laboratório
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

BEIRIGO, E. A. (2005). Comportamento Filtro-Drenante de Geotêxteis em Barragens de Rejeitos de Mineração. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-140/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 192 p.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: Elder Antônio Beirigo

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Comportamento Filtro-Drenante de Geotêxteis em Barragens de Rejeitos de Mineração.

GRAU / ANO: Mestre / 2005

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.

---

Elder Antônio Beirigo  
Rua Castro Alves, nº 1225, Bairro São José.  
CEP 35501-205 - Divinópolis/MG – Brasil.

## DEDICATÓRIA

---

*Aqueles meus maiores motivos de orgulho e gratidão a Deus.*

*Meus Pais, Maria Enelice e Ary Gonçalves Beirigo.*

## AGRADECIMENTOS

---

Ao término de uma etapa de trabalho e dedicação como o curso de mestrado, felizes são aqueles que conseguem fazer das dificuldades oportunidades aproveitadas de aprendizado e desenvolvimento humano. Neste contexto, estou muito feliz por ter tido o privilégio de contar com pessoas que contribuíram no aproveitamento das oportunidades que me apareceram durante o curso de mestrado em Geotecnia. Tendo isto em vista, cabe registrar meus agradecimentos a todos.

Aos meus pais, em primeiro lugar, agradeço pelos ensinamentos de honestidade e humildade. Aos meus irmãos, apesar da distância física, também agradeço por estarem sempre aqui comigo, do meu lado!

À Isabella agradeço por ter entendido e colaborado para a realização deste meu sonho. Em momentos de agradecimento como este faltam adjetivos para expressar todo o meu respeito, carinho e gratidão. A este sentimento se mistura a vontade de me desculpar pelos momentos de ausência e mau humor.

Aos meus orientadores, Professor Ennio Marques Palmeira e Professora Maria das Graças Gardoni, agradeço pelo privilégio que tive por ser seu orientando. Agradeço, também, pelo profissionalismo, humanidade e amizade com que nos relacionamos.

Aos amigos de todas as horas, Alisson, Wallace e Priscila, agradeço por também tornar menos árida esta etapa de minha vida estando sempre presentes. Também agradeço aos meus amigos Adriano, Gregório, Graça, Hernan, Nestor, Raul Dario e Maruska pelos momentos de descontração e lucidez diante de alguns momentos e dificuldade.

Agradeço aos professores do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB pelos conhecimentos transmitidos e pela relação amigável, em especial aos Professores Márcio, Noriz, Luís Fernando, André, Camapum e Pedro Murrieta.

Agradeço aos colegas da Geotecnia, Jôfran, James, Josileide, Hector, Íris, Eleonardo, Suzana, Luciana, Freddy, Hugo, Sandra, Elza, Mauro, Joice, Luís Guilherme, Paulo, Jenny e Wilber, pela feliz convivência.

Esta dissertação também seria menos interessante não fosse a colaboração da Samarco Mineração Ltda e da Fertilizantes Fosfatados S.A.. Nas pessoas da Engenheira Daviély e dos Engenheiros Manoel Juliá, Francisco e Luís Otávio sou grato a estas empresas.

Também tive o privilégio de contar com infraestruturas de laboratórios externos à Geotecnia da UnB, como os de Engenharia Civil de Furnas Centrais Elétricas S.A., de Difractometria de Raios X do Departamento de Geologia da UnB e do Centro de Manutenção de Equipamentos da UnB. Agradeço pelo seu apoio técnico nas pessoas da Geóloga Ana Livia, Professora Edi e Sr. José Gonçalves.

Agradeço ao CNPq pelo apoio financeiro.

Por fim, agradeço à todos aqueles que por ventura deixei de citar aqui mas que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente pela superação de mais esta etapa em minha vida. Meus sinceros agradecimentos a todos!

## RESUMO

O comportamento geotécnico geral de barragens de rejeito é dependente do desempenho dos respectivos dispositivos de filtração e drenagem. Neste sentido, este trabalho objetivou o estudo do comportamento de geotêxteis quando empregados nestes dispositivos. Para tanto foram realizadas investigações de campo e laboratório acerca das principais variáveis envolvidas no processo de filtração. Estas investigações permitiram a caracterização do processo de filtração ocorrente e a identificação de agentes intervenientes. As investigações de campo foram realizadas em barragens de contenção de rejeitos, alteadas com os próprios materiais a serem contidos, de minerações de minério de ferro e de rocha fosfática. Nestas investigações a condição de fluxo ocorrente foi qualificada como a principal força perturbadora. A geometria geral das estruturas de contenção de rejeitos, assim como a caracterização de campo dos materiais envolvidos, foi analisada. Foi exumada uma amostra de geotêxtil empregada na mineração de minério de ferro, tendo sido caracterizada a interação dos rejeitos com a malha têxtil por meio de estudos do grau de impregnação e granulometria das partículas retidas, além de microscopia ótica e eletrônica de varredura. Foram coletadas 20 amostras de rejeito em barragens das mineradoras que colaboraram com a pesquisa. Foi feita análise do potencial à instabilidade interna destas amostras. Com base neste estudo foram selecionadas amostras representativas de cada um dos rejeitos para serem estudadas nos ensaios de filtração em laboratório. Sistemas compostos por estes rejeitos e geotêxteis com gramatura variando de 200 a 600 g/m<sup>2</sup> foram submetidos a ensaios de filtração sob tensão, do tipo razão entre gradientes (GR), sob gradientes hidráulicos constante e variável. Observou-se que os incrementos de tensões aplicados aos corpos de prova tenderam a reduzir eventuais heterogeneidades observadas no início dos ensaios, sendo o estágio de 200 kPa aquele que limita as principais variações. Os rejeitos se comportaram de forma estável diante ao fluxo em todos os ensaios, tendo sido observados apenas fenômenos localizados de migração de partículas nas regiões mais próximas dos geotêxteis. A granulometria das partículas passantes através dos geotêxteis ao longo do ensaio permitiu constatar que apenas a fração fina sofre maior efeito da variação do gradiente hidráulico, enquanto os incrementos de tensão provocaram a perda de partículas mais graúdas. A avaliação microscópica dos geotêxteis após os ensaios permitiu a verificação de grãos maiores que os seus poros no seu interior, o que foi comprovado por meio dos estudos da granulometria destes materiais. No geral, os sistemas rejeito-geotêxtil ensaiados se comportaram de forma estável, inclusive em contraposição a alguns resultados de avaliações por critérios de projeto disponíveis na literatura. Neste sentido, o  $GR_{ASTM}$  foi bastante eficiente na medida em que se manteve quase sempre próximo da unidade, que caracteriza a condição de estabilidade. Porém, as outras propostas,  $GR_{Mod}$  e  $GR_{3mm}$ , mostraram-se também importantes na avaliação do efeito que o geotêxtil tem nas regiões mais próximas a ele. Cabe ressaltar a constatação da importância da complementação dos resultados obtidos nos ensaios de filtração por meio dos estudos de granulometria das partículas passantes pelo geotêxtil, além de investigação visual das condições deste ao final dos ensaios por meio de microscopia eletrônica de varredura.

## ABSTRACT

The behaviour of tailing dams depends on their filtration and drainage systems. In this context, this dissertation aimed to study the behaviour of geotextiles in such systems. To accomplish that, field and laboratory tests were performed on the main variables related to the filtration mechanism. These tests allowed the characterization of the filtration process and the identification of the main agents of this process. The field investigations were made in tailing dams of iron and phosphate industries. In these investigations the flow condition was the main disturbing agent. The general geometry of the tailing dams, as well as the field properties of the materials, were studied. A geotextile specimen was exhumed from a drainage system of one of the tailing dams of the iron industry and was subjected to studies on the interaction with the tailings by assessing its impregnation level, grain size analyses of the particles entrapped in the geotextile and optical and electronic scanning microscopy. Twenty samples of the tailings were collected and representative samples were chosen for the laboratory filtration tests. Geotextiles with masses per unit area varying between 200 and 600 g/m<sup>2</sup> were employed in the gradient ratio tests (GR) under pressure, being subjected to constant and varying hydraulic gradients. It was observed that the stresses applied at the top of the soil samples tended to reduce eventual heterogeneities observed at the beginning of the tests, being the stress of 200 kPa a threshold value for these variations. The tailings tested behaved as stable materials in all tests, being observed only localized migrations of particles in the regions close to the geotextile layer. The grain size analyses of the particles that piped through the geotextiles showed that only the soil fine fraction suffered the effects of the variation of hydraulic gradient, while the increments in normal stresses affected the passage of coarser particles thorough the geotextile. Post test microscopic analyses of the geotextiles showed large particles in the geotextile voids, which was corroborated by the grain size analyses of the entrapped particles. In general, the tailing-geotextile systems tested behaved in a stable manner, which was conflicting with some predictions by design criteria available in the literature. In this sense, the  $GR_{ASTM}$  was very effective to quantify the system behaviour and this value was always close to unity, which is a sign of system stability. Nevertheless, the other GR definitions,  $GR_{Mod}$  and  $GR_{3mm}$ , were also important for the evaluation of the geotextile influence on the behaviour of the neighbouring soil regions. It is important to point out the relevance of the complementary studies carried out to understand the behaviour of the systems tested that included grain size analyses of the particles that piped through the geotextile as well as visual and microscopic investigations of the geotextiles at the end of the tests.



# ÍNDICE

Capítulo	Página
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.3. ESCOPO DA DISSERTAÇÃO .....	3
<b>CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>5</b>
2.1. BARRAGENS DE REJEITOS .....	5
2.2. REJEITOS.....	14
2.3. SISTEMAS DE DRENAGEM E FILTRAÇÃO INTERNA: GRANULARES .....	18
2.4. GEOTÊXTEIS.....	22
2.5. SISTEMAS DE DRENAGEM E FILTRAÇÃO INTERNA: GEOTÊXTEIS.....	26
<b>CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>32</b>
3.1. INTRODUÇÃO.....	32
3.2. CASOS DE ESTUDO .....	32
3.2.1. Samarco Mineração Ltda – Unidade Industrial do Germano (UIG).....	32
3.2.2. Fertilizantes Fosfatados S.A. – Complexo de Mineração de Tapira/MG (CMT).....	36
3.3. MATERIAIS .....	38
3.3.1. Rejeitos.....	38
3.3.2. Geotêxteis.....	39
3.4. METODOLOGIAS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS ESTUDADOS .....	40
3.4.1. Investigação de Campo .....	40
3.4.2. Caracterização dos Rejeitos.....	46
3.4.3. Caracterização dos Geotêxteis Exumados em Campo .....	47
3.4.4. Caracterização dos Geotêxteis Virgens para Ensaios de GR .....	48
3.4.5. Estabilidade Interna dos Rejeitos .....	49
3.4.6. Dispersibilidade dos Rejeitos .....	52
3.5. METODOLOGIAS DOS ENSAIOS DE GR E COMPLEMENTARES .....	52
3.5.1. Ensaios de Filtração do Tipo Razão entre Gradientes (GR).....	52
3.5.2. Granulometria a Laser .....	61
3.5.3. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	63
<b>CAPÍTULO 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS ESTUDADOS .....</b>	<b>64</b>
4.1. INVESTIGAÇÃO DE CAMPO.....	64
4.2. CARACTERIZAÇÃO DOS GEOTÊXTEIS EXUMADOS EM CAMPO .....	66

4.3. CARACTERIZAÇÃO DOS REJEITOS AMOSTRADOS NO CAMPO .....	73
4.4. ESTABILIDADE INTERNA DOS REJEITOS.....	81
4.5. CARACTERIZAÇÃO DOS REJEITOS ESTUDADOS NOS ENSAIOS DE GR .....	85
4.6. DISPERSIBILIDADE DOS REJEITOS ESTUDADOS NOS ENSAIOS DE GR .....	96
4.7. CARACTERIZAÇÃO DOS GEOTÊXTEIS VIRGENS PARA ENSAIOS DE GR .....	96

**CAPÍTULO 5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE GR, COM  $I = 1$ , E ENSAIOS COMPLEMENTARES..... 99**

5.1. ENSAIOS DE FILTRAÇÃO DO TIPO RAZÃO ENTRE GRADIENTES DA AMOSTRA SA4, COM $I = 1$ , E ENSAIOS COMPLEMENTARES .....	100
5.1.1. Ensaio de GR do Sistema SAG1, com $i = 1$ .....	100
5.1.2. Ensaio Complementares ao GR do Sistema SAG1, com $i = 1$ .....	105
5.1.3. Ensaio de GR do Sistema SAG2, com $i = 1$ .....	106
5.1.4. Ensaio Complementares ao GR do Sistema SAG2, com $i = 1$ .....	110
5.1.5. Ensaio de GR do Sistema SAG3, com $i = 1$ .....	112
5.1.6. Ensaio Complementares ao GR do Sistema SAG3, com $i = 1$ .....	116
5.2. ENSAIOS DE FILTRAÇÃO DO TIPO RAZÃO ENTRE GRADIENTES DA AMOSTRA SL3, COM $I = 1$ , E ENSAIOS COMPLEMENTARES.....	117
5.2.1. Ensaio de GR do Sistema SLG1, com $i = 1$ .....	117
5.2.2. Ensaio Complementares ao GR do Sistema SLG1, com $i = 1$ .....	121
5.2.3. Ensaio de GR do Sistema SLG2, com $i = 1$ .....	124
5.2.4. Ensaio Complementares ao GR do Sistema SLG2, com $i = 1$ .....	128
5.3. ENSAIOS DE FILTRAÇÃO DO TIPO RAZÃO ENTRE GRADIENTES DA AMOSTRA FA1, COM $I = 1$ , E ENSAIOS COMPLEMENTARES .....	130
5.3.1. Ensaio de GR do Sistema FAG1, com $i = 1$ .....	130
5.3.2. Ensaio Complementares ao GR do Sistema FAG1, com $i = 1$ .....	134
5.3.3. Ensaio de GR do Sistema FAG3, com $i = 1$ .....	138
5.3.4. Ensaio Complementares ao GR do Sistema FAG3, com $i = 1$ .....	141

**CAPÍTULO 6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE GR, COM  $1 < I < 10$ , E ENSAIOS COMPLEMENTARES..... 143**

6.1. ENSAIO DE GR DO SISTEMA SAG2, COM $1 < I < 10$ .....	144
6.2. ENSAIOS COMPLEMENTARES AO GR DO SISTEMA SAG2, COM $1 < I < 10$ .....	149
6.3. ENSAIO DE GR DO SISTEMA SLG2, COM $1 < I < 10$ .....	152
6.4. ENSAIOS COMPLEMENTARES AO GR DO SISTEMA SLG2, COM $1 < I < 10$ .....	158
6.5. ENSAIO DE GR DO SISTEMA FAG1, COM $1 < I < 10$ .....	160
6.6. ENSAIOS COMPLEMENTARES AO GR DO SISTEMA FAG1, COM $1 < I < 10$ .....	165

**CAPÍTULO 7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS..... 168**

7.1. CONCLUSÕES.....	168
7.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	175

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>177</b>
<b>ANEXO .....</b>	<b>185</b>

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela</b>	<b>Página</b>
Tabela 2.1: Posição do Brasil nas Reservas e na Produção Mundial de Substâncias Mineraias em 2002 (DNPM, 2003).....	5
Tabela 2.2: Maiores geradores de rejeitos, em termos de massa, no Brasil <sup>(1)</sup> (DNPM, 2001)..	6
Tabela 2.3: Reagentes utilizados na concentração dos minérios de ferro e rocha fosfática. ...	15
Tabela 2.4: Principais minerais presentes em minérios de ferro e rocha fosfática brasileiros e respectivos pesos específicos. ....	16
Tabela 2.5: Critérios empíricos de projeto de sistemas de drenagem e filtração de barragens (Assis, 2003).....	20
Tabela 2.6: Propriedades do Polipropileno (PP) e do Poliéster (PET). (Mano, 1991).....	23
Tabela 3.1: Caracterização geotécnica dos rejeitos utilizados. ....	39
Tabela 3.2: Caracterização das amostras dos geotêxteis virgens estudados. ....	40
Tabela 3.3: Resumo dos trabalhos de campo. ....	45
Tabela 3.4: Critérios de projeto de filtros têxteis (modificado de Palmeira e Gardoni, 2000). ..	59
Tabela 3.5: Avaliação dos geotêxteis ensaiados quanto à retenção. ....	60
Tabela 3.6: Procedimentos adotados nos ensaios de GR e a partir deles.....	60
Tabela 4.1: Resumo dos trabalhos de campo. ....	65
Tabela 4.2: Caracterização da amostra de geotêxtil exumada. ....	71
Tabela 4.3: Caracterização das partículas retidas no interior do geotêxtil exumado. ....	73
Tabela 4.4: Caracterização das amostras dos rejeitos coletados na barragem da Cava do Germano, na UIG. ....	75
Tabela 4.5: Caracterização das amostras dos rejeitos coletados na BS3, na UIG.....	77
Tabela 4.6: Caracterização das amostras dos rejeitos coletados na BL1, no CMT.....	79
Tabela 4.7: Parâmetros complementares dos trabalhos de campo. ....	80
Tabela 4.8: Classificação das amostras de rejeito estudadas quanto ao potencial à instabilidade interna.....	82
Tabela 4.9: Limites de consistência e índices de vazios dos rejeitos selecionados para os ensaios de filtração (GR).....	86
Tabela 4.10: Resultados da caracterização preliminar dos rejeitos selecionados para os ensaios de filtração (GR).....	86
Tabela 4.11: Propriedades físico-químicas dos rejeitos estudados nos ensaios de GR.....	95
Tabela 4.12: Resultados dos ensaios de dispersibilidade (SCS). ....	96
Tabela 4.13: Caracterização da amostra de geotêxtil exumada. ....	97

Tabela 5.1: Características iniciais e finais dos sistemas rejeito-geotêxtil estudados nos ensaios de GR com  $i = 1$ ..... 99

Tabela 6.1: Características iniciais e finais dos sistemas rejeito-geotêxtil estudados nos ensaios de GR com  $1 \leq i \leq 10$  ..... 143

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
Figura 2.1: Gradiente de condutividade hidráulica gerado no lançamento hidráulico dos rejeitos no barramento (Vick, 1983 – modificada). ....	7
Figura 2.2: Método de alteamento a Montante: a) Seqüência executiva; c) Possibilidades geométricas para o sistema de drenagem e filtração interna (Rowatt, 2001 – modificado). ....	9
Figura 2.3: Método de alteamento a Jusante: a) Seqüência executiva; b) Possibilidades geométricas para o sistema de drenagem e filtração interna (Rowatt, 2001 – modificado). ...	10
Figura 2.4: Método de alteamento pela Linha de Centro: a) Seqüência; b) Possibilidades geométricas para o sistema de drenagem e filtração interna (Rowatt, 2001 – modificado). ...	10
Figura 2.5: Influência da tensão normal em geotêxteis não tecidos agulhados: a) espessura; e b) porosidade (modificado de Giroud, 1996).....	23
Figura 2.6: Variação da abertura de filtração em função da espessura em geotêxteis não tecidos agulhados (modificado de Giroud, 1996) .....	25
Figura 2.7: Anisotropia da condutividade hidráulica em função da tensão confinante em geotêxteis não tecidos. (Gardoni, 2000).....	26
Figura 2.8: Mecanismos de colmatação física em filtros de geotêxtil não tecido: a) cegamento; b) bloqueamento; e c) colmatação (modificado - Palmeira & Gardoni, 2000).....	28
Figura 2.9: Esquema do permeâmetro utilizado em ensaios de filtração do tipo razão entre gradientes (GR) (modificado – Bessa da Luz, 2003) .....	29
Figura 3.1: Barragem do Germano, da UIG / Samarco (Araújo, 2005).....	33
Figura 3.2: Seção transversal típica da Barragem do Germano, da UIG / Samarco (Pimenta de Ávila, 2003b).....	33
Figura 3.3: Baías de secagem da barragem do Germano , da UIG / Samarco (Araújo, 2005). 34	
Figura 3.4: Barragem da Cava do Germano, da UIG / Samarco.....	35
Figura 3.5: Esquemas dos sistemas de filtração e drenagem dos dispositivos de contenção de rejeitos, da UIG / Samarco: a) da barragem do Germano; e b) das baías de secagem. (Pimenta de Ávila, 2003a). .....	35
Figura 3.6: Esquema da seção transversal típica da Barragem de Lama 1 (BL1), do CMT / Fosfertil, com indicação do sistema de filtração e drenagem interna (modificado de Bush, 1987).....	38
Figura 3.7: Faixas granulométricas das amostras de rejeito estudadas. ....	39
Figura 3.8: Esquema da geometria dos pontos ensaiados na BL1, do CMT/ Fosfertil.....	41
Figura 3.9: Caminho de escoamento e deposição dos rejeitos arenosos na barragem da Cava do Germano, da UIG / Samarco. ....	42
Figura 3.10: Pontos ensaiados na barragem da Cava do Germano, da UIG / Samarco. ....	42
Figura 3.11: Geometria típica do processo de deposição da lama na BS3, da UIG / Samarco. ....	43

Figura 3.12: Esquema da amostragem na BS3, da UIG / Samarco.....	43
Figura 3.13: Determinação da massa específica de campo dos rejeitos arenosos.....	44
Figura 3.14: Permeâmetro Guelph utilizado na determinação da condutividade hidráulica de campo dos rejeitos da barragem da Cava do Germano, da UIG / Samarco. ....	44
Figura 3.15: Exumação da amostra de geotêxtil na baía de secagem número 1 (BS1), da barragem do Germano, da UIG / Samarco. ....	45
Figura 3.16: Amostragem das amostras de lama em laboratório. ....	46
Figura 3.17: Metodologia de avaliação da estabilidade interna proposta por Sherard (1979). (modificado de Sherard (1979)) .....	49
Figura 3.18: Método de descrição da forma da curva granulométrica. (modificado de Kenney e Lau (1985)).....	51
Figura 3.19: Curvas típicas para avaliação do potencial a instabilidade interna de solos (modificado de Lafleur <i>et al.</i> (1989))......	51
Figura 3.20: Equipamento para ensaios de filtração do tipo razão entre gradientes (GR). (Gardoni, 2000).....	53
Figura 3.21: Equipamento para ensaios de GR utilizado nesta pesquisa: a) adaptações feitas para variação do gradiente hidráulico; e b) materiais utilizados na coleta de partículas ao longo do ensaio.....	54
Figura 3.22: Seqüência de montagem do ensaio de GR: a) colocar o geotêxtil saturado sobre a parte inferior do permeâmetro; b) conectar a parte superior do permeâmetro à sua parte inferior; c) colocar o pistão e fechar o permeâmetro. ....	55
Figura 3.23: Curva granulométrica da areia uniforme utilizada como filtro na parte superior do corpo de provas do ensaio de GR.....	57
Figura 3.24: Granulômetro a laser.....	62
Figura 4.1: Perfis verticais na superfície das praias de rejeitos arenosos depositados hidraulicamente: a) na barragem da Cava do Germano (UIG); e b) na BL1 (CMT).....	64
Figura 4.2: Variação da massa específica aparente seca ao longo das praias de rejeitos arenosos da BL1 (CMT) e da barragem da Cava do Germano (UIG). ....	65
Figura 4.3: Variação da condutividade hidráulica superficial ao longo da praia de rejeitos da barragem da Cava do Germano (UIG). ....	66
Figura 4.4: Perfil vertical verificado na superfície da área compactada do barramento da BL1 (CMT).....	66
Figura 4.5: Amostra de geotêxtil exumada na BS1 (UIG).....	67
Figura 4.6: Distribuição espacial da amostragem na manta têxtil exumada na BS1 (UIG).....	68
Figura 4.7: Interação rejeito-geotêxtil observada na lupa: a) partículas finas nos poros do geotêxtil; b) partículas graúdas nos poros do geotêxtil; c) área de menor concentração de partículas impregnando o geotêxtil. ....	69
Figura 4.8: Interação rejeito-geotêxtil observada no MEV: a) partículas nos poros do geotêxtil; b) fibras têxteis revestidas por compostos de ferro; c) danos nas fibras; d) partículas maiores que os poros no interior da amostra.....	71
Figura 4.9: Difratometria de raios X de partículas aderidas à fibra têxtil.....	71

Figura 4.10: Relação entre o grau de impregnação e a gramatura verificados na amostra de geotêxtil exumada na BS1 (UIG).....	72
Figura 4.11: Granulometria das partículas retidas no interior do geotêxtil exumado: a) GE1 a GE4 e LGE; b) GE5 a GE9 e LGE.....	73
Figura 4.12: Granulometria das amostras de rejeito arenoso coletadas na barragem da Cava do Germano, na UIG: a) SA1 a SA4; b) SA5 a SA7. ....	76
Figura 4.13: Variação da massa específica média dos grãos dos rejeitos estudados em função das distâncias aos respectivos pontos de lançamento.....	76
Figura 4.14: Granulometria das amostras de lama coletadas na BS3, na UIG: a) SL1 a SL3; b) SL4 a SL6.....	78
Figura 4.15: Granulometria das amostras de rejeito arenoso coletadas na BL1, no CMT: a) FA1 a FA4; b) FA5 a FA7. ....	79
Figura 4.16: Variação do índice de vazios ao longo das praias de rejeito estudadas. ....	80
Figura 4.17: Curvas granulométricas das frações obtidas para a amostra SA4 (UIG).....	81
Figura 4.18: Características da curva granulométrica da amostra SA4 (UIG).....	83
Figura 4.19: Curvas de descrição da curva granulométrica dos rejeitos arenoso da barragem da Cava do Germano (UIG). ....	83
Figura 4.20: Curvas de descrição da curva granulométrica dos rejeitos finos da BS3 (UIG). ....	84
Figura 4.21: Curvas de descrição da curva granulométrica dos rejeitos arenoso da BL1 (CMT).....	84
Figura 4.22: Curvas granulométricas da SL3 e da LGE. ....	85
Figura 4.23: Curvas granulométricas dos rejeitos selecionados para os ensaios de filtração (GR).....	86
Figura 4.24: Forma dos grãos dos rejeitos estudados nos ensaios de filtração (GR): a) SA4; b) SL3; e c) FA1. ....	87
Figura 4.25: Mineralogia da amostra total do rejeito SA4. ....	88
Figura 4.26: Mineralogia da amostra total do rejeito SL3. ....	88
Figura 4.27: Mineralogia da amostra total do rejeito FA1. ....	89
Figura 4.28: Mineralogia da amostra do rejeito SA4: a) fração fina ( $\% < 0,075$ mm); b) fração grossa ( $\% > 0,075$ mm). ....	91
Figura 4.29: Mineralogia da amostra do rejeito SL3: a) fração fina ( $\% < 0,075$ mm); b) fração grossa ( $\% > 0,075$ mm). ....	92
Figura 4.30: Mineralogia da amostra do rejeito FA1: a) fração fina ( $\% < 0,075$ mm); b) fração grossa ( $\% > 0,075$ mm). ....	93
Figura 4.31: Curvas granulométricas dos rejeitos de minério de ferro com e sem a adequação da massa específica média dos grãos. ....	94
Figura 4.32: Comparação entre os resultados de granulometria a laser e de granulometria por peneiramento e sedimentação.....	95
Figura 4.33: Imagens dos geotêxteis virgens obtidas na lupa: a) G1; b) G2; e c) G3.....	97



Figura 4.34: Imagens dos geotêxteis virgens (RT 21) obtidas no MEV: a) vista geral a 50 X; b) vista geral a 350 X; c) condições das fibras a 1500 X; d) condições das fibras a 5000 X. . 98

Figura 5.1: Esquema típico do corpo de provas do ensaio de filtração (GR). .....	100
Figura 5.2: Variação da condutividade hidráulica em função do carregamento aplicado, no sistema SAG1.....	100
Figura 5.3: Variação da vazão em função do carregamento aplicado, no sistema SAG1.....	101
Figura 5.4: Variação do gradiente hidráulico em função do carregamento aplicado, no sistema SAG1.....	101
Figura 5.5: Variação da altura do corpo de provas em função do carregamento aplicado, no sistema SAG1.....	102
Figura 5.6: Variação da carga hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SAG1.....	102
Figura 5.7: Variação da condutividade hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SAG1.....	103
Figura 5.8: Variação do gradiente hidráulico ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SAG1.....	104
Figura 5.9: Variação da razão entre gradientes em função do carregamento aplicado, no sistema SAG1.....	104
Figura 5.10: Granulometria das partículas que se relacionaram diretamente com o geotêxtil no ensaio de GR do sistema SAG1. ....	105
Figura 5.11: Imagem superficial do G1 coletado após o ensaio de GR do sistema SAG1....	106
Figura 5.12: Variação da condutividade hidráulica em função do carregamento aplicado, no sistema SAG2.....	107
Figura 5.13: Variação da vazão em função do carregamento aplicado, no sistema SAG2....	107
Figura 5.14: Variação do gradiente hidráulico em função do carregamento aplicado, no sistema SAG2.....	107
Figura 5.15: Variação da altura do corpo de provas em função do carregamento aplicado, no sistema SAG2.....	108
Figura 5.16: Variação da carga hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SAG2.....	108
Figura 5.17: Variação da condutividade hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SAG2.....	109
Figura 5.18: Variação do gradiente hidráulico ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SAG2.....	109
Figura 5.19: Variação da razão entre gradientes em função do carregamento aplicado, no sistema SAG2.....	110
Figura 5.20: Granulometria das partículas que se relacionaram diretamente com o geotêxtil no ensaio de GR do sistema SLG2.....	111
Figura 5.21: Imagem superficial do G2 coletado após o ensaio de GR do sistema SAG2. ...	111

Figura 5.22: Imagens de MEV do geotêxtil do ensaio de GR com o sistema SAG2: a) vista geral da amostra; b) fibras da amostra; c) partícula maior que os poros adjacentes; e d) partículas no interior do geotêxtil.....	112
Figura 5.23: Variação da condutividade hidráulica em função do carregamento aplicado, no sistema SAG3.....	113
Figura 5.24: Variação da vazão em função do carregamento aplicado, no sistema SAG3....	113
Figura 5.25: Variação do gradiente hidráulico em função do carregamento aplicado, no sistema SAG3.....	113
Figura 5.26: Variação da altura do corpo de provas em função do carregamento aplicado, no sistema SAG3.....	114
Figura 5.27: Variação da carga hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SAG3.....	115
Figura 5.28: Variação da condutividade hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SAG3.....	115
Figura 5.29: Variação do gradiente hidráulico ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SAG3.....	115
Figura 5.30: Variação da razão entre gradientes em função do carregamento aplicado, no sistema SAG3.....	116
Figura 5.31: Granulometria das partículas que se relacionaram diretamente com o geotêxtil no ensaio de GR do sistema SAG3. ....	117
Figura 5.32: Imagem superficial do G3 coletado após o ensaio de GR do sistema SAG3....	117
Figura 5.33: Variação da condutividade hidráulica em função do carregamento aplicado, no sistema SLG1. ....	118
Figura 5.34: Variação da vazão em função do carregamento aplicado, no sistema SLG1. ...	118
Figura 5.35: Variação do gradiente hidráulico em função do carregamento aplicado, no sistema SLG1. ....	118
Figura 5.36: Variação da altura do corpo de provas em função do carregamento aplicado, no sistema SLG1. ....	119
Figura 5.37: Variação da carga hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SLG1. ....	119
Figura 5.38: Variação da condutividade hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SLG1. ....	120
Figura 5.39: Variação do gradiente hidráulico ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SLG1. ....	120
Figura 5.40: Variação da razão entre gradientes em função do carregamento aplicado, no sistema SLG1. ....	121
Figura 5.41: Granulometria das partículas coletadas ao longo do corpo de provas do ensaio de GR do sistema SLG1.....	122
Figura 5.42: Granulometria das partículas que se relacionaram diretamente com o geotêxtil no ensaio de GR do sistema SLG1.....	122
Figura 5.43: Imagem superficial do G1 coletado após o ensaio de GR do sistema SLG1. ...	123

Figura 5.44: Imagens de MEV do geotêxtil do ensaio de GR com o sistema SLG1: a) aglomerados de partículas no interior da amostra; b) detalhe dos grãos ocorrentes.....	123
Figura 5.45: Grão de quartzo no interior do geotêxtil do sistema SLG1 (DR-Xa).....	123
Figura 5.46: Minerais sobre o grão de quartzo no interior do geotêxtil do sistema SLG1 (DR-Xb).....	124
Figura 5.47: Variação da condutividade hidráulica em função do carregamento aplicado, no sistema SLG2.....	125
Figura 5.48: Variação da vazão em função do carregamento aplicado, no sistema SLG2....	125
Figura 5.49: Variação do gradiente hidráulico em função do carregamento aplicado, no sistema SLG2.....	125
Figura 5.50: Variação da altura do corpo de provas em função do carregamento aplicado, no sistema SLG2.....	126
Figura 5.51: Variação da carga hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SLG2.....	127
Figura 5.52: Variação da condutividade hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SLG2.....	127
Figura 5.53: Variação do gradiente hidráulico ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SLG2.....	127
Figura 5.54: Variação da razão entre gradientes em função do carregamento aplicado, no sistema SLG2.....	128
Figura 5.55: Granulometria das partículas coletadas ao longo do corpo de provas do ensaio de GR do sistema SLG2.....	129
Figura 5.56: Granulometria das partículas que se relacionaram diretamente com o geotêxtil no ensaio de GR do sistema SLG2.....	129
Figura 5.57: Imagem superficial do G2 coletado após o ensaio de GR do sistema SLG2....	130
Figura 5.58: Imagens de MEV do geotêxtil do ensaio de GR com o sistema SLG2: a) vista geral das fibras; e b) detalhe do revestimento das fibras por partículas finas.....	130
Figura 5.59: Variação da condutividade hidráulica em função do carregamento aplicado, no sistema FAG1.....	131
Figura 5.60: Variação da vazão em função do carregamento aplicado, no sistema FAG1....	131
Figura 5.61: Variação do gradiente hidráulico em função do carregamento aplicado, no sistema FAG1.....	132
Figura 5.62: Variação da altura do corpo de provas em função do carregamento aplicado, no sistema SAG1.....	132
Figura 5.63: Variação da carga hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema FAG1.....	133
Figura 5.64: Variação da condutividade hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema FAG1.....	133
Figura 5.65: Variação do gradiente hidráulico ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema FAG1.....	134

Figura 5.66: Variação da razão entre gradientes em função do carregamento aplicado, no sistema FAG1.....	134
Figura 5.67: Granulometria das partículas que se relacionaram diretamente com o geotêxtil no ensaio de GR do sistema FAG1. ....	135
Figura 5.68: Imagem superficial do G1 coletado após o ensaio de GR do sistema FAG1. ...	136
Figura 5.69: Imagens de MEV do geotêxtil do ensaio de GR com o sistema FAG1: a) vista geral do geotêxtil; b) partículas no interior da amostra; b) detalhe das fibras têxteis.....	136
Figura 5.70: Minerais no interior do geotêxtil do sistema FAG1 (DR-Xa). ....	137
Figura 5.71: Minerais envolvendo fibra têxtil do sistema FAG1 (DR-Xb). ....	137
Figura 5.72: Minerais envolvendo fibra têxtil do sistema FAG1 (DR-Xc). ....	137
Figura 5.73: Variação da condutividade hidráulica em função do carregamento aplicado, no sistema FAG3.....	138
Figura 5.74: Variação da vazão em função do carregamento aplicado, no sistema FAG3....	138
Figura 5.75: Variação do gradiente hidráulico em função do carregamento aplicado, no sistema FAG3.....	139
Figura 5.76: Variação da altura do corpo de provas em função do carregamento aplicado, no sistema FAG3.....	139
Figura 5.77: Variação da carga hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema FAG3.....	140
Figura 5.78: Variação da condutividade hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema FAG3.....	140
Figura 5.79: Variação do gradiente hidráulico ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema FAG3.....	141
Figura 5.80: Variação da razão entre gradientes em função do carregamento aplicado, no sistema FAG3.....	141
Figura 5.81: Granulometria das partículas que se relacionaram diretamente com o geotêxtil no ensaio de GR do sistema FAG3. ....	142
Figura 5.82: Imagem superficial do G1 coletado após o ensaio de GR do sistema FAG3....	142
Figura 6.1: Variação da condutividade hidráulica em função do gradiente hidráulico total aplicado, no sistema SAG2, ensaiado em $i$ variável. ....	145
Figura 6.2: Variação da vazão em função do gradiente hidráulico total aplicado, no sistema SAG2, ensaiado com $i$ variável. ....	145
Figura 6.3: Variação do gradiente hidráulico em função do gradiente hidráulico total aplicado, no sistema SAG2, ensaiado com $i$ variável. ....	145
Figura 6.4: Variação da condutividade hidráulica em função do carregamento aplicado, no sistema SAG2, ensaiado com $i$ variável.....	146
Figura 6.5: Variação da vazão em função do carregamento aplicado, no sistema SAG2, ensaiado com $i$ variável.....	146
Figura 6.6: Variação do gradiente hidráulico em função do carregamento aplicado, no sistema SAG2, ensaiado com $i$ variável.....	147

Figura 6.7: Variação da altura do corpo de provas em função do carregamento aplicado, no sistema SAG2, ensaiado com $i$ variável.....	147
Figura 6.8: Variação da carga hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SAG2, ensaiado com $i$ variável.....	148
Figura 6.9: Variação da condutividade hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SAG2, ensaiado com $i$ variável.....	148
Figura 6.10: Variação do gradiente hidráulico ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SAG2, ensaiado com $i$ variável.....	149
Figura 6.11: Variação da razão entre gradientes no sistema SAG2, ensaiado com $i$ variável, em função do: a) gradiente hidráulico total aplicado; e b) carregamento aplicado.....	149
Figura 6.12: Granulometria das partículas que se relacionaram diretamente com o geotêxtil no ensaio de GR do sistema SAG2, ensaiado com $i$ variável.....	150
Figura 6.13: Imagem superficial do G1 coletado após o ensaio de GR do sistema SAG2, ensaiado com $i$ variável.....	151
Figura 6.14: Imagens de MEV do geotêxtil do ensaio de GR com o sistema SAG2, ensaiado com $i$ variável: a) vista geral; b) e c) partículas no interior da amostra; e d) detalhe das fibras.....	152
Figura 6.15: Variação da condutividade hidráulica em função do gradiente hidráulico total aplicado, no sistema SLG2, ensaiado com $i$ variável.....	153
Figura 6.16: Variação da vazão em função do gradiente hidráulico total aplicado, no sistema SLG2, ensaiado com $i$ variável.....	153
Figura 6.17: Variação do gradiente hidráulico em função do gradiente hidráulico total aplicado, no sistema SLG2, ensaiado com $i$ variável.....	154
Figura 6.18: Variação da condutividade hidráulica em função do carregamento aplicado, no sistema SLG2, ensaiado com $i$ variável.....	154
Figura 6.19: Variação da vazão em função do carregamento aplicado, no sistema SLG2, ensaiado com $i$ variável.....	155
Figura 6.20: Variação do gradiente hidráulico em função do carregamento aplicado, no sistema SLG2, ensaiado com $i$ variável.....	155
Figura 6.21: Variação da altura do corpo de provas em função do carregamento aplicado, no sistema SLG2, ensaiado com $i$ variável.....	155
Figura 6.22: Variação da carga hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SLG2, ensaiado com $i$ variável.....	156
Figura 6.23: Variação da condutividade hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SLG2, ensaiado com $i$ variável.....	157
Figura 6.24: Variação do gradiente hidráulico ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SLG2, ensaiado com $i$ variável.....	157
Figura 6.25: Variação da razão entre gradientes no sistema SLG2, ensaiado com $i$ variável, em função do: a) gradiente hidráulico total aplicado; e b) carregamento aplicado.....	158
Figura 6.26: Granulometria das partículas coletadas ao longo do corpo de provas do ensaio de GR do sistema SLG2, ensaiado com $i$ variável.....	158

Figura 6.27: Granulometria das partículas que se relacionaram diretamente com o geotêxtil no ensaio de GR do sistema SLG2, ensaiado com i variável.....	159
Figura 6.28: Imagem superficial do G2 coletado após o ensaio de GR do sistema SLG2, ensaiado com i variável.....	160
Figura 6.29: Imagens de MEV do geotêxtil do ensaio de GR com o sistema SLG2, ensaiado com i variável: a) Vista geral da amostra; b) aglomerados de partículas no interior da amostra.....	160
Figura 6.30: Variação da condutividade hidráulica em função do gradiente hidráulico total aplicado, no sistema FAG1, ensaiado com i variável.....	161
Figura 6.31: Variação da vazão em função do gradiente hidráulico total aplicado, no sistema FAG1, ensaiado com i variável.....	161
Figura 6.32: Variação do gradiente hidráulico em função do gradiente hidráulico total aplicado, no sistema FAG1, ensaiado com i variável.....	161
Figura 6.33: Variação da condutividade hidráulica em função do carregamento aplicado, no sistema FAG1, ensaiado com i variável.....	162
Figura 6.34: Variação da vazão em função do carregamento aplicado, no sistema FAG1, ensaiado com i variável.....	162
Figura 6.35: Variação do gradiente hidráulico em função do carregamento aplicado, no sistema FAG1, ensaiado com i variável.....	162
Figura 6.36: Variação da altura do corpo de provas em função do carregamento aplicado, no sistema FAG1, ensaiado com i variável.....	163
Figura 6.37: Variação da carga hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema FAG1, ensaiado com i variável.....	163
Figura 6.38: Variação da condutividade hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema FAG1, ensaiado com i variável.....	164
Figura 6.39: Variação do gradiente hidráulico ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema FAG1, ensaiado com i variável.....	164
Figura 6.40: Variação da razão entre gradientes no sistema FAG1, ensaiado com i variável, em função do: a) gradiente hidráulico total aplicado; e b) carregamento aplicado.....	165
Figura 6.41: Granulometria das partículas que se relacionaram diretamente com o geotêxtil no ensaio de GR do sistema SLG1, ensaiado com i variável.....	166
Figura 6.42: Imagens de MEV do geotêxtil do ensaio de GR com o sistema FAG1, ensaiado com i variável: a) partículas no interior da amostra; b) detalhe das fibras.....	166
Figura 6.43: Minerais envolvendo fibra têxtil do sistema FAG1, ensaiado com i variável (DR-Xa).....	166
Figura 6.44: Minerais encontrados no interior do geotêxtil do sistema FAG1, ensaiado com i variável (DR-Xb).....	167

## LISTA DE ABREVIACÕES NOMENCLATURAS E SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal do corpo de prova;
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
$A_F$	Teor de hematita;
AOS	Abertura de filtração aparente;
ASTM	American Society for Testing and Materials;
BL1	Barragem de Lama 1;
BS1	Baia de secagem número 1;
BS3	Baia de secagem número 3;
C	Coefficiente da formulação de Hazen para obtenção da condutividade hidráulica;
C	Teor de carbono orgânico solúvel;
$C'_u$	Coefficiente linear de uniformidade do solo;
$C_0$	Coefficiente da formulação de Terzaghi para obtenção da condutividade hidráulica;
$C_1$	Coefficiente da formulação de Terzaghi, dependente de $C_0$ ;
Ca	Teor de cátion solúvel;
$C_c$	Coefficiente de curvatura da curva granulométrica;
CC	Curva granulométrica côncava para cima;
CD	Ensaio de sedimentação com defloculação química e mecânica;
cm	Centímetro;
$cm^2$	Centímetro quadrado;
$cm^3$	Centímetro cúbico;
CMT	Complexo de Mineração de Tapira;
CTC	Capacidade de troca catiônica;
$C_u$	Coefficiente de não-uniformidade;
DE	Curva granulométrica descontínua;
$d_f$	Diâmetro das fibras do geotêxtil;
DF	Ensaio de filtração dinâmica;
$D_i$	Diâmetro através do qual passam i% das partículas do solo analisado;
$d_i$	Diâmetro através do qual passam i% das partículas do solo analisado;
$dm^3$	Decímetro cúbico;
DR	Densidade relativa;
DR-X	Difratometria de raios X;
E	Amostra internamente estável;
e	Índice de vazios;
$e_f$	Índice de vazios final;
$e_i$	Índice de vazios inicial;
$e_{máx}$	Índice de vazios máximo;
$e_{mín}$	Índice de vazios mínimo;
$F^3$	Ensaio de filtração da fração fina;
FA	Amostras de rejeito arenoso coletadas no CMT;
Fe	Ferro solúvel;
FHWA	Federal Highway Administration;
FOS	Abertura de filtração baseada no peneiramento hidrodinâmico;
g	Gramas;
G1	Geotêxtil não tecido agulhado, de filamentos contínuos, Bidim RT 10;
G2	Geotêxtil não tecido agulhado, de filamentos contínuos, Bidim RT 21;
G3	Geotêxtil não tecido agulhado, de filamentos contínuos, Bidim RT 31;
GR	Razão entre gradientes;
$GR_{3mm}$	Razão entre gradientes da UnB;
$GR_{ASTM}$	Razão entre gradientes da ASTM;
$GR_{Mod}$	Razão entre gradientes da UBC;

H	Horizontal;
H+Al	Acidez total;
HCP	Altura do corpo de prova;
HCR	Ensaio de condutividade hidráulica;
I	Amostra internamente instável;
i	Gradiente hidráulico;
ID	Densidade relativa no critério de projeto de filtros têxteis de Giroud (1982);
$i_{i/j}$	Gradiente hidráulico entre piezômetros i e j;
IP	Índice de plasticidade;
IP	Índice de Plasticidade;
k	Coefficiente de condutividade hidráulica;
K	Teor de potássio solúvel;
$k_{\text{campo}}$	Coefficiente de condutividade hidráulica superficial de campo;
$k_F$	Coefficiente de condutividade hidráulica do filtro;
kg	Quilograma;
$k_n$	Condutividade hidráulica normal ao plano da manta de geotêxtil;
kPa	QuiloPascal;
$k_t$	Condutividade hidráulica ao longo da manta de geotêxtil;
L	Curva granulométrica linear;
LFT	Ensaio de fluxo de longa duração;
LL	Limite de liquidez;
LP	Limite de plasticidade;
m	Metro;
$m^2$	Metro quadrado;
$M_A$	Gramatura do geotêxtil;
MEV	Microscópio eletrônico de varredura;
$M_F$	Massa total da fração fina;
mg	Miligramma;
Mg	Teor de magnésio solúvel;
$M_H$	Massa de hematita;
ml	Mililitro;
mm	Milímetro;
$mm^2$	Milímetro quadrado;
$mm^3$	Milímetro cúbico;
MO	Teor de matéria orgânica solúvel;
N	Ensaio não realizado;
n	Porosidade;
Na	Teor de sódio solúvel;
NA	Nível d'água;
NE	Sistema rejeito-geotêxtil não ensaiado;
$n_{GT}$	Porosidade do geotêxtil;
NP	Sistema rejeito-geotêxtil não aprovado;
$O_{95}$	Abertura de filtração considerada em alguns critérios de filtro;
$O_{98}$	Abertura de filtração;
P	Sistema rejeito-geotêxtil aprovado;
P	Teor de fósforo solúvel;
PD	Percentual de dispersão;
PET	Poliéster;
$P_F$	Porcentagem de hematita na composição mineralógica do rejeito;
pH	Potencial hidrogeniônico;
PP	Polipropileno;
PVC	Policloreto de vinila;



q	Vazão unitária;
R	Ensaio realizado;
R'	Número hidrodinâmico;
ROM	Run of mine (minério bruto);
s	Segundo;
S	Soma dos cátions trocáveis;
SA	Amostras de rejeito arenoso coletadas na UIG;
SCS	Ensaio sedimentométrico comparativo;
SD	Ensaio de sedimentação sem defloculação química e mecânica;
SL	Amostras de rejeito fino (lama) coletadas na UIG;
t	Temperatura;
t <sub>GT</sub>	Espessura do geotêxtil;
ton	Tonelada;
UBC	University of British Columbia
UIG	Unidade Industrial do Germano;
UnB	Universidade de Brasília;
v	Velocidade aparente de fluxo;
V	Vertical;
X	Coefficiente de correlação do critério de projeto;
ΔT	Tempo de duração do ensaio;
Ψ	Permissividade;
δ	Diâmetro equivalente representativo das partículas do solo adjacente ao filtro;
λ	Grau de impregnação de geotêxteis;
v	Viscosidade cinemática do fluido percolante;
v <sub>água</sub>	Viscosidade cinemática da água;
θ	Transmissibilidade;
ρ <sub>d</sub>	Massa específica aparente seca;
ρ <sub>dcampo</sub>	Massa específica aparente seca de campo;
ρ <sub>f</sub>	Massa específica das fibras do geotêxtil;
ρ <sub>s</sub>	Massa específica dos grãos;
ρ <sub>sF</sub>	Massa específica média dos grãos da fração fina;
σ	Desvio padrão;
σ <sub>v</sub>	Tensão vertical;
ξ	Parâmetro adimensional da formulação de Giroud (1996);
$\bar{x}$	Média;
%	Porcentagem;
%Al	Potencial à saturação por alumínio;
%V	Potencial à saturação por bases;
<	Menor que;
>	Maior que;
≤	Menor ou igual a;
°	Graus;
°C	Graus Celsius.

## 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A atividade de mineração tem posição destacada no cenário econômico nacional, requerendo a atenção e o esforço científico dos diversos seguimentos técnicos que a atendem, entre eles a Geotecnia, no sentido de possibilitar que realize suas atividades básicas a custos atrativos ao mercado e preserve a sustentabilidade do ambiente de entorno. Com ênfase à disposição de rejeitos e estéreis gerados no beneficiamento de minérios, no Brasil, é crescente a demanda pelo maior controle da segurança técnica dos empreendimentos mineiros. Neste contexto, a ocorrência de rupturas de barragens de rejeito por deficiência dos sistemas de drenagem e filtração ressalta a importância da análise do comportamento destes dispositivos.

O Brasil está entre os principais produtores de minérios do mundo, assim como também detém algumas das principais reservas minerais. Associado a esta condição está a grande geração de rejeitos, os quais demandam uma disposição adequada. Os rejeitos gerados em indústrias de mineração exibem características mineralógicas, geotécnicas e físico-químicas variáveis em função do tipo de minério e do próprio processo de beneficiamento. De acordo com esta caracterização, a disposição dos rejeitos pode ser feita em superfície, em cavidades subterrâneas ou em ambientes aquáticos. Porém, segundo Espósito (2000), no Brasil, especialmente no caso de rejeitos inertes, observa-se uma preferência pela disposição em superfície utilizando barragens de contenção de rejeitos. Além disso, o uso do próprio rejeito a ser contido através da técnica de aterro hidráulico, quando este apresenta características adequadas, também ocorre na maioria destes empreendimentos.

A técnica de alteamento por aterro hidráulico, por sua vez, se baseia no lançamento de uma polpa composta por rejeito e líquidos no corpo do barramento, impondo uma variabilidade geotécnica importante a estes materiais após lançados. Com destaque aos métodos de alteamento de montante, jusante e linha de centro, uma das grandes vantagens desta técnica está na possibilidade de se executar os alteamentos de acordo com a demanda por volume de armazenamento. Em contrapartida, um dos principais inconvenientes está relacionado às restrições práticas impostas à geometria dos respectivos sistemas de drenagem e filtração interna. Na literatura este inconveniente é destacado por acontecimentos de rupturas de barragens de rejeitos como da Mina do Fernandinho (Parra e Lasmar, 1987) e da Mina do Pico São Luiz (Parra e Ramos, 1987), no ano de 1986, e da Mineração Rio Verde Ltda

---

(Gomes et al., 2001) em 2001, em que a inexistência ou ineficiência destes sistemas foi encarada como um dos principais fatores desencadeadores. Na análise do fenômeno de filtração que envolve estes dispositivos, merecem atenção aspectos como a concentração de lançamento, características de deposição, granulometria, mineralogia e degradabilidade do rejeito, além do nível de tensões ocorrente, da geotecnia dos materiais que compõem o sistema de drenagem e filtração e a agressividade e a composição do fluido percolante.

Com todas estas condicionantes, apesar do conhecimento existente acerca do comportamento de drenos e filtros constituídos de material granular natural convencional, empregar materiais produzidos industrialmente, onde se possa adequar sua caracterização à demanda de trabalho, no mínimo, parece interessante. O fato da crescente elevação dos custos de obtenção dos materiais granulares convencionais reforça esta idéia. Neste contexto, tendo sido utilizados como materiais filtrantes em barragens de contenção de rejeitos de unidades de mineração das empresas Fertilizantes Fosfatados S.A. – Fosfértil e Samarco Mineração Ltda, além de outras, os geotêxteis não tecidos se mostram como alternativa a ser verificada.

Geotêxteis, denominação dada a produtos de origem polimérica constituídos de filamentos contínuos ou não, dispostos em forma de mantas, em estruturas tecidas ou não, vêm sendo estudados e utilizados em diversas situações de drenagem e filtração com sucesso (Rollin e Lombard, 1988; Christopher e Fischer, 1992; Gardoni, 1995 e 2000; Palmeira, 1997; Lafleur, 1999; Cazzufi et al., 1999; Faure et al., 1999; Bessa da Luz, 2004). Por se tratar de uma tecnologia relativamente recente, apesar dos grandes avanços já obtidos na previsão e avaliação de seu comportamento filtro-drenante e das metodologias de projeto propostas até então, alguns testes e análises ainda precisam ser feitos para verificar e adequar seu desempenho às situações cotidianas de obra. Dentre estas, o uso de geotêxteis em filtros e drenos de barragens de contenção de rejeitos é destacado neste trabalho, tendo em vista as peculiaridades práticas impostas por este tipo de estrutura ao sistema de filtração e drenagem.

## **1.2. OBJETIVOS**

Diante do objetivo geral de caracterizar o comportamento de geotêxteis quando utilizados em dispositivos de filtração e drenagem de barragens de rejeito de minérios de ferro e rocha fosfática, foram buscados os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar no campo os parâmetros intervenientes no processo de filtração e drenagem que envolve os geotêxteis;

- 
- Avaliar a estabilidade interna dos rejeitos a serem estudados mediante ensaios de laboratório e propostas empíricas encontradas na literatura. Avaliar, também, o efeito da variação da intensidade de fluxo neste comportamento;
  - Avaliar a utilização da razão entre gradientes (GR) na análise do comportamento de geotêxteis não tecidos em situações de filtração com rejeitos de mineração.

### **1.3. ESCOPO DA DISSERTAÇÃO**

Os trabalhos e análises realizados para atingir aos objetivos traçados na seção anterior são apresentados nesta dissertação em seis capítulos. A seguir é feita uma descrição sucinta do conteúdo de cada um dos capítulos, com o objetivo de auxiliar na sua leitura.

No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica realizada para elucidação acerca do tema. São apresentadas informações sobre a geração de rejeitos, técnicas de disposição destes materiais e respectivos sistemas de filtração e drenagem. Ao final são apresentadas as propriedades dos geotêxteis não tecidos e questões relativas à sua utilização em dispositivos de filtração e drenagem.

O Capítulo 3 é utilizado para apresentar os materiais e métodos empregados nos trabalhos realizados. Informações sobre os materiais são resumidas, seguidas pelo detalhamento das metodologias de campo e laboratório utilizadas. Quando pertinente também são apresentados os equipamentos utilizados.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos na caracterização dos materiais estudados. São apresentados resultados de investigações de campo e laboratório neste sentido, além das respectivas análises e de previsões do comportamento em filtração dos materiais a serem estudados por meio de ensaios de filtração em laboratório.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de filtração sob tensão, do tipo razão entre gradientes (GR), realizados em laboratório sob gradiente hidráulico unitário e constante e níveis de tensão variados. Também são apresentados os resultados obtidos por meio de ensaios realizados de forma complementar aos de GR. Associada à apresentação dos resultados, é feita uma análise específica de cada um deles.

No Capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de filtração sob tensão, do tipo razão entre gradientes (GR), realizados em laboratório sob gradiente hidráulico e níveis

---

de tensão variáveis. Também são apresentados os resultados obtidos por meio de ensaios realizados de forma complementar aos de GR. Associada à apresentação dos resultados, é feita uma análise específica de cada um deles.

No Capítulo 7 é feita uma análise geral dos resultados, tentando concluir os trabalhos e esclarecer o atendimento aos objetivos traçados. Também são apresentadas sugestões para pesquisas futuras relacionadas com o presente tema.

Ao final, no item Anexo, são apresentadas as planilhas de medição dos ensaios de filtração, do tipo razão entre gradientes, realizados.

## CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. BARRAGENS DE REJEITOS

A atividade de mineração tem posição destacada no cenário econômico nacional, requerendo a atenção e o esforço científico dos diversos seguimentos técnicos que a atendem, entre eles a Geotecnia, no sentido de possibilitar que desempenhe suas atividades básicas a custos atrativos ao mercado e preservando a sustentabilidade do ambiente de entorno. Com ênfase à disposição de rejeitos e estéreis gerados no beneficiamento de minérios, especialmente após a ocorrência de grandes acidentes no mundo envolvendo vítimas humanas em meados da década de setenta, é crescente a demanda pelo maior controle da segurança técnica e ambiental dos empreendimentos mineiros.

Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2003), 8,4% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro, registrado no ano de 2002, foram oriundos de movimentações financeiras promovidas, direta ou indiretamente, pelas 72 substâncias minerais produzidas naquele ano. No cenário mundial, o país se manteve como detentor de grandes reservas minerais, além de figurar entre os maiores produtores (Tabela 2.1).

Tabela 2.1: Posição do Brasil nas Reservas e na Produção Mundial de Substâncias Minerais em 2002 (DNPM, 2003)

Posição		Mineral	Participação no Mercado Mundial (%)	
Reserva	Produção		Reserva	Produção
1º	1º	Nióbio	97,8	95,1
1º	2º	Tantalita	52,1	16,1
2º	5º	Estanho	22,4	4,4
2º	3º	Grafita	25,9	8,0
3º	3º	Alumínio	7,6	9,4
3º	3º	Caulim	28,5	7,9
3º	5º	Talco	17,0	6,4
3º	4º	Vermiculita	10,3	6,2
4º	4º	Magnesita	7,8	8,5
4º	3º	Manganês	2,9	13,3
5º	2º	Ferro	6,4	19,1
10º	7º	Rocha Fosfática	0,5	3,7

Esta posição, em contrapartida, chama a atenção para a quantidade de rejeitos gerados no tratamento dos minérios brutos. Na Tabela 2.2 são apresentadas as principais substâncias minerais geradoras de rejeitos no Brasil, em termos de massa, e as respectivas proporções de rejeitos por quantidade de minério bruto beneficiado, estimadas com base no Anuário Mineral Brasileiro de 2001 (DNPM, 2001). Estes materiais, cada qual com suas peculiaridades, demandam uma disposição técnica, econômico-financeira e ambientalmente adequada.

Tabela 2.2: Maiores geradores de rejeitos, em termos de massa, no Brasil <sup>(1)</sup> (DNPM, 2001)

<b>Mineral</b>	<b>Massa de Rejeitos gerada (ton)</b>	<b>%Rejeito <sup>(2)</sup></b>
Ferro	61.618.943	22,5
Argilas Comuns e Plásticas	44.235.688	96,5
Ouro	32.809.596	>99,9
Rocha Fosfática	25.243.248	84,8
Calcário	8.150.891	10,1
Carvão	7.542.610	52,6
Alumínio	5.154.098	28,8
Níquel	3.685.067	98,8
Amianto	2.457.084	92,1
Nióbio	2.281.336	97,3
Caulim	2.101.142	56,2

Notas: **(1)** Esta classificação está baseada apenas naquelas substâncias minerais, produzidas no Brasil em 2001, cuja produção está apresentada sob a unidade de massa no Anuário Mineral Brasileiro 2001 (DNPM, 2001); e **(2)** Porcentagem de rejeitos gerados por tonelada de minério bruto lavado.

Os rejeitos gerados em usinas de beneficiamento exibem características mineralógicas, físicas e químicas variáveis, em função do tipo de minério e do próprio processo industrial. Esta caracterização é determinante na definição da técnica de disposição dos rejeitos a ser adotada. Quanto ao local, a disposição pode ocorrer em superfície, em cavidades subterrâneas ou em ambientes aquáticos. Segundo USEPA (1994), a disposição de rejeitos na forma de lama em superfície é a mais comumente utilizada, especialmente para aqueles rejeitos que recebem a contribuição de água e/ou outros líquidos durante o processo de beneficiamento do minério bruto. Neste caso, barragens alteadas com os próprios rejeitos a serem contidos, sob a técnica de aterro hidráulico, são bastante utilizadas especialmente na contenção de rejeitos granulares (Espósito, 2000). Nesta técnica, o lançamento da polpa, composta por rejeito e líquidos, promove a segregação natural das partículas ao longo do caminho de deposição. No Brasil, a

---

elaboração e a apresentação de projetos de disposição de rejeitos de beneficiamento de minérios em barramento encontram-se normatizadas na NBR 13028 (ABNT, 1993).

O projeto de barragens de rejeitos deve considerar, além dos custos associados, as características dos rejeitos, dos fluidos, do local de instalação do barramento (topografia, geologia, hidrogeologia e sismicidade, por exemplo) e do método de alteamento adotado. Deve ser ressaltada a importância do controle da posição da superfície freática na interação destes parâmetros (Vick, 1983). Troncoso (1998) chama a atenção para a avaliação da ação do tempo no comportamento dos materiais envolvidos, tendo em vista a alterabilidade química tanto dos rejeitos quanto dos fluidos gerados na mineração.

O controle da posição da superfície freática é função da condutividade hidráulica do maciço e pode ser alcançado com o uso de sistemas de drenagem e filtração interna, frequentemente a jusante, e camadas de menor condutividade hidráulica a montante, no barramento. Antes do lançamento, pode-se submeter os rejeitos ao ciclonamento de forma a induzir a diminuição da condutividade hidráulica para montante da barragem (Figura 2.1). Além da própria eficiência do processo de ciclonamento, este gradiente de condutividade hidráulica é função das características dos rejeitos, do método de lançamento e do processo construtivo do barramento. (Vick, 1983)

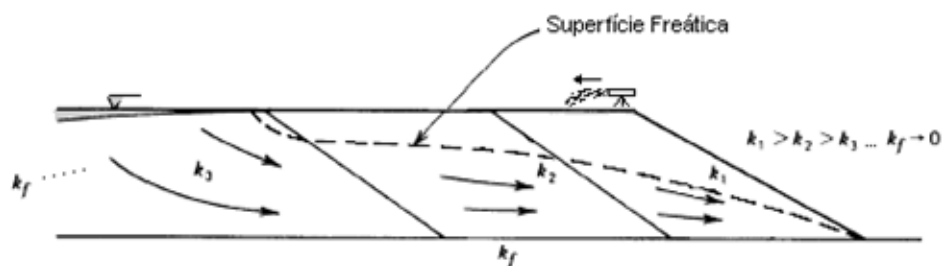


Figura 2.1: Gradiente de condutividade hidráulica gerado no lançamento hidráulico dos rejeitos no barramento (Vick, 1983 – modificada).

A granulometria e a massa específica dos grãos dos rejeitos atuam no processo de deposição caracterizando a segregação das partículas. Partículas maiores e/ou mais pesadas tendem a sedimentar mais rapidamente. Já a plasticidade (LP), que orienta quanto ao teor de argila presente no material, também está relacionada ao índice de plasticidade (IP), sendo que maiores valores de IP indicam materiais mais finos e, conseqüentemente, de menor condutividade hidráulica (Vick, 1983). Na seção 2.2 são apresentados comentários acerca do processo de geração dos rejeitos e seu comportamento frente a situações de percolação.



---

O lançamento dos rejeitos no reservatório comumente ocorre pelos seguintes métodos, individualmente ou de forma combinada (Vick (1983) e Ribeiro (2000)): descarga em ponto único; espigotamento; e ciclonamento. No método de descarga em ponto único é utilizado apenas um tubo para lançamento dos rejeitos. Quando do uso deste método no alteamento de barragens deve-se alterar a posição de lançamento com frequência que permita o equilíbrio das cotas do barramento. O espigotamento é caracterizado pelo lançamento simultâneo dos rejeitos por tubos, em diversos pontos do barramento, tentando-se dar maior homogeneidade ao maciço. Já o lançamento dos rejeitos no reservatório e no barramento por ciclonamento é feito com o objetivo de separar as frações fina (*overflow*) e grossa (*underflow*) dos rejeitos e aproveitar suas melhores características geotécnicas. Por meio da ação centrífuga do equipamento de ciclonagem o *underflow* é lançado na região do alteamento, enquanto a fração fina é direcionada ao reservatório. Eventuais variações no processo de beneficiamento dos minérios provocam alterações nas características do método de lançamento, influenciando as variáveis relacionadas com a energia de deposição, como a vazão e a concentração da polpa, com implicações nas características geotécnicas dos rejeitos lançados. A segregação vertical destes materiais após lançados, também influenciada por fatores como a suas próprias mineralogia e granulometria e a localização do ponto de lançamento, é um exemplo destas implicações. Isto gera a anisotropia de muitos dos parâmetros geotécnicos do barramento, dentre eles a condutividade hidráulica. Ocorrem razões entre a condutividade hidráulica horizontal ( $k_h$ ) e a vertical ( $k_v$ ) numa faixa de 2 a 10 em praias de rejeitos arenosos razoavelmente uniformes, podendo chegar a 100, ou mais, em depósitos mal controlados (Vick, 1983).

No que diz respeito ao método de alteamento, com destaque aos de montante, jusante e linha de centro, uma das grandes vantagens da técnica de aterro hidráulico está na possibilidade de se executar os alteamentos de acordo com a demanda por volume de armazenamento de rejeitos. O rejeito pode ser lançado por qualquer dos métodos tratados no parágrafo anterior. Nos casos de lançamento em ponto único e por espigotamento, após lançado, o rejeito depositado nas proximidades do alteamento subsequente é movimentado para compor o próximo dique. O método de alteamento adotado tem influência direta na variação espacial da condutividade hidráulica dos rejeitos no barramento (Cavalcante, 2000). Abaixo é apresentada uma discussão acerca dos métodos de alteamento, realizada a partir de Vick (1983) e Minns (1988), dando ênfase às questões relativas à condutividade hidráulica do maciço e às características dos respectivos sistemas de drenagem e filtração interna.

- **Alteamento a Montante:** recomendado apenas para rejeitos com mais de 40 a 60% de areia, o método de alteamento de montante é, reconhecidamente, o mais antigo e econômico. Nele, o lançamento se dá para montante de um dique de partida, geralmente constituído por material granular obtido em áreas de empréstimo. Os alteamentos sucessivos ocorrem sobre os rejeitos previamente lançados no reservatório (Figura 2.2a). Apesar de reduzir os volumes demandados, o uso das técnicas convencionais de execução de barragens é limitado apenas à porção do barramento movimentada. Assim, a condutividade hidráulica do barramento é principalmente controlada pela segregação imposta no lançamento do rejeito. Este método restringe as possibilidades práticas de controle da superfície freática, sendo comuns a potencialização da diminuição da condutividade hidráulica para montante da barragem, com o cicloneamento dos rejeitos, e o afastamento do nível d'água do reservatório do talude de jusante, por meio da ampliação das praias de deposição. O sistema de drenagem e filtração interna é limitado ao aproveitamento do dique de partida como dreno de pé e à execução de tapete drenante (dreno horizontal) a partir deste (Figura 2.2b). As principais vantagens do método de montante estão associadas ao menor volume de material movimentado, enquanto as principais desvantagens estão ligadas à necessidade de maior rigor no projeto, na construção e monitoramento do barramento.

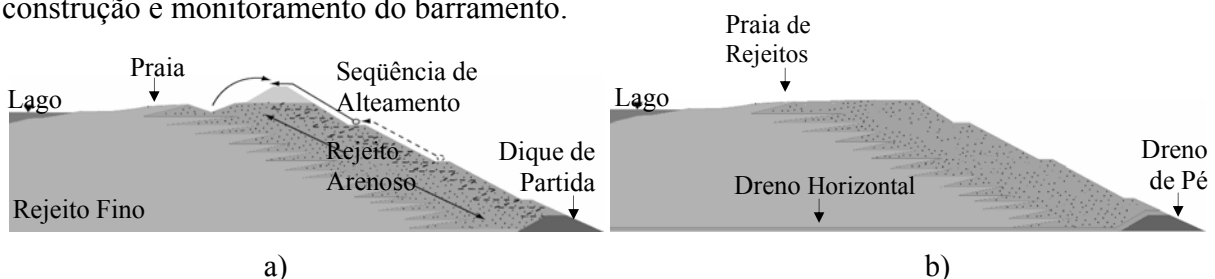


Figura 2.2: Método de alteamento a Montante: a) Seqüência executiva; c) Possibilidades geométricas para o sistema de drenagem e filtração interna (Rowatt, 2001 – modificado).

- **Alteamento a Jusante:** neste, no uso de rejeitos nos alteamentos, é comum o cicloneamento, em que, enquanto o *overflow* é lançado no reservatório para montante, o *underflow* é lançado, para montante, porém nas proximidades da área de alteamento, e redirecionado a jusante do dique de partida (Figura 2.3a). Este método de alteamento permite o uso das técnicas convencionais de construção de barragens de terra compactadas, permitindo também a melhoria do controle geotécnico da execução. A condutividade hidráulica do barramento é um parâmetro beneficiado nesta técnica, se apresentando mais homogênea. Apesar de possível o uso de recursos como os apresentados na Figura 2.2b, o método de alteamento a jusante é beneficiado pela possibilidade de variadas geometrias para o sistema de drenagem interno (tapetes drenantes, drenos verticais e/ou inclinados e drenos de

pé), permitindo um maior controle da superfície freática (Figura 2.3b). As principais vantagens estão associadas à possibilidade de melhor controle geotécnico na execução e as principais desvantagens aos grandes volumes de material demandados nos alteamentos.

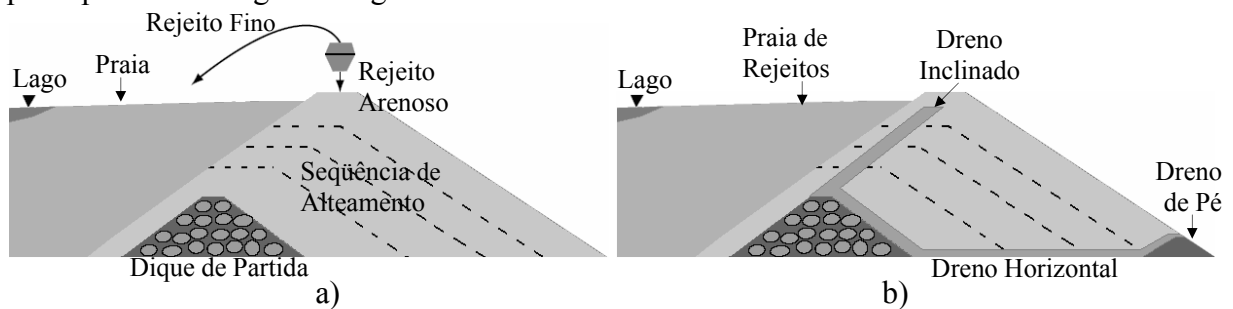


Figura 2.3: Método de alteamento a Jusante: a) Seqüência executiva; b) Possibilidades geométricas para o sistema de drenagem e filtração interna (Rowatt, 2001 – modificado).

- **Alteamentos pela Linha de Centro:** metodologia intermediária às anteriores, tenta agrupar suas vantagens, controlando as desvantagens. Bastante semelhante ao caso de jusante, os rejeitos são lançados no maciço após separação com ciclones e/ou movimentando aqueles sedimentados próximo ao barramento (Figura 2.4a). A direção dos alteamentos respeita a localização da linha central do alteamento subsequente. A condutividade hidráulica do maciço pode ser mais bem controlada aqui que no método de montante. Podem ser empregadas metodologias semelhantes às do método de jusante para o controle da superfície freática, inclusive no que diz respeito às possibilidades geométricas dos sistemas de drenagem e filtração interna (Figura 2.4b).

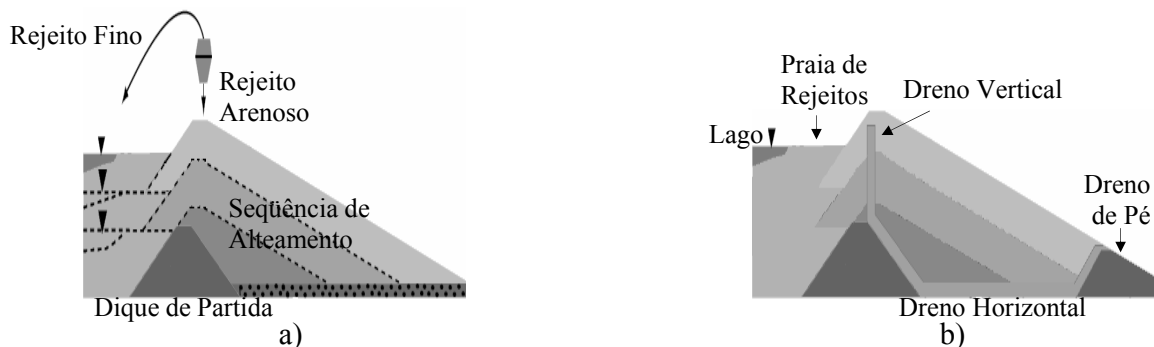


Figura 2.4: Método de alteamento pela Linha de Centro: a) Seqüência; b) Possibilidades geométricas para o sistema de drenagem e filtração interna (Rowatt, 2001 – modificado).

Em estudos para previsão da condutividade hidráulica de rejeitos de minérios de ferro depositados hidraulicamente, Espósito (2000) conclui que as formulações empíricas de Hazen (Equação 2.1) e Terzaghi (Equação 2.2) fornecem resultados médios próximos dos encontrados por meio de ensaios de infiltração *in situ* e de carga constante em laboratório. É importante ressaltar a grande dispersão dos valores encontrados por Espósito (2000) na utilização das formulações citadas.

---

$$\kappa = CD_{10}^2 \quad \text{Equação 2.1}$$

em que:  $k$  é o coeficiente de condutividade hidráulica (cm/s);  $C$  é um coeficiente que varia entre 90 e 120, sendo 100 um valor frequentemente utilizado; e  $D_{10}$  corresponde ao diâmetro (cm) através do qual passam 10% das partículas do solo analisado.

$$\kappa = C_1 D_{10}^2 (0,7 + 0,03t) \quad \text{Equação 2.2}$$

em que:

$$C_1 = C_0 \left( \frac{n - 0,13}{\sqrt[3]{1 - n}} \right) e$$

$n$  é a porosidade do solo;  $C_0$  é um coeficiente determinado em função do tamanho das partículas e varia entre menos de 400 a 800 para grãos arredondados e angulosos; e  $t$  corresponde à temperatura (°C).

Além destas questões relativas às fases de projeto e operação de barragens de contenção de rejeitos de mineração alteadas pela técnica de aterro hidráulico, ao se pensar no comportamento de longo prazo dos materiais envolvidos se deve estar atento à fase de abandono da estrutura. Diferentemente da maioria das obras de engenharia, barramentos como estes são destinados a “trabalhar” por tempo indeterminado, muitas vezes se reintegrando o relevo local. As características dos rejeitos e dos fluidos sofrem alterações ao longo do tempo, influenciando seu comportamento em percolação, devendo ser consideradas no projeto destas estruturas (Troncoso, 1998). Também se faz necessário o contínuo monitoramento do comportamento do barramento, e do respectivo sistema de drenagem e filtração interna, a fim de permitir o controle de possíveis alterações em tempo hábil.

Até meados dos anos setenta, segundo Mafra e Chapadeiro (2002), as barragens de rejeito eram construídas baseando-se no empirismo e sem aplicação da metodologia de projeto de barragens de terra compactadas. A ocorrência de incidentes, e dentre eles grandes rupturas, em barragens de rejeito no mundo até este período, envolvendo vítimas humanas, gerou o desenvolvimento e o uso das metodologias atuais de projeto e execução de barragens de rejeito. Na literatura podem ser encontrados relatos de diversos incidentes em barragens de contenção de rejeitos (ICOLD, 2001; Greenpeace International, 2002), construídas antes e após este período. Especialmente os incidentes registrados como rupturas, direta ou indiretamente estão associados com a presença danosa da água no barramento (Ozkan e

---

Ipekoglu, 2002). Como exemplos, abaixo são tratados alguns casos de incidentes ocorridos no Brasil.

