



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Programa Interunidades



Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

JOSÉ CARLOS DE LIMA JÚNIOR

**ESTUDO DO DESEMPENHO DE BARREIRAS DE GEOTÊXTIL PARA
CONTENÇÃO DE SEDIMENTOS CARREADOS PELO ESCOAMENTO
SUPERFICIAL**

Guaratinguetá
2014

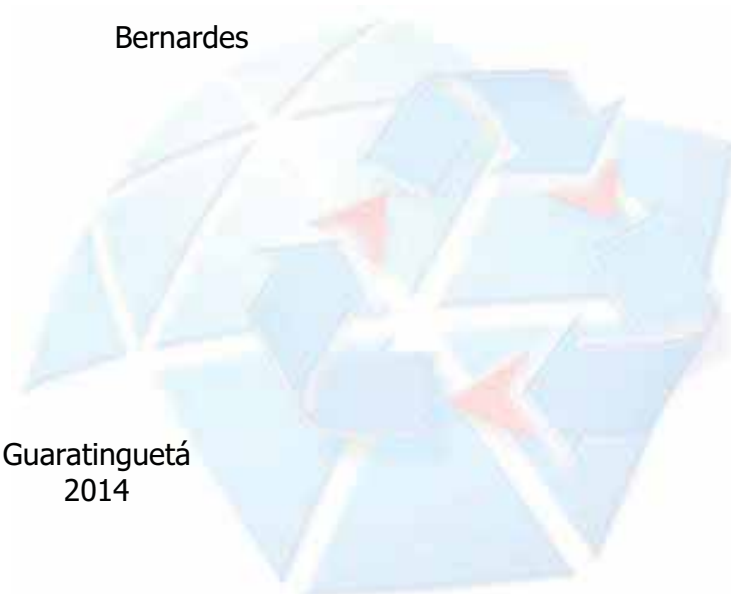
JOSÉ CARLOS DE LIMA JÚNIOR

**ESTUDO DO DESEMPENHO DE BARREIRAS DE GEOTÊXTIL PARA
CONTENÇÃO DE SEDIMENTOS CARREADOS PELO ESCOAMENTO
SUPERFICIAL**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Área de Concentração Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. George de Paula Bernardes

Guaratinguetá
2014



Lima Júnior, José Carlos.

Estudo do desempenho de barreiras de geotêxtil
para contenção de sedimentos carregados pelo
escoamento superficial / José Carlos de Lima
Júnior, 2014

128 f.

Orientador: George de Paula Bernardes

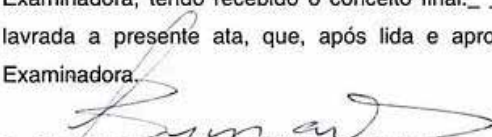
Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2014

1. Barreira de contenção de rejeitos. 2. Geotêxtil
3. Recursos hídricos. I. Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

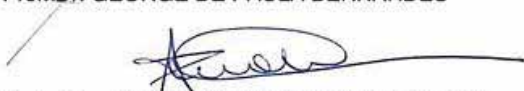


ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE JOSÉ CARLOS DE LIMA JÚNIOR, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Aos 17 dias do mês de fevereiro do ano de 2014, às 14:00 horas, no(a) Sala de Videoconferencia do Campus de Guaratinguetá, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. GEORGE DE PAULA BERNARDES do(a) Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Profa. Dra. ANNA SILVIA PALCHECO PEIXOTO do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/ Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. EDUARDO DELL'AVANZI do(a) Departamento de Construção Civil / Universidade Federal do Paraná, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de JOSÉ CARLOS DE LIMA JÚNIOR, intitulado "BARREIRAS DE GEOTÊXTIL PARA RETENÇÃO DE SEDIMENTOS CARREADOS PELO ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM MINERADORAS". Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.



Prof. Dr. GEORGE DE PAULA BERNARDES



Profa. Dra. ANNA SILVIA PALCHECO PEIXOTO



Prof. Dr. EDUARDO DELL'AVANZI

“A dúvida é o princípio da sabedoria”

Aristóteles

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, inicialmente à Deus e minha família, minha mãe Edna, meu pai José Carlos, minha irmã Kamila, pelo apoio, incentivo e compreensão da ausência durante este período.

Ao professor orientador George pela dedicação, orientação e ensinamentos, disposto sempre a ajudar em todas as etapas da pesquisa, assim como, pelo exemplo de profissionalismo e educar.

Aos professores Eduardo Dell’Avanzi e Anna Pacheco pela pronta disponibilidade de participação na banca examinadora e contribuições que enriqueceram este trabalho.

À minha namorada Tamires pelo carinho, compreensão e apoio nos momentos difíceis.

À todos os amigos, de Taubaté, Guaratinguetá e principalmente de Lorena, presentes nos melhores e piores momentos, durante a realização deste trabalho, e pelo apoio e torcida de todos.

Ao técnico do laboratório Flávio pela atenção e colaboração na realização dos ensaios.

À Pós-Graduação de Engenharia Civil e Ambiental da UNESP pelo suporte financeiro.

À mineradora Pedreira Rio das Pedras por ceder o espaço do empreendimento para a realização de ensaios e coleta de materiais.

Finalmente, agradeço também a todos os demais que estiveram presentes durante esta etapa e me ajudaram de alguma forma e não foram citados.

Resumo

O setor de mineração brasileiro experimentou um crescimento de produção de minérios sem precedentes nos últimos anos, impulsionado pelo cenário externo favorável em relação do setor da construção civil. Consequentemente, essas atividades além de gerarem grandes volumes de rejeitos tem cada vez mais ocupado extensas áreas ficando o solo superficial totalmente desprotegido. Isso tem provocado uma maior cobrança por parte da sociedade na questão da responsabilidade ambiental e social. Como resultado, as empresas de mineração têm sido fortemente cobradas no tocante à garantia associada às barreiras de rejeito e principalmente quanto ao escoamento superficial de modo a proteger os recursos hídricos. Atualmente realizam-se estudos para a diminuição da contaminação de recursos hídricos em desagüamentos de rejeitos. Neste contexto, o material que vem dando resultados de qualidade e eficiência é o geotêxtil, por apresentar funções que possam ser usadas para a diminuição dos impactos. Este trabalho analisa o comportamento da barreira geotêxtil para contenção de sedimentos provindo do escoamento superficial de uma pedreira. O estudo analisou o comportamento de dois geotêxteis com diferentes gramaturas em função da respectiva abertura de filtração aparente. Para avaliar o desempenho do geotêxtil foi construído um modelo físico em laboratório de modo a avaliar o volume retido e do volume que passa, assim como, sua eficiência. Os resultados indicam que para a filtração e retenção do rejeito, o geotêxtil de menor gramatura e geotêxtil de maior gramatura apresentaram um comportamento uniforme no início devido ao agulhamento, embora o geotêxtil reutilizado de menor gramatura apresentou uma maior eficiência em relação ao tempo que leva para que o rejeito não fique retido na barreira. O geotêxtil de menor gramatura apresentou uma maior eficiência quanto ao tempo de retenção embora uma maior parcela de finos tenha passado. O geotêxtil com maior gramatura retem mais finos mas o volume retido atinge a cota limite da bacia de retenção com menor tempo.

Palavras-chave: Barreira de Contenção; Rejeitos Minerários, Recursos Hídricos, Geotêxtil

Abstract

The Brazilian mining industry experienced a growth of ore production unprecedented in recent years, driven by favorable external scenario regarding the construction sector. Consequently, in addition to these activities generate large volumes of waste has increasingly occupied extensive areas getting totally unprotected topsoil. This has led to greater demand from society on the issue of environmental and social responsibility. As a result, mining companies have been heavily charged in respect of ensuring the barriers associated tailings and mostly about the runoff to protect water resources. Currently studies are conducted to reduce the contamination of water resources drainages tailings. In this context, the material that has been providing quality results and efficiency is the geotextile by presenting functions that can be used for the mitigation of impacts. This paper analyzes the behavior of geotextile barrier for containment of sediment runoff stemmed from a quarry. The study analyzed the behavior of two geotextiles with different weights depending on their opening apparent filtration. To evaluate the performance of the geotextile a physical model has been built in the laboratory in order to evaluate the retentate volume and the volume that passes, as well as its efficiency. The results indicate that for filtration and retention of the refuse, the geotextile lighter weight and greater weight had a uniform behavior at the beginning due to the needling, although geotextile reusable lighter weight had a greater efficiency compared to the time it takes to that the waste does not become trapped in the barrier. The geotextile lighter weight showed greater efficiency on the retention time although a larger proportion of fines has passed. The geotextile retains a heavier weight thinner but retained volume reaches the quota limit of basins with less time.

Keywords: Barrier Containment; Tailings Mining; Water Resources, Geotextile

Índice de Figuras

Figura 1: Exemplo de geotêxtil tecido.....	19
Figura 2: Exemplo de geotêxtil não tecido.....	19
Figura 3: Exemplo de ligação mecânica.....	20
Figura 4: Sistema de drenagem superficial.....	22
Figura 5: Sistemas de drenagem subterrânea.....	23
Figura 6: Mecanismos de colmatção física em filtros de geotêxtil não tecido: a) cegamento; b) bloqueamento; e c) colmatção.....	24
Figura 7: Fluxograma para critério de dimensionamento de Lafleur para solos com granulometria ampla.....	36
Figura 8: Obtenção de P a partir da curva de distribuição de poros de um determinado geotêxtil.....	40
Figura 9: Planta de localização da área com a base Google Earth.....	42
Figura 10: Planta de localização da sub-bacia hidrográfica com a base IBGE.....	46
Figura 11: Planta topográfica atual do empreendimento.....	47
Figura 12: Bacia de retenção de finos situada no empreendimento.....	47
Figura 13: Dimensionamento da bacia. Planta de corte e perfil.....	48
Figura 14: Mancha do material fino, proveniente do beneficiamento do empreendimento, no córrego Pinheirinho.....	48
Figura 15: Bacia de retenção de finos com a futura locação de uma barreira de geotêxtil.....	49
Figura 16: Bacia de retenção de finos acumulada de finos devido ao desaguamento.....	50
Figura 17: Localização da casa de luz em relação à bacia de retenção.....	50
Figura 18: Mecanismo de investigação da capacidade de filtração do geotêxtil.....	52
Figura 19: Gráfico de calibração do volume retido pela barreira geotêxtil.....	53
Figura 20: Régua métrica fixada no lisímetro.....	54
Figura 21: Gráfico de calibração do volume de saída.....	54
Figura 22: Agitador e tanque de água destilada.....	55

Figura 23: Béquer utilizado no ensaio de sedimentação.....	55
Figura 24: Casagrande e cisel, materiais utilizados para realização do ensaio de limite de liquidez.....	56
Figura 25: Curva granulométrica dos rejeitos retidos.....	60
Figura 26: Ensaio 1 – Geotêxtil Novo de Menor Gramatura.....	62
Figura 27: Diferença da altura para atingir o reservatório de saída.....	66
Figura 28: Carga hidráulica máxima retida pelo geotêxtil.....	66
Figura 29: Material retido no geotêxtil de menor e maior gramatura.....	67
Figura 30: Material que passa pelo geotêxtil de menor e maior gramatura.....	68
Figura 31: Superposição dos resultados obtidos com o geotêxtil novo de menor gramatura.....	69
Figura 32: Superposição dos resultados obtidos com o geotêxtil novo de maior gramatura.....	70
Figura 33: Superposição dos resultados obtidos com o geotêxtil reutilizado de menor gramatura.....	71
Figura 34: Superposição dos resultados obtidos com o geotêxtil reutilizado de maior gramatura.....	72
Figura 35: Superposição dos três resultados obtidos com o geotêxtil reutilizado de menor gramatura.....	73
Figura 36: Superposição dos três resultados obtidos com o geotêxtil reutilizado de maior gramatura.....	74
Figura 37: Rejeito fino retido no geotêxtil após a lavagem para a sua reutilização.....	75
Figura 38: Rejeito passando pela estrutura agulhada do geotêxtil de maior gramatura.....	76
Figura 39: Mecanismo de retenção diferenciado ao longo do geotêxtil em função da altura.....	77
Figura 40: Comparação dos resultados dos Ensaios 1, 3, 5 e 13 e Ensaios 7, 9, 11 e 18.....	78
Figura 41: Comparação dos resultados dos Ensaios 2, 4, 6 e 14 e Ensaios 8, 10, 12 e 19.....	79
Figura 42: Comparação dos resultados dos Ensaios 15,16 e 17 e Ensaios 20, 21 e 22.....	80
Figura 43: Máxima retenção do rejeito com o geotêxtil de menor gramatura.....	81

Figura 44: Máxima retenção do rejeito, com o geotêxtil de maior gramatura.....	82
---	----

Índice de Tabelas

Tabela 1: Critérios empíricos de projeto de sistemas de drenagem e filtração de barragens.....	16
Tabela 2: Valores das condições de contorno e suas aplicações.....	34
Tabela 3: Valores de coeficiente A , onde tg é a espessura do geotêxtil em metros.....	35
Tabela 4: Critério de Retenção – FHWA.....	37
Tabela 5: Critério de prevenção à colmatção – FHWA.....	38
Tabela 6: Especificação técnica do geotêxtil de maior gramatura.....	56
Tabela 7: Especificação técnica do geotêxtil de menor gramatura.....	57
Tabela 8: Programação dos 22 ensaios realizados.....	58
Tabela 9: Resultados e observações dos 22 ensaios realizados.....	63

Sumário

RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XII
SUMÁRIO	XIII
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	4
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 MINERAÇÃO E MEIO AMBIENTE	5
3.2 DESAGUAMENTO DE RESÍDUOS	5
3.2.1 <i>Características do rejeito</i>	7
3.3 ESCOAMENTO SUPERFICIAL E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	9
3.3.1 <i>Escoamento superficial</i>	9
3.3.2 <i>Escoamento superficial na mineração</i>	10
3.3.3 <i>Transporte de sedimentos minerários</i>	12
3.3.4 <i>Avaliação do transporte sedimentos sólidos</i>	12
3.3.5 <i>Medidas de controle da poluição</i>	13
3.4 SISTEMAS DE DRENAGEM E FILTRAÇÃO INTERNA.....	14
3.5 GEOTÊXTEIS.....	18
3.5.1 <i>Utilização de geotêxtil em sistemas de drenagem e filtração</i>	20
3.5.2 <i>Função do geotêxtil</i>	25
3.5.3 <i>Propriedades dos geotêxteis</i>	26
3.5.4 <i>Mecanismos de filtração em geotêxteis</i>	27
3.5.5 <i>Influência da estrutura do geotêxtil</i>	28
3.5.6 <i>Influência do meio a filtrar</i>	29
3.5.7 <i>Efeito das condições de solicitação</i>	31
3.5.8 <i>Critérios de dimensionamento</i>	32
4 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	42
4.1 DESCRIÇÃO DOS ASPECTOS FISIOGRAFICOS E GEOLÓGICOS	43
4.1.1 <i>Geomorfologia</i>	43
4.1.2 <i>Geologia regional</i>	43

4.1.3	<i>Hidrografia e hidrogeologia</i>	45
4.1.4	<i>Clima</i>	46
4.1.5	<i>Situação atual do empreendimento</i>	46
5	MATERIAIS E MÉTODO	52
5.1	ENSAIOS DE EFICIÊNCIA DA BARREIRA	52
5.1.1	<i>Calibração do mecanismo da capacidade de filtração do geotêxtil</i>	53
5.2	CARACTERÍSTICAS DO REJEITO UTILIZADO	55
5.2.1	<i>Granulometria</i>	55
5.2.2	<i>Limites de Liquidez e Plasticidade</i>	56
5.3	CARACTERIZAÇÃO DO GEOTÊXTIL	56
5.4	PROGRAMAÇÃO DE ENSAIOS	58
6	RESULTADOS.....	60
6.1	CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DO REJEITO.....	60
6.2	ENSAIO DE BARREIRA	61
	SITUAÇÕES OBSERVADAS PARA OS ENSAIOS REALIZADOS	66
7	ANÁLISES E DISCUSSÕES	67
7.1	ANÁLISE	67
	SITUAÇÕES OBSERVADAS PARA OS ENSAIOS DE REPETIBILIDADE	75
7.2	COMPARAÇÕES DOS COMPORTAMENTOS DOS GEOTÊXTEIS	77
7.3	DISCUSSÃO	81
8	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	83
8.1	CONCLUSÃO.....	83
8.2	RECOMENDAÇÕES.....	84
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85
10	ANEXOS.....	95

1 INTRODUÇÃO

Entende-se por atividades de mineração aquelas caracterizadas fundamentalmente pela pesquisa e exploração de recursos minerais úteis, que se encontrem no solo ou subsolo, compondo a paisagem ou ambiente. Chamas (1989) define mineração como um complexo de atividades necessárias à extração econômica de bens minerais da crosta terrestre, provocando transformações no meio ambiente, quer seja nas atividades da lavra quer que nas do processo. A lavra constitui-se no conjunto de atividades coordenadas que extraem um bem mineral, objetivando o seu aproveitamento industrial ou uso direto. Nela também são produzidos os estéreis do decapeamento da mina. Já os processos de mineração (tratamentos) são aqueles que envolvem separações físicas e químicas, visando à obtenção da substância mineral de interesse. No processo são também produzidos os rejeitos. Em linhas gerais, pode-se dizer que em uma determinada mineração são obtidos os minérios lavrados a partir do qual se obtém o produto final e o rejeito, e os estéreis, com mineralização não econômica.

O produto final, que é a substância de interesse da mineradora, se encontra vinculado à natureza de cada mineração, tendo como base a pesquisa mineral realizada, o plano de lavra estabelecido e o tratamento submetido ao minério. Todavia o estabelecimento do plano de lavra é fruto da exigência do cliente. Todo processo, tanto de lavra como de beneficiamento, há que se contemplarem também fatores que influenciam no produto final, como por exemplo, condições de locatividade, parâmetros de usina de beneficiamento, entre outros.

Há casos de mineradoras consumirem um alto volume de água: na pesquisa mineral (sondas rotativas e amostragens), na lavra (desmonte hidráulico, bombeamento de água de minas subterrâneas etc), no beneficiamento (britagem, moagem, flotação, lixiviação etc),

no transporte por mineroduto e na infraestrutura (pessoal, laboratórios, etc). Há casos em que é necessário o rebaixamento do lençol freático para o desenvolvimento da lavra, prejudicando outros possíveis consumidores.

Atualmente realizam-se estudos para a diminuição da contaminação de recursos hídricos em desaguamentos de rejeitos. Neste contexto, o material que vem dando resultados de qualidade e eficiência é o geotêxtil, por apresentar funções que possam ser usadas para a diminuição dos impactos dos ecossistemas aquáticos.

As principais funções que ainda hoje marcam a eficiência do geotêxtil nas obras de engenharia são: a separação, a reforço de solo, a filtração, a drenagem e a barreira líquida, quando uma ou ambas de suas faces estão impregnadas ou associadas a algum material impermeabilizante. Os geotêxteis podem ser usados nestas funções de forma isolada ou, como acontece na maioria das vezes, desempenhando duas, ou até três diferentes simultaneamente, o que muitos especialistas denominam de funções combinadas.

No entanto, a função filtração envolve a passagem de fluidos ou de gases transversalmente ao maior plano da manta. O geotêxtil funciona como um filtro, onde retém partículas maiores que a sua abertura de filtração (O_f) - parâmetro que caracteriza a dimensão dos poros na manta sintética, à medida que permite a passagem de fluidos ou gases pelo mesmo. Portanto, é o equilíbrio do sistema solo-geotêxtil que permite a passagem de líquidos, com certa perda de massa de solo, para uma determinada vida útil estipulada em projeto. As suas principais funções são a permeabilidade, a retenção de partículas, além da capacidade de fluxo para longos períodos de vida útil.

A função drenagem consiste na transmissão de fluidos, geralmente na direção paralela ao plano da manta, em que a retenção de partículas pode ocorrer, mas não é a sua função prioritária. O transporte de líquidos pode também ser feito transversalmente à menor seção da manta (espessura), onde envolve parâmetros físicos como a própria espessura, a distribuição das fibras e de seus poros, abrindo espaço para o uso de novos conceitos e parâmetros de projeto, tais como a transmissividade. A função barreira física está associada com um material impermeabilizante colocado em uma ou ambas as faces. Nesta situação o geotêxtil pode desempenhar a função de uma geomembrana ou de um geocomposto, onde sua estrutura porosimétrica na face oposta àquela impregnada poderá drenar (transmitir) líquidos associadamente à função de impermeabilização.

Ainda os geotêxteis apresentam outras funções combinadas onde são submetidos, sendo classificadas em funções primárias, secundárias ou terciárias, as quais dependem do tipo do geotêxtil ou do seu melhor desempenho em uma determinada função.

2 OBJETIVOS

Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar o comportamento da barreira geotêxtil para contenção de sedimentos provindo do escoamento superficial de uma mineradora, localizada no município de Guaratinguetá, estado de São Paulo.

Objetivo Específico

O objetivo específico deste trabalho é analisar o comportamento do geotêxtil com diferentes gramaturas em função da respectiva abertura aparente. Para avaliar o desempenho do geotêxtil foi construído um modelo físico em laboratório de modo a avaliar o volume retido e do volume que passa, assim como, sua eficiência, reuso e durabilidade.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Mineração e Meio Ambiente

No Brasil, a atividade de mineração é fiscalizada e dirigida pelo Departamento Nacional da Produção e Mineral (DNPM), órgão vinculado ao Ministério das Minas e Energia. O DNPM (1991) integrado à consciência ecológica do povo brasileiro no que tange à degradação provocada pela mineração e atua diretamente no disciplinamento do conflito entre a preservação dos ecossistemas e o atendimento das exigências do ser humano, quanto ao aproveitamento dos recursos minerais não renováveis. Esta nova consciência, tanto da sociedade quanto dos órgãos governamentais, levou os empreendimentos mineiros desenvolvidos a partir da década de 80 a tentar minimizar os danos ecológicos provocados pela mineração.

Atualmente existe uma preocupação com a restauração, reabilitação ou recuperação da área minerada. O ideal é que esta preocupação seja considerada não apenas no período de desativação do empreendimento, no final da extração, por ocasião do esgotamento da jazida, de tal forma que os trabalhos sejam reduzidos a um acabamento final mínimo. O ideal é que se tenha este objetivo durante todas as etapas do empreendimento, ou seja, tanto na implantação quanto no funcionamento.

3.2 Desaguamento de resíduos

A mineração se caracteriza pela extrema variedade de situações em que se podem processar. Isso se deve à diversidade de bens minerais que podem se apresentar em diferentes formas e condições de jazimento. Este fato condiciona a utilização de tecnologias específicas de extração e beneficiamento. Devido a uma amplitude de situações possíveis, a generalização sobre as atividades mineira é aproximativa. Pode-se considerar

que a quase totalidade das minerações baseia-se em trabalhos que envolvem a mobilização de solos e rochas ou escavações. A extração mineral pode-se dar em terra (céu aberto ou subterrânea) ou em corpos d'água (rios, lagos ou mar). Na implantação de uma atividade de mineração, Fornasi et al. (1991) consideram três etapas:

- Pesquisa mineral, que tem como objetivo determinar as reservas minerais disponíveis para efetuar o estudo técnico sobre a viabilidade técnico-econômica.
- Abertura de vias de acesso, compreendendo corte e aterros;
- Instalação de equipamentos, para operações de desmontes, beneficiamento e transporte.

A partir da instalação da atividade mineral, seguem-se algumas etapas fundamentais para que o funcionamento da mesma se realize, tais como decapeamento, desmonte, transporte interno de minério de rejeito, beneficiamento, disposição de rejeitos, estocagem do produto final, carregamento e transporte do produto final, e operações auxiliares.

- Decapeamento – trata-se remoção das camadas estéreis sobrejacentes ao corpo mineralizado, para expô-lo. Neste processo devem ser verificados os procedimentos adequados para a disposição temporária ou definitiva dos materiais removidos. Parte deste material pode ser utilizada na construção de acessos e estruturas de contenção.
- Desmonte – refere-se à desagregação ou fragmentação do corpo de minério para a sua remoção. Além de desmonte manual com ferramentas simples, em se tratando de minerações de pequeno porte, pode ser utilizado como desmonte hidráulico (processo de escavação de materiais desagregáveis pelo uso de jato d'água de alta pressão, utilizando bombas e tubulação); desmonte mecânico (desmonte de solos e rochas friáveis através de impacto e arraste, com o uso de máquinas, tais como retroescavadeiras, tratores e dragas, entre outras) e desmonte com explosivos (para rochas duras, quando a fragmentação se dá por detonação).
- Transporte interno de minério – compreende-se em todos os processos de transferência do material de desmonte e decapeamento entre as unidades e setores internos da mineração, como frente de lavra, usinas de beneficiamento, bacia de

acumulação, bota-fora, entre outros. Podem ser utilizados caminhões, esteiras rolantes, dutos, canais, vagonetes, teleféricos, dentre outros processos.

- Beneficiamento – se corresponde ao conjunto de processos ao que é submetido o minério extraído, com a finalidade de regularizar o tamanho dos fragmentos, remover minerais associados sem valor econômico e aumentar a qualidade, pureza ou teor. São utilizadas comumente, a britagem, moagem e concentração, mas são muito variáveis os processos empregados, pois dependem, basicamente, do tipo e qualidade do minério extraído. Podem ser utilizados a lavagem, a secagem, o peneiramento e a calcinação. São citados também os processos de concentração por densidade, por separação magnética, separação eletrostática, metalurgia extrativa, ciclonagem, flotação e pirólise. Alguns destes processos envolvem ataques com ácidos ou outros reagentes químicos.
- Disposição dos rejeitos – consideram-se os resíduos derivados dos processos de beneficiamento do minério. Os rejeitos derivados da usina de concentração são constituídos isoladamente ou, em proporções variadas, por gases, líquidos e sólidos. Os gases resultantes dos processos de concentração, tais como vapor d'água, gás sulfídrico, entre outros, são tratados química ou fisicamente, seja por absorção, condensação, queima ou liberados na atmosfera. Os rejeitos sólidos inertes vêm sendo depositados em pilhas. Já os líquidos e também sólidos diversos são dispostos em reservatórios, nas denominadas barragens de contenção de rejeitos ou bacias ou tanques de decantação.
- Estocagem de produtos – compreende-se o armazenamento do produto, em geral estocado em pilhas.
- Operações auxiliares – englobam-se as construções e manutenções de barragens, funcionamento das oficinas de manutenção, dos lavadores dos equipamentos e dos depósitos de sucatas, onde são utilizados e armazenados produtos como óleos e graxas.

3.2.1 Características do rejeito

Segundo Abrão (1987) os rejeitos em geral exibem características mineralógicas, geotécnicas e físico-químicas variáveis em função do tipo de minério processado e do próprio processo de beneficiamento adotado. Do ponto de vista geotécnico os rejeitos são considerados granulometricamente finos, variando de colóides a areia. Em geral, os mais

grosseiros são não plásticos e os mais finos podem exibir índices de plasticidades, IP, até 150, como por exemplo, as argilas fosfáticas da Flórida.

Para Chamas (1989) o rejeito é uma dosada mistura de água e sólidos visando à racionalização do seu manuseio, transporte e disposição. O mesmo passa por três estados de comportamento até atingir sua condição final de disposição:

- a) 1º estado: estado inicial do rejeito com comportamento líquido necessário ao seu transporte por via hídrica, denominado de polpa;
- b) 2º estado: estágio intermediário correspondente ao processo de sedimentação, com comportamento semi-líquido a semi-viscoso;
- c) 3º estado: estágio em que ocorre o processo de adensamento e que corresponde ao rejeito propriamente dito comportando-se como solo arenoso ou argiloso, dependendo da sua granulometria.

São considerados rejeitos os materiais separados por processo de beneficiamento para obtenção do mineral de interesse. A produção dos mesmos depende das reservas minerais de cada jazida, das características do minério, e do processo de exploração e beneficiamento empregados. A granulometria e plasticidade da fração sólida do rejeito podem variar em função do processo industrial e da natureza do minério bruto. O rejeito mais favorável, do ponto de vista de engenharia, constitui-se de areias finas a médias, não plásticas, de alta permeabilidade e resistência ao cisalhamento, e baixa compressibilidade, como, por exemplo, os obtidos no beneficiamento de itabiritos (minério de ferro). Esse rejeito sedimenta e adensa rapidamente, com pronta liberação da água da polpa, permitindo o tráfego e a manipulação do material com equipamento de terraplanagem, dentro de um período muito curto após lançado. Os mais desfavoráveis são as argilas com plasticidade elevada, de difícil sedimentação e adensamento, como os obtidos no beneficiamento de minérios de ouro e alumínio, que exigem reservatórios relativamente grandes para sua disposição e inviabiliza a utilização do material como fundação ou para alargar a barragem. A água liberada pela polpa constitui-se na fração líquida do rejeito. As características químicas da água são funções do processo industrial previsto para o beneficiamento e concentração do minério. No caso da água apresentar níveis não tolerados de substâncias tóxicas, toda concepção do sistema deverá ser elaborada prevendo a recirculação do líquido para a planta em circuito fechado e/ou com tratamento do efluente antes da descarga do mesmo para o meio ambiente (Abrão, 1987 e Chamas, 1989).

3.3 Escoamento superficial e transporte de sedimentos

3.3.1 Escoamento superficial

Das fases básicas do ciclo hidrológico, talvez a mais importante para o engenheiro seja a do escoamento superficial, que é a fase que trata da ocorrência e transporte da água na superfície terrestre, pois a maioria dos estudos hidrológicos está ligada ao aproveitamento da água superficial e à proteção contra os fenômenos provocados pelo seu deslocamento. Assim, da precipitação que atinge o solo, parte fica retida quer seja em depressões quer seja como película em torno de partículas sólidas.

Pode ocorrer que a água infiltrada venha, posteriormente, aflorar na superfície como fonte para novo escoamento superficial.

O escoamento superficial abrange desde o excesso de precipitação que ocorre logo após uma chuva intensa e se desloca livremente pela superfície do terreno, até o escoamento de um rio, que pode ser alimentado tanto pelo excesso de precipitação como pelas águas subterrâneas.

Os fatores que influenciam no escoamento superficial podem ser de natureza climática, relacionados à precipitação ou de natureza fisiográfica ligados às características físicas da bacia. Dentre os fatores climáticos destacam-se a intensidade e a duração da precipitação, pois quanto maior a intensidade, mais rápido o solo atinge a sua capacidade de infiltração provocando um excesso de precipitação que escoará superficialmente. A duração também é diretamente proporcional ao escoamento, pois para chuvas de intensidade constante, haverá maior oportunidade de escoamento quanto maior for a duração.

Dentre os fatores fisiográficos os mais importantes são a área, a forma, a permeabilidade e a capacidade de infiltração, e a topografia da bacia.

A influência da área é clara, pois sua extensão está relacionada à maior ou menor quantidade de água que ela pode captar. A permeabilidade do solo influi diretamente na capacidade de infiltração, ou seja, quanto mais permeável for o solo, maior será a quantidade de água que ele pode absorver, diminuindo o potencial de ocorrência de empoçamento ou escoamento superficial (runoff).

Outros fatores importantes são as obras hidráulicas construídas nas bacias, tal como uma barragem que, acumulando a água em um reservatório, reduz as vazões máximas do escoamento superficial e retarda a sua propagação. Em sentido contrário, pode-se retificar um rio aumentando a velocidade do escoamento superficial.

3.3.2 Escoamento superficial na mineração

A mineração pode ser uma fonte de contaminação dos recursos hídricos da área de extração e entorno. As atividades de mineração e de garimpo exigem grandes remanejamentos de rochas e movimentações de terra, por isso os parâmetros de qualidade da água mais alterados por essa atividade são os sólidos e a turbidez.

Fonseca (2004) sugere que a maior parte das minerações no Brasil provoca poluição por sedimentos. A poluição por compostos químicos solúveis, também existe e pode ser localmente grave, mas é mais restrita. As minerações de ferro, calcário, granito, areia, argila, bauxita, manganês, cassiterita, diamante e várias outras provocam, em geral, poluição das águas apenas por sedimentos. Além da poluição por sólidos, muitas minerações provocam poluição de natureza química, por efluentes que se dissolvem na água usada no tratamento do minério ou na água que passa pela área de mineração. Estes contaminantes solúveis podem ser reagentes usados no tratamento do minério ou podem ser originados pela própria rocha minerada. A contaminação química da água mais comum, provocada pela própria rocha minerada, é a contaminação por ácido sulfúrico originado da oxidação de sulfetos de rocha (pirita). Pode haver contaminação, também, por metais pesados originados da rocha. As bacias de rejeito e as pilhas de estéril de minas de metais não-ferrosos e de ouro, também podem provocar contaminação da água.

Inserido neste contexto, Mota (2000), salienta que a mineração e o garimpo são fontes de poluição dos recursos hídricos, modificando principalmente os seguintes parâmetros: sólidos e compostos tóxicos. Os sólidos são alterados através da erosão do solo, que pode trazer como consequências: o assoreamento dos rios; o aterramento gradual dos mananciais e o soterramento de animais e ovos de peixes; o aumento da turbidez da água, ocasionando a diminuição da penetração da luz solar, reduzindo a atividade fotossintética das algas e, em consequência, sua produção de oxigênio; impactos sobre a vida aquática.

Alguns componentes inorgânicos, entre eles os metais pesados, são tóxicos ao homem e, se incorporados à água, podem trazer como consequência danos à saúde humana e aos animais aquáticos.

Segundo Lamego Simões F^o et al. (2003), nas atividades de mineração as fontes de poluição para o meio ambiente, com repercussão no sistema hidrológico da região, são as liberações de efluentes líquidos para os cursos superficiais e sistemas subterrâneos. Além dos efluentes relacionados com a parte industrial, devem ser consideradas também as drenagens. Outro aspecto a ser mencionado é que o próprio desenvolvimento da lavra (que dá origem a cava da mina ou as galerias subterrâneas) tem o potencial de alterar o padrão hidrogeológico local e causar alteração de composição nestas águas, que deverão ser drenadas (e eventualmente tratadas) antes de serem liberadas para o meio ambiente.

No enchimento com água subterrânea, deve ser dedicada atenção especial aos aspectos geotécnicos, particularmente à estabilidade dos taludes. Com relação à qualidade da água subterrânea, esta é em geral livre de nutrientes que possam causar problemas de eutrofização no reservatório formado. Outro aspecto referente à qualidade das águas subterrâneas é o seu pH, que em alguns casos é muito reduzido, podendo conferir à água uma cor ocre ou avermelhada, limitando bastante o seu uso (Von Sperling, 1998).

O enchimento com água da chuva apresenta uma evolução que depende do balanço hidrológico local. Em regiões tropicais pode ocorrer a formação de reservatórios com altos índices de salinidade e, portanto, impróprios para o adequado desenvolvimento da vida aquática. Além disso, as precipitações pluviométricas podem também conter poluentes orgânicos e minerais. Outro aspecto refere-se à acidificação da água em decorrência de chuvas com baixos valores de pH (Von Sperling, 1998).

De acordo com Hancock et al.. (2006), a preservação ambiental da região de minas abandonadas é muito importante, especialmente onde o escoamento superficial e a erosão podem carrear os rejeitos das minas e contaminar o seu entorno e os cursos d'água. É necessário o desenvolvimento de metodologias para avaliação do impacto ambiental e da dinâmica da alteração do relevo das minas, principalmente onde dados de campo são ausentes ou escassos.

3.3.3 Transporte de sedimentos minerários

Os sedimentos que chegam ao curso d'água têm diversas granulometrias e sofrerão um processo de transporte diferenciado, de acordo com as condições do local e do escoamento (Carvalho, 1994).

Existem forças que atuam sobre as partículas, que as mantêm em suspensão ou no fundo do rio, saltando do leito para o escoamento, deslizando ou rolando ao longo do leito, as quais são função do tamanho, peso e forma da partícula, do regime de escoamento, da velocidade da corrente, de obstáculos no leito, da declividade e forma do canal, entre outros.

O material de arraste e saltação constituem o material do leito e tem seu movimento governado pela capacidade de transporte do escoamento. Por outro lado, o material em suspensão - mantido nesta condição por ação de forças de sustentação da turbulência - move-se aproximadamente a mesma velocidade do rio (Nordins & McQuivey, 1971; Umezawa, 1979).

As chuvas que desagregam os solos e as enxurradas que o transportam para os cursos d'água são os principais mecanismos indutores do transporte de sedimentos (Carvalho, 1994).

Quando o material transportado por um curso d'água provém da superfície da bacia contribuinte ele é caracterizado como deplúvio (Washload) e seu transporte se dá predominantemente em suspensão, atingindo ao redor de 90 a 95% do total de sedimentos transportados (Shen, 1971; Umezawa, 1979; Figueiredo, 1989).

3.3.4 Avaliação do transporte sedimentos sólidos

Existem duas maneiras de se estimar o transporte sólido dos leitos fluviais:

1) através do uso de fórmulas empíricas de transporte sólido, onde relaciona-se a carga sólida com parâmetros do fluido, do escoamento e do material transportado;

2) através de medições diretas de vazão líquida e concentração de sedimentos numa seção de medida no curso d'água. Estas medições devem ser realizadas periodicamente e durante um determinado período de tempo que seja de caráter representativo.

3.3.5 Medidas de controle da poluição

O primeiro procedimento a ser adotado é o planejamento da extração e controle de todo o processo para a redução do volume de resíduos gerados. Essas medidas reduziram o volume de efluente a ser tratado e dessa maneira diminuiriam o custo da recuperação das áreas degradadas.

A melhor alternativa de tratamento dependerá de fatores técnicos (volume de efluentes, tipo e concentração dos contaminantes presentes, etc.) e econômicos. Se os efluentes da mineração forem muito ácidos ou apresentarem metais pesados, o tratamento requererá alguns cuidados especiais. Existem alguns estudos sobre as melhores técnicas de remediação da DAM (Adam & Kontopoulos, 2006).

Como coloca Fonseca (2004), o controle no caso de sólidos é tecnicamente simples, mas pode requerer investimentos consideráveis. Pode ser feito através de barragens para contenção e sedimentação. As barragens são muitas vezes os investimentos mais pesados em controle ambiental realizado pelas empresas de mineração. Por outro lado, como estas barragens servem também para recirculação de água, podem não ser considerados investimentos exclusivos de controle ambiental.

Para Bezerra (2005) uma estrutura de retenção de água para sedimentação dos rejeitos requer manutenção contínua e representa uma responsabilidade a longo prazo. Von Sperling (1998), sugere que as empresas mineradoras implantem programas de monitoramento da qualidade da água em barragens de rejeitos não apenas para atender a deliberações normativas de órgãos de controle da poluição, mas também subsidiar a correta operação hidrológica dessas barragens, incluindo sua região de entorno, o que contribui significativamente para enriquecer o componente visual das empresas mineradoras.

Bezerra (2005) ressalta a importância do planejamento e das pesquisas para recuperação de áreas de contenção de sedimentos (barragens ou lagos). Após definir os objetivos da recuperação, o primeiro problema técnico relativo à recuperação de resíduos é o desaguamento, principalmente com a fração fina (silte ou limo) dos sedimentos. Uma

maneira de evitar estes problemas é projetar um sistema de recuperação que retenha permanentemente os sedimentos sob a lâmina de água. A entrada de água pluvial e subterrânea no lago de retenção representa o maior risco de falha para esta estrutura, estas águas devem ser desviadas e não direcionadas para dentro da represa. Enquanto tais sistemas podem ser aceitáveis durante a operação do represamento, sua utilidade em uma situação de desativação é questionada. Uma maneira de evitar o problema, potencialmente sério, destas águas é de construir represamentos em áreas à montante. Locais à montante, sem ameaças de águas pluvial e subterrânea, e, preferivelmente, locais de lavra à montante poderiam ser usados para receber os depósitos de estéril sempre que possível. Infelizmente, locais em áreas topograficamente mais altas nem sempre estão disponíveis para deposição. A recuperação deve também visar ao problema da estabilidade da barragem.