- Ruptura da Barragem da Mina do Fernandinho (MG) (Parra e Lasmar, 1987): alteada pelo método de montante, esta barragem era executada em camadas de grande espessura sem compactação adequada, com inclinação excessiva do talude de jusante ( $42^\circ$ ) e, aparentemente, sem instrumentos de monitoramento. Além disso, os rejeitos de minério de ferro ali armazenados eram lançados em pontos afastados do maciço da barragem, induzindo a sedimentação da fração fina nas proximidades da crista. A ruptura da barragem ocorreu em 16 de maio de 1986. As possíveis causas do incidente: inclinação e altura do talude incompatíveis com a resistência ao cisalhamento do material e com as pressões piezométricas desenvolvidas no maciço; e, diante da aparente elevação da superfície freática no maciço sem ocorrência de chuvas no período, foi admitido que o sistema de drenagem, existente na fundação da barragem, perdeu gradativamente sua eficiência devido à colmatação provocada por finos. Estes fatores levaram a uma situação de talude crítico que, associada ao fato da presença de equipamentos trabalhando simultaneamente no topo da barragem, levou à ruptura.
- Ruptura da Barragem da Mina do Pico São Luís (MG) (Parra e Ramos, 1987): alteada pelo método de jusante, esta barragem foi executada inicialmente sem compactação dos rejeitos, com inclinação excessiva dos taludes de montante e jusante ( $42^\circ$ ) e sem dispositivos de drenagem e filtração interna. Após uma primeira ruptura em junho de 1985 e conseqüentes reparos, passaram a ser observadas movimentações e surgências d'água no talude de jusante. Foram, então, instalados medidores de nível d'água na crista do barramento e executados furos de sondagens na fundação para subsidiar um novo projeto de estabilização. Entretanto, antes da conclusão do projeto, a barragem foi alteada por mais 3,0 metros por necessidade do empreendimento, seguida do vertedor, que foi alteado de 0,80 metros em 01 de outubro de 1986. Pouco tempo depois, na madrugada do dia 02 de outubro, a barragem havia rompido exatamente na região do vertedor, permanecendo intacto o restante do aterro. As possíveis causas do incidente: erosão superficial junto ao vertedor, levando ao posterior solapamento do pé do aterro; ocorrência de um processo de erosão regressiva interna do material do aterro, que teria ocorrido devido à alta condutividade hidráulica do material de fundação em relação à do aterro e/ou pela heterogeneidade da condutividade hidráulica do maciço na região do vertedor; aumento da pressão piezométrica devido ao alteamento do vertedor. Estas hipóteses

---

estão associadas à baixa resistência à erosão do material do aterro e à inexistência de um sistema de drenagem interna.

- Ruptura localizada no talude de jusante da Barragem da Mina Serra Grande (GO) (ICOLD, 2001): esta barragem foi iniciada em 1989 pelo método de jusante, destinada à contenção de rejeitos de minério de ouro. Os materiais eram lançados para composição do maciço sem compactação. Em 1991, optou-se por alterar o método de alteamento para montante. Apesar de, em 1993, terem ocorrido chuvas intensas no local e de não ter sido observada percolação compatível na saída do sistema de drenagem, ocorreu erro na interpretação dos resultados de acompanhamento da piezometria existente. Em 02 de fevereiro de 1994, com a continuação das chuvas, ocorreu a ruptura localizada do talude de jusante, a qual não alcançou a crista da barragem. As possíveis causas do incidente: execução inadequada dos alteamentos; e ineficiência do sistema de drenagem e filtração interna. Estes fatores levaram à excessiva elevação da superfície freática.

- Ruptura da Barragem da Mineração Rio Verde (MG) (Gomes, et al. 2001): a área de deposição dos rejeitos se constituía, desde 1990, na antiga área de lavra da mineração (cava). Os rejeitos eram lançados na região sul da área, favorecendo o direcionamento da fração fina, com líquidos, para as proximidades da borda norte. Em 1994, tendo alcançado os limites da cava nas bordas norte e leste, passaram a ser executados alteamentos pelo método de montante, com inclinação de talude de jusante bastante acentuada (aproximadamente, 1H:1,8V) e sem sistema de drenagem interna. Não foram identificados instrumentos de monitoramento do comportamento da estrutura. Em 22 de junho de 2001 ocorreu a ruptura da porção nordeste deste sistema de contenção. As possíveis causas do incidente: geometria inadequada dos alteamentos; método de lançamento dos rejeitos no reservatório; e a inexistência de sistema de drenagem e filtração interna. A associação destes fatores levou à situação de talude crítica, com elevação excessiva da superfície freática e consequente ruptura.

No estudo de casos históricos de incidentes como os apresentados, fica clara a necessidade de maior rigor técnico no controle do comportamento de barragens de contenção de rejeitos alteadas com os próprios materiais a serem contidos. Neste contexto, fica ressaltada a importância do bom desempenho do sistema de drenagem e filtração interna. Como também visto anteriormente, os rejeitos de minérios de ferro e rocha fosfática estão entre os mais gerados no Brasil. Isto, aliado às semelhanças do processo industrial em que são gerados estes

---

rejeitos e à prática comum da disposição em reservatórios de barragens alteadas por meio da técnica de aterro hidráulico, levou à opção pelo estudo de barragens de contenção de rejeitos de minérios de ferro e rocha fosfática. Assim, a partir da seção seguinte se dará atenção exclusiva ao estudo geotécnico relativo a estes materiais, porém de forma generalizada. Apenas quando necessário serão feitas ressalvas das eventuais diferenciações encontradas nestas minerações.

## **2.2. REJEITOS**

Os rejeitos, produtos sem valor comercial do beneficiamento de minérios, exibem características mineralógicas, geotécnicas e físico-químicas variáveis, em função do tipo de minério e do próprio processo de beneficiamento. Em minerações de minérios de ferro e rocha fosfática o processo de geração destes rejeitos é bastante semelhante. Os minérios são submetidos a processos sucessivos de britagem, moagem e peneiramento, até se alcançar a granulometria e teores comerciais. Durante este processo são adicionados, ainda, alguns produtos químicos para auxiliar no alcance dos teores desejados. Estes fatores influenciam no seu comportamento em filtração quando lançados no barramento.

Após lavrado, o minério bruto (*run of mine – ROM*) geralmente passa por uma etapa de britagem primária e homogeneização, com o objetivo de prepará-lo para a usina de beneficiamento. Na usina ocorre a rebitagem, para possibilitar o início do processo de concentração. Este processo inicia com a moagem do material rebitado, geralmente seguida da adição de água para deslamagem e separação/concentração. Nas etapas de moagem e deslamagem é gerada parte dos rejeitos granulares e das lamas enviadas às barragens. Especialmente no caso da rocha fosfática, após a moagem, pode ser realizada uma etapa de separação magnética, com o intuito de coletar a magnetita presente no minério e enviá-la ao reservatório da barragem de rejeitos. O processo de concentração segue com o envio dos produtos da deslamagem para a etapa de flotação. Nesta, são adicionados reagentes condicionantes para favorecer o processo de segregação das partículas dos minerais. Na Tabela 2.3 são apresentados alguns dos reagentes utilizados nas minerações de minérios de ferro e rocha fosfática brasileiras. Uma das principais diferenciações entre os processos de beneficiamento dos minérios de ferro e rocha fosfática ocorre aqui, em que os materiais que sofrem flotação são considerados rejeitos pelo primeiro enquanto, no segundo, os rejeitos são aqueles que sofrem sedimentação. A partir desta etapa os concentrados minerais podem ser preparados para transporte e os rejeitos, na forma fluida (polpa), encaminhados para

---

disposição nos reservatórios das barragens. Os concentrados podem, ainda, ser novamente submetidos a etapas semelhantes às mencionadas, para maior concentração dos minérios.

Tabela 2.3: Reagentes utilizados na concentração dos minérios de ferro e rocha fosfática.

<b>Reagentes</b>	
<b>Minério de Ferro <sup>(1)</sup></b>	<b>Minério de Rocha Fosfática <sup>(2)</sup></b>
Amido de milho	Amido de milho
Soda cáustica	Soda cáustica
Amina	Ácidos graxos
Cal	Reagentes sintéticos
Sulfito de sódio	
Sulfato ferroso	
Floculante	
Coagulante	

Fontes: (1) Taveira (2003); e (2) GETEC/CMT (2003).

Os rejeitos são encaminhados às barragens acompanhados por um fluido composto por água e reagentes que podem influenciar tanto o seu comportamento quanto o da própria água frente a situações de percolação. Nogueira Jr. (1986) estudou a possibilidade de colmatação química de drenos de barragens por compostos de ferro. Neste estudo, afirma que o pH da água (ou fluido) e o potencial de oxi-redução e complexação do ferro influenciam no processo de solubilização e precipitação de compostos de ferro. Os potenciais de oxi-redução e complexação do ferro determinam a sua susceptibilidade a estes processos. A precipitação, por exemplo, comumente ocorre na saída do sistema de drenagem devido à ação oxidante do oxigênio do ar e/ou da atividade de organismos vivos ali presentes. Espósito (2000), por meio de estudos com recursos de microscopia ótica, verificou a presença de concreções de goethita em rejeitos de minério de ferro depositados hidraulicamente, possivelmente formadas *in situ* após solubilização e reprecipitação de óxidos de ferro. Vários outros pesquisadores estudaram o fenômeno de colmatação de filtros e drenos por compostos de ferro, como Haas (1982), Bentel et al. (1982), Scheurnberg (1982), Mendonça *et al.* (1999). Alguns destes trabalhos serão tratados na seção relativa a sistemas de drenagem e filtração de barragens de rejeitos.

A Tabela 2.4 apresenta alguns dos principais minerais presentes em rejeitos de minérios de ferro e rocha fosfática brasileiros. Além das etapas de britagem e moagem, que favorecem a formação de arestas bem definidas (Abrão, 1987), a mineralogia também pode influenciar a forma dos grãos de rejeitos gerados. O quartzo e a magnetita, por exemplo, têm estrutura



composta por dimensões aproximadamente equidimensionais. Já nos casos da hematita e das micas, suas estruturas favorecem a formação de grãos lamelares. Assim, tanto os rejeitos de minério de ferro quanto os de rocha fosfática apresentam grãos com formas variadas, especialmente equidimensionais e lamelares.

Tabela 2.4: Principais minerais presentes em minérios de ferro e rocha fosfática brasileiros e respectivos pesos específicos.

<b>Composição Mineralógica</b>			
<b>Minério de Ferro</b>		<b>Minério de Rocha Fosfática</b>	
<b>Mineral</b> <sup>(2)</sup>	<b>Peso Específico</b> <sup>(1) (4)</sup>	<b>Mineral</b> <sup>(3)</sup>	<b>Peso Específico</b> <sup>(1) (4)</sup>
Quartzo	2,65	Apatita	3,11 a 3,22
Hematita	5,26	Magnetita	5,20
		Micas (Vermiculita)	2,30
		Quartzo	2,65
		Perovskita / Anatásio	3,98 a 4,26 / 3,82 a 3,97
		Calcita/Dolomita	2,71 / 2,86

Nota: (1) Peso específico = peso específico do mineral ao ar / peso específico da água ao ar.

Fontes: (2) Espósito (2000); (3) GETEC/CMT (2003); e (4) Deer *et al.* (1966).

Enquanto na mineração de minério de ferro são gerados dois tipos principais de rejeitos, basicamente diferenciados pela granulometria, na mineração de rocha fosfática são gerados três tipos principais de rejeitos: magnético, composto por magnetita; lama; e rejeito arenoso. Com exceção da magnetita, os rejeitos de ambas as minerações, geralmente, têm grãos com diâmetro equivalente inferior a 2,0 mm. Aqueles utilizados diretamente nos alteamentos das barragens de contenção de rejeitos, apresentam grande parte de suas partículas na fração areia, ou seja, com diâmetro equivalente entre 0,05 e 2,0 mm, segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995).

O comportamento de solos frente a condições de percolação é bastante discutido na literatura, especialmente no que se refere ao potencial de migração das partículas por meio dos vazios adjacentes. No caso de solos finos, o conceito de dispersibilidade está associado ao potencial das partículas entrarem em suspensão quando em contato com água na ausência de fluxo (Sherard *et al.*, 1976b). Neste mesmo trabalho, o autor afirma que o fenômeno da dispersibilidade de solos está associado à ocorrência de íons de sódio em suspensão no fluido percolante. Volk (1937), citado por Sherard *et al.* (1976b), propõe o SCS Laboratory Dispersion Test, também conhecido como ensaio sedimentométrico comparativo. Neste ensaio, o potencial à dispersibilidade do solo é medido por meio da comparação dos teores de

---

argila ( $\% < 0,002$  ou  $0,005$  mm) das curvas granulométricas obtidas após realização de ensaios de sedimentação com e sem o uso de agitação mecânica e defloculação química das amostras. Sherard *et al.* (1976a) propõe a realização de um ensaio de laboratório, denominado Pinhole, para verificação deste fenômeno por meio da observação da coloração da água destilada submetida à percolação por um furo previamente produzido no corpo de provas.

No caso de solos granulares, como os rejeitos geralmente utilizados no alteamento de barragens, é mais comum ser tratado o conceito de estabilidade interna. A estabilidade interna de um solo trata-se da sua habilidade de prevenir a perda de partículas frente a perturbações externas, como o fluxo de água, por exemplo. Estudado desde a década de 30, teoricamente este conceito se aplica a qualquer tipo de solo. Porém, a redução da granulometria do material, assim como da severidade das forças perturbadoras, diminui o potencial à instabilidade, ou sufusão, como também é denominada. Em materiais granulares, devido à ausência, ou quase, de coesão entre as partículas, a distribuição granulométrica e a densidade relativa do material, além da severidade das forças perturbadoras, determinam o potencial ao carreamento. Um material estável se manterá assim independentemente da sua compacidade ou da intensidade da força perturbadora. Porém o potencial à instabilidade aumenta com a diminuição da densidade relativa e o aumento da força perturbadora. (Kenney e Lau, 1985).

Segundo Lafleur *et al.* (1989), solos internamente instáveis estão sujeitos a se auto-colmatarem, ou seja, bloquear os seus próprios vazios de maneira a dificultar, ou até impedir, a passagem do fluido percolante. Diversos pesquisadores têm estudado o mecanismo de estabilidade interna de solos granulares, uma vez que se trata de fator preponderante no comportamento de filtros e drenos. Sherard (1979), Kenney e Lau (1985) e Lafleur *et al.* (1989) sugerem que o potencial à sufusão seja avaliado em função de parâmetros retirados da distribuição granulométrica dos materiais envolvidos. Muñoz (2005), após realização de ensaios de filtração com amostras de solos avaliados diferentemente pelas metodologias propostas em Kenney e Lau (1985) e Lafleur *et al.* (1989) constatou que estas apresentam divergências em alguns casos, e recomenda a consideração dos efeitos da força de percolação, ou outros tipos de forças perturbadoras, e da forma e textura dos grãos. Honjo *et al.* (1996) afirmam que o solo adjacente ao filtro pode formar dispositivos internos de auto-filtração. Estes dispositivos se formam a partir da migração de partículas no seu interior e sua formação é controlada pelas partículas mais graúdas do material. Eles ainda afirmam que solos que apresentem razão de descontinuidade granulométrica (razão entre os diâmetros, maior e

---

menor, que limitam a descontinuidade) maior que 4 não têm capacidade de formação destes dispositivos, sendo determinados instáveis internamente. Sherard *et al.* (1984a e 1984b) e Tomlinson e Vaid (2000) ainda investigaram a influência do confinamento no comportamento do solo. Fenton e Griffiths (1997), Tomlinson e Vaid (2000), Locke (2001) e Indraratna e Radampola (2002) discutem a influência do gradiente hidráulico na estabilidade interna de solos granulares.

Assim, ao se estudar o mecanismo de filtração em barragens em geral deve-se estar atento ao comportamento dos materiais a serem protegidos pelo filtro. Em especial, no caso de rejeitos, a mineralogia, a forma dos grãos e o processo de beneficiamento têm influência direta nos parâmetros considerados nas principais metodologias de avaliação da dispersibilidade e da estabilidade interna destes materiais.

### **2.3. SISTEMAS DE DRENAGEM E FILTRAÇÃO INTERNA: GRANULARES**

O sistema de drenagem e filtração interna é um importante dispositivo de controle da posição da superfície freática em barragens de contenção de rejeitos alteadas pela técnica de aterro hidráulico. A sua geometria é principalmente determinada pelo método de alteamento utilizado. Comumente são dimensionados por meio das técnicas de projeto de sistemas de drenagem e filtração de barragens de terra compactada. O comportamento destes dispositivos em situação de fluxo é influenciado pelas características do fluido, dos materiais adjacentes, especialmente os rejeitos, dos próprios materiais que os compõem e da interação entre eles.

Neste contexto, o sistema de drenagem e filtração interna do barramento deverá permitir a máxima vazão do fluido, evitando o movimento conjunto de partículas que possam prejudicar a drenabilidade ou mesmo gerar a instabilidade interna do próprio material adjacente (Taylor, 1948). Os materiais empregados na sua construção podem ser naturais ou artificiais de empréstimo, ou oriundos das próprias minerações, como rejeitos ciclados ou outros materiais graúdos. O uso de materiais granulares naturais é principalmente limitado por fatores econômicos relacionados com a distância de transporte. Isso justifica o uso de materiais disponíveis, geralmente em abundância, na própria mineração. O ciclamento dos rejeitos pode possibilitar o seu uso, porém o lançamento inadequado da fração fina deste processo no barramento, segundo Vick (1983), pode reduzir a eficiência do rejeito grosso ciclado como sistema filtro-drenante. No caso de outros materiais granulares oriundos da própria mineração, as etapas do processo em uqe são gerados determinam suas características geotécnicas. Vick (1983) menciona a ocorrência de *piping* e comportamento inapropriado em

---

filtros executados com materiais graúdos, resíduos, da própria mineração. No estudo de barragens do Quadrilátero Ferrífero (MG), Mafra e Chapadeiro (2002) chamam a atenção para a excessiva quantidade de finos presente no *sinter feed* (material graúdo da mineradora), utilizado como substituto de materiais de empréstimo na composição de sistemas filtro-drenantes, e para seu elevado potencial a colmatação por óxidos de ferro.

O projeto de sistemas de drenagem e filtração busca a determinação das dimensões e geometrias que melhor atendem ao adequado controle do fluido percolante. O estudo das potenciais geometrias a serem empregadas, no caso de barragens de contenção de rejeitos alteadas por meio da técnica de aterro hidráulico, está diretamente vinculado ao método de alteamento utilizado. Nas Figura 2.2b, Figura 2.3b e Figura 2.4b são apresentadas algumas possibilidades geométricas. Já o seu dimensionamento é tomado como função das características do fluido percolante, dos materiais adjacentes (rejeitos), dos materiais constituintes do próprio dispositivo e da interação entre eles.

Desde os anos 20 têm sido propostos critérios empíricos de dimensionamento de filtros baseados no desempenho quanto à condutividade hidráulica e à retenção de partículas, verificado em laboratório. Destes, alguns dos mais utilizados em sistemas de drenagem e filtração de barragens são apresentados na Tabela 2.5. Muitas vezes, estes critérios tentam resumir resultados encontrados por meio de estudos de laboratório em comparações de parâmetros de fácil determinação, como aqueles oriundos das curvas granulométricas dos materiais envolvidos. O critério proposto por Vaughan e Soares (1982), por exemplo, sugere que o material do filtro seja escolhido em função da sua condutividade hidráulica que, por sua vez, é determinada de uma relação com o diâmetro característico do material adjacente. A condutividade hidráulica, aqui, resume os efeitos da porosidade, da forma dos grãos e da distribuição granulométrica, além de outras, do material a ser selecionado como filtro. Fischer e Holtz (1996) e Sherard *et al.* (1984a) questionam o uso do coeficiente de não-uniformidade dos solos ( $C_u$ ) e da relação entre os diâmetros médios dos grãos do material do filtro ( $D_{50}$ ) e do solo adjacente ( $d_{50}$ ) em critérios de projeto de sistemas de drenagem e filtração. Apesar da simplicidade, estes critérios empíricos se aplicam mais razoavelmente a materiais semelhantes aos estudados na sua respectiva concepção, implicando na comum adoção de elevados coeficientes de segurança no dimensionamento de sistemas de drenagem e filtração. Segundo Assis (2003), estes coeficientes de segurança, em geral, variam de 10 a 100.

Tabela 2.5: Critérios empíricos de projeto de sistemas de drenagem e filtração de barragens (Assis, 2003)

Autor	Material Adjacente	Critério de Filtro	Principais Características
Terzaghi (1922)	Areia uniforme	$D_{15}/d_{15} > 4 - 5$ $D_{15}/d_{85} < 4 - 5$	Baseado na experiência do autor.
US Bureau of Reclamation (1963)	$C_u = 3 - 4$ (solos não coesivos)	$5 < D_{50}/d_{50} < 10$ (areia fina)	$D_{100} < 75$ mm, $D_5 > 0,074$ mm e as frações finas dos materiais do filtro e do solo adjacente devem ter curvas granulométricas paralelas.
	$C_u > 4$ (solos bem graduados)	$12 < D_{50}/d_{50} < 58$ e $12 < D_{15}/d_{15} < 40$ (partículas arredondadas) $9 < D_{50}/d_{50} < 30$ e $6 < D_{15}/d_{15} < 18$ (partículas angulares)	
Vaughan e Soares (1982)	-	$k_F < 6,7 \cdot 10^{-6} \cdot \delta^{1,52}$	$\delta$ em $\mu\text{m}$ .
Sherard e Dunnigan (1985)	Siltes finos e Argilas (+ 85% < 0,074 mm)	$D_{15}/d_{85} \leq 9$	Filtros de solos finos (mais de 40% < 0,074 mm) devem ter menos de 60% mais grosseiro que 4,76 mm e tamanho máximo de partícula de 50 mm. Para condutividade hidráulica propõe $D_{15}/d_{15} < 3 - 5$ .
	Siltes e Areia Argilosa (40 a 85% < 0,074 mm)	$D_{15} \leq 0,7$ mm	
	Material intermediário (15 a 40% < 0,074 mm)	$D_{15} = \frac{40 - A}{40 - 15} ((4 \cdot d_{85}) - 0,7) + 0,7$ mm	
	Material Grosso (- 15% < 0,074 mm)	$D_{15}/d_{85} < 4 - 5$	

Notas:  $C_u$  corresponde ao coeficiente de não-uniformidade do solo, dado pela relação  $d_{60}/d_{10}$ ;  $D_i$  é o diâmetro máximo (mm) das  $i\%$  partículas mais finas do material do filtro;  $d_j$  é o diâmetro máximo (mm) das  $j\%$  partículas mais finas do material adjacente ao filtro;  $k_F$  condutividade hidráulica do filtro;  $\delta$  é o diâmetro equivalente representativo das partículas do solo adjacente ao filtro, frequentemente  $\delta = d_{85}$ , e  $A$  é a porcentagem de partículas (%), do material adjacente ao filtro, menores que 0,074 mm.

Especialmente após o advento do computador, diversos pesquisadores têm estudado e proposto critérios de dimensionamento de sistemas de drenagem e filtração considerando os efeitos de mais parâmetros no mecanismo de filtração (Silveira, 1965; Kenney *et al.*, 1985; Honjo e Veneziano, 1989; Schuler, 1996; Bordier e Zimmer, 1996; Indraratna e Vafai, 1997; Reddi e Bonala, 1997; Reddi *et al.*, 2000; Locke, 2001; Radampola, 2001). Estes critérios são baseados nos chamados modelos analíticos de filtração (Locke, 2001). O processo de

---

interação entre os materiais envolvidos no mecanismo de filtração é bastante complexo, sendo influenciado por diversos fatores como: forma, rugosidade e peso específico dos grãos, distribuição granulométrica, características dos vazios, coesão, densidade aparente dos materiais do filtro e dos solos adjacentes; viscosidade, temperatura e densidade do fluido percolante; gradiente hidráulico e vazão de fluxo; e ação de agentes químicos e biológicos. A dificuldade de analisar a interação ao longo do tempo de todos estes fatores leva à necessidade de relegar alguns, considerados menos importantes e/ou mais difíceis de controlar.

Silveira (1965), propõe um modelo probabilístico para avaliar a capacidade de retenção de partículas de um filtro a partir da distribuição dos diâmetros de suas constrições, definindo o número de confrontos e a profundidade de infiltração das partículas até a retenção. O termo constrição está associado à menor dimensão dos vazios que ligam poros adjacentes em um meio poroso. Kenney *et al.* (1985) discutem a distribuição do tamanho destas constrições em função de parâmetros da distribuição granulométrica dos materiais. Schuler (1996) propõe o dimensionamento de filtros granulares em função da variabilidade granulométrica do solo adjacente, dada pela proporção em massa das partículas divididas em faixas de diâmetros, e de um modelo cúbico de distribuição dos canais porosos dos materiais envolvidos. A colmatação dos canais de poros do material do filtro, ao longo do tempo, é discutida por Bordier e Zimmer (1996), Reddi e Bonala (1997) e Reddi *et al.* (2000). Bordier e Zimmer (1996) propõem um modelo para seleção de materiais de filtros em função deste efeito, enquanto Reddi *et al.* (2000) propõem a previsão da variação da condutividade hidráulica do filtro ao longo do tempo. Indraratna e Vafai (1997) propõem a consideração de canais interligando poros e discutem o movimento de partículas ao longo do tempo através do filtro quando submetidas à ação das forças de percolação. Como resultado, estes pesquisadores propõem um modelo matemático para previsão da migração das partículas do solo adjacente para o filtro ao longo do tempo, o qual permite a avaliação da variação cronológica da condutividade hidráulica e da vazão pelo filtro. Este modelo é utilizado por Radampola (2001) para avaliar a influência do gradiente hidráulico no mecanismo de filtração. Locke (2001) considera que o filtro é composto por uma rede tridimensional de vazios, incorpora o modelo probabilístico de Silveira (1965) para avaliar o diâmetro das constrições e modifica o modelo de Indraratna e Vafai (1997) para considerar o aumento da viscosidade do fluxo, devido às partículas em suspensão, na previsão da profundidade de infiltração das partículas e consequente determinação da espessura do filtro.

---

Também deve ser analisado o comportamento de longo prazo dos materiais envolvidos no mecanismo de fluxo através de barragens de contenção de rejeitos, alteadas com os próprios materiais a serem contidos. Os estudos neste sentido voltados para materiais convencionais, devem ser mais bem avaliados frente às peculiaridades dos rejeitos de mineração. A colmatação físico-química de filtros de barragens de rejeitos por compostos de ferro, por exemplo, tratada por Bentel et al. (1982), Scheurnberg (1982), Vick (1983) e Pacheco e Melo (1987), ressalta esta necessidade. A indicação de novas técnicas e materiais para estes dispositivos demandam igual ou maior consideração. No caso de geotêxteis, a possibilidade de controle de suas características hidráulicas por meio do processo industrial em que são produzidos é uma grande vantagem sobre os materiais granulares naturais, na medida em que pode permitir a diminuição da quantidade de variáveis envolvidas no processo de análise.

#### **2.4. GEOTÊXTEIS**

Geotêxtil é a denominação dada a produtos utilizados em engenharia, de origem polimérica, constituídos de filamentos contínuos ou não dispostos em forma de mantas, em estruturas tecidas ou não. Uma das principais aplicações destes produtos é como dispositivo de drenagem e filtração em obras em geral. Tendo isto em vista, há um amplo conhecimento acerca dos parâmetros que controlam seu comportamento quando submetido a estes casos.

Como esta pesquisa se destina ao estudo do comportamento daqueles geotêxteis cujos filamentos são dispostos de forma aleatória na manta, denominados geotêxteis não tecidos, a partir daqui se dará ênfase a estes materiais, exceto quando mencionado em contrário. A maioria destes materiais é produzida a partir de filamentos de poliéster (PET) ou polipropileno (PP) (Koerner, 1994). Na Tabela 2.6 são apresentadas algumas características destes polímeros. A solidarização destes filamentos poliméricos em forma de manta têxtil geralmente é feita por: agulhamento, em que as fibras são entrelaçadas umas as outras, formando os geotêxteis não tecidos agulhados; fusão parcial por aquecimento, formando os geotêxteis não tecidos termoligados; e interligação pela ação de produtos químicos, formando os geotêxteis não tecidos resinados. Neste trabalho são avaliados apenas àqueles agulhados. Devido ao fato de serem produzidos industrialmente, os geotêxteis não tecidos agulhados podem ter suas principais características controladas e adaptadas às necessidades de projeto.

Dentre as propriedades ditas como estruturais de geotêxteis não tecidos por Koerner (1994), pode-se citar a gramatura, a espessura e as associadas à porometria como sendo as mais importantes no comportamento hidráulico de geotêxteis (Vidal, 2001). A determinação da

gramatura ( $M_A$ ), equivalente à massa por unidade de área da manta têxtil, encontra-se normatizada na norma brasileira NBR 12568 (ABNT, 1992). Esta propriedade é atribuída ao geotêxtil no processo industrial em que é produzido. A espessura ( $t_{GT}$ ) pode ser definida como a distância entre as duas faces da manta do geotêxtil quando submetido a uma tensão normal de 2 kPa, denominada espessura nominal, ou a uma solicitação próxima a de campo para projeto. No caso de geotêxteis não tecidos agulhados esta diferenciação se justifica na alta compressibilidade exemplificada na Figura 2.5, na qual se pode notar uma maior influência da tensão normal na espessura para carregamentos de até 200 kPa. A determinação da espessura de geotêxteis encontra-se normatizada na norma brasileira NBR 12569 (ABNT, 1992).

Tabela 2.6: Propriedades do Polipropileno (PP) e do Poliéster (PET). (Mano, 1991)

Polímero	Densidade Relativa	Complementares
Polipropileno (PP)	0,90	Termoplástico de alta resistência à oxidação química e a ação de solventes.
Poliéster (PET)	1,33 a 1,45	Termoplástico resistente mecânica, térmica e quimicamente, porém susceptível ao ataque de soluções alcalinas.

Quanto aos parâmetros relacionados à porometria da manta, a porosidade e a distribuição do tamanho de constrições merecem destaque. A porosidade ( $n_{GT}$ ), normalmente expressa em porcentagem, é a relação entre o volume de vazios e o volume total da amostra. Giroud (1996) relaciona a porosidade com a gramatura e a espessura do geotêxtil por meio da relação

$$n_{GT} = 1 - \frac{M_A}{t_{GT} \cdot \rho_f} \quad \text{Equação 2.3}$$

em que  $\rho_f$  é a massa específica das fibras ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $t_{GT}$  é a espessura do geotêxtil (cm) e  $M_A$  é a sua gramatura (g). Na Figura 2.5 se pode notar que a porosidade também é influenciada pelo nível de tensões. Porém, esta influência é menor que no caso da espessura.

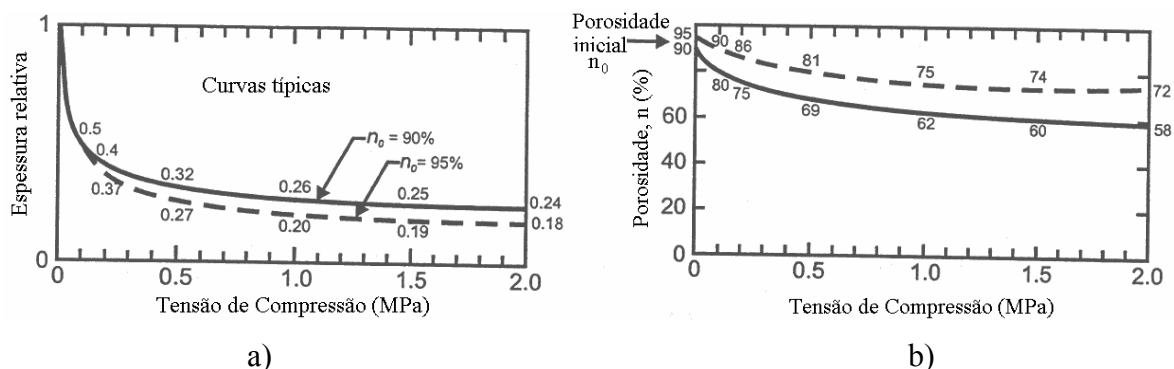


Figura 2.5: Influência da tensão normal em geotêxteis não tecidos agulhados: a) espessura; e b) porosidade (modificado de Giroud, 1996)



Conceito semelhante ao adotado para filtros granulares naturais, a distribuição do tamanho das constrições, menor diâmetro de um canal de fluxo, pode ser obtida determinando o diâmetro das partículas que atravessam a manta. E, a partir desta caracterização, pode ser determinado o parâmetro mais relevante do ponto de vista prático, segundo Gardoni (2000), para o dimensionamento de filtros e drenos têxteis: a abertura de filtração ( $O_{98}$ ). Também influenciada pela tensão confinante, a  $O_{98}$  equivale ao diâmetro máximo da partícula que pode atravessar a manta. Dentre os ensaios empregados na sua determinação podem ser citados: o peneiramento, a seco, úmido ou hidrodinâmico, de partículas calibradas através da manta (Calhoun, 1972; Gerry e Raymond, 1983; Fayoux, 1977; Mlynarek *et al.*, 1993); métodos baseados no fenômeno de capilaridade, onde se destaca o “bubble point”, combinando medidas de tensão capilar com medidas de fluxo de ar através do geotêxtil (Bathia *et al.*, 1994; Bathia e Smith, 1995; Palmeira e Gardoni, 2000); e tratamento matemático das medidas obtidas através de análises morfológicas da superfície da manta, onde os vazios são preenchidos com resina (Rollin *et al.*, 1977). Deve-se observar que a influência da tensão confinante fica relegada nestas metodologias. Em contrapartida, Giroud (1996) propõe a determinação da abertura de filtração por meio da Equação 2.4 e da Equação 2.5, em que se pode notar esta influência uma vez que a espessura do geotêxtil ( $t_{GT}$ ) também é função da tensão confinante. Na Figura 2.6 são apresentadas curvas espessura *versus* abertura de filtração, obtidas segundo estas equações.

$$\frac{O_{98}}{d_f} = \frac{1}{\sqrt{1 - n_{GT}}} - 1 + \frac{\xi \cdot n_{GT}}{(1 - n_{GT})t_{GT} / \rho_f} \quad \text{Equação 2.4}$$

que é equivalente a

$$\frac{O_{98}}{d_f} = \left( \frac{t_{GT}/d_f}{M_A/\rho_f d_f} \right)^{1/2} - 1 + \frac{\xi \left( 1 - \frac{M_A/\rho_f d_f}{t_{GT}/d_f} \right)}{M_A/\rho_f d_f} \quad \text{Equação 2.5}$$

em que  $d_f$  é o diâmetro das fibras do geotêxtil; e  $\xi$  é um parâmetro adimensional obtido da calibração com dados de ensaio.

Quanto às propriedades hidráulicas, pode-se verificar o uso da teoria de Darcy na avaliação dos principais parâmetros. Considerando a ocorrência de fluxo laminar, são determinadas a condutividade hidráulica normal ao plano da manta ( $k_n$ ) e a capacidade de fluxo ao longo

desta ( $k_t$ ). A primeira permite a determinação de uma propriedade bastante útil à quantificação do fluxo normal ao plano: a permissividade ( $\psi$ ):

$$k_n = \frac{v}{i} \quad \text{Equação 2.6}$$

$$\psi = \frac{k_n}{t_{GT}} \quad \text{Equação 2.7}$$

em que  $v$  é a velocidade aparente de fluxo (cm/s) e  $i$  o gradiente hidráulico.

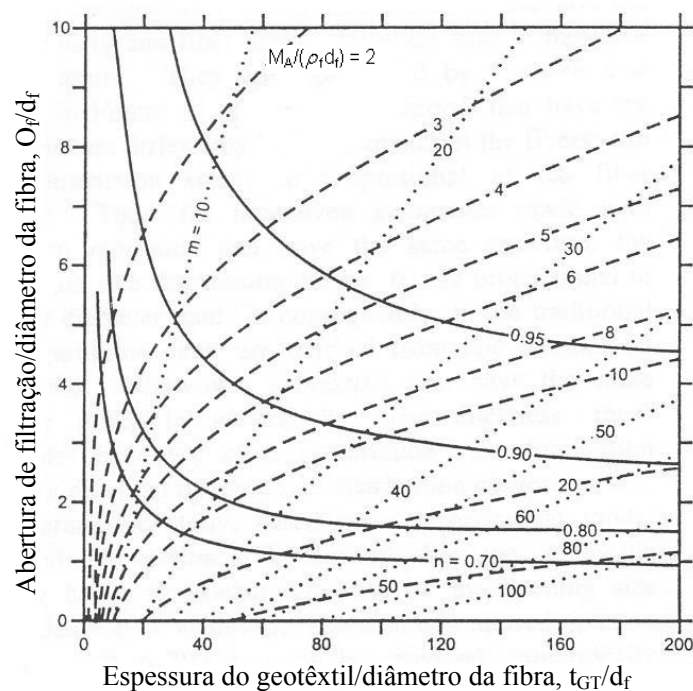


Figura 2.6: Variação da abertura de filtração em função da espessura em geotêxteis não tecidos agulhados (modificado de Giroud, 1996)

A segunda, a capacidade de fluxo no plano da manta ( $k_t$ ), importante na avaliação da drenabilidade do geotêxtil (Gardoni, 2000), está relacionada à definição da transmissibilidade ( $\theta$ ) por

$$\theta = k_t \cdot t_{GT} \quad \text{Equação 2.8}$$

Diversos pesquisadores discutem a influência das propriedades estruturais, como o diâmetro das fibras, a espessura e a porosidade da manta e suas variações em função do carregamento aplicado, nestas propriedades hidráulicas de geotêxteis não tecidos (Gourc *et al.*, 1982; Koerner e Sankdey, 1982; Rauman, 1982; Giroud, 1996; Gardoni e Palmeira, 1998; e

Gardoni, 2000). No caso da permissividade, Gardoni (2000) verificou um decréscimo de até 10 vezes para cargas de até 550 kPa, situação agravada quando utilizado o geotêxtil previamente impregnado. A transmissibilidade, apesar da dispersão dos resultados obtidos, justificada pela variabilidade estrutural das mantas ensaiadas, também apresentou este comportamento. Porém, a impregnação, que reduziu a compressibilidade do geotêxtil, diminuiu este efeito de redução quando comparado com a manta limpa. Ocorre, ainda, a anisotropia dos parâmetros estruturais, inclusive com o efeito da variação da tensão confinante, que se traduz em anisotropia dos parâmetros hidráulicos dos geotêxteis não tecidos (Gourc *et al.*, 1982; Palmeira e Gardoni, 2002). Na Figura 2.7 são apresentadas curvas das condutividades hidráulicas normal ( $k_n$ ) e ao longo da manta têxtil ( $k_t$ ) em função da tensão normal aplicada, para um geotêxtil de gramatura igual a 200 g/m<sup>2</sup>, segundo Gardoni (2000).

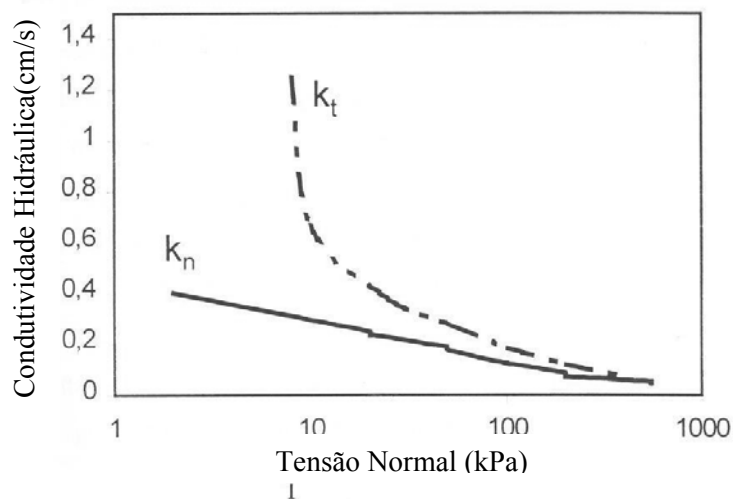


Figura 2.7: Anisotropia da condutividade hidráulica em função da tensão confinante em geotêxteis não tecidos. (Gardoni, 2000)

## 2.5. SISTEMAS DE DRENAGEM E FILTRAÇÃO INTERNA: GEOTÊXTEIS

Quando aplicado em sistemas de drenagem em filtração interna o geotêxtil também deverá permitir a máxima vazão do fluido, evitando o movimento conjunto de partículas que possam prejudicar a drenabilidade ou mesmo gerar a instabilidade interna do próprio material adjacente. Aplicados em barragens de terra compactada convencionais e em barragens de rejeitos de mineração alteadas por aterro hidráulico há mais de 25 anos (Bentel *et al.*, 1982; Montez, 1987; Faure *et al.*, 1999; Bush, 1987), o comportamento destes materiais em condições de filtração vem sendo estudado por diversos pesquisadores. Por se tratar de uma tecnologia relativamente recente, apesar dos grandes avanços já obtidos na previsão e avaliação de seu comportamento filtro-drenante e das metodologias de projeto propostas até

---

então, alguns testes e análises ainda precisam ser feitos para verificar e adequar seu desempenho às situações cotidianas de engenharia. Dentre estes, o uso de geotêxteis em sistemas de drenagem e filtração interna de barragens de contenção de rejeitos de mineração é destacado nesta pesquisa, tendo em vista as peculiaridades práticas impostas por este tipo de estrutura ao mecanismo de filtração.

O dimensionamento de filtros têxteis, usualmente, é feito com base em critérios de retenção, permeabilidade e colmatação. Palmeira e Gardoni (2000) sumarizam alguns dos critérios de projeto existentes para o uso de geotêxteis não tecidos em dispositivos de filtração e drenagem. Estes critérios, em sua maioria, são pautados em relações empíricas comparando dimensões típicas de grãos do solo adjacente ao filtro com a abertura de filtração do geotêxtil (Equação 2.9).

$$O_{95} = X.d_j \quad \text{Equação 2.9}$$

em que:  $O_{95}$  é a abertura de filtração do geotêxtil (mm);  $d_j$  é um diâmetro característico do solo adjacente ao filtro (mm); e  $X$  é um coeficiente de correlação do critério de projeto.

Na avaliação do desempenho de filtros têxteis quanto à capacidade de retenção de partículas, Giroud (1994) afirma que o solo a ser protegido deve possuir uma distribuição uniforme das partículas e estar no estado denso, assegurando a perfeita interação entre as partículas, além de estar em contato íntimo com o filtro têxtil, o qual deve ser dotado de aberturas apropriadas. Porém, se estas não são satisfeitas, as partículas de solo que se deslocam devido ao fluxo d'água, possivelmente em maior monta, se não passarem através do geotêxtil podem interagir com ele de três diferentes formas (Lafleur, 1999): cegamento; bloqueamento; ou colmatação física do geotêxtil. Estas se diferenciam, basicamente, pela posição em que as partículas ficam retidas em relação à manta (Figura 2.8). Há, ainda, casos discutidos na literatura a respeito de fenômenos de colmatação química (Haas, 1982; Bentel *et al.*, 1982; Scheurnberg, 1982) e biológica (Colmanetti, 2002) de filtros sintéticos. A concepção de um filtro sintético requer o conhecimento destas condições de bloqueio, as quais dependem da espessura e da distribuição do tamanho de poros (Gardoni, 2000). Gardoni (2000) ressalta também a negligência dos efeitos da tensão normal atuante sobre a manta nos critérios de projeto de filtros têxteis, tendo sido comprovada sua influência em estudos como os apresentados em Gardoni (2000) e Bessa da Luz (2004).

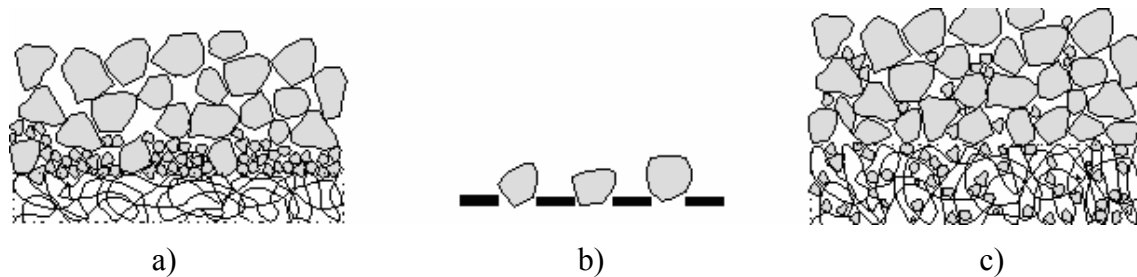


Figura 2.8: Mecanismos de colmatação física em filtros de geotêxtil não tecido: a) cegamento; b) bloqueamento; e c) colmatação (modificado - Palmeira & Gardoni, 2000).

Há diversos tipos e metodologias de ensaios de laboratório destinados à avaliação da compatibilidade do sistema solo-geotêxtil em condições de percolação, dos quais pode-se citar (Shi, 1993): o ensaio de fluxo de longa duração (LFT); o ensaio de condutividade hidráulica (HCR); o ensaio de filtração dinâmica (DF); o ensaio de filtração da fração fina ( $F^3$ ); e o ensaio de filtração do tipo razão entre gradientes (GR). Um dos mais utilizados na avaliação do potencial à colmatação e capacidade de retenção de geotêxteis, o ensaio GR tem sido empregado por diversos pesquisadores (Shi, 1993; Fannin et al., 1994a e 1994b; Shi et al., 1994; Palmeira et al., 1996; Matheus, 1997; Palmeira & Fannin, 1998; Gardoni, 1995 e 2000; Bessa da Luz, 2004; Araújo, 2005; Muñoz, 2005).

No ensaio de filtração do tipo razão entre gradientes (GR) o nível de colmatação do geotêxtil é inferido a partir da medida de gradientes hidráulicos em diferentes locais ao longo do sistema solo-geotêxtil. Um esquema do permeâmetro utilizado neste ensaio é apresentado na Figura 2.9. Este ensaio permite a avaliação do efeito da variação do gradiente hidráulico no comportamento dos materiais ensaiados. Segundo a ASTM (1991), na norma D 4491, a Razão entre Gradientes (GR) é definida como apresentado na Equação 2.10. Porém, Fannin *et al.* (1994a) e Gardoni (2000), na tentativa de melhorar a avaliação do desempenho do geotêxtil durante o ensaio, propuseram, respectivamente, as Equação 2.11 e Equação 2.12, em que recomendam a definição do GR em função dos gradientes hidráulicos medidos em regiões mais próximas da amostra de geotêxtil.

$$GR_{ASTM} = \frac{i_{9/12}}{i_{7/9}} \quad \text{Equação 2.10}$$

em que:  $i_{9/12}$  é o gradiente hidráulico entre os piezômetros 9 e 12, no trecho da amostra incluindo o geotêxtil e a camada de solo 25 mm imediatamente acima; e  $i_{7/9}$  é o gradiente

hidráulico no solo ensaiado, medido ao longo do trecho compreendido entre 25 e 75 mm acima do nível do geotêxtil, entre os piezômetros 7 e 9 (Figura 2.9).

$$GR_{Mod} = \frac{i_{10/12}}{i_{7/9}} \quad \text{Equação 2.11}$$

em que:  $i_{10/12}$  é o gradiente hidráulico entre os piezômetros 10 e 12, no trecho da amostra incluindo o geotêxtil e a camada de solo 8 mm imediatamente acima (Figura 2.9).

$$GR_{3mm} = \frac{i_{11/12}}{i_{7/9}} \quad \text{Equação 2.12}$$

em que:  $i_{11/12}$  é o gradiente hidráulico entre os piezômetros 11 e 12, no trecho da amostra incluindo o geotêxtil e a camada de solo 8 mm imediatamente acima (Figura 2.9).

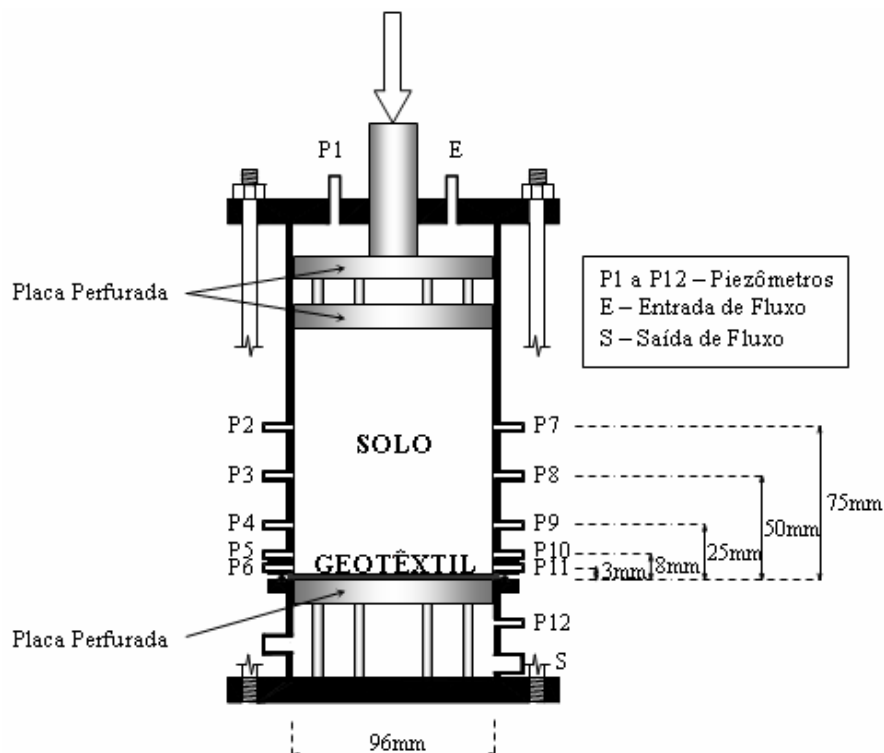


Figura 2.9: Esquema do permeâmetro utilizado em ensaios de filtração do tipo razão entre gradientes (GR) (modificado – Gardoni, 2000)

Gardoni (2000) e Bessa da Luz (2004) ainda verificaram o efeito da aplicação de elevados níveis de carregamento no topo do sistema solo-geotêxtil (corpo de prova), durante o ensaio de GR. Foi observado que os valores obtidos de  $GR_{3mm}$  são mais sensíveis a alterações no sistema solo-geotêxtil e podem ser bem maiores do que os propostos pela ASTM (1991) e por

---

Fannin et al. (1994a). Valores elevados de GR podem indicar colmatção do sistema. Já valores muito baixos podem indicar a ocorrência de *piping*. Um valor de GR unitário indica que a presença do geotêxtil não está afetando o regime de fluxo do sistema. Lafleur *et al.* (2002) consideram que valores de GR superiores a 2,0 são indicativos da ocorrência de algum fenômeno de colmatção, enquanto valores abaixo de 0,5 são considerados indicativos de *piping*. Em FHWA (1991), citado em Gardoni (2000), um valor de  $GR_{ASTM}$  igual ou superior a 3 indica incompatibilidade do conjunto solo-geotêxtil ensaiado, sendo indicativo da ocorrência de colmatção. Porém, Gardoni (2000) constatou que, para alguns solos residuais, valores de  $GR_{ASTM}$  acima de 3 podem ocorrer sem que com isso o filtro se apresente colmatado. A verificação deste fato por meio da variação da condutividade hidráulica do sistema solo-geotêxtil, mostra que o uso exclusivo do valor do GR não é suficiente para a decisão da escolha ou não de um filtro sintético. Além da condutividade hidráulica, o acompanhamento da variação da vazão pode auxiliar na avaliação dos resultados dos ensaios de filtração do tipo razão entre gradientes.

Estudos da compatibilidade de sistemas solo-geotêxtil por meio de ensaios de GR, em que o solo trata-se de rejeito de mineração, foram realizados por Gardoni (2000), Bessa da Luz (2004) e Araújo (2005). Gardoni (2000) e Bessa da Luz (2004) apresentam resultados de ensaios de GR em que foram aplicadas tensões normais de 0 a 2000 kPa em corpos de provas compostos por rejeitos arenosos de minério de ferro e geotêxtil de gramatura variando de 150 a 600 g/m<sup>2</sup>, sob gradiente hidráulico unitário. Araújo (2005) apresenta resultados de ensaios de filtração do tipo razão entre gradientes de grandes dimensões. Nestes ensaios foi aplicado um gradiente hidráulico constante unitário, sem aplicação de tensões normais, a corpos de provas compostos por rejeitos finos de minério de ferro e geotêxteis de gramatura variando de 150 a 400 g/m<sup>2</sup>. Em todos estes trabalhos é relatada a verificação da maior sensibilidade do  $GR_{3mm}$  às condições do ensaio.

Os avanços alcançados na avaliação do comportamento dreno-filtrante de geotêxteis têm permitido o seu crescente uso em sistemas de drenagem e filtração de barragens de rejeitos. Abaixo são apresentados alguns casos históricos e algumas lições aprendidas. Além destes, há mais registros do uso de geotêxteis em sistemas de drenagem e filtração de barragens de rejeitos como: na recuperação da barragem de rejeitos de minérios de ferro da Mina do Pico São Luís (MG/Brasil) (Parra e Ramos, 1987); na Barragem do Germano, de rejeitos de minérios de ferro, da Samarco Mineração Ltda. (MG/Brasil) (Pimenta de Ávila Consultoria,

---

2003b); diques de contenção de rejeitos finos de minério de ferro, da Samarco Mineração Ltda. (MG/Brasil) (Pimenta de Ávila Consultoria, 2003a); e na barragem BL1, de rejeitos de minério de rocha fosfática (MG/Brasil) (Bush, 1987). Cabe ressaltar, inclusive, que amostras de geotêxteis exumadas nos diques de contenção de rejeitos finos de minério de ferro, da Samarco Mineração Ltda, apresentaram indícios de colmatação por cegamento e bloqueamento (Araújo, 2005).

- Barragens de rejeitos de minério de ouro, na África do Sul (Bentel et al., 1982): frente às vantagens de redução de custos e tempo de construção, geotêxteis não tecidos agulhados, de filamentos contínuos, foram empregados, entre 1976 e 1982, em barragens de rejeitos de minério de ouro na região noroeste da África do Sul. Tendo seu comportamento acompanhado, principalmente, por meio de piezometria, os geotêxteis apresentaram bom desempenho no auxílio ao controle da posição da superfície freática no barramento. Inclusive, os pesquisadores comentam que os geotêxteis se comportaram bem frente às peculiaridades químicas dos rejeitos e fluidos das barragens, não apresentando indícios de degradabilidade ou colmatação química.
- Barragem de rejeitos minério de ouro da ERGO, na África do Sul (Scheurenberg, 1982): tendo sido aplicados em sistemas de drenagem interna do barramento, verificou-se a colmatação da manta têxtil não tecida, principalmente nas áreas expostas à atmosfera, por compostos de ferro. Constatou-se, porém, que esta colmatação pode não estar associada especificamente com a manta sintética, uma vez que também foi observada em drenos compostos por materiais granulares convencionais;
- Barragens de rejeitos de nióbio da Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração, no estado de Minas Gerais/Brasil (Montez, 1987): tendo iniciada a utilização nos sistemas de drenagem e filtração interna das barragens em 1976, é relatado o bom desempenho dos geotêxteis ao longo do tempo. Tratam-se de duas barragens com alturas máximas previstas de 48 e 74 metros. Os geotêxteis não tecidos foram empregados em drenos de pé, drenos horizontais, drenos inclinados e verticais, além de outros.



---

## **CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS**

---

### **3.1. INTRODUÇÃO**

Com o intuito de dar enfoque real à aplicação deste trabalho contou-se com a colaboração de duas empresas mineradoras brasileiras: Samarco Mineração Ltda. (Samarco) e Fertilizantes Fosfatados S.A. (Fosfértil). Referidas neste trabalho como “casos de estudo”, algumas particularidades das barragens de rejeitos disponibilizadas por estas empresas mineradoras são apresentadas na seção seguinte. Como poder-se-á notar, as mineradoras, além do fornecimento das amostras de rejeitos e fluidos, possibilitaram a realização da investigação de campo, para caracterização dos agentes intervenientes no mecanismo de filtração das barragens e dos rejeitos lançados hidraulicamente.

Após a descrição destes casos de estudo, são apresentados os materiais e métodos empregados nas investigações de campo e laboratório na busca dos objetivos deste trabalho.

### **3.2. CASOS DE ESTUDO**

#### **3.2.1. SAMARCO MINERAÇÃO LTDA – UNIDADE INDUSTRIAL DO GERMANO (UIG)**

Localizada no município de Mariana, no interior do estado de Minas Gerais, a Unidade Industrial do Germano (UIG), da Samarco Mineração Ltda., realiza trabalhos de lavra e beneficiamento de minério de ferro com teor contido aproximado de 55%. Esta unidade industrial gera cerca de 8,5 milhões de toneladas de rejeitos por ano, os quais tratam-se de dois tipos distintos, basicamente, pela granulometria.

Após lavrado, o *ROM* é encaminhado à planta de beneficiamento, onde é submetido aos processos de britagem, rebritagem, moagem, peneiramento e flotação, para separação e concentração de acordo com a demanda comercial. São adicionados água e outros reagentes ao minério bruto durante o beneficiamento. Assim, ao longo destes processos são gerados dois tipos principais de rejeitos: o rejeito fino (lama) e o rejeito arenoso. Encaminhados por via úmida às respectivas barragens de contenção, estes rejeitos podem ser diferenciados tanto pela granulometria quanto pela mineralogia de suas partículas, em função dos diferentes estágios do processo de beneficiamento em que são separados do minério bruto. A lama, coletada na etapa de flotação, geralmente, é mais fina e possui teores diferenciados de hematita e quartzo em relação ao rejeito arenoso.

A disposição destes rejeitos na UIG é feita em barragens alteadas com os rejeitos arenosos gerados, utilizando a técnica de aterro hidráulico. Atualmente, são duas às barragens empregadas com este fim: a barragem do Germano; e a barragem da Cava do Germano. A primeira é destinada à disposição tanto dos rejeitos arenosos quanto da lama, enquanto a segunda recebe apenas rejeitos arenosos. Iniciada em 1976, a barragem do Germano foi executada a partir de um dique inicial de 70 metros de altura, constituído por enrocamento impermeabilizado por um núcleo argiloso à montante. Os alteamentos seguintes ocorreram pelo método de montante, com os rejeitos arenosos sendo lançados por ponto único. Em 1999 foi definida a execução de um reforço à jusante do barramento original, incorporado a este com objetivo de melhorar suas condições de estabilidade, também constituído por rejeito arenoso. Na Figura 3.1 é apresentada uma foto da barragem do Germano, enquanto na Figura 3.2 é apresentada a sua seção transversal típica, em que se pode notar as geometrias do barramento com e sem o reforço.



Figura 3.1: Barragem do Germano, da UIG / Samarco (Araújo, 2005).

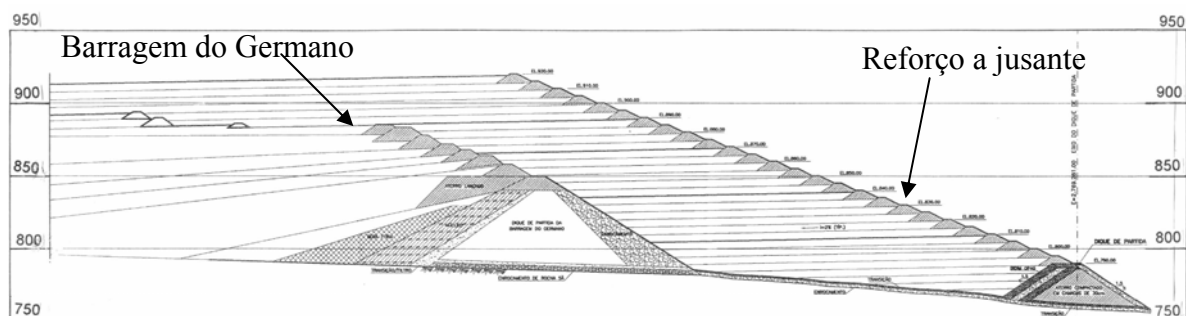


Figura 3.2: Seção transversal típica da Barragem do Germano, da UIG / Samarco (Pimenta de Ávila, 2003b).

No caso da lama, originalmente lançada a montante da barragem, a partir de 2002 passou a ser adotada uma metodologia de lançamento em baías de secagem executadas no reservatório da própria barragem do Germano (Figura 3.3), com o objetivo de ampliar a vida útil do

---

reservatório. O projeto desta metodologia prevê o seccionamento do reservatório da barragem por diques, formando porções menores, denominadas baias. Assim, a lama é lançada em ponto único com teor de sólidos da ordem de 20 a 25% numa primeira baia e, desta, o rejeito sedimentado, com teor de sólidos de 40%, aproximadamente, é dragado e enviado a outras baias onde, por sistema de revezamento, é disposto à secagem por evaporação e drenagem. Cada lançamento é feito até se alcançar uma espessura da ordem de 50 cm de material úmido em cada baia antes de se passar a outra, sendo que o próximo lançamento numa mesma baia só ocorre depois de aproximadamente 30 dias, quando este material assume um teor de sólidos da ordem de 75 a 80%. Normalmente se obtém declives naturais no material lançado da ordem de 1%, o que favorece a sua drenagem. Os líquidos são captados em drenos verticais de gabião (tulipas), envolvidos por geotêxtil não tecido agulhado, de gramatura de 200 g/cm<sup>2</sup> (Figura 3.5b).

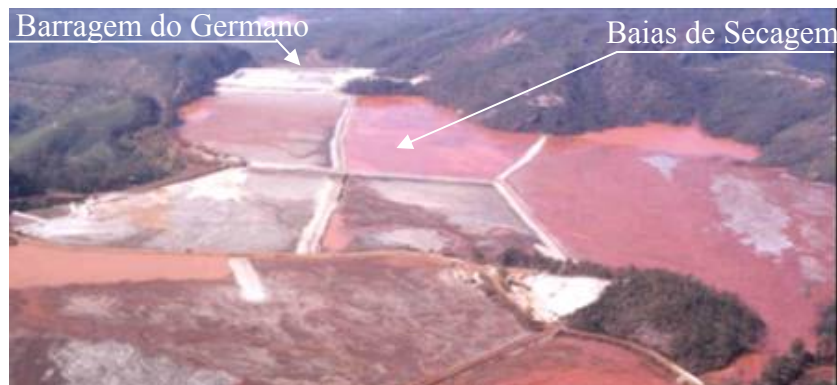


Figura 3.3: Baias de secagem da barragem do Germano , da UIG / Samarco (Araújo, 2005).

Já a barragem da Cava do Germano (Figura 3.4), destinada à contenção de rejeitos arenosos desde 2001, constitui uma antiga área de lavra da mineradora e objetiva, além da adequada disposição dos rejeitos, à recomposição da topografia local. Sua operação se dá de maneira coordenada com o lançamento dos rejeitos arenosos na barragem do Germano. Enquanto é realizado o alteamento de uma, com auxílio de equipamentos de terraplanagem, o lançamento hidráulico dos rejeitos arenosos é executado na outra e, ao se alcançar a condição de alteamento do barramento desta última, o processo é invertido. Assim, é de se esperar que os rejeitos arenosos lançados na barragem do Germano e na barragem da Cava do Germano apresentem características bastante semelhantes. Deve-se ressaltar que na barragem da Cava do Germano o lançamento dos rejeitos também se dá por ponto único e está previsto o seu alteamento até aproximadamente 150 metros de altura.



Figura 3.4: Barragem da Cava do Germano, da UIG / Samarco.

Assim, são três os dispositivos de contenção de rejeitos adotados na UIG: a barragem da Cava do Germano; a barragem do Germano; e as baias de secagem da barragem do Germano. Os sistemas de filtração e drenagem empregados na barragem do Germano e nas baias de secagem são constituídos por geotêxteis não tecidos agulhados, além de outros materiais, e por isso servem de motivação ao trabalho apresentado nesta dissertação. Seções típicas exemplificando a geometria destes sistemas são apresentadas na Figura 3.5.

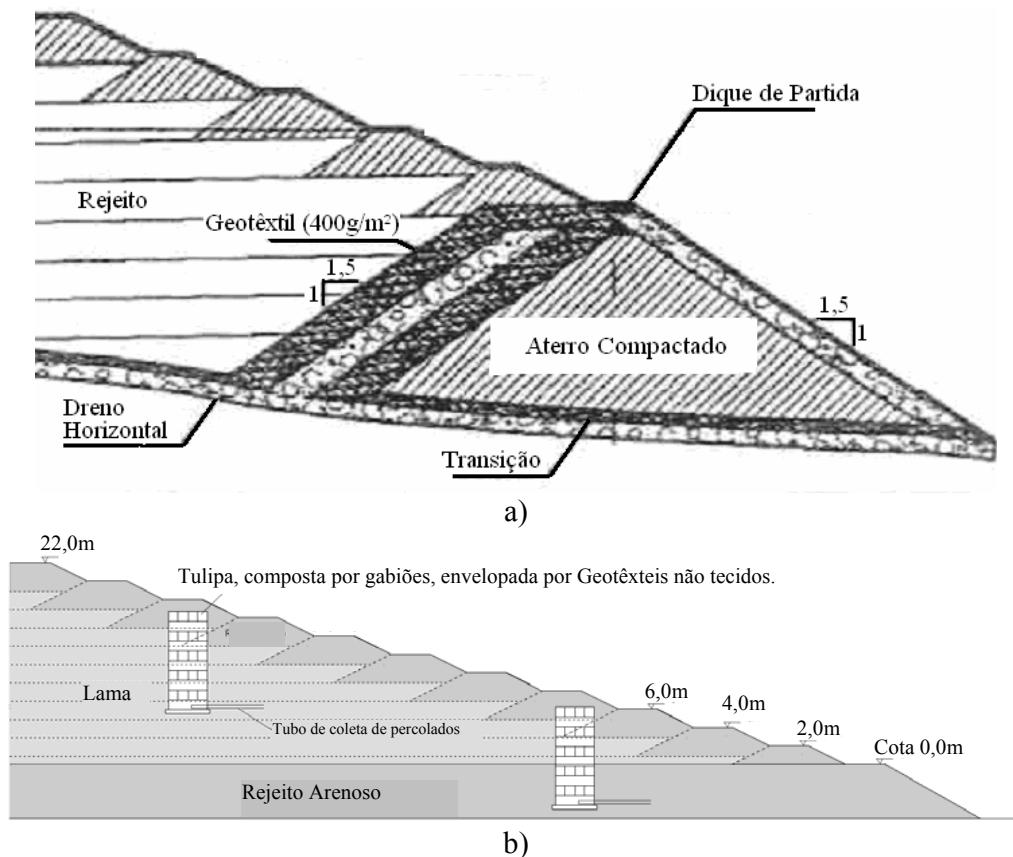


Figura 3.5: Esquemas dos sistemas de filtração e drenagem dos dispositivos de contenção de rejeitos, da UIG / Samarco: a) da barragem do Germano; e b) das baias de secagem. (Pimenta de Ávila, 2003a).

---

É de se esperar que o comportamento destes geotêxteis seja bastante influenciado pela condição inicial de impregnação a que são submetidos. No caso da barragem do Germano, os geotêxteis constituintes do tapete drenante (Figura 3.5a) foram submetidos ao contato direto com a polpa de rejeitos e fluidos oriundos da usina de beneficiamento. Neste caso, os geotêxteis são imediatamente solicitados à filtração e drenagem dos materiais lançados, situação que caracteriza a influência de sua impregnação inicial pelo fluido percolante. Além disso, após o início dos alteamentos com rejeitos, os geotêxteis empregados entre um alteamento e o subsequente foram submetidos, também, ao contato com rejeitos previamente drenados, homogeneizados e compactados pelos equipamentos utilizados (Figura 3.5a). Neste caso, a impregnação dos geotêxteis se dá pelo contato direto com as partículas dos rejeitos, sendo esperada a influência dos carregamentos impostos durante o processo de compactação. Vale comentar também o elevado nível de tensões a que estão submetidos os geotêxteis empregados na barragem do Germano (tensão vertical máxima em torno de 2000kPa), uma vez que esta estrutura de contenção se apresenta, atualmente, com mais de 100 metros de altura a partir do tapete drenante (Figura 3.5a).

No caso das baias de secagem (Figura 3.5b) os geotêxteis não tecidos agulhados são empregados principalmente na posição vertical, sendo submetidos ao contato direto com a lama fluida. O lançamento da lama se dá de forma a favorecer a sedimentação natural de suas partículas sólidas ao longo do caminho percorrido (de escoamento) até alcançar a tulipa, onde os líquidos são filtrados, drenados e destinados à barragem do sistema de captação de água que abastece a usina de beneficiamento. Este caminho de escoamento tem influência direta na quantidade de partículas em suspensão na lama que chega à tulipa, o que altera a solicitação aos geotêxteis. Na tulipa (Figura 3.5b) os geotêxteis envolvem uma estrutura vertical constituída por gabiões caixa que pode alcançar até 10 metros de altura. Estes gabiões são estruturas de tela metálica preenchidas com enrocamento. A instalação dos geotêxteis em estruturas deste tipo deve ser de tal forma que minimize a ocorrência de danos mecânicos provocados por extremidades perfurantes da tela e do enrocamento. Nesta estrutura, os geotêxteis são, ainda, envolvidos por uma matriz grosseira que auxilia na estabilidade da tulipa e serve de transição para a passagem da lama.

### **3.2.2. FERTILIZANTES FOSFATADOS S.A. – COMPLEXO DE MINERAÇÃO DE TAPIRA/MG (CMT)**

Localizado no município de Tapira, a 42 km de Araxá, no estado de Minas Gerais, o Complexo de Mineração de Tapira (CMT) responde como o maior complexo de mineração da

---

Fertilizantes Fosfatados S.A. (Fosfertil), que hoje engloba 08 (oito) centros industriais, desde mineradoras a indústrias químicas de beneficiamento de concentrado fosfático. A Fosfertil é o maior produtor de concentrado fosfático do país, com cerca de 53% da produção nacional, segundo dados do DNPM (2003). Além disso, o CMT é também o maior complexo de mineração de rocha fosfática do Brasil, produzindo concentrado fosfático com base na extração de um minério bruto com 13 a 14% de teor contido. Deste processo produtivo são gerados mais de 1 milhão de toneladas de rejeitos por ano.

Após lavrado, o *ROM* é encaminhado à planta de beneficiamento, onde é submetido aos processos de britagem, rebritagem, moagem, peneiramento, magnetização e flotação, para separação e concentração do minério de acordo com a demanda comercial. São adicionados água e outros reagentes ao minério bruto, durante o processo de beneficiamento. Assim, são gerados, basicamente, três tipos de rejeitos: magnético; fino (lama); e arenoso. O rejeito magnético, constituído principalmente por magnetita, é assim denominado tendo em vista o uso de magnetização para separá-lo do minério bruto. O estágio em que são coletados condiciona seus grãos ao diâmetro máximo de 2,0 mm. A lama e o rejeito arenoso têm mineralogia variada, com apatita, quartzo e vermiculita, principalmente, e granulometria também limitada a 2,0 mm, sendo a lama um pouco mais fina.

O CMT conta com um grupo de oito barragens destinadas à contenção dos rejeitos, águas residuárias e água bruta. Será dado destaque à estrutura denominada barragem de lama 1 (BL1), tendo em vista ser uma das principais estruturas destinadas à contenção de rejeitos do complexo de mineração. Além disso, esta barragem é alteada pela técnica de aterro hidráulico, pelo método de linha de centro, e conta com dispositivos de drenagem também constituídos por geotêxteis e materiais naturais. Iniciada em 1978, a BL1 foi executada sob a seguinte seqüência: construção de um dique de argila a montante e um outro de enrocamento a jusante; execução de tapetes drenantes entre estes diques; seqüência de alteamentos, utilizando técnica de aterro hidráulico pela linha de centro, até a cota atual (81 m de altura), a qual consta como altura máxima da barragem prevista em projeto. Esta estrutura recebe lama e rejeito arenoso oriundos da usina de beneficiamento. A lama é lançada hidraulicamente, por gravidade, a montante no reservatório da barragem, enquanto o rejeito arenoso é lançado por espigotamento a partir da crista do barramento, para montante deste. Na Figura 3.6 é apresentado um croqui da seção transversal típica da BL1.

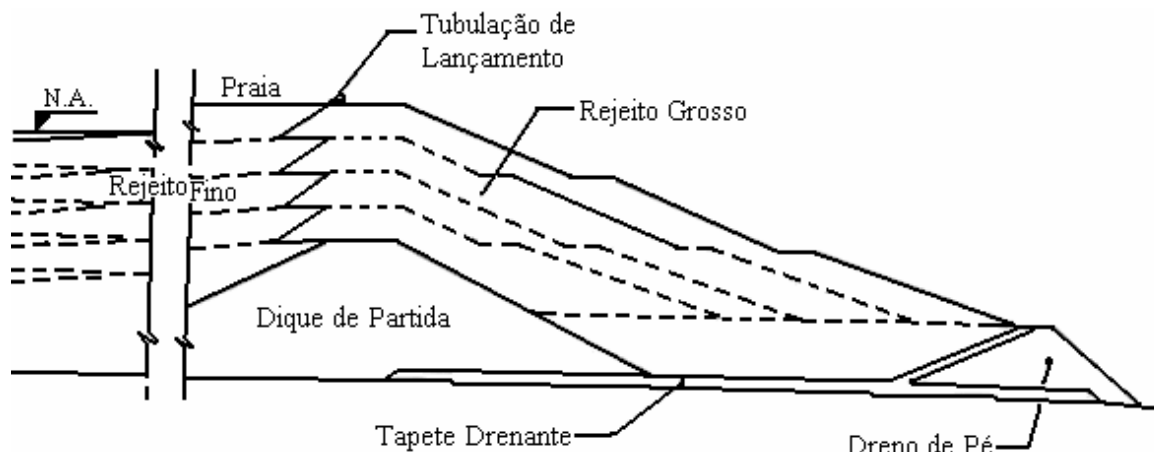


Figura 3.6: Esquema da seção transversal da Barragem de Lama 1 (BL1), do CMT / Fosfertil, com indicação do sistema de filtração e drenagem interna (modificado de Bush, 1987).

No sistema de filtração e drenagem da BL1 foram empregados materiais granulares naturais envelopados com geotêxteis não tecidos agulhados (Figura 3.6). Neste caso, os geotêxteis são submetidos especialmente ao contato direto com a polpa de rejeitos e fluidos, oriundos da usina de beneficiamento. Assim, os geotêxteis têm impregnação inicial influenciada pelo fluido constituinte da polpa de rejeitos lançada. Também vale comentar o elevado nível de tensões a que estão submetidos os geotêxteis empregados nestes sistemas de filtração e drenagem, tendo em vista o porte atual da estrutura.