3.4 Sistemas de drenagem e filtração interna

O sistema de drenagem e filtração interna é 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 do 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 das interações 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 (Taylor, 1948). Os materiais empregados na sua construção podem ser naturais ou artificiais de empréstimos, 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 filtro-drenante. No caso dos outros materiais granulares

oriundos da própria mineração, as etapas do processo em que 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 fino 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 colmatção 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 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 1. Muitos destes critérios tentam resumir resultados obtidos por meio de estudos e ensaios laboratoriais em comparações de parâmetros de fácil determinação como aqueles vindos 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 resume os efeitos da porosidade, da forma dos grãos e da distribuição granulométrica, além de outras, do material a ser selecionado como filtro. Fisher e Holtz (1996) e Sherard et al. (1984) 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 estudos 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, varia de 10 a 100.

Tabela 1: Critérios empíricos de projeto de sistemas de drenagem e filtração de barragens (Assis, 2003).

Autor	Material Adjacente	Crítério de Filtro	Principais Características
Terzaghi (1922)	Areia uniforme	$D_{15}/d_{15} > 4 - 5$ e $D_{15}/d_{85} < 4 - 5$	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)	-	$k_F < 6,7 \cdot 10^{-6} \cdot \delta^{1,52}$	δ em μm .
Sherard e Dunnigan (1985)	Siltos 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 $D_{15}/d_{15} < 3 - 5$.
	Siltos e Areia Argilosa (40 a 85% < 0,074 mm)	$D_{15} \leq 0,7$ mm	
	Material intermediário (15 a 40% < 0,074 mm)	$D_{15} = \frac{40 - A}{40 - 15} ((4 \cdot d_{85}) - 0,7) + 0,7 \text{ mm}$	
	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; δ 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.

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 com: 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 do 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 de 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. Kenny et al. (1985) discutem a distribuição do tamanho destas constrições em função dos 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 colmatção 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 a 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 resultados, 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 conseqüente determinação da espessura do filtro.

O comportamento, a longo prazo, dos materiais envolvidos também devem ser analisados no mecanismo de fluxos de barragens de contenção de rejeitos, e os estudos voltados para materiais convencionais, devem ser avaliados frente às peculiaridades dos rejeitos de mineração. Um exemplo da colmatação físico-química de filtros de barragens de contenção de rejeitos são os compostos de ferro, 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.

3.5 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 submetidos a estes casos.

Os geotêxteis são permeáveis, são materiais poliméricos têxteis planos e são classificados com base no processo de fabricação em: tecidos, não tecidos ou tricotados (Araújo, 2008).

Os geotêxteis tecidos são manufaturados através de processos convencionais de tecelagem, recorrendo a teares mecânicos. Estes geotêxteis apresentam um aspecto de fios perpendiculares entre si entrelaçados. Há vários tipos de malhas, embora a mais comum seja a malha simples. Um exemplo deste tipo de estrutura pode ser observado na Figura 1.

Os componentes mais usados na fabricação de geotêxteis tecidos são fitas (extrudidas ou obtidas por corte de folhas de plástico), fios de tiras, multifilamentos ou monofilamentos. As estruturas resultantes apresentam uma distribuição de poros relativamente regular. Geralmente, as estruturas resultantes têm 1 a 2 mm de espessura.



Figura 1: Exemplo de geotêxtil tecido (Schujmann, 2010)

No que se refere aos geotêxteis não tecidos, em geral usam-se monofilamentos contínuos, podendo em algumas situações ser fabricados a partir de fibras cortadas. A manufatura deste tipo de geotêxteis consiste na deposição contínua das fibras ou filamentos em um tapete, para que se forme uma malha solta que será ligada e cuja espessura é ligeiramente superior à do produto final (Figura 2). Os métodos utilizados para a ligação dessa malha podem ser: ligação mecânica, ligação térmica e ligação química (Lopes, 2009).

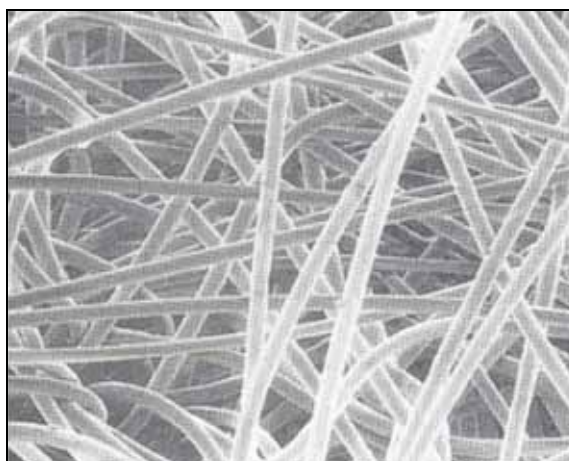


Figura 2: Exemplo de geotêxtil não tecido (Schujmann, 2010)

A ligação térmica é realizada por aquecimento dos componentes, o que permite a sua ligação nos pontos de contacto entre fibras. O geotêxtil resultante é pouco espesso e apresenta-se rígido e áspero ao toque.

A ligação química é geralmente conseguida pela adição de resina acrílica, por impregnação ou pulverização.

Por fim, a ligação mecânica, provavelmente o mais comum dos processos de ligação, obtido pela passagem de milhares de agulhas rugosas na opção a, da Figura 3, em movimento vertical, através de um emaranhado de filamentos, que provoca a sua ligação mecânica, conforme se encontra esquematizado na opção b, da Figura 3. (Pinto, 2005).

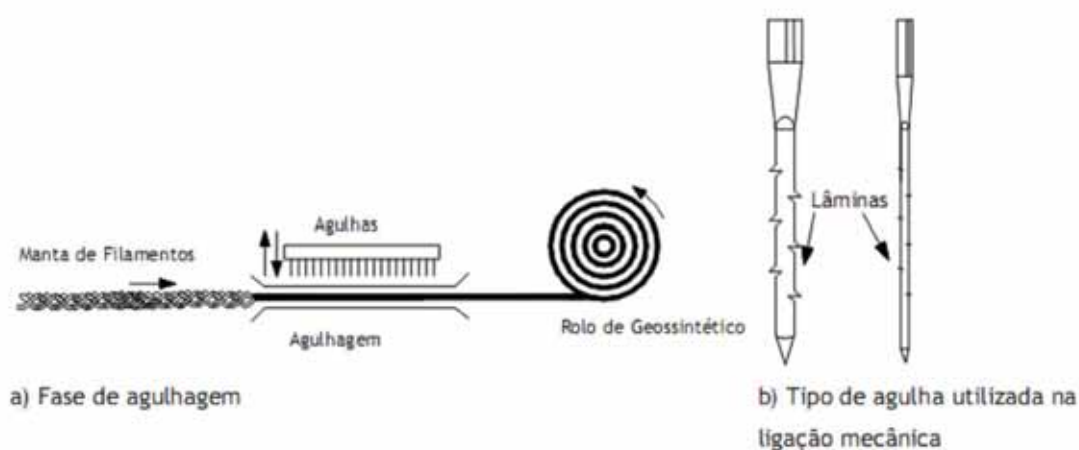


Figura 3: Exemplo de ligação mecânica (Pinto, 2005).

3.5.1 Utilização de geotêxtil em sistemas de drenagem e filtração

Quando aplicado em sistemas de drenagem e 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 rejeito de mineração 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 (Beirigo, 2005).

A drenagem superficial trata basicamente da água que precipita e escoam superficialmente, devendo ser conduzida por estruturas superficiais (sarjetas, canaletas, canais, etc.) e/ou subterrâneas (tubulações, galerias celulares, etc.).

Nas obras de proteção ao meio ambiente, à drenagem superficial visa proteger as obras em geral das ações erosivas e destrutivas da água e, principalmente, afastá-la rapidamente para minimizar ou evitar sua infiltração.

As estruturas de drenagem superficial são dimensionadas a partir da quantificação da água a ser escoada (vazão). As vazões a serem consideradas podem ser estimadas utilizando-se o Método Racional, válido para pequenas bacias (área de até 1km²), cuja expressão básica é:

$$Q = C \cdot i \cdot A, \text{ onde:} \quad [1]$$

Q = vazão a ser drenada na seção considerada;

C = coeficiente de escoamento superficial (Run-Off);

i = intensidade da chuva crítica;

A = área de contribuição da bacia.

Determinadas as vazões, a solução se concentra na implantação de estruturas hidráulicas (valetas, canaletas, bueiros, galerias, canais em gabiões, etc.), com a finalidade de controlar e orientar o escoamento das águas para eliminar os efeitos de erosão. A escolha dos materiais destinados à construção e/ou revestimentos das estruturas hidráulicas é feita em função da resistência à erodibilidade proveniente do fluxo da água. A Figura 4 demonstra o sistema de drenagem pluvial com os tipos de construção e estruturas.

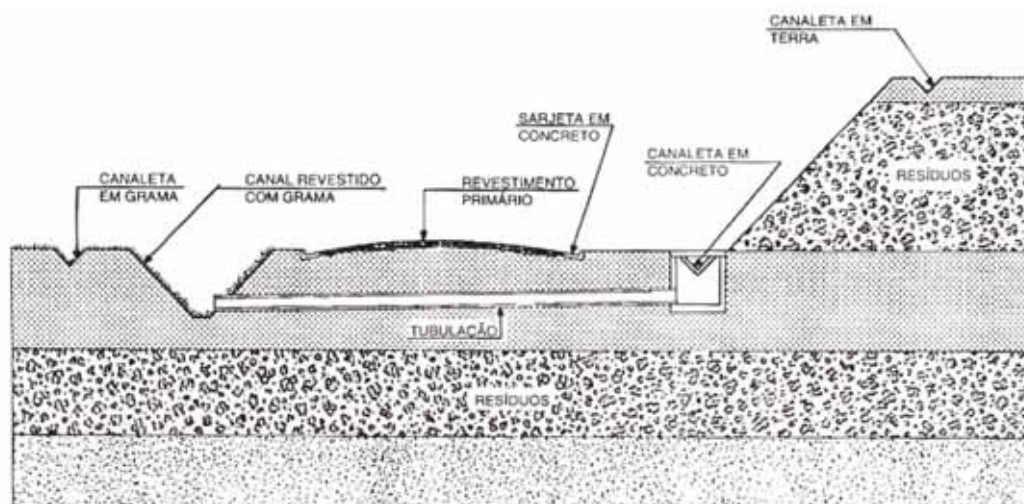


Figura 4: Sistema de drenagem superficial (Bozza & Figueiredo, 1994).

A drenagem subterrânea trata basicamente do controle das águas de percolação no solo proveniente de lençol freático, formado pelas águas subterrâneas e/ou águas de infiltração. Consiste na interceptação das linhas de percolação, com o objetivo de afastar ou remover a água de locais indesejados. Uma vez interceptadas essas águas, se faz necessário determinar as vazões de entrada nas estruturas de drenagem (influxo).

As águas que penetram nas estruturas de drenagem (influxo), e que devem ser retiradas adequadamente (efluxo), determinam as características geométricas (declividade e secção) e do material condutor (brita, areia, tubo, etc.) Essa estrutura, adequadamente posicionada e devidamente dimensionada chama-se DRENO, seja qual for sua forma básica (trincheira, colchão, mista, etc.). A figura 5 demonstra dois tipos de forma básica utilizado na drenagem subterrânea.

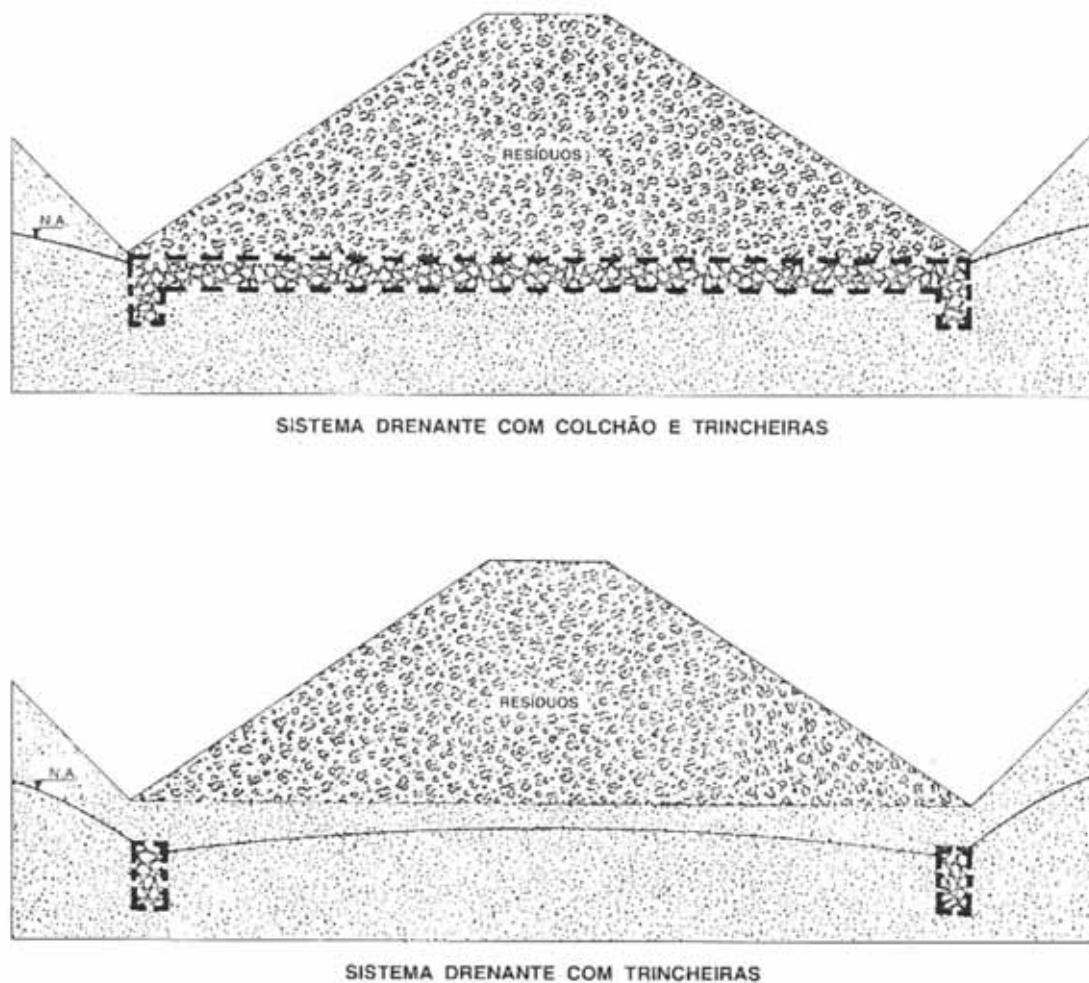


Figura 5: Sistemas de drenagem subterrânea (Bozza & Figueiredo, 1994).

O escoamento da água no solo gera forças de percolação que podem provocar problemas de ordem geotécnica, sendo o “Piping” o principal fenômeno a ser controlado.

O “Piping” é um fenômeno de erosão interna, progressiva e instável, caracterizado pela perda de partículas finas do solo, criando condições de ruptura seja pela concentração de fluxo, aumento de velocidade, carregamento acelerado de partículas e/ou redução de resistência ao cisalhamento do solo.

O deslocamento não controlado de partículas do solo pode também colmatar o meio drenante tornando o sistema inoperante. Para o controle adequado do “Piping” e suas consequências, se faz necessário que o dreno seja dotado de um filtro adequado, ou seja, algo que permita a passagem das águas ao mesmo tempo em que tenha capacidade de retenção adequada de partículas. Os filtros podem ser:

- Naturais: constituídos de agregados, adequadamente dimensionados, em uma ou várias camadas constituindo as denominadas “transições granulométricas”.
- Sintéticos: são os geotêxteis, materiais têxteis permeáveis, produzidos industrialmente, que atendem às condições de filtro pelas suas características de porosidade e retenção de partículas.
- Mistos: constituídos por solos mais a camada geotêxtil.

Os geotêxteis não-tecidos de filamentos contínuos agulhados são os que mais se adequam a essas necessidades.

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 6). 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 dos poros (Gardoni, 2000). Gardoni (2000) ressalta também a negligência dos efeitos de tensão normal atuante sobre a manta nos critérios de projeto de filtros têxteis, tendo sido comprovada sua influência em estudos como os estudos apresentados em Gardoni (2000) e Bessa da Luz (2004).

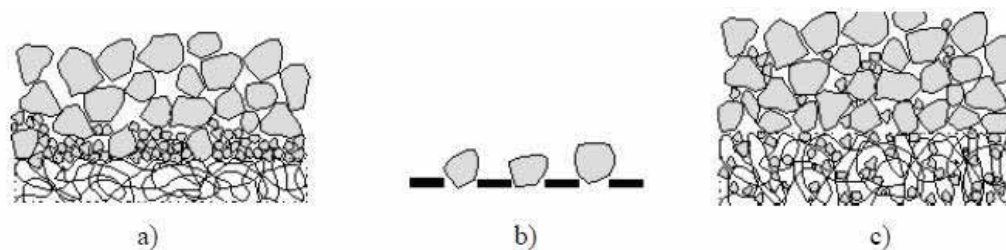


Figura 6: Mecanismos de colmatação física em filtros de geotêxtil não tecido: a) cegamento; b) bloqueamento; e c) colmatação (Beirigo, 2005).

Há diversos tipos e metodologias de ensaios de laboratório destinados à avaliação da compatibilidade do sistema solo-geotêxtil em condições de percolação, dos quais se pode citar (Shi, 1993): o ensaio de fluxo de longa duração (LFT); o ensaio de condutividade hidráulica (HCT); 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 colmatção 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).

3.5.2 Função do geotêxtil

Os geotêxteis possuem várias funções em obras geotécnicas, dentre elas, simultaneamente ou separadamente estão: reforço, drenagem (específico para não-tecido agulhado), proteção, separação ou filtração.

Para este trabalho, o objetivo é a utilização da função filtração, principalmente para filtração de rejeito de mineração. Segundo NBR 12553/1991 a função filtração é definida como: retenção do solo ou de outras partículas, permitindo a passagem do fluido em movimento. Para o desempenho melhor desta função, o geotêxtil deve ser suficientemente permeável para possibilitar a passagem do fluido, ao mesmo tempo em que deve reter determinados diâmetros de partículas, mantendo o solo adjacente estável. Em obras de engenharia, normalmente são necessários o uso de filtros permanentes.

Nestes casos, faz-se necessário um sistema de interceptação dessas águas por meio de drenos. O escoamento da água no solo gera forças de percolação que podem provocar problemas de ordem geotécnica. O principal fenômeno a ser controlado é o da erosão interna (pipping), caracterizado pela perda de partículas finas do solo, de forma a criar condições de ruptura. O deslocamento não controlado de partículas do material de base pode também colmatar o meio drenante.

Para o controle da erosão interna do material adjacente ao dreno e das consequências deste fenômeno, se faz necessário que o dreno seja dotado de um filtro

adequado, ou seja, que permita a passagem de água ao mesmo tempo em que tenha capacidade de retenção de determinadas partículas.

Os filtros também podem ser utilizados em situações onde ocorram partículas em suspensão, neste caso em especial a metodologia de dimensionamento deveria prever em projeto o período de troca ou lavagem do filtro, uma vez que a filtração de partículas em suspensão tende a colmatar o filtro. O problema da colmatação torna-se extremamente grave no caso da filtração de partículas muito finas (argilas ou siltes) que poderiam reduzir a permeabilidade do sistema a ponto de necessitar manutenção muito freqüente, ou em situações onde pode ocorrer colmatação biológica.

O comportamento em filtração é função da estrutura dos geotêxteis. O processo de fabricação tem influência significativa na estrutura porométrica de um geotêxtil, sobretudo no caso dos não-tecidos, nos quais, por exemplo, o tipo da agulha e a intensidade de agulhagem podem provocar variações substanciais em suas propriedades (Urashima e Vidal 1998b; Hwang et al 1998).

3.5.3 Propriedades dos geotêxteis

As propriedades dos geotêxteis associadas a seu comportamento em filtração são a condutividade hidráulica e a dimensão e porcentagem de seus poros. Segundo URASHIMA (2002), o conhecimento e análise das propriedades hidráulicas dos geotêxteis e de sua estrutura porométrica são essenciais para a sua adequada utilização em sistemas de filtração, ou mesmo drenagem e separação, também é necessário o conhecimento de propriedades essenciais para análise de seu comportamento em determinadas condições de solicitação, caracterização do produto, controle de sua qualidade e fornecimento de parâmetros para projetos, tais como:

- Propriedades físicas: massa por unidade de área, espessura nominal, densidade dos fios e porosidade;
- Propriedades mecânicas: resistência à perfuração por impacto, por puncionamento e por estouro, resistência à tração, flexibilidade e compressibilidade;
- Propriedades mecânicas do conjunto solo-geotêxtil: resistência à tração confinada, resistência ao cisalhamento direto e resistência ao arrancamento.

No sistema filtrante, as propriedades da manta virgem podem ser modificadas, seja pelo bloqueio de partículas em sua estrutura, seja pela compressibilidade da mesma, existindo ensaios de longa duração para estudo do comportamento hidráulico em função do tempo.

O processo de simulação proposto ao longo deste trabalho, permiti a estimativa da variação no tempo, da perda de carga hidráulica imposta pelo sistema filtrante, prevendo o período de troca ou lavagem do filtro, ou seja, torna viável a avaliação das alterações das propriedades das mantas têxteis, mesmo em situações em que ocorram partículas em suspensão.

3.5.4 Mecanismos de filtração em geotêxteis

Uma série de artigos clássicos discutem o mecanismo de filtração dos geotêxteis, dentre os quais podemos citar Gourc e Faure (1990), Rollin e Lombard (1988) e Rollin et al (1989).

Podem-se considerar dois tipos básicos de mecanismos de filtração através das mantas sintéticas, em função das diferentes condições em que ocorra a interação solo-geotêxtil: filtração em meio poroso e filtração de partículas em suspensão.

O fluxo, no sistema solo-geotêxtil, na situação de filtração em meio poroso, poderá conduzir a diversas situações, passíveis de alterar as suas propriedades hidráulicas:

- No geotêxtil: retenção de partículas na manta ou deposição sobre ela, depósito de microorganismos ou cristais nos filamentos ou fibras (Vidal e Riguetti 1990);
- No solo base: formação de pré-filtro ou carreamento de partículas, como lavagem (sufusão) ou erosão interna progressiva.

Em um caso teórico, quando um solo é composto por esferas de um mesmo diâmetro, todas as esferas podem ser retidas se todas as aberturas do geotêxtil são menores que o diâmetro destas. Usualmente o solo compõe-se de partículas com diferentes tamanhos e formas, que são representados por meio da curva granulométrica.

A estabilidade interna da estrutura do solo, também deve ser avaliada para evitar a erosão interna do solo. O coeficiente de uniformidade (CU) definido como D_{60}/D_{10} ,

define a estabilidade interna do solo, onde d_{10} é o diâmetro correspondente a 10 % na curva granulométrica e d_{60} a 60 %. Se $CU < 10$ a estrutura do solo é estável (Pilarczyk, 2000).

Para solos coesivos como a argila ou silte adensado, a estabilidade interna é fortemente afetada pela coesão, quanto maior a coesão maior a estabilidade interna.

Na filtração de partículas em suspensão o processo de deposição é função da velocidade do fluxo, da concentração de partículas, do tipo de solo e da estrutura do material filtrante. A abertura de filtração tem influência representativa apenas no caso de partículas não coesivas.

Desta forma, verifica-se que diversos fatores podem influenciar no comportamento dos sistemas de filtração, tais como: a estrutura do geotêxtil, a estrutura do meio a filtrar e as condições de solicitação.

3.5.5 Influência da estrutura do geotêxtil

A estrutura do geotêxtil influencia o comportamento em função de sua espessura e do tipo e dimensão de seus poros (vazios).

Em um tecido existe um único confronto entre as partículas e o filtro, que define imediatamente se a partícula passa ou fica retida. A partícula retida pode bloquear o vazio ou compor uma estrutura com outras partículas que cheguem simultaneamente ao vazio. Os vazios neste tipo de geotêxtil têm praticamente a mesma forma e dimensão.

Em um não-tecido, além do confronto de superfície, a partícula enfrentará outros confrontos durante a passagem através da espessura do geotêxtil. Nos geotêxteis não-tecidos termoligados, as fibras ou filamentos estão em contato direto devido a fusão parcial que as une, reduzindo consideravelmente a espessura e formando vazios de contorno fechado. Os vazios neste caso têm forma e dimensão variada, mas, devido à pequena espessura e ao contorno definido do vazio, o problema se aproxima do caso dos tecidos.

Um não-tecido agulhado apresenta cerca de 90% de porosidade, não existindo ligações entre as fibras ou filamentos num corte, com praticamente nenhum ponto de contato, a menos que esteja sob tensões de confinamento significativas. Neste caso, a

forma e a dimensão dos vazios variam em todas as direções, aumentando a probabilidade de novos confrontos para a partícula que está atravessando sua espessura.

3.5.6 Influência do meio a filtrar

Conforme descrito anteriormente à interação solo-geotêxtil pode levar a duas condições distintas de filtração: filtração em meio poroso e filtração de partículas em suspensão.

a) Filtração de Líquido Percolando através de um Meio Poroso

Consiste na instalação da manta entre o solo e o material drenante, permitindo, simultaneamente, prevenção da migração de partículas do solo-base e livre escoamento da água através do filtro.

A adequada interação solo-geotêxtil-meio drenante dependerá das condições de fluxo, o qual poderá ser em sentido único ou reverso e do gradiente hidráulico.

Podemos dividir em três as condições de filtração de um meio poroso: material a reter uniforme, bem graduado e mal graduado, mas não uniforme.

No caso de material uniforme, o comportamento em filtração está diretamente ligado à dimensão das partículas e à direção do fluxo. Caso o fluxo atue no sentido e direção da gravidade, se o poro for maior que as partículas, algumas se desprendem e são carregadas pelo filtro, mas desde que a relação entre o tamanho do poro e o diâmetro das partículas e a força atuante permitam o efeito de arco a estrutura do meio poroso se estabiliza. Este efeito é alcançado no caso de força de percolação atuando na mesma direção da força da gravidade.

No caso de materiais bem graduados, a eventual movimentação de partículas causada pelo fluxo pode formar rapidamente um pré-filtro quando encontra o geotêxtil, pois a retenção de uma partícula maior faz com que esta partícula também contribua para bloquear uma menor que chegue.

Materiais mal graduados e não uniformes, apresentando curva granulométrica com coeficiente de curvatura fora do intervalo entre 1 e 3, podem apresentar sufusão, ou seja,

passagem livre das partículas mais finas através da estrutura do solo, em função das condições do fluxo.

Neste caso é necessário decidir entre reter ou deixar passar estas partículas. Caso a perda das partículas possa desestabilizar o solo à montante do filtro, as partículas em movimento devem ser retidas. Sua retenção poderá implicar numa redução da condutividade hidráulica na interface com o filtro, que poderá ser benéfica, caso implique numa redução de velocidade do fluxo aceitável, ou impor um aumento excessivo das poro-pressões na massa de solo.

Lafleur (1999) mostra a diversidade de comportamento dos solos neste caso, se bem que a maioria dos solos com curva granulométrica côncava tendeu à colmatação física do filtro e com curva convexa à perda contínua de partículas.

No caso de materiais granulares, a densidade do meio também afeta o comportamento do sistema. Solos mais densos terão vazios menores, dificultando o movimento relativo entre partículas e, conseqüentemente, seu arraste. Materiais puramente argilosos geralmente não apresentam este problema devido às ligações elétricas entre as partículas que dificultam seu arraste. Cuidados na análise da filtração destes solos devem ser tomados, principalmente no caso de argilas dispersivas.

b) Filtração de Líquido Fluindo com Partículas em Suspensão

É o caso da filtração de um líquido, contendo partículas finas em suspensão, onde os grãos não estão em contato e não existe nenhuma estrutura rígida organizada.

A filtração de partículas em suspensão é um problema crítico, pois, devido a perda de carga hidráulica que ocorre quando a partícula carregada encontra o filtro, ela tende a se depositar em sua superfície, o que ocorre mesmo para partículas muito pequenas, bem menores que a abertura de filtração do elemento filtrante.

O comportamento de um sistema de filtração com partículas em suspensão pode variar de acordo com o tipo de material. No caso de solo granular, as partículas retidas formam uma camada de material ainda permeável, em um fenômeno equivalente ao aumento da espessura do filtro; já para solo coesivo, o problema da colmatação passa a ter

enorme importância. A colmatção geralmente é provocada pelo depósito de uma camada de solo pouco permeável à montante do filtro.

Os casos de colmatção física observados referem-se quase sempre a situações de filtração em suspensão. Algumas vezes, falhas ou problemas na execução de determinadas obras geotécnicas podem transformar um problema de filtração de meio poroso em filtração de partículas em suspensão. Quando tratar-se realmente de filtração de partículas em suspensão é necessário avaliar a perda de carga hidráulica causada pela deposição das partículas para prever o processo de troca ou lavagem do filtro.

Partículas muito finas criam rapidamente uma barreira de baixa condutividade hidráulica que, em função da sua concentração na suspensão pode exigir troca ou lavagem, do filtro com muita frequência. O tempo de manutenção destes filtros é função do tipo de partícula, de sua concentração e da velocidade do fluxo (Vidal 1992).

3.5.7 Efeito das condições de solicitação

Segundo URASHIMA (2002), as condições de solicitação que podem influenciar no comportamento do filtro são:

- Solicitações de compressão e tração do filtro;
- Carregamento cíclico;
- Intensidade, direção e sentido do fluxo, devendo-se considerar a direção da gravidade (possibilidade de formação de arco), a possibilidade de mudança no sentido do fluxo e de sua direção (proteção de encostas) e velocidade do fluxo,
- Condições ambientes – características do fluido, riscos de degradação do filtro, alterações químicas no meio a filtrar, possibilidade de colmatção química ou biológica.

Carregamentos cíclicos podem ocorrer por solicitações mecânicas ou hidráulicas. Quando ocorrem por solicitações mecânicas levam a um processo de passagem de partículas concentrado nos pontos de contato, conforme estudo de Saxena e Hsu (1986). Já os carregamentos cíclicos hidráulicos normalmente estão associados aos problemas de inversão do sentido do fluxo. A inversão do sentido do fluxo pode provocar movimentos no geotêxtil.

Nesta situação, além das solicitações que tendem a aumentar a abertura de filtração ao longo do tempo, efeitos de arco e outros fatores que geralmente aumentam a probabilidade de retenção, deixam de atuar, fazendo com que, um filtro inicialmente satisfatório, torne-se insatisfatório com o tempo. Cazzuffi et al (1999) discutem o problema e propõem um equipamento de ensaio para análise do comportamento nesta situação.

Estes efeitos e a situação de fluxo paralelo ao filtro vêm sendo debatidos pelos projetistas alemães, desde Heerten (1984) a Heibaum (1999), que discutem os cuidados a serem tomados e o dimensionamento deste tipo de obra.

Quanto às condições ambientes, a grande diversidade das solicitações exige um estudo detalhado dos fatores intervenientes. Os riscos de colmatação biológica podem ser avaliados por ensaios como o estabelecido pela ASTM D 1987 (1991) (Mendonça e Erlich 2001).

Faure e Kehila (1998) discutem o efeito de danos mecânicos ou causados por falhas na execução (deposição de solo fofo). Nos ensaios realizados por estes autores, os danos mecânicos impostos conforme o procedimento proposto pela ISO/TR10722-1 (1998) (descrito por Vidal et al 1999) praticamente não alteram a abertura de filtração dos geotêxteis ensaiados.

Muitas relações empíricas ou teóricas vêm sendo desenvolvidas para o dimensionamento de sistemas filtrantes têxteis, onde os diversos critérios existentes tentam considerar os princípios básicos para o bom funcionamento do sistema de filtração.

3.5.8 Critérios de dimensionamento

3.5.8.1. Introdução

Atualmente existem diversos critérios para dimensionamento de filtros geotêxteis. Os critérios básicos usados em projetos de engenharia são critério de retenção, critério de permeabilidade, critério de colmatação e critérios de sobrevivência, algumas vezes subdividido em resistência à solicitação mecânica e durabilidade. A avaliação da capacidade filtrante deve ser feita sempre simultaneamente pela capacidade de retenção e pela capacidade de permeabilidade.

Os critérios de retenção são baseados no conceito de que o filtro geotêxtil deve reter um número suficiente de partículas do solo de forma que um solo estável se desenvolva com formação de arcos, prevenindo alguma migração adicional de grãos. Para prevenir a colmatção do geotêxtil, deve-se permitir a passagem de algumas partículas através do geotêxtil (CHRISTOPHER et al., 1993).

Os critérios de permeabilidade são fundamentados no princípio de que o geotêxtil deve assegurar permeabilidade suficientemente para prevenir o desenvolvimento de excesso de poro-pressão de água e para proporcionar uma capacidade de vazão adequada.

A colmatção é estritamente relacionada ao critério de permeabilidade e capacidade de fluxo, contudo, mesmo estando satisfeitos os critérios de retenção e permeabilidade, o sistema filtrante pode estar suscetível à colmatção. O potencial de colmatção depende da relação entre as partículas finas do solo e da capacidade destas partículas em bloquear ou colmatar a maioria das aberturas e poros de um geotêxtil (CHRISTOPHER et al., 1993).

Existem também, critérios de dimensionamento fundamentados em modelos probabilísticos, os quais se baseiam na espessura de geotêxtil necessária para reter uma dada partícula dentro de um intervalo de confiança desejado.

Segundo Gardoni (2000), os critérios usuais de dimensionamento de mantas geotêxteis não consideram a influência da tensão de compressão e nem a colmatção parcial dos filtros antes do início da sua vida útil. Esta colmatção ocorre devido ao espalhamento e compactação do solo sobre a manta e é uma limitação ainda não quantificada. As atuais aplicações de geossintéticos em obras geotécnicas e de meio ambiente requerem que o produto seja, em geral, usado em situações severas, tornando-se necessário uma revisão geral dos critérios para adequação às condições efetivas de uso.

No Brasil, o critério de sobrevivência às solicitações mecânicas pode ser avaliado pela norma NBR 15224 (2005) para aplicações em trincheiras drenantes. A seguir serão citados alguns critérios usualmente encontrados na bibliografia.

3.5.8.2 Critério do Comitê Francês de Geotêxteis e Geomembranas (CFGG, 1986).

Para o dimensionamento da capacidade de retenção do filtro, este critério relaciona a abertura de filtração do geotêxtil obtida por peneiramento hidrodinâmico (O95) com o valor do diâmetro equivalente do solo tal que 85% de todas as partículas sejam inferiores a ele (d_{85}), às condições de contorno do meio (distribuição granulométrica, densidade e

gradiente hidráulico) e à situação para o qual é empregado (ou seja, filtro trabalhando ou não como elemento drenante).

O critério de retenção segue a equação a seguir, sendo os valores de suas variáveis e suas aplicações apresentadas na Tabela 2.

$$O_{95} < C_1 \times C_2 \times C_3 \times C_4 \times d_{85} \dots \dots \dots (2)$$

Onde:

C1 – coeficiente relativo ao gradiente hidráulico;

C2 – coeficiente relativo à densidade do solo;

C3 – coeficiente relativo à granulometria do solo;

C4 – coeficiente relativo às funções do geotêxtil.

Tabela 2: Valores das condições de contorno e suas aplicações

Coeficiente	Valor	Aplicação
C ₁	1,00	Solos bem graduados e contínuos
	0,80	Solos uniformes e contínuos
C ₂	1,25	Solos densos e confinados
	0,80	Solos fofos e desconfiados
C ₃	1,00	Gradientes hidráulicos, $i < 5$
	0,80	Gradiente hidráulico, $5 < i < 20$
	0,60	Gradiente hidráulico, $20 < i < 40$
C ₄	1,00	Uso somente para filtração
	0,30	Uso para filtração e drenagem

No caso de solos coesivos, deve-se aplicar a regra acima citada se o valor da abertura de filtração obtida for superior a 80µm, caso contrário mantém-se a abertura de filtração igual a 80µm.

A filtração de solos dispersivos ou solos em suspensão não estão incluídos no campo de aplicação deste critério de retenção, sendo a escolha do geotêxtil satisfatório realizada através de ensaios de comportamento.

No que se refere à permeabilidade, o geotêxtil deve obedecer à condição:

$$K_{GT} > A \times K_s \dots \dots \dots (3)$$

Sendo:

K_{GT} - permeabilidade do geotêxtil, em m/s;

K_S - coeficiente de permeabilidade do solo protegido em m/s;

A - coeficiente adimensional para permeabilidade como indicado na Tabela 3.

Tabela 3: Valores de coeficiente A, onde t_g é a espessura do geotêxtil em metros.

Coeficiente (A)	Aplicação
$10^3 t_g$	Gradientes baixos e solos limpos
$10^4 t_g$	Gradientes baixos e solos de permeabilidade baixa
$10^5 t_g$	Gradientes elevados e obras de grande responsabilidade

Como citado em Christopher et al. (1993), quanto ao critério de colmatção do CFGG (1986) a abertura de filtração do geotêxtil deve obedecer a condição:

$$O_{95} \geq 4 d_{15} \dots \dots \dots (4)$$

3.5.8.3 Critério Lafleur (1999)

Lafleur propôs este critério de dimensionamento para aprimorar os critérios já existentes, visto que parte destes não considera solos com granulometria ampla.

Assim, foi proposto um critério de retenção para solos problemáticos, não coesivos com coeficientes de uniformidade maiores que seis. Este critério baseia-se no perfil da curva granulométrica do material filtrante, assim como, na condição de estabilidade interna do solo.

Lafleur considera três curvaturas específicas de granulometria, sendo as curvas lineares aquelas que apresentam obrigatoriamente partículas finas uniformemente distribuídas, as curvas descontínuas como aquelas em que existe falha de um certo tamanho de partículas e as curvas côncavas as que apresentam uma concavidade ao longo da granulometria.

Para um melhor entendimento do dimensionamento do filtro com uso deste critério deve-se seguir as etapas do fluxograma apresentado na Figura 7.

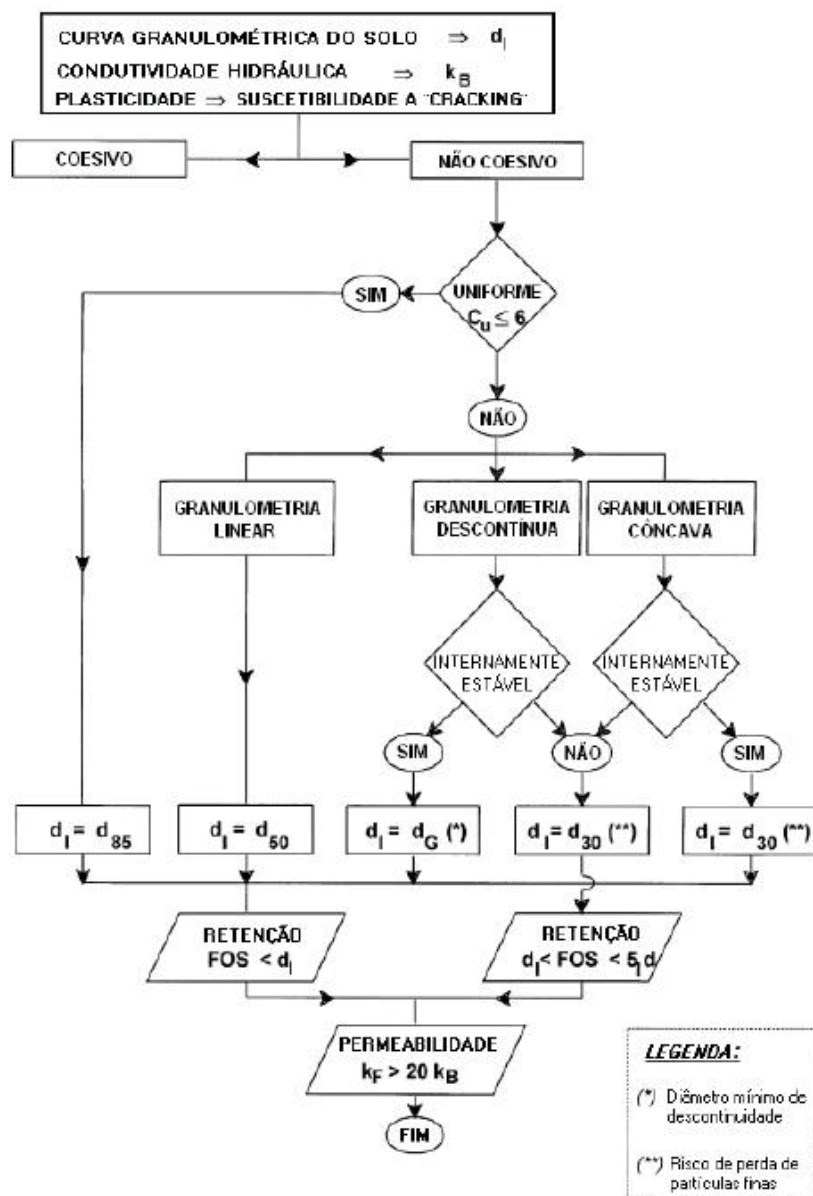


Figura 7: Fluxograma para critério de dimensionamento de Lafleur para solos com granulometria ampla (Muñoz, 2005).