### 3.3. MATERIAIS

#### 3.3.1. REJEITOS

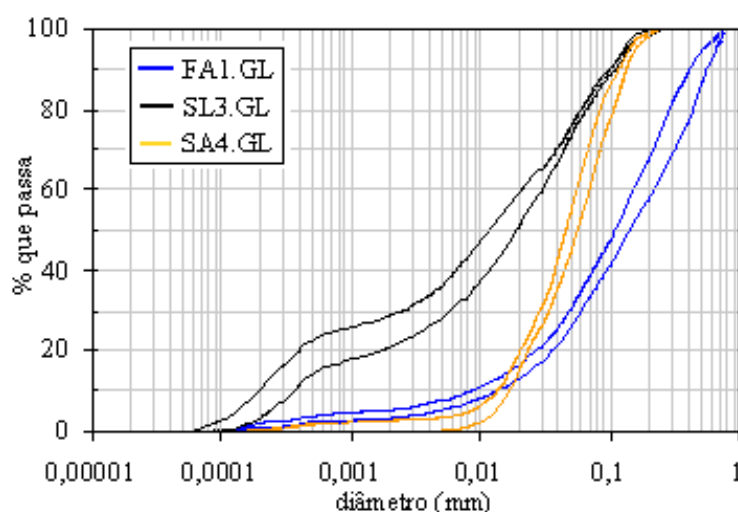
Dos rejeitos gerados nas mineradoras citadas acima três tipos distintos foram estudados: o rejeito arenoso disposto na BL1, do CMT / Fosfertil; e o rejeito arenoso e a lama, dispostos na barragem da Cava do Germano e nas baias de secagem, respectivamente, da UIG / Samarco.

Foram coletadas 7 amostras do rejeito arenoso da BL1, 7 amostras do rejeito arenoso da barragem da Cava do Germano, e 6 amostras da lama das baias de secagem. Neste último caso, tendo em vista o rodízio do lançamento dos rejeitos nas baias de forma aleatória em relação às características destes materiais, por praticidade foi escolhida a baia de número 3 (BS3), como sendo representativa das demais, para a amostragem. Os procedimentos de amostragem e demais estudos de campo realizados são descritos na seção 3.4.. Na Tabela 3.1 são apresentadas algumas características destes materiais, obtidas em laboratório, e na Figura 3.7 são apresentadas as respectivas faixas granulométricas.

Tabela 3.1: Caracterização geotécnica dos rejeitos utilizados.

Rejeitos		$d_{15}$ (mm)	$d_{50}$ (mm)	$d_{85}$ (mm)	$C_u$	$C_c$	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )
FA	$\bar{x}$	0,066	0,127	0,268	2,9	0,8	3,07
	$\sigma$	0,008	0,014	0,034	0,8	0,1	0,26
SA	$\bar{x}$	0,036	0,071	0,136	2,7	1,1	2,94
	$\sigma$	0,002	0,004	0,014	1,1	0,1	0,05
SL	$\bar{x}$	0,009	0,032	0,079	7,6	1,2	3,23
	$\sigma$	0,008	0,021	0,040	4,0	0,6	0,25

Notas: FA representa as amostras de rejeito arenoso coletadas no CMT; SA e SL representam as amostras de rejeitos arenoso e fino (lama) coletadas na UIG;  $d_i$  corresponde ao diâmetro equivalente através do qual passam  $i$  por cento das partículas do rejeito;  $\rho_s$  é a massa específica média dos grãos da amostra;  $\bar{x}$  equivale ao valor médio obtido; e  $\sigma$  é o desvio padrão dos valores obtidos.



Notas: FA1.GL, SL3.GL e SA4.GL representam exemplos de amostras de cada um dos tipos de rejeitos estudados. Da BL1 do CMT e da BS3 e da barragem da Cava do Germano, respectivamente, representa as amostras de rejeito arenoso coletadas no CMT; SA e SL representam as amostras de rejeitos arenoso e fino (lama) coletadas na UIG;

Figura 3.7: Faixas granulométricas das amostras de rejeito estudadas.

### 3.3.2. GEOTÊXTEIS

Os geotêxteis utilizados nos ensaios de laboratório consistiram em amostras limpas (virgens) e amostras exumadas *in situ*. Tratam-se de amostras de três tipos de geotêxteis não tecidos agulhados, de filamentos contínuos, de poliéster, da marca Bidim. Na Tabela 3.2 são apresentadas algumas características dos geotêxteis virgens estudados nesta pesquisa, obtidas em catálogos do fabricante. Os procedimentos de amostragem e caracterização de laboratório e de campo são descritos na seção 3.4.



Tabela 3.2: Caracterização das amostras dos geotêxteis virgens estudados.

Geotêxtil	Código <sup>(1)</sup>	Estrutura	Matéria Prima	$O_{95}$ (mm)	$k_n$ (cm/s)
Bidim RT 10	G1	Não tecido, agulhado, de filamentos contínuos.	100% Poliéster	0,13 – 0,23	$4.10^{-1}$
Bidim RT 21	G2			0,09 – 0,16	$4.10^{-1}$
Bidim RT 31	G3			0,06 – 0,13	$4.10^{-1}$

Nota: (1) Código adotado para identificação das amostras.

Fonte: Bidim (2002).

### 3.4. METODOLOGIAS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS ESTUDADOS

#### 3.4.1. INVESTIGAÇÃO DE CAMPO

Com a função de fornecer material de trabalho aos experimentos de laboratório e informações complementares às análises dos respectivos resultados, foram realizadas investigações de campo nas estruturas de disposição de rejeitos disponibilizadas. Cabe ressaltar que estas estruturas tratam-se da barragem de lama (BL1), do CMT / Fosfertil (Figura 3.6), e da barragem da Cava do Germano e da baía de secagem número 3 (BS3), do UIG / Samarco (Figura 3.1 e Figura 3.3). Estas investigações abrangeram as seguintes atividades:

- Reconhecimento dos principais processos intervenientes na geração dos rejeitos, desde o beneficiamento do minério bruto até o respectivo lançamento nos reservatórios das barragens;
- Estudo dos projetos das estruturas de disposição dos rejeitos e respectivos sistemas de filtração e drenagem interna, objetivando, especialmente, a caracterização dos métodos de alteamento dos barramentos e do uso de geotêxteis em seus sistemas de filtração e drenagem;
- Identificação das técnicas de lançamento dos rejeitos nos reservatórios e nos barramentos, e qualificação das condições impostas aos geotêxteis utilizados nos seus sistemas de filtração e drenagem, visando à orientação dos ensaios de laboratório a serem realizados;
- Coleta de amostras deformadas de rejeitos. Foram empregadas metodologias distintas de amostragem para cada tipo de rejeito, tendo em vista, principalmente, o método de lançamento de cada um deles na barragem. No caso do rejeito arenoso da BL1, o lançamento é feito a partir do barramento para montante, por espigotamento. Além disso, o alteamento do barramento é realizado com auxílio de equipamentos de terraplanagem. Assim, no corpo do barramento há um material compactado mecanicamente por estes equipamentos e ao longo da

praia de deposição do espigotamento há um material depositado hidráulicamente. Neste caso, optou-se pela geometria de coleta de amostras apresentada na Figura 3.8, representada pelos pontos assinalados na cor vermelha, em que o ponto F1 é o único tomado como representativo do material compactado. A partir deste ponto foram selecionados radialmente os demais (F2 a F7), espaçados aleatoriamente, de forma a serem representativos da variabilidade da praia de deposição hidráulica.

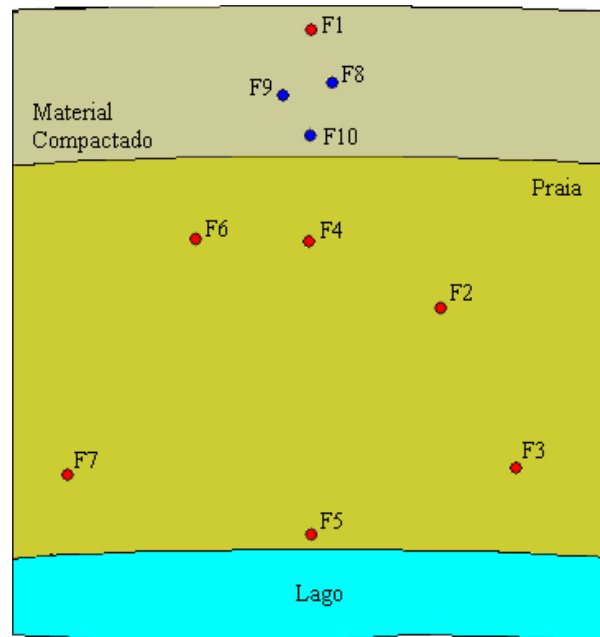


Figura 3.8: Esquema da geometria dos pontos ensaiados na BL1, do CMT/ Fosfertil.

No caso dos rejeitos arenosos da barragem da Cava do Germano, o lançamento é realizado a partir do barramento para montante, em ponto único, e o alteamento do barramento também é executado por equipamentos de terraplanagem. Apesar disso, o lançamento em ponto único, no caso, possibilita que os rejeitos se depositem em diversas direções, inclusive ao longo das proximidades do barramento (Figura 3.9). Assim, os serviços de terraplanagem poderão empregar toda a gama de rejeitos lançados no barramento, dependendo da direção de escoamento da polpa lançada. Daí optou-se por realizar os trabalhos de amostragem destes rejeitos ao longo de um caminho de escoamento identificado visualmente (Figura 3.10). A distância entre os pontos de amostragem (S1 a S7) foi determinada de forma a tentar facilitar os trabalhos e dar representatividade às amostras coletadas.

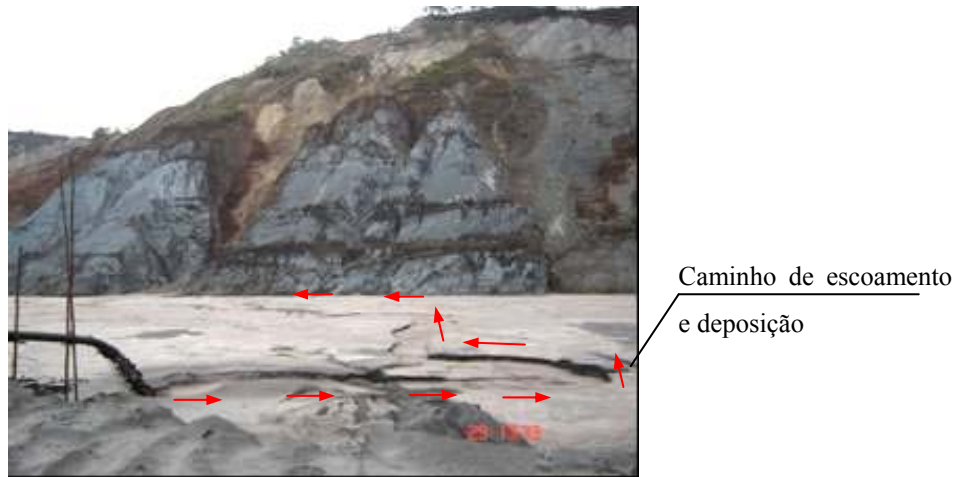


Figura 3.9: Caminho de escoamento e deposição dos rejeitos arenosos na barragem da Cava do Germano, da UIG / Samarco.

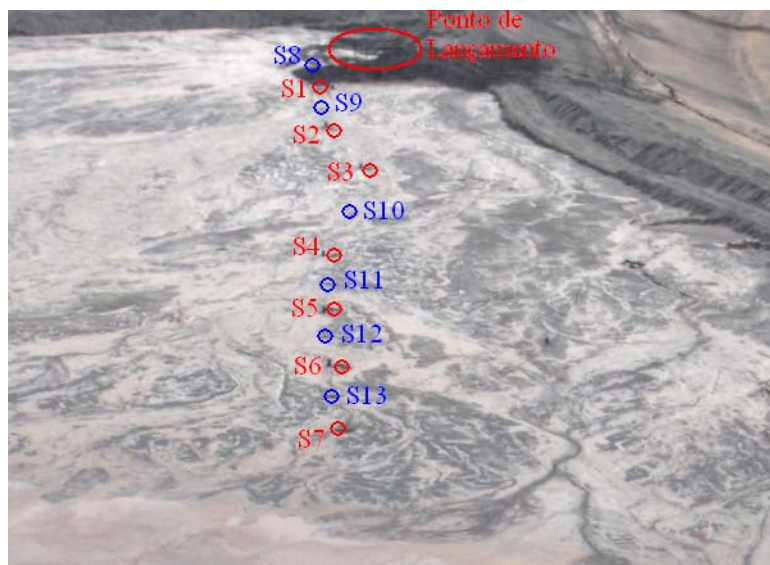


Figura 3.10: Pontos ensaiados na barragem da Cava do Germano, da UIG / Samarco.

No caso da lama da BS3, ocorreu algo semelhante, tendo em vista que o seu lançamento também se dá em ponto único. Assim, a lama pode percorrer diferentes caminhos até chegar à tulipa (Figura 3.11), podendo fazê-lo com diferentes teores de sólidos suspensos em função destes. Por isso, optou-se por amostrar a lama ao longo do principal caminho de escoamento observado no período de realização dos trabalhos de campo (Figura 3.12). A distância entre os pontos de amostragem (L1 a L6) foi determinada com base na facilidade de coleta das amostras a partir da margem da baía.



Figura 3.11: Geometria típica do processo de deposição da lama na BS3, da UIG / Samarco.

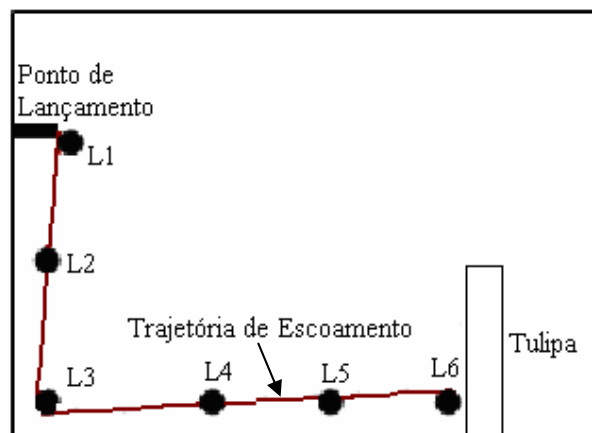


Figura 3.12: Esquema da amostragem na BS3, da UIG / Samarco.

- Determinação da variabilidade da massa específica aparente seca de campo nas áreas de amostragem. Foi empregado um cilindro bizelado de PVC, de volume conhecido, cravado manualmente, com auxílio de um nível de bolha, nos pontos de interesse (Figura 3.13). Após coletadas com uso dos cilindros as amostras foram encaminhadas ao laboratório, onde a determinação de suas massas e teores de umidade permitiu a conclusão deste ensaio. Este estudo foi possível apenas para os rejeitos arenosos, uma vez que a lama encontrava-se em condição muito fluida, inviável para este tipo de ensaio. No caso dos rejeitos arenosos, além da determinação da massa específica de campo nos pontos em que foram coletadas as amostras, esta também foi realizada em pontos intermediários, assinalados nas Figura 3.8 e Figura 3.10 sob a cor azul. Cabe ressaltar que os pontos 8, 9 e 10 da Figura 3.8 estão localizados dentro da área de atuação dos equipamentos de terraplanagem que executam os alteamentos, enquanto os demais são representativos da praia de deposição do espigotamento. No caso dos pontos de ensaio na barragem da Cava do Germano, todos os pontos estão situados ao longo do caminho de escoamento da polpa lançada em ponto único (Figura 3.10);

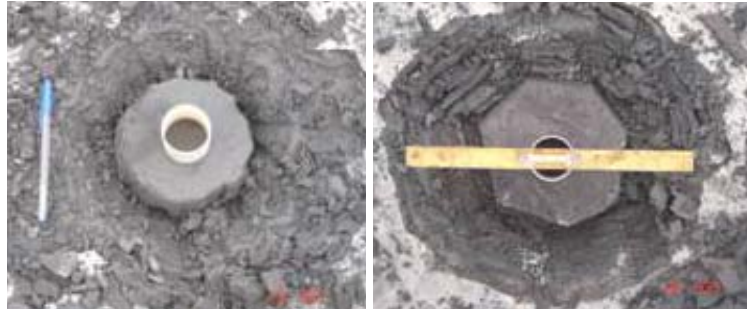


Figura 3.13: Determinação da massa específica de campo dos rejeitos arenosos.

- Determinação da condutividade hidráulica de campo dos rejeitos por meio de ensaio com permeômetro Guelph. O procedimento de ensaio utilizado é descrito em Soilmoisture Equipment Corp. (1991). Foi possível a realização deste ensaio apenas na barragem da Cava do Germano, tendo em vista a fluidez da lama na baía de secagem e as dificuldades de transporte do equipamento para o CMT. Neste caso, os pontos em que foram realizados estes ensaios coincidem com aqueles em que foram realizados os ensaios de determinação da massa específica de campo (Figura 3.10). Na Figura 3.14 é apresentado o equipamento empregado nos ensaios, instalado na praia de deposição da barragem da Cava do Germano.

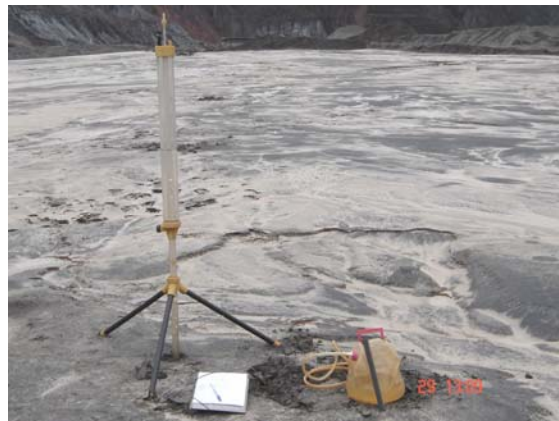


Figura 3.14: Permeômetro Guelph utilizado na determinação da condutividade hidráulica de campo dos rejeitos da barragem da Cava do Germano, da UIG / Samarco.

- Exumação de amostras dos geotêxteis empregados nos sistemas de filtração e drenagem estudados. Tendo em vista as dificuldades impostas pela geometria das estruturas de disposição dos rejeitos estudadas, pôde ser exumada apenas uma amostra de geotêxtil em uma baía de secagem adjacente à BS3. Foi necessário o uso de uma escavadeira neste procedimento, o que provocou alguns danos, como perfurações e rasgos, na amostra. Apesar disso, a amostra coletada pôde ser considerada representativa do material utilizado no campo, uma vez que estes danos não ocorreram de forma generalizada. Na Figura 3.15 são apresentadas algumas fotos do processo de exumação. Foram coletadas, ainda, amostras da

lama no contato com o geotêxtil exumado para caracterização em laboratório. Deve-se ressaltar que a amostra de geotêxtil foi coletada na tulipa da baía de secagem número 1 (BS1), a qual apresentava problemas de operação no período em que foram realizados os trabalhos de campo desta pesquisa, tendo sido desativada após este trabalho.



Figura 3.15: Exumação da amostra de geotêxtil na baía de secagem número 1 (BS1), da barragem do Germano, da UIG / Samarco.

Na Tabela 3.3 são resumidos os ensaios de campo realizados.

Tabela 3.3: Resumo dos trabalhos de campo.

Rejeitos <sup>(1)</sup>	N° de Ensaíados				Geotêxtil
	Coleta de Amostras	$\rho_{dcampo}$ <sup>(2)</sup>	$k_{campo}$ (Guelph) <sup>(3)</sup>	Total	
FA	7	10	-	10	-
SA	7	13	13	13	-
SL	6	-	-	6	Exumado

Notas: (1) FA, SA e SL correspondem, respectivamente aos rejeitos arenoso do CMT e arenoso e lama da UIG; (2) massa específica aparente seca de campo ( $g/cm^3$ ), e (3) condutividade hidráulica superficial de campo (cm/s).

---

### 3.4.2. CARACTERIZAÇÃO DOS REJEITOS

Inicialmente, cada uma das amostras de rejeitos coletadas foi preparada para os ensaios de laboratório, sendo submetidas à secagem ao ar, destorroamento, homogeneização e quarteamento, de acordo com as recomendações da NBR 6457 (ABNT, 1986). No caso dos rejeitos arenosos, este procedimento foi aplicado em cada uma das amostras na íntegra, enquanto nas amostras de lama apenas uma porção de cada uma delas foi tomada como respectivamente representativa. Neste último caso, optou-se por este procedimento tendo em vista que, acondicionadas em tambores plásticos, as amostras de lama sofreram intenso processo de densificação durante o transporte, o que dificultou a sua retirada total de dentro dos recipientes. Assim, após drenar o fluido sobrenadante, foi coletada uma porção da amostra na região central de cada recipiente e ao longo de todo o perfil de partículas sólidas neles contidas. Na Figura 3.16 é apresentada uma foto em que pode se notar a localização e as condições desta amostragem. Estas porções das amostras de lama foram, então, preparadas normalmente para os ensaios de caracterização.

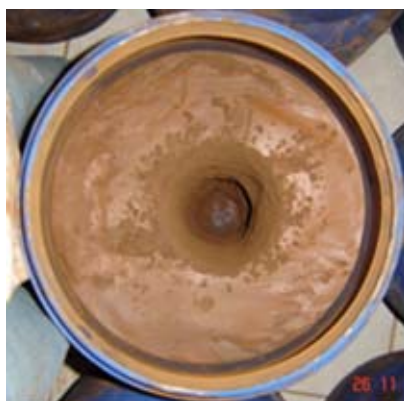


Figura 3.16: Amostragem das amostras de lama em laboratório.

Como resultado deste processo de preparação, porções representativas de cada uma das amostras dos rejeitos foram submetidas a ensaios de granulometria e massa específica dos grãos. Nesta etapa os ensaios de granulometria foram realizados com base nas recomendações da NBR 7181 (ABNT, 1984b), com e sem o uso de agitação mecânica e defloculação química. Os ensaios de massa específica dos grãos foram realizados com base nas recomendações da NBR 6508 (ABNT, 1984a). A partir dos resultados destes ensaios foi selecionada uma amostra representativa de cada tipo de rejeito, as quais serão empregadas na seqüência desta pesquisa. O procedimento de seleção foi baseado na análise da estabilidade interna das amostras, descrito na seção 3.4.5..

---

Então, as três amostras de rejeitos selecionadas foram submetidas a ensaios complementares de granulometria a laser, índices de vazios máximo e mínimo, limites de consistência, avaliação da forma das partículas, análise físico-química e difratometria de raios X. Os ensaios de granulometria a laser tiveram o objetivo de permitir a avaliação da melhor técnica de determinação granulométrica para estudos de filtração e drenagem em rejeitos de mineração. O equipamento e o procedimento do ensaio de granulometria a laser são mais bem descritos na seção 3.5.2.. Os ensaios de índices de vazios máximo e mínimo foram realizados segundo as recomendações da MB 3388 (ABNT, 1991) e da MB 3324 (ABNT, 1990), respectivamente. Os ensaios de limites de consistência foram realizados com base nas recomendações da NBR 6459 (ABNT, 1984c) e da NBR 7180 (ABNT, 1984d). A avaliação da forma das partículas foi realizada com auxílio de uma lupa com capacidade de ampliação de até 50 vezes. A análise físico-química objetivou principalmente a identificação de minerais solúveis nas amostras selecionadas.

Por fim, os ensaios de difratometria de raios X foram realizados em amostras totais e amostras fracionadas dos rejeitos. As amostras fracionadas são oriundas da separação por peneiramento das amostras totais em duas frações, uma com grãos de diâmetro equivalente superior a 0,075 mm e outra com grãos menores.

Os resultados obtidos na caracterização dos rejeitos descrita aqui foram utilizados para avaliar a densidade relativa dos materiais no campo e a compatibilidade de propostas empíricas para previsão da condutividade hidráulica com a obtida com uso do permeâmetro Guelph. Com base na massa específica dos grãos e na massa específica aparente seca de campo pode-se determinar o índice de vazios de campo (Equação 3.1). A partir deste foram determinadas a porosidade e a densidade relativa. Quanto à condutividade hidráulica, foram empregadas as Equações 2.1 e 2.2, propostas por Hazen e Terzaghi, respectivamente, segundo Espósito (2000).

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1$$

Equação 3.1

### **3.4.3. CARACTERIZAÇÃO DOS GEOTÊXTEIS EXUMADOS EM CAMPO**

A exumação da amostra de geotêxtil na BS1 objetivou a verificação da real interação entre esta e os materiais envolvidos no processo de filtração e drenagem. Assim, a amostra exumada foi submetida a investigações de laboratório que consistiram em avaliações visuais



---

das suas condições de integridade mecânica e na caracterização dos mecanismos de interação com os materiais adjacentes a ela.

As condições de integridade mecânica foram avaliadas visualmente, tentando-se identificar danos provocados pelos materiais constituintes do sistema de drenagem da baía e pelo procedimento de amostragem utilizado no campo. Esta avaliação foi registrada fotograficamente.

Os estudos de caracterização dos mecanismos de interação entre o geotêxtil exumado e os materiais adjacentes, compreenderam avaliações com microscópio eletrônico de varredura (MEV) e uma lupa de capacidade de ampliação de 50 vezes, além dos ensaios de determinação da gramatura e grau de impregnação do geotêxtil e granulometria das partículas nele retidas. Para permitir estes estudos foram obtidas amostras tentando-se caracterizar todos os graus de interação verificados. Cabe a ressalva de que as regiões que apresentaram qualquer tipo de dano mecânico foram preteridas no processo de amostragem. O conjunto total de amostras assim obtidas foi estudado com auxílio da lupa, trabalho a partir do qual foram selecionadas amostras representativas para os estudos com o MEV. As amostras restantes foram utilizadas para avaliação do grau de impregnação e da gramatura da amostra exumada, com posterior determinação da granulometria das partículas nelas retidas. O grau de impregnação ( $\lambda$ ) pode ser determinado pela razão entre as massas da amostra impregnada e da mesma amostra limpa. A massa limpa das amostras foi obtida após coleta das partículas nelas impregnadas, lavagem com água em abundância e secagem em estufa. Esta última massa também foi utilizada na determinação da gramatura da amostra que pôde ser obtida por meio da razão desta pela área das amostras. A granulometria das partículas retidas no interior das amostras foi determinada por granulometria a laser.

#### **3.4.4. CARACTERIZAÇÃO DOS GEOTÊXTEIS VIRGENS PARA ENSAIOS DE GR**

Os geotêxteis não tecidos, agulhados, de filamentos contínuos, são produzidos e comercializados na forma de mantas de 2,15 a 4,30 metros de largura, podendo alcançar até 200 metros de comprimento. Os filamentos são dispostos aleatoriamente na manta, o que atribui grande variabilidade espacial às suas características. No estudo dos geotêxteis utilizados neste trabalho, com o objetivo de avaliar a variação espacial da sua gramatura, foi empregado procedimento estatístico de amostragem aleatória simples, segundo metodologia proposta por Gardoni (2000). A partir da distribuição das gramaturas assim obtidas foram selecionadas amostras representativas para serem empregadas na seqüência dos trabalhos.

Assim, a coleta de amostras representativas dos geotêxteis G1, G2 e G3 se destinou à determinação das suas gramaturas e ao provimento dos ensaios de filtração, do tipo razão entre gradientes (GR), a serem realizados. Aleatoriamente, foram selecionados trechos de até 6 metros ao longo do comprimento de cada uma das mantas de geotêxtil estudadas, de forma contínua ou não. Estes trechos foram, divididos em quadrados de 15 cm de lado, identificados por números, dos quais foram sorteados aleatoriamente alguns para serem amostrados. Foram obtidas amostras circulares, de 10,2 cm de diâmetro que foram, em seguida, pesadas para determinação das respectivas gramaturas. Os resultados deste estudo foram utilizados em conjunto com os dados fornecidos pelo fabricante sobre os geotêxteis, apresentados na Tabela 3.3, na seqüência das investigações desta pesquisa.

### 3.4.5. ESTABILIDADE INTERNA DOS REJEITOS

A seleção das amostras de rejeito a serem estudadas por meio de ensaios de filtração (GR) foi feita com base na avaliação do potencial à instabilidade interna das amostras coletadas nas mineradoras. Neste estudo foram utilizadas as metodologias propostas por Sherard (1979), Kenney e Lau (1985), e Lafleur *et al.* (1989). Estas metodologias se baseiam na distribuição granulométrica do material para determinar seu potencial à instabilidade, e se caracterizam pela simplicidade de aplicação.

Sherard (1979) sugere que a estabilidade interna de solos seja avaliada dividindo a curva granulométrica da amostra em duas frações e as comparando, segundo um determinado critério de filtro, como se tratassem de amostras distintas (Figura 3.17). Em sua proposta, divide a curva granulométrica de uma amostra em diversas combinações de duas frações e verifica a sua estabilidade interna diante do atendimento ao critério de filtro apresentado na Equação 3.2. Caso as combinações sejam aprovadas pelo critério de filtro, a amostra é considerada estável.

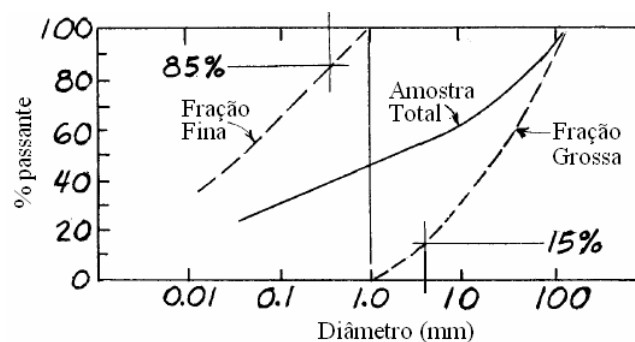


Figura 3.17: Metodologia de avaliação da estabilidade interna proposta por Sherard (1979). (modificado de Sherard (1979))

---

$$\frac{D_{15G}}{d_{85F}} < 5$$

Equação 3.2

em que:  $D_{15G}$  corresponde ao diâmetro por meio do qual passam 15% das partículas da fração mais grossa da combinação (mm); e  $d_{85F}$  àquele por meio do qual passam 85% das partículas da fração mais fina da combinação (mm).

Nos casos em que o número hidrodinâmico  $R'$ , dado pela Equação 3.3, é maior que 10, Kenney e Lau (1985) sugerem que a forma da curva granulométrica seja mais importante que o próprio diâmetro das partículas.

$$R' = \frac{qD_5}{nv}$$

Equação 3.3

em que:  $q$  corresponde à vazão unitária (mm/s), dada pela razão da vazão ( $\text{mm}^3/\text{s}$ ) pela área da seção transversal ( $\text{mm}^2$ );  $D_5$  é o diâmetro do solo equivalente a 5% das partículas passando (mm);  $n$  é a porosidade do solo;  $v$  é viscosidade cinemática do fluido percolante ( $v_{\text{água}} \simeq 1\text{mm}^2/\text{s}$ ).

Assim, com base na afirmação de Kenney *et al.* (1985) de que o diâmetro equivalente médio dos vazios de um solo é quatro vezes menor que o diâmetro equivalente médio de suas partículas, Kenney e Lau (1985) propõem a descrição da forma da curva granulométrica e, a partir desta, a avaliação do potencial do solo à instabilidade interna. A Figura 3.18 auxilia no entendimento deste método de descrição. No diagrama localizado a esquerda, na figura, podem ser identificados os eixos das ordenadas, correspondente à fração  $F$  da massa de partículas menores que o diâmetro  $D$ , e das abscissas, correspondente aos diâmetros  $D$  das partículas em escala logarítmica. A curva granulométrica do material é plotada neste diagrama, seguida da identificação de um par aleatório de valores de  $D$  e  $F_1$  correspondentes. A partir deste par de valores iniciais, é determinado um outro par de valores correspondentes,  $4D$  e  $F_2$ . No diagrama da direita, com eixo de abscissas equivalente à fração da massa entre  $D$  e  $4D$ , denominada por  $H$ , e ordenadas equivalente à  $F$ , os valores de  $F_1$  e da diferença entre  $F_1$  e  $F_2$  são plotados como um ponto, em que  $F$  equivale a  $F_1$  e  $H$  equivale a  $(F_2 - F_1)$ . Este procedimento é repetido até se estabelecer a forma da curva  $H \times F$ . A reta  $F + H = 1$  limita a curva  $H \times F$  e a reta  $H = 1,3F$  separa os materiais estáveis daqueles de granulometrias instáveis internamente. Ainda segundo Kenney e Lau (1985), em solos bem graduados

( $1 < C_c < 3$ ) a maior perda de partículas ocorre quando a curva  $H \times F$  passa abaixo da reta  $H = 1,3F$  no intervalo  $0 \leq F \leq 0,2$ . Em solos mal graduados ( $C_c > 3$ ) e uniformes ( $C_u < 2$ ) vale a afirmativa semelhante, porém, para o intervalo  $0 \leq F \leq 0,3$ .

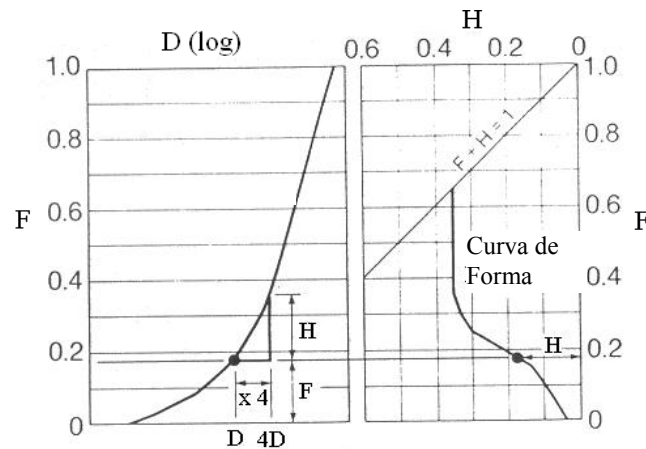


Figura 3.18: Método de descrição da forma da curva granulométrica. (modificado de Kenney e Lau (1985))

Segundo Lafleur *et al.* (1989), solos internamente instáveis estão sujeitos a se auto-colmatarem, ou seja, bloquear os seus próprios vazios de maneira a dificultar a passagem do fluido percolante. No estudo deste fenômeno estes pesquisadores constataram diferentes comportamentos de solos, em estudos de filtração, caracterizados por três tipos distintos de curvas granulométricas. Destes estudos, denominando as curvas por linear, côncava para cima e descontínua (Figura 3.19), concluem que as amostras que apresentam curvas granulométricas côncavas para cima têm maior possibilidade de serem instáveis internamente. As curvas lineares podem ser consideradas estáveis e as curvas descontínuas podem ser estáveis ou não, sendo necessários estudos complementares para uma melhor avaliação de seu potencial à instabilidade interna.

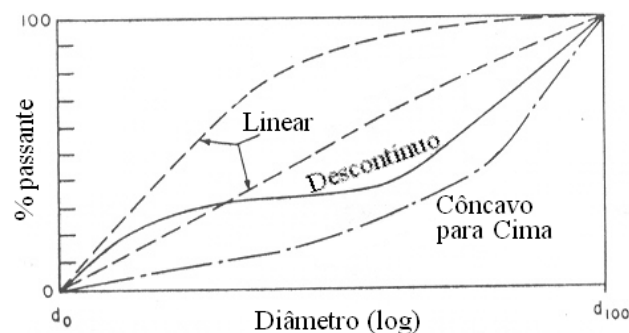


Figura 3.19: Curvas típicas para avaliação do potencial a instabilidade interna de solos (modificado de Lafleur *et al.* (1989)).

Os resultados obtidos com o emprego destas propostas foram comparados com aqueles obtidos por meio dos ensaios de filtração.

---

### 3.4.6. DISPERSIBILIDADE DOS REJEITOS

As amostras selecionadas para os ensaios de GR, especialmente as dos rejeitos de minério de ferro, apresentaram grande quantidade de partículas menores que 0,075 mm. Tendo isto em vista, também foram submetidas a estudos de seu potencial à dispersibilidade, com o objetivo de melhor avaliar o seu comportamento em condições de filtração e drenagem. Para tanto foi utilizada a metodologia proposta por Volk (1937), citado por Sherard (1976b).

Para o estudo da dispersibilidade de solos Volk (1937), citado por Sherard (1976b), propõe o SCS Laboratory Dispersion Test, também conhecido como ensaio sedimentométrico comparativo, ou ensaio de dispersibilidade, em que são comparados os teores de argila ( $\% < 0,002$  ou  $0,005$  mm) das curvas granulométricas, de um mesmo material, obtidas após a realização de ensaios de sedimentação com e sem o uso de agitação mecânica e defloculação química. Neste procedimento, aqueles materiais que apresentam percentual de dispersão (PD) (Equação 3.4) superior a 25% apresentam algum grau de dispersibilidade, que pode ser classificado de alto ou baixo em função deste percentual (Head, 1988).

$$PD = \frac{A}{B}100 \quad \text{Equação 3.4}$$

em que:  $A$  é a porcentagem de partículas menores que 0,005 mm, encontrada para a amostra no ensaio de sedimentação realizado sem agitação mecânica e defloculação química; e  $B$  é um valor equivalente a  $A$ , porém referente ao encontrado na realização do ensaio padrão, com defloculação química e agitação mecânica.

Assim, as três amostras de rejeitos estudadas nos ensaios de GR foram submetidas a ensaios de dispersibilidade. No ensaio de dispersibilidade foi adotado o procedimento recomendado para determinação granulométrica na NBR 7181 (ABNT, 1984b), porém, cada amostra foi submetida a ensaios de sedimentação com e sem o uso de agitação mecânica e defloculação química. Feitos estes ensaios o potencial à dispersibilidade foi analisado.

### 3.5. METODOLOGIAS DOS ENSAIOS DE GR E COMPLEMENTARES

#### 3.5.1. ENSAIOS DE FILTRAÇÃO DO TIPO RAZÃO ENTRE GRADIENTES (GR)

Nesta pesquisa, sete sistemas rejeito-geotêxtil foram estudados por meio do equipamento de ensaios de filtração, do tipo razão entre gradientes (GR), sob diferentes condições de carregamento e gradiente hidráulico. Este equipamento, desenvolvido por Gardoni (2000) no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB), permite a aplicação de elevados

---

carregamentos ao sistema ensaiado. No presente trabalho, pequenas adaptações foram feitas para também tornar possível a variação do gradiente hidráulico e a retirada de partículas passantes pelo geotêxtil em diferentes etapas do ensaio.

O equipamento de GR da UnB, descrito em detalhes em Gardoni (2000) (Figura 3.20), foi desenvolvido para avaliar o efeito de elevados níveis de carregamento no comportamento em filtração de conjuntos solo-geotêxtil, submetidos a gradientes hidráulicos unitários. Gardoni (2000) e Bessa da Luz (2004) realizaram diversos ensaios com este equipamento, inclusive com variados conjuntos rejeito-geotêxtil. Com o objetivo de verificar também o efeito da variação imediata do gradiente hidráulico aplicado ao sistema (Figura 3.21) foram feitas as seguintes adaptações no equipamento: o quadro de leituras piezométricas foi substituído por outro de altura 60 cm maior; foi adaptado um dispositivo de variação controlada do nível piezométrico de saída do fluido passante pelo corpo de provas (DV); e o reservatório R1, de abastecimento direto do corpo de provas, foi elevado em 40 cm. Na Figura 3.21 também são apresentadas as adaptações feitas para permitir a retirada de partículas passantes pelo geotêxtil durante a realização do ensaio. Os seguintes materiais foram empregados nestas últimas adaptações: um vasilhame de plástico com altura de 18 cm e capacidade de 5 litros; válvulas para vedação dos piezômetros; uma seringa de 20 ml de capacidade; e uma cápsula metálica para coleta das partículas.

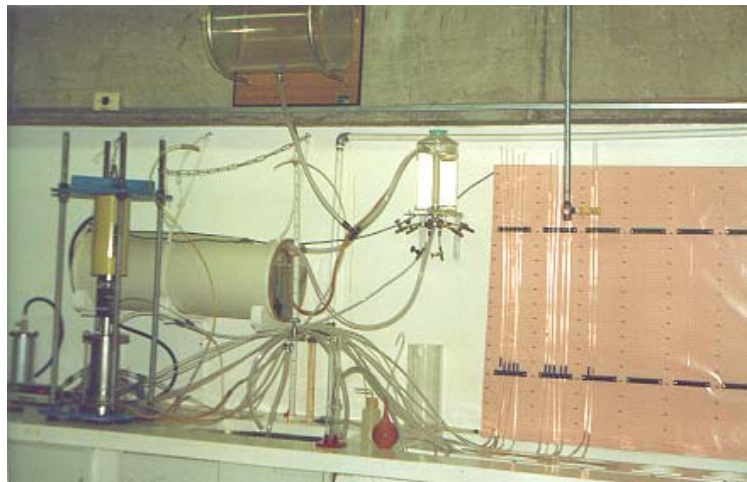


Figura 3.20: Equipamento para ensaios de filtração do tipo razão entre gradientes (GR).  
(Gardoni, 2000)

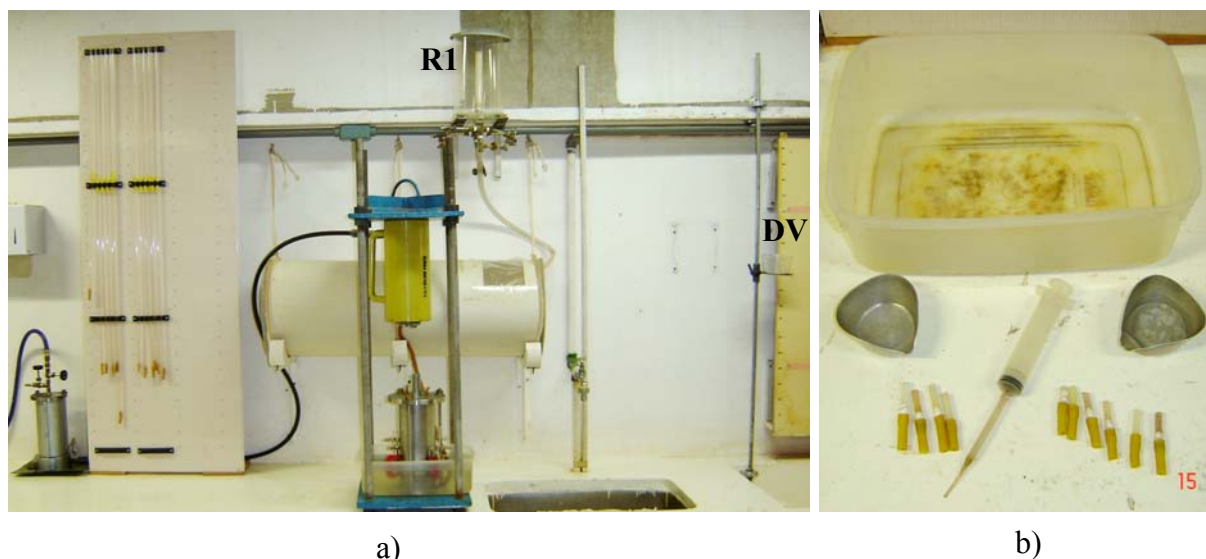


Figura 3.21: Equipamento para ensaios de GR utilizado nesta pesquisa: a) adaptações feitas para variação do gradiente hidráulico; e b) materiais utilizados na coleta de partículas ao longo do ensaio.

O ensaio de filtração de GR consiste, originalmente, em dispor a amostra de geotêxtil na base do permeâmetro (Figura 3.22) seguido da amostra de solo, sobre a qual será aplicado o carregamento. Tanto a colocação do geotêxtil quanto a do solo, ou rejeito no caso, merecem atenção especial para melhorar o desempenho do ensaio. A amostra de geotêxtil a ser utilizada deve ser previamente saturada e esta condição deve ser mantida durante todos os processos de montagem e realização do ensaio. No caso do rejeito, além da saturação, também deve ser garantida a sua homogeneidade durante a montagem do corpo de provas. Com esta expectativa adotou-se a metodologia proposta por Shi (1993), em que uma massa conhecida de rejeito misturado à água destilada é fervida e, conhecendo-se o  $C_u$  do rejeito, emprega-se o processo de deposição por pluviamento ( $C_u < 2$ ) ou como lama ( $C_u > 2$ ). Como neste trabalho todas as amostras ensaiadas apresentaram  $C_u > 2$ , foi utilizado o procedimento de deposição da mistura de rejeito e água destilada no permeâmetro na forma de lama. Esta metodologia permite, inclusive, que se controle a densidade do corpo de provas com base no peso específico dos grãos ( $\gamma_s$ ) e nos índices de vazios máximo e mínimo ( $e_{máx}$  e  $e_{mín}$ ) da amostra de rejeito utilizada e de sua altura dentro do permeâmetro.

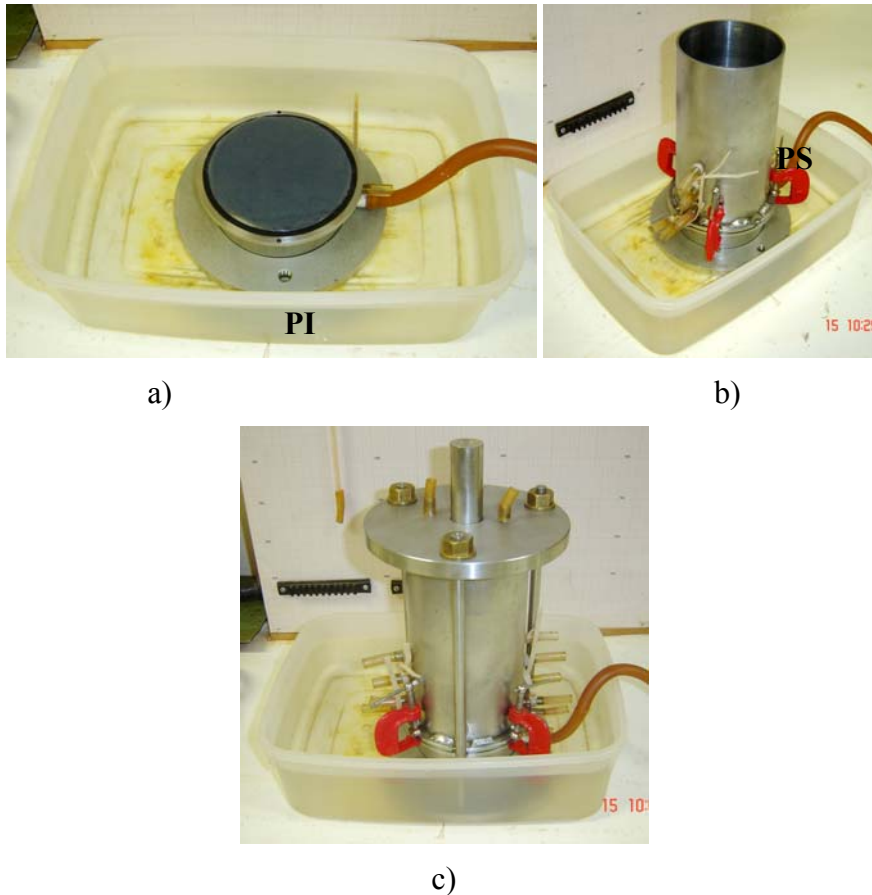


Figura 3.22: Seqüência de montagem do ensaio de GR: a) colocar o geotêxtil saturado sobre a parte inferior do permeâmetro; b) conectar a parte superior do permeâmetro à sua parte inferior; c) colocar o pistão e fechar o permeâmetro.

Assim, o procedimento completo de montagem e condução do ensaio de GR consistiu em (Figura 3.22):

- a) Selecionar uma amostra de geotêxtil de gramatura equivalente à média encontrada nos estudos de amostragem e distribuição espacial aparente uniforme das fibras;
- b) Saturar esta amostra de geotêxtil, inclusive com o auxílio de um dissecador para aplicação de vácuo até que não fossem mais observadas bolhas de ar na amostra;
- c) Montar a parte inferior do permeâmetro (PI) e submergí-la no vasilhame plástico, cheio de água destilada, até o seu recobrimento por uma lâmina de aproximadamente 0,5 cm de água;
- d) Colocar a amostra de geotêxtil saturada, submersa, sobre a placa perfurada da parte inferior do permeâmetro (Figura 3.22a);
- e) Misturar aproximadamente 2 kg do rejeito a ser ensaiado em uma porção de água destilada que permita a sua completa saturação. Após definir a sua massa e volume total, esta mistura



---

(A1) foi submetida à fervura por aproximadamente 2 horas, para retirada de bolhas de ar oclusas. Esta mistura foi, então, resfriada na temperatura ambiente;

f) Colar telas de aberturas de 0,037 mm, de 0,5 cm<sup>2</sup> aproximadamente, na entrada dos piezômetros, do lado interno da parte superior do permeâmetro. Feito isto, foi passada uma fina camada de graxa automotiva neste lado do permeâmetro, em seguida recoberta com um filme plástico, exceto na região onde foram coladas as telas. A parte superior do permeâmetro foi, então, conectada à parte inferior, que continha a amostra de geotêxtil saturada, com auxílio de prendedores do tipo “sargento” (Figura 3.22b);

g) Colocar pequenas buchas de fibras de geotêxteis desfiados, nas entradas dos piezômetros, pelo lado externo da parte superior do permeâmetro para evitar a saída de partículas;

h) Conectar o tubo de saída e a válvula de saída nos local adequado na parte inferior do permeâmetro, mantendo-os fechados. Conectar, também, as válvulas de vedação nas entradas dos piezômetros, na parte superior do permeâmetro;

i) Depositar, com auxílio de uma pequena concha, a mistura de rejeito e água destilada, previamente fervida e homogeneizada, cuidadosamente sobre a amostra de geotêxtil. Esta deposição seguiu até atingir aproximadamente 13 cm no interior do permeâmetro. O recipiente que continha a mistura de rejeito e água foi, com a massa restante de rejeito em seu interior, preenchido com água destilada até alcançar o volume equivalente ao de A1. A massa desta nova mistura (A2) foi determinada;

j) Tendo optado por moldar corpos de prova com densidade relativa (*DR*) de 50%, foi utilizada a Equação 3.5 para determinar a altura do corpo de provas (*H<sub>CP</sub>*) a ser alcançada no processo de densificação descrito no item abaixo;

$$H_{CP} = \frac{\gamma_s (M1 - M2) / (\gamma_s - 1)}{\gamma_d \cdot A} \quad \text{Equação 3.5}$$

$$\text{onde } \gamma_d = \frac{\gamma_s}{\{1 - [DR(e_{m\acute{a}x} - e_{m\acute{i}n}) - e_{m\acute{a}x}]\}} \quad \text{Equação 3.6}$$

em que:  $\gamma_d$  é o peso específico aparente seco do corpo de provas para a *DR* adotada (g/cm<sup>3</sup>);  $\gamma_s$  é o peso específico dos grãos do solo (g/cm<sup>3</sup>); *M1* e *M2* são respectivamente as massas das misturas A1 e A2 (g); e *A* é a área da seção transversal do permeâmetro (cm<sup>2</sup>).

k) Densificar a amostra imprimindo uma vibração ao permeâmetro assim montado, por meio de batidas em sua parede lateral, com o auxílio de um martelo de borracha. Este processo de densificação foi conduzido até se alcançar a HCP calculada com a Equação 3.5.;

l) Retirar o excesso de água acumulado na parte superior do corpo de provas e depositar uma camada de 1 cm de areia uniforme neste local. Na Figura 3.23 é apresentada a curva granulométrica da areia utilizada;

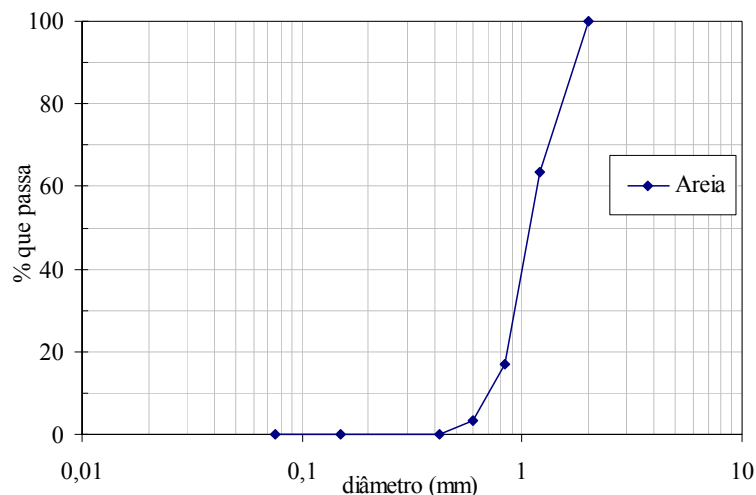


Figura 3.23: Curva granulométrica da areia uniforme utilizada como filtro na parte superior do corpo de provas do ensaio de GR.

m) Colocar o pistão de aplicação de carga sobre o corpo de provas, tampá-lo e conectar o tubo de entrada de água e o piezômetro P1. Terminar de fechar o permeâmetro (Figura 3.22c);

n) Desconectar o tubo de saída e a válvula de saída da parte inferior do permeâmetro e retirar as partículas passantes pelo geotêxtil, durante a moldagem do corpo de provas, com o auxílio da seringa;

o) Reconectar o tubo de saída e a válvula de saída na parte inferior do permeâmetro, mantendo-os fechados;

p) Conectar os piezômetros P2 a P12, previamente preenchidos com água deaerada;

q) Posicionar a extremidade livre do tubo de saída na altura adequada ao gradiente hidráulico unitário no dispositivo de controle da carga piezométrica de saída (DV);

r) Iniciar a aplicação de fluxo por meio do tubo de entrada e observar a ocorrência de bolhas de ar nos piezômetros P1 a P12, no tubo da saída e no próprio tubo de entrada. Quando não

---

foram encontradas bolhas realizou-se o controle da vazão pelo tubo de saída e se acompanhou as cargas hidráulicas nos piezômetros P1 a P12, fazendo leituras a intervalos conhecidos;

s) Quando a vazão e as cargas hidráulicas se mostraram estáveis ao longo do tempo o sistema foi dado como estabilizado. Então, todos os piezômetros e o tubo de saída foram fechados com o emprego das válvulas de vedação e os procedimentos anteriores, de n) a r) foram repetidos. Porém, antes de se iniciar o acompanhamento da vazão e das cargas hidráulicas, o primeiro estágio de gradiente hidráulico foi aplicado, passando pelos valores de 2,5, 5 e 10. A partir deste último se iniciou a aplicação dos carregamentos mecânicos, passando por 25, 50, 100, 200, 500, 1000 e 2000 kPa. Nos casos em que não foi variado o gradiente hidráulico durante o ensaio, após a verificação da estabilização da vazão e das cargas hidráulicas nos piezômetros, para o estágio de 0 kPa aplicado no topo do corpo de provas, foram aplicados os estágios descritos de carregamento mecânico.

Foram coletadas partículas imediatamente antes da aplicação de cada novo estágio ao corpo de provas, seja de gradiente hidráulico ou de carregamento mecânico. Além disso, ao final de alguns ensaios foram coletadas amostras de partículas ao longo do corpo de provas, em posições equivalentes às entradas dos piezômetros, além da interface do geotêxtil. As amostras de geotêxtil oriundas de cada ensaio de GR foram secas ao ar e analisadas com uso da lupa. Algumas destas amostras foram selecionadas para análise no MEV. O grau de impregnação e a granulometria das partículas retidas em cada uma das amostras de geotêxtil ensaiadas também foram determinados.

A definição dos conjuntos rejeito-geotêxtil a serem submetidos aos ensaios de GR, com variação do gradiente hidráulico total antes da aplicação de carregamentos mecânicos, foi feita com base no dimensionamento dos geotêxteis para uso como filtros frente aos rejeitos estudados por meio dos critérios de projeto apresentados na Tabela 3.4.

Como se pode notar na Tabela 3.5, segundo os critérios retenção e condutividade hidráulica utilizados poderiam ser empregados variados conjuntos rejeito-geotêxtil, porém também foi verificado o critério de colmatção proposto pela FHWA (1991), citado por Gardoni (2000), que pode ser verificado nos ensaios de GR realizados com gradiente hidráulico unitário. Este critério recomenda que a razão entre os gradientes medidos nas regiões contidas do geotêxtil à 2,5 cm e à 7,5 cm deste seja menor que 3 para se evitar a colmatção do geotêxtil. Assim, foram escolhidos os sistemas rejeito-geotêxtil.

Tabela 3.4: Critérios de projeto de filtros têxteis (modificado de Palmeira e Gardoni, 2000).

Autor	Condutividade Hidráulica <sup>(1)</sup>	Retenção <sup>(2)</sup>		Observações	
Giroud (1982)	$k_{GT} > k_S$ e $k_{GT} > 10 k_S i_S$	$O_{95}/d_{50} < C'_u$	Para $I_D < 35\%$ e $1 < C'_u < 3$	Em (1) se busca evitar o excesso na redução da vazão e no desenvolvimento de poro-pressões, respectivamente. E em (2) se assume a migração de finos do solo para $C_u$ elevado.	
		$O_{95}/d_{50} < 9/C'_u$	Para $I_D < 35\%$ e $C'_u > 3$		
		$O_{95}/d_{50} < 1.5C'_u$	Para $35\% < I_D < 65\%$ e $1 < C'_u < 3$		
		$O_{95}/d_{50} < 13.5/C'_u$	Para $35\% < I_D < 65\%$ e $C'_u > 3$		
		$O_{95}/d_{50} < 2C'_u$	Para $I_D > 65\%$ e $1 < C'_u < 3$		
		$O_{95}/d_{50} < 18/C'_u$	Para $I_D > 65\%$ e $C'_u > 3$		
FHWA (1985)	$k_{GT} > C k_S$	AOS < B d <sub>85</sub>	B = 1	Para $d_{50} > 0,074\text{mm}$ , $C_u < 2$ ou $C_u > 8$ e fluxo permanente.	Em (1), $C = 1$ para solos estáveis e gradientes hidráulicos baixos e $C = 10$ para solos instáveis, gradientes elevados e condutividade hidráulica dinâmica.
			B = 0,5	Para $d_{50} > 0,074\text{mm}$ , $2 < C_u < 4$ e fluxo permanente.	
			B = 8/C <sub>u</sub>	Para $d_{50} > 0,074\text{mm}$ , $4 < C_u < 8$ e fluxo permanente.	
		AOS < d <sub>15</sub>	Para $d_{50} > 0,074\text{mm}$ e fluxo dinâmico.		
		AOS < 1,8 d <sub>85</sub>	Para $d_{50} < 0,074\text{mm}$ e fluxo permanente.		
		AOS < 0,5 d <sub>85</sub>	Para $d_{50} < 0,074\text{mm}$ e fluxo dinâmico.		
Lafleur (1999)	$k_{GT} > 20 k_S$	FOS/d <sub>i</sub> < 1	d <sub>i</sub> = d <sub>85</sub>	Para $C_u \leq 6$	(2) é aplicável a solos internamente estáveis.
			d <sub>i</sub> = d <sub>50</sub>	Para $C_u > 6$ e granulometria linear.	
			d <sub>i</sub> = d <sub>G</sub>	Para $C_u > 6$ e $C_c > 3$ .	
			d <sub>i</sub> = d <sub>30</sub>	Para $C_u > 6$ e granulometria côncava para cima.	
		1 < FOS/d <sub>i</sub> < 5	d <sub>i</sub> = d <sub>30</sub>	Para $C_u > 6$ e $C_c > 3$ e/ou granulometria côncava para cima.	(2) é aplicável a solos internamente instáveis.

**Notas:** FOS é a abertura de filtração baseada no peneiramento hidrodinâmico (mm); AOS é a abertura de filtração aparente (mm); d<sub>i</sub> e d<sub>G</sub> correspondem, respectivamente, ao diâmetro característico e ao

diâmetro mínimo da eventual descontinuidade granulométrica das partículas do solo adjacente ao geotêxtil (mm);  $C_u$  é o coeficiente de não-uniformidade do solo;  $C'_u$  = coeficiente linear de uniformidade do solo, dado por  $(d'_{100}/d'_{10})^{0.5}$ ;  $I_D$  = densidade relativa do solo;  $C_c$  = coeficiente de curvatura do solo =  $(d_{30})^2/(d_{60} \cdot d_{10})$ .

Tabela 3.5: Avaliação dos geotêxteis ensaiados quanto à retenção.

<b>Critério de Projeto</b>	<b>Rejeito</b>	<b>G1</b>	<b>G2</b>	<b>G3</b>
Giroud (1982)	SA4	NP	P	P
	SL3	NP	P	NE
	FA1	P	NE	P
FHWA (1985)	SA4	P	P	P
	SL3	NP	P	NE
	FA1	P	NE	P
Lafleur (1999)	SA4	NP	NP	NP
	SL3	NP	NP	NE
	FA1	NP	NE	P

Nota: A letra P assinala os geotêxteis aprovados pelo respectivo critério de projeto como filtro dos rejeitos estudados, enquanto NP se refere àqueles não aprovados e NE aos não ensaiados.

Na Tabela 3.6 são resumidos os ensaios de GR realizados e aqueles complementares a eles.

Tabela 3.6: Procedimentos adotados nos ensaios de GR e a partir deles.

Rejeito	Geotêxtil	Código do Conjunto Rejeito-Geotêxtil	Ensaio de GR		Granulometria das partículas coletadas	Grau de Impregnação	Análise na Lupa	Análise no MEV
			i = 1,0	1,0 ≤ i ≤ 10				
SA4	G1	SAG1	R	N	R	R	R	N
	G2	SAG2	R	R	R	R	R	R
	G3	SAG3	R	N	R	R	R	N
SL3	G1	SLG1	R	N	R	R	R	R
	G2	SLG2	R	R	R	R	R	N
FA1	G1	FAG1	R	R	R	R	R	R
	G3	FAG3	R	N	R	R	R	N

Nota: Os conjuntos rejeito-geotêxtil têm os respectivos ensaios realizados marcados pela letra R, enquanto os não-realizados estão marcados com a letra N.

---

Mais informações sobre o equipamento de ensaios de GR utilizado podem ser obtidas em Gardoni (2000) e Bessa da Luz (2004). Além disso, em Shi (1993), Gardoni (2000) e Bessa da Luz (2004) podem ser encontradas mais informações sobre a metodologia de montagem e condução do ensaio.

### **3.5.2. GRANULOMETRIA A LASER**

Como alternativa ao uso das metodologias convencionais de determinação da distribuição granulométrica dos rejeitos, foi utilizado o equipamento denominado “granulômetro a laser”, disponível no Laboratório de Geotecnia da UnB. Estudado por Manso (1999), este equipamento permite a análise de materiais que não estejam disponíveis em quantidade suficiente para o emprego das metodologias convencionais. A distribuição granulométrica obtida se baseia na análise estatística de fatores geométricos da amostra. Além do uso dos resultados obtidos com o granulômetro a laser, também foi feito um estudo comparativo destes com aqueles obtidos em ensaios de peneiramento e sedimentação convencionais.

Fabricado pela Malvern Instruments Ltd., o granulômetro a laser utilizado é do modelo Mastersizer S Standard Bench. Composto por uma unidade ótica, uma unidade de preparação de amostra e um micro-computador com software específico, este equipamento determina a distribuição do tamanho das partículas passantes diante de uma luz laser por meio da avaliação estatística das dimensões da obscuração (sombreamento) e do espalhamento da luz provocados pelas partículas sobre um detector convenientemente posicionado. Na Figura 3.24 é apresentado um esquema do funcionamento do granulômetro e seus principais componentes. Numericamente, o software do equipamento obtém a distribuição dos volumes das partículas que passam entre a luz e o detector por meio de dados da obscuração e do espalhamento da luz laser. É utilizado um ajuste estatístico dos dados lidos para convertê-los aos dados da distribuição dos volumes fornecidos como resultado. A partir desta distribuição de volumes é determinada a distribuição dos diâmetros das partículas considerando-as como esferas de volumes equivalentes aos das partículas medidos.

Diferentemente do ensaio de sedimentação convencional, o uso do granulômetro não utiliza o peso específico das partículas como parâmetro base para a determinação da sua distribuição granulométrica. Isso torna provável a diminuição dos erros na análise de amostras que apresentem grãos compostos por minerais de peso específico muito distinto, como as de rejeitos de minérios de ferro e rocha fosfática, tendo em vista que no ensaio de sedimentação é assumido um valor médio deste parâmetro para todas as partículas das amostras. Comparado

---

ao ensaio de peneiramento, o uso do granulômetro a laser também pode se apresentar interessante. É que, a partir da determinação dos volumes das partículas, o granulômetro converte estes volumes ao de esferas e, a partir destas, determina os seus diâmetros. Assim, com o uso do granulômetro, o diâmetro equivalente é determinado com base no volume da partícula e não na medida de um dos seus lados, como é o que ocorre no peneiramento.

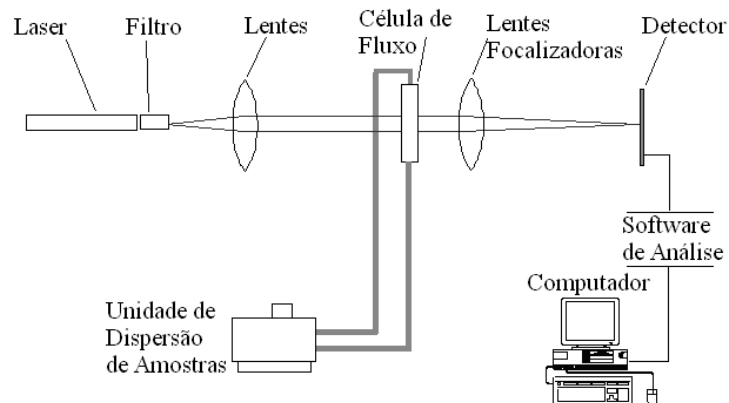


Figura 3.24: Granulômetro a laser (Malvern Instruments Ltd. - modificado).

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 na luz laser detectada; e o resíduo do ajuste feito a partir do modelo estatístico escolhido na análise dos volumes medidos. Podendo variar de 0 a 100%, 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%. Quanto ao resíduo do ajuste estatístico mencionado, o software do equipamento oferece algumas opções de funções estatísticas a serem utilizadas nas análises das medições feitas pelo equipamento. Deve-se optar por aquela que forneça o menor resíduo, sendo que é recomendável que este seja mantido abaixo de 1%.

Nesta pesquisa o granulômetro a laser foi utilizado para analisar as amostras submetidas aos ensaios de GR e todas aquelas coletadas durante a realização deste ensaio (Tabela 3.6). Devido à agilidade que este equipamento permite na determinação das curvas granulométricas, optou-se para a determinação de faixas granulométricas, e não apenas curvas, para as amostras a serem submetidas aos ensaios de GR. Os resultados destes ensaios

---

são comparados, quando oportuno, com aqueles obtidos nos ensaios tradicionais de peneiramento e sedimentação.

### **3.5.3. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)**

De forma também complementar às demais análises, a interação rejeitos-geotêxteis foi estudada com uso de recursos de microscopia eletrônica de varredura (MEV), numa colaboração do Laboratório de Engenharia Civil de Furnas Centrais Elétricas a esta pesquisa. Amostras dos geotêxteis virgens, dos geotêxteis retirados após os ensaios de GR (Tabela 3.6) e dos geotêxteis exumados no campo foram selecionadas, com o auxílio da lupa, para serem analisadas pelo MEV.

Foram coletadas amostras de, aproximadamente, 1 cm<sup>2</sup> na porção central de cada uma das amostras selecionadas. No MEV as regiões de análise foram escolhidas tentando-se evitar aquelas que eventualmente tenham sido perturbadas durante a coleta das amostras. Foram obtidas imagens das estruturas observadas em ampliações variadas. Além disso, também foram identificados alguns dos principais minerais presentes nas regiões fotografadas.



## **CAPÍTULO 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS ESTUDADOS**

---

### **4.1. INVESTIGAÇÃO DE CAMPO**

O lançamento dos rejeitos da UIG (Samarco) nos locais de disposição ocorre em ponto único, enquanto no CMT (Fosfertil) ocorre por espigotamento. Como abordado no Capítulo 2, estes se tratam de métodos de lançamento hidráulico em que, tanto a segregação horizontal quanto vertical de suas partículas, e a conseqüente anisotropia dos parâmetros geotécnicos das praias de deposição, são reconhecidas. Na Figura 4.1 são apresentados perfis superficiais dos rejeitos arenosos dos minérios de ferro e rocha fosfática estudados, em que a estratificação caracterizada pelas diferentes cores observadas indicam a segregação vertical.

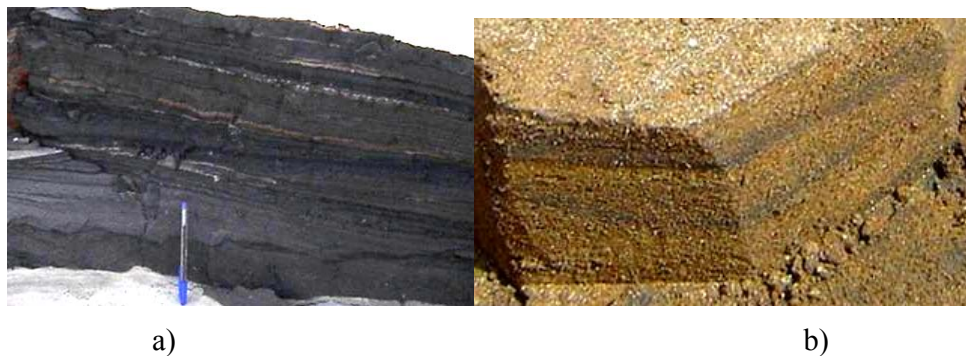


Figura 4.1: Perfis verticais na superfície das praias de rejeitos arenosos depositados hidráulicamente: a) na barragem da Cava do Germano (UIG); e b) na BL1 (CMT).

Os métodos de descarga em ponto único e por espigotamento implicaram em diferentes condições de amostragem. Na UIG, o lançamento em ponto único determinou caminhos de escoamento e sedimentação bem definidos, justificando a amostragem e os demais trabalhos de campo ao longo destes caminhos (Figura 3.10 e Figura 3.12). Já no CMT, o espigotamento gera uma dispersão maior da polpa de rejeitos lançada, o que justificou a geometria radial, a partir de um ponto no trecho compactado do barramento, para a realização da amostragem e demais trabalhos de campo (Figura 3.8). Estes trabalhos compreenderam ensaios de massa específica aparente seca de campo nas praias de rejeitos da BL1, no CMT, e da barragem da Cava do Germano, na UIG. Nesta última também foram realizados ensaios de condutividade hidráulica superficial (Guelph). No caso da lama da UIG, apenas foram coletados rejeitos ao longo do principal caminho de escoamento observado no período dos trabalhos de campo e de uma amostra de geotêxtil utilizado no sistema de filtração e drenagem da respectiva estrutura de contenção. Na Tabela 4.1 são apresentados os resultados médios dos trabalhos de campo obtidos para os parâmetros investigados.

Tabela 4.1: Resumo dos trabalhos de campo.

Rejeitos	Nº de Amostras coletadas	$\rho_{campo}^{(1)}$ (g/cm <sup>3</sup> )				$k_{campo}$ (Guelph) <sup>(2)</sup> (cm/s)		Geotêxtil
		Crista		Praia		$\bar{x}$	$\sigma$	
		$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$			
FA	7	1,87	0,14	1,47	0,10	-	-	-
SA	7	-	-	1,59	0,16	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	-
SL	6	-	-	-	-	-	-	Exumado

Notas:  $\bar{x}$  equivale ao valor médio obtido;  $\sigma$  é o desvio padrão dos valores obtidos. (1) massa específica aparente seca de campo, e (2) condutividade hidráulica superficial de campo.

A variação da massa específica aparente seca e da condutividade hidráulica em função da distância ao ponto de lançamento dos rejeitos é apresentada nas Figuras 4.2 e 4.3, respectivamente. Pode-se observar a grande dispersão destes parâmetros ao longo das praias de rejeito sendo que, no caso das massas específicas determinadas na praia de rejeitos de minério de ferro (UIG), pode ser observada uma tendência de aumento da dispersão dos resultados com o aumento da distância ao ponto de lançamento dos rejeitos. No caso dos estudos realizados na BL1 (CMT), foram obtidos valores maiores para a massa específica aparente seca determinada na área compactada por equipamentos de terraplanagem em relação àqueles obtidos na praia de rejeitos, compactada hidraulicamente no lançamento da polpa. Na Figura 4.4 é apresentado um perfil superficial dos rejeitos compactados pelos equipamentos de terraplanagem, em que se pode notar também uma maior homogeneidade em relação aos depositados hidraulicamente (Figura 4.1b).

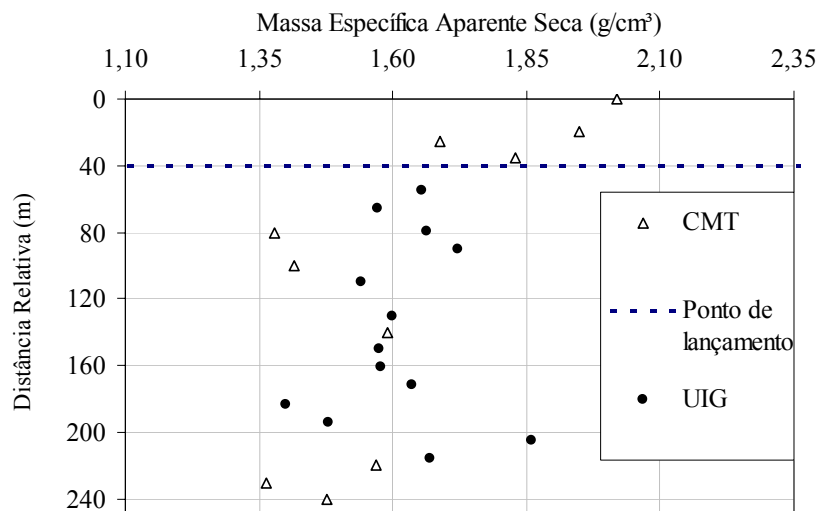


Figura 4.2: Variação da massa específica aparente seca ao longo das praias de rejeitos arenosos da BL1 (CMT) e da barragem da Cava do Germano (UIG).

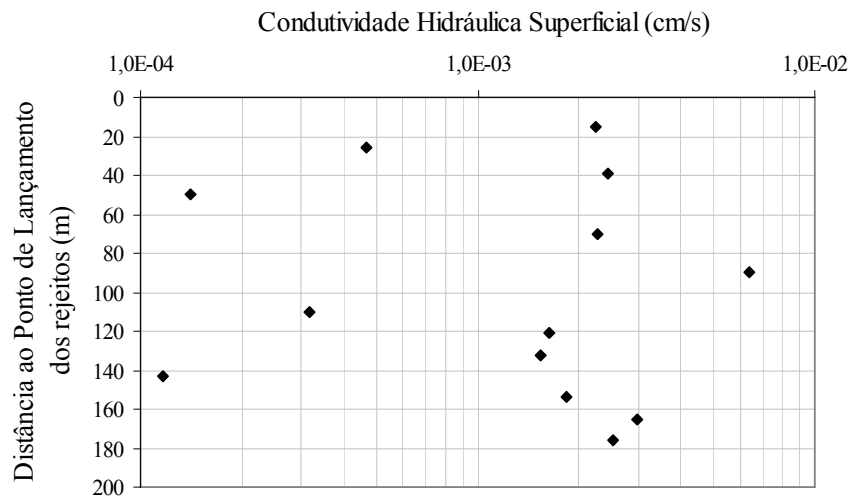


Figura 4.3: Variação da condutividade hidráulica superficial ao longo da praia de rejeitos da barragem da Cava do Germano (UIG).



Figura 4.4: Perfil vertical verificado na superfície da área compactada do barramento da BL1 (CMT).

#### 4.2. CARACTERIZAÇÃO DOS GEOTÊXTEIS EXUMADOS EM CAMPO

Nas Figuras 3.5 e 3.6 foram apresentadas as geometrias típicas dos sistemas de filtração e drenagem estudados, inclusive, tendo sido destacadas as posições de utilização dos geotêxteis. Nestas geometrias pode-se verificar a dificuldade de exumação de amostras de geotêxteis, especialmente na barragem do Germano e na BL1, tendo em vista o volume de materiais colocados sobre eles. Apenas no caso da BS1 pôde ser feita a exumação, tendo sido registrado o seu contato direto com o dreno, composto por tela metálica acondicionando enrocamento, e com o rejeito fino (lama), como material a ser filtrado e drenado. Inclusive, foi coletada uma amostra da lama no contato com a amostra exumada para análise granulométrica e comparação com os demais estudos de laboratório.

A amostra de geotêxtil exumada apresentou danos mecânicos possivelmente provocados por extremidades perfurantes dos materiais a ela adjacentes (DPM), como a tela metálica e o

---

enrocamento, e pelo próprio procedimento de amostragem (DPA) que demandou o uso de uma retroescavadeira. Na Figura 4.5 são apresentados alguns exemplos dos danos observados.

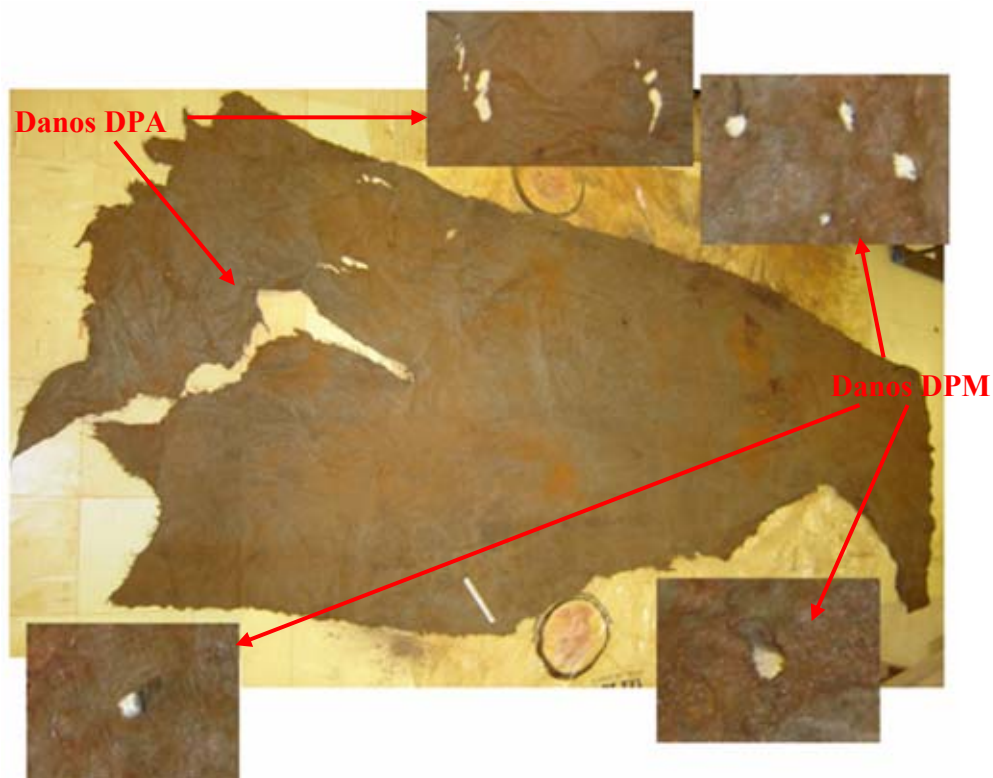


Figura 4.5: Amostra de geotêxtil exumada na BS1 (UIG).

Foram identificadas, ainda, regiões de maior concentração de partículas aderidas à manta têxtil. Para a quantificação e qualificação deste fato e verificação da influência da variabilidade espacial das características da manta, foi realizada amostragem orientada de maneira a caracterizar regiões visivelmente distintas. Na Figura 4.6 é apresentada a distribuição dos pontos de amostragem de GE1 a GE9.

Assim, foram selecionadas nove amostras para análises na lupa e no microscópio eletrônico de varredura (MEV) e estudos da variabilidade espacial da gramatura e do grau de impregnação, além da granulometria das partículas retidas na malha têxtil. Na análise com a lupa foram qualificados os principais níveis de interação entre a manta e os rejeitos. Na Figura 4.8 são apresentadas fotos deste trabalho em que pode ser verificada a impregnação tanto por partículas mais finas quanto por partículas mais graúdas. Além disso, na Figura 4.8a e na Figura 4.8b pode ser verificada a grande quantidade de partículas sobre a manta têxtil, o que chama a atenção para a possibilidade de ocorrência de fenômenos de cegamento e bloqueamento. Na Figura 4.8c foi possível a identificação de furos possivelmente gerados pelo processo de agulhamento na fabricação do geotêxtil.

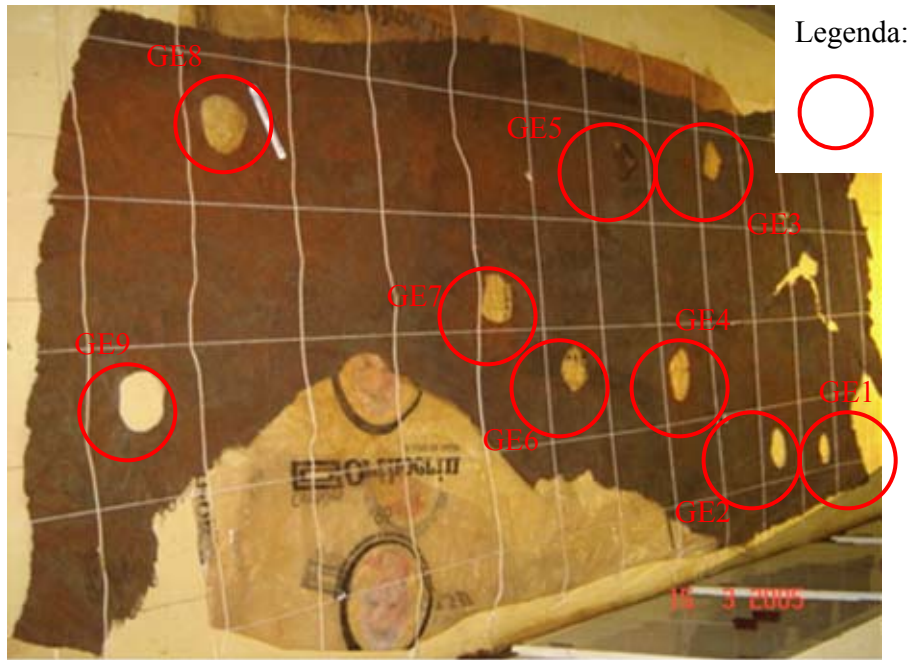
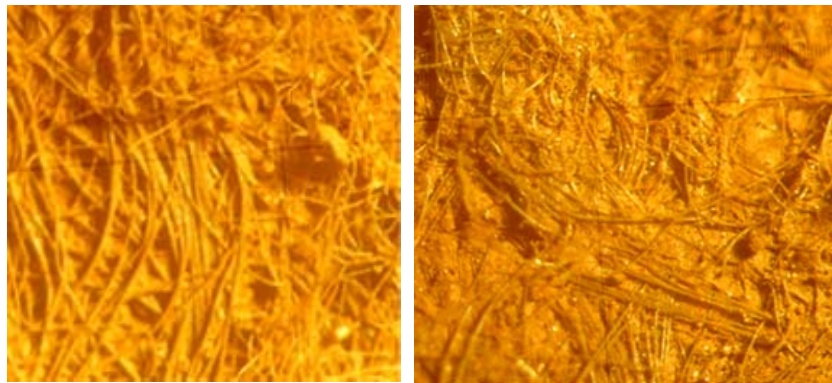
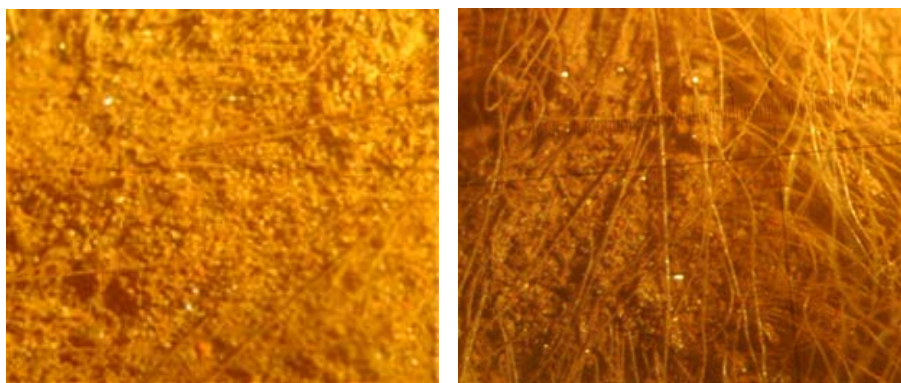


Figura 4.6: Distribuição espacial da amostragem na manta têxtil exumada na BS1 (UIG).



a)



b)

Figura 4.7: Interação rejeito-geotêxtil observada na lupa: a) partículas finas nos poros do geotêxtil; b) partículas graúdas nos poros do geotêxtil; cont.

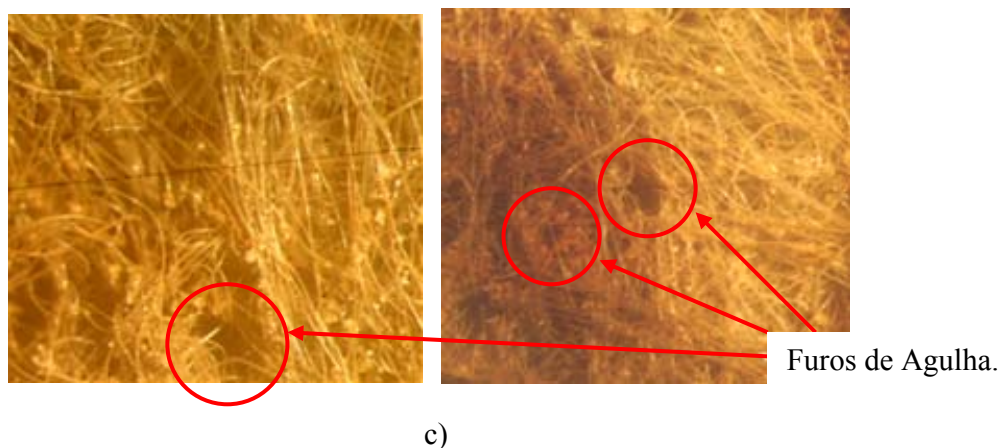
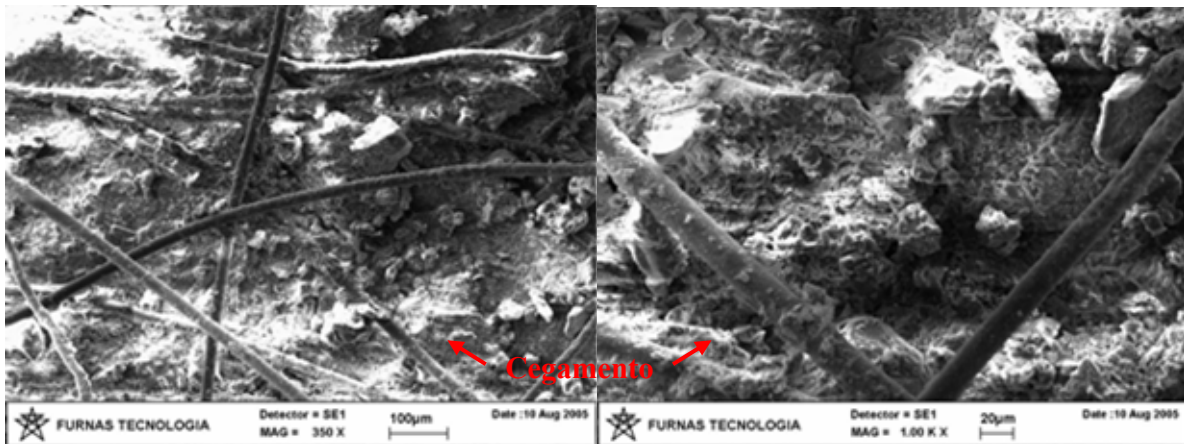
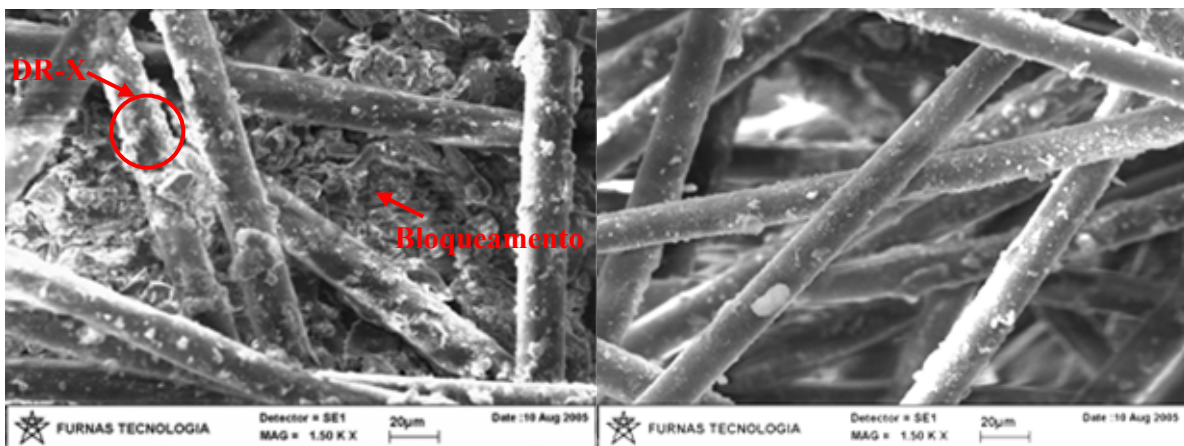


Figura 4.8: Interação rejeito-geotêxtil observada na lupa: a) partículas finas nos poros do geotêxtil; b) partículas graúdas nos poros do geotêxtil; c) área de menor concentração de partículas impregnando o geotêxtil.

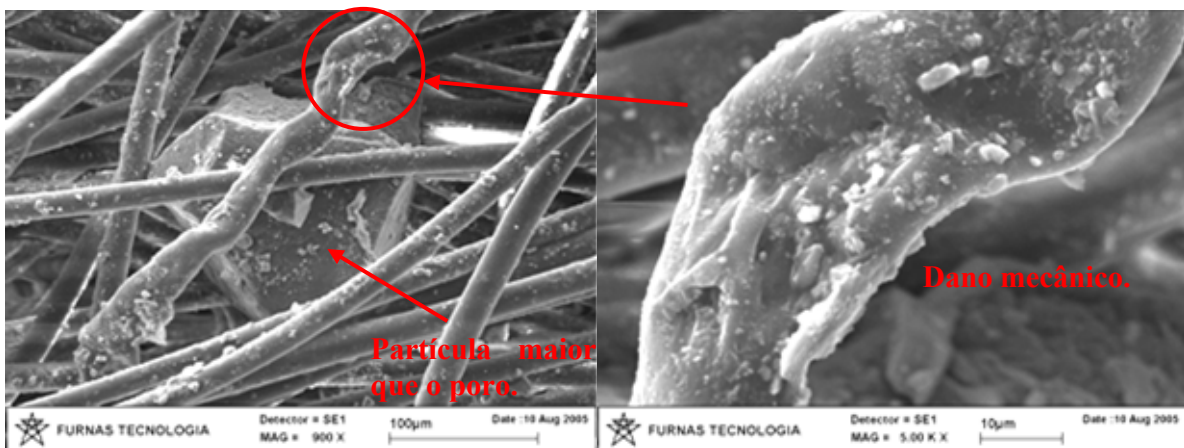
Com base nos estudos com a lupa foram selecionadas amostras para os trabalhos com o MEV. Na Figura 4.10 são apresentadas algumas imagens obtidas neste trabalho. Pôde ser observada a ocorrência de aglomerados de partículas em regiões da superfície do geotêxtil, caracterizando a ocorrência localizada de cegamento da manta (Figura 4.10a), e do seu interior, caracterizando fenômenos localizados de bloqueamento (Figura 4.10b). A análise de difratometria de raios X (DR-X) das partículas aderidas à superfície de algumas fibras (Figura 4.10b) indicou a ocorrência marcante de minerais de ferro (Figura 4.11). Este revestimento provoca a redução do tamanho dos poros do geotêxtil e, conseqüentemente, de sua abertura de filtração, podendo influenciar no seu comportamento em filtração. Já na Figura 4.10c são apresentadas imagens da amostra estudada em que foram identificados pequenos danos nas fibras. A presença de uma partícula maior que o tamanho natural dos poros locais leva a concluir pela possibilidade de inserção forçada desta no interior da malha de fibras pelos carregamentos externos aplicados. Esta inserção forçada pode ter danificado localmente a manta. Outra alternativa possível, é que estes danos tenham sido provocados durante o próprio processo de produção do geotêxtil. Na Figura 4.10d, além de mais exemplos de danos mecânicos em fibras provocados, possivelmente, por ações como as mencionadas, também pode-se notar a ocorrência de aglomerados de partículas finas que, apesar de serem maiores que os poros locais, estão dentro da matriz de fibras sem ter provocado danos aparentes.



a)

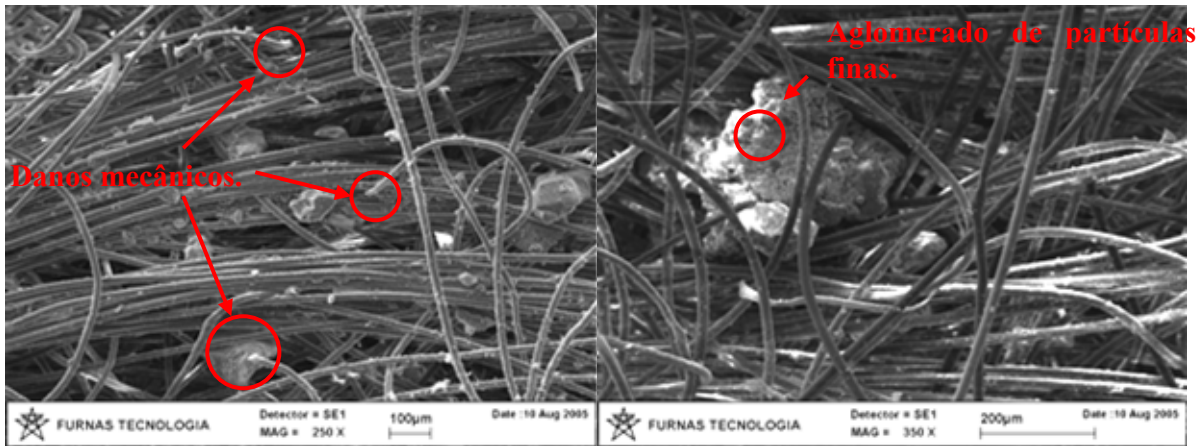


b)



c)

Figura 4.9: Interação rejeito-geotêxtil observada no MEV: a) partículas nos poros do geotêxtil; b) fibras têxteis revestidas por compostos de ferro; c) danos nas fibras; cont.



d)

Figura 4.10: Interação rejeito-geotêxtil observada no MEV: a) partículas nos poros do geotêxtil; b) fibras têxteis revestidas por compostos de ferro; c) danos nas fibras; d) partículas maiores que os poros no interior da amostra.

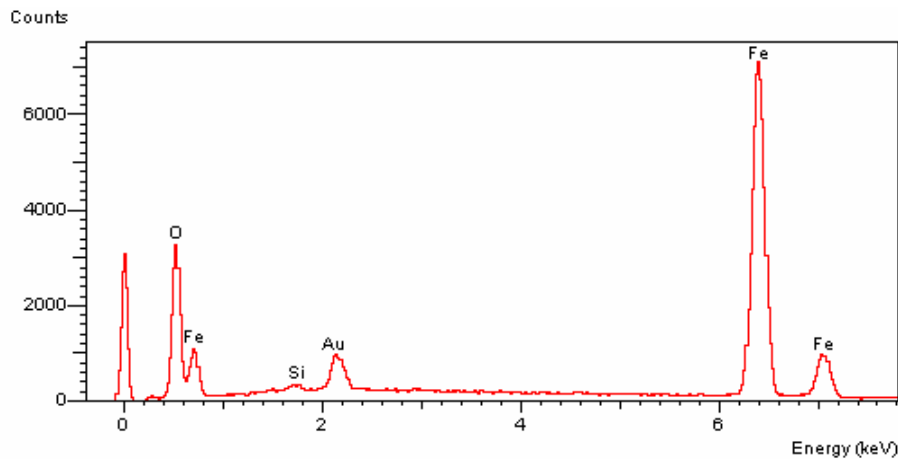


Figura 4.11: Difratomia de raios X de partículas aderidas à fibra têxtil.

Na Tabela 4.2 são apresentados os resultados dos estudos de gramatura e grau de impregnação ao longo da amostra exumada. Pode-se notar que uma gramatura média é semelhante à do geotêxtil comercial de 400 g/m<sup>2</sup>. Quanto ao grau de impregnação, foi observada uma importante dispersão. Cabe registrar que não foi verificada associação clara desta dispersão com a variabilidade da gramatura ao longo da amostra (Figura 4.12).

Tabela 4.2: Caracterização da amostra de geotêxtil exumada.

Am.	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	$\bar{x}$	$\sigma$
$\lambda$	4,6	4,0	2,0	6,6	2,2	3,4	10,0	5,6	2,5	4,5	2,4
MA	392	412	416	414	415	385	393	461	426	413	21

Notas:  $\lambda$  é o grau de impregnação e  $M_A$  é a gramatura da amostra de geotêxtil exumada (g/m<sup>2</sup>).



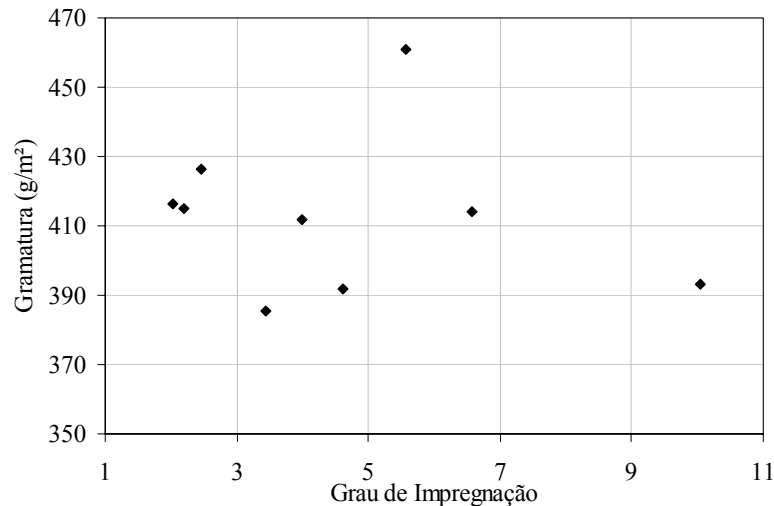


Figura 4.12: Relação entre o grau de impregnação e a gramatura verificados na amostra de geotêxtil exumada na BS1 (UIG).

A granulometria das partículas retidas no interior da malha têxtil (GE1 a GE9) e do material coletado adjacente a esta (LGE) também foi investigada. Na Tabela 4.3 são apresentados os principais parâmetros granulométricos obtidos e na Figura 4.14 são apresentadas as curvas granulométricas. Pode-se verificar a ocorrência de uma pequena quantidade de grãos maiores que a faixa de abertura de filtração do geotêxtil (0,09 a 0,16 mm), fornecida pelo fabricante, no interior do geotêxtil. Isto pode ter sido provocado tanto durante a instalação do geotêxtil no sistema de filtração e drenagem como também pelos carregamentos aplicados a ele durante sua vida útil na estrutura. Em alguns casos estes grãos também são maiores que os observados no material coletado próximo à manta. Isto demonstra a possibilidade de que outros materiais tenham entrado em contato com a manta exumada.

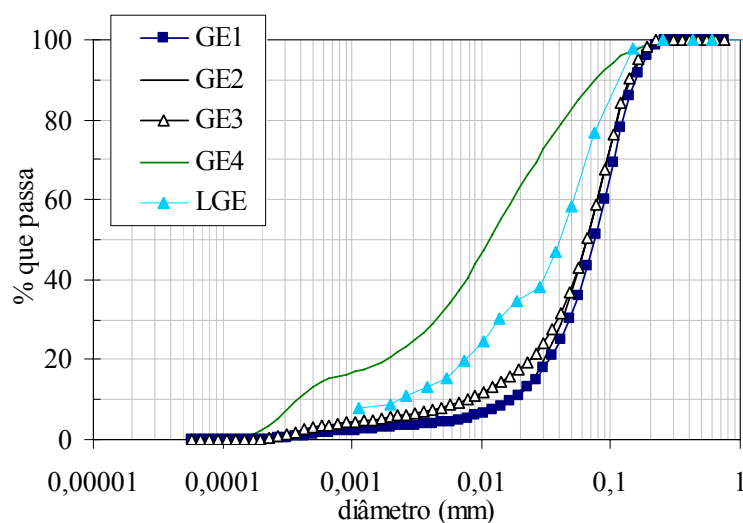
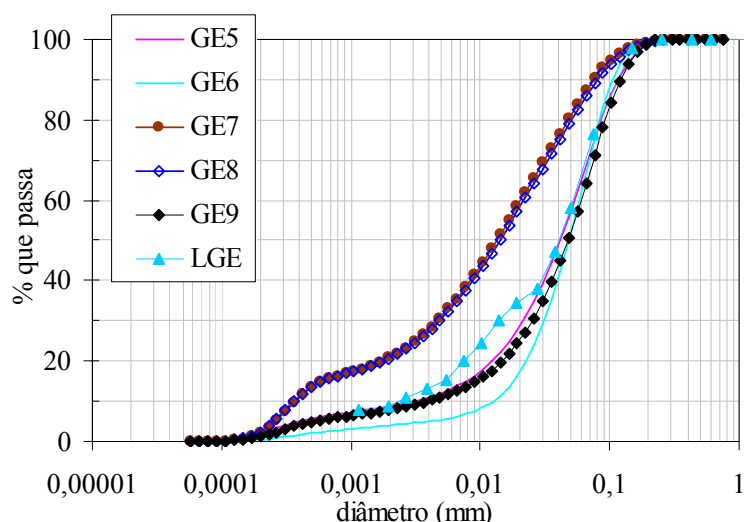


Figura 4.13: Granulometria das partículas retidas no interior do geotêxtil exumado: a) GE1 a GE4 e LGE; cont.



b)

Figura 4.14: Granulometria das partículas retidas no interior do geotêxtil exumado: a) GE1 a GE4 e LGE; b) GE5 a GE9 e LGE.

Tabela 4.3: Caracterização das partículas retidas no interior do geotêxtil exumado.

Rejeito	$d_{15}$	$d_{50}$	$d_{85}$	Rejeito	$d_{15}$	$d_{50}$	$d_{85}$
	(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(mm)	(mm)
	CD	CD	CD		CD	CD	CD
<b>GE1</b>	0,026	0,075	0,140	<b>GE6</b>	0,018	0,048	0,094
<b>GE2</b>	0,026	0,065	0,126	<b>GE7</b>	0,000	0,013	0,060
<b>GE3</b>	0,016	0,065	0,121	<b>GE8</b>	0,000	0,014	0,065
<b>GE4</b>	0,001	0,012	0,056	<b>GE9</b>	0,009	0,048	0,066
<b>GE5</b>	0,008	0,041	0,098	<b>LGE</b>	0,006	0,041	0,105

Notas:  $d_i$  corresponde ao diâmetro equivalente através do qual passam  $i$  por cento das partículas do rejeito impregnado ao geotêxtil.

### 4.3. CARACTERIZAÇÃO DOS REJEITOS AMOSTRADOS NO CAMPO

Nesta seção é apresentada a caracterização inicial das 20 amostras de rejeitos coletadas, destinada especialmente aos estudos de estabilidade interna e consequente seleção daquelas a serem estudadas nos ensaios de filtração (GR). Para tanto foram realizados ensaios de granulometria e massa específica dos grãos, seguindo as recomendações feitas na NBR 7181 (ABNT, 1984b) e na NBR 6508 (ABNT, 1984a), respectivamente. No caso dos ensaios de granulometria, além da metodologia convencional recomendada na norma utilizada, foram

---

realizados ensaios de sedimentação sem o uso de agitação mecânica e defloculação química das partículas. Os resultados obtidos nestes ensaios são apresentados nas Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 e nas Figuras 4.16, 4.19 e 4.20, sendo que os códigos das amostras identificam a mineradora, o tipo de rejeito e o ponto de amostragem em que foi coletada. Como exemplos, a amostra **SA4** foi coletada no ponto **P4** da praia de rejeitos **Arenosos** (barragem da Cava do Germano) na **Samarco** e a amostra **FA2** foi coletada no ponto **F2** na praia de rejeitos **Arenosos** (BL1) na **Fosfertil**. As inscrições CD e SD que completam esta nomenclatura identificam os resultados obtidos por meio de ensaios de sedimentação com e sem o uso de agitação mecânica e defloculação química, respectivamente.

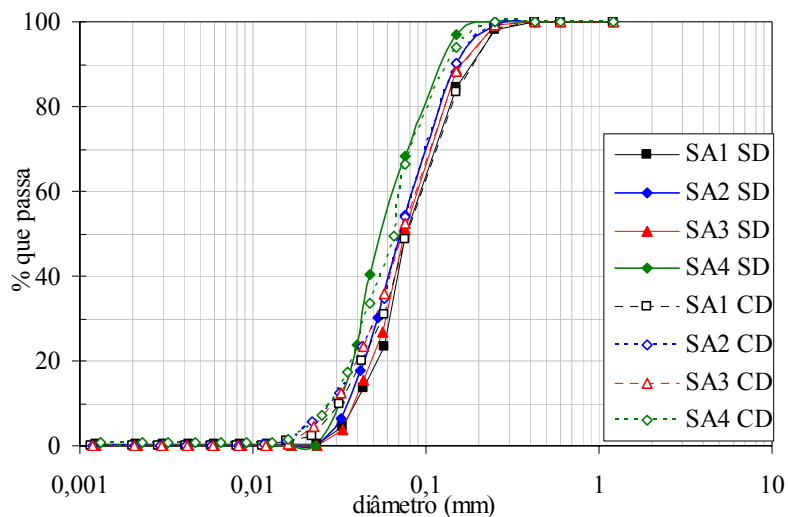
Tanto na Tabela 4.4 quanto na Figura 4.16 pode-se notar que, apesar da distância entre os pontos de amostragem no campo e das características do procedimento de lançamento dos rejeitos, as amostras coletadas na barragem da Cava do Germano apresentam reduzida variabilidade granulométrica. Além disso, o efeito da agitação mecânica e da defloculação química nos resultados dos ensaios de granulometria são bastante pequenos. No caso da massa específica média dos grãos pode-se notar uma tendência à diminuição com o aumento da distância ao ponto de lançamento dos rejeitos, com exceção da SA3. Apesar da sua pequena variabilidade, tal fato indica a diminuição do teor de ferro ao longo do caminho de deposição do rejeito. Na Figura 4.17 são apresentadas as relações entre as massas específicas médias dos grãos dos rejeitos estudados neste trabalho. A variação desta relação para os rejeitos SL e FA, também apresentada na Figura 4.17, será comentada a seguir.

No caso das amostras de rejeito fino (lama) coletadas na BS3 (UIG), tanto na Tabela 4.5 quanto na Figura 4.19 pôde-se notar uma maior variabilidade granulométrica em função da distância entre os pontos de amostragem no campo. Neste caso, há uma clara distinção entre os resultados dos ensaios de granulometria por sedimentação realizados com e sem o uso de agitação mecânica e defloculação química, especialmente nas frações menores que 0,002 mm. A massa específica dos grãos também apresenta uma importante variabilidade, indicando uma possível variação do teor dos minerais constituintes das amostras ao longo do caminho de escoamento da lama. Porém, na Figura 4.17 nota-se que não foi possível relacionar diretamente a variação da massa específica média dos grãos com a distância ao ponto de lançamento do rejeito. Tal fato pode ter sido influenciado pelo procedimento de coleta das amostras, tendo em vista o uso de uma retroescavadeira.

Tabela 4.4: Caracterização das amostras dos rejeitos coletados na barragem da Cava do Germano, na UIG.

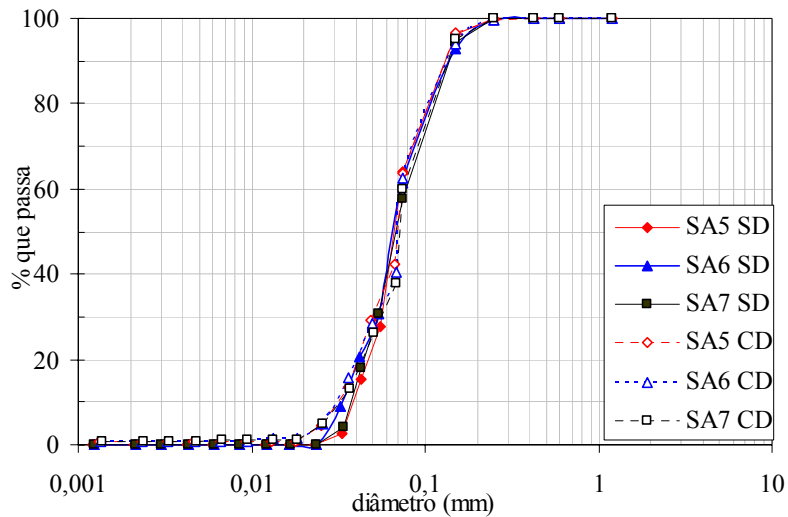
Rejeito	$d_{15}$ (mm)		$d_{50}$ (mm)		$d_{85}$ (mm)		$C_u$		$C_c$		$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )
	CD	SD	CD	SD	CD	SD	CD	SD	CD	SD	
SA1	0,037	0,046	0,078	0,077	0,162	0,156	3,2	2,5	1,0	1,0	3,01
SA2	0,034	0,040	0,071	0,071	0,139	0,139	3,1	2,5	1,1	0,9	2,97
SA3	0,035	0,043	0,072	0,074	0,143	0,143	3,1	2,4	1,0	0,9	2,91
SA4	0,033	0,034	0,065	0,057	0,125	0,119	2,6	2,2	1,0	0,9	2,97
SA5	0,037	0,043	0,069	0,067	0,124	0,124	2,3	1,9	1,1	1,1	2,94
SA6	0,035	0,037	0,071	0,067	0,129	0,131	2,4	2,2	1,2	1,2	2,90
SA7	0,039	0,041	0,072	0,069	0,129	0,131	2,3	2,2	1,3	1,0	2,87
$\bar{x}$	0,036	0,041	0,071	0,069	0,136	0,134	2,7	2,2	1,1	1,0	2,94
$\sigma$	0,002	0,004	0,004	0,006	0,014	0,012	1,1	0,2	0,1	0,1	0,05

Notas:  $d_i$  corresponde ao diâmetro equivalente através do qual passam  $i$  por cento das partículas do rejeito;  $C_u$  é o coeficiente de não-uniformidade do rejeito;  $C_c$  é o coeficiente de curvatura da respectiva curva granulométrica; e  $\rho_s$  corresponde massa específica média dos grãos que compõem o rejeito.



a)

Figura 4.15: Granulometria das amostras de rejeito arenoso coletadas na barragem da Cava do Germano, na UIG: a) SA1 a SA4; cont.



b)

Figura 4.16: Granulometria das amostras de rejeito arenoso coletadas na barragem da Cava do Germano, na UIG: a) SA1 a SA4; b) SA5 a SA7.

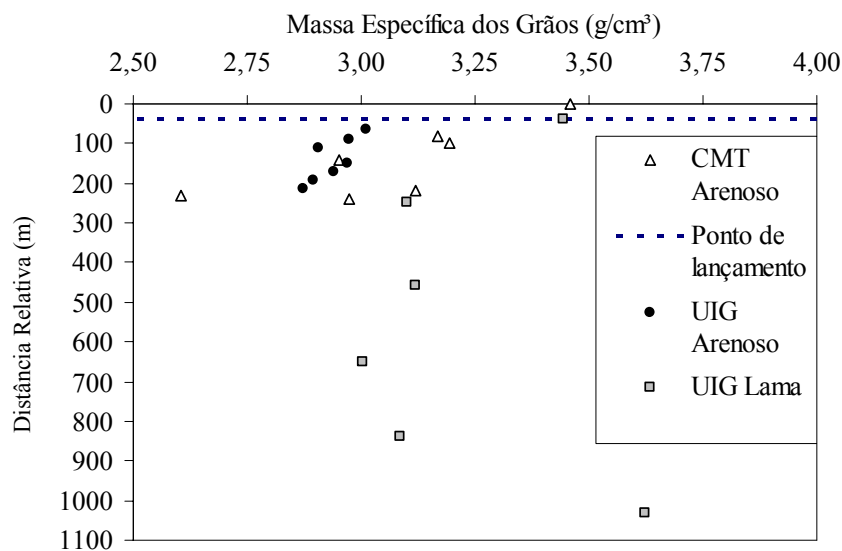


Figura 4.17: Variação da massa específica média dos grãos dos rejeitos estudados em função das distâncias aos respectivos pontos de lançamento.

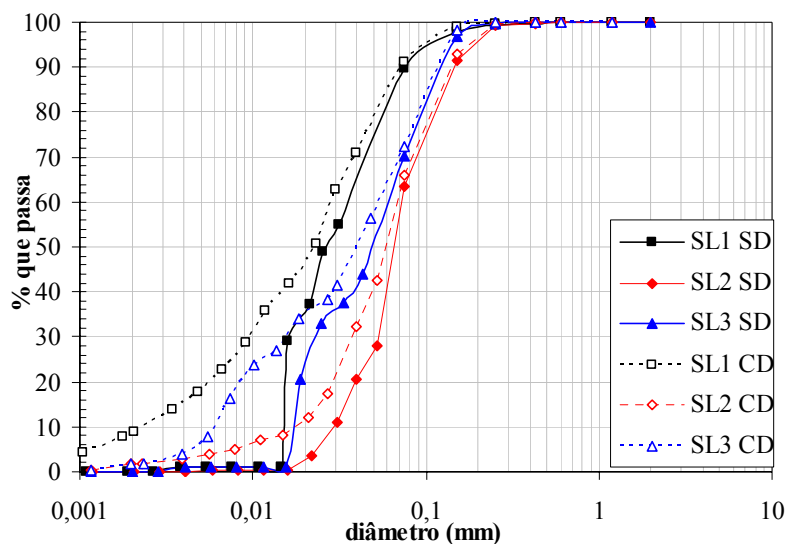
A granulometria e a massa específica média dos grãos do rejeito arenoso coletado na BL1 (CMT) são apresentadas na Tabela 4.6 e na Figura 4.20. Estas amostras apresentam baixa variabilidade granulométrica, porém importante variação da massa específica média dos grãos. Na Figura 4.17 pode-se observar que a variabilidade deste último parâmetro não pôde ser claramente associada à distância entre os pontos de amostragem e o de lançamento do rejeito. Tal observação pode ser justificada, além das características do procedimento de lançamento dos rejeitos, pela grande variabilidade dos tipos minerais ocorrentes. Nota-se ainda que, especialmente as amostras FA1, FA4 e FA5 apresentaram um aumento da

porcentagem de partículas menores que 0,005 mm quando ensaiados com o uso de agitação mecânica e defloculação química.

Tabela 4.5: Caracterização das amostras dos rejeitos coletados na BS3, na UIG.

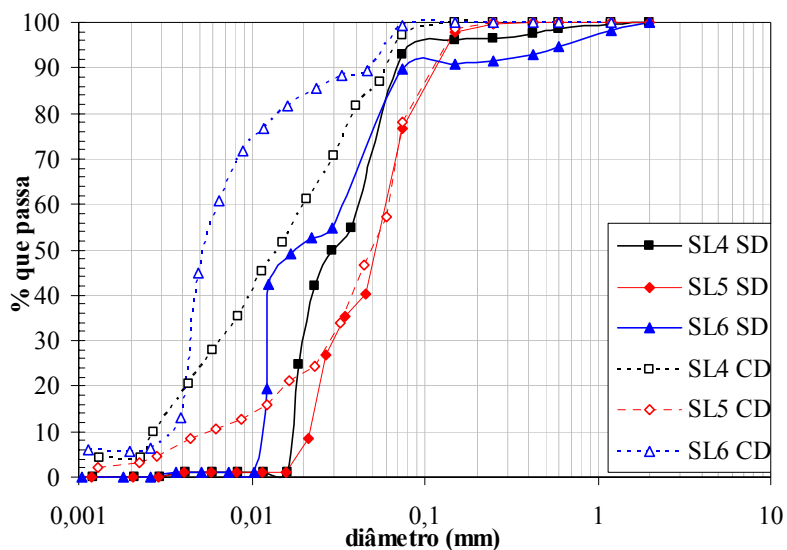
Rejeito	d <sub>15</sub> (mm)		d <sub>50</sub> (mm)		d <sub>85</sub> (mm)		C <sub>u</sub>		C <sub>c</sub>		ρ <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
	CD	SD	CD	SD	CD	SD	CD	SD	CD	SD	
SL1	0,004	0,010	0,022	0,026	0,064	0,069	11,9	4,9	1,4	0,9	3,44
SL2	0,024	0,034	0,060	0,067	0,128	0,133	3,9	2,5	1,2	1,4	3,10
SL3	0,007	0,015	0,041	0,51	0,112	0,117	9,2	5,8	0,8	0,8	3,12
SL4	0,003	0,013	0,014	0,30	0,050	0,067	7,4	4,4	0,8	1,0	3,00
SL5	0,011	0,023	0,050	0,054	0,100	0,105	11,2	2,8	2,4	0,7	3,09
SL6	0,004	0,010	0,005	0,018	0,023	0,069	2,0	4,6	0,9	0,5	3,62
$\bar{x}$	0,009	0,018	0,032	0,041	0,079	0,093	7,6	4,2	1,2	1,3	3,23
σ	0,008	0,010	0,021	0,019	0,040	0,029	4,0	0,9	0,6	0,3	0,25

Nota: Valem as mesmas notas mencionadas na Tabela 4.4.



a)

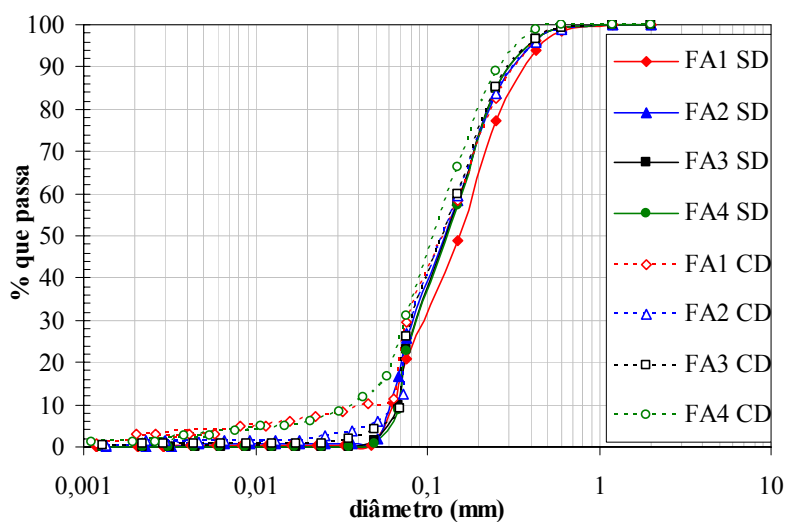
Figura 4.18: Granulometria das amostras de lama coletadas na BS3, na UIG: a) SL1 a SL3; cont.



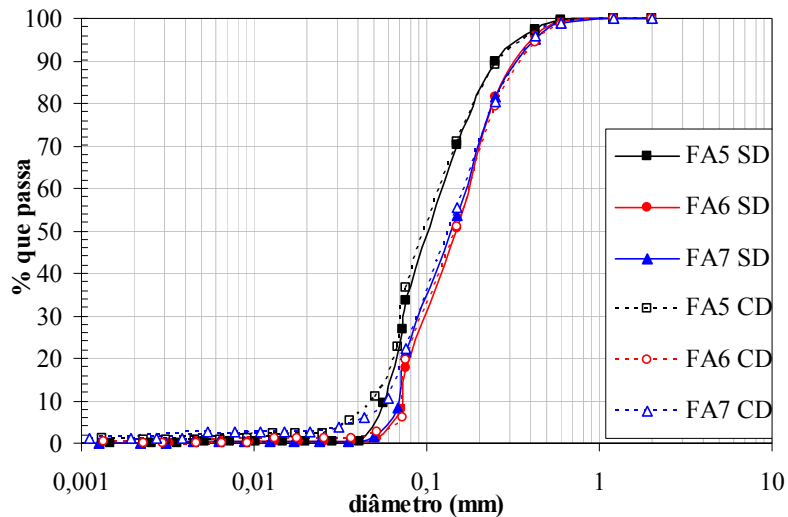
b)

Figura 4.19: Granulometria das amostras de lama coletadas na BS3, na UIG: a) SL1 a SL3; b) SL4 a SL6.

De forma complementar, a partir destes dados pôde-se avaliar melhor os resultados dos ensaios de campo. Os índices de vazios de campo dos rejeitos foram determinados para os pontos que tiveram a massa específica de campo e média dos grãos determinadas (Equação 3.1). Na Figura 4.21 é revelada a dispersão destes resultados.



a)



b)

Figura 4.20: Granulometria das amostras de rejeito arenoso coletadas na BL1, no CMT: a) FA1 a FA4; b) FA5 a FA7.

Tabela 4.6: Caracterização das amostras dos rejeitos coletados na BL1, no CMT.

Rejeito	d <sub>15</sub> (mm)		d <sub>50</sub> (mm)		d <sub>85</sub> (mm)		C <sub>u</sub>		C <sub>c</sub>		ρ <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
	CD	SD	CD	SD	CD	SD	CD	SD	CD	SD	
FA1	0,066	0,068	0,128	0,154	0,281	0,330	3,7	3,1	0,9	0,9	3,46
FA2	0,073	0,067	0,128	0,131	0,267	0,266	2,4	2,6	0,7	0,8	2,95
FA3	0,071	0,070	0,128	0,133	0,249	0,250	2,2	2,3	0,7	0,8	3,12
FA4	0,054	0,071	0,115	0,134	0,232	0,251	3,8	2,3	1,1	0,8	3,17
FA5	0,057	0,062	0,104	0,109	0,228	0,225	2,6	2,3	0,9	0,7	2,61
FA6	0,074	0,074	0,148	0,148	0,316	0,294	2,5	2,5	0,7	0,8	3,20
FA7	0,066	0,071	0,138	0,142	0,301	0,293	2,9	2,5	0,9	0,8	2,97
$\bar{x}$	0,066	0,069	0,127	0,136	0,268	0,273	2,9	2,5	0,8	0,8	3,07
σ	0,008	0,004	0,014	0,015	0,034	0,035	0,8	0,3	0,1	0,04	0,26

Nota: Valem as mesmas notas mencionadas na Tabela 4.4.



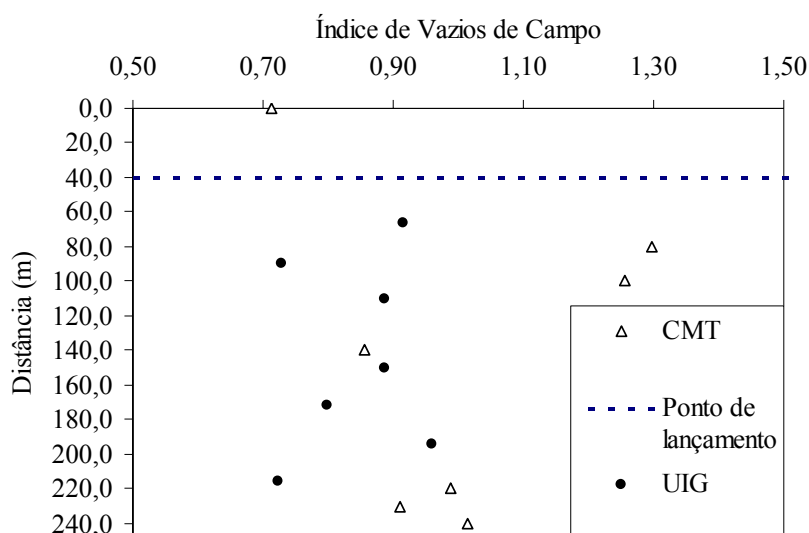


Figura 4.21: Variação do índice de vazios ao longo das praias de rejeito estudadas.

Na Tabela 4.7 são apresentados os parâmetros médios relacionados aos índices de vazios assim determinados. Também são apresentados os resultados médios obtidos com o emprego das Equações 2.1 e 2.2, propostas por Hazen e Terzaghi, respectivamente, segundo Espósito (2000), para previsão da condutividade hidráulica dos rejeitos estudados.

Tabela 4.7: Parâmetros complementares dos trabalhos de campo.

Rejeito	e		n (%)		DR (%)		k (cm/s) (Hazen)		k (cm/s) (Terzaghi)	
	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$
SA	0,84	0,09	46	3	49	39	$9,2 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-1}$	$4,5 \cdot 10^{-2}$
SL	-	-	-	-	-	-	$6,7 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	-	-
FA	1,01	0,21	50	5	50	36	$3,3 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{-1}$	$8,1 \cdot 10^{-1}$	$4,5 \cdot 10^{-1}$

Notas: *e* corresponde ao índice de vazios de campo; *n* à porosidade; *DR* à respectiva relativa dos rejeitos; e *k* é o coeficiente de condutividade hidráulica calculado.

Cabe ressaltar que os resultados e respectivas análises da variabilidade geotécnica de campo dos rejeitos, apresentados até aqui, tratam-se apenas de indicativos destinados à adequação dos trabalhos de laboratório voltados para a avaliação do comportamento em filtração dos materiais estudados. A caracterização específica do comportamento dos diversos parâmetros tratados ao longo das respectivas praias de deposição, caminhos de escoamento, ou mesmo na área compactada do barramento, devem ter abrangência suficiente para a obtenção de valores representativos para cada caso de aplicação.

#### 4.4. ESTABILIDADE INTERNA DOS REJEITOS

O procedimento de seleção das amostras a serem empregadas nos ensaios de filtração (GR) de laboratório foi baseado em análises da estabilidade interna das amostras segundo as metodologias propostas por Sherard (1979), Kenney e Lau (1985) e Lafleur *et al.* (1989), descritas na seção 3.4.5. Como mencionado, estas metodologias se baseiam na distribuição granulométrica do material para determinar sua capacidade de estabilidade interna.

No uso da metodologia de Sherard (1979) as curvas granulométricas dos rejeitos estudados, obtidas nos ensaios de granulometria realizados segundo as recomendações da NBR 7181 (ABNT, 1989), foram divididas em três conjuntos de duas frações, uma fina e outra grossa. Nesta divisão optou-se por porcentagens tomadas como representativas de solos em projetos de filtração na literatura. Assim, cada uma das amostras foi dividida em conjuntos de frações: mais fina que 15% e mais grossa que 15% da amostra real; mais fina que 30% e mais grossa que 30% da amostra real; e mais fina que 50% e mais grossa que 50% da amostra real.

A partir de então, cada uma das frações mais grossas foi verificada como filtro da respectiva fração mais fina por meio da Equação 3.2. Todas as amostras se apresentaram estáveis segundo esta metodologia. Na Figura 4.22 são apresentadas as curvas granulométricas das frações obtidas para amostra SA4 como exemplo. Na

Tabela 4.8 são sumarizados os resultados obtidos nesta e nas demais metodologias utilizadas, sendo que os resultados destes últimas serão tratados a seguir.

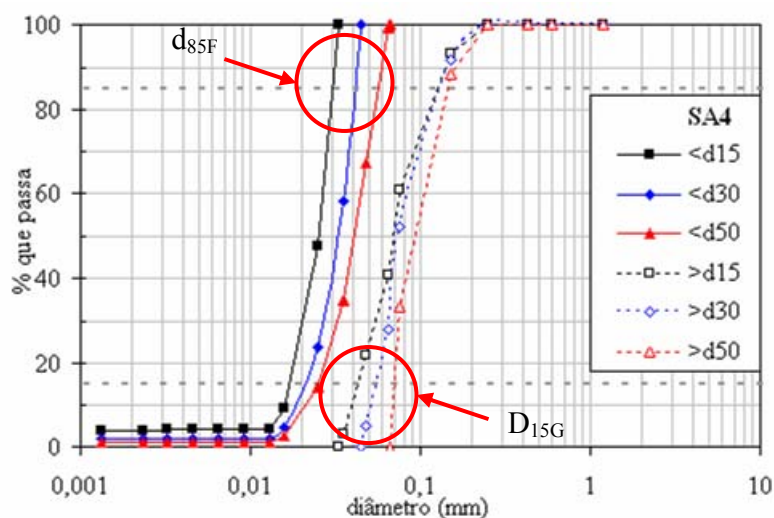


Figura 4.22: Curvas granulométricas das frações obtidas para a amostra SA4 (UIG).

Tabela 4.8: Classificação das amostras de rejeito estudadas quanto ao potencial à instabilidade interna.

<b>Metodologia<sup>(4)</sup></b>	<b>(1)</b>	<b>(2)</b>	<b>(3)</b>		<b>(1)</b>	<b>(2)</b>	<b>(3)</b>		<b>(1)</b>	<b>(2)</b>	<b>(3)</b>
<b>Rejeito</b>	<b>Resultados</b>			<b>Rejeito</b>	<b>Resultados</b>			<b>Rejeito</b>	<b>Resultados</b>		
<b>SA1</b>	E	E	L	<b>SL1</b>	E	I	L	<b>FA1</b>	E	I	DE
<b>SA2</b>	E	E	L	<b>SL2</b>	E	E	CC	<b>FA2</b>	E	E	L
<b>SA3</b>	E	E	L	<b>SL3</b>	E	I	CC	<b>FA3</b>	E	E	L
<b>SA4</b>	E	E	CC	<b>SL4</b>	E	I	L	<b>FA4</b>	E	E	L
<b>SA5</b>	E	E	CC	<b>SL5</b>	E	E	L	<b>FA5</b>	E	E	L
<b>SA6</b>	E	E	CC	<b>SL6</b>	E	I	L	<b>FA6</b>	E	E	L
<b>SA7</b>	E	E	CC					<b>FA7</b>	E	E	L

Notas: (1) Sherard (1979); (2) Kenney e Lau (1985); (3) Lafleur *et al.* (1989); E = potencialmente estável internamente; I = potencialmente instável internamente; L – curva granulométrica linear; CC = curva granulométrica côncava para cima; e DE = curva granulométrica descontínua.

A forma das curvas granulométricas obtidas para todas as amostras foi submetida à comparação com os modelos de curva típicos apresentados por Lafleur *et al.* (1989). Uma quantidade representativa das amostras coletadas na mineração de minério de ferro pôde ser classificada como côncava para cima (CC), enquanto as amostras de rejeito de minério de rocha fosfática foram classificadas, em sua maioria, como lineares (L). A exceção é a amostra FA1 que foi classificada como descontínua (DE), tendo em vista o pequeno patamar observado no ponto que limita a fração 10% mais fina do rejeito. Lafleur *et al.* (1989) afirmam que materiais com curvas CC geralmente têm algum grau de instabilidade interna. Para materiais com curvas L, estes pesquisadores afirmam a predominância da estabilidade. Já materiais com curvas DE demandam uma investigação específica do seu potencial a instabilidade interna. Na Figura 4.23 é apresentado um esquema típico da metodologia adotada na identificação de curvas granulométricas do tipo CC, utilizando-se como exemplo a amostra SA4.

Considerando-se que o número hidrodinâmico  $R'$ , dado pela Equação 3.3, seja maior que 10, pode-se aplicar a proposta de Kenney e Lau (1985), que sugerem que a forma da curva granulométrica seja mais importante que o próprio diâmetro das partículas na análise da

estabilidade interna de um solo. Utilizando a metodologia gráfica de descrição da forma da curva granulométrica apresentada na seção 3.4.6., são obtidos os gráficos apresentados nas Figuras 4.24, 4.25 e 4.26.

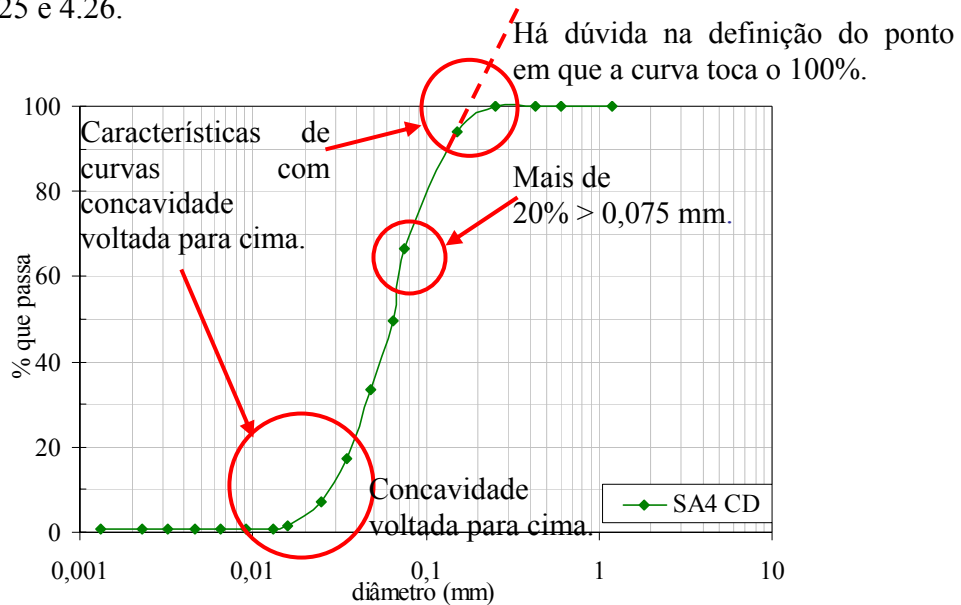


Figura 4.23: Características da curva granulométrica da amostra SA4 (UIG).

Na Figura 4.24 pode-se notar que todas as amostras analisadas, bem graduadas e não uniformes, são consideradas internamente estáveis (E) pela metodologia proposta por Kenney e Lau (1985).

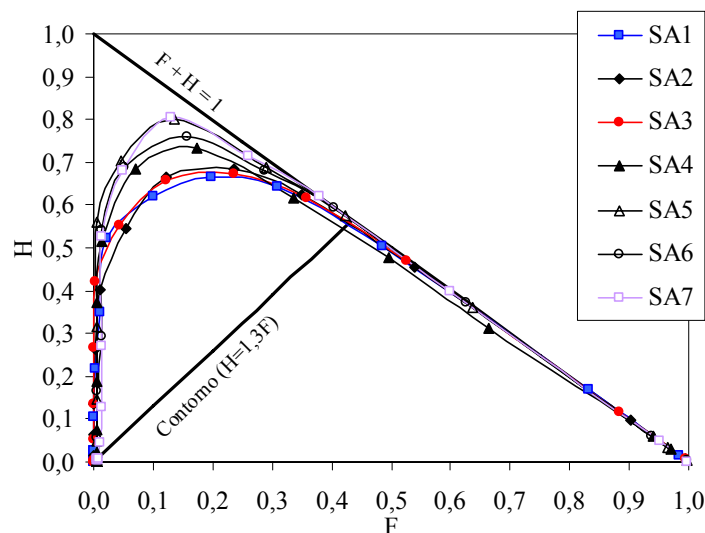


Figura 4.24: Curvas de descrição da curva granulométrica dos rejeitos arenoso da barragem da Cava do Germano (UIG).

Na Figura 4.25 pode-se observar que as amostras SL1, SL3, SL4 e SL6 apresentam algum grau de instabilidade interna, segundo a metodologia proposta por Kenney e Lau (1985). Porém, a amostra SL3, descontínua ( $C_c < 1$ ) e não uniforme ( $C_u > 2$ ), apresenta o maior

potencial à perda de partículas, apesar de ter a curva de descrição da forma da curva granulométrica bem próxima do contorno entre os materiais estáveis (**E**) e os instáveis (**I**) internamente na região em que  $F$  é menor ou igual a 0,2 .

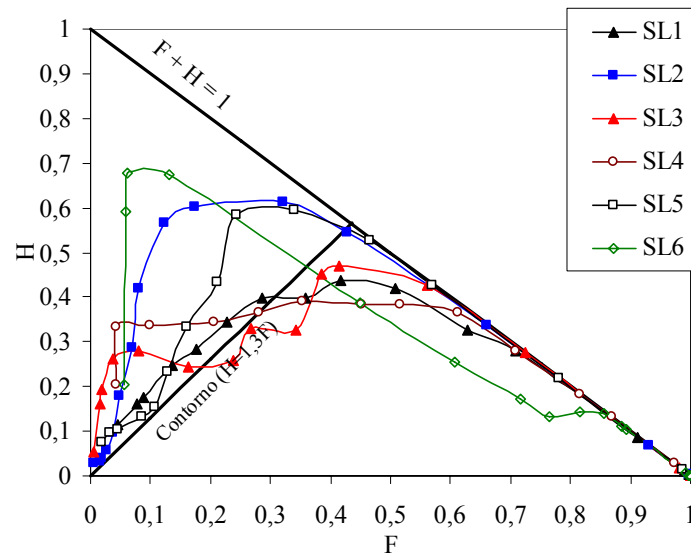


Figura 4.25: Curvas de descrição da curva granulométrica dos rejeitos finos da BS3 (UIG).

No caso das amostras coletadas na BL1 (CMT), na Figura 4.26 pode-se notar que apenas a curva de descrição da forma da curva granulométrica da amostra FA1, descontínua e não uniforme, passa abaixo do contorno ( $H=1,3F$ ) na região em que  $F$  é menor ou igual a 0,2. Assim sendo, ela foi classificada como potencialmente instável (**I**), apesar da proximidade a este contorno.

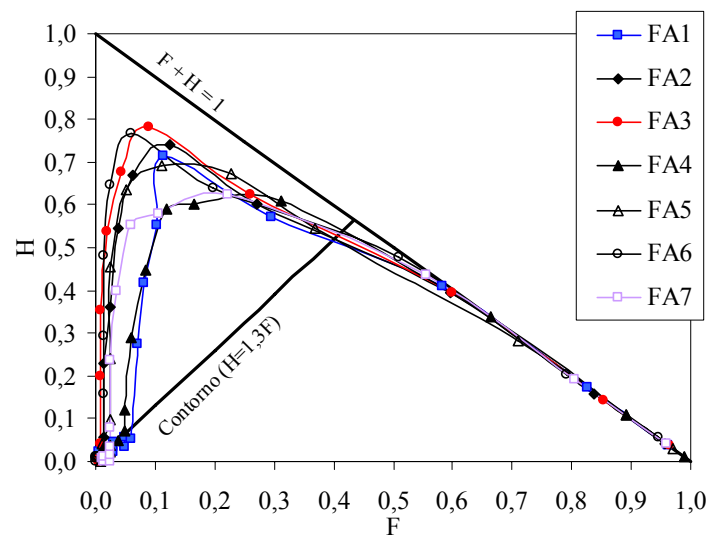


Figura 4.26: Curvas de descrição da curva granulométrica dos rejeitos arenoso da BL1 (CMT).

A partir desta classificação dois critérios foram utilizados para a seleção das três amostras que foram estudadas nos ensaios de filtração do tipo razão entre gradientes: cada tipo de rejeito deve ter uma amostra representativa estudada; e estudar amostras classificadas como potencialmente instáveis internamente. Assim, foram escolhidas as amostras SA4, SL3 e FA1. A amostra SA4, potencialmente instável apenas pela proposta de Lafleur *et al.* (1989), foi escolhida por ter uma porcentagem de finos ( $\% < 0,075$  mm) ligeiramente superior às demais amostras de rejeito arenoso da UIG que obtiveram a mesma classificação. A amostra SL3, além de ter sido classificada como potencialmente instável por duas das três metodologias utilizadas apresentou granulometria muito semelhante à do material (LGE) coletado próximo à amostra de geotêxtil exumada (Figura 4.27), o que também favoreceu sua escolha.

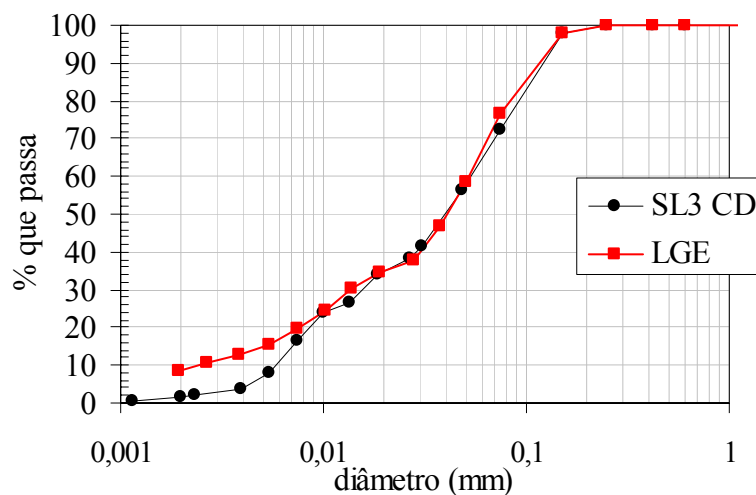


Figura 4.27: Curvas granulométricas da SL3 e da LGE.

#### 4.5. CARACTERIZAÇÃO DOS REJEITOS ESTUDADOS NOS ENSAIOS DE GR

Para melhor entender o comportamento das amostras escolhidas nos ensaios de filtração a serem realizados sua caracterização foi complementada pelos seguintes estudos: determinação dos índices de vazios máximo e mínimo e dos limites de liquidez e plasticidade; avaliação da forma das partículas; difratometria de raios X; granulometria a laser; e análise físico-química.

Na Tabela 4.9 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de determinação dos limites de liquidez e de plasticidade e dos índices de vazios máximo e mínimo. Apesar do elevado teor de partículas menores que 0,075 mm, especialmente no caso dos rejeitos de minério de ferro, as amostras foram classificadas como não plásticas ou com plasticidade muito baixa. Já os índices de vazios determinados em laboratório ficaram abaixo dos limites inferior e máximo observados no campo. No caso dos índices de vazios este resultado pode ser justificado pela distinção entre o procedimento de laboratório para determinação destes parâmetros do processo de sedimentação no campo. Além disso, o processo de

homogeneização das amostras no laboratório pode favorecer a redução dos vazios entre as partículas. No campo, a deposição hidráulica provoca a segregação das partículas especialmente de acordo com seu peso. Isto pode ter favorecido a formação de vazios maiores, e/ou em maior quantidade, no campo.

Tabela 4.9: Limites de consistência e índices de vazios dos rejeitos selecionados para os ensaios de filtração (GR).

Rejeito	LL	LP	IP	e	
				Máx.	Mín.
FA1	NP	NP	NP	1,13	0,67
SA4	NP	NP	NP	0,93	0,46
SL3	14	7	7	0,91	0,50

Na Tabela 4.10 e na Figura 4.28, são reapresentados os resultados obtidos na caracterização preliminar dos rejeitos SA4, SL3 e FA1.

Tabela 4.10: Resultados da caracterização preliminar dos rejeitos selecionados para os ensaios de filtração (GR).

Rejeito	d <sub>15</sub> (mm)		d <sub>50</sub> (mm)		d <sub>85</sub> (mm)		C <sub>U</sub>		C <sub>C</sub>		$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )
	CD	SD	CD	SD	CD	SD	CD	SD	CD	SD	
FA1	0,066	0,068	0,128	0,154	0,281	0,330	3,7	3,1	0,9	0,9	3,46
SA4	0,033	0,034	0,065	0,057	0,125	0,119	2,6	2,2	1,0	0,9	2,97
SL3	0,007	0,015	0,041	0,51	0,112	0,117	9,2	5,8	0,8	0,8	3,12

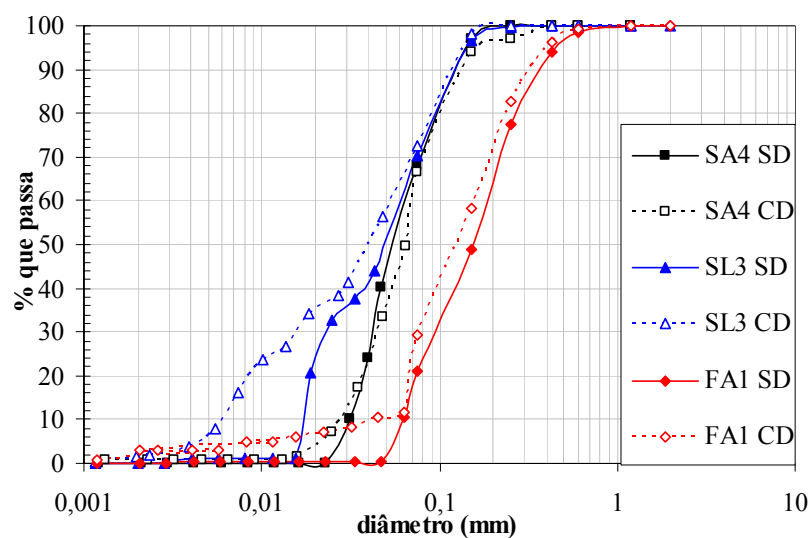


Figura 4.28: Curvas granulométricas dos rejeitos selecionados para os ensaios de filtração (GR).

Estudos qualitativos das formas das partículas que compõem os rejeitos estudados nos ensaios de filtração (GR) foram feitos com uso de uma lupa com capacidade de ampliação de 50 vezes. Pôde-se notar a ocorrência marcante de partículas lamelares, especialmente no rejeito de rocha fosfática, e outras equidimensionais em ambos os rejeitos. Algumas imagens obtidas são apresentadas na Figura 4.29.

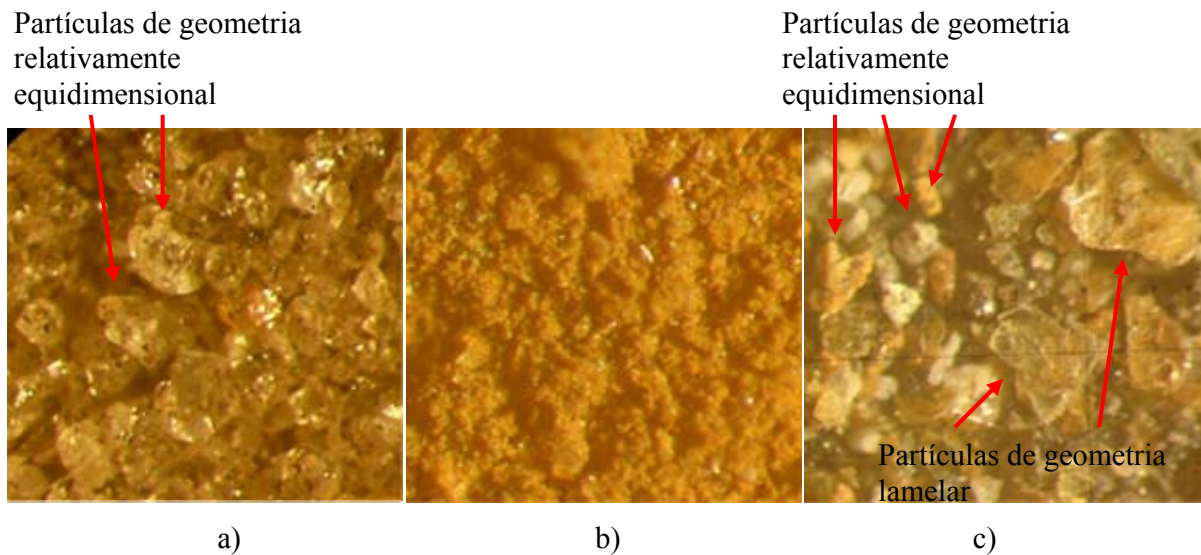


Figura 4.29: Forma dos grãos dos rejeitos estudados nos ensaios de filtração (GR): a) SA4; b) SL3; e c) FA1.

A composição mineralógica dos rejeitos foi estudada com recursos de difratometria de raios X analisando-se as amostras totais. Os difratogramas obtidos são apresentados nas Figuras 4.30, 4.31 e 4.32. Cabe ressaltar a maior diversidade de minerais presentes na amostra de rejeito de rocha fosfática (FA1). A mineralogia identificada nestes estudos comprova também a variedade de formas possíveis das partículas dos rejeitos.



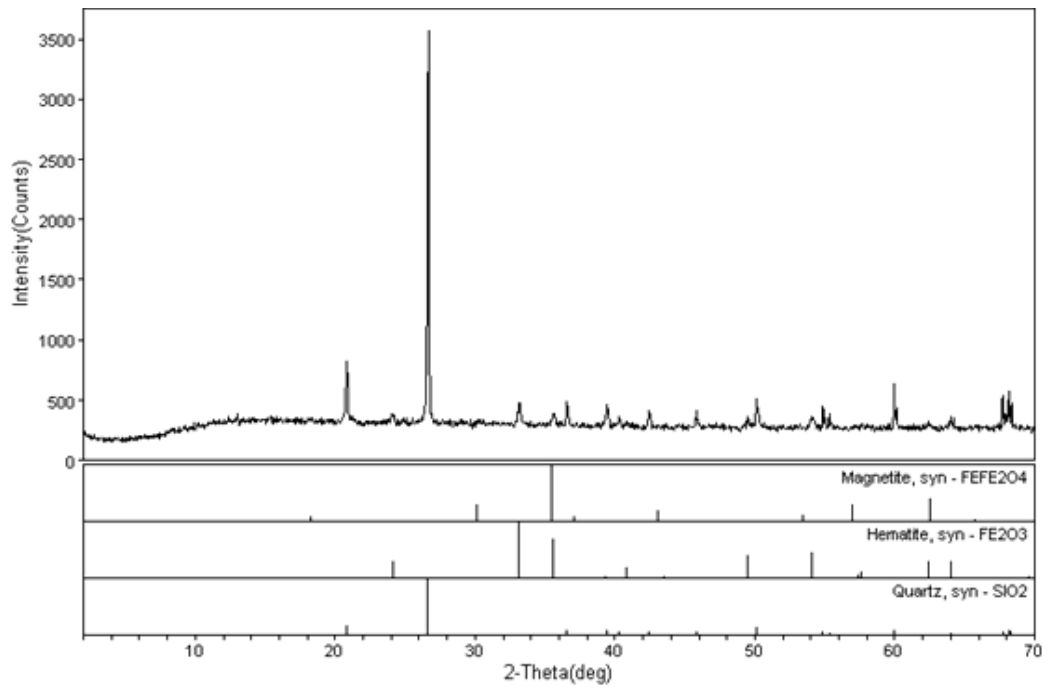


Figura 4.30: Mineralogia da amostra total do rejeito SA4.

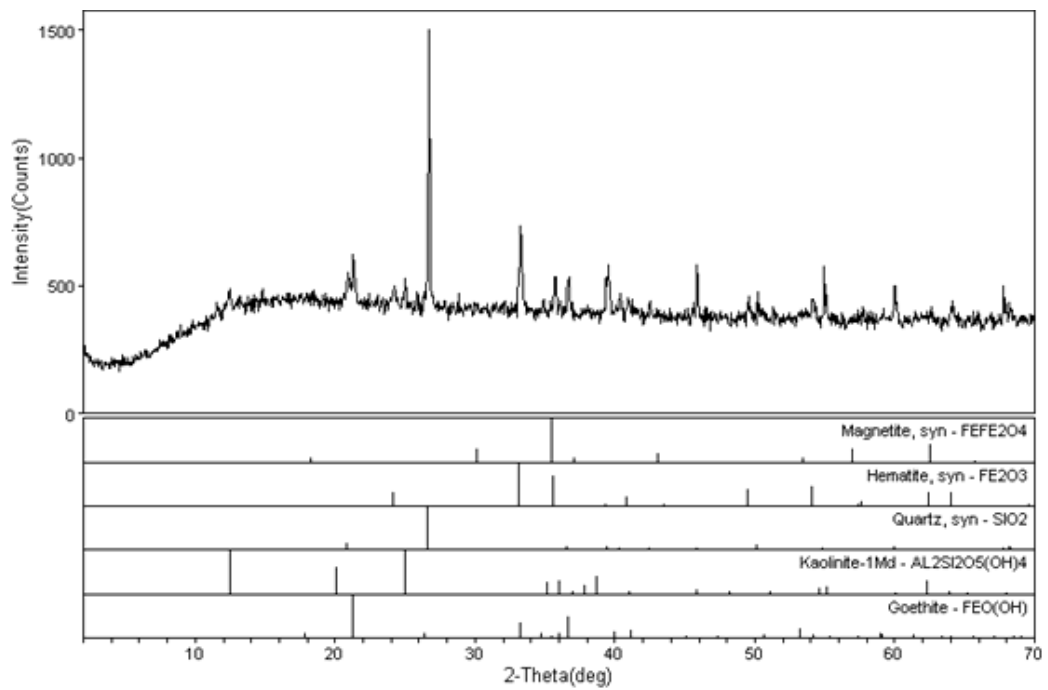


Figura 4.31: Mineralogia da amostra total do rejeito SL3.