Atribuindo um índice de retenção, RR, onde:

- solos internamente estáveis: $RR < 1$,
- solos internamente instáveis: $1 < RR < 5$.

Sendo:

$$RR = Of / dI \dots\dots\dots (5)$$

Considerando:

Of – abertura de filtração obtida por peneiramento hidrodinâmico;

dI – tamanho indicativo da partícula do solo base:

- d₈₅ para solos uniformes ($C_u < 6$);
- d₅₀ para solos linearmente graduados não uniformes ($C_u > 6$);
- d₃₀ para solos com granulometria côncava;
- d_G para solos com granulometria descontínua (d_G é o diâmetro mínimo da descontinuidade).

Quanto à permeabilidade o geotêxtil deve obedecer à condição:

$$K_{GT} > 20 \times K_S \dots \dots \dots (6)$$

3.5.8.4 Critério do Federal Highway Administration (FHWA, 1985)

Critério proposto por Christopher e Holtz (1985) no Geotextile Engineering Manual, citado por Freitas (2003) e Aguiar e Vertematti (2004).

Quanto à capacidade de retenção, o critério do FHWA apresenta propostas distintas de acordo com a porcentagem de partículas finas na constituição granulométrica do solo, como demonstra a Tabela 4.

Quanto à permeabilidade o geotêxtil deve atender a condição:

$$K_{GT} > C \times K_S \dots \dots \dots (7)$$

sendo C, um coeficiente adimensional cujos valores são função do tipo de aplicação. Para situações não críticas, com baixos gradientes e solos estáveis, usa-se C igual a 1. Em situações críticas ou severas, com gradientes hidráulicos elevados, condutividade hidráulica dinâmica ou solos instáveis utiliza-se C igual a 10.

Tabela 4: Critério de Retenção – FHWA.

Solo	Critério	Aplicação
< 50% passando na peneira 200	Fluxo permanente:	$B=1 \rightarrow CU < 2$ ou $CU > 8$
	$AOS^1 < B d_{85}$	$B=0,5 CU \rightarrow 2 < CU < 4$
		$B=8/CU \rightarrow 4 < CU < 8$
	Fluxo dinâmico, fluxo em dois sentidos:	—
> 50% passando na peneira 200	$AOS < d_{15}$	—
	Fluxo permanente:	
	$AOS < d_{85}$	Geotêxteis tecidos
	$AOS < 1,8 d_{85}$	Geotêxteis não tecidos
	Fluxo dinâmico, fluxo em dois sentidos:	
	$AOS < 0,5 d_{85}$	—

¹AOS: abertura de filtração (ASTM D-4751, 2003)

²CU: coeficiente de uniformidade

O critério do FHWA aborda considerações sobre o risco de colmatção como apresentado na Tabela 5.

Tabela 5: Critério de prevenção à colmatção – FHWA.

Critério	Geotêxtil	Aplicação
$GR^1 < 3$	—	Severa
Porcentagem de área aberta $> 4\%$	Tecido	Não severa
Porosidade $> 30\%$	Não tecido	Não severa

¹GR: razão entre gradientes (ASTM D-5101, 2001)

3.5.8.5 Critério de Giroud (1996)

Giroud propôs um critério de dimensionamento para situações de filtração regulares, sob as seguintes condições:

- Filtro exposto a fluxo unidirecional;
- Contato íntimo entre o material de base e o filtro;
- Solo de base internamente estável;
- Solo de base resistente à liquefação quando submetida a carregamentos cíclicos;
- Base sem grandes vazios que permitam a água fluir livremente;
- Solo não coesivo.

O Critério de Retenção é baseado no coeficiente de uniformidade do solo, definido como a razão entre os diâmetros das partículas do solo. Esta razão denomina-se Coeficiente de Uniformidade Característica, “ C_{uc} ”, e é classificada como:

1. Se $C_{uc}=3$ é usado no critério de retenção, classifica-se como hiperestável. Neste caso somente as partículas que formam um arranjo denso do solo são consideradas, resultando em um critério de retenção conservativo.
2. Se $C_{uc}=13$ é usado no critério de retenção, classifica-se como hipoestável. O arranjo de partículas é considerado no limite da estabilidade interna.
3. Se $C_{uc}=6,5$ é usado no critério de retenção, classifica-se como mesoestável, sendo um caso intermediário.

Podem-se considerar duas situações: solo de base com coeficiente de uniformidade menor ou igual ao característico ($C_u \leq C_{uc}$) e solo de base com coeficiente de uniformidade maior que o valor característico ($C_u > C_{uc}$).

O Critério de Retenção pode ser expresso como:

$$O_F < \Omega \times d_{85} \dots \dots \dots (8)$$

Com:

$$\Omega = \omega \times C_u^{0,3} \quad \text{para } C_u \leq C_{uc} \dots \dots \dots (9)$$

$$\Omega = \omega \times C_{uc}^2 \times C_u^{-1,7} \quad \text{para } C_u > C_{uc} \dots \dots \dots (10)$$

Onde ω é um coeficiente adimensional igual a 1 para solos fofos e 2 para solos densos.

Quanto à permeabilidade o filtro pode ser dimensionado com o critério contra a redução excessiva de vazão:

$$K_{GT} > K_S \dots \dots \dots (11)$$

Ou, ser dimensionado visando o não desenvolvimento de poro-pressão excessivo:

$$K_{GT} > 10 \times K_S \times i_s \dots \dots \dots (12)$$

Sendo i_s o gradiente hidráulico nas adjacências do filtro.

Para dimensionamento de filtros que não se enquadrem nas exigências de solo granular na situação de filtração regular, o autor recomenda a utilização de métodos presentes em outras publicações. Para os solos internamente instáveis, Giroud (1996) recomenda consultar Kenney e Lau(1985) e Lafleur et al. (1989).

3.5.8.6 Critério Racional (1996, 2002, 2003)

Urashima (1996) propôs um critério de retenção para dimensionamento de filtros geotêxteis fundamentado no estudo probabilístico desenvolvido por Silveira (1965) e citado por Urashima. A análise do comportamento do filtro por este critério permite determinar o nível de confiança de retenção de uma dada partícula, necessitando conhecer apenas a sua curva de distribuição de poros e o número de confrontos.

O critério enfoca aspecto relativo ao carregamento de partículas, em que a espessura requerida do filtro (tg) é tal que a probabilidade de uma partícula atravessá-la em toda sua extensão seja nula, dentro de um nível de confiança (P').

Inicialmente deve-se estabelecer o diâmetro da partícula do material de base a reter, posteriormente, com as curvas de distribuição de poros determina-se o valor P , conforme ilustra a Figura 8, onde P é a probabilidade de uma partícula de diâmetro d' encontrar, em um confronto, um vazão de diâmetro d , sendo $d > d'$.

Com o número de confrontos dos geotêxteis disponíveis e a probabilidade P , calcula-se P' :

$$P' = 1 - PN \dots\dots\dots (13)$$

Onde:

P – probabilidade de uma partícula de diâmetro d' encontrar, em um confronto, um vazio de diâmetro d , sendo $d > d'$;

P' – nível de confiança de retenção;

N – número de confrontos.

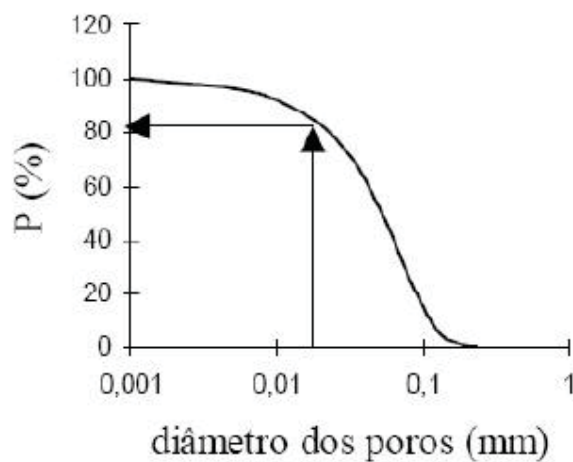


Figura 8: Obtenção de P a partir da curva de distribuição de poros de um determinado geotêxtil (Urashima, 2002).

Em sua tese de mestrado, Urashima (1996) propôs a obtenção da curva de distribuição de poros pela teoria de Gourc (1982) e posteriormente, a adoção do procedimento de retroanálise de Silveira (1993), com resultados de filtração em suspensão, para estimativa do número de confrontos, possibilitando o dimensionamento racional de filtros geotêxteis pela teoria probabilística.

A determinação da curva de poros pelo modelo teórico de Gourc utilizado para geotêxteis não-tecidos agulhados considera como hipótese básica que os filamentos estão distribuídos aleatoriamente segundo a Lei de Poisson, tendo como parâmetros a porosidade e o diâmetro do filamento.

A curva de distribuição de poros, a qual representa a probabilidade acumulada P de se encontrar um poro que apresente diâmetro d maior ou igual a d' é dada pela equação:

$$P = \exp \left[- \frac{\left(\frac{\eta \pi d^2}{4} + \frac{\lambda d}{2} \right)}{\eta_{GT}} \right]$$

Sendo:

$$\eta = 8 \frac{(1 - \eta_{GT})}{(\pi^2 d_f^2)}$$

$$\lambda = \left(2 + \frac{4}{\pi} \right) \frac{(1 - \eta_{GT})}{d_f} \dots\dots\dots(14)$$

Onde:

η – número de fibras por unidade de seção;

η_{GT} – porosidade do filtro;

λ – perímetro da fibra por unidade de seção;

d_f – diâmetro da fibra.

Com aprimoramento do Método Racional, Urashima (2002) propôs a retroanálise de resultados de ensaios de filtração à carga variável com a curva de distribuição de poros determinada por análise de imagens, para estimar o valor da distância média entre confrontos.

Segundo a autora, a curva obtida por análise de imagens para geotêxteis não tecidos agulhados de filamentos contínuos avaliados leva a valores pouco mais conservadores, mas bem próximos dos obtidos pelo método teórico, aproximando-se tanto mais quanto maior o nível de confiança.

4 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área do empreendimento, figura 9, esta localizada na Fazenda Boa Esperança, no bairro do Rio das Pedras, município de Guaratinguetá, estado de São Paulo. O Empreendimento vem operando há anos junto a Fazenda Esperança, em uma área de 31,5 ha, a área possui como coordenadas geográficas de referencia 22°51'48'' de latitude sul e 45°08'55'' de longitude oeste.

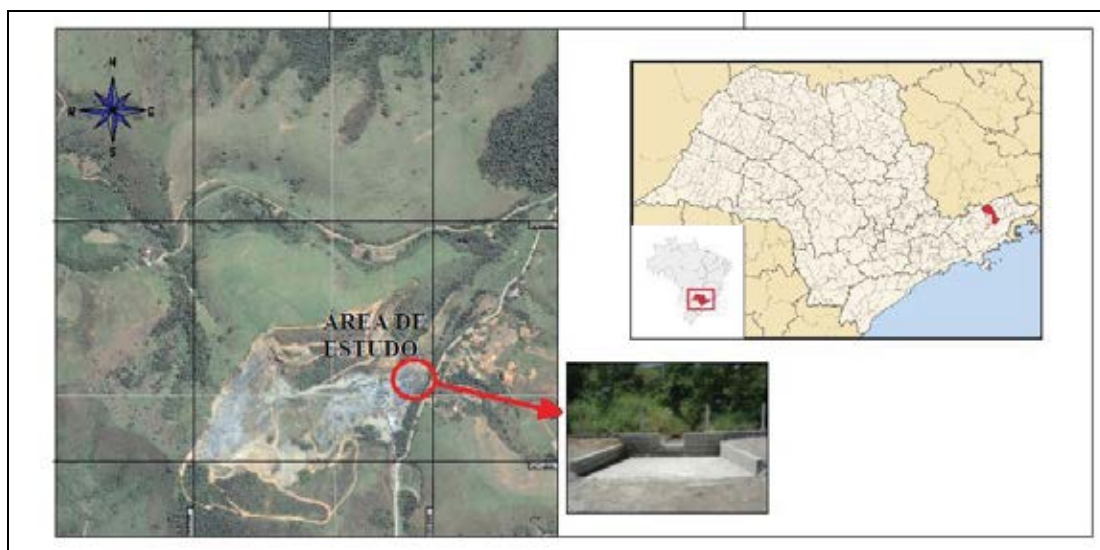


Figura 9: Planta de localização da área com a base Google Earth.

O acesso ao empreendimento é feito através da Rodovia Presidente Dutra – BR 116, até o município de Guaratinguetá, onde se encontra o trevo de acesso à Rodovia BR 171, que liga Guaratinguetá-SP a Paraty-RJ. Nesta rodovia segue-se por 7,0km até o desvio para a estrada de terra que liga a BR 171 ao Bairro Rio das Pedras e a fazenda Esperança, isto logo após o Posto da Polícia Rodoviária a esquerda da rodovia, até o local do empreendimento são mais 3,2km.

A topografia da área levantada é formada por morros, variando a declividade média da área 10° a 40°, a área do entorno, pertence à Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul e possui como principais afluentes deste rio o Ribeirão São Gonçalo, o Ribeirão São José e o rio das Pedras, sendo este formado pelos Ribeirões Cachoeirinha, do Paiol e o córrego do Pinheirinho.

4.1 Descrição dos aspectos fisiográficos e geológicos

4.1.1 Geomorfologia

A região de interesse, segundo a Divisão Geomorfológica do Mapa Geomorfológico do IPT (1981), está inserida na província geomorfológica do Planalto Atlântico, Zona do Médio Vale do Paraíba. Esta zona subdividiu-se naturalmente em uma região de morros desenvolvidos sobre rochas pré-cambrianas, onde se situa a área pesquisada, e uma região de colinas sedimentares. A subzona dos Morros Cristalinos dispõe-se ao redor da Bacia de Taubaté, emoldurando os relevos de colinas, sendo constituída por relevos de Morros Paralelos, Mar de Morros e Morrotes Alongados Paralelos, constituindo normalmente um relevo com declividades médias a altas e amplitudes locais de 100 a 300 metros.

Na área pesquisada destaca-se o relevo de Mar de Morros com predomínio de topos aplainados, vertentes com perfis retilíneos a convexos, drenagem de alta densidade, padrão dendrítico e planícies aluvionares interiores desenvolvidas.

4.1.2 Geologia regional

A região analisada situa-se no Escudo Atlântico, onde se destacam rochas do embasamento cristalino e sedimentos da Bacia de Taubaté. O primeiro é formado por rochas pré-cambrianas, com predomínio de granitos, gnaisses, migmatitos e xistos diversos, não aflorando na área em estudo.

Quanto à litologia, segundo IPT (1981), de maneira geral, neste grupo distingui-se uma seqüência ectínica e uma migmatítica-gnaissica. No estado de São Paulo existe certa dificuldade na separação estratigráfica destas duas seqüências devida principalmente a passagem transicional, com feldspatização progressiva dos ectinitos de facies xisto verde para as rochas gnaissico-migmatíticas.

Como qualquer distinção entre estas seqüências só poderia basear-se em critérios metamórficos, não aconselháveis como inferências estratigráficas, foi efetivada uma separação em conjuntos litológicos caracterizados como complexos, evitando dessa forma uma conotação de empilhamento no tempo. Assim, distingui-se o Complexo Pilar, formado pelas rochas metassedimentares ectiníticas e o Complexo Embu, constituído pelos migmatitos e gnaisses migmatizados (IPT, 1981).

Na região em que se localiza a área pesquisada ocorrem rochas relacionadas ao Complexo Embu, que abrangem terrenos constituídos predominantemente por gnaisses e migmatitos homogêneos oftámicos, nebulíticos e facoidais. Corpos metabásitos irregulares com dimensões variadas ocorrem como núcleos paleossomáticos, que por vezes também tem uma natureza quartzítica e calcosilicática (IPT, 1981).

Encaixadas nestas rochas pré-cambrianas do Complexo Embu ocorrem na região diversas intrusões relacionadas à Fácies Cantareira das Suítes Graníticas Sintectônicas, que constituem a maior parte do magmatismo granitóide do embasamento paulista, tendo sua distribuição uma dispersão bastante ampla nos vários compartimentos tectônicos (IPT, 1981).

A Facies Cantareira é a de maior representatividade no pré-cambriano paulista, tanto no que se refere ao número de corpos como na expressão em área. São afetados pelas grandes falhas transcorrentes aparecendo em núcleos de geoanticlínios e anticlinórios gerados na segunda fase de dobramentos do Ciclo Brasileiro. Os corpos graníticos desta fácies são de origem mesozonal a catazonal, apresentando caráter alóctone a paraúctone, com feições de contato tanto transicionais quanto parcialmente discordantes, desenvolvendo inclusive algumas auréolas de contato quando intrudidos em metamorfitos de baixo grau (IPT, 1981).

Nestas rochas graníticas são observados também tipos bastante diversificados textural, composicional e mineralogicamente. O tipo granito-gnáissico é o mais comum, com a foliação concordante ao trend regional. Possui uma granulação fina a média, composição granítica a granodiorítica e ocorrência conspícua de megacristais de feldspato potássico, oriundos de uma metassomatose tardia, conferindo à rocha caráter porfiróide (IPT, 1981).

Ao norte da cidade de Guaratinguetá ocorrem sedimentos da Bacia de Taubaté. Esta bacia é governada pelo mais importante acidente tectônico cenozóico continental paulista, a tafrogênese, que originou o Graben do Paraíba (IPT, 1981).

A Bacia de Taubaté, não aflorante no local pesquisado é governada pelo mais importante acidente tectônico cenozóico continental paulista, a tafrogênese, que originou o Graben do Paraíba. Esta bacia, que abriga o grupo homônimo, situa-se na parte mais central e subsidente dessa feição tectônica (IPT, 1981).

As seqüências sedimentares existentes no Vale do Paraíba relacionam-se basicamente a dois grupos, sendo um correspondente aos sedimentos terciários da Bacia de Taubaté, citados acima e o outro correspondendo a sedimentos quaternários depositados na várzea pelo rio Paraíba.

4.1.3 Hidrografia e hidrogeologia

A região situa-se na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, sendo esta uma região bem drenada, com os cursos d'água por vezes encachoeirados, apresentando perfis que denotam grande energia no trabalho de erosão e transporte.

No entorno da área pesquisada os principais afluentes do Rio Paraíba do Sul são o Rio São Gonçalo, o Ribeirão São José e o Rio das Pedras, sendo este último formado pelo Ribeirão Cachoeirinha, Ribeirão do Paiol e Córrego do Pinheirinho. Este último constitui-se no limite leste da área pesquisada. Ocorrem outros córregos e drenagens de menor porte na área do entorno, porém sem expressão e interesse para a área em estudo.

Quanto à profundidade do N.A. esta é menor nas áreas próximas às drenagens existentes no entorno e vai aumentando à medida que se caminha em direção ao topo dos morros, sendo este influenciado diretamente pelo sistema de falhamentos da região.