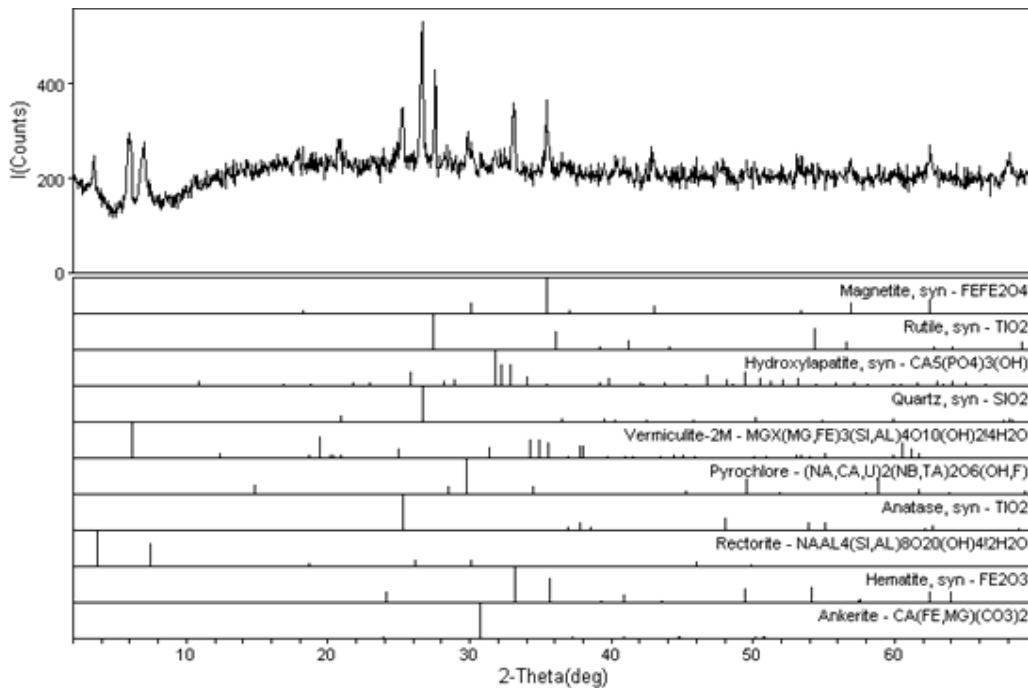


Figura 4.32: Mineralogia da amostra total do rejeito FA1.

Tanto a forma observada das partículas dos rejeitos estudados quanto suas mineralogias chamam a atenção para a qualidade dos resultados obtidos nos ensaios de granulometria utilizando-se os procedimentos tradicionais de peneiramento e sedimentação. No caso de materiais com partículas de formas bastante distintas, especialmente como os rejeitos arenosos (SA4 e FA1) estudados neste trabalho, tanto o peneiramento quanto a sedimentação determinará tamanhos de partículas que podem não ser representativos dos materiais analisados. No peneiramento apenas uma dimensão da seção de menor área é determinada, enquanto na sedimentação a consideração de partículas esféricas para avaliação do tempo de queda, baseada na Lei de Stokes, incorre em erros quando aplicados a materiais mais irregulares como os de partículas lamelares. No caso do procedimento de ensaio por sedimentação a mineralogia das partículas também interfere nos resultados. Ao ser considerada uma massa específica média para as partículas ocorre uma majoração dos diâmetros de partículas compostas por minerais mais pesados, como a hematita, e minoração dos daquelas compostas por minerais mais leves, como o quartzo e a vermiculita nos casos estudados. Para melhor analisar o efeito dos erros qualificados até aqui nos resultados dos ensaios de granulometria, duas frentes foram adotadas: avaliação paramétrica do efeito da variação da massa específica dos grãos nos resultados das etapas de sedimentação; e realização de ensaios de granulometria a laser.

---

Para avaliação paramétrica as amostras de rejeito foram divididas em duas frações: uma passante e outra retida no diâmetro de 0,075 mm. A mineralogia destas frações foi, então, analisada com auxílio da difratometria de raios X. Os difratogramas obtidos estão apresentados nas Figura 4.33, Figura 4.34 e Figura 4.35. No caso dos rejeitos de rocha fosfática ainda pode ser observada a grande variedade de minerais presentes em cada uma das frações, porém nos rejeitos de minérios de ferro nota-se que as frações retidas são caracterizadas pela ocorrência predominante do quartzo. Assim, uma análise paramétrica melhor orientada pode ser feita para estas últimas amostras considerando-se que todas as partículas de hematita estão na fração fina. No caso da SA4, por exemplo, considerando-se que na amostra total há apenas hematita e quartzo, por simplificação, o teor de hematita pode ser aproximado com o uso da Equação 4.1.

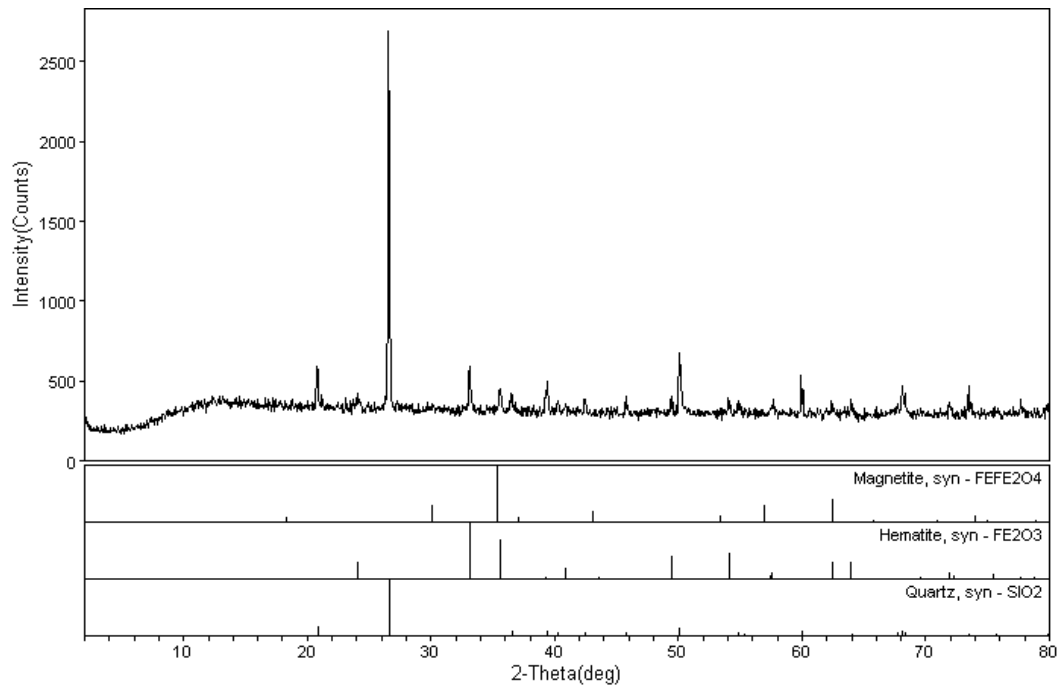
$$\rho_s = 2,61.P_F + 2,65 \quad \text{Equação 4.1}$$

em que  $\rho_s$  é a massa específica média dos grãos do material ( $\text{g/cm}^3$ ) e  $P_F$  é a porcentagem de hematita na sua composição mineralógica.

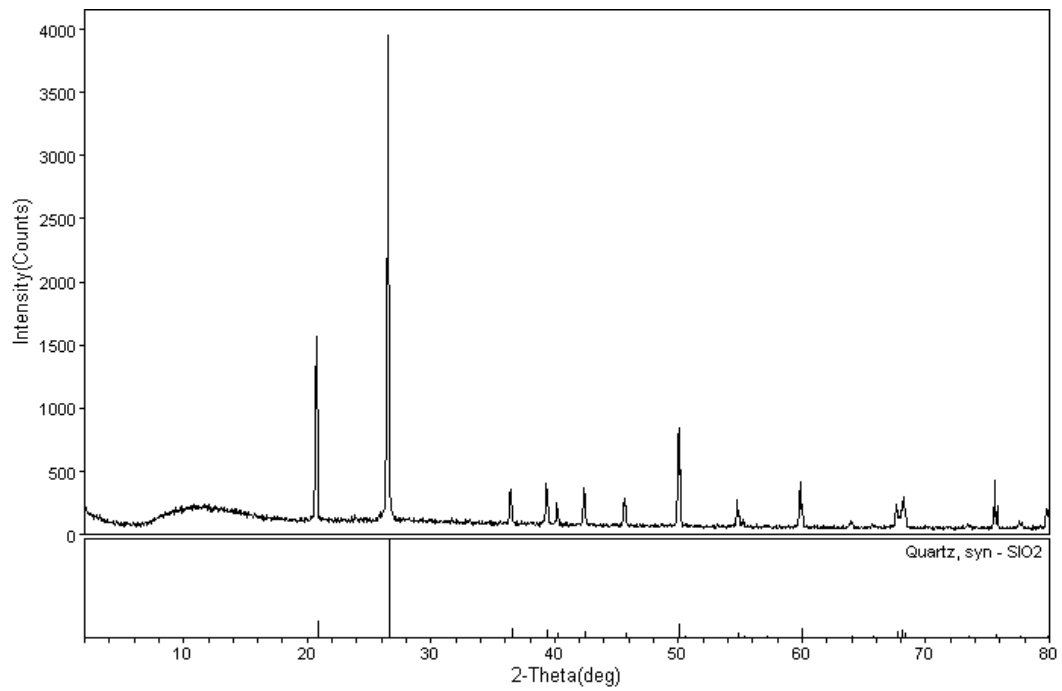
Assim, a massa de hematita ( $M_H$ ) contida em uma porção da amostra total é igual à massa deste mineral na sua fração fina ( $\% < 0,075$  mm). Assim, conhecendo-se a massa total da fração fina ( $M_F$ ) pode-se determinar o seu teor de hematita ( $A_F$ ) e, conseqüentemente, a massa específica média ( $\rho_{s,F}$ ) dos grãos desta fração, que deverá ser utilizada nas análises dos resultados obtidos nos respectivos ensaios de sedimentação (Equação 4.2).

$$\rho_{s,F} = 2,61.A_F + 2,65 \quad \text{Equação 4.2}$$

em que  $A_F = M_H / M_F$ .

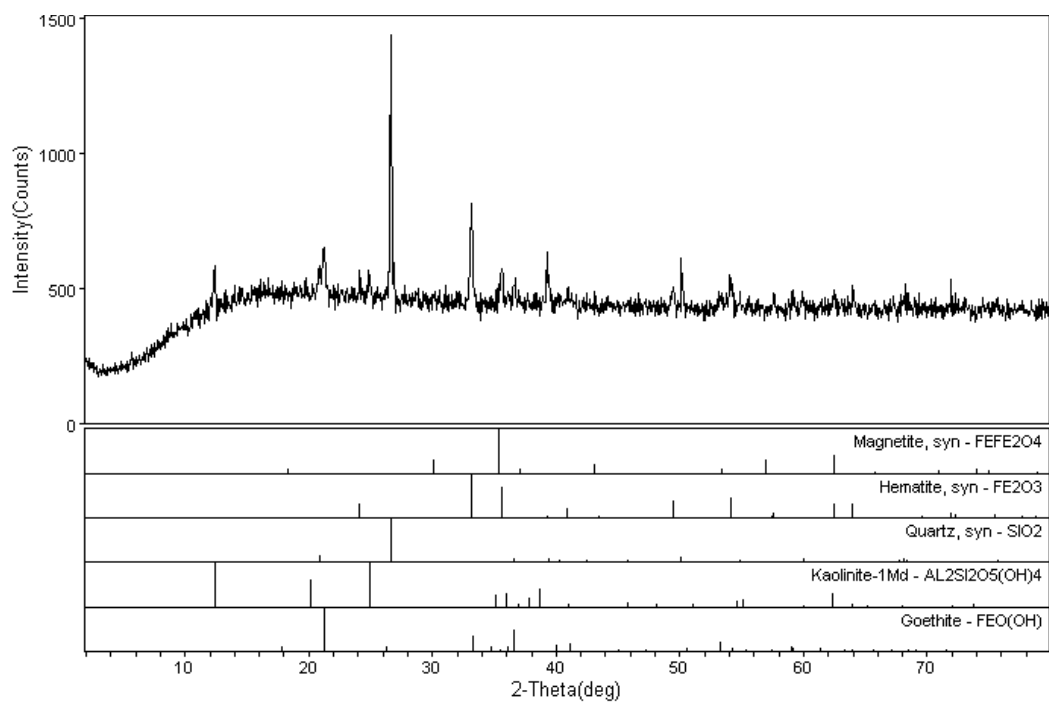


a)

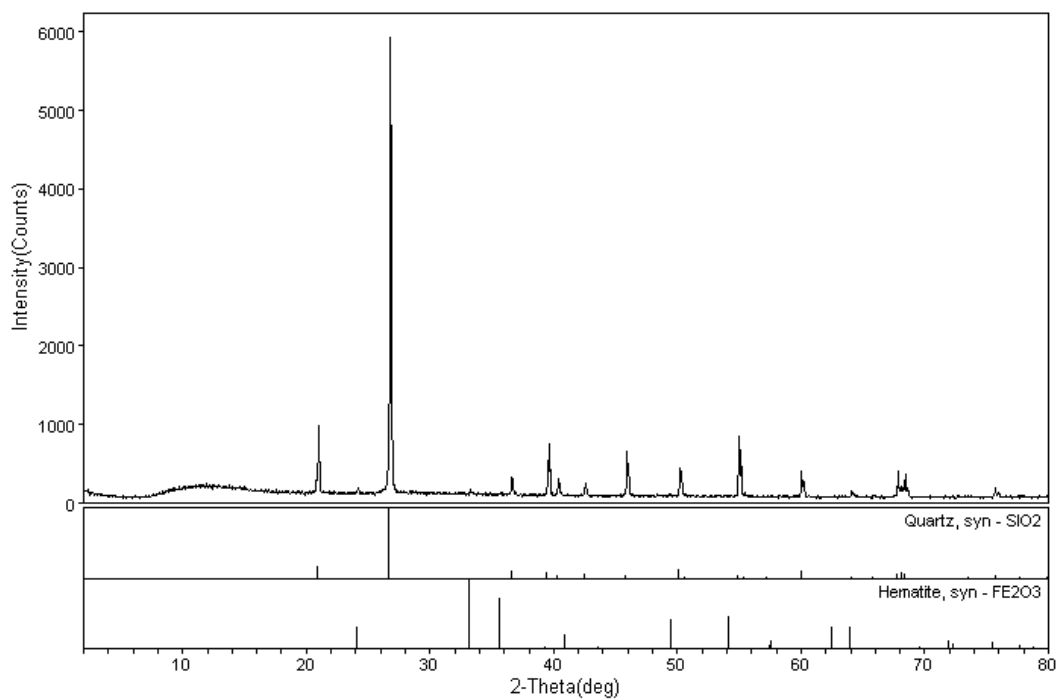


b)

Figura 4.33: Mineralogia da amostra do rejeito SA4: a) fração fina (<math>\% < 0,075\text{ mm}</math>); b) fração grossa (<math>\% > 0,075\text{ mm}</math>).

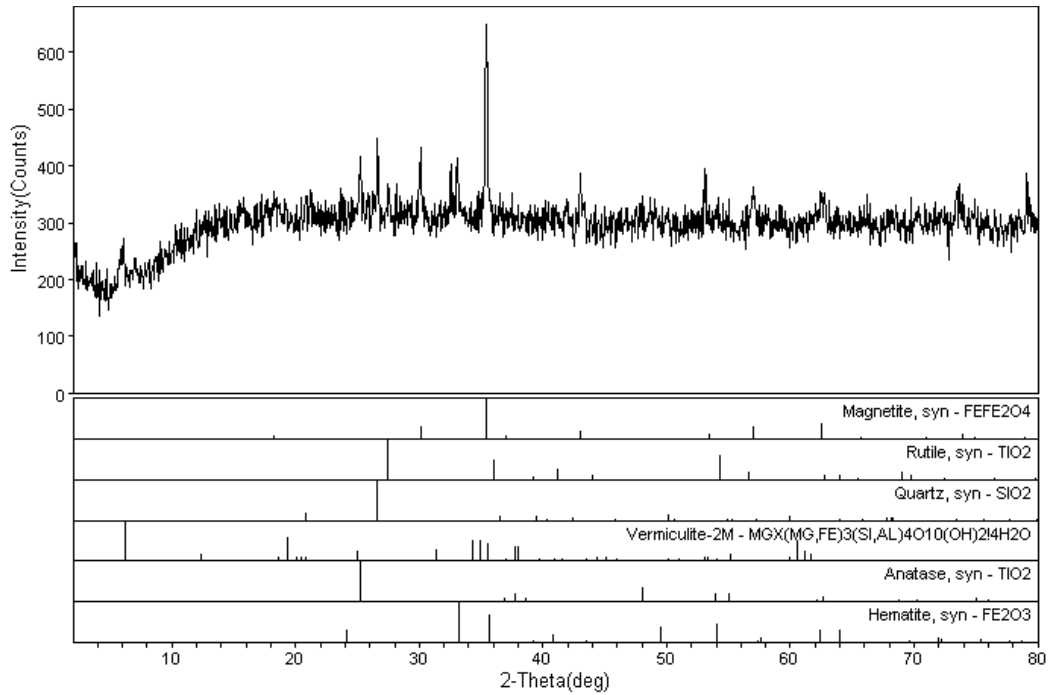


a)

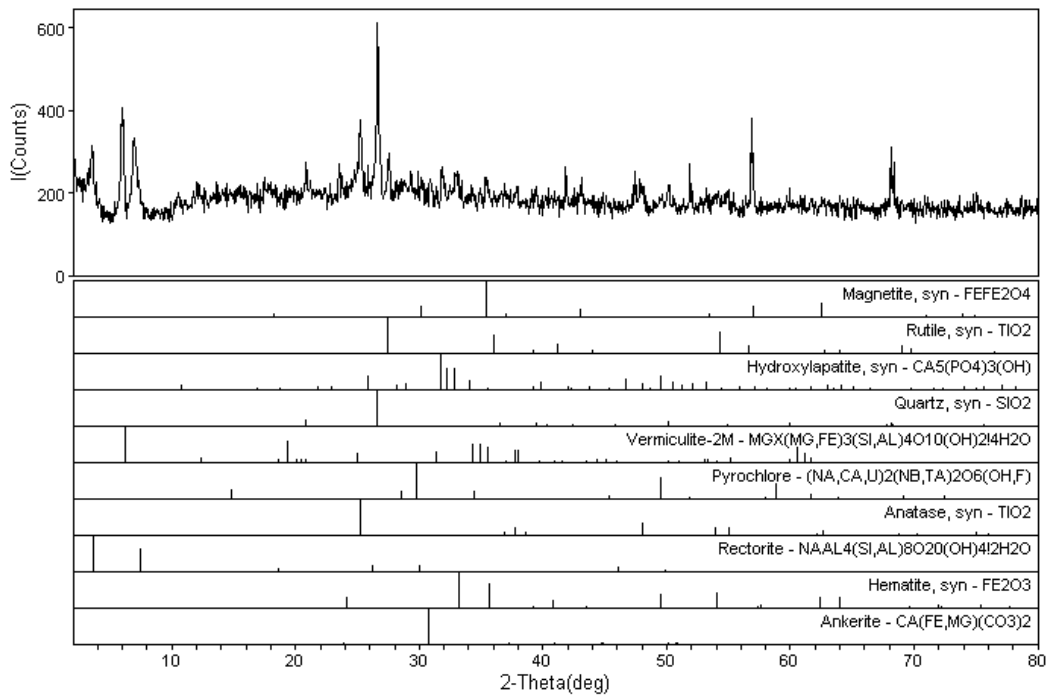


b)

Figura 4.34: Mineralogia da amostra do rejeito SL3: a) fração fina (<math>\% < 0,075 \text{ mm}</math>); b) fração grossa (<math>\% > 0,075 \text{ mm}</math>).



a)



b)

Figura 4.35: Mineralogia da amostra do rejeito FA1: a) fração fina ( $\% < 0,075\text{ mm}$ ); b) fração grossa ( $\% > 0,075\text{ mm}$ ).

Utilizando a  $\rho_s F$  nos cálculos dos resultados do ensaio de sedimentação da amostra SA4 fornece a curva destacada em vermelho na Figura 4.36 (SA4 Fração Fina). Pode-se notar que praticamente não há alteração no resultado obtido com a adequação da massa específica

média dos grãos. Assim, pode-se pressupor que este parâmetro não tem influência marcante nos resultados de ensaios de granulometria tradicionais.

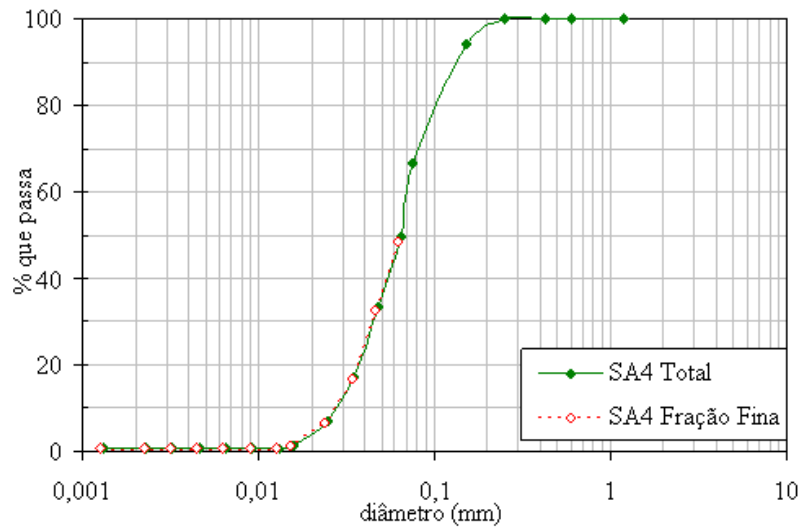


Figura 4.36: Curvas granulométricas dos rejeitos de minério de ferro com e sem a adequação da massa específica média dos grãos.

Nos ensaios de granulometria a laser a massa específica dos grãos não é utilizada na análise dos materiais, tendo em vista que os resultados são dados em termos do volume da amostra ensaiada. As dimensões das partículas são analisadas de forma diferente das demais metodologias, na medida em que o software acoplado ao equipamento para análise das medições reconhece as partículas como esferas de volumes iguais aos medidos para as partículas reais e determina o diâmetro destas. Assim, o diâmetro equivalente obtido na granulometria a laser pode ser mais representativo das partículas analisadas na medida em que é definido com base no volume real das partículas. Na Figura 4.37 são apresentadas as faixas granulométricas determinadas com o granulômetro a laser e as curvas parciais obtidas com os procedimentos tradicionais de peneiramento e sedimentação. Nota-se que há uma distinção entre os resultados obtidos segundo os procedimentos utilizados. No caso da sedimentação esta diferença é mais destacada para a porção mais fina dos materiais ensaiados e aumenta com o teor de finos. Isto pode ser justificado tanto por meio das diferenças teóricas entre a sedimentação e a granulometria a laser como também pelo efeito defloculante provocado. O ultra som utilizado no granulômetro pode ter provocado uma defloculação maior que o defloculante químico utilizado na sedimentação. No caso do peneiramento, apenas a porcentagem retida na malha de 0,075 mm foi utilizada na comparação com os resultados do granulômetro. Em todas as amostras ocorreu uma diferenciação importante entre os resultados obtidos segundo estas duas metodologias. Isto pode ser justificado pela maneira diferente como a geometria das partículas interfere nos resultados.

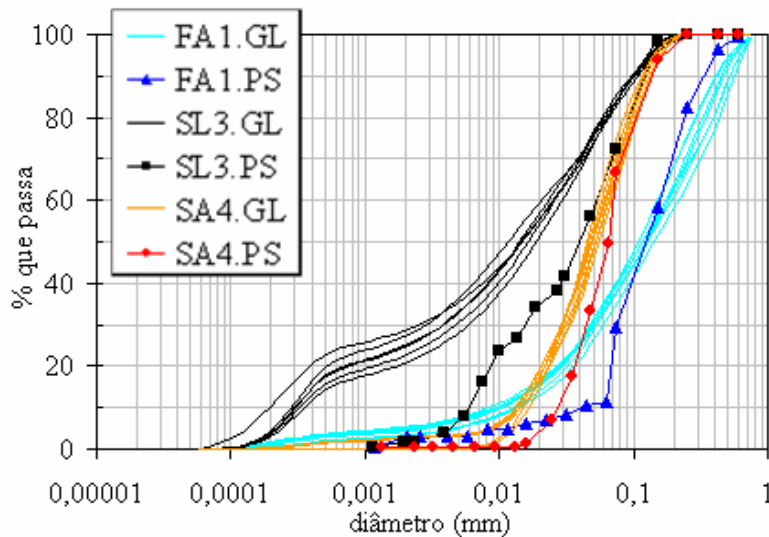


Figura 4.37: Comparação entre os resultados de granulometria a laser e de granulometria por peneiramento e sedimentação.

Também importantes na avaliação dos resultados dos ensaios de filtração e do comportamento dos rejeitos em situações de filtração no campo e também na sua caracterização, algumas propriedades físico-químicas das amostras de rejeito estudadas no GR foram definidas e são apresentadas na Tabela 4.11. Cabe ressaltar o potencial hidrogeniônico (pH) básico das amostras e as respectivas capacidades de troca catiônica (CTC) que favorecem a redução e solubilização de minerais como o ferro solúvel, que também ocorre em concentrações importantes em todas as amostras. O contato destes minerais solubilizados com regiões oxidantes pode propiciar a sua precipitação, podendo levar à colmatação destas regiões e/ou de outras à jusante ao fluxo. Além disso, esta alcalinidade dos rejeitos pode influenciar no comportamento dos geotêxteis estudados, tendo em vista a susceptibilidade ao ataque por soluções alcalinas dos materiais compostos por poliéster.

Tabela 4.11: Propriedades físico-químicas dos rejeitos estudados nos ensaios de GR.

Rejeitos	pH	H+Al (1)	CTC (1)	%Al	%V	s (1)	Na (1)	Ca (1)	Mg (1)	K (1)	C (2)	MO (2)	P (3)	Fe (3)
SA4	8,0	1,1	3,50	0	69	2,40	0,08	2,21	0,1	0,01	3,9	6,7	0,6	75,9
SL3	8,3	1,2	6,15	0	80	4,95	0,34	3,48	1,1	0,03	4,6	7,9	3,4	129,0
FA1	8,6	1,2	9,67	0	88	8,47	0,56	5,94	1,8	0,17	3,6	6,2	85,2	70,9

Notas: (1) valores em  $\text{cmol/dm}^3 = \text{mE}/100\text{ml}$ ; (2) valores em  $\text{g/kg}$ ; (3)  $\text{mg/dm}^3 = \text{ppm}$ ; pH é o potencial hidrogeniônico em água; H+Al corresponde à acidez total; CTC é a capacidade de troca catiônica; %Al é o potencial à saturação por alumínio; %V é o potencial à saturação por bases; s é a soma de cátions trocáveis; Na é o teor de sódio solúvel; Ca é o teor de cálcio solúvel; Mg é o teor de magnésio solúvel; K é o teor de potássio solúvel; C é o teor de carbono orgânico solúvel; MO é o teor de matéria orgânica solúvel; P e o teor de fósforo solúvel; e Fe ferro solúvel.



---

#### 4.6. DISPERSIBILIDADE DOS REJEITOS ESTUDADOS NOS ENSAIOS DE GR

Originalmente criada para a avaliação do comportamento de solos finos, os resultados obtidos com a proposta de Volk (1934), citado por Sherard (1976) para materiais arenosos devem ser analisados com maior rigor. No caso dos rejeitos estudados, apenas a amostra SA4 apresentou potencial de dispersibilidade superior ao mínimo proposto para classificar uma amostra como potencialmente dispersiva. Porém, neste caso, a porcentagem de partículas menores que 0,002 mm é inferior a 5%. Isto faz com que o potencial à dispersibilidade desta amostra, que se apresentou próximo do limite inferior da proposta, tenha influência apenas numa fração muito reduzida da amostra.

Na Tabela 4.12, em que são apresentados os resultados obtidos, pode-se observar que o PD (potencial de dispersão) foi calculado considerando dois diâmetros diferentes como característicos das frações argila das amostras: 0,002 mm e 0,005 mm. Apesar disso, qualitativamente os resultados não sofreram alteração.

Tabela 4.12: Resultados dos ensaios de dispersibilidade (SCS).

Rejeitos	SCS <sup>(1)</sup>		SCS <sup>(2)</sup>	
	PD (%)	Avaliação	PD (%)	Avaliação
SA4	27	Pouco Dispersivo	27	Pouco Dispersivo
SL3	9	Não Dispersivo	14	Não Dispersivo
FA1	5	Não Dispersivo	15	Não Dispersivo

Notas: (1) SCS (ensaio sedimentométrico) avaliado considerando-se porcentagem menor que 0,002 mm de diâmetro; (2) SCS avaliado considerando-se porcentagem menor que 0,005 mm de diâmetro.

#### 4.7. CARACTERIZAÇÃO DOS GEOTÊXTEIS VIRGENS PARA ENSAIOS DE GR

A caracterização dos geotêxteis a serem utilizados nos ensaios de filtração (GR) foi feita a partir de estudos da variabilidade da gramatura das mantas, análises de imagens com a lupa e com o MEV. A variação espacial da sua gramatura foi determinada a partir de amostragem aleatória simples das mantas. A partir da distribuição das gramaturas foram selecionadas amostras representativas, com gramatura próxima da média obtida, para serem empregadas na seqüência dos trabalhos, segundo metodologia proposta por Gardoni (2000). Na Tabela 4.13 são resumidos os resultados obtidos neste estudo.

Tabela 4.13: Caracterização da amostra de geotêxtil exumada.

Amostra	$M_A$ (g/m <sup>2</sup> )	
	$\bar{x}$	$\sigma$
G1	204	17
G2	410	25
G3	627	51

Nota:  $M_A$  corresponde à gramatura.

Algumas amostras virgens coletadas durante a amostragem foram selecionadas para os estudos com a Lupa e com o MEV para servirem de referência e melhorar o entendimento dos resultados dos ensaios de GR. Nas Figuras 4.38 e 4.39 são apresentadas imagens obtidas com estes equipamentos, respectivamente. Nestas imagens pode ser verificada a grande quantidade de poros gerados nas amostras pelo processo de fabricação por agulhamento. Especialmente em ensaios de laboratório como o caso do ensaio de filtração (GR), em que são utilizadas amostras de dimensões relativamente pequenas (10 cm de diâmetro, no caso do GR) para representar o comportamento de toda a manta, estes poros, maiores que os naturalmente gerados no entrelaçamento das fibras, podem ter influência decisiva nos resultados favorecendo a migração de partículas através do geotêxtil. Com o intuito de evitar este efeito amostras com menores quantidades destes poros aparentes (furos de agulha) foram selecionadas para os ensaios de laboratório. Também são claros os seguintes aspectos nas imagens obtidas: distribuição aleatória das fibras; existência de fibras cortadas e/ou danificadas; superfície das fibras praticamente desprovidas de partículas. Estes aspectos auxiliarão nas análises que se seguirão.

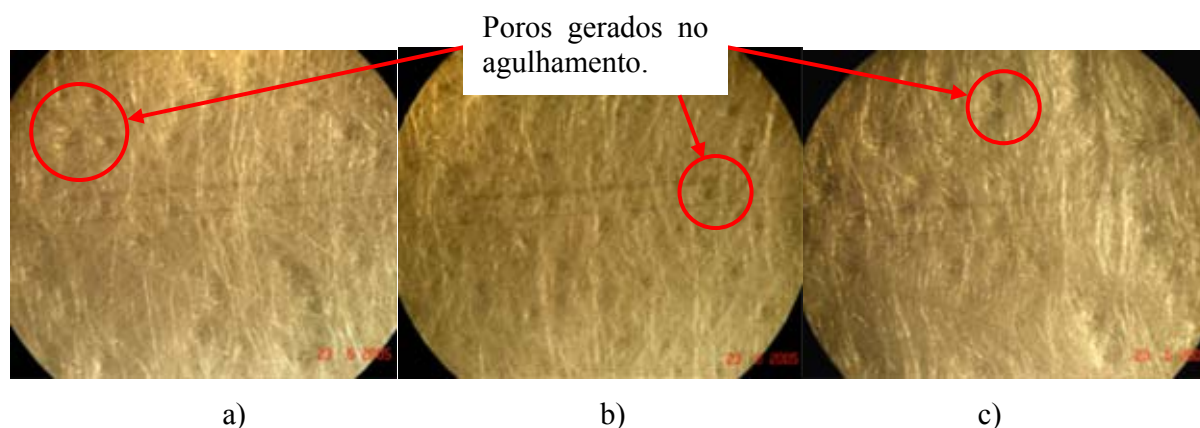
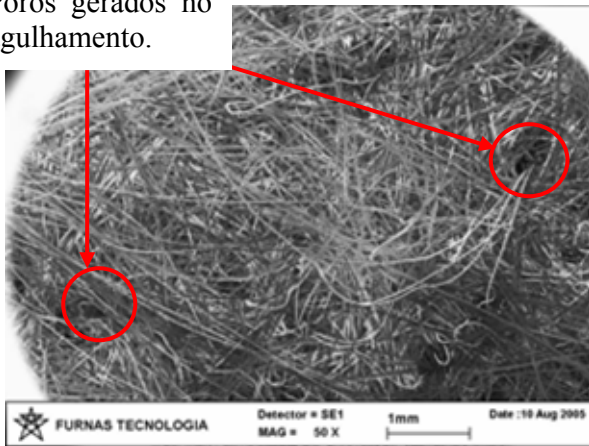
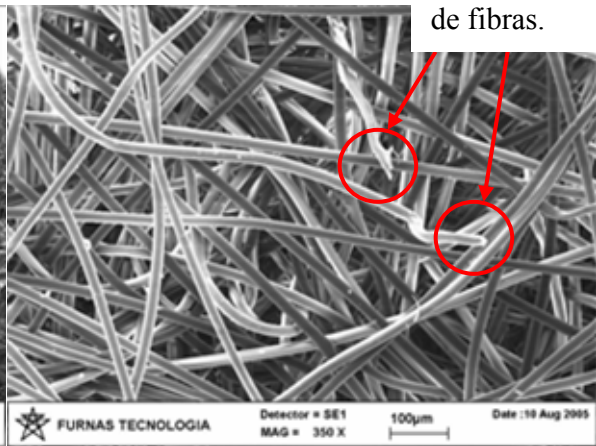


Figura 4.38: Imagens dos geotêxteis virgens obtidas na lupa: a) G1; b) G2; e c) G3.

Poros gerados no agulhamento.

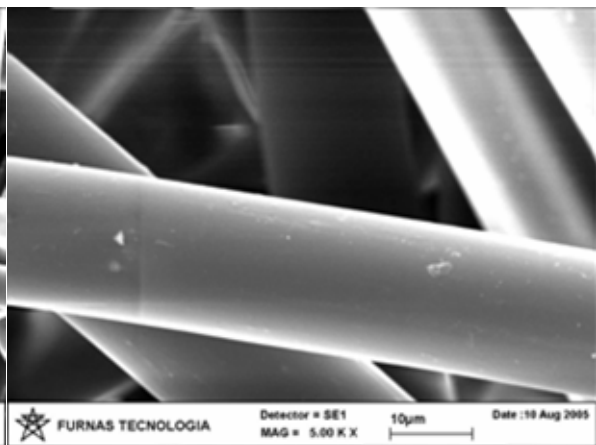
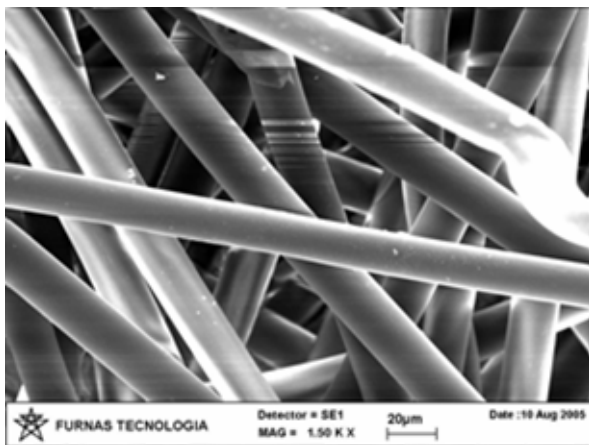


Extremidades de fibras.



a)

b)



c)

d)

Figura 4.39: Imagens dos geotêxteis virgens (RT 21) obtidas no MEV: a) vista geral a 50 X; b) vista geral a 350 X; c) condições das fibras a 1500 X; d) condições das fibras a 5000 X.

## CAPÍTULO 5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE GR, COM $i = 1$ , E ENSAIOS COMPLEMENTARES

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios de filtração do tipo razão entre gradientes (GR), realizados com gradiente hidráulico ( $i$ ) constante e igual a um. Para auxiliar a análise dos resultados, em alguns casos também foram investigadas a granulometria de partículas ao longo do corpo de provas e passantes e retidas no geotêxtil ao longo dos ensaios, além da interação entre as partículas do rejeito e as fibras da amostra têxtil. Nestes estudos foram utilizados um granulômetro a laser, uma lupa e um microscópio eletrônico de varredura (MEV). A mineralogia de algumas partículas retidas no geotêxtil, identificadas no MEV, foi caracterizada por meio de recursos de difratometria de raios X disponível neste mesmo equipamento. Também foi identificado o grau de impregnação da amostras de geotêxtil após cada ensaio.

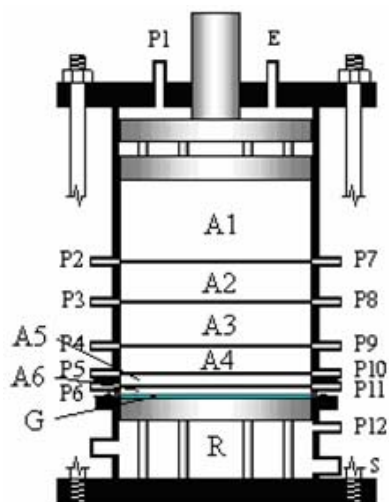
Na Tabela 5.1 são apresentados alguns dados iniciais e finais de caracterização dos sistemas rejeito-geotêxtil estudados. Estes dados também auxiliarão nas análises que se seguirão.

Tabela 5.1: Características iniciais e finais dos sistemas rejeito-geotêxtil estudados nos ensaios de GR com  $i = 1$

Sistema	$i_{\text{total}}^{(5)}$	$\sigma_v^{(6)}$ (kPa)	$e_i^{(1)}$	$e_f^{(2)}$	$H_{Cpi}^{(3)}$ (cm)	$\Delta T^{(4)}$ (dias)	$M_A$ (g/m <sup>2</sup> ) <sup>(7)</sup>	$\lambda^{(8)}$
SAG1	1,0	0 25, 50, 100, 200, 500, 1000 e 2000	0,68	0,65	10,18	3,6	207	2,8
SAG2			0,65	0,64	11,54	3,9	400	2,0
SAG3			0,68	0,63	10,84	2,6	601	1,8
SLG1			0,70	0,59	11,65	8,6	182	2,4
SLG2			0,70	0,56	12,45	8,4	399	0,6
FAG1			0,90	0,79	10,37	8,3	199	2,1
FAG3			0,90	0,76	11,61	5,8	601	0,9

Notas: (1) e (2) são, respectivamente, os índices de vazios inicial e final dos rejeitos nos corpos de prova; (3) é a altura inicial dos corpos de prova; (4) é o tempo de duração dos ensaios em dias; (5) é o gradiente hidráulico total aplicado aos corpos de prova; (6) são os níveis de tensão aplicados aos corpos de prova; (7) é a gramatura dos geotêxteis ensaiados; e (8) é o grau de impregnação dos geotêxteis ao final de cada ensaio.

Na Figura 5.1 é apresentado um esquema típico dos corpos de prova utilizados nos ensaios de GR, o qual será utilizado nas discussões dos resultados de cada ensaio.



Em que:

**P1 a P12** correspondem aos piezômetros do permeâmetro;

**E e S** são a entrada e a saída de água do sistema, respectivamente;

Figura 5.1: Esquema típico do corpo de provas do ensaio de filtração (GR). (modificado – Gardoni, 2000)

## 5.1. ENSAIOS DE FILTRAÇÃO DO TIPO RAZÃO ENTRE GRADIENTES DA AMOSTRA SA4, COM $i = 1$ , E ENSAIOS COMPLEMENTARES

### 5.1.1. ENSAIO DE GR DO SISTEMA SAG1, COM $i = 1$

A condutividade hidráulica ( $k$ ) e a vazão do sistema SAG1 sofreram uma pequena redução ao longo do ensaio, sendo mais pronunciada para carregamentos de até 200 kPa (Figura 5.2 e Figura 5.3). A condutividade hidráulica média do sistema ensaiado ( $k_{1/12}$ ), desde o início foi muito abaixo da condutividade hidráulica calculada para o rejeito SA4 com base nos ensaios de campo (Guelph) e nas propostas de Hazen e Terzaghi. A condutividade hidráulica média da região A6 ( $k_{11/12}$ ) que contém o geotêxtil, sempre abaixo do valor de condutividade hidráulica normal ao plano da manta fornecido pelo fabricante ( $4 \cdot 10^{-1}$ ), sofreu uma redução de mais de dez vezes ao longo do ensaio, com destaque para os estágios de até 200 kPa.

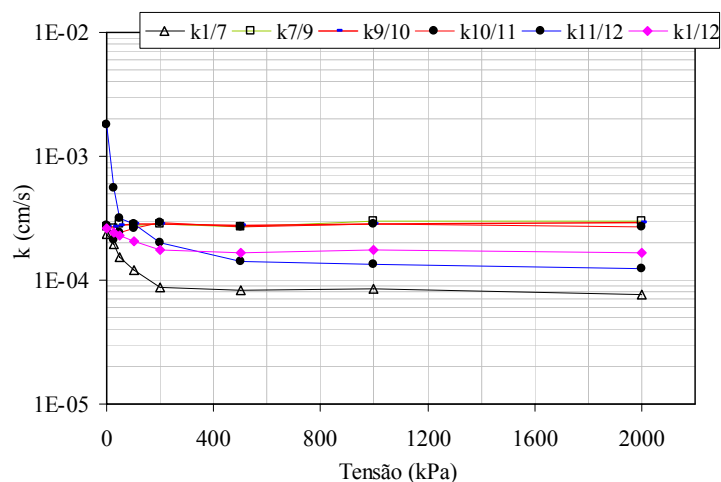


Figura 5.2: Variação da condutividade hidráulica em função do carregamento aplicado, no sistema SAG1.

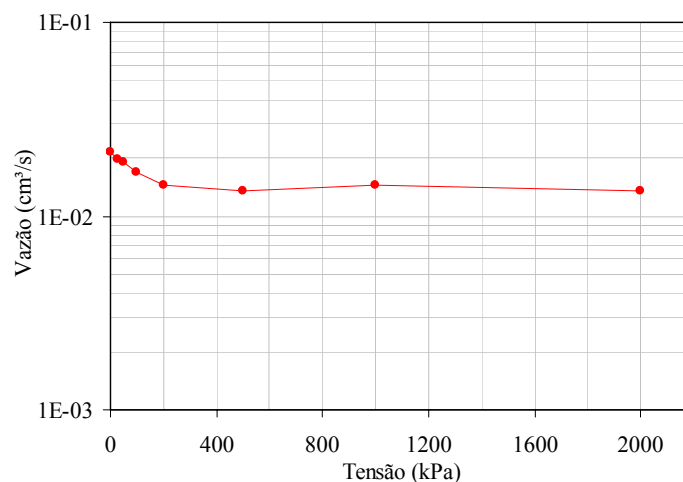


Figura 5.3: Variação da vazão em função do carregamento aplicado, no sistema SAG1.

O comportamento de  $k$  e da vazão pelo sistema SAG1 se refletiu no gradiente hidráulico ( $i$ ) calculado ao longo do corpo de prova, tendo sido observada maior variação também para tensões de até 200 kPa (Figura 5.4).

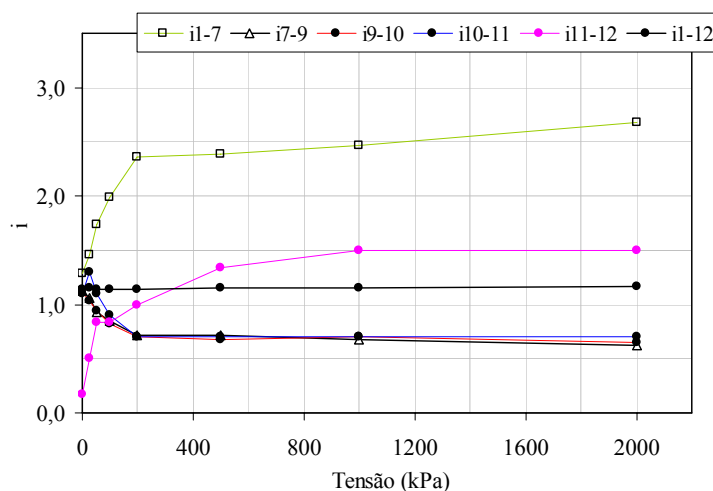


Figura 5.4: Variação do gradiente hidráulico em função do carregamento aplicado, no sistema SAG1.

A variação da altura do sistema SAG1 foi acompanhada durante o ensaio (Figura 5.5). Apesar da observação de continuidade dos recalques para carregamentos superiores a 200 kPa (Figura 5.5), tanto  $k$  quanto a vazão e  $i$  apresentaram-se aproximadamente constantes para estes estágios. Isto indica a possibilidade de associação de parte destes recalques à perda de partículas do corpo de prova através geotêxtil.

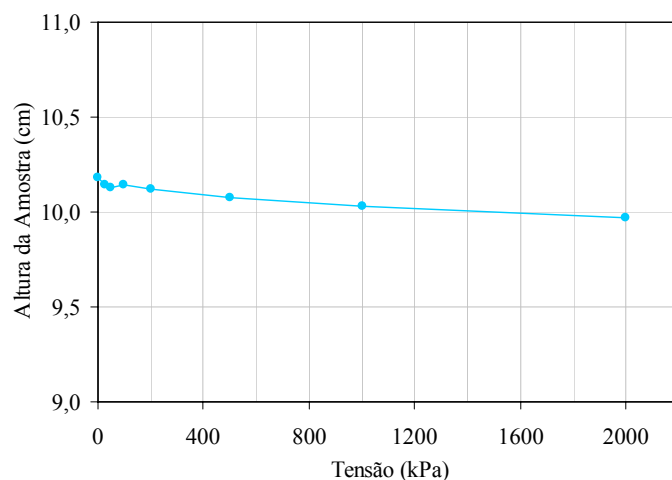


Figura 5.5: Variação da altura do corpo de provas em função do carregamento aplicado, no sistema SAG1.

A avaliação da variação da carga hidráulica em função do carregamento aplicado (Figura 5.6) indica que, no início do ensaio, prevaleceu uma condição de homogeneidade no corpo de provas, exceto nas regiões mais próximas do geotêxtil (A5 e A6). Ao longo do ensaio, porém, passou a ocorrer uma maior perda de carga na região A1, o que pode ser justificado por uma maior compactação desta região diante dos carregamentos aplicados como também pelo entupimento parcial dos furos da placa perfurada, por partículas da amostra, por meio da qual são aplicados os carregamentos e o fluxo ao corpo de provas. Uma pequena distinção do comportamento geral do corpo de provas também pode ser observada nos piezômetros P10 e P11 (Figura 5.6).

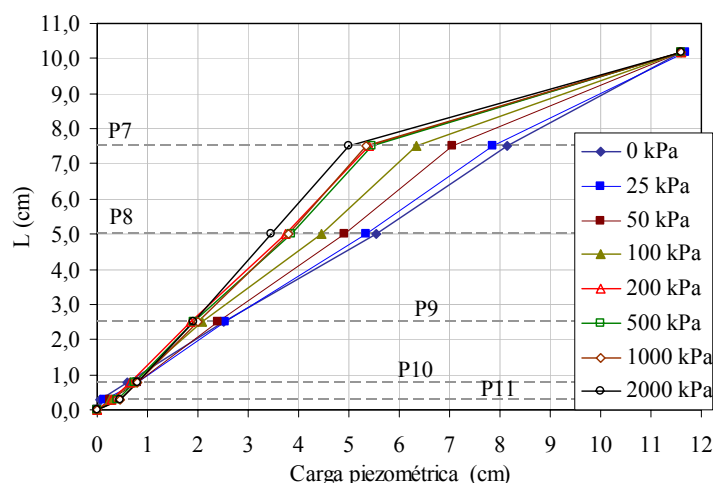


Figura 5.6: Variação da carga hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SAG1.

O comportamento da carga hidráulica se reflete na variação de  $k$  e de  $i$  ao longo do corpo de provas, para cada estágio de carregamento. Dois comportamentos distintos podem ser observados nas Figuras 5.7 e 5.8. Nas regiões mais próximas das fronteiras inferior e superior (A1 e A6), após o primeiro estágio (0kPa) em que a maior condutividade hidráulica de A6 indica a possibilidade perda de partículas desta região através do geotêxtil, há uma redução da condutividade hidráulica, e conseqüente aumento de gradiente hidráulico, em função do carregamento, enquanto nas demais regiões (A2 a A5) a condutividade hidráulica permanece praticamente constante, sendo mais notável a redução de gradiente hidráulico que chegou a aproximadamente 50% ao final do ensaio. Além disso, a forma especialmente das curvas de gradiente hidráulico apresentadas na Figura 5.8 indicam a possibilidade de migração de partículas em direção ao geotêxtil. Este fenômeno deve ser verificado por meio de determinações da granulometria do rejeito ao longo do corpo de provas, uma vez que também pode ser justificado pela maior compressão da amostra de geotêxtil em função dos carregamentos aplicados em relação ao restante do sistema ensaiado. Aparentemente, a migração de partículas foi um fenômeno localizado, se limitando às regiões mais próximas do geotêxtil (A5 e A6).

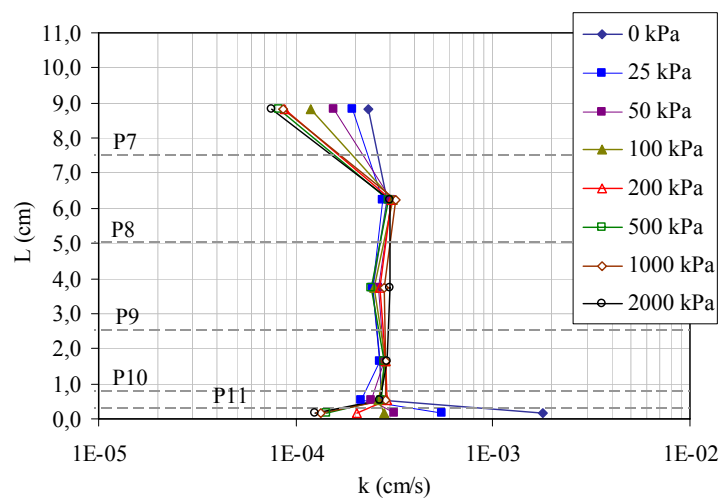


Figura 5.7: Variação da condutividade hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SAG1.



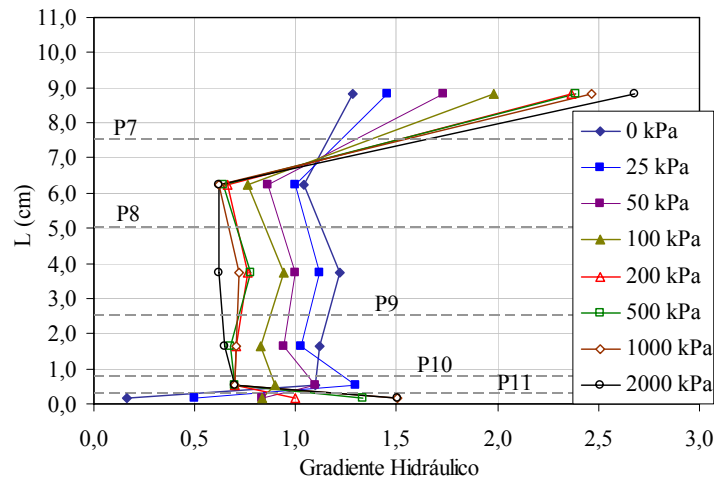


Figura 5.8: Variação do gradiente hidráulico ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SAG1.

Os resultados obtidos por meio das propostas de avaliação da razão entre gradientes analisadas neste trabalho ( $GR_{ASTM}$ ,  $GR_{Mod}$  e  $GR_{3mm}$ ) são apresentadas na Figura 5.9. De forma coerente com os resultados dos demais parâmetros analisados, as maiores variações dos valores de GR ocorreram para tensões de até 200 kPa. No primeiro estágio de carregamento (0 kPa) os valores de GR estavam abaixo da unidade, indicando que durante este e/ou a montagem do ensaio possa ter ocorrido perda de partículas das regiões mais próximas do geotêxtil. A partir do estágio de 200 kPa o gradiente hidráulico na região mais próxima do geotêxtil (i11/12) passou a atingir valores superiores ao da região central do corpo de prova. Neste caso, o  $GR_{3mm}$  possibilitou identificar que a região mais influenciada pelo geotêxtil era mais restrita que o informado pelas demais propostas de GR.

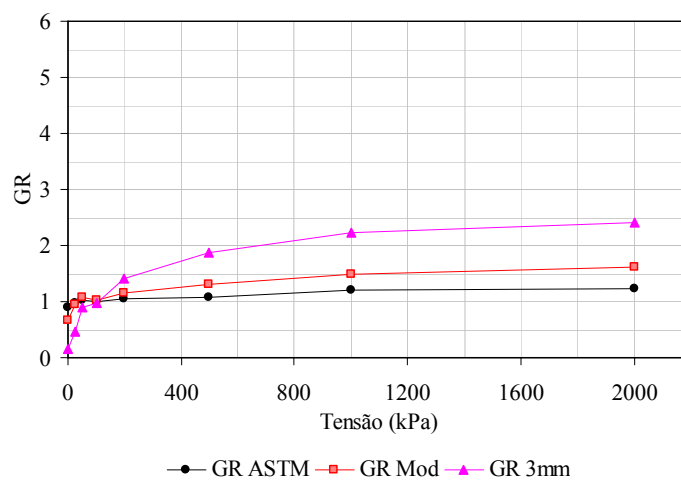


Figura 5.9: Variação da razão entre gradientes em função do carregamento aplicado, no sistema SAG1.

No geral, destaque deve ser dado para a importante redução de  $k_{11/12}$  ao longo do ensaio, caracterizada inclusive nos valores acima de 2 observados para o  $GR_{3mm}$ . Porém, apesar disso, o comportamento hidráulico do sistema SAG1 não sofreu grandes alterações diante das condições de fluxo e carregamento mecânico a ele aplicadas. Os estudos complementares apresentados a seguir auxiliarão nestas interpretações.

### 5.1.2. ENSAIOS COMPLEMENTARES AO GR DO SISTEMA SAG1, COM $i = 1$

Foram coletadas partículas passantes pelo geotêxtil após cada estabilização dos parâmetros hidráulicos acompanhados no ensaio de GR do sistema SAG1, com  $i = 1$ . A granulometria destas partículas foi determinada com auxílio do granulômetro a laser. Na Figura 5.10 são apresentadas as curvas obtidas para os materiais coletados e a do rejeito estudado (SA4.GL), para comparação. Pode-se notar que a granulometria das partículas coletadas antes da aplicação do fluxo (SAG1.AT) e após cada estágio de carregamento (SAG1.0kPa a SAG1.2000kPa) está dentro da faixa de variação natural do rejeito, obtida em laboratório. A curva das partículas coletadas após o término do ensaio (SAG1.AP) indica que o procedimento de coleta de partículas ao longo do ensaio foi satisfatório, uma vez que permitiu a coleta daquelas de maior diâmetro. A granulometria das partículas retidas no interior do geotêxtil (SAG1.IG) mostra que foi retida principalmente a fração mais grossa do rejeito estudado. A análise destes resultados em confronto com a faixa de variação da abertura de filtração fornecida pelo fabricante do geotêxtil (0,13 a 0,23 mm) permite a verificação de que partículas de diâmetro equivalente contido neste intervalo foram retidas no interior da malha têxtil, enquanto partículas um pouco mais finas passaram por ela e foram coletadas ao longo e ao final do ensaio de GR.

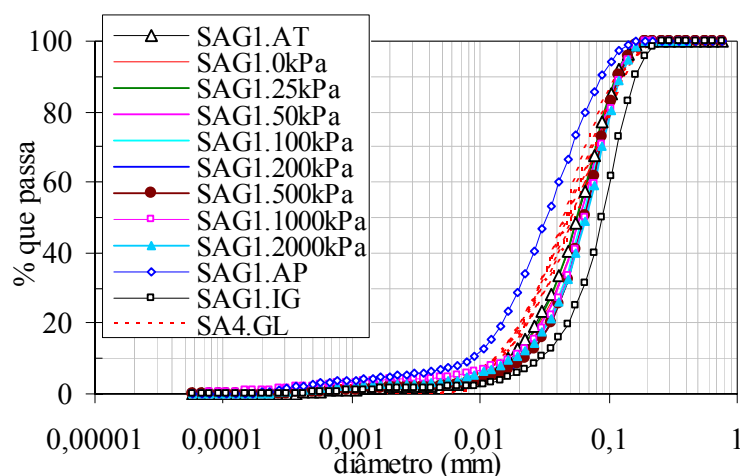


Figura 5.10: Granulometria das partículas que se relacionaram diretamente com o geotêxtil no ensaio de GR do sistema SAG1.

---

A visualização da amostra do geotêxtil G1, coletada no ensaio de GR, com a lupa permitiu a identificação da condição das fibras posicionadas na sua superfície (Figura 5.11). Puderam ser identificados alguns furos aparentes provocados pelo processo de fabricação por agulhamento da manta têxtil. Além disso, a coloração das fibras indica a pouca ocorrência de partículas finas de hematita lhas revestindo.

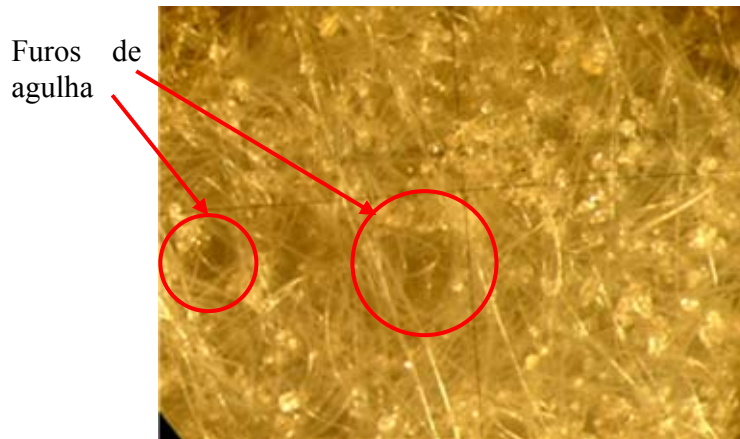


Figura 5.11: Imagem superficial do G1 coletado após o ensaio de GR do sistema SAG1.

### 5.1.3. ENSAIO DE GR DO SISTEMA SAG2, COM $i=1$

Os resultados obtidos na avaliação do comportamento do sistema SAG2 mostram que ocorreu maior variabilidade dos parâmetros hidráulicos analisados para tensões de até 100 kPa, especialmente para as regiões do corpo de provas mais distantes das fronteiras inferior e superior (A2, A3 e A4). A condutividade hidráulica média e a vazão do sistema SAG2 sofreram pequena redução ao longo do ensaio (Figura 5.12 e Figura 5.13) e o gradiente hidráulico acompanhou este comportamento (Figura 5.14). O comportamento das regiões A5 e A6 merece ser destacado. No final do primeiro estágio de carregamento (0 kPa) estas regiões apresentaram a maior e a menor  $k$  observada ao longo do corpo de prova, respectivamente. Isto indica a possibilidade migração de partículas da região A5 para A6. Porém esta migração aparentemente é um fenômeno localizado, possivelmente provocado pela heterogeneidade inicial do corpo de prova obtida no processo de montagem do ensaio, uma vez que as demais regiões apresentaram comportamento praticamente estável.

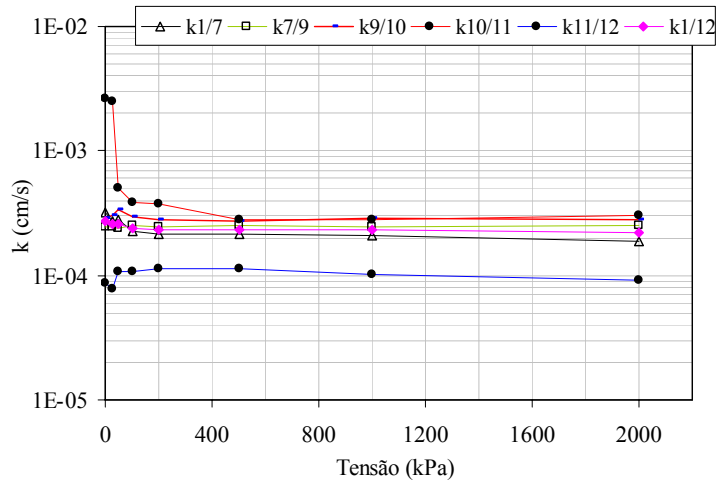


Figura 5.12: Variação da condutividade hidráulica em função do carregamento aplicado, no sistema SAG2.

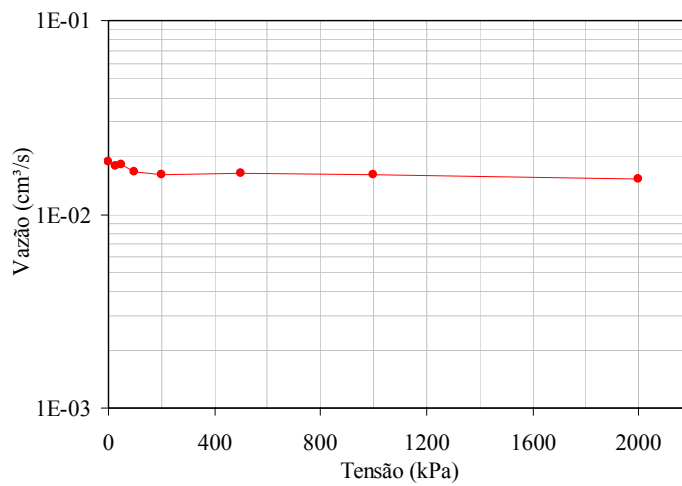


Figura 5.13: Variação da vazão em função do carregamento aplicado, no sistema SAG2.

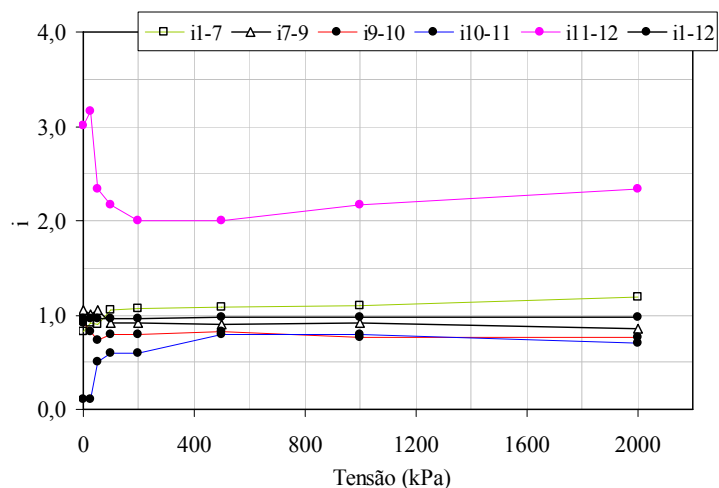


Figura 5.14: Variação do gradiente hidráulico em função do carregamento aplicado, no sistema SAG2.

A variação da altura do corpo de provas durante o ensaio permitiu a verificação da continuidade dos recalques para tensões superiores a 100 kPa (Figura 5.15), em contraposição ao desempenho dos parâmetros hidráulicos já analisados que se mantiveram praticamente constantes após este estágio.

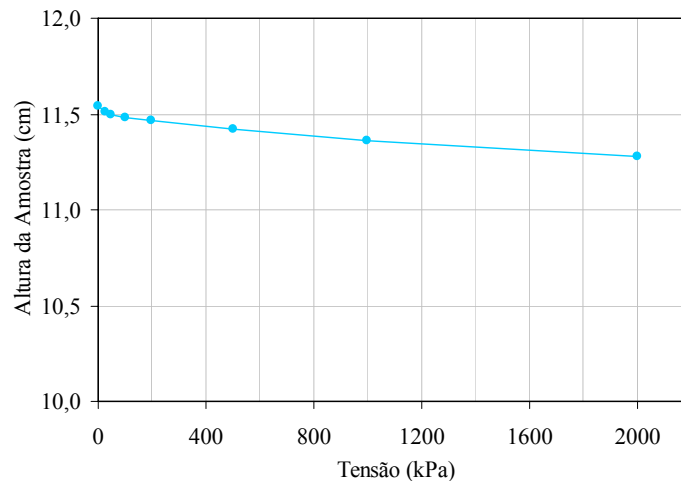


Figura 5.15: Variação da altura do corpo de provas em função do carregamento aplicado, no sistema SAG2.

Na avaliação da variação da carga hidráulica ao longo do corpo de provas (Figura 5.16) pode-se notar que no início do ensaio prevalecia uma condição de homogeneidade no sistema SAG2, exceto nas regiões mais próximas do geotêxtil (A5 e A6). À medida que foram aplicados os estágios de carregamento o comportamento do corpo de provas se manteve praticamente constante.

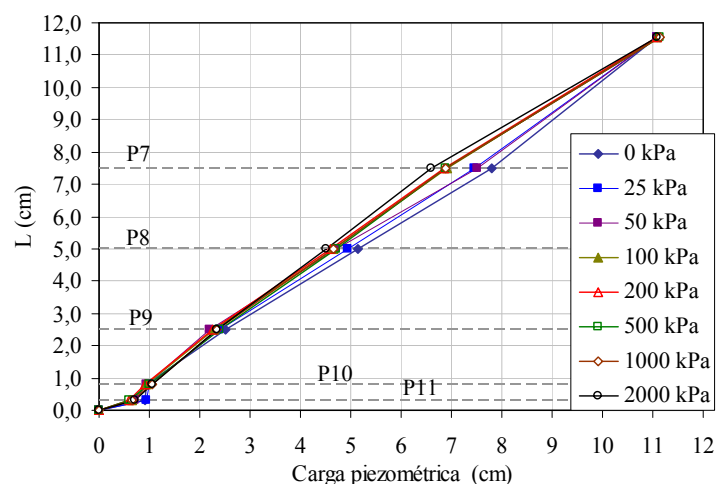


Figura 5.16: Variação da carga hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SAG2.

O comportamento da carga hidráulica durante o ensaio também pode ser notada na avaliação de  $k$  e  $i$  ao longo do corpo de provas. As maiores variações ocorreram nas regiões próximas à

fronteira drenante (A5 e A6). Nas Figuras 5.17 e 5.18 pode-se notar que a condutividade hidráulica do sistema sofreu sua maior redução entre os carregamentos de 25 e 50 kPa, a qual se refletiu no maior aumento também do gradiente hidráulico, especialmente na região A5. Como esta região terminou o primeiro estágio de carregamento (0 kPa) com a maior  $k$  do sistema, conclui-se que a variação mais abrupta dos parâmetros analisados pode ter sido provocada tanto pelos carregamentos aplicados quanto pela migração de partículas para esta região. Em contrapartida, o aumento do gradiente hidráulico na região A6 indica a possibilidade de que parte das partículas perdidas, especialmente no primeiro estágio do ensaio, pela região A5 tenha sido retida nesta. Deve-se ressaltar novamente que a possível migração de partículas identificada é um fenômeno localizado, não havendo indícios da sua generalização ao longo do corpo de provas.

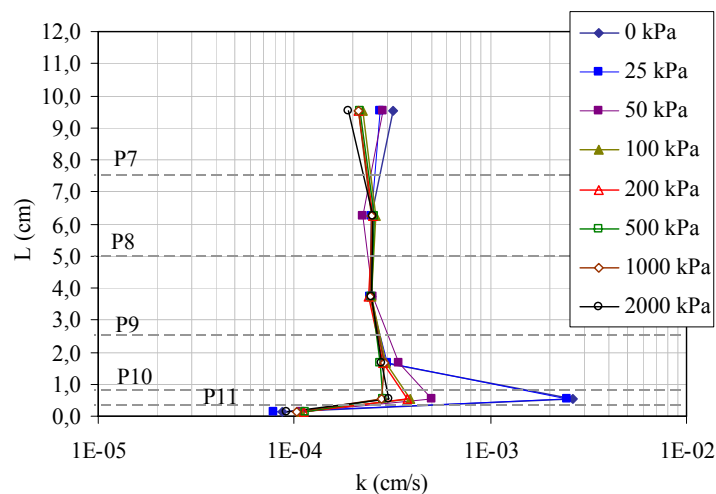


Figura 5.17: Variação da condutividade hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SAG2.

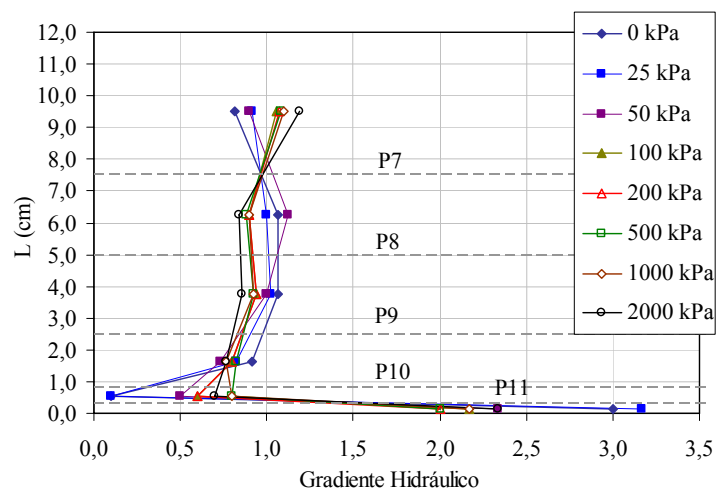


Figura 5.18: Variação do gradiente hidráulico ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SAG2.

De forma coerente com os resultados dos demais parâmetros hidráulicos, as maiores variações dos valores obtidos de GR ocorreram para tensões de até 100 kPa (Figura 5.19). O GR<sub>3mm</sub> ter alcançado valores próximos de 3,0 (três) chama a atenção para os elevados gradientes hidráulicos ocorrentes na região A6. Apesar disso, a condutividade hidráulica do sistema sofreu pouca variação ao longo do ensaio. Na seção seguinte são apresentados resultados de ensaios complementares ao GR que auxiliarão nas análises destes resultados.

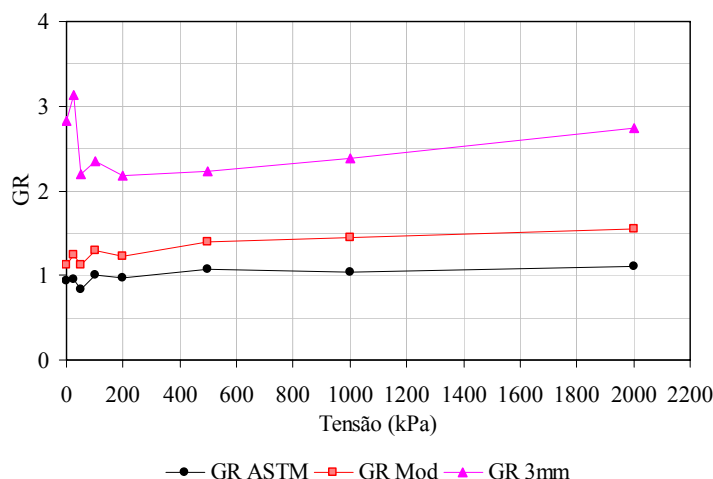


Figura 5.19: Variação da razão entre gradientes em função do carregamento aplicado, no sistema SAG2.

#### 5.1.4. ENSAIOS COMPLEMENTARES AO GR DO SISTEMA SAG2, COM $i=1$

Foram coletadas partículas passantes pelo geotêxtil após cada estágio de carregamento (SAG2.0kPa a SAG2.2000kPa) e após o término do ensaio (SAG2.AP), além daquelas retidas no interior do geotêxtil (SAG2.IG). A análise das curvas apresentadas na Figura 5.20 mostra resultados bastante semelhantes aos obtidos para o sistema SAG1. O procedimento de coleta de partículas utilizado teve, novamente, desempenho satisfatório. A granulometria das partículas coletadas está dentro da faixa de variação natural do rejeito, obtida em laboratório, enquanto as coletadas após o término do GR são mais finas e as que foram retidas no interior do geotêxtil têm maior quantidade de partículas grossas. Porém, a interpretação destes resultados leva a conclusões distintas às obtidas para o sistema SAG1. É que a faixa de variação da abertura de filtração do geotêxtil G2 fornecida pelo fabricante (0,09 a 0,16 mm) limita diâmetros inferiores aos de algumas partículas impregnadas no geotêxtil, identificadas na curva SAG2.IG. Isto indica que as condições de carregamento e fluxo aplicadas ao sistema SAG2 podem ter forçado a infiltração destas partículas na malha têxtil.

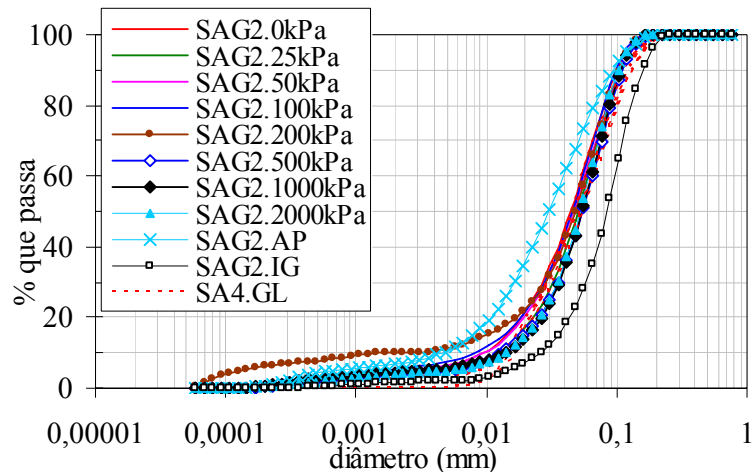


Figura 5.20: Granulometria das partículas que se relacionaram diretamente com o geotêxtil no ensaio de GR do sistema SLG2.

A visualização da amostra do geotêxtil G2 coletada no ensaio de GR com a lupa permitiu a identificação da condição das fibras posicionadas na sua superfície (Figura 5.21). Novamente a coloração das fibras indica a pouca ocorrência de partículas finas de hematita lhes revestindo. Esta observação é comprovada na Figura 5.22, obtida com o MEV. Na Figura 5.22c foi identificado um grão maior que os poros adjacentes no interior da malha têxtil. Já na Figura 5.22d se pode observar partículas retidas no interior da malha têxtil.

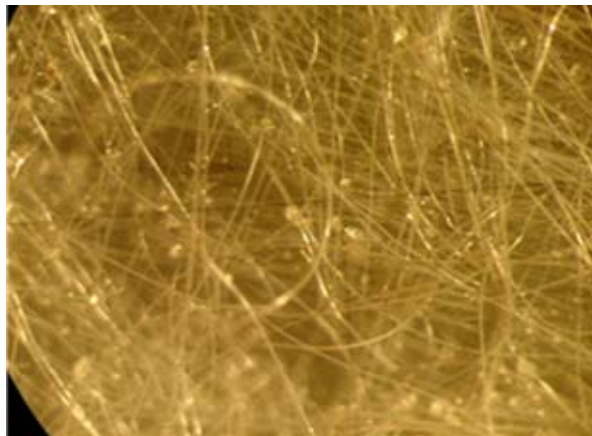


Figura 5.21: Imagem superficial do G2 coletado após o ensaio de GR do sistema SAG2.



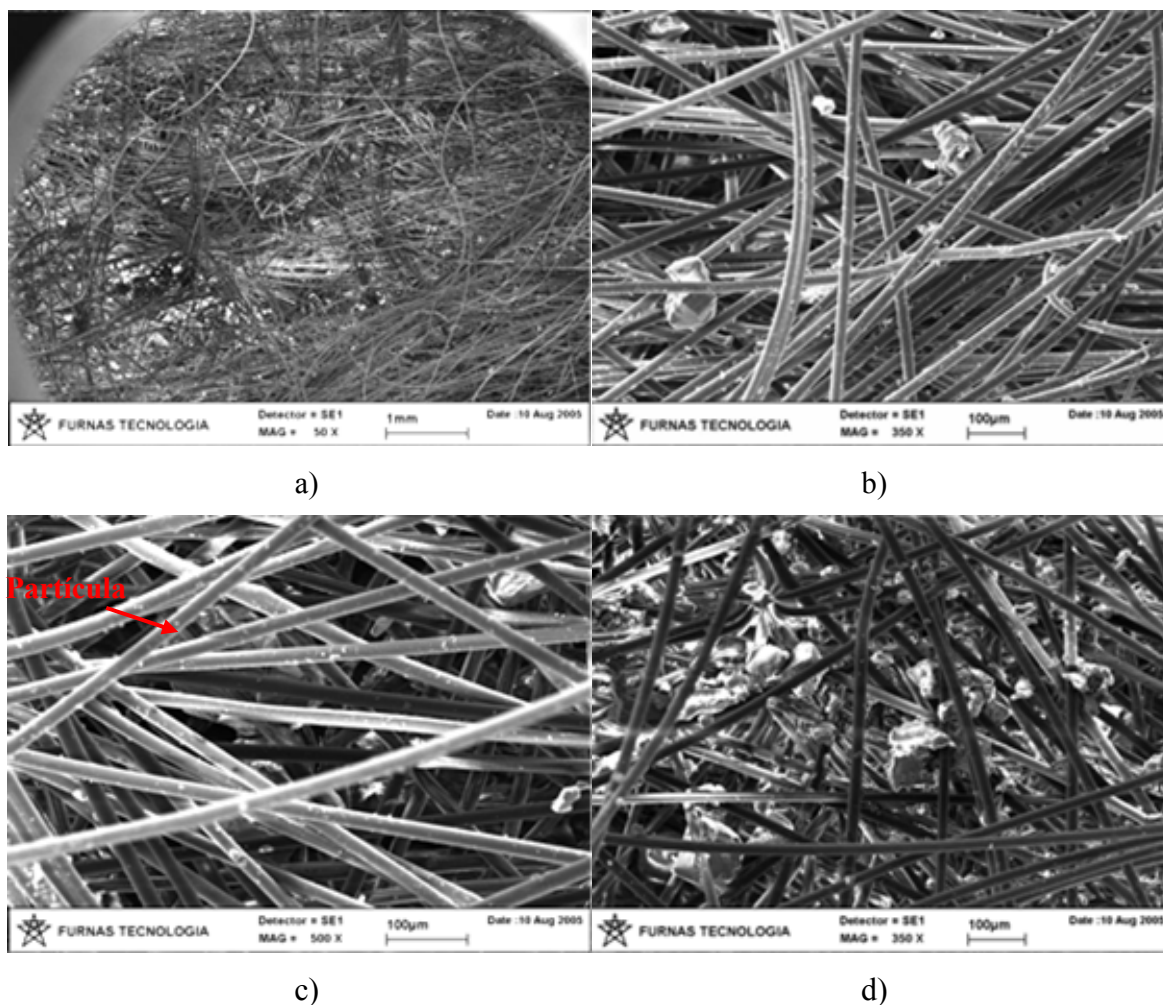


Figura 5.22: Imagens de MEV do geotêxtil do ensaio de GR com o sistema SAG2: a) vista geral da amostra; b) fibras da amostra; c) partícula maior que os poros adjacentes; e d) partículas no interior do geotêxtil.

#### 5.1.5. ENSAIO DE GR DO SISTEMA SAG3, COM $i = 1$

Os resultados obtidos para o sistema SAG3 mostram um comportamento aproximadamente constante ao longo do ensaio, exceto para a região A6 em que se pode observar uma maior variação dos parâmetros analisados para tensões de até 200 kPa. Porém, após este estágio de carregamento inclusive esta região assumiu o comportamento médio do sistema ensaiado. Nas Figuras 5.23, 5.24 e 5.25 são apresentados os resultados obtidos para a variação da condutividade hidráulica, da vazão e do gradiente hidráulico em função dos carregamentos aplicados.

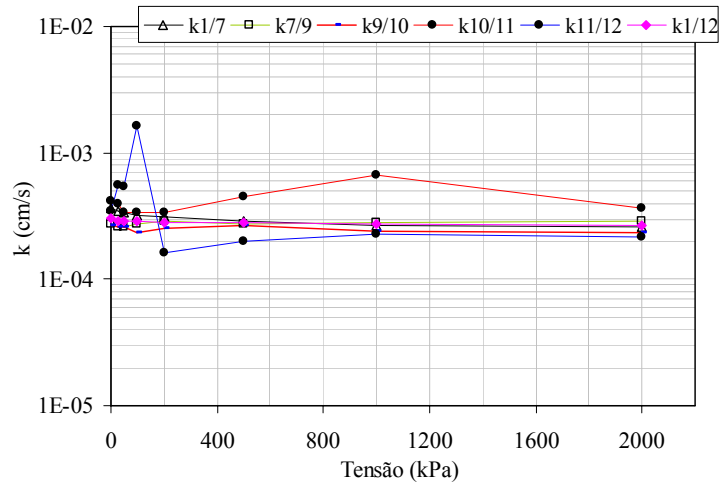


Figura 5.23: Variação da condutividade hidráulica em função do carregamento aplicado, no sistema SAG3.

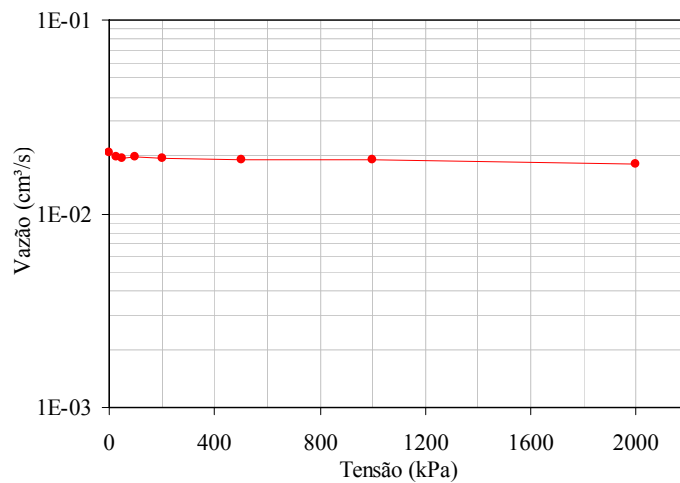


Figura 5.24: Variação da vazão em função do carregamento aplicado, no sistema SAG3.

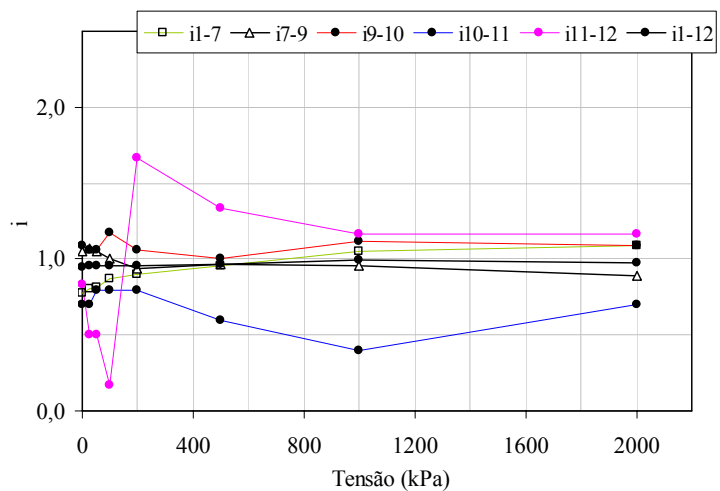


Figura 5.25: Variação do gradiente hidráulico em função do carregamento aplicado, no sistema SAG3.

---

A pouca variação dos parâmetros hidráulicos também pode ser reflexo da reduzida variação da altura do corpo de provas em função dos carregamentos aplicados (Figura 5.26).

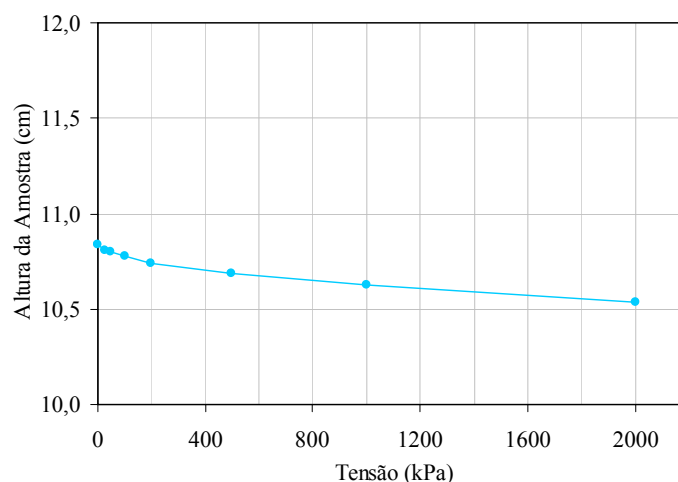


Figura 5.26: Variação da altura do corpo de provas em função do carregamento aplicado, no sistema SAG3.

A carga hidráulica ao longo do sistema SAG3 se mostrou a mais homogênea entre os ensaios de GR com o rejeito SA4. Além disso, ela se mostrou aproximadamente constante ao longo de todo o ensaio (Figura 5.27). Este comportamento se refletiu na variação de  $k$  e de  $i$  ao longo do corpo de provas. As maiores variações ocorreram próximo ao geotêxtil (A5 e A6). Porém, um fenômeno diferente dos observados até aqui ocorreu com o sistema SAG3. A condutividade hidráulica da região A6 ( $k_{11/12}$ ) experimentou um aumento para tensões de até 100 kPa, seguido de uma redução brusca no estágio de 200 kPa (Figura 5.28). Para os estágios seguintes também foi observado um aumento de  $k_{11/12}$ . Avaliando estes resultados conjuntamente com a variação do gradiente hidráulico ao longo do corpo de prova (Figura 5.29), nota-se a possibilidade de migração de partículas através do geotêxtil especialmente para tensões de até 100 kPa. Esta migração pode ter levado a um aumento da porosidade na região A6 que sofreu um recalque abrupto ao ser aplicada a tensão de 200 kPa. A migração de partículas pode ter continuado nos estágios seguintes do ensaio.

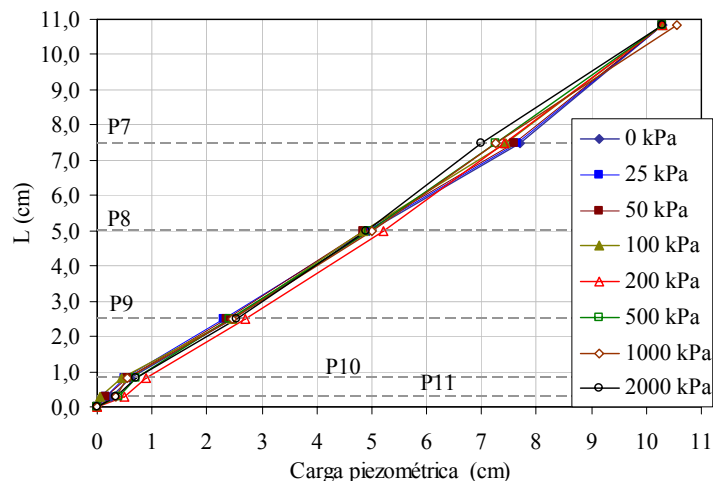


Figura 5.27: Variação da carga hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SAG3.

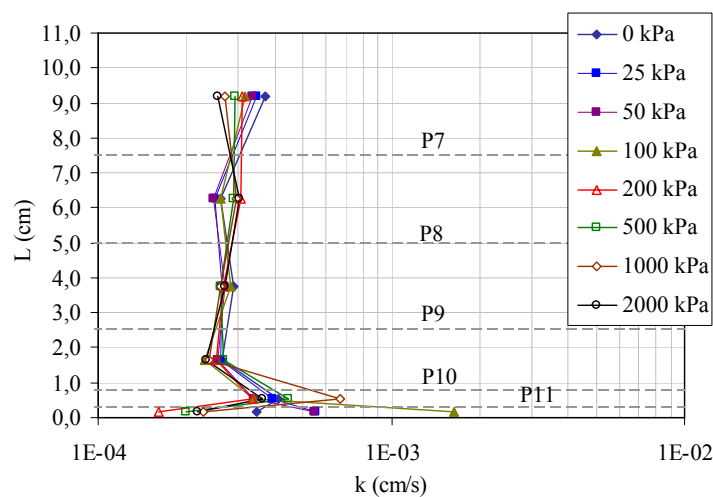


Figura 5.28: Variação da condutividade hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SAG3.

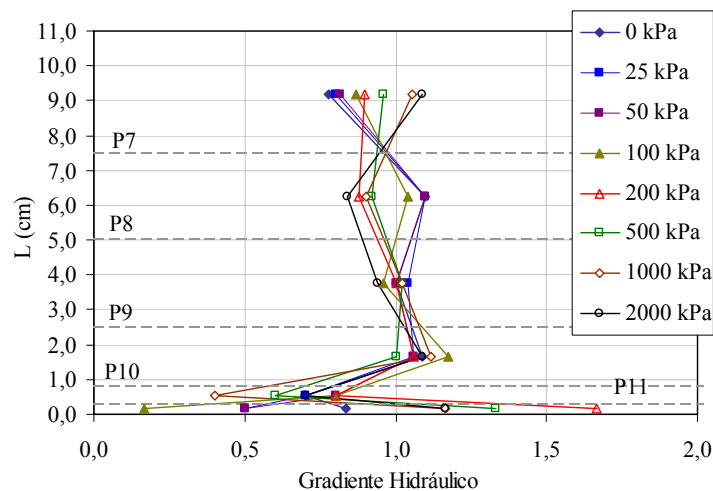


Figura 5.29: Variação do gradiente hidráulico ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SAG3.

As maiores variações dos valores obtidos de GR ocorreram para tensões de até 200 kPa. Na Figura 5.30 pode-se observar que ao final do ensaio as regiões próximas do geotêxtil tiveram um comportamento bastante semelhante, sendo observados valores de GR próximos da unidade para todas as propostas analisadas.

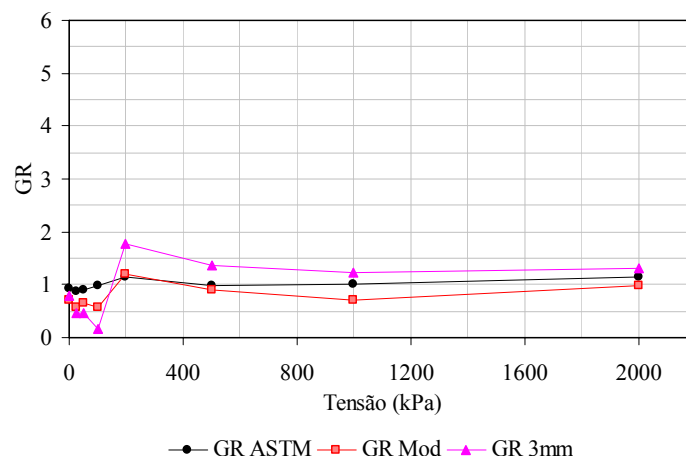


Figura 5.30: Variação da razão entre gradientes em função do carregamento aplicado, no sistema SAG3.

#### 5.1.6. ENSAIOS COMPLEMENTARES AO GR DO SISTEMA SAG3, COM $i=1$

O procedimento de coleta de partículas utilizado teve, novamente, desempenho satisfatório. A granulometria das partículas coletadas ao longo do ensaio de GR do sistema SAG3 é semelhante às obtidas para os demais ensaios de GR realizados com o rejeito SA4 e gradiente hidráulico total unitário (Figura 5.31). Porém, a interpretação dos resultados permitiu a identificação de partículas maiores que a faixa de abertura de filtração do geotêxtil G3, fornecida pelo fabricante, impregnadas no interior da amostra têxtil ensaiada. Novamente, isto pode ser encarado como um indicativo de que as condições de carregamento e fluxo aplicadas ao corpo de provas tenham forçado a infiltração destas partículas na malha têxtil. Os valores de GR (Figura 5.30) estudados, porém, mostram que o sistema SAG3 se comportou de forma estável (GR aproximadamente igual a 1) para carregamentos superiores a 200 kPa. O grau de impregnação observado ao final do ensaio (1,77), menor que as demais amostras ensaiadas com este mesmo rejeito, indica que apesar de maiores em diâmetro, as partículas impregnaram o geotêxtil em menor quantidade. Isto pode ter permitido o bom desempenho do sistema no ensaio de GR, tendo ocorridos valores de GR próximos da unidade.

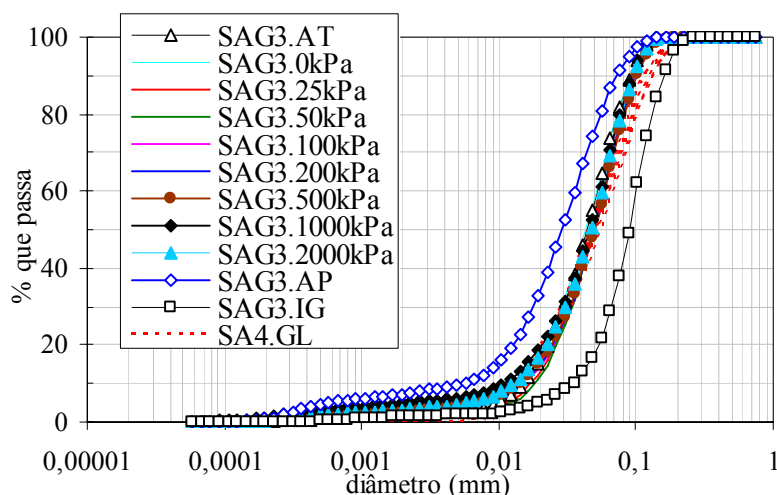


Figura 5.31: Granulometria das partículas que se relacionaram diretamente com o geotêxtil no ensaio de GR do sistema SAG3.

A visualização da amostra do geotêxtil G3 com a lupa (Figura 5.32) identificou uma grande quantidade de partículas retidas na sua superfície.

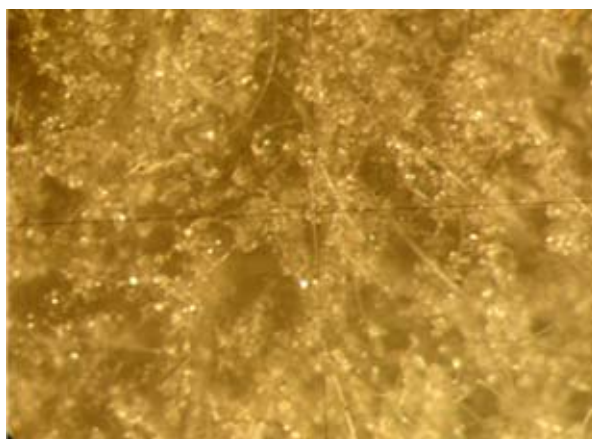


Figura 5.32: Imagem superficial do G3 coletado após o ensaio de GR do sistema SAG3.

## 5.2. ENSAIOS DE FILTRAÇÃO DO TIPO RAZÃO ENTRE GRADIENTES DA AMOSTRA SL3, COM $i = 1$ , E ENSAIOS COMPLEMENTARES

### 5.2.1. ENSAIO DE GR DO SISTEMA SLG1, COM $i = 1$

Os resultados obtidos mostram uma heterogeneidade no comportamento do sistema SLG1 ao final do primeiro estágio de carregamento, que se manteve no decorrer do ensaio. Nas Figuras 5.33, 5.34 e 5.36 se pode notar que a condutividade hidráulica ( $k$ ) e a vazão pelo corpo de prova variaram de forma bastante semelhante à altura do corpo de prova, tendo sido desenvolvidos gradientes hidráulicos ( $i$ ) aproximadamente constantes (Figura 5.35). Isto indica que as condições de fluxo e carregamento mecânico impostas ao sistema SLG1 não provocaram grandes alterações no seu comportamento hidráulico.

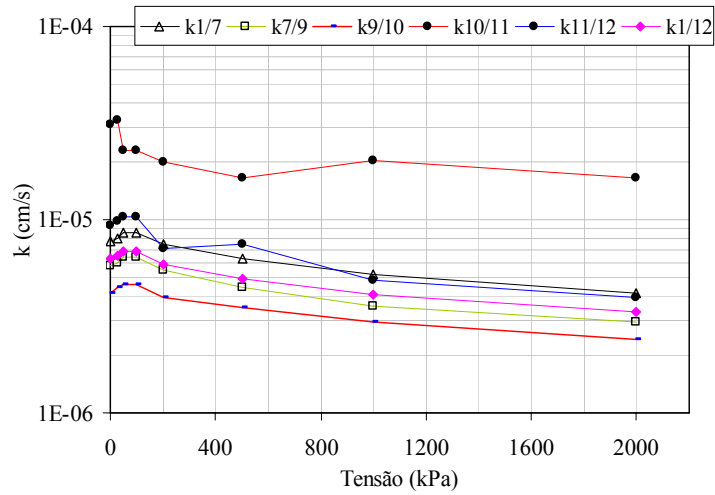


Figura 5.33: Variação da condutividade hidráulica em função do carregamento aplicado, no sistema SLG1.

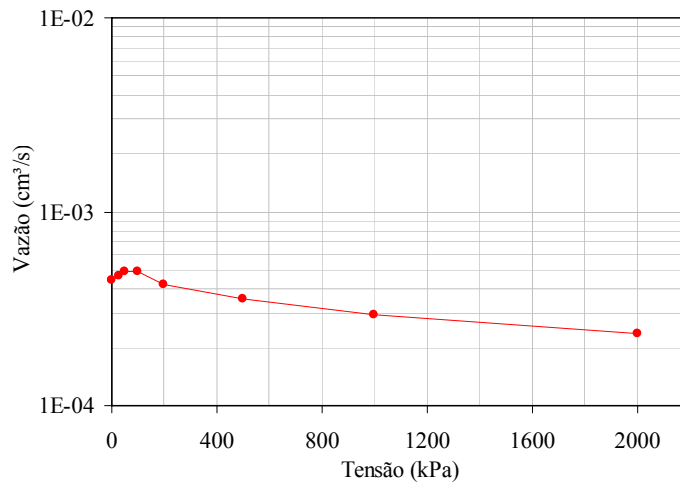


Figura 5.34: Variação da vazão em função do carregamento aplicado, no sistema SLG1.

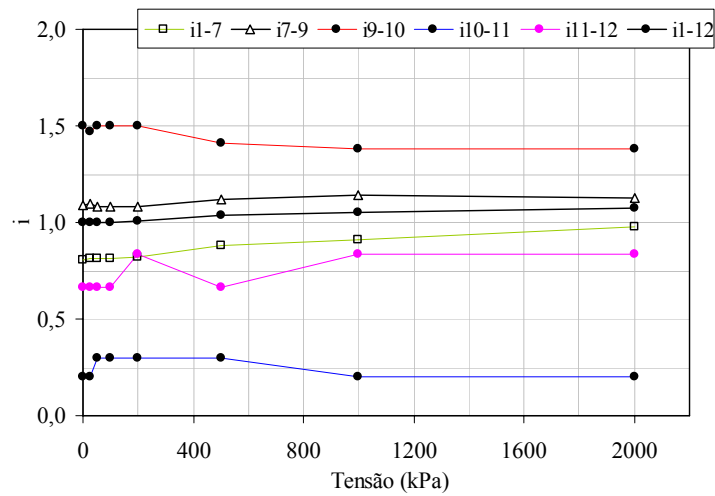


Figura 5.35: Variação do gradiente hidráulico em função do carregamento aplicado, no sistema SLG1.

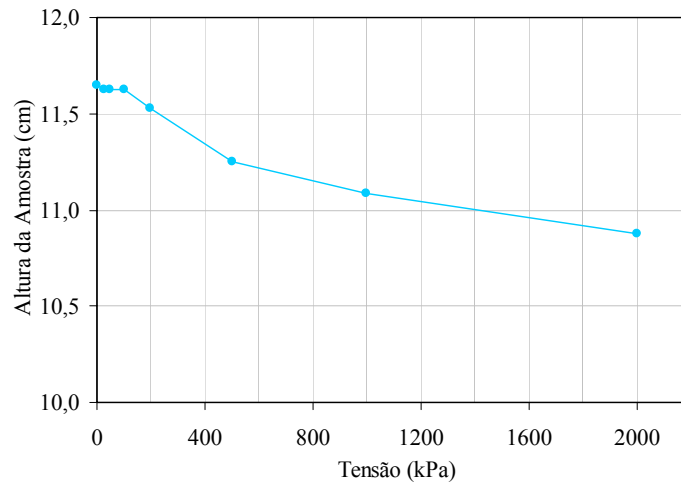


Figura 5.36: Variação da altura do corpo de provas em função do carregamento aplicado, no sistema SLG1.

A carga hidráulica ao longo do corpo de provas permaneceu praticamente constante durante o ensaio (Figura 5.37), tendo se mantido a situação identificada ao final do primeiro estágio do ensaio. Nas regiões A5 e A6 foi observada uma menor perda de carga em relação ao restante do sistema SLG1, indicando a perda de partículas destas regiões através do geotêxtil.

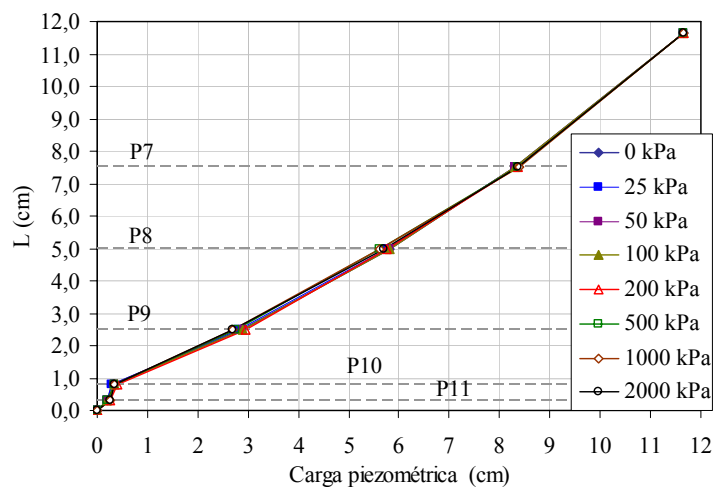


Figura 5.37: Variação da carga hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SLG1.

Nas Figuras 5.38 e 5.39 pode ser observada a diminuição  $k$ , e consequente aumento  $i$ , em função dos carregamentos aplicados. Especialmente  $k$  sofreu maior variação para carregamentos superiores a 200 kPa, o que está em acordo com a curva de variação da altura do corpo de provas (Figura 5.36). Além disso, o comportamento distinto das regiões A5 e A6 devem ser ressaltados. Desde o final do primeiro estágio de carregamento (0 kPa) a região A5 apresentou uma condutividade hidráulica maior, e um gradiente hidráulico menor, que as



demais. Na Figura 5.39 também pode ser observada um aumento no gradiente hidráulico na medida em que se aproxima do geotêxtil, exceto nas regiões A5 e A6. Isto é um indicativo da possibilidade de migração de partículas mais finas ao longo do corpo de provas, especialmente até a região A4 e da região A5 para a A6, ou da maior compactação destas regiões na montagem do ensaio, tendo em vista ser identificado deste o final do primeiro estágio de carregamento.

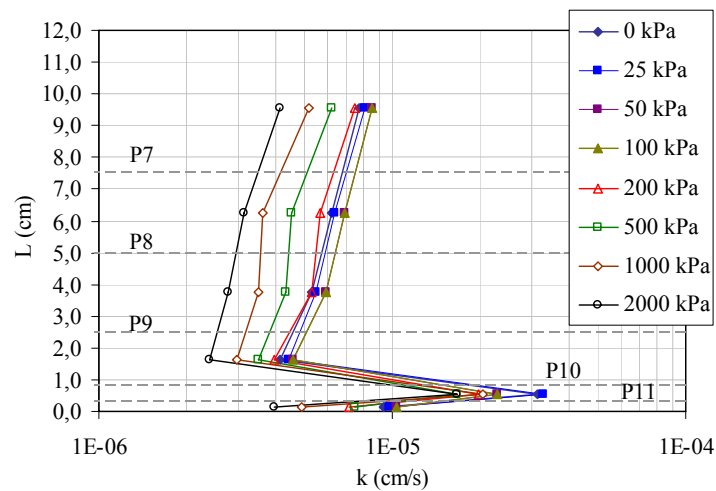


Figura 5.38: Variação da condutividade hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SLG1.

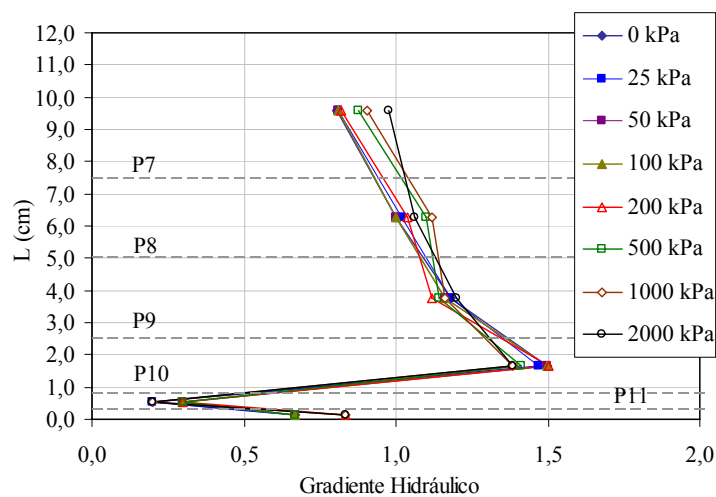


Figura 5.39: Variação do gradiente hidráulico ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SLG1.

Os valores de GR calculados ao longo do ensaio também se apresentaram relativamente constantes (Figura 5.40). Porém, os valores do  $GR_{Mod}$  e do  $GR_{3mm}$ , abaixo da unidade, são bem representativos dos menores gradientes observados para as regiões A5 e A6, mais próximas do geotêxtil, ficando caracterizada a ocorrência de piping. No geral, a condutividade

hidráulica do sistema diminuiu de maneira compatível com o adensamento observado no corpo de provas em função dos carregamentos mecânicos aplicados, o que justifica a forma das curvas de GR.

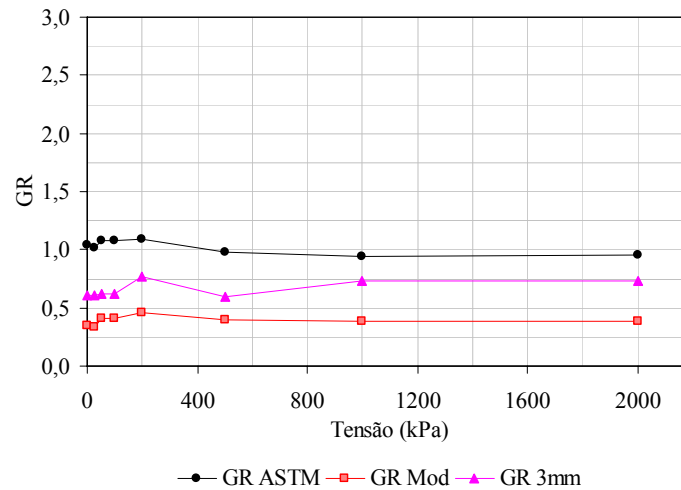


Figura 5.40: Variação da razão entre gradientes em função do carregamento aplicado, no sistema SLG1.

### 5.2.2. ENSAIOS COMPLEMENTARES AO GR DO SISTEMA SLG1, COM $i=1$

Para auxiliar a análise dos resultados do ensaio de GR com o sistema SLG1 foram investigadas a granulometria de partículas ao longo do corpo de provas e passantes e retidas no geotêxtil ao longo ensaio, além da interação entre as partículas do rejeito e as fibras da amostra têxtil. A granulometria das partículas coletadas ao longo do corpo de provas, próximo aos piezômetros 7 (SLG1.7), 9 (SLG1.9), 10 (SLG1.10) e 11 (SLG1.11), é apresentada na Figura 5.41. Pode-se observar que a granulometria das partículas permaneceu relativamente estável ao longo do corpo de provas e dentro da faixa de variação natural do rejeito ensaiado (SL3.GL), com exceção das amostras coletadas próximo aos P10 e P11 que apresentaram uma quantidade um pouco maior de partículas grossas. Na Figura 5.42 pode ser observado que a amostra coletada sobre o geotêxtil (SLG1.SG) tem uma quantidade maior de partículas grossas que o rejeito ensaiado. Estas observações são coerentes com os resultados obtidos na análise dos parâmetros hidráulicos apresentada na seção anterior.

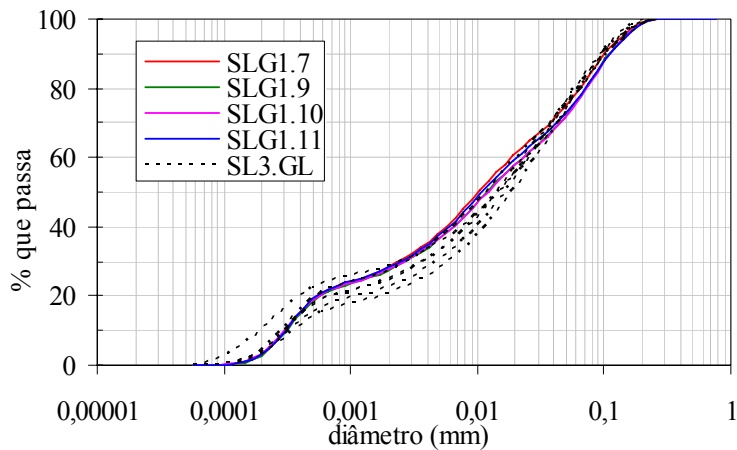


Figura 5.41: Granulometria das partículas coletadas ao longo do corpo de provas do ensaio de GR do sistema SLG1.

Além disso, na Figura 5.42 pode ser verificado que os diâmetros das partículas passantes pelo geotêxtil antes (SLG1.AT) e após o ensaio (SLG1.AP) são menores que a faixa de variação da abertura de filtração do geotêxtil. Estas amostras também têm maior quantidade de partículas finas que o rejeito (SL3.GL). A amostra SLG1.IG é composta por uma maior quantidade de partículas grossas que o rejeito, porém de diâmetro dentro da faixa de variação da abertura de filtração do geotêxtil. A análise conjunta destes resultados com os obtidos no próprio ensaio de GR mostra a coerência na identificação de piping na região mais próxima do geotêxtil.

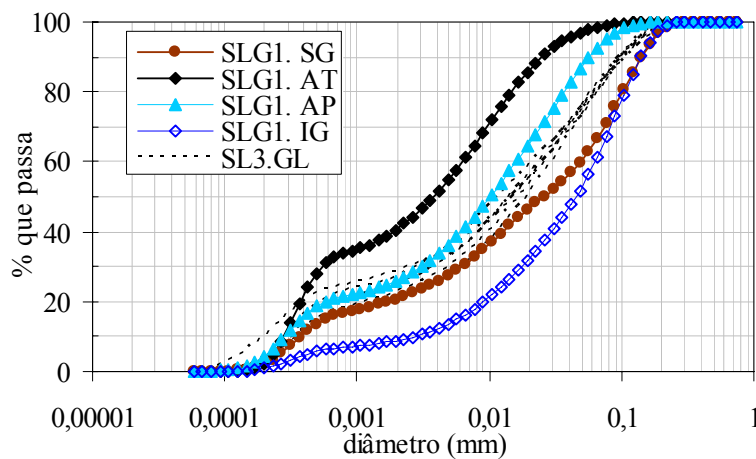


Figura 5.42: Granulometria das partículas que se relacionaram diretamente com o geotêxtil no ensaio de GR do sistema SLG1.

A visualização com a lupa da amostra do geotêxtil G1 ensaiada permitiu a identificação da condição das fibras posicionadas na sua superfície (Figura 5.43). Pôde ser observada a coloração avermelhada destas fibras, possivelmente gerada pela impregnação por compostos de minerais de ferro. Na Figura 5.44a, obtida com o MEV, pôde ser verificada a ocorrência de grandes aglomerados de partículas no interior do geotêxtil. Na Figura 5.44b, com auxílio das

Figura 5.45 e Figura 5.46, permitiu verificar que estas partículas, algumas vezes, se tratavam de quartzo envolto por pequenas partículas de hematita e caulinita.

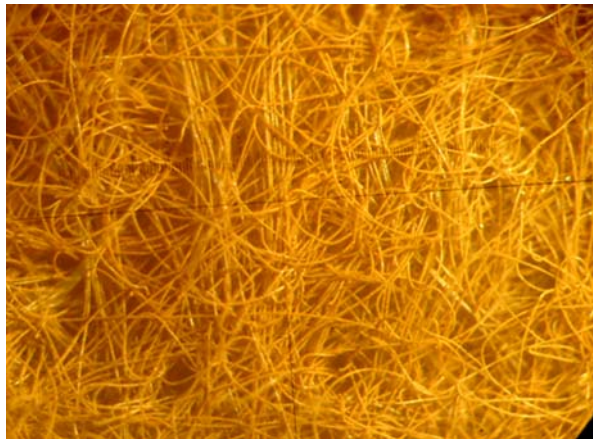


Figura 5.43: Imagem superficial do G1 coletado após o ensaio de GR do sistema SLG1.

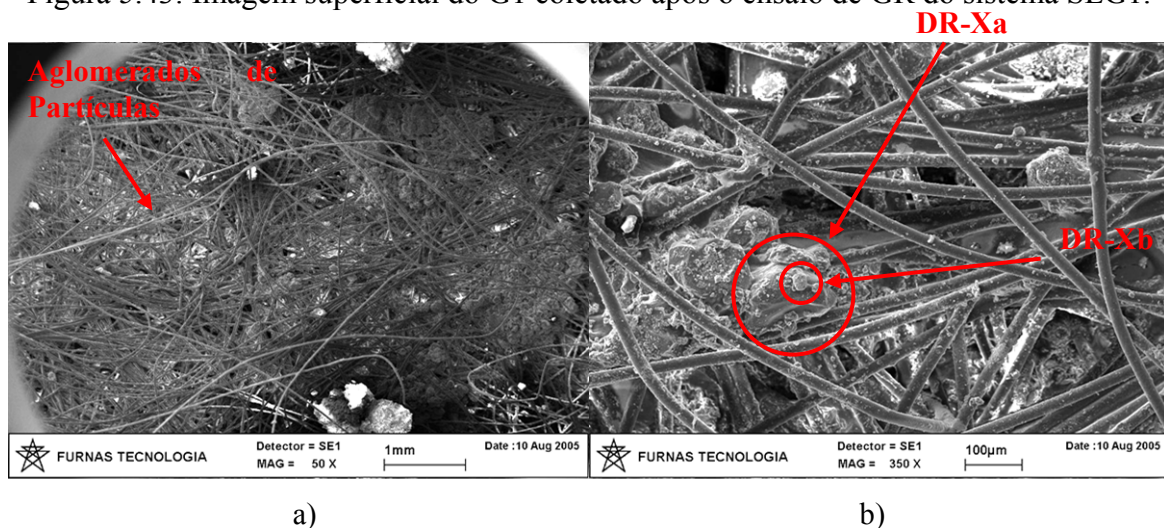


Figura 5.44: Imagens de MEV do geotêtil do ensaio de GR com o sistema SLG1: a) aglomerados de partículas no interior da amostra; b) detalhe dos grãos ocorrentes.

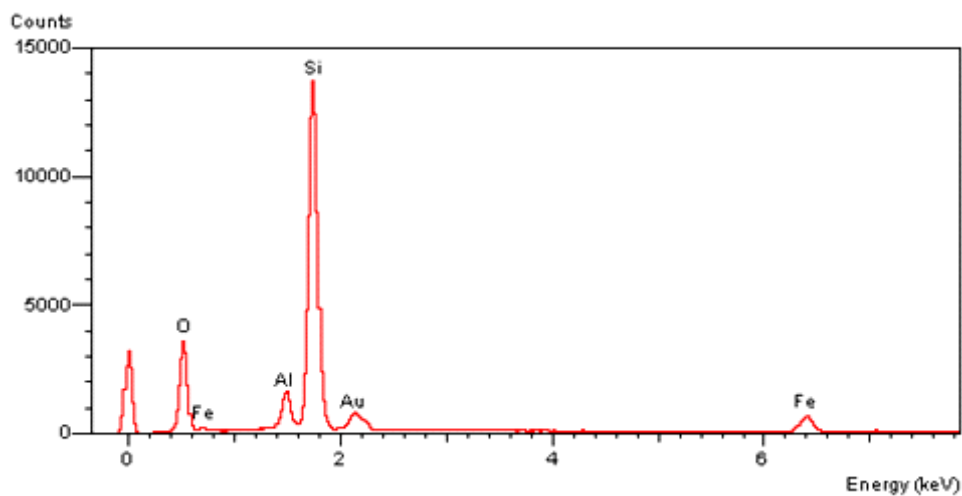


Figura 5.45: Grão de quartzo no interior do geotêtil do sistema SLG1 (DR-Xa).

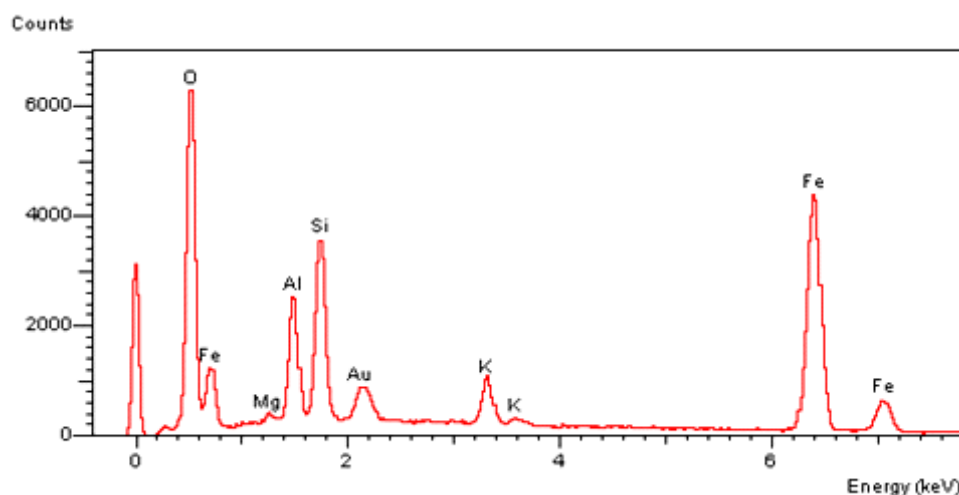


Figura 5.46: Minerais sobre o grão de quartzo no interior do geotêxtil do sistema SLG1 (DR-Xb).

### 5.2.3. ENSAIO DE GR DO SISTEMA SLG2, COM $i=1$

Os resultados obtidos no ensaio com o sistema SLG2 mostram novamente a estabilidade do seu comportamento hidráulico a partir da condição caracterizada ao final do primeiro estágio de carregamento (0 kPa). Foi observada, também, uma homogeneidade dos parâmetros hidráulicos analisados (Figura 5.47 e Figura 5.49) nas regiões centrais do corpo de prova, sendo que as regiões A5 e A6 apresentaram comportamento distinto destas. A condutividade hidráulica da região A5 (K10/11) é maior que a média do sistema, enquanto a k11/12, da região A6, é menor. Isto pode ser característico da migração de partículas da primeira em direção a segunda especialmente até o final do primeiro estágio de carregamento. Além disso, apenas nos estágios em que foram aplicados níveis mais baixos de tensão (até 100 kPa) foi observada uma variação do comportamento da região A5. Apesar da condutividade hidráulica na região que contém o geotêxtil (A6) ser apenas, aproximadamente, 3 (três) vezes maior que a média do corpo de provas, o gradiente hidráulico nesta região alcançou valores bastante elevados. Na Figura 5.49 se pode notar que no restante do corpo de provas ocorreram gradientes hidráulicos próximos da unidade, com exceção da região A5.

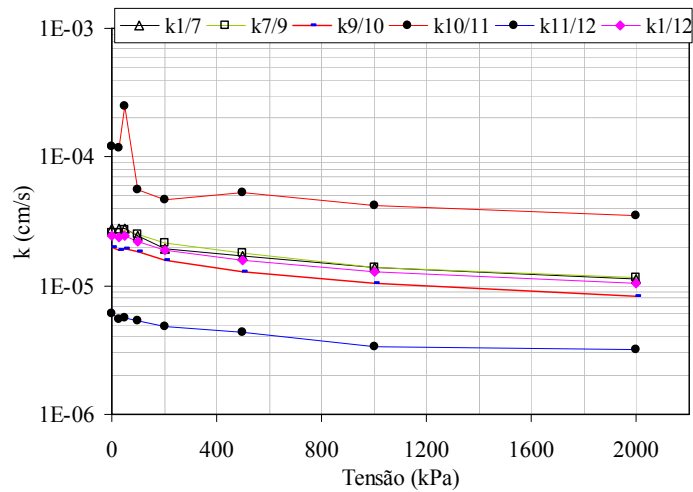


Figura 5.47: Variação da condutividade hidráulica em função do carregamento aplicado, no sistema SLG2.

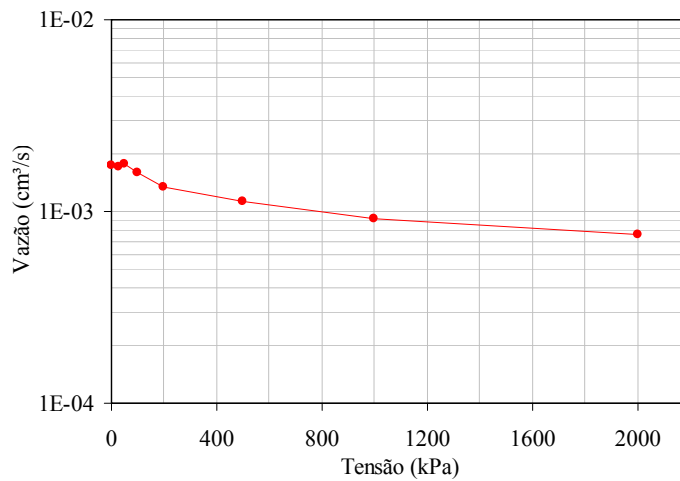


Figura 5.48: Variação da vazão em função do carregamento aplicado, no sistema SLG2.

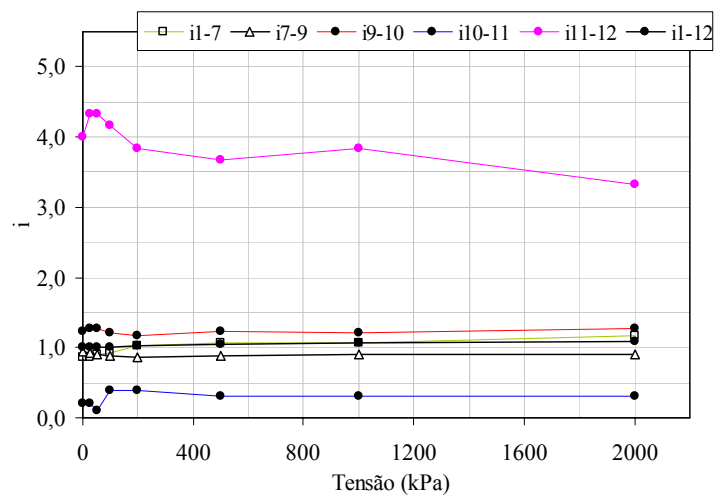


Figura 5.49: Variação do gradiente hidráulico em função do carregamento aplicado, no sistema SLG2.

---

Na Figura 5.50 é apresentada a variação da altura do corpo de provas ao longo do ensaio.

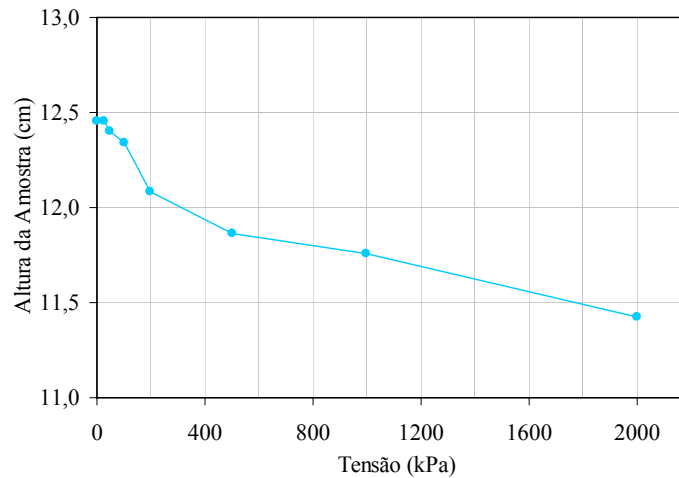


Figura 5.50: Variação da altura do corpo de provas em função do carregamento aplicado, no sistema SLG2.

A carga hidráulica ao longo do corpo de provas (Figura 5.51) novamente se mostrou homogênea ao longo do corpo de provas, com exceção das regiões A5 e A6, e constante durante o ensaio. Na Figura 5.47 se pode observar que a condutividade hidráulica do sistema diminuiu com o aumento do nível de carregamento e esta variação foi mais pronunciada para tensões superiores a 200 kPa. A distinção do comportamento das regiões A5 e A6, mais próximas do geotêxtil, em relação às demais também é comprovada nas Figuras 5.52 e 5.53. Observa-se que a condutividade hidráulica da região A5 chega a ser até dez vezes superior à observada nas regiões A1 a A4 para baixos níveis de tensão (Figura 5.52). Na região A6 deve ser destacado o elevado gradiente hidráulico, que chega a ser mais de quatro vezes superior ao médio aplicado ao corpo de provas (Figura 5.53). Nesta mesma figura se pode notar a diminuição do gradiente hidráulico, em função do carregamento aplicado, na região mais próxima do geotêxtil (A6). Isto chama a atenção para a perda de partículas através do geotêxtil como efeito a compressão promovida, aparentemente não se devendo, assim, apenas ao fluxo aplicado.

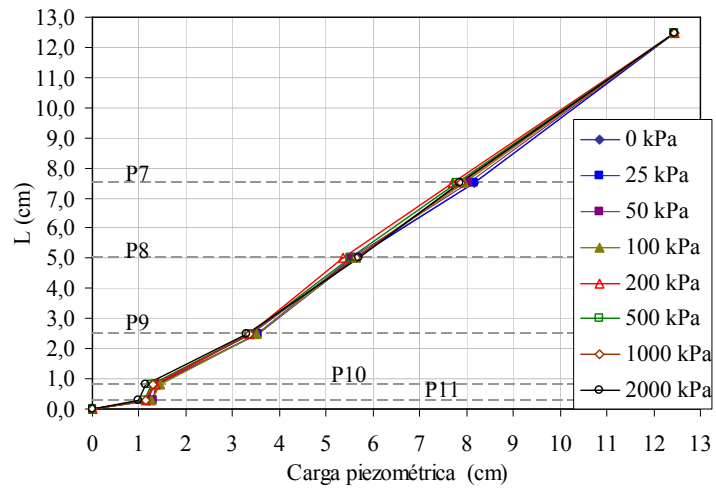


Figura 5.51: Variação da carga hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SLG2.

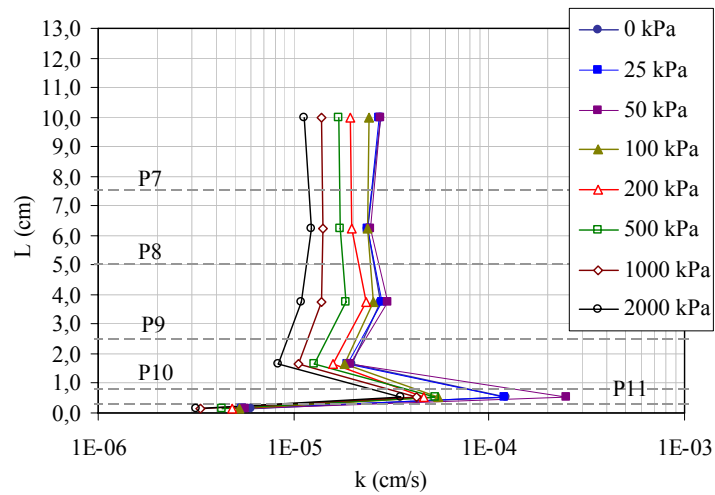


Figura 5.52: Variação da condutividade hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SLG2.

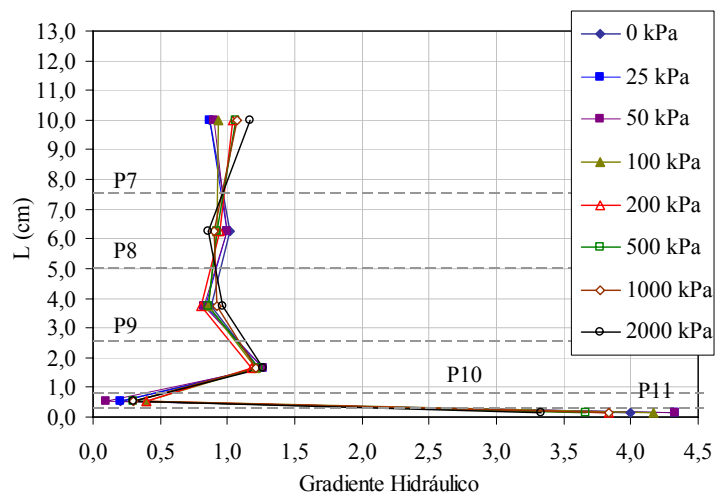


Figura 5.53: Variação do gradiente hidráulico ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SLG2.



De forma coerente com os resultados dos demais parâmetros hidráulicos do sistema SLG2, analisados no ensaio de filtração GR com gradiente hidráulico total unitário, os valores de GR calculados são representativos do maior gradiente hidráulico na região mais próxima do geotêxtil (A6). Além disso, o  $GR_{ASTM}$  acima da unidade chama a atenção para a maior média dos gradientes hidráulicos observados nas regiões mais próximas do geotêxtil (Figura 5.54). O piezômetro P11, que está associado à definição do  $GR_{3mm}$ , mostrou-se importantíssimo na avaliação do comportamento do geotêxtil na medida em que diminuiu a região de estudo a partir deste em relação às outras propostas de GR estudadas.

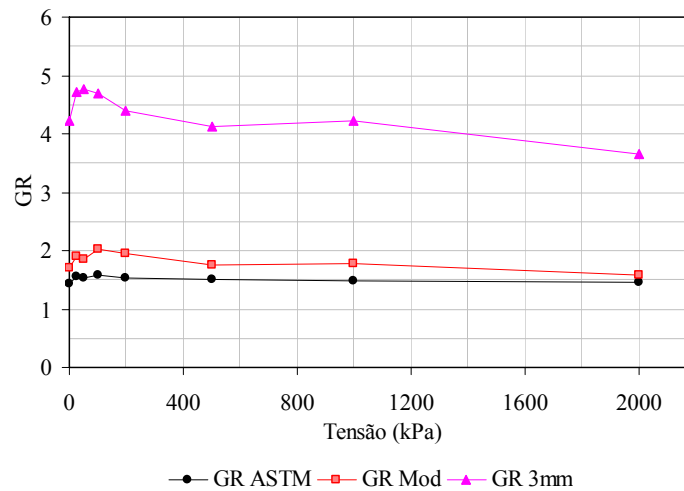


Figura 5.54: Variação da razão entre gradientes em função do carregamento aplicado, no sistema SLG2.

#### 5.2.4. ENSAIOS COMPLEMENTARES AO GR DO SISTEMA SLG2, COM $i = 1$

Também foi analisada a granulometria de partículas ao longo do corpo de provas e passantes e retidas no geotêxtil ao longo ensaio com o sistema SLG2, além da interação entre as partículas do rejeito e as fibras da amostra têxtil. A granulometria das partículas coletadas ao longo do corpo de provas, próximo aos piezômetros 7 (SLG2.7), 9 (SLG2.9), 10 (SLG2.10) e 11 (SLG2.11), é apresentada na Figura 5.55. O comportamento destas curvas granulométricas é bastante semelhante ao verificado para o sistema SLG1.

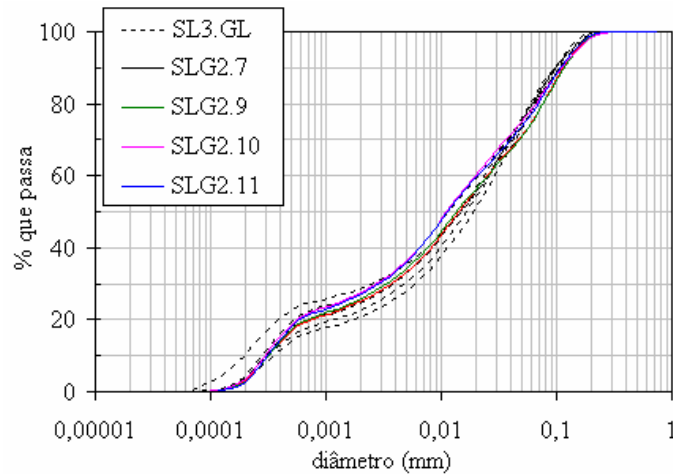


Figura 5.55: Granulometria das partículas coletadas ao longo do corpo de provas do ensaio de GR do sistema SLG2.

As curvas apresentadas na Figura 44 mostram que o sistema perdeu apenas partículas mais finas durante o ensaio (SLG2.AP), sendo que as mais grossas ficaram retidas sobre (SLG2.SG) ou no interior (SLG2.IG) do geotêxtil. Porém, os resultados apresentados na Figura 5.54, para a variação do GR ao longo do ensaio, demonstram que ocorreu uma importante diminuição da condutividade hidráulica da região A6, que contém o geotêxtil.

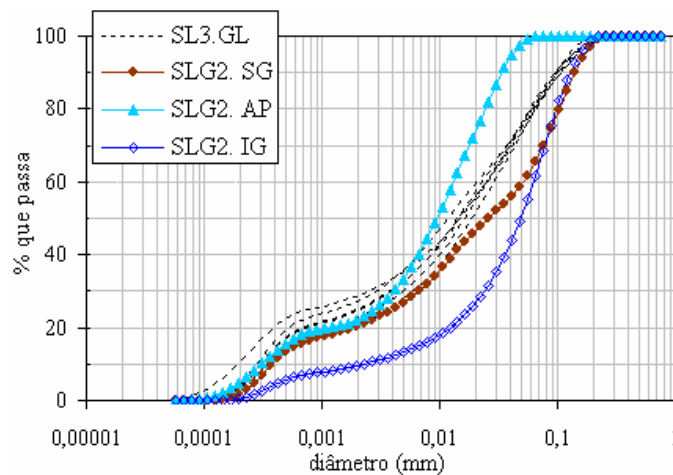


Figura 5.56: Granulometria das partículas que se relacionaram diretamente com o geotêxtil no ensaio de GR do sistema SLG2.

Na Figura 5.57 é apresentada a superfície do G2, utilizado no GR, visualizada com a lupa. Na Figura 5.58 são apresentadas imagens obtidas com o MEV, em que se pôde verificar a interação das partículas com o geotêxtil. Vale destacar a grande quantidade de partículas finas aderidas às fibras, observada especialmente na Figura 5.58b.

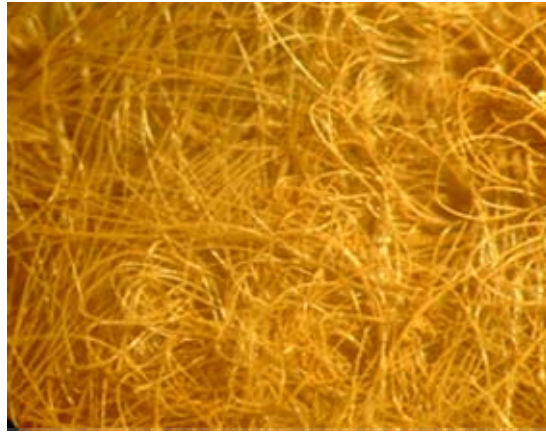


Figura 5.57: Imagem superficial do G2 coletado após o ensaio de GR do sistema SLG2.

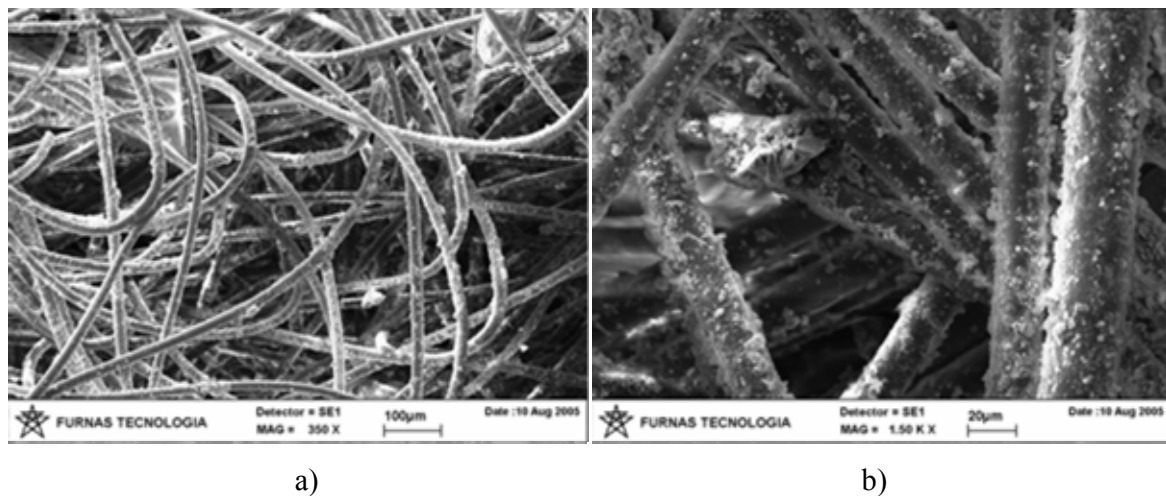


Figura 5.58: Imagens de MEV do geotêxtil do ensaio de GR com o sistema SLG2: a) vista geral das fibras; e b) detalhe do revestimento das fibras por partículas finas.

### 5.3. ENSAIOS DE FILTRAÇÃO DO TIPO RAZÃO ENTRE GRADIENTES DA AMOSTRA FA1, COM $i = 1$ , E ENSAIOS COMPLEMENTARES

#### 5.3.1. ENSAIO DE GR DO SISTEMA FAG1, COM $i = 1$

Nas Figura 5.59 e Figura 5.60 pode-se observar que nos primeiros estágios de carregamento, notadamente até 100 kPa, o comportamento do sistema FAG1 sofreu suas principais variações. Ao final do primeiro estágio pôde ser observada uma heterogeneidade do corpo de provas em que, especialmente, as regiões A1 e A5 se diferenciaram das demais e entre si. O comportamento destas regiões se manteve relativamente constante ao longo do restante do ensaio. De uma forma geral, se pode observar que a condutividade hidráulica varia ao longo de todo o corpo de provas, aumentando quanto mais próximo do geotêxtil. A exceção é a região A6, que teve um comportamento variável durante todo o ensaio. Até o estágio de 100 kPa experimentou um aumento da condutividade hidráulica ( $k_{11/12}$ ) (Figura 5.59), e uma redução do gradiente hidráulico ( $i_{11/12}$ ) (Figura 5.61). Isto pode ter ocorrido frente à possível

perda de partículas desta região através do geotêxtil durante os estágios em que foram aplicados menores níveis de carregamento ao sistema. No estágio de 200 kPa ocorreu uma redução da condutividade hidráulica, provocada, possivelmente, por um adensamento localizado frente a esta possível perda de partículas. A perda de partículas do sistema, que possivelmente provocou a redução do gradiente hidráulico da região A6 no estágio seguinte (500 kPa) aparentemente cessou quando aplicados os níveis de carregamento mais elevados.

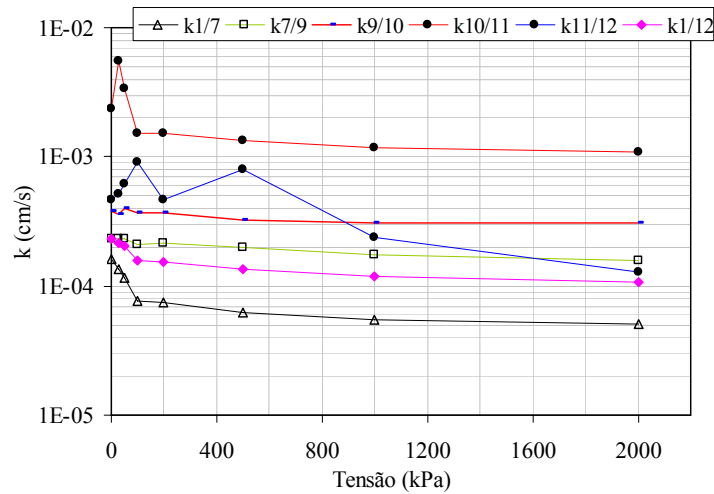


Figura 5.59: Variação da condutividade hidráulica em função do carregamento aplicado, no sistema FAG1.

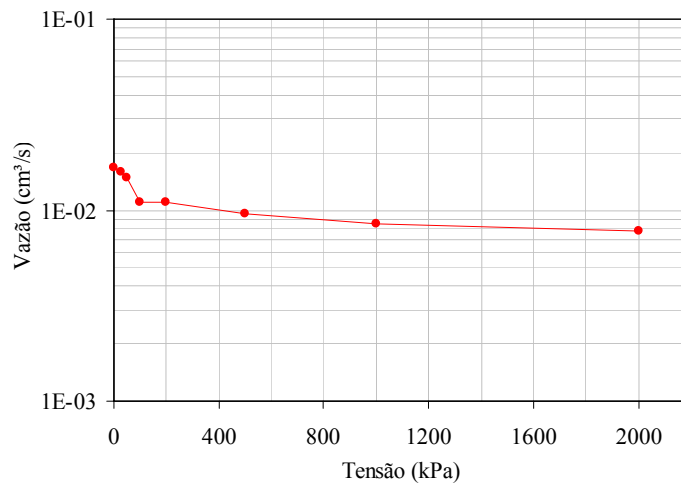


Figura 5.60: Variação da vazão em função do carregamento aplicado, no sistema FAG1.

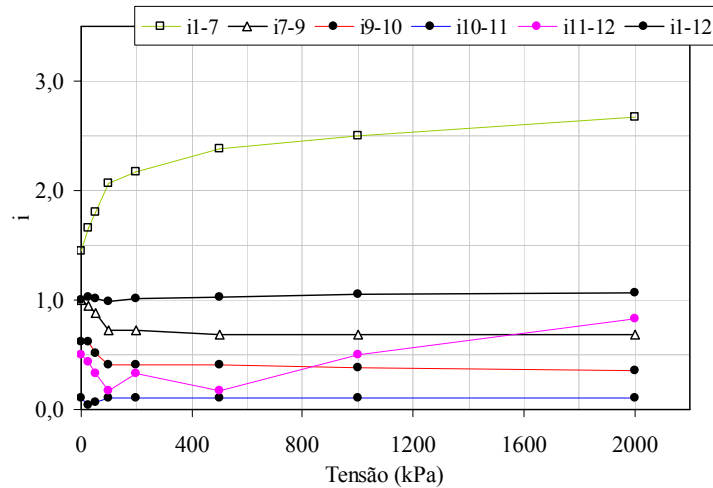


Figura 5.61: Variação do gradiente hidráulico em função do carregamento aplicado, no sistema FAG1.

O acompanhamento da variação da altura do corpo de provas durante o ensaio é apresentado na Figura 5.62.

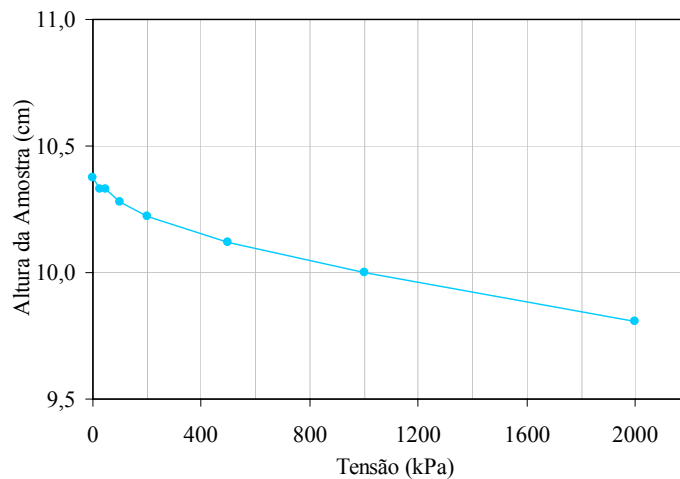


Figura 5.62: Variação da altura do corpo de provas em função do carregamento aplicado, no sistema SAG1.

A variação da carga hidráulica ao longo do corpo de provas (Figura 5.63) mostra que havia uma pequena heterogeneidade no corpo de no final do primeiro estágio de carregamento, a qual se acentuou principalmente para carregamentos de até 200 kPa. Nas regiões A5 e A6 se pode notar a possível influência do geotêxtil no comportamento do rejeito arenoso de rocha fosfática, tendo sido observada uma relativa redução da perda de carga.

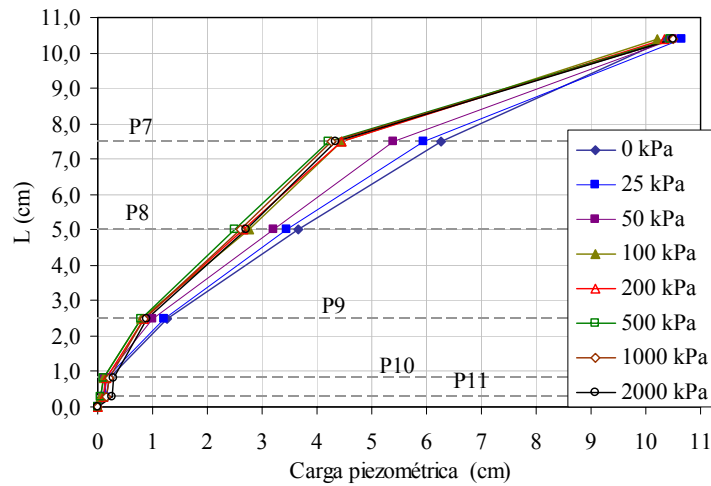


Figura 5.63: Variação da carga hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema FAG1.

O comportamento da carga hidráulica medida ao longo do corpo de provas se refletiu na condutividade hidráulica calculada (Figura 5.64). Observou-se uma diminuição de  $k$  em todas as regiões do corpo de provas em função do aumento do nível de tensão. Nas regiões A5 e A6 foram verificadas variações de até cinco vezes, por exemplo. Na região A5 praticamente não houve variação do gradiente hidráulico ( $i$ ) ao longo do ensaio (Figura 5.65). Analisando conjuntamente este resultado com  $k$  da mesma região conclui-se pela possibilidade de migração de partículas finas desta em direção ao geotêxtil. Isto pode ter influenciado a redução da condutividade hidráulica na região A6, que o contém.

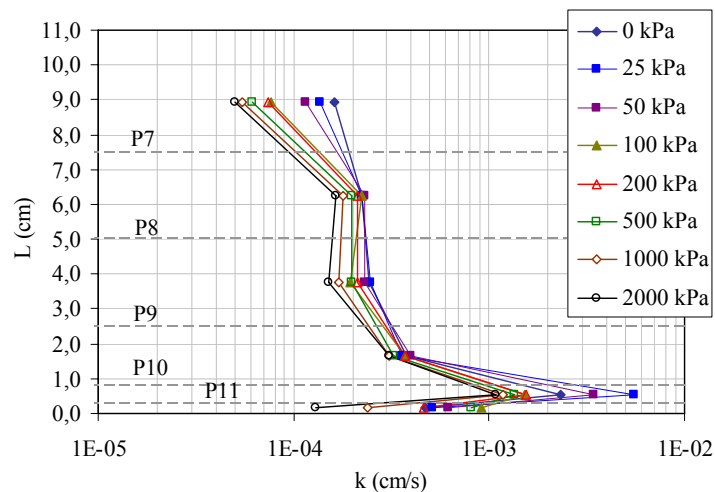


Figura 5.64: Variação da condutividade hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema FAG1.

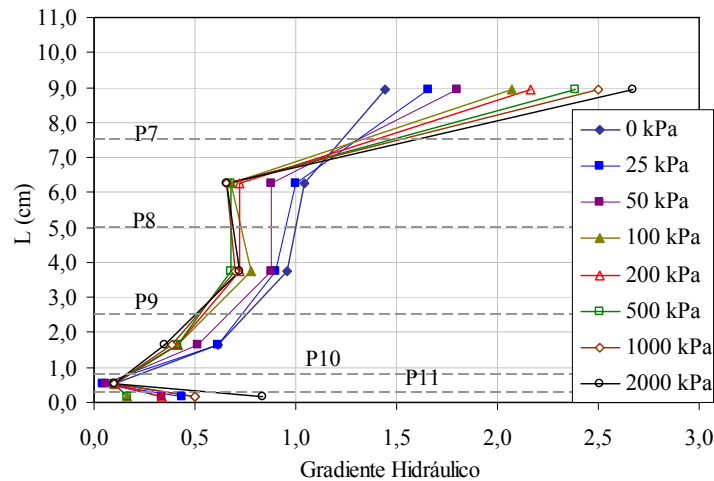


Figura 5.65: Variação do gradiente hidráulico ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema FAG1.

A avaliação dos resultados de GR, apresentados na Figura 5.66, permite a verificação de que, no final do primeiro estágio de carregamento, a região A5 (especialmente representada no  $GR_{Mod}$ ) apresentou comportamento hidráulico distinto das demais, indicando a ocorrência de maior perda de partículas desta região. No geral, nos primeiros estágios de ensaio foram observados valores baixos de GR segundo as três propostas consideradas. Com a aplicação de carregamentos verticais superiores a 500 kPa no topo do corpo de provas, foi observado o aumento do  $GR_{3mm}$ . Esta ocorrência pode ser justificada pela maior compressão da amostra de geotêxtil frente a estes carregamentos.