Na pedreira já existente na área, a qual se encontra atualmente com paredões de até 40 metros de alturas, ainda não foi atingido o N.A. No entanto, com o aprofundamento da praça de lavra da pedreira quando da continuidade dos trabalhos de exploração do gnaiss este nível poderá aflorar, devendo a água, para que dessa forma, seja bombeada para possibilitar os trabalhos de mineração no local. A figura 10 demonstra a localização da sub-bacia hidrográfica no entorno do empreendimento.

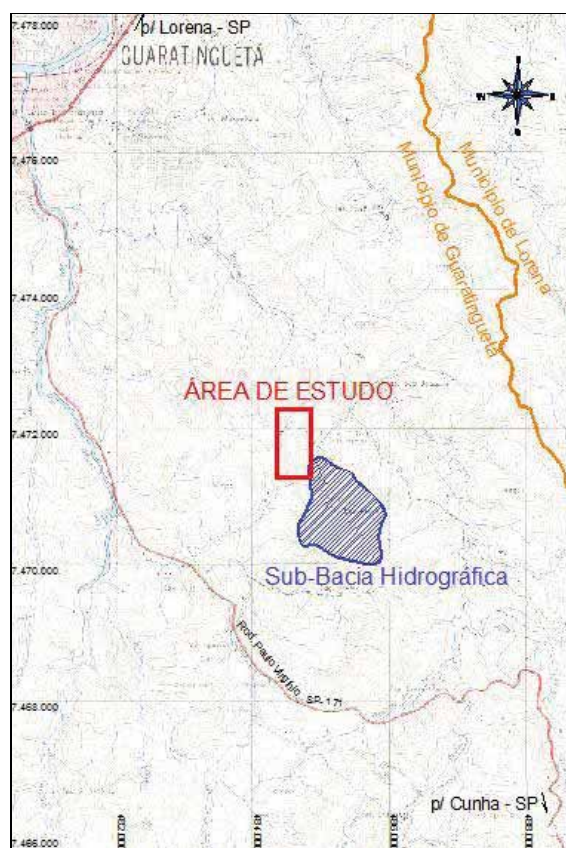


Figura 10: Planta de localização da sub-bacia hidrográfica com a base IBGE.

4.1.4 Clima

O clima da região é subtropical e possui regime de chuvas caracterizado como intermitentes com períodos de concentração nas estações primavera e verão, mais predominantemente nos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março. O índice de precipitação pluviométrica é da ordem de 1.300 mm por ano aproximadamente, com temperaturas médias máximas de 25,4° C e com média mínima de 14,3° C, com umidade relativa do ar em torno de 80%.

4.1.5 Situação atual do empreendimento

Devido a maior fiscalização de órgãos ambientais, o empreendimento foi obrigado a instalar bacias de decantação e bacia de retenção de finos próxima à área de beneficiamento.

A figura 11 demonstra a planta topográfica do empreendimento e a localização da bacia de decantação, casa de luz e a área de contribuição do escoamento superficial.

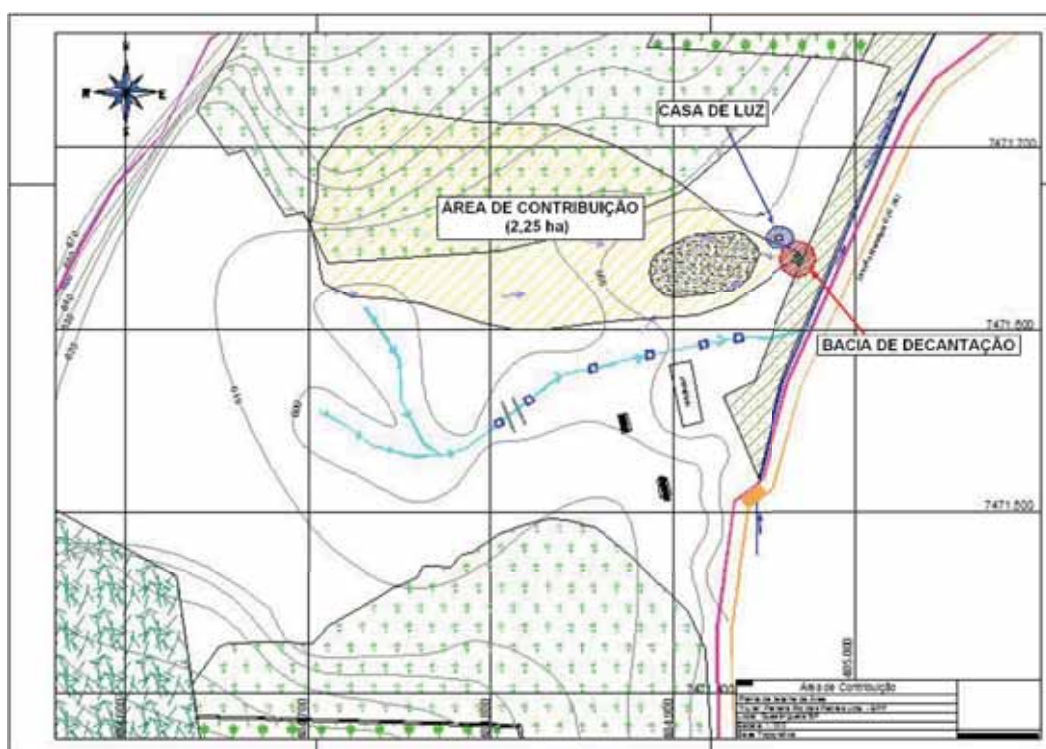


Figura 11: Planta topográfica atual do empreendimento.

Com toda esta área de contribuição de escoamento superficial, todo o rejeito produzido era lançado diretamente no córrego Pinheirinho. Tendo em vista este problema, foi realizada a construção de uma bacia de decantação para os materiais finos. Na figura 12, é possível observar a bacia de decantação de finos instalada no empreendimento.



Figura 12: Bacia de retenção de finos situada no empreendimento.

A seguir, na figura 13, segue o dimensionamento da bacia de decantação de finos localizada no empreendimento.

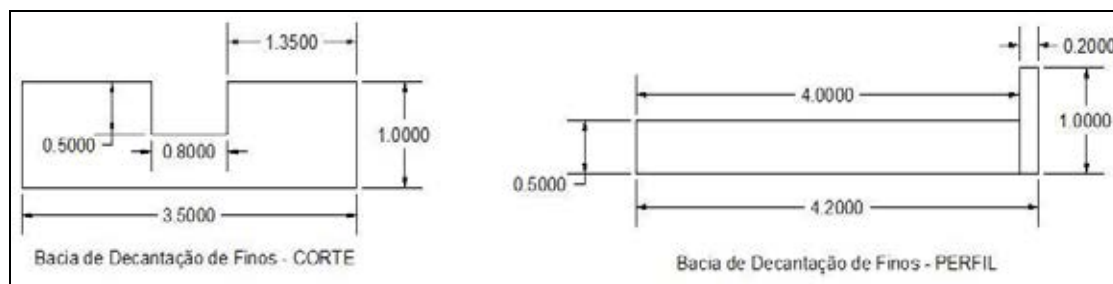


Figura 13: Dimensionamento da bacia. Planta de corte e perfil.

Esta bacia de retenção de finos foi construída e instalada para evitar ou diminuir os impactos que estavam sendo causados, pelo lançamento do rejeito, ao Córrego do Pinheirinho. Mesmo após a instalação da bacia de retenção, o rejeito ainda está sendo lançado no córrego, de forma bem reduzida, mas não evita que os órgãos fiscalizadores apliquem multas ambientais. Na figura 14 observa-se o desaguamento do material fino para o córrego Pinheirinho.



Figura 14: Mancha do material fino, proveniente do beneficiamento do empreendimento, no córrego Pinheirinho.

Para tentar solucionar este problema, adotou-se a análise do comportamento de uma barreira geotêxtil para contenção de sedimentos provindo do escoamento superficial e desaguamento do empreendimento.

A figura 15 demonstra a esquematização da futura instalação de uma barreira de geotêxtil na bacia de retenção de finos.



Figura 15: Bacia de retenção de finos com a futura locação de uma barreira de geotêxtil.

A geração de poeira fica restrita aos processos extrativos e ao trânsito de máquinas e caminhões transportadores nas vias de acesso internas do empreendimento. Esta alteração ambiental tem origem também do arraste eólico do material depositado nas pilhas de material extraído e da operação das máquinas no pátio de manobras do empreendimento. A maior parte da poeira, porém, deposita-se nos arredores próximos dentro ainda dos limites do empreendimento, sendo pouco significativa, principalmente devido à alta pluviosidade do local, e a grande capacidade de retenção d'águas.

A figura 16 observa-se a bacia de retenção de finos preenchida do rejeito e a lâmina d'água devido ao período chuvoso e a falta de limpeza do preenchimento da bacia para retirada do material mais grosso presente.



Figura 16: Bacia de retenção de finos acumulada de finos devido ao desaguamento.

Depois de analisar todas as situações encontradas no campo, notou-se uma construção estava locada a menos de 15 metros de distância da bacia de decantação. Na figura 17 é possível observar a distância entre a casa de luz e a bacia de decantação.



Figura 17: Localização da casa de luz em relação à bacia de retenção.

Como é possível observar na figura acima, temos um problema com a locação da casa de luz. Para a solução deste problema, foi adotado uma altura de 29 centímetros de

barreira geotêxtil, para os ensaios de laboratório. Este procedimento foi adotado, em função dos períodos críticos em épocas chuvosas, tentando impedir que a água atinja a casa de luz, devido a colmatação que ocorre nos geotêxteis.

5 MATERIAIS E MÉTODO

5.1 Ensaios de eficiência da barreira

Para a avaliação da eficiência da barreira com geotêxtil foi construído um modelo físico, lisímetro de laboratório (figura 18), feito com placas de vidro de dimensões: 30 cm de largura, 102 cm de comprimento e 50 cm de altura para uma inclinação de 1%. No centro da caixa foram fixadas cantoneiras para fixação do sistema de barreira composta por uma moldura de madeira, tela e geotêxtil.



Figura 18: Mecanismo de investigação da capacidade de filtração do geotêxtil.

Para o ensaio, foi utilizado um mecanismo para determinação do volume de entrada e volume de saída do rejeito em função do tempo de filtração, com o controle da altura da carga retida pelo geotêxtil, com o equipamento de mecanismo com fluxo horizontal, utilizando lisímetro de laboratório. O ensaio começou com uma vazão constante de 60 L do

rejeito a ser preenchido em um galão de 20 L já dimensionado com uma escala de litro em litro.

O ensaio iniciava com a homogeneização do rejeito e em seguida o registro era aberto e iniciava-se o controle de volume que entrava no sistema em função do tempo. Durante o ensaio era controlado, também, o volume que atravessava a barreira e a evolução da altura de rejeito retido através de uma fita métrica fixa do lado externo do vidro.

5.1.1 Calibração do mecanismo da capacidade de filtração do geotêxtil

Para a análise dos gráficos de volume de carga na barreira, foi realizado o ajuste de calibração para o cálculo do volume retido. Esta calibração foi feita com uma régua métrica fixada do lado externo do vidro, onde estava locada a barreira geotêxtil. As leituras foram medidas em centímetros e com ajuda do béquer graduado, foram transformadas em leituras de volume do material retido pelo geotêxtil. Na figura 19, observa-se o gráfico de calibração do volume retido.

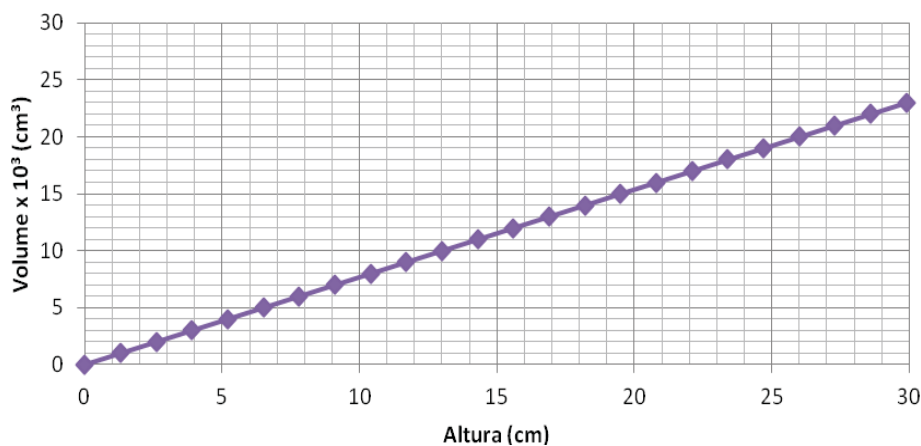


Figura 19: Gráfico de calibração do volume retido pela barreira geotêxtil.

A figura 20 se pode observar o lisímetro de laboratório com a régua métrica fixada no centro do seu mecanismo para a medição da altura de carga retida.



Figura 20: Régua métrica fixada no lisímetro.

Para a análise dos gráficos de reservatório de saída, foi realizado um ajuste de calibração para o cálculo do volume que sai. Esta calibração foi feita com uma fita métrica fixada no reservatório utilizado na coleta do material que passa pela barreira geotêxtil. As leituras foram medidas em centímetros e com ajuda do béquer graduado, foram transformadas em leituras de volume de saída. Na figura 21, observa-se o gráfico de calibração do volume de saída.

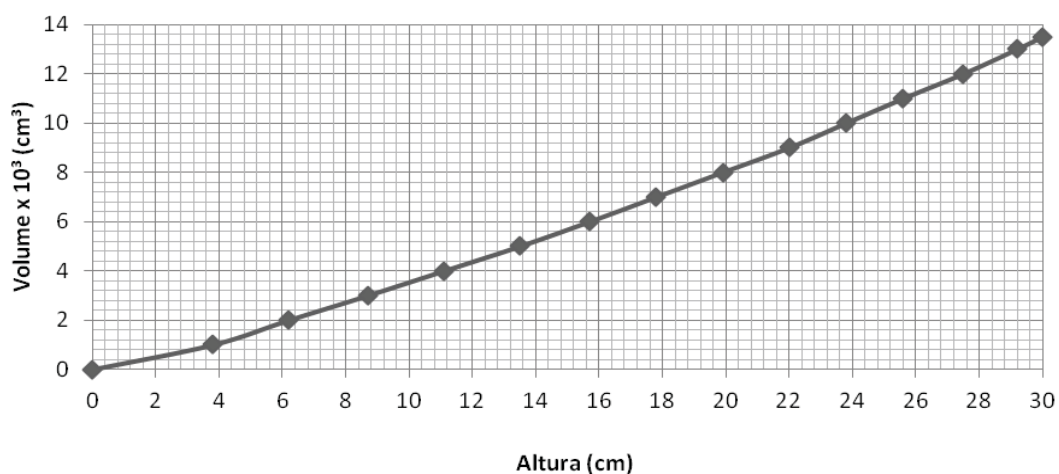


Figura 21: Gráfico de calibração do volume de saída.

O formato do gráfico acima é devido à geometria encontrada no reservatório utilizado nos ensaios de laboratório.

5.2 Características do rejeito utilizado

5.2.1 Granulometria

O ensaio de sedimentação é utilizado para determinar a granulometria de solos compostos de materiais finos, como as argilas. É um ensaio de caracterização, que juntamente com o ensaio de peneiramento compõem a Análise Granulométrica dos solos.

A determinação da granulometria do solo, no ensaio de sedimentação, é baseada na Lei de Stokes. Essa lei relaciona o tamanho da partícula com a velocidade com que ela sedimenta em um meio líquido. Dessa forma, quanto maior a partícula, mais rapidamente ela irá se depositar no fundo da proveta de ensaio.

Os principais equipamentos utilizados nas medições do ensaio de peneiramento e sedimentação estão ilustrados nas figuras 22 e 23.



Figura 22: Agitador e tanque de água destilada.



Figura 23: Béquer utilizado no ensaio de sedimentação.

Ainda para os ensaios de sedimentação, também foram realizados ensaios com o material passante à barreira geotêxtil.

5.2.2 Limites de Liquidez e Plasticidade

Os procedimentos para a realização do ensaio de Limite de Liquidez, segundo a NBR-6459. Este ensaio objetiva-se obter massas de solo com consistências que permitam pelo menos uma determinação do número de golpes em cada um dos intervalos de n°. de golpes: 25 – 35, 20 – 30 e 15 – 25. Na figura 24, observa-se o material utilizado para fazer as medições do ensaio.



Figura 24: Casagrande e cisel, materiais utilizados para realização do ensaio de limite de liquidez.

5.3 Caracterização do geotêxtil

Para a programação dos ensaios foram utilizados dois tipos de geotêxtil com aberturas de filtração (O95) diferentes, um geotêxtil com abertura de filtração 0,26 mm (maior gramatura) e o outro variando entre 0,25-0,15 mm (menor gramatura).

Nas tabelas 6 e 7 encontram-se as especificações técnicas dos geotêxteis de maior gramatura e menor gramatura, respectivamente, utilizados nos ensaios de laboratório.

Tabela 6: Especificação técnica do geotêxtil de maior gramatura

ESPEFICAÇÃO TÉCNICA GEOTÊXIL MAIOR GRAMATURA								
Propriedades Mecânicas								
Produto	Norma	Valor/Unidade	Produto	Norma	Valor/Unidade	Produto	Norma	Valor/Unidade
Resistência à tração faixa larga	ABNT NBR 12824	–	Resistência à tração grab	ASTM D 4632	–	Rasgo trapezoidal	ABNT NBR 13351	–
Valor na ruptura - L	–	8 kN/m	Tração na ruptura - L	–	520 N	Valor na ruptura - L	–	215 N

Alongamento - L	–	60%	Alongamento (min) - L	–	60%	Valor na ruptura - T	–	195 N
Valor na ruptura - T	–	7 kN/m	Tração na ruptura - T	–	450 N	Puncionamento	ASTM D 4833	280 N
Alongamento - T	–	70%	Alongamento (min) - T	–	70%	Puncionamento CBR	ABNT NBR 13359	1,3 kN
Propriedades Hidráulicas			Propriedades Físicas					
Produto	Norma	Valor/Unidade	Produto					
Permissividade	ASTM D 4491	2,4 S ⁻¹	Comprimentos	200 m				
Fluxo de água	–	115 l/s/m ²	Largura	2,30 à 4,60 m				
Permeabilidade normal	ABNT NBR 15223	0,30 cm/s	Matéria-prima e tecnológica	100 % poliéster - filamentos contínuos				
Abertura aparente (O95)	ISO 12956/99	0,25 mm	Ponto de fusão	260°C				
Abertura aparente (O90)	–	0,20 mm	Estrutura	Não tecido - Agulhada				
Abertura aparente	ASTM D 4751	0,33 mm						

Tabela 7: Especificação técnica do geotêxtil de menor gramatura

ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA GEOTÊXTIL MAIOR GRAMATURA								
Propriedades Mecânicas								
Produto	Norma	Valor/Unidade	Produto	Norma	Valor/Unidade	Produto	Norma	Valor/Unidade
Resistência à tração faixa larga	ABNT NBR 12824	–	Resistência à tração grab	ASTM D 4632	–	Rasgo trapezoidal	ABNT NBR 13351	–
Valor na ruptura - L	–	8 kN/m	Tração na ruptura - L	–	520 N	Valor na ruptura - L	–	215 N
Alongamento - L	–	60%	Alongamento (min) - L	–	60%	Valor na ruptura - T	–	195 N
Valor na ruptura - T	–	7 kN/m	Tração na ruptura - T	–	450 N	Puncionamento	ASTM D 4833	280 N
Alongamento - T	–	70%	Alongamento (min) - T	–	70%	Puncionamento CBR	ABNT NBR 13359	1,3 kN
Propriedades Hidráulicas			Propriedades Físicas					
Produto	Norma	Valor/Unidade	Produto					
Permissividade	ASTM D 4491	2,4 S ⁻¹	Comprimentos	200 m				
Fluxo de água	–	115 l/s/m ²	Largura	2,30 à 4,60 m				
Permeabilidade normal	ABNT NBR 15223	0,30 cm/s	Matéria-prima e tecnológica	100 % poliéster - filamentos contínuos				
Abertura aparente (O95)	ISO 12956/99	0,25 mm	Ponto de fusão	260°C				
Abertura aparente (O90)	–	0,20 mm	Estrutura	Não tecido - Agulhada				
Abertura aparente	ASTM D 4751	0,33 mm						

Depois de avaliados e executados, os ensaios sofreram alguns reajustes para que os ensaios tenham maior confiabilidade em seus resultados.

5.4 Programação de ensaios

Para o estudo realizado foram executados 22 ensaios dispostos para avaliar o comportamento da barreira geotêxtil. Nesta avaliação foram utilizados dois tipos de geotêxteis com aberturas de filtração (O95) diferentes. Um geotêxtil com abertura de filtração 0,26 mm (maior gramatura) e o outro variando entre 0,25-0,15 mm (menor gramatura). A tabela 8 demonstra as características dos 22 ensaios realizados.

Tabela 8: Programação dos 22 ensaios realizados.

FIGURA	ENSAIO	TIPO DE GEOTÊXTIL UTILIZADO
Figura 26	Ensaio 1	Geotêxtil Novo de Menor Gramatura
A1	Ensaio 2	Geotêxtil Reutilizado de Menor Gramatura
A2	Ensaio 3	Geotêxtil Novo de Menor Gramatura
A3	Ensaio 4	Geotêxtil Reutilizado de Menor Gramatura
A4	Ensaio 5	Geotêxtil Novo de Menor Gramatura
A5	Ensaio 6	Geotêxtil Reutilizado de Menor Gramatura
A6	Ensaio 7	Geotêxtil Novo de Maior Gramatura
A7	Ensaio 8	Geotêxtil Reutilizado de Maior Gramatura
A8	Ensaio 9	Geotêxtil Novo de Maior Gramatura
A9	Ensaio 10	Geotêxtil Reutilizado de Maior Gramatura
A10	Ensaio 11	Geotêxtil Novo de Maior Gramatura
A11	Ensaio 12	Geotêxtil Reutilizado de Maior Gramatura
A12	Ensaio 13	Geotêxtil Novo de Menor Gramatura
A13	Ensaio 14	Geotêxtil Primeira Reutilização de Menor Gramatura
A14	Ensaio 15	Geotêxtil Segunda Reutilização de Menor Gramatura
A15	Ensaio 16	Geotêxtil Terceira Reutilização de Menor Gramatura
A16	Ensaio 17	Geotêxtil Quarta Reutilização de Menor Gramatura
A17	Ensaio 18	Geotêxtil Novo de Maior Gramatura
A18	Ensaio 19	Geotêxtil Primeira Reutilização de Maior Gramatura

A19	Ensaio 20	Geotêxtil Segunda Reutilização de Maior Gramatura
A20	Ensaio 21	Geotêxtil Terceira Reutilização de Maior Gramatura
A21	Ensaio 22	Geotêxtil Quarta Reutilização de Maior Gramatura

6 RESULTADOS

6.1 Caracterização granulométrica do rejeito

Para caracterização granulométrica do rejeito, utilizado nos estudos, foi realizado o ensaio de sedimentação para análise granulométrica de acordo com a Norma NBR-7181. Foi realizado junto a este ensaio as medições da umidade higroscópica e o peneiramento do rejeito. Para uma caracterização mais detalhada do rejeito utilizado, foram executados novos ensaios de sedimentação do material que retido no geotêxtil novo e reutilizado de menor e maior gramatura e do material que passa no geotêxtil novo e reutilizado de menor e maior gramatura.

Para este ensaio foi gerado as curvas granulométricas dos rejeitos retidos, observados na figura 25.

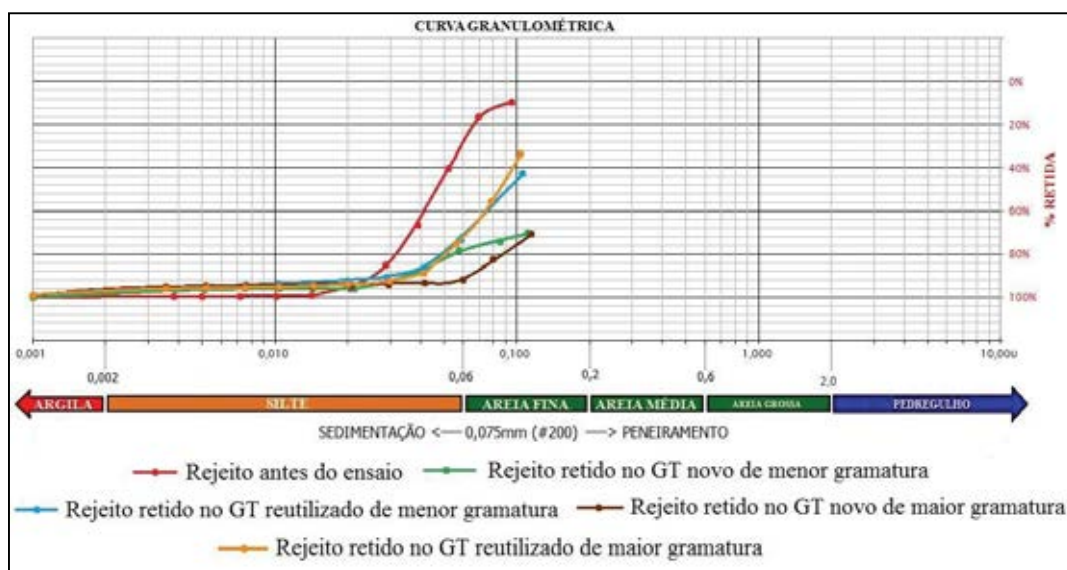


Figura 25: Curva granulométrica dos rejeitos retidos.

De acordo com a NBR-6502/95, observa-se que o rejeito apresenta características de uma areia silte argilosa com presença de biotita (curva vermelha).

No gráfico, nota-se que o rejeito retido no GT (geotêxtil) novo de menor gramatura (curva verde) retém 12% a mais de grãos finos do que o rejeito retido no GT novo de maior gramatura (curva marrom), devido principalmente pela estrutura do GT de maior gramatura ser agulhada. Em relação à retenção do GT reutilizado de menor gramatura (curva azul) e o GT reutilizado de maior gramatura (curva laranja) a diferença na retenção é quase a mesma devido à perda das características de suas estruturas em relação ao geotêxtil novo.

Para o ensaio de sedimentação do material que passa pelo geotêxtil de menor e maior gramatura novo e reutilizado não foi possível obter os resultados devido à quantidade de material coletado.

Para caracterização dos Limites de Atteberg, foi realizado o ensaio de Limite de Liquidez, de acordo com a Norma NBR-6459. É a quantidade de umidade do solo, onde o mesmo muda do estado líquido para o estado plástico, ou seja, perde a sua capacidade de fluir.

O Limite de Plasticidade não foi possível realizar devido ao material apresentar comportamento atípico de suas partículas para tentar moldá-las até que o teor de umidade do solo seja alcançado e comece a fraturar, como é visivelmente visto em casos de materiais argilosos. Um dos fatores pode estar associado à alta quantidade de biotita presente no material pesquisado.

O Limite de Plasticidade não foi possível realizar devido ao material apresentar comportamento atípico de suas partículas para tentar moldá-las até que o teor de umidade do solo seja alcançado e comece a fraturar, como é visivelmente visto em casos de materiais argilosos. Um dos fatores pode estar associado à alta quantidade de biotita presente no material pesquisado, portanto, o rejeito foi caracterizado como NP.

6.2 Ensaio de barreira

Foram realizados 22 ensaios com a utilização do geotêxtil de maior gramatura e menor gramatura, novos e reutilizados. A seguir os gráficos estão dispostos em relação aos

ensaios realizados. A figura 26 ilustra um exemplo dos ensaios realizados que foram dispostos os gráficos em: volume de entrada (cm^3) x tempo (min) (curva vermelha); volume de carga retida (cm^3) x tempo (min) (curva verde) e; volume de saída (cm^3) x tempo (min) (curva azul), respectivamente.

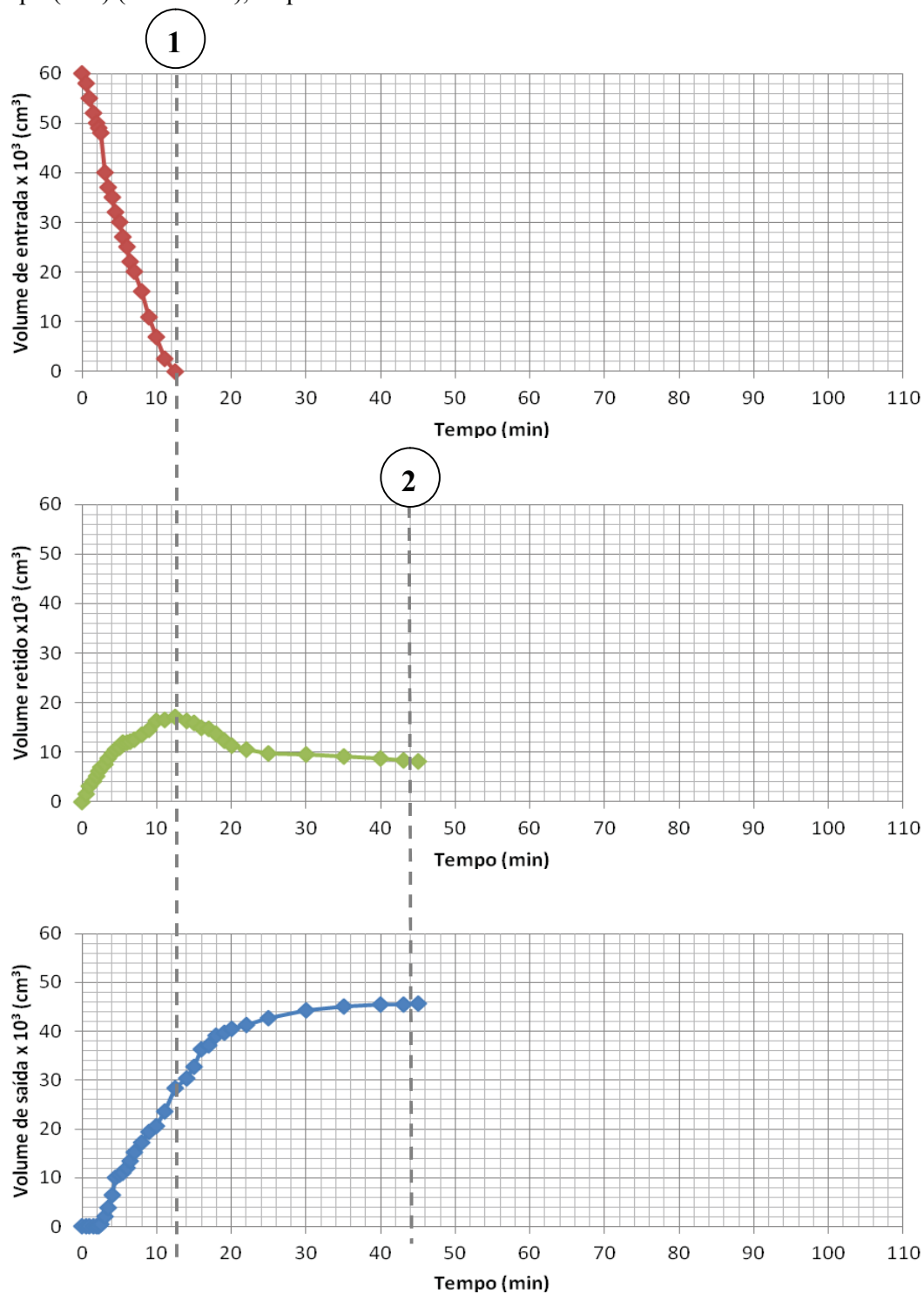


Figura 26: Ensaio 1 – Geotêxtil Novo de Menor Gramatura

Tabela 9: Resultados e observações dos 22 ensaios realizados

ENSAIO	OBSERVAÇÕES
Ensaio 1	Observou-se que no primeiro instante, denominado “1”, aproximadamente $t=13$ min, foi encerrado o volume de entrada do rejeito, com seu volume máximo retido chegando a $18 \times 10^3 \text{cm}^3$ e seu volume de saída chegando a $29 \times 10^3 \text{cm}^3$. Para o segundo instante, denominado “2”, observou-se que no $t=45$ min, seu volume de saída foi interrompido.
Ensaio 2	Observou-se que instante denominado “1”, no intervalo de $t=2$ a $t=4$ min foi interrompido o volume de entrada devido ao máximo carregamento da barreira de contenção do geotêxtil. Com isto, no intervalo de $t=2$ a $t=9$ min, ocorreu uma queda na carga hidráulica da barreira geotêxtil. Para o segundo instante, denominado “2”, observou-se que no $t=60$ min seu volume de saída é interrompido.
Ensaio 3	Observou-se que no primeiro instante, denominado “1”, aproximadamente $t=15$ min, foi encerrado o volume de entrada do rejeito, com seu volume máximo retido chegando a $19 \times 10^3 \text{cm}^3$ e seu volume de saída chegando a $25 \times 10^3 \text{cm}^3$. Para o segundo instante, denominado “2”, observou-se que no $t=45$ min, seu volume de saída foi interrompido.
Ensaio 4	Observou-se que no primeiro instante, denominado “1”, aproximadamente $t=14$ min, foi encerrado o volume de entrada do rejeito, com seu volume máximo retido chegando a $19 \times 10^3 \text{cm}^3$ e seu volume de saída chegando a $28 \times 10^3 \text{cm}^3$. Para o segundo instante, denominado “2”, observou-se que no $t=71$ min, seu volume de saída foi interrompido.
Ensaio 5	Observou-se que instante denominado “1”, no intervalo de $t=3$ a $t=5$ min foi interrompido o volume de entrada devido ao máximo carregamento da barreira de contenção do geotêxtil. Com isto, no intervalo de $t=4$ a $t=11$ min, não houve alteração na carga hidráulica da barreira geotêxtil. Para o segundo instante, denominado “2”, observou-se que no $t=80$ min seu volume de saída é interrompido.
Ensaio 6	Observou-se que no primeiro instante, denominado “1”, aproximadamente $t=11$ min, foi encerrado o volume de entrada do rejeito, com seu volume máximo retido chegando a $21 \times 10^3 \text{cm}^3$ e seu volume de saída chegando a $21 \times 10^3 \text{cm}^3$. Para o segundo instante, denominado “2”, observou-se que no $t=82$ min, seu volume de saída foi interrompido.
Ensaio 7	Observou-se que no primeiro instante, denominado “1”, aproximadamente $t=9$ min, foi encerrado o volume de entrada do rejeito, com seu volume máximo retido chegando a $21 \times 10^3 \text{cm}^3$ e seu volume de saída chegando a $19 \times 10^3 \text{cm}^3$. Para o segundo instante, denominado “2”, observou-se que no $t=93$ min, seu volume de saída foi interrompido.

Ensaio 8	Observou-se que no primeiro instante, denominado “1”, aproximadamente $t=11$ min, foi encerrado o volume de entrada do rejeito, com seu volume máximo retido chegando a $21 \times 10^3 \text{cm}^3$ e seu volume de saída chegando a $20 \times 10^3 \text{cm}^3$. Para o segundo instante, denominado “2”, observou-se que no $t=85$ min, seu volume de saída foi interrompido.
Ensaio 9	Observou-se que instante denominado “1”, no intervalo de $t=8$ a $t=12$ min e $t=16$ a $t=20$ min foi interrompido o volume de entrada devido ao máximo carregamento da barreira de contenção do geotêxtil. Com isto, no intervalo de $t=10$ a $t=22$ min, houve alteração na carga hidráulica da barreira geotêxtil. Para o segundo instante, denominado “2”, observou-se que no $t=1050$ min seu volume de saída é interrompido.
Ensaio 10	Observou-se que no primeiro instante, denominado “1”, aproximadamente $t=11$ min, foi encerrado o volume de entrada do rejeito, com seu volume máximo retido chegando a $22 \times 10^3 \text{cm}^3$ e seu volume de saída chegando a $20 \times 10^3 \text{cm}^3$. Para o segundo instante, denominado “2”, observou-se que no $t=92$ min, seu volume de saída foi interrompido.
Ensaio 11	Observou-se que no primeiro instante, denominado “1”, aproximadamente $t=14$ min, foi encerrado o volume de entrada do rejeito, com seu volume máximo retido chegando a $20 \times 10^3 \text{cm}^3$ e seu volume de saída chegando a $20 \times 10^3 \text{cm}^3$. Para o segundo instante, denominado “2”, observou-se que no $t=100$ min, seu volume de saída foi interrompido.
Ensaio 12	Observou-se que no primeiro instante, denominado “1”, aproximadamente $t=12$ min, foi encerrado o volume de entrada do rejeito, com seu volume máximo retido chegando a $21 \times 10^3 \text{cm}^3$ e seu volume de saída chegando a $21 \times 10^3 \text{cm}^3$. Para o segundo instante, denominado “2”, observou-se que no $t=100$ min, seu volume de saída foi interrompido.
Ensaio 13	Observou-se que no primeiro instante, denominado “1”, aproximadamente $t=17$ min, foi encerrado o volume de entrada do rejeito, com seu volume máximo retido chegando a $17 \times 10^3 \text{cm}^3$ e seu volume de saída chegando a $33 \times 10^3 \text{cm}^3$. Para o segundo instante, denominado “2”, observou-se que no $t=107$ min, seu volume de saída foi interrompido.
Ensaio 14	Observou-se que no primeiro instante, denominado “1”, aproximadamente $t=17$ min, foi encerrado o volume de entrada do rejeito, com seu volume máximo retido chegando a $19 \times 10^3 \text{cm}^3$ e seu volume de saída chegando a $31 \times 10^3 \text{cm}^3$. Para o segundo instante, denominado “2”, observou-se que no $t=100$ min, seu volume de saída foi interrompido.
Ensaio 15	Observou-se que no primeiro instante, denominado “1”, aproximadamente $t=15$ min, foi encerrado o volume de entrada do rejeito, com seu volume máximo retido chegando a $18 \times 10^3 \text{cm}^3$ e seu volume de saída chegando a $30 \times 10^3 \text{cm}^3$. Para o segundo instante, denominado “2”, observou-se que no $t=90$ min, seu

	volume de saída foi interrompido.
Ensaio 16	Observou-se que no primeiro instante, denominado “1”, aproximadamente $t=16$ min, foi encerrado o volume de entrada do rejeito, com seu volume máximo retido chegando a $18 \times 10^3 \text{cm}^3$ e seu volume de saída chegando a $27 \times 10^3 \text{cm}^3$. Para o segundo instante, denominado “2”, observou-se que no $t=95$ min, seu volume de saída foi interrompido.
Ensaio 17	Observou-se que no primeiro instante, denominado “1”, aproximadamente $t=18$ min, foi encerrado o volume de entrada do rejeito, com seu volume máximo retido chegando a $18 \times 10^3 \text{cm}^3$ e seu volume de saída chegando a $20 \times 10^3 \text{cm}^3$. Para o segundo instante, denominado “2”, observou-se que no $t=106$ min, seu volume de saída foi interrompido.
Ensaio 18	Observou-se que no primeiro instante, denominado “1”, aproximadamente $t=15$ min, foi encerrado o volume de entrada do rejeito, com seu volume máximo retido chegando a $16 \times 10^3 \text{cm}^3$ e seu volume de saída chegando a $36 \times 10^3 \text{cm}^3$. Para o segundo instante, denominado “2”, observou-se que no $t=80$ min, seu volume de saída foi interrompido.
Ensaio 19	Observou-se que no primeiro instante, denominado “1”, aproximadamente $t=21$ min, foi encerrado o volume de entrada do rejeito, com seu volume máximo retido chegando a $19 \times 10^3 \text{cm}^3$ e seu volume de saída chegando a $29 \times 10^3 \text{cm}^3$. Para o segundo instante, denominado “2”, observou-se que no $t=100$ min, seu volume de saída foi interrompido.
Ensaio 20	Observou-se que no primeiro instante, denominado “1”, aproximadamente $t=17$ min, foi encerrado o volume de entrada do rejeito, com seu volume máximo retido chegando a $20 \times 10^3 \text{cm}^3$ e seu volume de saída chegando a $31 \times 10^3 \text{cm}^3$. Para o segundo instante, denominado “2”, observou-se que no $t=85$ min, seu volume de saída foi interrompido.
Ensaio 21	Observou-se que no primeiro instante, denominado “1”, aproximadamente $t=16$ min, foi encerrado o volume de entrada do rejeito, com seu volume máximo retido chegando a $19 \times 10^3 \text{cm}^3$ e seu volume de saída chegando a $28 \times 10^3 \text{cm}^3$. Para o segundo instante, denominado “2”, observou-se que no $t=100$ min, seu volume de saída foi interrompido.
Ensaio 22	Observou-se que no primeiro instante, denominado “1”, aproximadamente $t=19$ min, foi encerrado o volume de entrada do rejeito, com seu volume máximo retido chegando a $18 \times 10^3 \text{cm}^3$ e seu volume de saída chegando a $34 \times 10^3 \text{cm}^3$. Para o segundo instante, denominado “2”, observou-se que no $t=110$ min, seu volume de saída foi interrompido.