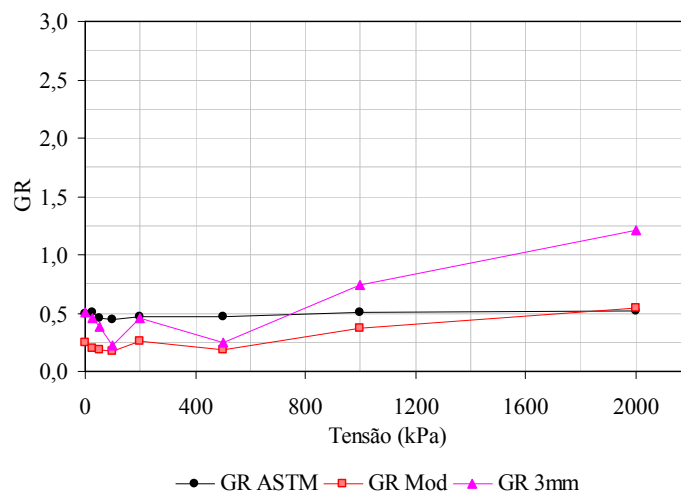


Figura 5.66: Variação da razão entre gradientes em função do carregamento aplicado, no sistema FAG1.

### 5.3.2. ENSAIOS COMPLEMENTARES AO GR DO SISTEMA FAG1, COM $i=1$

No ensaio de GR com o sistema FAG1 foram coletadas partículas passantes antes da aplicação de fluxo (FAG1.AT) e após a sua realização (FAG1.AP), além daquelas

impregnadas no geotêxtil ao final do ensaio (FAG1.IG). Na Figura 5.67 pode ser observado que a granulometria da FAG1.IG possui uma quantidade menor de partículas finas em relação do rejeito ensaiado (FA1.GL). A granulometria das partículas passantes pelo geotêxtil durante o ensaio identifica a perda destas partículas mais finas. A análise conjunta destes resultados com os obtidos no próprio ensaio de GR indica a ocorrência de piping na região mais próxima do geotêxtil, especialmente no início do ensaio de GR. Para carregamentos superiores a 200 kPa o acréscimo do GR nas regiões mais próximas do geotêxtil pode ter sido gerado pela compactação provocada.

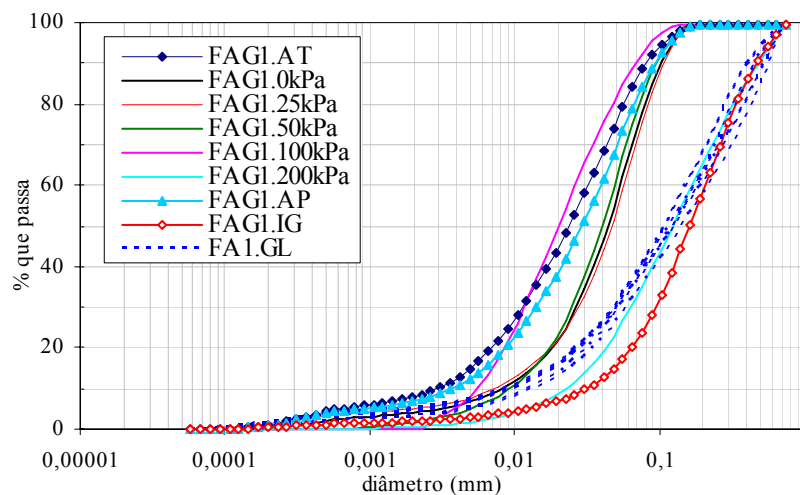


Figura 5.67: Granulometria das partículas que se relacionaram diretamente com o geotêxtil no ensaio de GR do sistema FAG1.

A visualização da superfície do geotêxtil com a lupa permitiu a verificação da variedade de formas das partículas retidas (Figura 5.68). Também foi identificada a ocorrência de furos aparentes, gerados no processo de fabricação por agulhamento. Na Figura 5.69 são apresentadas imagens obtidas com o MEV, sendo que a identificação de partículas de formas variadas indica a ocorrência dos diversos minerais constituintes do rejeito no interior da malha de fibras. A difratometria de raios X de algumas partículas visualizadas permitiu a comprovação deste fato (Figura 5.69b, Figura 5.69c, Figura 5.70, Figura 5.71 e Figura 5.72). Inclusive, nas Figuras 5.69c, 5.71 e 5.72 pode ser verificado o revestimento de fibras sintéticas por partículas finas também dos diversos minerais constituintes do rejeito, especialmente minerais de ferro e micas.





Figura 5.68: Imagem superficial do G1 coletado após o ensaio de GR do sistema FAG1.

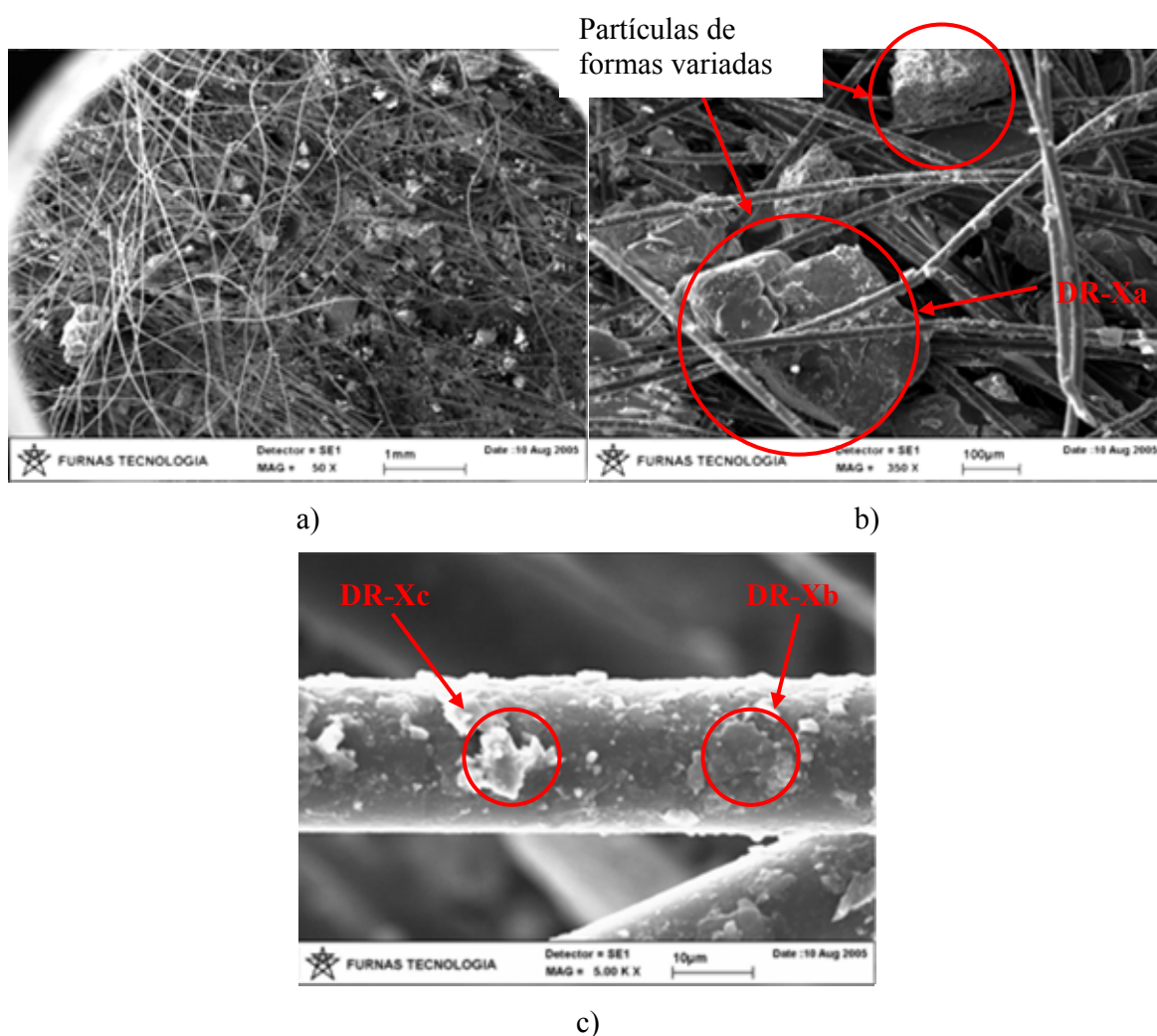


Figura 5.69: Imagens de MEV do geotêxtil do ensaio de GR com o sistema FAG1: a) vista geral do geotêxtil; b) partículas no interior da amostra; b) detalhe das fibras têxteis.

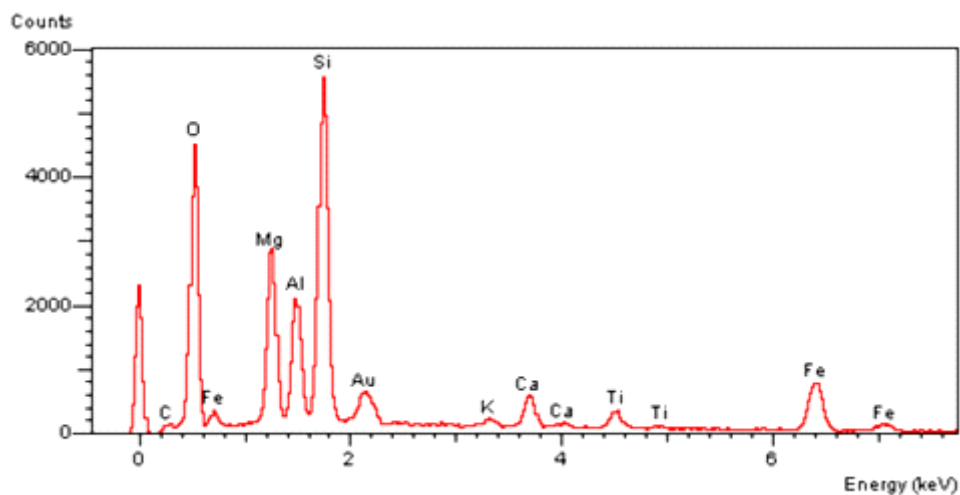


Figura 5.70: Minerais no interior do geotêxtil do sistema FAG1 (DR-Xa).

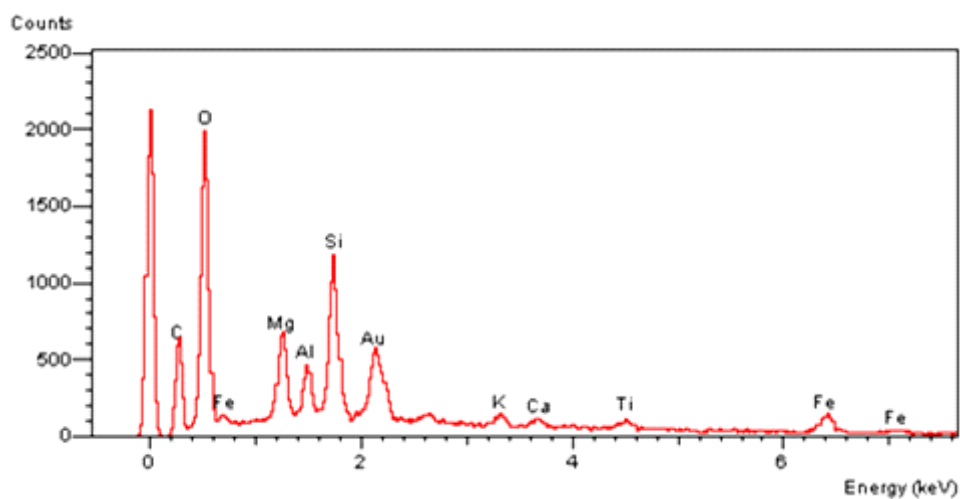


Figura 5.71: Minerais envolvendo fibra têxtil do sistema FAG1 (DR-Xb).

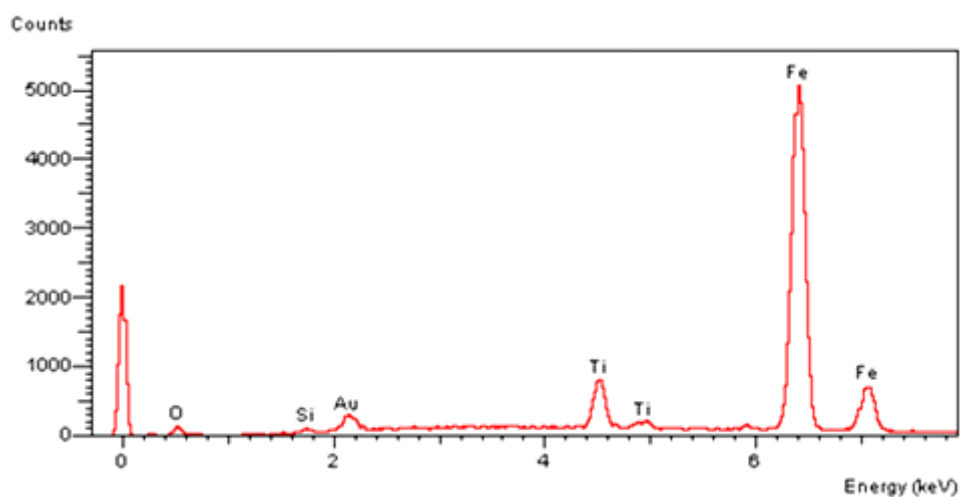


Figura 5.72: Minerais envolvendo fibra têxtil do sistema FAG1 (DR-Xc).

### 5.3.3. ENSAIO DE GR DO SISTEMA FAG3, COM $i=1$

Os resultados obtidos para o sistema FAG3 mostram uma pequena variação do comportamento para níveis de tensão de até 200 kPa (Figura 5.73, Figura 5.74 e Figura 5.75). Além disso, se pode observar que a condutividade hidráulica varia ao longo de todo o corpo de provas, sendo maior quanto mais próximo do geotêxtil. Este comportamento se mantém constante durante todo o ensaio.

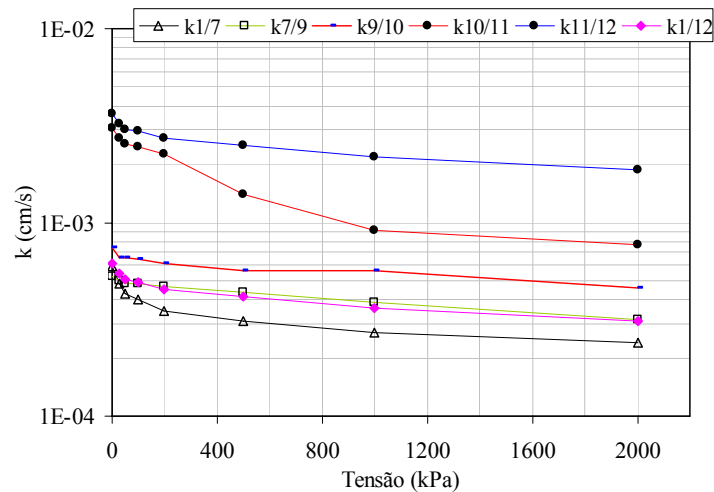


Figura 5.73: Variação da condutividade hidráulica em função do carregamento aplicado, no sistema FAG3.

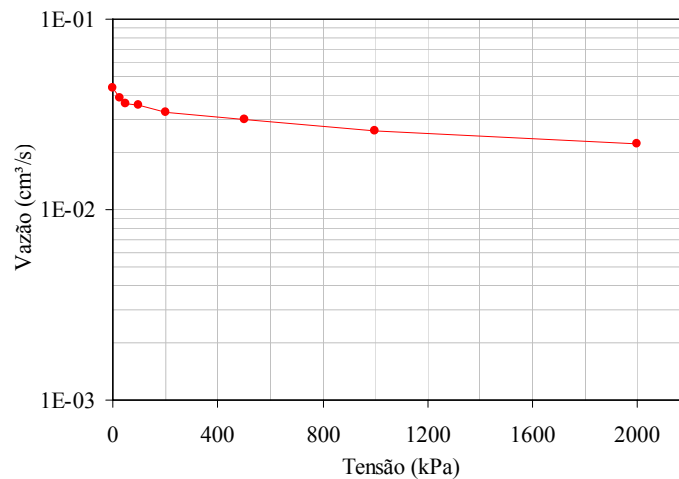


Figura 5.74: Variação da vazão em função do carregamento aplicado, no sistema FAG3.

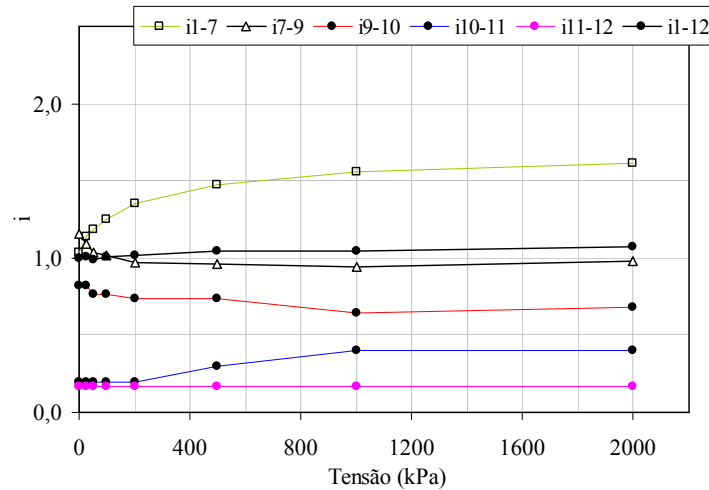


Figura 5.75: Variação do gradiente hidráulico em função do carregamento aplicado, no sistema FAG3.

A variação da altura do corpo de provas em função dos níveis de tensão aplicados é apresentada na Figura 5.76.

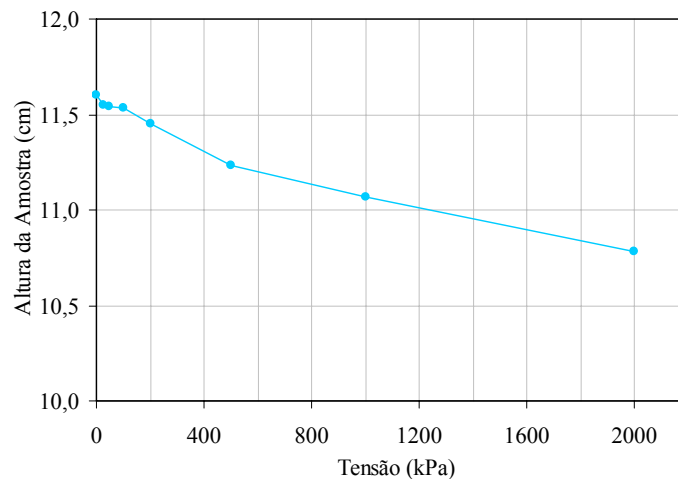


Figura 5.76: Variação da altura do corpo de provas em função do carregamento aplicado, no sistema FAG3.

Na Figura 5.77 pode ser verificado que a carga hidráulica ao longo do corpo de provas não sofreu grandes alterações desde o final do primeiro estágio de carregamento (0 kPa). Porém, cabe ressaltar a maior diferenciação observada para as cargas hidráulicas medidas nas regiões A5 e A6, mais próximas do geotêxtil, indicando mais uma vez a influência deste no comportamento dos materiais adjacentes.

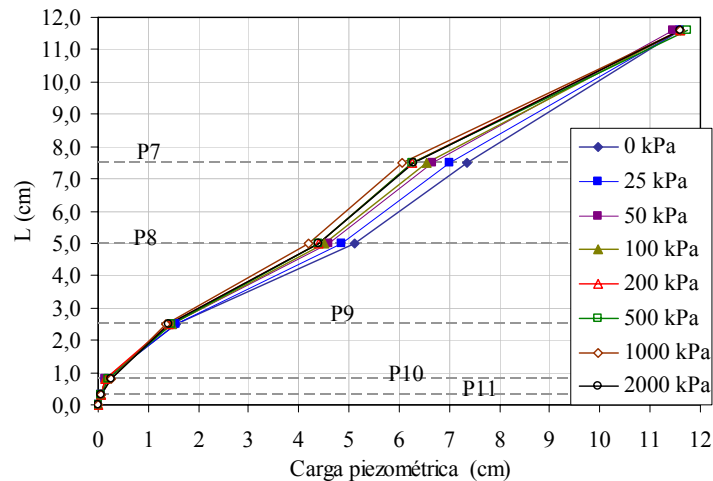


Figura 5.77: Variação da carga hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema FAG3.

O comportamento observado nas Figuras 5.78 e 5.79 indicam a possibilidade de ocorrência de migração de partículas no interior do corpo de provas. Na Figura 5.79, por exemplo, observa-se um gradiente hidráulico maior na região A3 que na região A2, indicando a possibilidade de migração de partículas da primeira para a segunda região mencionada. Nas regiões seguintes, A4, A5 e A6 é observada uma redução progressiva do gradiente hidráulico, também indicando a possibilidade de perda de partículas do sistema através do geotêxtil. Na Figura 5.78 também se pode verificar a diminuição da condutividade hidráulica em função dos carregamentos aplicados em todas as regiões do corpo de provas. Além disso, se observa uma condutividade hidráulica quase 10 vezes superior à média nas regiões mais próximas do geotêxtil, realçando a influência deste no comportamento do rejeito.

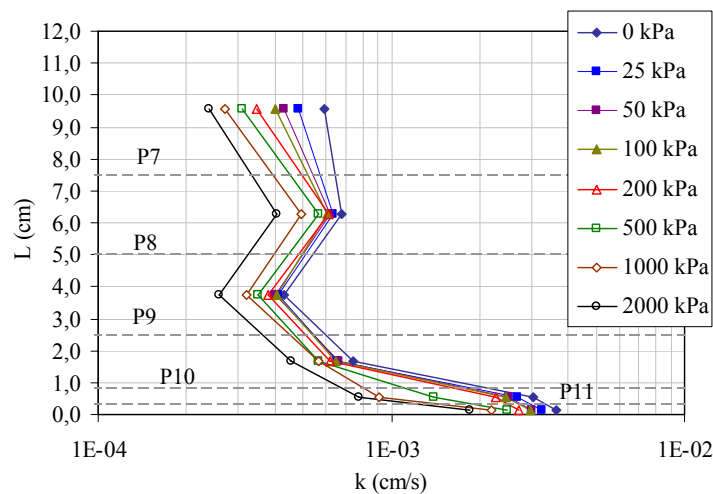


Figura 5.78: Variação da condutividade hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema FAG3.

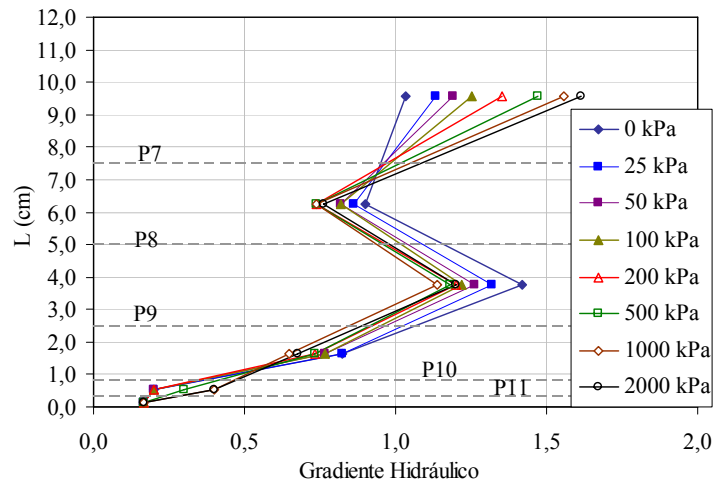


Figura 5.79: Variação do gradiente hidráulico ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema FAG3.

Os valores de GR se mostraram praticamente constantes ao longo de todo o ensaio (Figura 5.80). Isso ressalta o efeito do procedimento de montagem do corpo de provas e/ou do primeiro estágio de carregamento aplicado. Também se pode observar que todos os valores de GR indicam a possibilidade de perda de partículas das regiões mais próximas do geotêxtil.

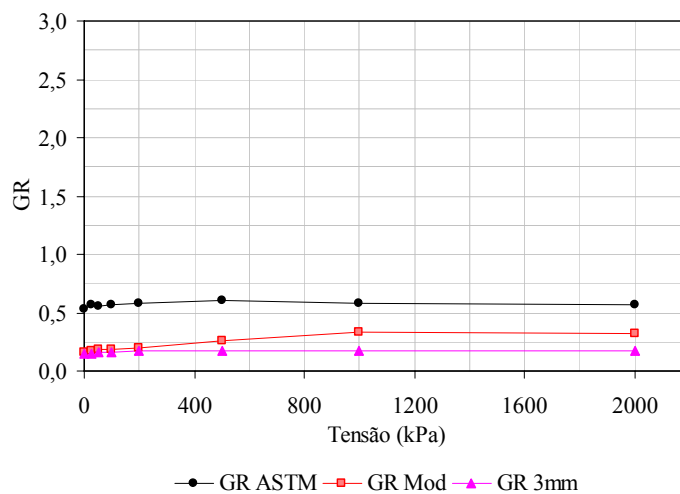


Figura 5.80: Variação da razão entre gradientes em função do carregamento aplicado, no sistema FAG3.

#### 5.3.4. ENSAIOS COMPLEMENTARES AO GR DO SISTEMA FAG3, COM $i=1$

No ensaio de GR com o sistema FAG3 foram coletadas partículas passantes antes da aplicação de fluxo (FAG3.AT) e após a realização do ensaio (FAG3.AP), além daquelas impregnadas no geotêxtil (FAG3.IG). Na Figura 5.81 pode ser observado que a granulometria das partículas retidas dentro do geotêxtil possui uma quantidade menor de partículas finas em relação do rejeito FA1. A granulometria das partículas passantes pelo geotêxtil durante o

ensaio identifica a perda destas partículas mais finas. A análise conjunta destes resultados com os obtidos no próprio ensaio de GR indica a ocorrência de piping na região mais próxima do geotêxtil.

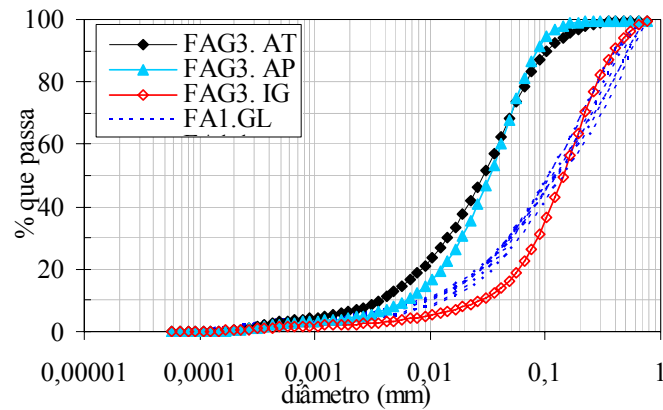


Figura 5.81: Granulometria das partículas que se relacionaram diretamente com o geotêxtil no ensaio de GR do sistema FAG3.

A visualização da superfície do geotêxtil ensaiado com a lupa permitiu a verificação da variedade de forma de partículas retidas ali (Figura 5.82).

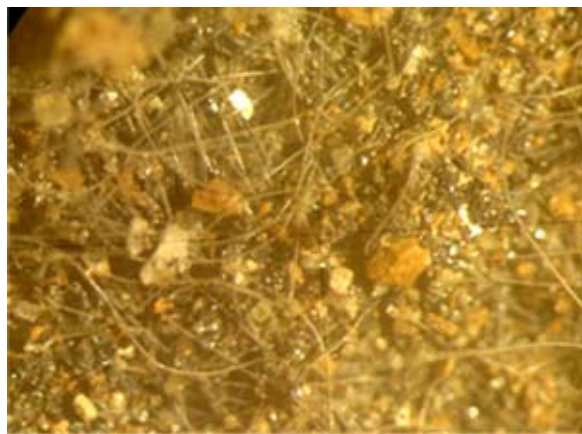


Figura 5.82: Imagem superficial do G1 coletado após o ensaio de GR do sistema FAG3.

## CAPÍTULO 6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE GR, COM $1 \leq i \leq 10$ , E ENSAIOS COMPLEMENTARES.

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios de filtração do tipo razão entre gradientes (GR), realizados com variação do gradiente hidráulico ( $i$ ) de 1 a 10. A seqüência de ensaio compreendeu primeiro a aplicação dos incrementos de gradiente hidráulico para um carregamento aplicado no topo dos corpos de prova de 0 kPa. Ao se atingir o gradiente hidráulico total de 10, este foi mantido constante e tiveram início os estágios de incremento de tensão no topo dos corpos de prova. Ou seja, os estágios em que foram variados os carregamentos aplicados aos corpos de prova foram conduzidos sob gradiente hidráulico total constante e igual a 10.

O processo de análise também é contemplado pela apresentação e análise dos resultados de ensaios complementares ao GR: granulometria a laser das partículas passantes durante a aplicação dos carregamentos e retidas nos geotêxteis; granulometria a laser das partículas remanescentes em diferentes regiões do corpo de provas após os ensaios de GR; análise de imagens dos geotêxteis após os ensaios com auxílio da lupa e do MEV. Na Tabela 6.1 são apresentados alguns dados iniciais e finais de caracterização dos sistemas rejeito-geotêxtil estudados. O esquema do corpo de prova apresentado na Figura 5.1 também será utilizado neste capítulo para auxiliar na apresentação dos resultados e análises.

Tabela 6.1: Características iniciais e finais dos sistemas rejeito-geotêxtil estudados nos ensaios de GR com  $1 \leq i \leq 10$

Sistema	$i_{total}^{(5)}$	$\sigma_v^{(6)}$ (kPa)	$e_i^{(1)}$	$e_f^{(2)}$	$H_{Cpi}^{(3)}$ (cm)	$\Delta T^{(4)}$ (dias)	$M_A^{(7)}$ (g/m <sup>2</sup> )	$\lambda^{(8)}$
SAG2	1, 2.5 <sup>(9)</sup> , 5 e 10	0, 25, 50,	0,68	0,64	10,63	7,6	397	1,8
SLG2		100, 200, 500, 1000	0,70	0,54	10,82	32,6	401	0,4
FAG1		e 2000	0,90	0,77	9,52	5,6	209	-

Notas: (1) e (2) são, respectivamente, os índices de vazios inicial e final dos rejeitos nos corpos de prova; (3) é a altura inicial dos corpos de prova; (4) é o tempo de duração dos ensaios em dias; (5) é o gradiente hidráulico total aplicado aos corpos de prova; (6) são os níveis de tensão aplicados aos corpos de prova; (7) é a gramatura dos geotêxteis ensaiados; (8) é o grau de impregnação dos geotêxteis ao final de cada ensaio; e (9) no caso do ensaio com o sistema FAG1 foi aplicado  $i = 2$ .



---

## 6.1. ENSAIO DE GR DO SISTEMA SAG2, COM $1 \leq i \leq 10$

A variação do gradiente hidráulico total, como esperado, alterou as características do corpo de provas para a aplicação dos diferentes níveis de carregamentos mecânicos. Durante estes últimos estágios, a condutividade hidráulica ( $k$ ), a vazão e o gradiente hidráulico ( $i$ ) ao longo do corpo de provas sofreram suas principais variações naqueles em que foram aplicados baixos níveis de tensão, notadamente até 50 kPa.

Nas Figura 6.1, 6.2 e 6.3 são apresentadas a variação da condutividade hidráulica, da vazão e do gradiente hidráulico ao longo do corpo de provas, respectivamente, diante dos diferentes gradientes hidráulicos totais aplicados. Ao final do primeiro estágio de ensaio,  $i = 1$  e 0 kPa, pôde-se notar que apenas as regiões A5 e A6 apresentavam características distintas do restante do corpo de provas (Figura 6.1 e Figura 6.3). Com a variação do gradiente hidráulico aplicado ao corpo de provas foi observada uma pequena redução na condutividade hidráulica média do sistema SAG2, especialmente influenciada pelo comportamento da região A1. A condutividade hidráulica desta região apresentou uma redução da ordem de 10 (dez) vezes, possivelmente provocada pela sedimentação de partículas finas, eventualmente em suspensão, acima do corpo de provas. As regiões A2, A3 e A4 apresentaram comportamento aproximadamente constante diante da variação do gradiente hidráulico total, principalmente quanto à condutividade hidráulica, o que indica uma característica de estabilidade interna do rejeito estudado mesmo sob estas condições de fluxo. Já as regiões A5 e A6 sofreram maior influência da variação do gradiente total aplicado. Na região A6, que contém o geotêxtil, foi observada uma redução da condutividade hidráulica ( $k_{11/12}$ ) da ordem de cinco vezes quando da aplicação de  $i = 2,5$ . Como neste mesmo estágio foram verificados aumentos na vazão (Figura 6.2) pelo sistema e no  $i_{11/12}$  desta região (Figura 6.3), conclui-se pela possível migração de partículas para esta região. Nos estágios seguintes, até se atingir  $i = 10$ , o aumento da vazão foi acompanhado de aumentos no gradiente hidráulico sem grande variação da condutividade hidráulica, indicando que não ocorreu alteração relevante na estrutura desta região. Já na região A5 a variação da vazão foi acompanhada de variações da condutividade hidráulica para gradientes locais aproximadamente constantes. Assim, esta região pode ter perdido partículas ao longo dos estágios de variação do gradiente total. A associação do comportamento das regiões A5 e A6 indica que o sistema perdeu partículas especialmente nos estágios de maiores gradientes hidráulicos totais.

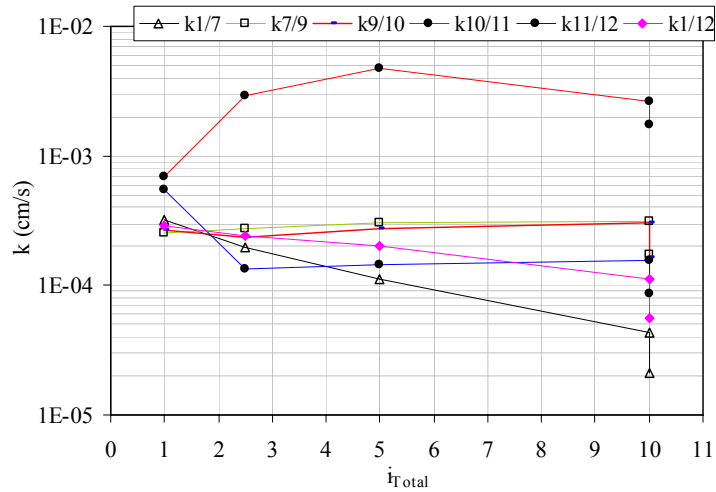


Figura 6.1: Variação da condutividade hidráulica em função do gradiente hidráulico total aplicado, no sistema SAG2, ensaiado em  $i$  variável.

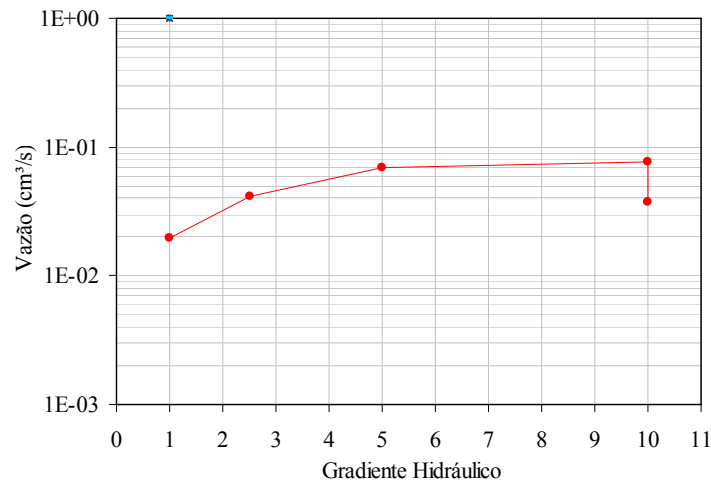


Figura 6.2: Variação da vazão em função do gradiente hidráulico total aplicado, no sistema SAG2, ensaiado com  $i$  variável.

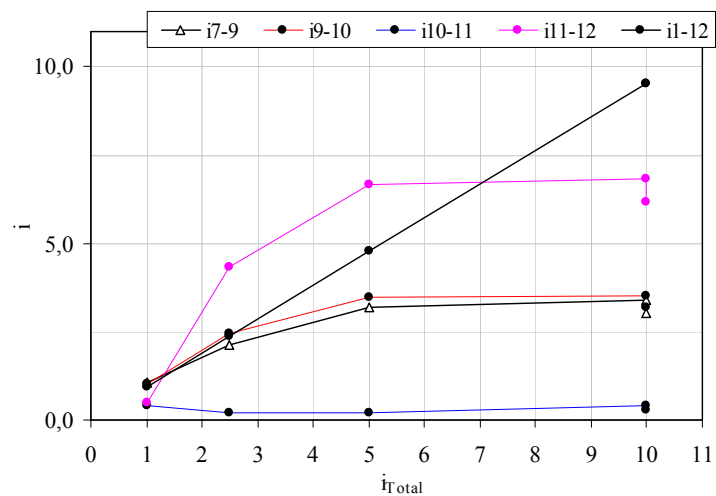


Figura 6.3: Variação do gradiente hidráulico em função do gradiente hidráulico total aplicado, no sistema SAG2, ensaiado com  $i$  variável.

Ao final dos estágios de carregamento constante (0 kPa) e gradiente variável observou-se a heterogeneidade do comportamento hidráulico do corpo de prova. Apesar disso, já na aplicação dos primeiros estágios de carregamento mecânico ocorreu uma tendência à homogeneização. Ao final do estágio de  $i = 10$  e 50 kPa as principais alterações no comportamento do sistema já tinham ocorrido. Nas Figura 6.4 e 6.6 pode-se visualizar este comportamento. Na Figura 6.5 é apresentada a variação da vazão pelo sistema SAG2 ao longo dos estágios em que foram variados os níveis de tensão.

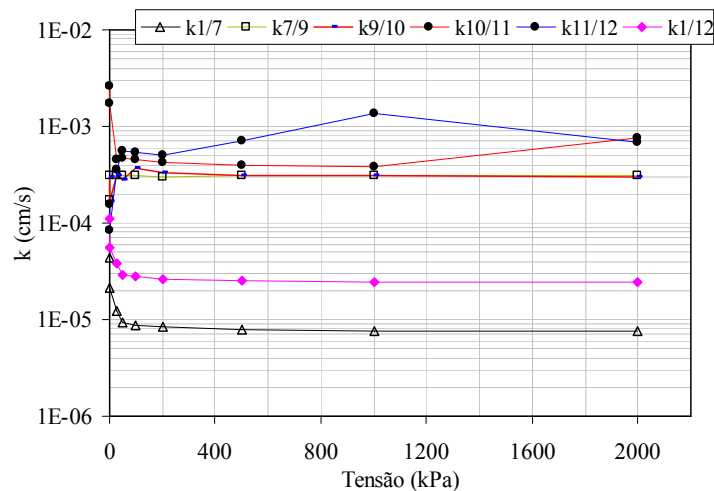


Figura 6.4: Variação da condutividade hidráulica em função do carregamento aplicado, no sistema SAG2, ensaiado com  $i$  variável.

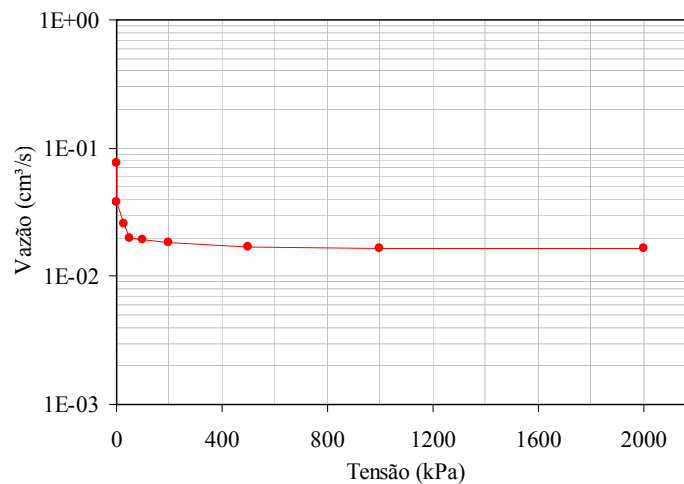


Figura 6.5: Variação da vazão em função do carregamento aplicado, no sistema SAG2, ensaiado com  $i$  variável.

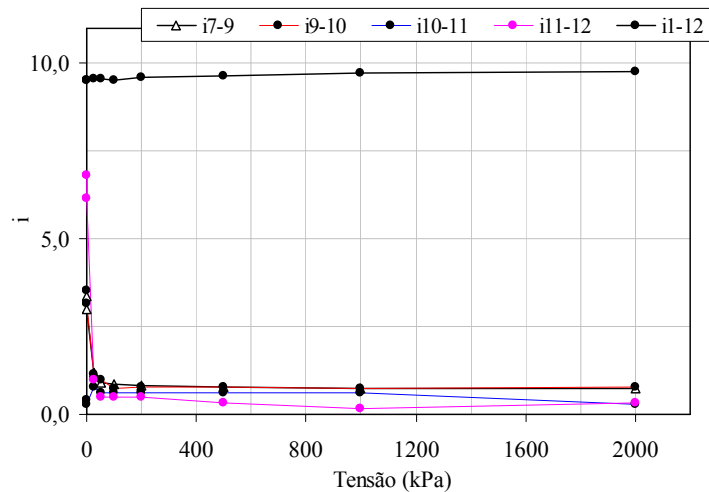


Figura 6.6: Variação do gradiente hidráulico em função do carregamento aplicado, no sistema SAG2, ensaiado com  $i$  variável.

Na Figura 6.7 é apresentada a variação da altura do corpo de provas em função dos carregamentos aplicados.

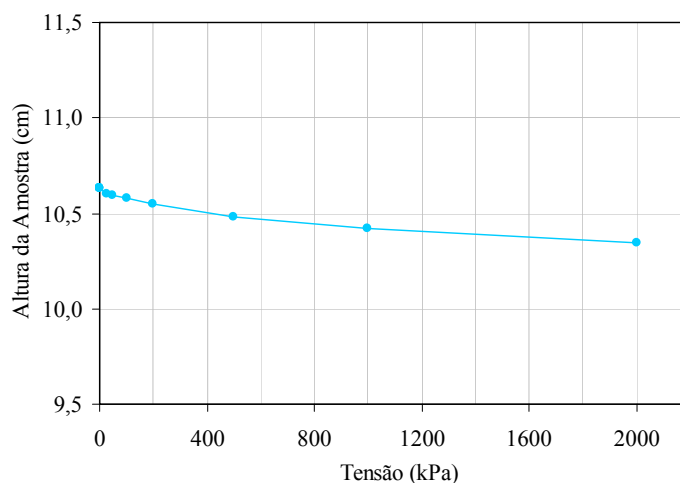


Figura 6.7: Variação da altura do corpo de provas em função do carregamento aplicado, no sistema SAG2, ensaiado com  $i$  variável.

A variação da carga hidráulica no corpo de provas ao longo dos estágios de ensaio (Figura 6.8) mostra que, principalmente a partir do estágio de  $i = 10$  e 0 kPa, ocorreu uma importante perda de carga na região A1. Nos estágios anteriores o sistema se comportou de forma relativamente homogênea. Com o início dos estágios de incremento de tensão foi verificado que a carga hidráulica sofreu suas principais variações até o de 25 kPa.

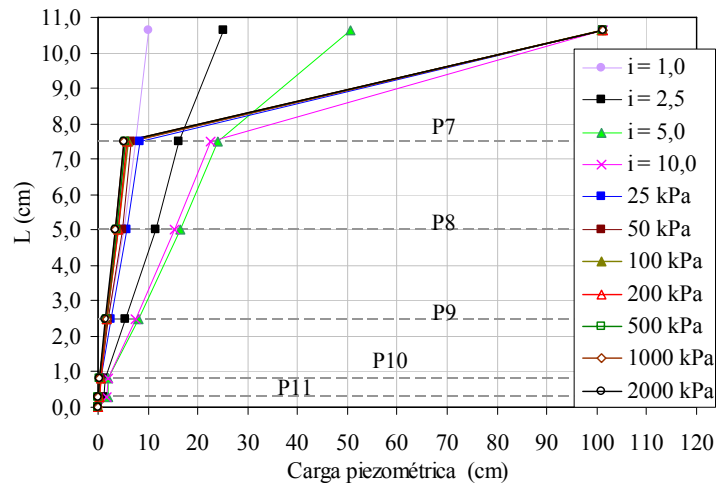


Figura 6.8: Variação da carga hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SAG2, ensaiado com  $i$  variável.

Nas Figura 6.9 e 6.10 se pode observar novamente que as principais alterações no comportamento do sistema SAG2 ocorreram nos estágios de carregamento mecânico constante e gradiente total variável. Após a aplicação da tensão de 25 kPa o sistema tendeu a apresentar um comportamento mais homogêneo. Estas observações indicam a maior interferência da condição de fluxo no comportamento do sistema ensaiado, em relação ao carregamento mecânico.

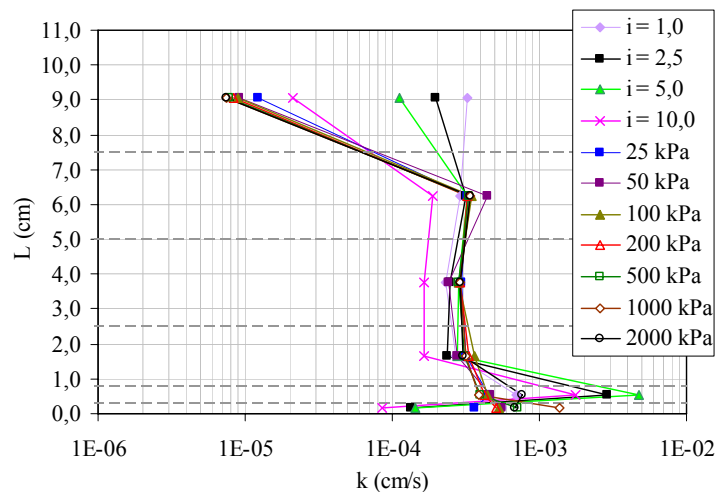


Figura 6.9: Variação da condutividade hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SAG2, ensaiado com  $i$  variável.

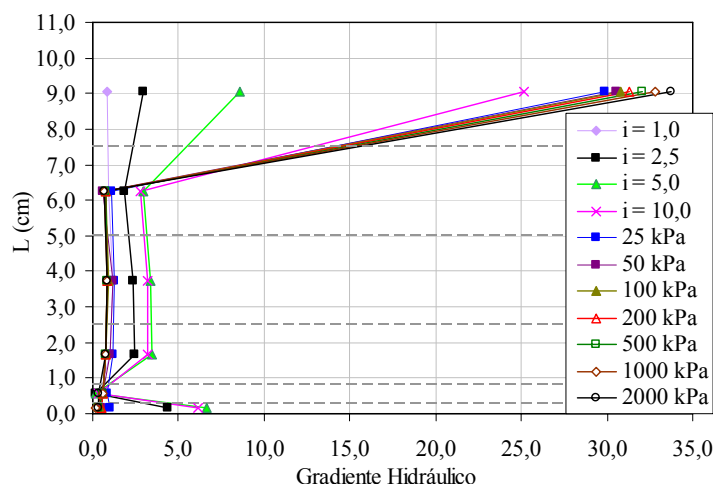


Figura 6.10: Variação do gradiente hidráulico ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SAG2, ensaiado com  $i$  variável.

As curvas de GR ao longo do ensaio (Figura 6.11) são representativas do verificado por meio dos demais parâmetros analisados, tendo sido observadas as principais alterações nos estágios em que foi variado o gradiente hidráulico total e naqueles em que foram aplicados os menores carregamentos mecânicos (até 50 kPa). O  $GR_{3mm}$  ter atingido valores acima de 2 (dois) chama a atenção para a menor condutividade hidráulica da região que contém o geotêxtil para gradientes totais elevados. Porém, ao longo dos estágios de variação dos carregamentos mecânicos aplicados ao sistema SAG2 foi alcançada uma condição de maior estabilidade, inclusive com maior condutividade hidráulica nesta região (A6).

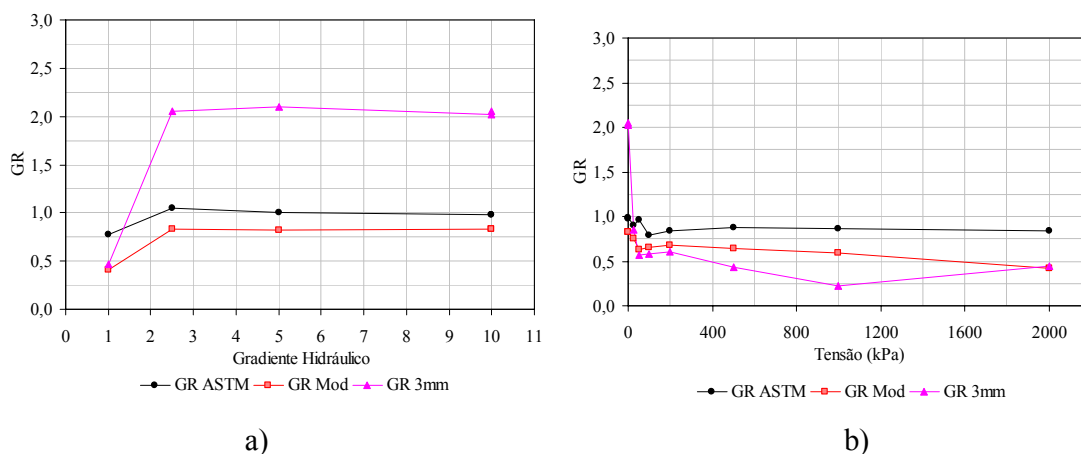


Figura 6.11: Variação da razão entre gradientes no sistema SAG2, ensaiado com  $i$  variável, em função do: a) gradiente hidráulico total aplicado; e b) carregamento aplicado para  $i=10$ .

## 6.2. ENSAIOS COMPLEMENTARES AO GR DO SISTEMA SAG2, COM $1 \leq i \leq 10$

No ensaio de GR com o sistema SAG2 foram coletadas partículas passantes antes da aplicação do fluxo (SAG2.AT) e após a estabilização de cada estágio, seja de variação do

gradiente ( $SAG2.i = 1$ ,  $SAG2.i = 2,5$ ,  $SAG2.i = 5$  e  $SAG2.i = 10$ ) hidráulico total ou do carregamento mecânico aplicado ( $SAG2.25kPa$ ,  $SAG2.50kPa$ ,  $SAG2.100kPa$ ,  $SAG2.200kPa$ ,  $SAG2.500kPa$ ,  $SAG2.1000kPa$  e  $SAG2.2000kPa$ ). Além disso, ao final do ensaio foram coletadas as partículas passantes remanescentes na base do permeâmetro ( $SAG2.AP$ ) e as impregnadas no geotêxtil ( $SAG2.IG$ ). As curvas granulométricas, obtidas no granulômetro a laser, são apresentadas na Figura 6.12. Nesta figura, a variabilidade granulométrica identificada para a amostra SA4 no granulômetro a laser ( $SA4.GL$ ) é apresentada para permitir comparações com os demais resultados.

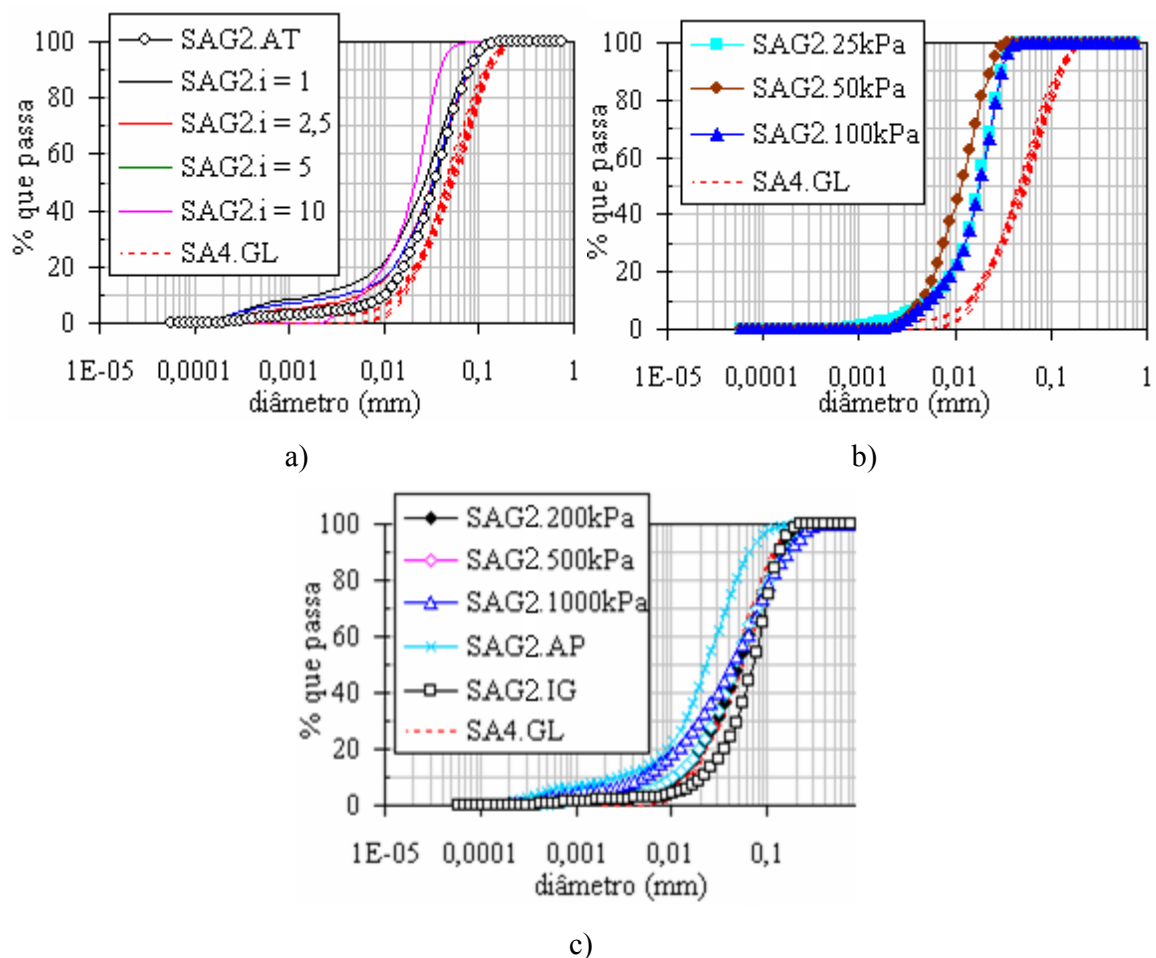


Figura 6.12: Granulometria das partículas que se relacionaram diretamente com o geotêxtil no ensaio de GR do sistema SAG2, ensaiado com  $i$  variável.

Na Figura 6.12a pode ser verificado que a variação do gradiente hidráulico total está associada à perda de partículas finas do rejeito ensaiado através do geotêxtil. Na Figura 6.12b nota-se que isto continuou a ocorrer durante os primeiros estágios de ensaio em que foi variado o carregamento mecânico aplicado ao sistema. Porém, a partir do carregamento de 200 kPa (Figura 6.12c) as curvas granulométricas das partículas passantes pelo geotêxtil apresentaram-se dentro da variabilidade natural da amostra de rejeito ensaiada, com exceção

---

da SAG2.1000kPa que apresentou uma porcentagem maior de partículas com mais de 0,2 mm de diâmetro equivalente. Estas observações indicam a distinção dos efeitos provocados pelos incrementos do gradiente hidráulico e do carregamento mecânico no caso estudado. Os gradientes hidráulicos aplicados não foram suficientes para provocar a perda de partículas de diâmetros superiores à faixa de variação da abertura de filtração do geotêxtil. Já carregamentos mecânicos mais elevados proporcionaram este efeito.

A análise destes resultados com a variação do GR em função do gradiente e do carregamento mecânico aplicado (Figura 6.11) mostra que, ao longo dos estágios de incremento de tensões sob gradiente hidráulico constante e igual a 10, partículas finas eventualmente retidas no geotêxtil durante os estágios anteriores passaram através do geotêxtil, contribuindo para a redução do  $GR_{3mm}$ .

A visualização da superfície do geotêxtil com a lupa permitiu a identificação de fibras relativamente limpas e de furos aparentes provocados pelo agulhamento (Figura 6.13). Na Figura 6.14, obtida com o MEV, se pode notar a condição das fibras (Figura 6.14d), e algumas regiões de grande concentração de partículas no interior do geotêxtil (Figura 6.14b e Figura 6.14c).

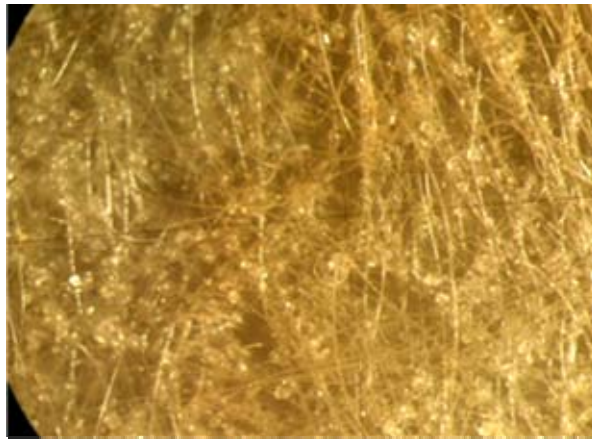


Figura 6.13: Imagem superficial do G1 coletado após o ensaio de GR do sistema SAG2, ensaiado com  $i$  variável.



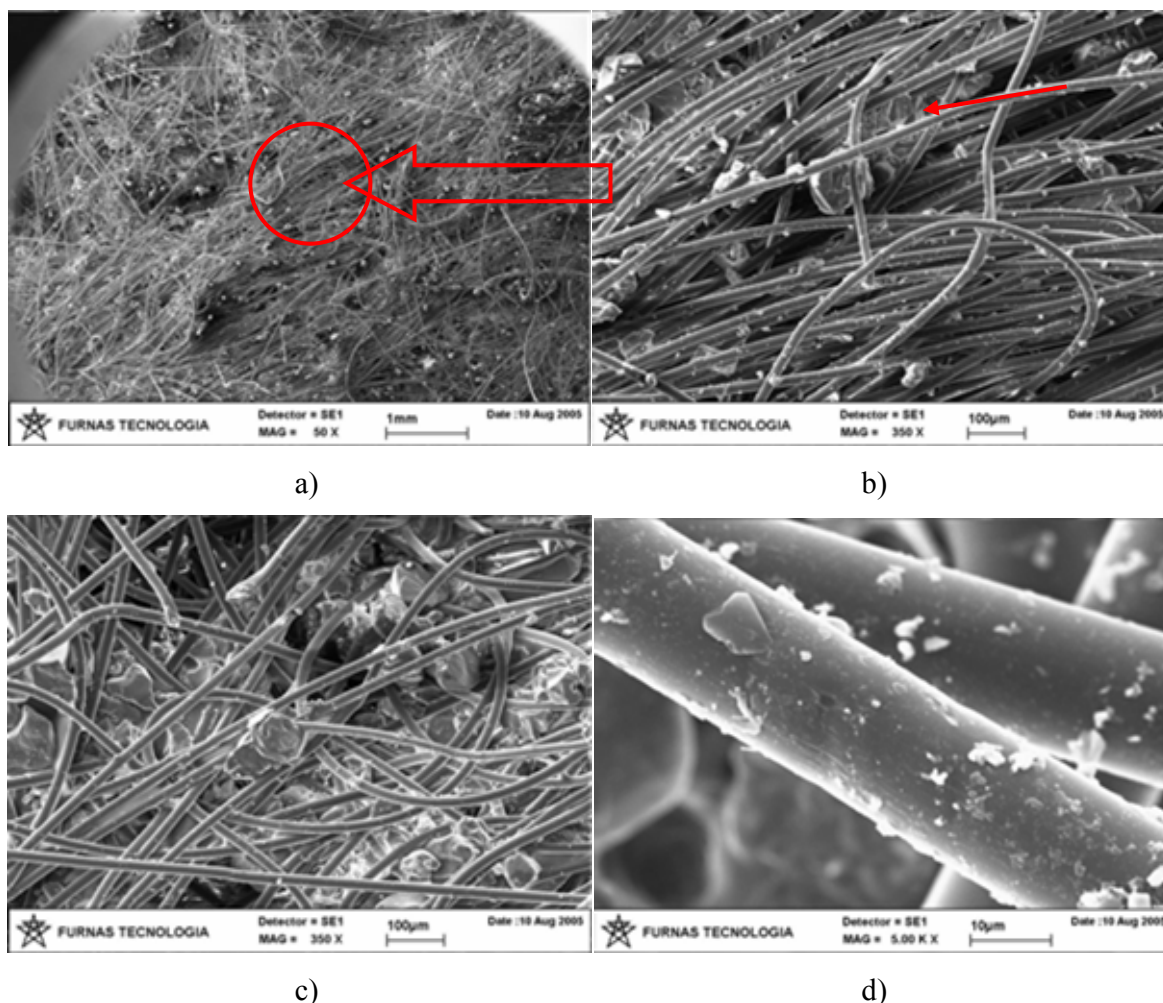


Figura 6.14: Imagens de MEV do geotêxtil do ensaio de GR com o sistema SAG2, ensaiado com  $i$  variável: a) vista geral; b) e c) partículas no interior da amostra; e d) detalhe das fibras.

### 6.3. ENSAIO DE GR DO SISTEMA SLG2, COM $1 \leq i \leq 10$

O comportamento do sistema SLG2 sofreu as principais variações em seu comportamento hidráulico durante os estágios de variação do gradiente hidráulico total e naqueles em que foram aplicados os mais baixos níveis de tensão, notadamente até 200 kPa.

Nas Figura 6.15, 6.16 e 6.17 é apresentada a variação da condutividade hidráulica ( $k$ ), da vazão e do gradiente hidráulico ( $i$ ) ao longo do corpo de provas, respectivamente, diante dos diferentes gradientes hidráulicos totais aplicados. Pode-se notar que no estágio de 0 kPa e  $i = 5$  a condutividade hidráulica do sistema sofreu uma importante redução que, apesar do aumento no gradiente hidráulico, levou à redução da vazão. Aparentemente, este comportamento foi principalmente influenciado pela redução da condutividade hidráulica da área A6 provocada, possivelmente, pela migração de partículas de outras regiões do corpo de prova. Especialmente as regiões A4 e A5 sofreram aumento da condutividade hidráulica, o que indica que pode ter ocorrido perda de partículas finas em direção à região A6. Ao final

dos estágios de variação do gradiente hidráulico total pôde ser observada uma redução de aproximadamente dez vezes na condutividade hidráulica desta região, além da importante elevação do gradiente hidráulico local.

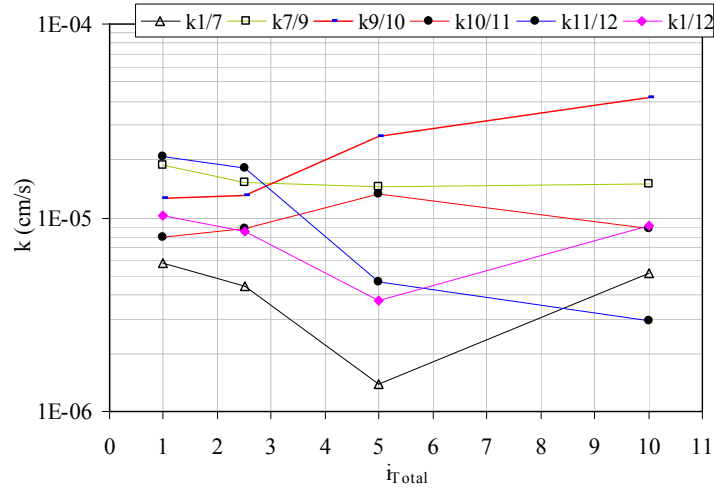


Figura 6.15: Variação da condutividade hidráulica em função do gradiente hidráulico total aplicado, no sistema SLG2, ensaiado com  $i$  variável.

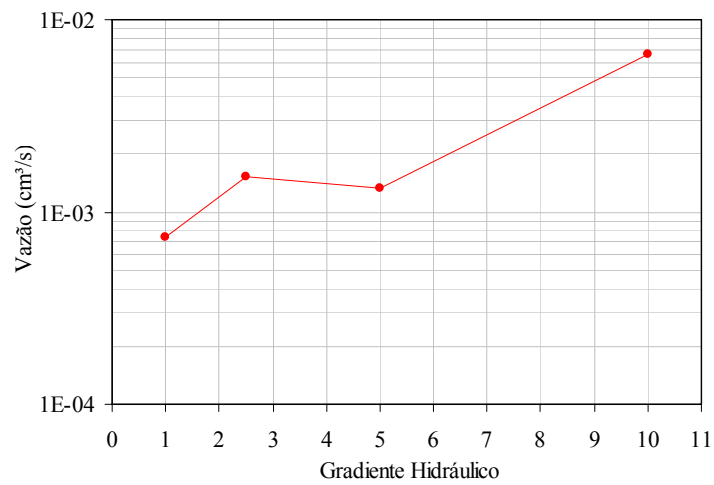


Figura 6.16: Variação da vazão em função do gradiente hidráulico total aplicado, no sistema SLG2, ensaiado com  $i$  variável.

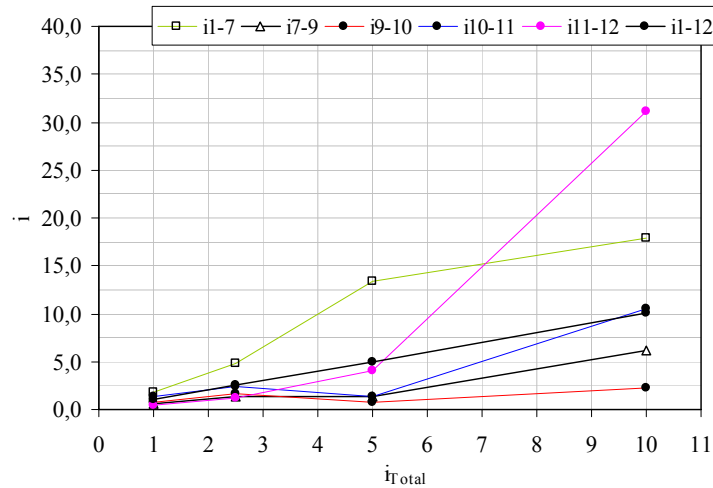


Figura 6.17: Variação do gradiente hidráulico em função do gradiente hidráulico total aplicado, no sistema SLG2, ensaiado com  $i$  variável.

Com o aumento dos níveis de tensão passou a ocorrer uma importante perda de carga na região A1, possivelmente justificada pela maior compactação desta região. Nas Figura 6.18, 6.19 e 6.20 são apresentadas as variações da condutividade hidráulica ( $k$ ), da vazão e do gradiente hidráulico ( $i$ ) em função dos carregamentos aplicados, respectivamente. Pode-se notar que, apesar do sistema ter experimentado poucas variações no seu comportamento hidráulico, o estágio de 200 kPa limita as principais variações observadas.

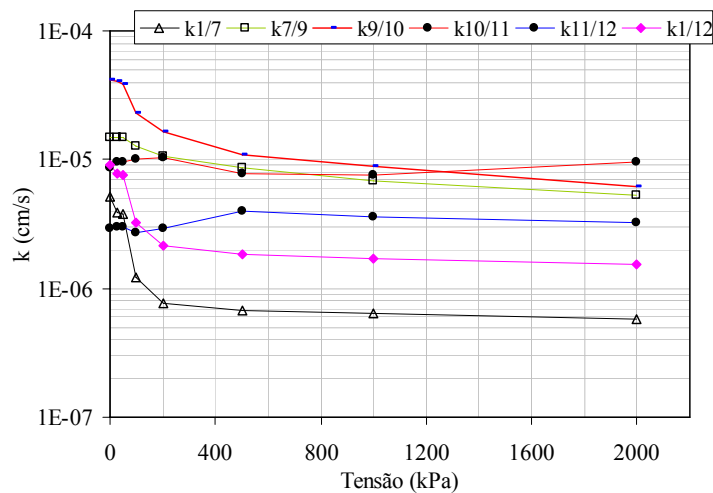


Figura 6.18: Variação da condutividade hidráulica em função do carregamento aplicado, no sistema SLG2, ensaiado com  $i$  variável.

Na Figura 6.21 é apresentada a variação da altura do corpo de provas em função dos carregamentos aplicados.

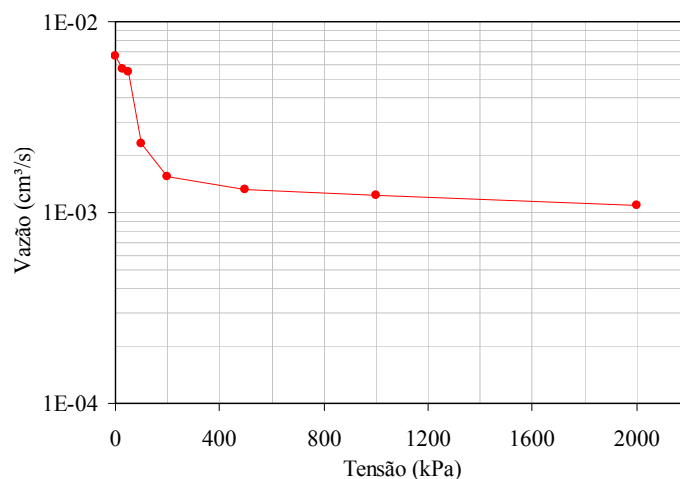


Figura 6.19: Variação da vazão em função do carregamento aplicado, no sistema SLG2, ensaiado com  $i$  variável.

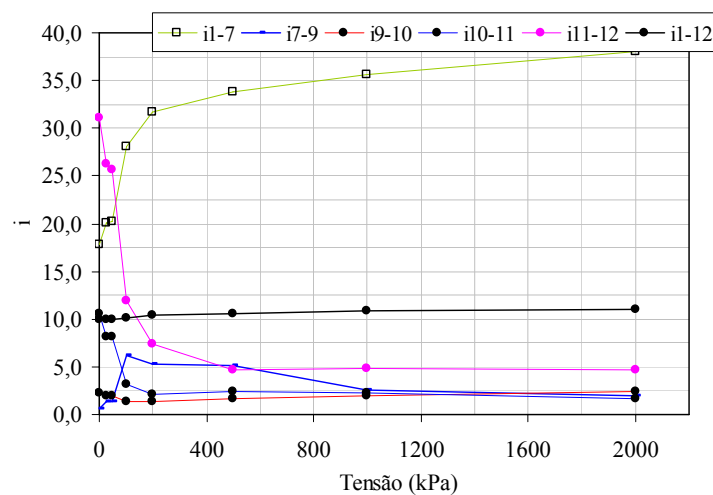


Figura 6.20: Variação do gradiente hidráulico em função do carregamento aplicado, no sistema SLG2, ensaiado com  $i$  variável.

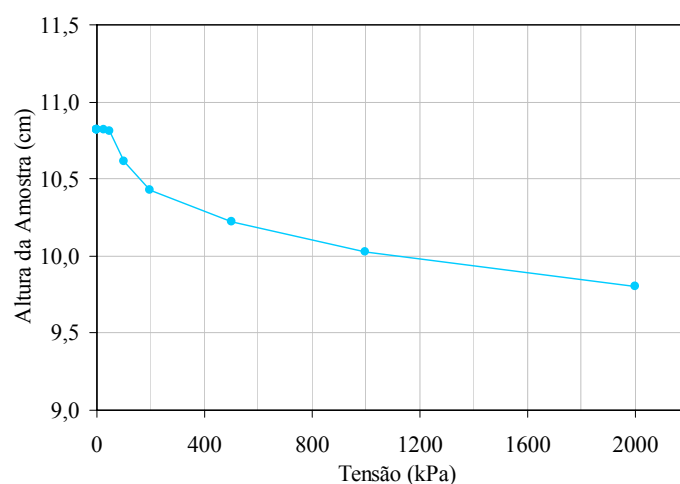


Figura 6.21: Variação da altura do corpo de provas em função do carregamento aplicado, no sistema SLG2, ensaiado com  $i$  variável.

Na avaliação da variação da carga hidráulica ao longo do corpo de provas durante o ensaio (Figura 6.22), além da maior perda de carga observada na região A1 a partir dos estágios de variação do carregamento mecânico, se pôde verificar que o comportamento das regiões centrais do corpo de provas não sofreu grandes alterações. A variação do gradiente hidráulico total aplicado ao sistema promoveu as principais alterações, notadamente o  $i = 5$  e  $10$  (Figura 6.22, Figura 6.23 e Figura 6.24). Novamente se pode notar que, ao serem variados os níveis de carregamento para um mesmo gradiente hidráulico total, as principais alterações ocorrem nos estágios de menores tensões. No caso, foram observadas as maiores variações nos estágios em foram aplicadas tensões de até 100 kPa.

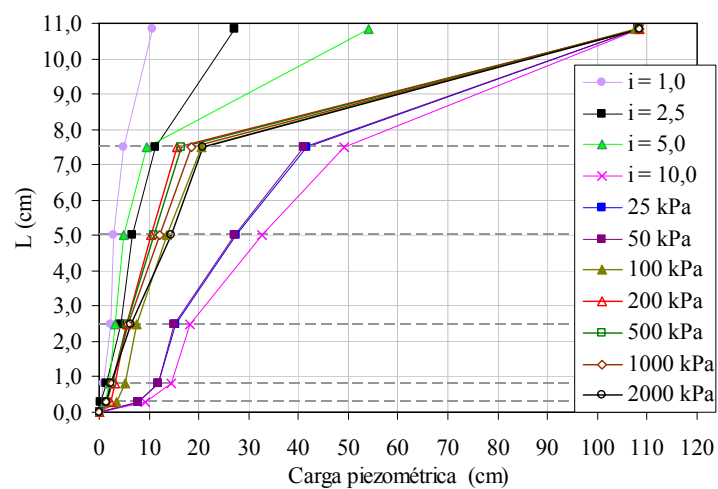


Figura 6.22: Variação da carga hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SLG2, ensaiado com  $i$  variável.

Na Figura 6.23 pode-se observar que no estágio de 0 kPa e  $i = 10$  ocorreu uma redução da condutividade hidráulica da região A6 acompanhada do aumento na região A5. Isto, especialmente diante do importante aumento do gradiente hidráulico local observado (Figura 6.24), indica a possível migração de partículas em direção à região A6, que contém o geotêxtil.

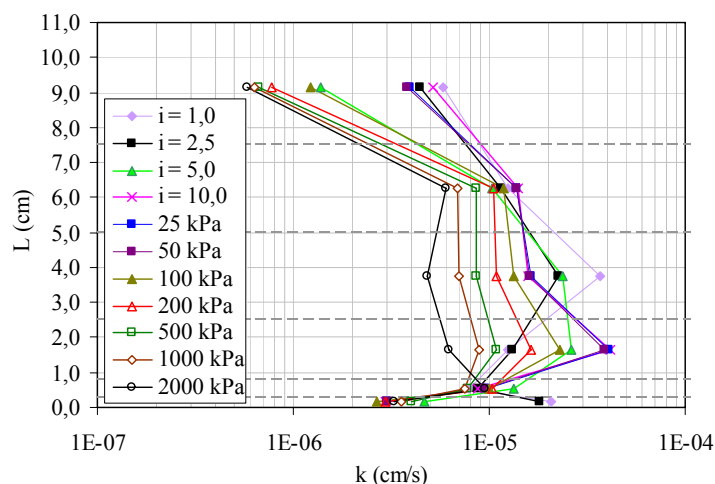


Figura 6.23: Variação da condutividade hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SLG2, ensaiado com  $i$  variável.

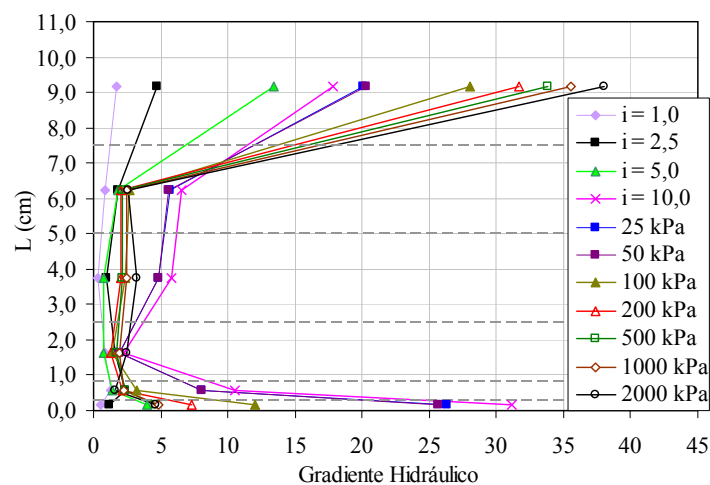


Figura 6.24: Variação do gradiente hidráulico ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema SLG2, ensaiado com  $i$  variável.

As curvas de GR ao longo do ensaio (Figura 6.25) são representativas do verificado por meio dos demais parâmetros analisados, tendo sido observadas as maiores alterações durante os estágios em que foi variado o gradiente hidráulico total e naqueles em que foram aplicados os menores carregamentos mecânicos. Nestas curvas destacam-se os estágios de  $i = 5$  e  $10$  e  $0$  kPa, além do S de  $i = 10$  e  $25$  a  $500$  kPa. Também se nota que os carregamentos mecânicos tendem a melhorar o comportamento do sistema reduzindo a heterogeneidade de gradientes hidráulicos ao longo do corpo de provas. Apesar disso, ao final do ensaio foi observado um  $GR_{3mm}$  acima de  $2$  (dois), o que novamente chama a atenção para a possibilidade de redução da condutividade hidráulica da região que contém o geotêxtil (A6).

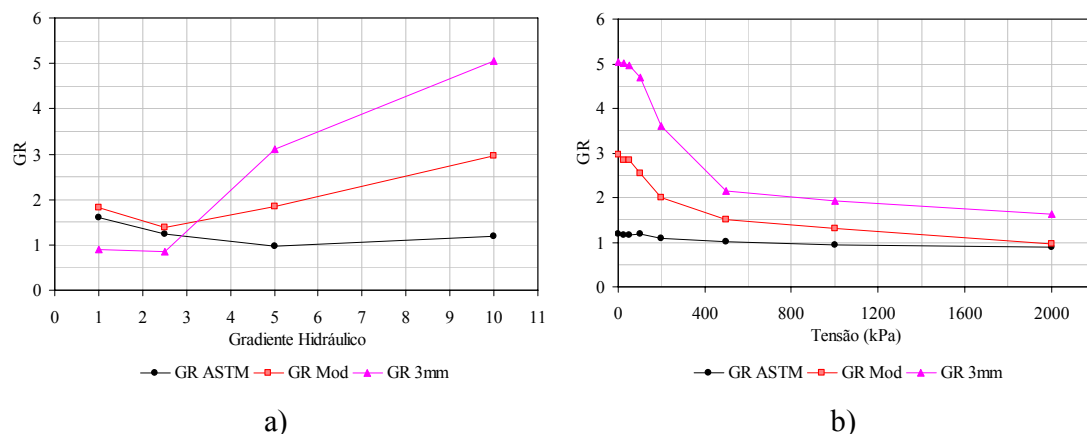


Figura 6.25: Variação da razão entre gradientes no sistema SLG2, ensaiado com  $i$  variável, em função do: a) gradiente hidráulico total aplicado; e b) carregamento aplicado para  $i=10$ .

#### 6.4. ENSAIOS COMPLEMENTARES AO GR DO SISTEMA SLG2, COM $1 \leq i \leq 10$

Foram coletadas partículas ao longo de todo o corpo de provas, após o ensaio, próximo aos piezômetros 7 (SLG2.7), 9 (SLG2.9), 10 (SLG2.10) e 11 (SLG2.11), além de partículas passantes através do geotêxtil antes (SLG2.AT) e após (SLG2.AP) a realização do ensaio e retidas no geotêxtil (SLG2.IG). A análise granulométrica destas partículas forneceu os resultados apresentados nas Figura 6.26 e 6.27. O comportamento destas curvas granulométricas é bastante semelhante ao verificado para o sistema SLG2 ensaiado no GR com  $i = 1$ . Ao longo do corpo de provas não pôde ser identificada variabilidade granulométrica (Figura 6.26). As curvas da Figura 6.27 mostram que apenas partículas mais finas do rejeito passaram pelo geotêxtil durante o ensaio (SLG2.AP), sendo que mais grossas ficaram retidas sobre (SLG2.SG) ou no interior (SLG2.IG) do geotêxtil. Nestas figuras, a variabilidade granulométrica identificada para a amostra SL3 no granulômetro a laser (SL3.GL) é apresentada para permitir comparações com os demais resultados.

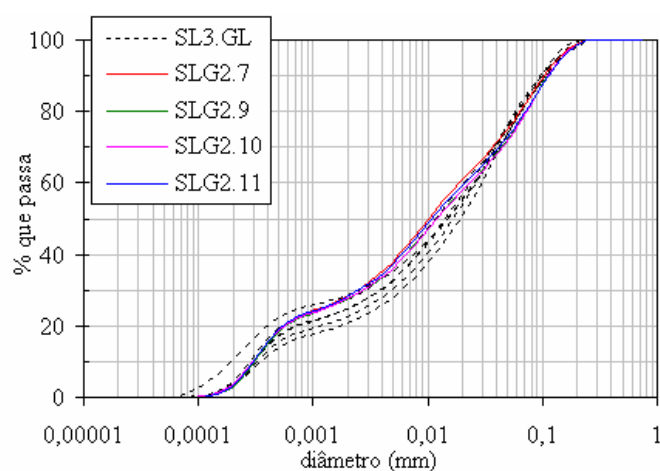


Figura 6.26: Granulometria das partículas coletadas ao longo do corpo de provas do ensaio de GR do sistema SLG2, ensaiado com  $i$  variável.

Como no caso do ensaio de GR com gradiente hidráulico variável do sistema SAG2, pode-se notar que a variação na condição de fluxo aparentemente provocou a migração de partículas finas do rejeito ensaiado. Parte destas partículas ficou retida na região A6 o que favoreceu a elevação do GR nesta região nos estágios de gradiente hidráulico variável. Com a estabilização do gradiente hidráulico e a variação dos carregamentos aplicados parte destas partículas também foi perdida através do geotêxtil, o que, após os primeiros estágios de incremento de tensão, favoreceu a redução relativa do gradiente local. Apesar disso, ao final do ensaio a condutividade hidráulica da região A6 ainda foi cinco vezes menor que a média do sistema.

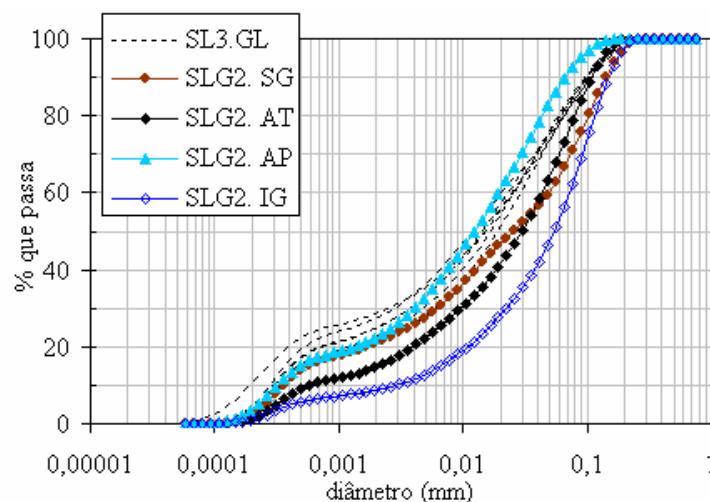


Figura 6.27: Granulometria das partículas que se relacionaram diretamente com o geotêxtil no ensaio de GR do sistema SLG2, ensaiado com  $i$  variável.

Na Figura 6.28 é apresentada a superfície do G2 utilizado no GR do sistema SLG2 obtida com a lupa. Foram identificados furos gerados pelo agulhamento e a ocorrência de aglomerados de partículas. Na Figura 6.29 são apresentadas imagens obtidas com o MEV, em que se pôde visualizar a interação das partículas com o geotêxtil. Vale destacar a grande quantidade de partículas finas aderidas às fibras, observada na Figura 6.29b.



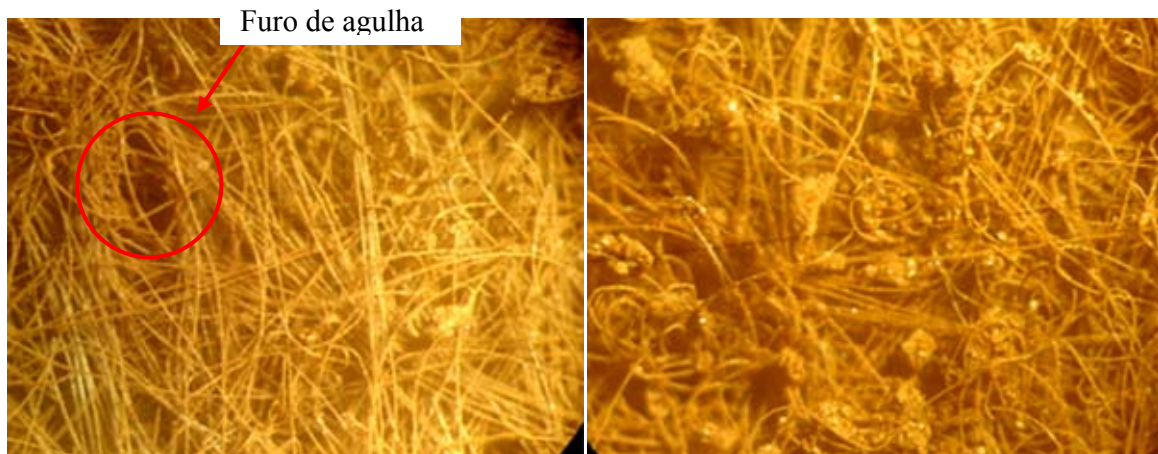
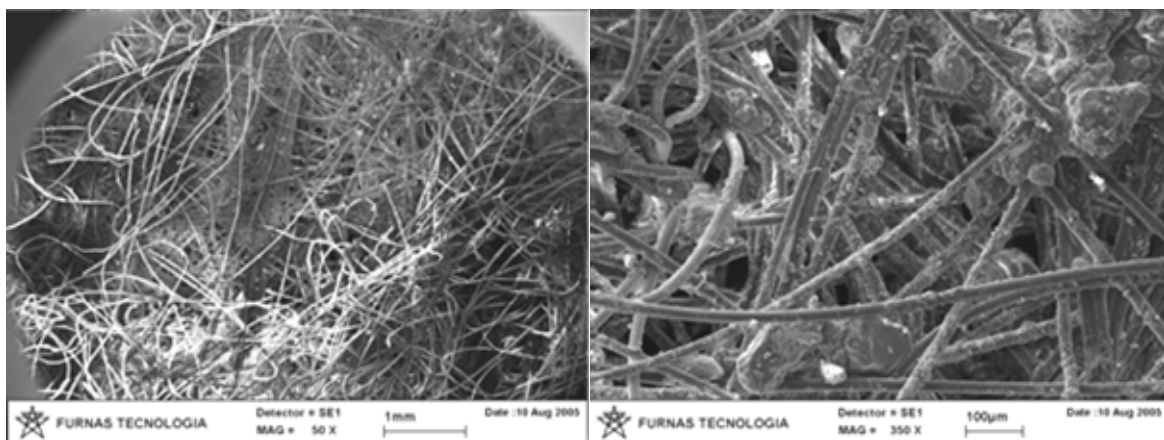


Figura 6.28: Imagem superficial do G2 coletado após o ensaio de GR do sistema SLG2, ensaiado com  $i$  variável.



a)

b)

Figura 6.29: Imagens de MEV do geotêxtil do ensaio de GR com o sistema SLG2, ensaiado com  $i$  variável: a) Vista geral da amostra; b) aglomerados de partículas no interior da amostra.

### 6.5. ENSAIO DE GR DO SISTEMA FAG1, COM $1 \leq i \leq 10$

Nas Figuras 6.30 a 6.35 pode ser verificado que os resultados dos estágios de variação do gradiente hidráulico total, em que ocorreu um aumento da heterogeneidade inicial do corpo de provas, e daqueles de incremento de tensões. Apesar do sistema FAG1 ter se comportado de forma relativamente constante ao longo de todo o ensaio, pôde-se identificar o estágio de aplicação de 200 kPa como limite para as principais alterações observadas. Também deve ser destacada a maior condutividade hidráulica das regiões A5 e A6, mais próximas do geotêxtil, durante todo o ensaio.

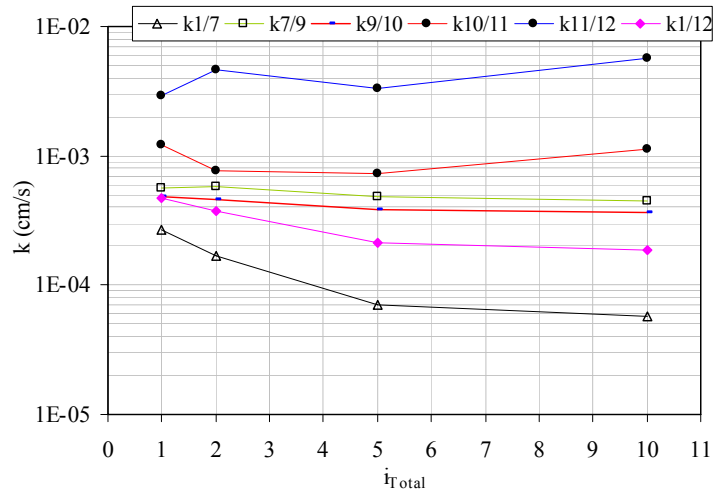


Figura 6.30: Variação da condutividade hidráulica em função do gradiente hidráulico total aplicado, no sistema FAG1, ensaiado com  $i$  variável.

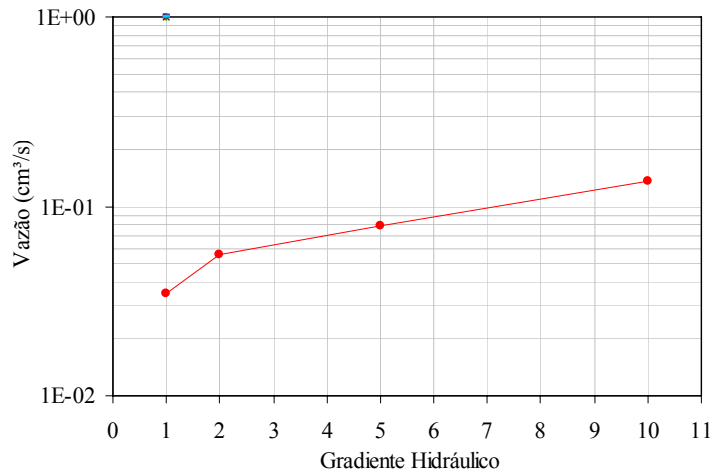


Figura 6.31: Variação da vazão em função do gradiente hidráulico total aplicado, no sistema FAG1, ensaiado com  $i$  variável.

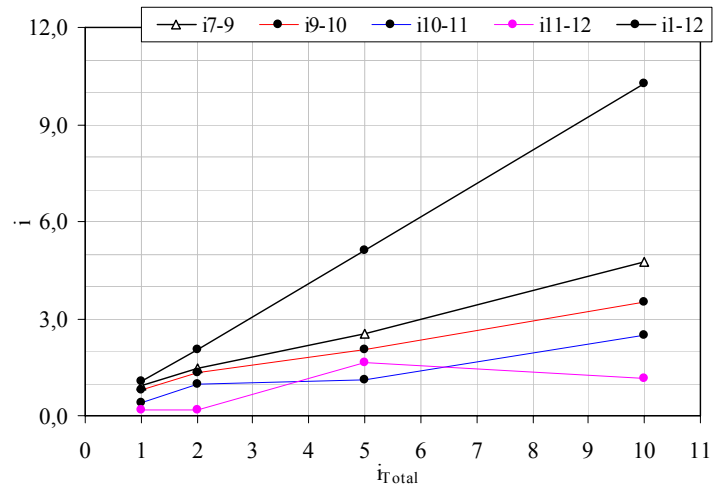


Figura 6.32: Variação do gradiente hidráulico em função do gradiente hidráulico total aplicado, no sistema FAG1, ensaiado com  $i$  variável.

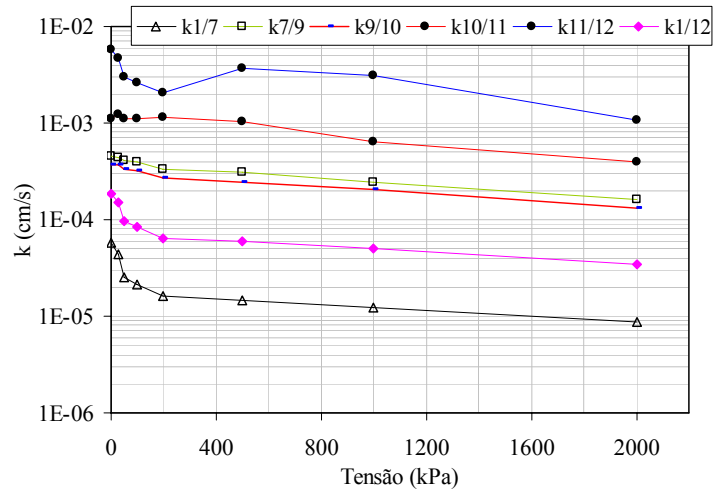


Figura 6.33: Variação da condutividade hidráulica em função do carregamento aplicado, no sistema FAG1, ensaiado com  $i$  variável.

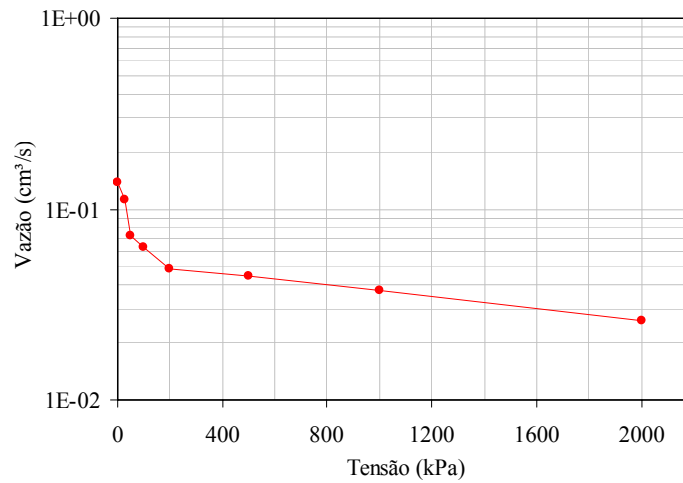


Figura 6.34: Variação da vazão em função do carregamento aplicado, no sistema FAG1, ensaiado com  $i$  variável.

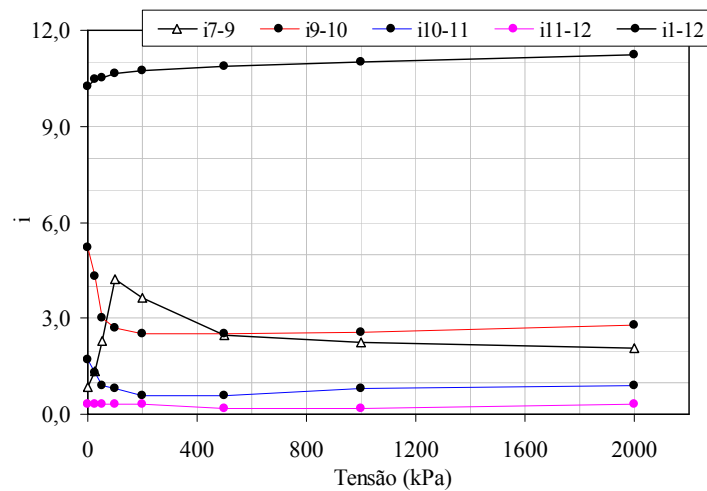


Figura 6.35: Variação do gradiente hidráulico em função do carregamento aplicado, no sistema FAG1, ensaiado com  $i$  variável.

Na Figura 6.36 é apresentada a variação da altura do corpo de provas em função dos carregamentos aplicados.

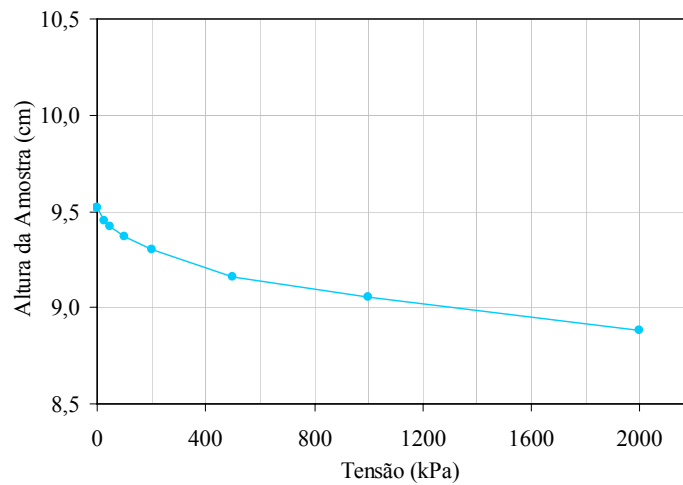


Figura 6.36: Variação da altura do corpo de provas em função do carregamento aplicado, no sistema FAG1, ensaiado com  $i$  variável.

Nas Figuras 6.37, 6.38 e 6.39 pode-se notar que os estágios de maior incremento do gradiente hidráulico e de menores níveis de tensão aplicados são aqueles em que ocorreram as principais alterações no comportamento do sistema FAG1. Podem ser destacados os estágios compreendidos entre a aplicação de  $i = 10$ , com 0 kPa, e 50 kPa com  $i = 10$ . Cabe ressaltar a pequena variação na carga hidráulica medida para as regiões A5 e A6 ao longo de todo o ensaio, o que refletiu na sua maior condutividade hidráulica.

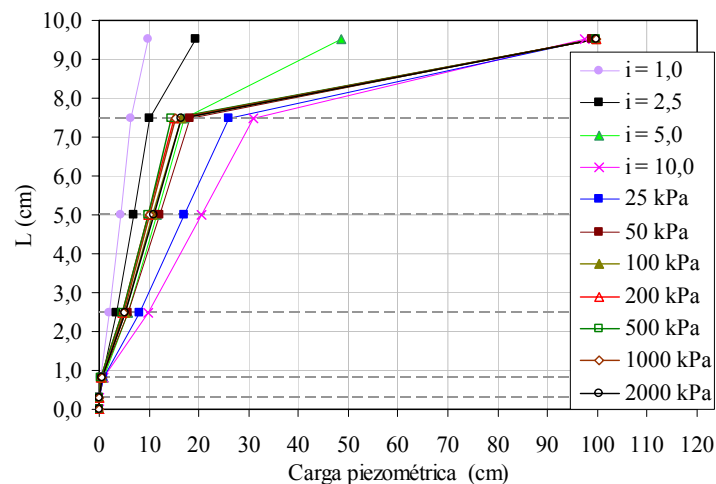


Figura 6.37: Variação da carga hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema FAG1, ensaiado com  $i$  variável.

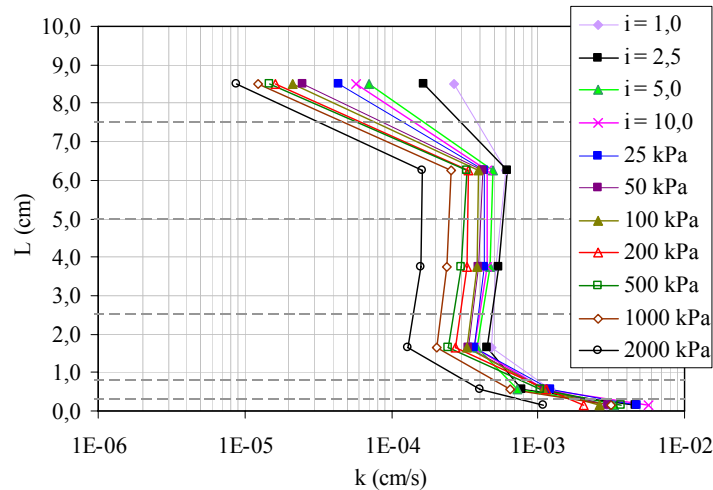


Figura 6.38: Variação da condutividade hidráulica ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema FAG1, ensaiado com  $i$  variável.

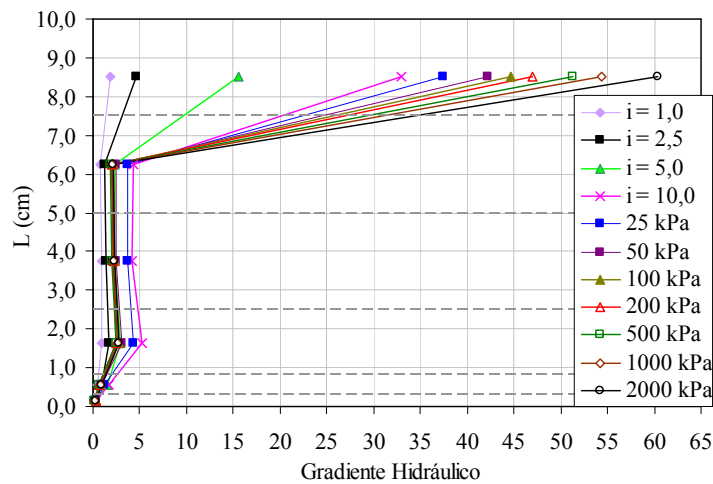


Figura 6.39: Variação do gradiente hidráulico ao longo do corpo de provas para os diferentes carregamentos aplicados ao sistema FAG1, ensaiado com  $i$  variável.

Os valores de GR ao longo do ensaio (Figura 6.40) se mostraram aproximadamente constantes ao longo de todo o ensaio, de forma coerente com os resultados dos demais parâmetros analisados. A ocorrência de valores abaixo de 0,5 para aquelas regiões mais próximas do geotêxtil ( $GR_{Mod}$  e  $GR_{3mm}$ ) é indicativo da perda excessiva de partículas destas regiões do sistema através do geotêxtil.

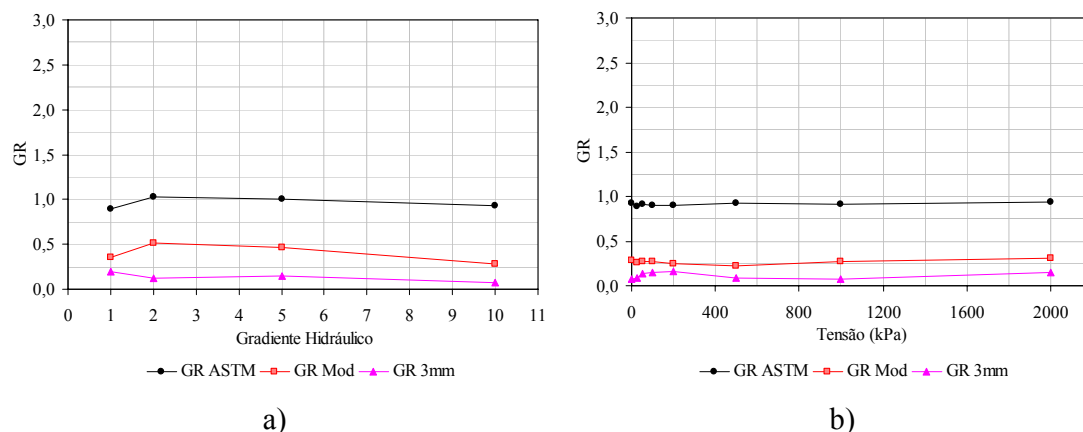


Figura 6.40: Variação da razão entre gradientes no sistema FAG1, ensaiado com  $i$  variável, em função do: a) gradiente hidráulico total aplicado; e b) carregamento aplicado.

### 6.6. ENSAIOS COMPLEMENTARES AO GR DO SISTEMA FAG1, COM $1 \leq i \leq 10$

No ensaio de GR com o sistema FAG1 foram coletadas partículas passantes antes da aplicação do fluxo (FAG1.AT), após cada estágio em que foi variado o gradiente hidráulico (FAG1.i = 1, FAG1.i = 2, FAG1.i = 5, FAG1.i = 10,), após o último carregamento aplicado (FAG1.25 a 2000kPa) e após a desmontagem do ensaio (FAG1.AP). Além destas, também foram coletadas as partículas impregnadas no geotêxtil (FAG3.IG) (Figura 6.41).

Como no caso dos demais ensaios de GR em que foi aplicado fluxo sob diferentes gradientes, no ensaio com o sistema FAG1 foi verificado que no final dos estágios de incremento de gradiente hidráulico foram coletadas uma maior quantidade de partículas finas. Com os incrementos de tensão observou-se um aumento na quantidade de partículas mais grossas passando pelo geotêxtil. Apesar disso, mesmo as partículas impregnadas no geotêxtil apresentaram uma maior quantidade de partículas finas que o rejeito ensaiado. A faixa de variação da abertura de filtração do G1 limita diâmetros inferiores aos das partículas coletadas no interior do geotêxtil (FAG1.IG). A variabilidade granulométrica identificada para a amostra FA1 no granulômetro a laser (FA1.GL) é apresentada nas figuras abaixo para permitir comparações com os demais resultados.

Na Figura 6.42 são apresentadas imagens obtidas com o MEV. Destaque é dado à mineralogia variada das partículas encontradas no interior do geotêxtil e revestindo suas fibras (Figura 6.42 a , Figura 6.42 b , Figura 6.43 e Figura 6.44).

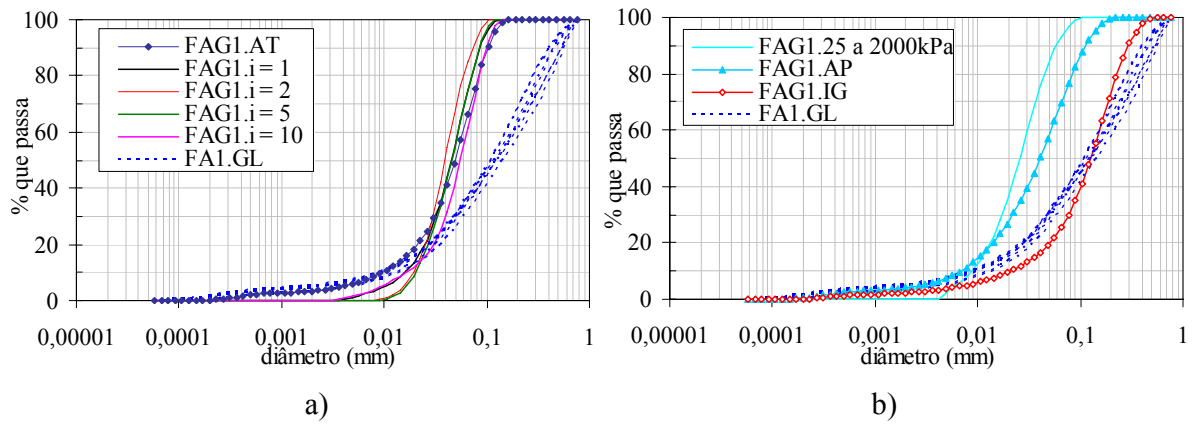


Figura 6.41: Granulometria das partículas que se relacionaram diretamente com o geotêxtil no ensaio de GR do sistema SLG1, ensaiado com  $i$  variável.

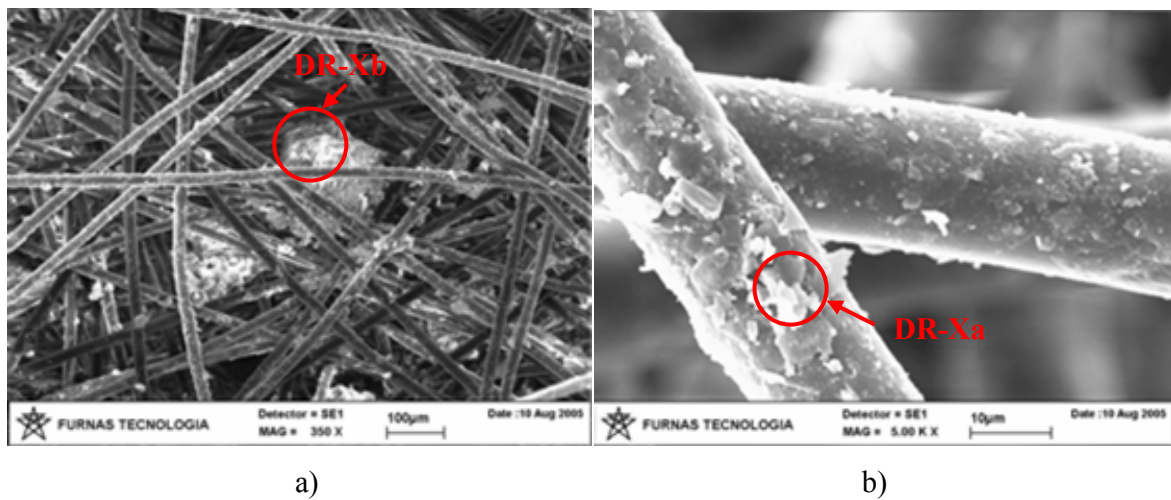


Figura 6.42: Imagens de MEV do geotêxtil do ensaio de GR com o sistema FAG1, ensaiado com  $i$  variável: a) partículas no interior da amostra; b) detalhe das fibras.

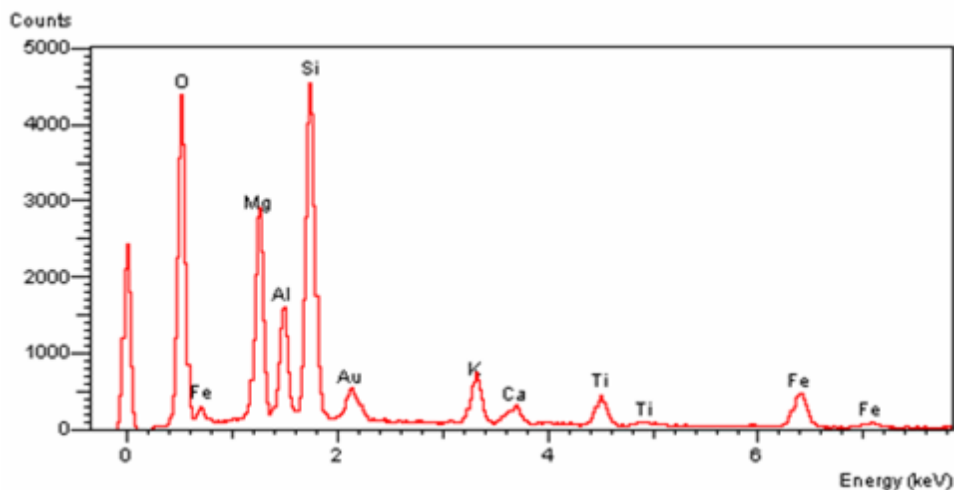


Figura 6.43: Minerais envolvendo fibra têxtil do sistema FAG1, ensaiado com  $i$  variável (DR-Xa).

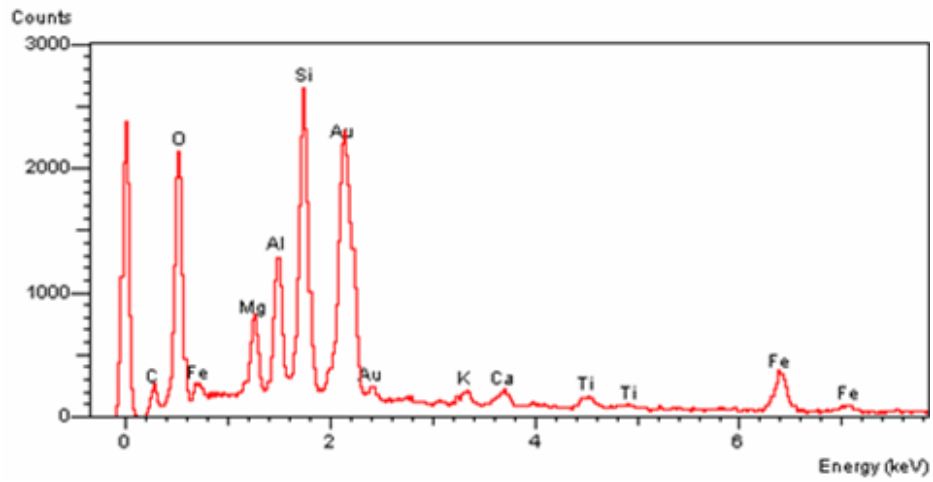


Figura 6.44: Minerais encontrados no interior do geotêxtil do sistema FAG1, ensaiado com i variável (DR-Xb).



## **CAPÍTULO 7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

---

### **7.1. CONCLUSÕES**

Neste trabalho foi estudado o comportamento dreno-filtrante de geotêxteis quando empregados em dispositivos de filtração e drenagem de barragens de rejeito. Para tanto foram realizadas investigações de campo e laboratório acerca das principais variáveis envolvidas no processo de filtração destes dispositivos. Estas investigações permitiram a caracterização do processo de filtração ocorrente e a identificação de agentes intervenientes.

O processo de filtração é especialmente regido pela sua geometria como um todo e dos materiais envolvidos, pela interação entre estes materiais e pela intensidade das forças perturbadoras. As investigações de campo foram realizadas em barragens de contenção de rejeitos, alteadas com os próprios materiais a serem contidos, de minerações de minérios de ferro e rocha fosfática. Nestas investigações a condição de fluxo ocorrente foi qualificada como a principal força perturbadora. A geometria geral das estruturas de contenção de rejeitos, assim como dos respectivos sistemas de filtração e drenagem interna, foi caracterizada mediante avaliações dos respectivos projetos. Foi constatada a predominância da adoção de drenos horizontais (tapetes drenantes) em barragens de rejeito alteadas pela técnica de aterro hidráulico, com algumas possibilidades de drenos verticais e inclinados. A geometria dos materiais envolvidos, no caso os rejeitos e os geotêxteis, foi caracterizada após coleta de amostras representativas e estudos em laboratório.

No caso dos geotêxteis esta caracterização geométrica foi feita com base principalmente em informações obtidas dos projetos das barragens estudadas e da exumação de uma amostra no campo. Chegou a ser observado, inclusive, que a especificação de projeto para a amostra exumada (G1) não foi seguida, tendo sido constatada a utilização do geotêxtil G2. A geometria dos rejeitos foi avaliada com base numa amostragem de campo, ao longo dos respectivos caminhos de deposição nas barragens, e avaliações de laboratório da variabilidade dos seus parâmetros granulométricos. Foi observada uma uniformidade granulométrica dos rejeitos ao longo dos respectivos caminhos de deposição, especialmente do SA4 e do FA1. No caso da lama de rejeito de minério de ferro, SL3, a maior variabilidade pode estar associada ao procedimento de amostragem utilizado, que empregou uma retroescadeira como ferramenta.

---

A interação entre rejeitos e geotêxteis no campo foi caracterizada especialmente com base nos resultados da avaliação da amostra de geotêxtil exumada. Apesar dos danos provocados durante o processo de amostragem, puderam ser identificados danos provavelmente provocados pelos materiais adjacentes ao geotêxtil no campo, notadamente a tela metálica e o enrocamento que compõem o sistema de drenagem. A avaliação da variabilidade do grau de impregnação identificou uma grande dispersão ao longo da amostra, observação também caracterizada no estudo da granulometria das partículas retidas no interior da malha têxtil. Inclusive, grãos maiores que a faixa de abertura de filtração fornecida pelo fabricante foram encontrados nesta caracterização. A análise da amostra exumada com recursos de microscopia ótica e eletrônica de varredura permitiu a visualização de áreas em que os poros estavam muito impregnados por partículas, podendo ser qualificadas como ocorrências localizadas de cegamento e bloqueamento, qualificando uma importante restrição ao fluxo de água. A difratometria de raios X dos materiais encontrados revestindo as fibras em algumas regiões identificou a grande ocorrência de compostos de ferro. Também foi coletada uma amostra de rejeito fino (lama) no contato com o geotêxtil exumado para caracterização. A granulometria dos materiais encontrados no interior da malha têxtil, em alguns casos, apresentou diâmetros superiores aos desta amostra, o que leva a conclusão de que outros materiais distintos da lama também foram submetidos ao contato com o geotêxtil exumado.

De forma complementar, foi avaliada a variabilidade do índice de vazios de alguns rejeitos ao longo da superfície dos respectivos caminhos de deposição. No caso do rejeito SA4, também foi avaliada a variabilidade da condutividade hidráulica superficial. Tanto no caso do índice de vazios quanto da condutividade hidráulica foi observada uma grande variabilidade ao longo do caminho de deposição, não tendo sido possível sua associação com a distância ao ponto de lançamento das polpas dos rejeitos. Tal fato pode estar associado à segregação vertical (estratificação) observada nos rejeitos depositados hidraulicamente. À título de comparação com os resultados de campo também foi avaliada a condutividade hidráulica de alguns dos rejeitos com base nas propostas empíricas de Hazen e Terzaghi (Espósito, 2000). Estas formulações levaram a resultados médios até cem vezes superiores aos da condutividade hidráulica superficial média de campo.

No laboratório, as 20 amostras de rejeito coletadas no campo (13 de rejeitos de minérios de ferro e 7 de rocha fosfática) foram caracterizadas de forma a permitir a avaliação dos respectivos potenciais à instabilidade interna. Nesta avaliação foram utilizadas as propostas

---

metodológicas de Sherard (1976), Kenney e Lau (1985) e Lafleur *et al.* (1989). Segundo a proposta de Sherard (1976), voltada para a comparação de diâmetros característicos do material estudado, todas as amostras foram classificadas como sendo potencialmente estáveis internamente. Por meio da proposta de Lafleur *et al.* (1989), que propõe a avaliação qualitativa da forma da curva granulométrica do material, foi classificado o maior número de amostras como sendo potencialmente instáveis internamente. Já ao ser empregada a metodologia de Kenney e Lau (1985), que considera tanto parâmetros característicos da geometria das partículas como também da forma da curva granulométrica, apenas algumas amostras de rejeito fino (lama) de minério de ferro e uma de rocha fosfática foram classificadas como potencialmente instáveis internamente. Com base nestes resultados, foram selecionadas as amostras SA4, SL3 e FA1, como sendo representativas de cada tipo de rejeito estudado, para serem utilizadas nos ensaios de filtração do tipo razão entre gradientes em laboratório. Cabe ressaltar a semelhança observada entre a amostra SL3 e a LGE coletada próximo ao geotêxtil exumado no campo.

Estas amostras selecionadas foram, então, submetidas à caracterização em laboratório, tendo sido realizados estudos da sua plasticidade, forma dos grãos, mineralogia e físico-química. As amostras mais grossas foram classificadas como não plásticas, com base nos ensaios de limites de consistência. A forma geral dos grãos observada é bastante coerente com os resultados da análise mineralógica, tendo sido observadas partículas de formas variadas (lamelares a equidimensionais). A análise físico-química dos rejeitos permitiu a identificação de pH básico e importante capacidade de troca catiônica (CTC) que favorecem a solubilização de minerais presentes, como é o caso do ferro solúvel (Fe) que também ocorre em importantes concentrações nas amostras estudadas. Estes estudos foram aproveitados e complementados para avaliar os métodos de determinação granulométrica mais utilizados em geotecnia, a sedimentação e o peneiramento, em confronto com o ensaio de granulometria a laser. Neste sentido foi avaliado o efeito da mineralogia, traduzidos na massa específica e na forma dos grãos, nos resultados destes ensaios. A análise paramétrica permitiu a verificação de que a massa específica dos grãos pouco interferiu nos resultados dos ensaios de granulometria por sedimentação e peneiramento. O mesmo ocorreu nos estudos com o granulômetro, que forneceram curvas granulométricas com fração grossa semelhante à obtida por peneiramento. A distinção observada entre a fração fina destas curvas e os resultados dos ensaios de sedimentação pode estar associado tanto a variabilidade de formas das partículas como

---

também a um maior efeito defloculante do ultra-som do equipamento granulômetro a laser que o defloculante químico utilizado no procedimento convencional.

Como especialmente os rejeitos de minério de ferro selecionados apresentaram uma importante quantidade de partículas finas ( $\% < 0,075$  mm) optou-se pela investigação do eventual potencial à dispersibilidade dos rejeitos selecionados para o ensaio de GR. Foi utilizada a proposta de Volk (1934), citado por Sherard (1976), considerando a fração argila analisada limitada, primeiro, pelo diâmetro de 0,002 mm e, depois, por 0,005 mm. Apenas a amostra SA4 apresentou potencial à dispersibilidade mas, como sua fração de partículas menores que 0,005 mm é muito pequena, conclui-se que este resultado não indica o comprometimento de seu comportamento como um todo.

Caracterizados os rejeitos, foi feita a caracterização dos geotêxteis a serem utilizados nos ensaios de laboratório. Esta caracterização se baseou na avaliação da variabilidade da gramatura do geotêxtil e na visualização microscópica das condições das suas fibras. A variabilidade da gramatura ao longo da manta têxtil caracterizada permitiu a identificação de regiões bastante distintas. Nos ensaios de laboratório foram utilizadas amostras com características próximas da média geral, tentando-se padronizar os resultados obtidos em relação a este referencial. Nas análises de microscopia foram identificados danos possivelmente gerados durante o processo de fabricação do têxtil.

Com base nos resultados destes estudos foram definidos os detalhes dos ensaios de filtração a serem realizados no laboratório. Foi utilizado um equipamento de filtração sob tensão do tipo razão entre gradientes, desenvolvido e disponível na Universidade de Brasília, que é constituído por um permeâmetro com piezômetros instalados ao longo de sua parede lateral. Assim, a geometria geral do dispositivo de filtração em laboratório foi limitada por este permeâmetro. A geometria dos materiais a serem ensaiados foi caracterizada com base em ensaios de laboratório e informações fornecidas pelo fabricante dos geotêxteis. A interação entre rejeitos e geotêxteis foi o objetivo da investigação, porém a condição inicial foi impressa no procedimento de montagem dos corpos de prova que consistiu na deposição dos rejeitos em forma de lama sobre os geotêxteis. Além do efeito das peculiaridades dos rejeitos e dos geotêxteis nesta interação, foi avaliada a ação da variação da intensidade de fluxo aplicada, como força perturbadora, e de variados níveis de tensão. O posicionamento dos piezômetros ao longo do permeâmetro e a coleta de partículas ao longo de cada um dos

---

ensaios, além de avaliações microscópicas das características dos geotêxteis após cada ensaio permitiram a avaliação do comportamento hidráulico dos materiais estudados.

Nos ensaios de filtração de GR realizados, tanto com  $i$  constante quanto variável, com o rejeito SA4 foi observado que, ao final do primeiro estágio dos ensaios (0 kPa) a condutividade hidráulica média do sistema rejeito-geotêxtil ensaiado foi da ordem de  $3 \times 10^{-4}$  cm/s. Isto indica que eventuais variações no procedimento de montagem do ensaio e execução deste primeiro estágio não interferiram no comportamento do rejeito como um todo. Também cabe mencionar que este valor é apenas dez vezes inferior ao obtido nos trabalhos de campo. Nos ensaios de GR realizados nas mesmas condições com os outros rejeitos estudados a variação observada na condutividade hidráulica média no final do primeiro estágio do ensaio também é pequena e permite a mesma interpretação.

Porém, apesar disso, em alguns ensaios realizados com as amostras SL3 e FA1 observou-se que ao final do primeiro estágio de carregamento prevalecia uma condição de heterogeneidade no comportamento hidráulico ao longo de todo o corpo de prova. No caso dos ensaios com a amostra FA1, inclusive, esta heterogeneidade foi pouco influenciada pelos incrementos de gradiente hidráulico e tensão. Isto demonstra a possibilidade de ter ocorrido a migração de partículas ao longo destes corpos de prova devido o processo de vibração utilizado durante a montagem do ensaio. Caso tenha ocorrido, este fenômeno pode ser identificado como instabilidade interna frente à vibração, porém há a possibilidade de se tratar do efeito de um eventual gradiente de compactação. Em outros casos, esta heterogeneidade no comportamento hidráulico ao final do primeiro estágio de ensaio (0 kPa e  $i = 1$ ) se concentrou nas regiões A5 e A6, mais próximas do geotêxtil ensaiado. Além disso, estes fenômenos de migração de partículas não sofreram grandes variações com os incrementos de gradiente hidráulico e carregamentos mecânicos aplicados aos corpos de prova. E, em todos os ensaios, os incrementos de tensão aplicados tenderam a reduzir a heterogeneidade inicial dos corpos de prova, sendo o estágio de 200 kPa aquele que limita as principais variações observadas. No caso da amostra SL3, quando ensaiada sob incrementos de gradiente hidráulico foram observadas alterações no comportamento das regiões A4, A5 e A6, porém a análise granulométrica das partículas destas regiões mostrou uma alteração muito pequena na granulometria, a qual pode ter sido especialmente influenciada pela proximidade do geotêxtil. De forma geral, pode-se concluir que as amostras de rejeito estudadas se comportaram de maneira estável ao longo dos ensaios de GR realizados diante dos gradientes hidráulicos

---

aplicados, sendo possível a ocorrência de instabilidade interna durante a montagem dos corpos de prova devido ao processo de densificação por vibração utilizado.

O procedimento de coleta das partículas passantes pelos geotêxteis durante os ensaios de GR mostrou-se eficiente, tendo a análise granulométrica destas partículas possibilitado a verificação de que o gradiente hidráulico foi o principal responsável pela perda de partículas finas dos rejeitos ensaiados, enquanto os carregamentos mecânicos levaram a perda de partículas maiores. Inclusive, estes estudos permitiram verificar que apenas partículas com diâmetro equivalente não superior à faixa de variação da abertura de filtração dos geotêxteis estudados passaram por eles durante os ensaios, mesmo durante a aplicação dos mais elevados níveis de tensão. A granulometria das partículas retidas no interior dos geotêxteis também foi avaliada após os ensaios de GR. Este estudo levou a verificação de partículas maiores que a faixa de tamanhos da abertura de filtração dos geotêxteis no interior das malhas têxteis. Esta verificação foi confirmada nas investigações com microscopia eletrônica de varredura.

Os estudos de microscopia auxiliaram bastante na análise do desempenho dos geotêxteis ao final dos ensaios de GR. Puderam ser identificados diversos graus de interação entre as fibras e as partículas. Os resultados obtidos com a microscopia foram bastante coerentes com os estudos dos parâmetros analisados no GR e com os resultados da avaliação do grau de impregnação final dos geotêxteis. Inclusive, cabe comentar a observação de que o grau de impregnação diminuiu com o aumento da gramatura dos geotêxteis. Também foi observada uma redução do grau de impregnação dos geotêxteis quando ensaiados sob gradiente hidráulico (i) variável em relação aos de ensaios realizados sob i constante.

A avaliação dos resultados dos ensaios de GR, realizados sob gradiente hidráulico (i) constante, também chama a atenção para a possível influência dos furos gerados no processo de fabricação por agulhamento. Isto se deve à identificação do fenômeno de piping, nas regiões A5 e A6, no ensaio com o sistema FAG3, uma vez que geotêxtil utilizado (G3) tem abertura de filtração menor que o geotêxtil G1, utilizado no ensaio com o sistema FAG1, em que não foi caracterizado este fenômeno ao final do último. Apesar de não ter sido caracterizado o piping no ensaio com o sistema SAG3, a grande redução da condutividade hidráulica nas proximidades dos geotêxteis em relação aos resultados obtidos nos ensaios com os sistemas SAG1 e SAG2, também indica a possibilidade de interferência dos furos do agulhamento.

---

Ao final dos ensaios de GR realizados, a avaliação dos resultados com base nas propostas de GR analisadas caracterizou de forma satisfatória o comportamento geral dos sistemas rejeito-geotêxtil. O  $GR_{ASTM}$  foi bastante eficiente na medida em que se manteve quase sempre próximo da unidade, em que é caracterizada a condição de estabilidade dos sistemas, o que é coerente com a verificação da estabilidade do comportamento dos rejeitos diante da aplicação de fluxo, inclusive sob gradientes hidráulicos variados. As outras propostas,  $GR_{Mod}$  e  $GR_{3mm}$ , também se mostraram importantes na avaliação do efeito do geotêxtil nas regiões mais próximas a ele. Por meio destas propostas puderam ser caracterizadas ocorrências de piping, como nos ensaios com os sistemas SLG1 e FAG3, sob  $i$  constante, e FAG1 sob  $i$  variável. Um importante aumento no gradiente nas proximidades dos geotêxteis também pôde ser identificado por meio das propostas de  $GR_{Mod}$  e  $GR_{3mm}$ , como nos casos dos sistemas SAG1, SAG2 e SLG2, sob  $i$  constante, e SLG2 sob  $i$  variável.

Vale comentar que os resultados obtidos nos ensaios de filtração (GR) indicaram a compatibilidade geral dos sistemas rejeito-geotêxtil ensaiados. Porém, é recomendada a sua utilização naqueles sistemas para os quais não foram verificados fenômenos localizados de piping e redução da condutividade hidráulica nas regiões próximas aos geotêxteis, tentando-se evitar o efeito indesejado de eventuais problemas associados ao agravamento destas ocorrências em longo prazo. A indicação da compatibilidade geral dos sistemas rejeito-geotêxtil, por meio das avaliações dos resultados dos ensaios de GR realizados, está em desacordo com alguns dos resultados obtidos no dimensionamento destes sistemas feitos com base em critérios de projeto propostos na literatura.

Assim, o equipamento de filtração sob tensão, utilizado para análise do comportamento em filtração dos sistemas compostos por rejeitos de mineração e geotêxteis, mostrou-se útil, tendo permitido a caracterização de diversos fenômenos ocorrentes, como piping e migração de partículas localizados. Porém, é extremamente importante a complementação de seus resultados por meio de estudos de granulometria das partículas retidas ao longo dos corpos de prova e passantes e retidas nos geotêxteis ao longo dos ensaios, além da investigação das condições de interação entre os geotêxteis e os rejeitos, ao final dos ensaios, por meio de microscopia eletrônica de varredura. Além disso, as propostas de avaliação da razão entre gradientes analisadas se mostraram importantes na avaliação do desempenho dos sistemas ensaiados.

---

## 7.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Apesar do trabalho realizado e apresentado aqui, muitas questões envolvendo mecanismos de filtração em geral, em especial no caso de barragens de rejeito, ainda demanda maiores aprofundamentos. Com intuito de também contribuir com indicações de direções a serem tomadas em eventuais estudos futuros, abaixo são itemizadas algumas sugestões.

- Em alguns casos são construídos barramentos compactados, sobre os geotêxteis dos respectivos sistemas de filtração e drenagem interna, antes de se iniciar o lançamento hidráulico dos rejeitos. Voltando-se principalmente para estes casos, é recomendável a avaliação do comportamento de sistema rejeito-geotêxtil diante da aplicação prévia de elevados carregamentos com posterior aplicação de fluxo, sob gradientes hidráulicos totais variados;
- Os resultados observados neste trabalho indicam a necessidade de melhorias nos critérios de projeto de filtros têxteis existentes para aplicá-los ao caso de rejeitos. Mais ensaios de GR, como os realizados, devem ser feitos com rejeitos de minérios de ferro e rocha fosfática para permitir a criação de um critério de projeto específico para estes casos;
- Geotêxteis são empregados numa diversidade muito grande de minerações devendo, ainda, ser avaliado o comportamento hidráulico de sistemas rejeito-geotêxtil considerando rejeitos destas indústrias. Como exemplos podem ser citados os rejeitos de minérios de nióbio e ouro;
- A estabilidade interna é uma importante característica no desempenho de materiais em condições de filtração. Mais estudos podem ser realizados para avaliar a estabilidade de uma maior diversidade e quantidade de rejeitos;
- Os geotêxteis, num primeiro contato, podem receber diretamente a polpa de rejeitos oriunda das usinas de beneficiamento de minérios. Esta situação pode impor aos geotêxteis a ação química dos rejeitos e fluidos a eles associados e à ação física das partículas em suspensão. Muito provavelmente isto alterará as condições iniciais de impregnação e integridade dos geotêxteis em relação às estudadas neste trabalho. Então, sugere-se que seja estudado o efeito do contato direto da polpa de rejeitos, tal como é gerada no processo de beneficiamento de minérios, com os geotêxteis;



- 
- As dimensões do permeâmetro utilizado neste trabalho limitam especialmente o estudo de amostras mais representativas de geotêxteis. São utilizadas amostras de diâmetro da ordem de 10 cm, o que limita esta possibilidade, tendo em vista a grande variabilidade observada em mantas têxteis. Além disso, o sistema de drenagem, no equipamento utilizado, é simulado por uma placa perfurada que altera as condições de transferência de tensão para os geotêxteis em relação ao que ocorre em um dreno real. Então, sugere-se o estudo do efeito da variação das dimensões das amostras de geotêxtil ensaiadas e também das características dos materiais que compõem o dreno adjacente. Podem ser aplicados carregamentos não superiores a 200 kPa, obtendo, ainda, resultados representativos;
  - No caso de rejeitos lançados hidráulicamente, a dificuldade de montagem de corpos de prova indeformados, coletados no campo para estudos de laboratório, limita a verificação do efeito de características conhecidas destes materiais como a própria segregação vertical promovida durante sua sedimentação. Apesar disso, investigações de campo podem permitir a obtenção de bons resultados na avaliação do desempenho real de sistemas de filtração e drenagem de barragens de rejeito. Uma possibilidade é a utilização de modelos reduzidos, em campo, que simulem a barragem e seus constituintes, promovendo situações semelhantes às que ocorrem na barragem real;
  - A possibilidade de investigações de campo também abre precedentes para a avaliação do efeito do tempo no desempenho dos dispositivos de filtração e drenagem de barragens de rejeito. A possibilidade de solubilização e precipitação de compostos de ferro é um efeito a ser avaliado. Na literatura podem ser encontrados relatos de rupturas provavelmente associadas a estes fenômenos, tendo em vista a redução da condutividade hidráulica dos dispositivos ao longo do tempo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- ABNT (1984a). NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 8p.
- ABNT (1984b). NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 13p.
- ABNT (1984c). NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 6p.
- ABNT (1984d). NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 3p.
- ABNT (1986). NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 7p.
- ABNT (1990). MB 3324: Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 6p.
- ABNT (1991). MB 3388: Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 14p.
- ABNT (1992). NBR 12569: Geotêxteis – Determinação da espessura. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 2p.
- ABNT (1993). NBR 13028: Elaboração e apresentação de projeto de disposição de rejeitos de beneficiamento, em barramento, em mineração. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 10p.
- ABNT (1995). NBR 6502: Rochas e Solos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 18p.
- ABNT (2003). NBR 12568: Geossintéticos – Determinação da massa por unidade de área. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 2p.
- 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, REGEO'87, Rio de Janeiro, RJ, pp. 1-9.
- Araújo, G.S. (2005). Estudo Experimental do Comportamento Dreno-Filtrante de Interfaces de Rejeitos Finos-Geotêxteis. Dissertação de Mestrado, Escola de Minas, UFOP, Ouro Preto, MG, 171p.
- Assis, A. P. (2003). Apostila de Barragens. Disciplina do Curso de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília. ENC/FT, Universidade de Brasília. Brasília, DF;
- ASTM (1991). D 4491: Test methods for water permeability of geotextiles by permittivity. ASTM Standard on Geosynthetics, Philadelphia, USA, pp. 18-22.
- Bathia, S. K. & Smith, J. L. (1995). Application of the bubble point method to the characterization of the pore-size distribution of geotextiles. Geotechnical Testing Journal,

---

18(1): 94-105.

Bathia, S. K., Smith, J. L. & Christopher, B. R. (1994). Interrelationship between pore openings of geotextiles and methods of evaluation. 6th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Singapore, pp. 705-710.

Bentel, D., Robbertze, J. & Smith, M. (1982). The use and behavior of geotextiles in underdrainage systems of gold mine tailings dam in South Africa. 2nd International Conference on Geotextiles, Las Vegas, USA, 1: 183-188.

Bessa da Luz, D. W. (2004). Compatibilidade de Sistemas Solo-Geotêxtil em Ensaio de Filtração sob Tensão. Dissertação de Mestrado, Publicação n<sup>o</sup> G.DM-120A/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 139 p.

Bidim (2002). Tabela de especificações técnicas – Geotêxtil Bidim RT. Bidim Ind. E Com. Ltda., São Paulo, SP, 1p.

Bordier, C. & Zimmer, D. (1996). Influence of clogging on drainage performances of granular and geosynthetic drainage materials. Geofilters'96, Montreal, Canadá, pp. 135-154.

Bush, R.G. (1987). Construção de barragens com rejeito de fosfato. Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, REGEO'87, Rio de Janeiro, RJ, pp. 379-396.

Calhoun, C. C. (1972). Development of design criteria and acceptance specifications for plastic filter cloths. U. S. Army Corps of Engineers, Waterways Experimental Station, Vicksburg, Technical Report, pp. 72-77.

Cavalcante, A.L.B., (2000). Efeito do Gradiente de Permeabilidade na Estabilidade de Barragens de Rejeito Alteadas pelo Método de Montante. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 190p.

Cazzufi, D. A., Mazzucato, A., Moraci, N. & Tondello, M. (1999). A new test apparatus for the study of geotextiles behaviour as filters in unsteady flow conditions: relevance and use. Geotextiles and Geomembranes, 17: 313-329.

Christopher, B. R. & Fischer, G. R. (1992). Geotextile filtration principles, practices and problems. Geotextiles and Geomembranes, 11: 337-353.

Colmanetti, J. P. (2000). Comportamento de filtros geotêxteis em sistemas de drenagem para resíduos sólidos municipais. Dissertação de Mestrado, Publicação n<sup>o</sup> G.DM-076/2000, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 126 p.

Deer, W.A., Howie, R.A. & Zussman, J. (1966). An Introduction to the Rock-Forming Minerals. Longmans, Green and Co. Ltd., London, Inglaterra, 528p.

DNPM (2001). Anuário Mineral Brasileiro 2001. Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, Brasília, DF, 30 vol., 156p.

DNPM (2003). Sumário Mineral 2003. Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, Brasília, DF, 23 vol., 132p.

---

Espósito, T.J. (2000). Metodologia Probabilística e Observacional Aplicada a Barragens de Rejeito Construídas por Aterro Hidráulico. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-004A/00, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 363p.

Fannin, R. J., Vaid, Y. P & Shi, Y. C. (1994a). A critical evaluation of the gradient ratio test. *Geotechnical Testing Journal*, 17(1): 35-42.

Fannin, R. J., Vaid, Y. P & Shi, Y. C. (1994b). Filtration behaviour of nonwoven geotextiles. *Canadian Geotechnical Journal*, 31: 555-563.

Faure, Y. H., Farkouh, B., Delmas, P. & Nancey, A. (1999). Analysis of geotextile filter behaviour after 21 years in Valcros dam. *Geotextile and Geomembrane*, 17: 353-370.

Fayoux, D. (1977). Filtration hydrodynamique des sols par des textiles. 1st International Conference on Geotextiles, Paris, pp: 329-332.

Fenton, G.A. & Griffiths, D.V. (1997). Extreme hydraulic gradient statistics in stochastic earth dam. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 123(11): 995-1000.

Fischer, G.R. & Holtz, R.D. (1996). A critical review of granular soil filter retention criteria. *Geofilters'96*, Montreal, Canadá, pp. 409-418.

Gardoni, M. G. A. & Palmeira, E. M. (1998). The performance of a geotextile filter in tropical soil. 6th International Conference on Geosynthetics, Atlanta, USA, pp. 1027-1032.

Gardoni, M. G. A. (2000). Estudo do Comportamento Dreno-Filtrante de Geossintéticos sob Compressão. Tese de Doutorado, Publicação G.T.D-003A/2000, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 313p.

Gardoni, M.G. (1995). Avaliação da Aplicabilidade de Ensaios de Laboratório e Critérios de Filtros para a Utilização de Geotêxteis em Solos do Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-024A/95, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 177p.

Gerry, B. S. & Raymond, G. P. (1983). Equivalent opening size of geotextiles. *Geotechnical Testing Journal*, 6 (2): 53-63.

GETEC/CMT (2003). Manual de Dados Básicos de Processo. Fertilizantes Fosfatados S. A. – Fosfertil, Relatório 005/03 - GEP-M-046-03, 1 vol., 44p.

Giroud, J. P. (1994). Quantification of geosynthetic behavior. 6th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, IGS, Singapore, pp. 3-27.

Giroud, J.P. (1996). Granular filters and geotextile filters. *Geofilters'96*, Montreal, Canadá, pp. 565-680.

Gomes, R. C. et al. 2001. Laudo pericial da ruptura do dique de contenção de rejeitos de minério de ferro da cava C1 da Mineração Rio Verde Ltda, localizada no município de Nova Lima / M.G. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 18p.

Gourc, J.P., Faure, Y., Rollin, A. & Lafleur, J. (1982). Structural permeability law of

- 
- geotextiles. 2nd International Conference on Geotextiles, Las Vegas, USA, 1: 149-154.
- Greenpeace International, 2002. Corporate Crimes: The need for an international instrument on corporate accountability and liability: Mining cases. Greenpeace International, 3: 87-114.
- Haas, W. M., (1982). Geotextiles in tailings dike construction: laboratory and field observations. 2nd International Conference on Geotextiles, Las Vegas, USA, 1: 205-210.
- Head, K.H. (1988). Manual of Soil Laboratory Testing. Pentech Press Ltd., Devon, USA, 2 vol., 748p.
- Honjo, Y. & Veneziano, D. (1989). Improved filter criterion for cohesionless soils. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 115(1): 75-94.
- Honjo, Y., Haque, M.A. & Tsai, K.A.. (1996). Self-filtration of broadly and gap graded cohesionless soils. Geofilters'96, Montreal, Canada, pp. 227-236.
- ICOLD (2001). Tailings Dams: Risk of Dangerous Occurrences. Bulletin 121. Lessons learnt from practical experiences. International Committee of Large Dams - ICOLD, Paris, França, 144p.
- Indraratna, B. & Vafai, F. (1997). Analytical model for particle migration within base soil-filter system. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 123(2): 100-109.
- Indraratna, B. e Radampola, S. (2002). Analysis of critical hydraulic gradient for particle movement in filtration. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 128(4): 347-350.
- Kenney, T. C., Chahal, R., Chiu, E., Ofoegbu, G. I., Omenge, G. N. & Ume, C. A. (1985). Controlling constriction sizes of granular filters. Canadian Geotechnical Journal, 22 (1): 32-43.
- Kenney, T.C. & Lau, D. (1985). Internal stability of granular filters. Canadian Geotechnical Journal, 22: 215-225.
- Koerner, R. M. & Sandey, J. E. (1982). Transmissivity of geotextiles and geotextile/soil systems. Second International Conference on Geotextiles, Las Vegas, USA, 1: 173-176.
- Koerner, R.M. (1994). Designing with Geosynthetics. Prentice-Hall Inc., New Jersey, EUA, 783p.
- Lafleur, J. (1999). Selection of geotextiles to filter broadly cohesionless soils. Geotextiles and Geomembranes, 17:299-312.
- Lafleur, J., Francoeur, J. & Faure, Y. (2002). Piping, bridging and blinding of geotextiles as evaluated from the gradient ratio test. 7th International Conference on Geosynthetics, Nice, França, pp.1069-1074.
- Lafleur, J., Mlynarek, J. & Rollin, A.L. (1989). Filtration of broadly graded cohesionless soils. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 115(2): 1747-1768.
- Locke, M.R. (2001). Analytical and Laboratory Modelling of Granular Filters for

---

Embankment Dams. PhD Thesis, Faculty of Engineering, University of Wollongong, Australia, 334p.

Mafra, J. M. Q. & Chapadeiro, E. (2002). Sobre o fechamento das barragens de rejeitos – considerações gerais. 10º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, ABGE/ABMS, Ouro Preto, MG, 13p.

Mano, E.B. (1991). Polímeros como Materiais de Engenharia. Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, SP, 197.

Manso, E.A. (1999). Análise granulométrica dos solos de Brasília pelo granulômetro a laser. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-056A/99, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 165p.

Matheus, E. (1997). Comportamento de Sistemas Solo-Geotêxtil em Ensaios de Filtração Sob Condições Severas. Dissertação de Mestrado, Publicação G.D.M-048A/97, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 121p.

Mendonça, M.B., Ehrlich, M., Cammarota, M.C. & Silva, L.R. (1999). Formação de biofilmes de ocre em Geotêxteis. Primeiro Congresso Sul-Americano de Geossintéticos, Rio de Janeiro, RJ, v. 1, pp. 257-265.

Minns, A. (1988). A review of tailings disposal practices in North America and Australia. Hydraulic Fill Structures, ASCE Geotechnical Special Publications N° 21, pp 52-68.

Mlynarek, J., Lafleur, J., Rollin, A. L. & Lombard, G. (1993). Geotextile filter design based on filtration opening size obtained by hydrodynamic sieving. Filter in Geotechnical and Hydraulic Engineering, Editado por Brauns, Heibaum & Shuler, Balkema, Rotterdam (Proc. GeoFilters'92 Conference, Karlsruhe, Germany), pp. 27-33.

Montez, F.T. (1987). Utilização de geotêxtil em barragens de rejeitos. Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, REGEO'87, ABMS, Rio de Janeiro, RJ, pp. 333-348.

Muñoz, C.S. (2005). Desempenho de Geotêxteis na Filtração de Solos Internamente Instáveis. Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 109p.

Nogueira Jr, J. (1986). Colmatação química de drenos de barragens por compostos de ferro. Artigo Técnico 10, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, São Paulo, SP, 22p.

Ozkan, S. & Ipekoglu, B. (2002). Investigation of environmental impacts of tailings dams. Environmental Management and Health, 13 (3): 242-248.

Pacheco, E.B. & Melo, C.E. (1987). Sedimentação, drenagem e compressibilidade de rejeitos em testes de grandes dimensões. Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, REGEO'87, ABMS, Rio de Janeiro, RJ, pp. 23-38.

Palmeira, E. M. & Fannin, R. J. (1998). A methodology for the evaluation of geotextile pore opening sizes under confining pressure. Geosynthetics International, 5(3): 347-357.

Palmeira, E. M. & Gardoni, M. G. A. (2000). Geotextiles in filtration: a state of the art review

---

and remaining challenges. International Symposium on Geosynthetics in Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, in association with GeoEng2000, Melbourne, Australia, pp. 85-110.

Palmeira, E. M. & Gardoni, M. G. A. (2002). Drainage and filtration properties of non-woven geotextiles under confinement using different experimental techniques. *Geotextiles and Geomembranes*, 20: 97-115.

Palmeira, E. M. (1997). Propriedades físicas e hidráulicas de geotêxteis não tecidos sob pressão. *Solos e Rochas*, 20 (2): 69-78.

Palmeira, E. M., Fannin, R. J., & Vaid, Y. P. (1996). A study on the behaviour of soil-geotextile systems in filtration tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 33: 899-912.

Parra, P.C. & Lasmar, N.T. 1987. Ruptura da barragem de rejeitos da Mina do Fernandinho. *Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, REGEO'87, ABMS, Rio de Janeiro, RJ*, pp. 423-444.

Parra, P.C. & Ramos, J.V. 1987. Ruptura, recuperação e estabilização da barragem de rejeitos da Mina do Pico São Luiz. *Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, REEGO'87, ABMS, Rio de Janeiro, RJ*, pp. 445-462.

Pimenta de Ávila Consultoria Ltda. (2003a). Especificação técnica para construção de extravasores em gabião para as baías – Sistemas de secagem de lamas. Publicação SA-400-EP-4208, Samarco Mineração, Belo Horizonte, MG.

Pimenta de Ávila Consultoria Ltda. (2003b). Relatório síntese das investigações como construído da Barragem do Germano. Samarco Mineração, Belo Horizonte, MG.

Radampola, S. S. (2001). Geohydraulic Aspects of Dam Filters. Master of Engineering Thesis, Faculty of Engineering, University of Wollongong, Australia, 173p.

Rauman, G. (1982). In-plane permeability of compressed geotextiles. *Proceedings of the Second International Conference on Geotextiles, Las Vegas, USA*, 1: 55-60.

Reddi, L. & Bonala, M. (1997). Analytical solution for fine particle accumulation in soil filters. *Jornal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 123 (12): 1143-1152.

Reddi, L., Ming, X., Hajra, M., Lee, I. (2000). Permeability reduction of soil filters due to physical clogging. *Jornal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 126 (3): 236-246.

Ribeiro, L.F.M. (2000). Simulação Física do Processo de Formação dos Aterros Hidráulicos Aplicado a Barragens de Rejeitos. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 235p.

Rollin, A. & Lombard, G. (1988). Mechanisms affecting long-term filtration behavior of geotextiles. *Geotextile and Geomembrane*, 7: 119-145;

Rollin, A. L., Masounave, J. & Dallire, G. (1977). Study of the hydraulic properties of nonwoven fabrics. *Proceedings of the International Conference on the Use of Fabrics Geotechnics, Paris*, pp. 201-206.

---

Rowatt, G.C. (2001). *Facultative Matters: An introduction to tailings dams risks*. General Cologne Re., Toronto, Canadá, pp. 6-9.

Scheurnberg, R.J. (1982). Experiences in the use of geofabric in underdrainage of residue deposits. *Second International Conference on Geotextiles, Las Vegas, USA*, 1: 199-204.

Schuler, U. (1996). Scattering of the composition of soils – an aspect for the stability of granular filters. *Geofilters'96, Montreal, Canadá*, pp. 21-34.

Sherard, J. L. (1979). Sinkholes in dams of coarse, broadly graded soils. *13th International Congress on Large Dams*, 2: 25-35.

Sherard, J. L., Dunnigan, L.P. & Talbot, J. R. (1984a). Basic properties of sand and gravel filters. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 110 (6): 684-700.

Sherard, J. L., Dunnigan, L.P. & Talbot, J. R. (1984b). Filters for silts and clays. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 110 (6): 701-718.

Sherard, J.L., Dunnigan, L.P. & Decker, R.S. (1976b). Identification and nature of dispersive soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 102(4): 287-301.

Sherard, J.L., Dunnigan, L.P., Decker, R.S. & Steele, E.F. (1976a). Pinhole test for identifying dispersive soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 102(1): 69-85.

Shi, Y. (1993). *Filtration Behaviour of Non-Woven Geotextiles in the Gradient Ratio Test*. Dissertação de Mestrado, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 125p.

Shi, Y. C., Fannin, R. J. & Vaid, Y. P. (1994). Interpretation of gradient ratio test results. *6th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Singapore*, pp. 673-676.

Silveira, A. (1965). An analysis of the problem of washing through in protective filters. *Sixth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Canadá*, vol. 2: 551-555.

Soilmoisture Equipment Corp. (1991). *Model 2800 Guelph Permeameter Manual. Operation Instructions*. Soilmoisture Equipment Corp., Santa Barbara, USA, 27p.

Taveira, A. L. S. (2003). *Provisão de recursos financeiros para o fechamento de empreendimentos mineiros*. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, São Paulo, SP, 209p.

Taylor, D.W. (1948). *Fundamentals of Soil Mechanics*. John Wiley and Sons, Inc., New York, USA, 700p.

Tomlinson, S.S. e Vaid, Y.P. (2000). Seepage forces and confining pressure effects on piping erosion. *Canadian Geotechnical Journal*, 37: 1-13.

USEPA. 1994. *Technical Report: Design and Evaluation of Tailings Dams*. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, New York, 59p.



---

Vaughan, P.R. & Soares, H.F. (1982). Design of filters for clay core of dams. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 108(GT1): 17-31.

Vick, S.G. (1983). Planning, Design and Analysis of Tailings Dams. John Wiley & Sons, New York, USA 369p.

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