Situações observadas para os ensaios realizados

Após a realização dos ensaios e a montagem de todos os gráficos, notou-se que a soma do volume retido mais a soma do volume de saída. Neste caso, o material que passou pela barreira geotêxtil teve que atingir uma altura mínima até chegar à tubulação de saída do lisímetro para o reservatório de saída. Na figura 27 observa-se a diferença de altura mínima “h” que o rejeito atingiu na tubulação até o reservatório de saída.



Figura 27: Diferença da altura para atingir o reservatório de saída.

Na figura 28 observa-se o carregamento máximo da barreira de contenção do geotêxtil, quando foi preciso interromper o volume de saída para que não rompesse a barreira.



Figura 28: Carga hidráulica máxima retida pelo geotêxtil.

Como visto antes, este é o carregamento máximo da barreira geotêxtil para evitar que a bacia de decantação não exceda seu limite e a água atinja a casa de luz.

7 ANÁLISES E DISCUSSÕES

7.1 Análise

Para uma primeira análise foi feita a separação do material para os ensaios de sedimentação para a determinação da quantidade (porcentagem) do material que fica retido e a quantidade do que passa pela barreira geotêxtil. Nas figuras 29 e 30, apresentam as diferenças do material retido para o material que passa, pelo tamanho de grãos, nos geotêxteis.



Figura 29: Material retido no geotêxtil de menor e maior gramatura.

Onde:

- 1) Material retido no geotêxtil reutilizado de menor gramatura;
- 2) Material retido no geotêxtil novo de menor gramatura;
- 3) Material retido no geotêxtil reutilizado de maior gramatura;
- 4) Material retido no geotêxtil novo de maior gramatura.

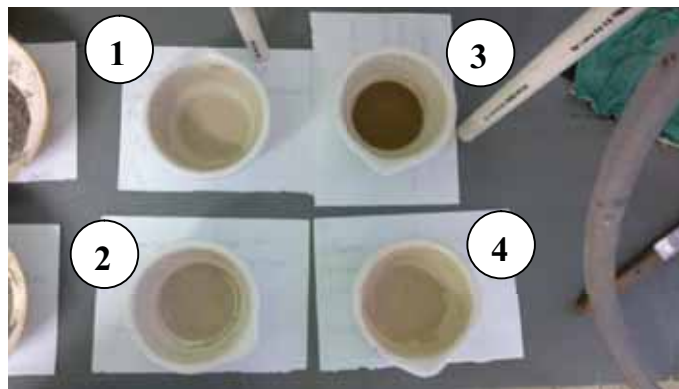


Figura 30: Material que passa pelo geotêxtil de menor e maior gramatura.

Onde:

- 1) Material que passa pelo geotêxtil reutilizado de menor gramatura;
- 2) Material que passa pelo geotêxtil novo de menor gramatura;
- 3) Material que passa pelo geotêxtil reutilizado de maior gramatura;
- 4) Material que passa pelo geotêxtil novo de maior gramatura.

Para análises de repetibilidade, os gráficos foram dispostos com a superposição dos resultados obtidos, tais como: geotêxtil novo de menor gramatura (Figura 31); geotêxtil reutilizado de menor gramatura (Figura 32); geotêxtil novo de maior gramatura (Figura 33); geotêxtil reutilizado de maior gramatura (Figura 34); 3 resultados com geotêxtil reutilizado de menor gramatura (Figura 35) e; 3 resultados com geotêxtil reutilizado de maior gramatura (Figura 36), respectivamente.

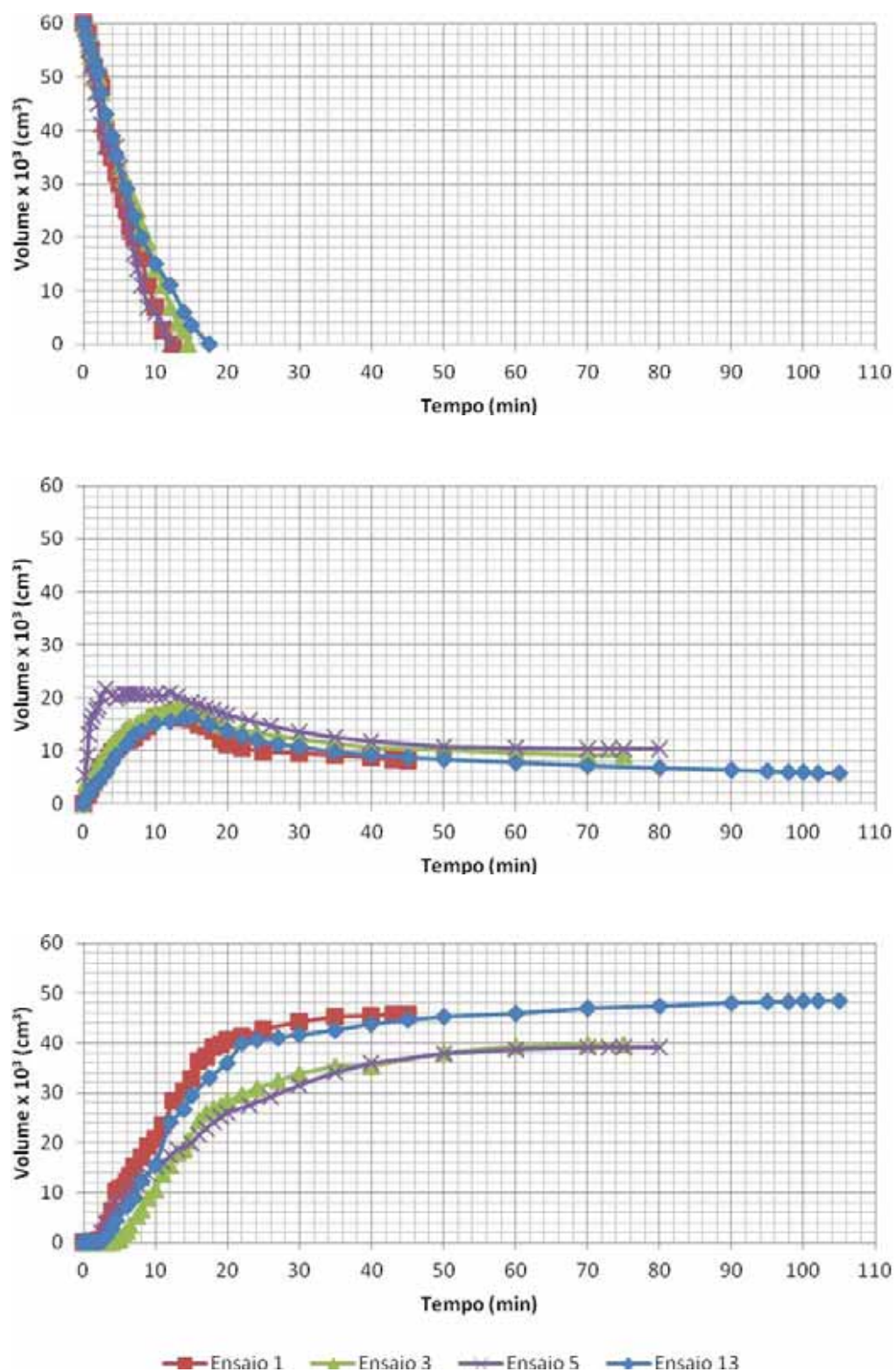


Figura 31: Superposição dos resultados obtidos com o geotêxtil novo de menor gramatura.

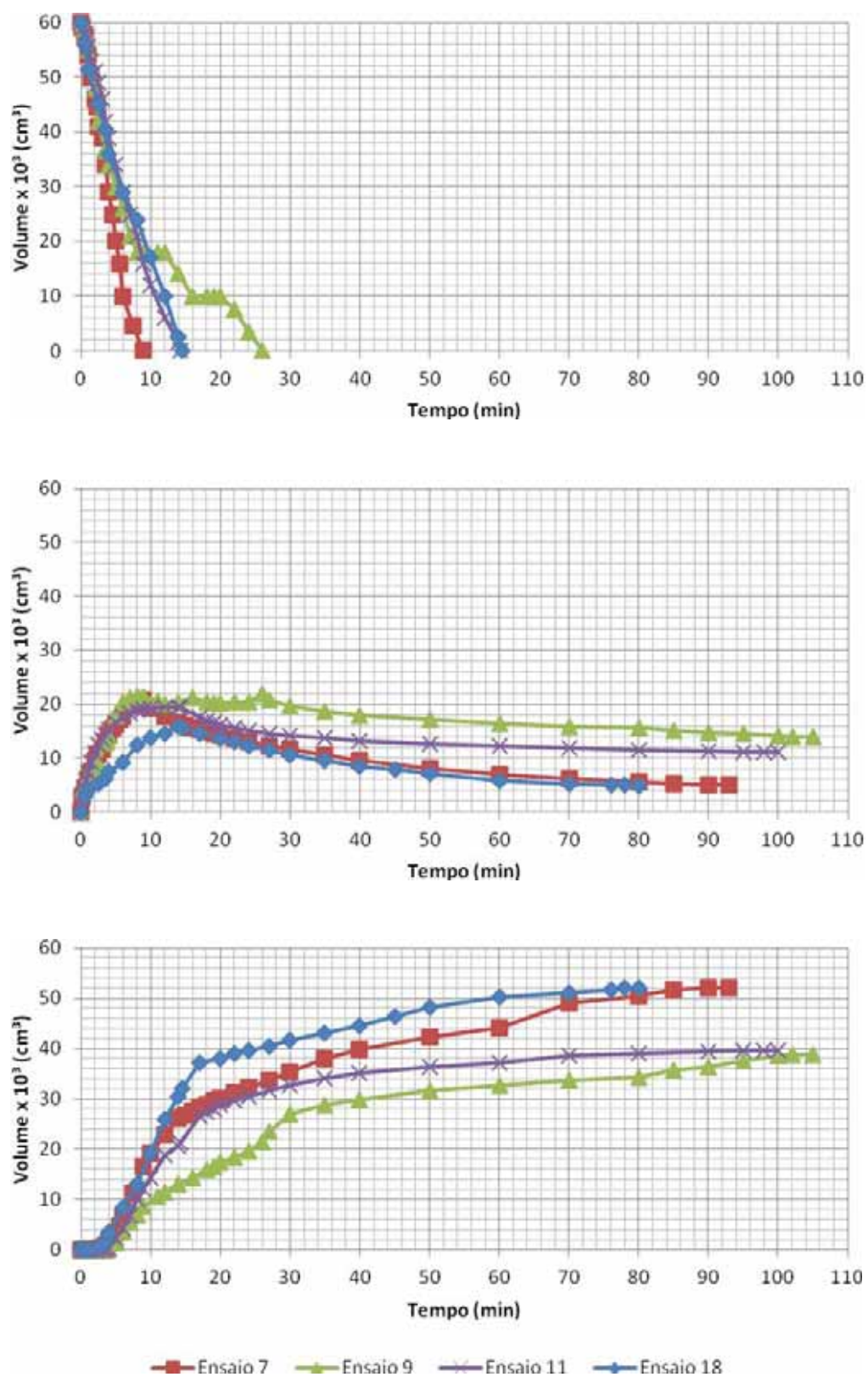


Figura 32: Superposição dos resultados obtidos com o geotêxtil novo de maior gramatura.

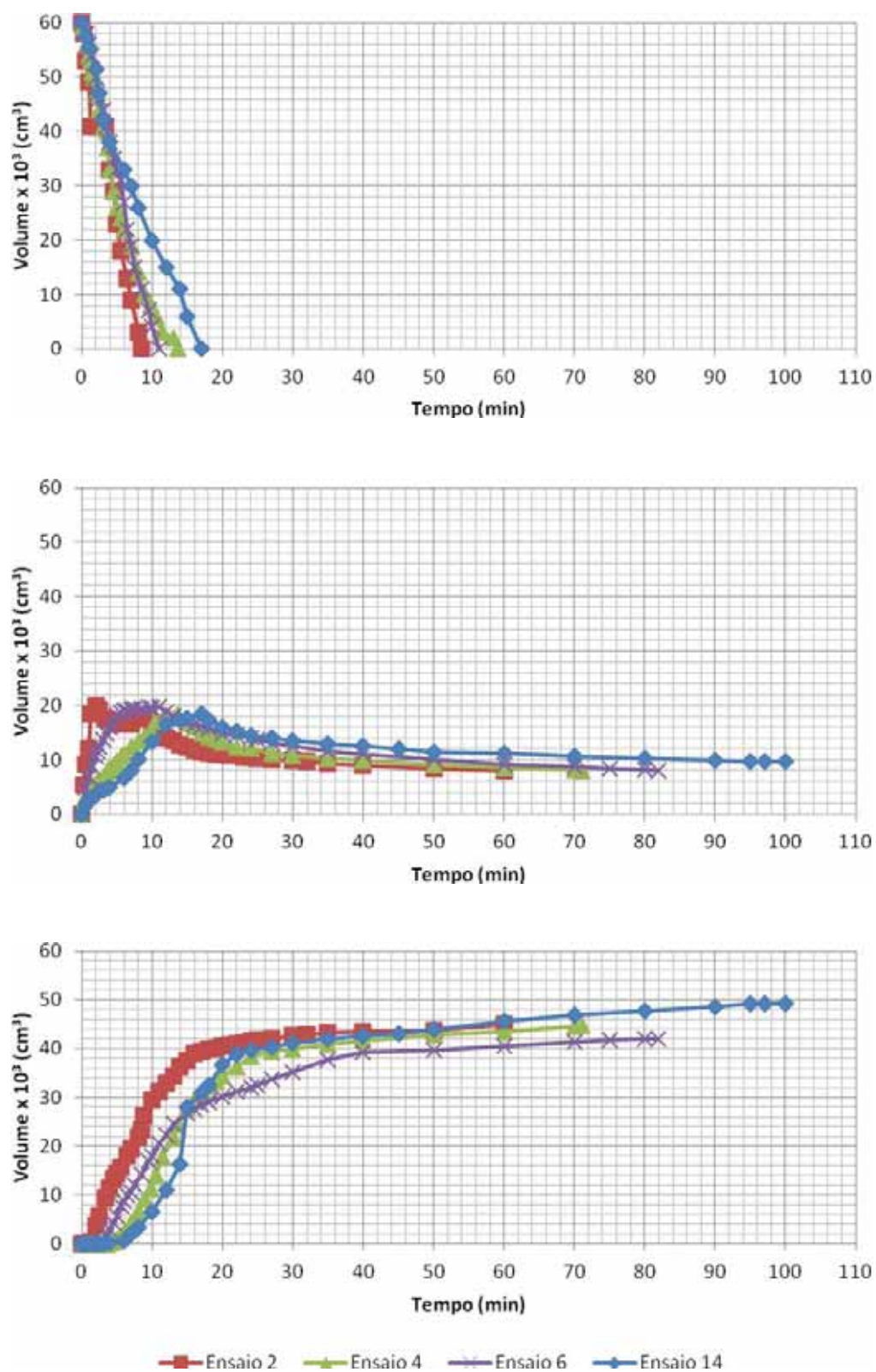


Figura 33: Superposição dos resultados obtidos com o geotêxtil reutilizado de menor gramatura.

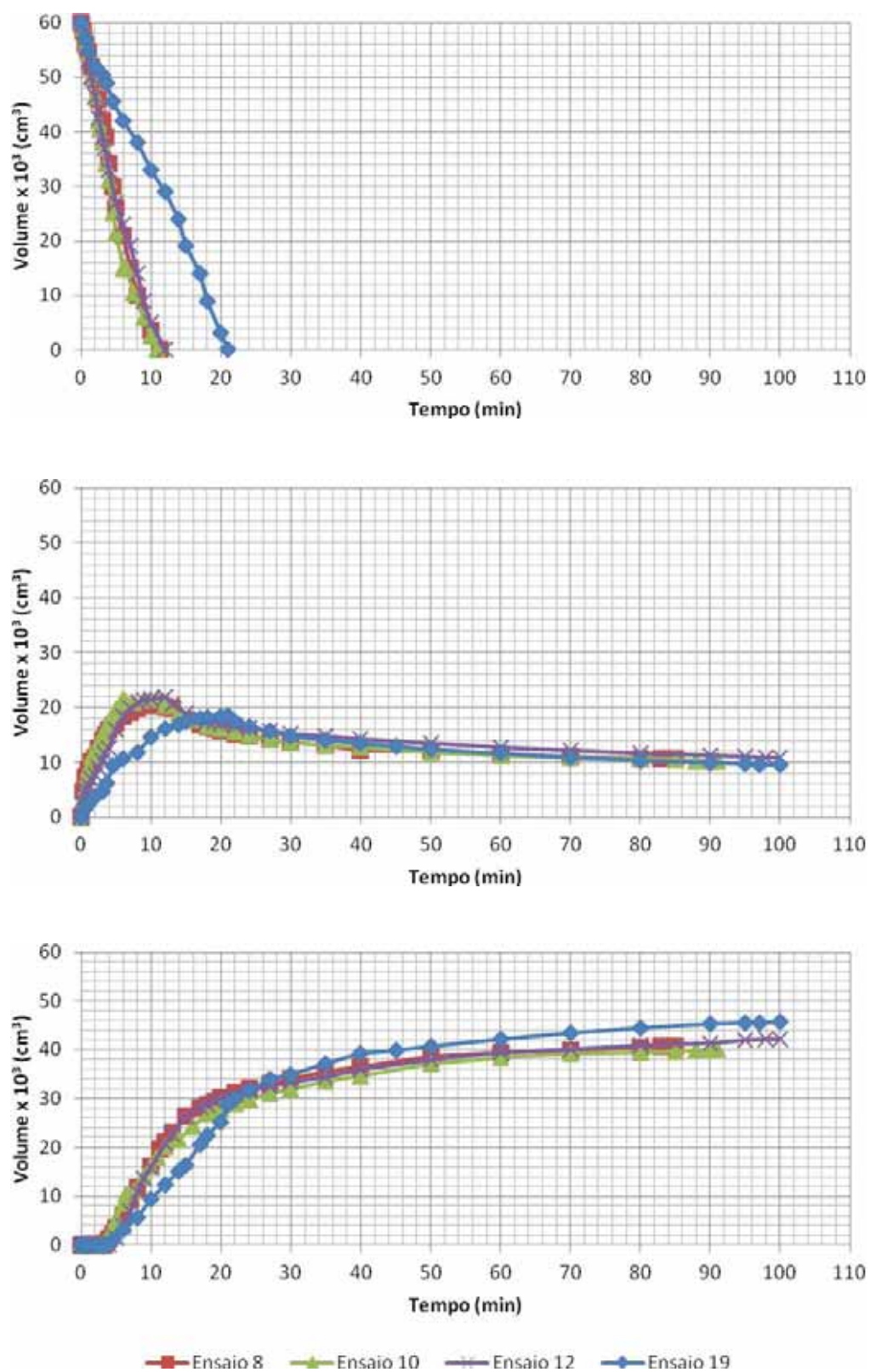


Figura 34: Superposição dos resultados obtidos com o geotêxtil reutilizado de maior gramatura.

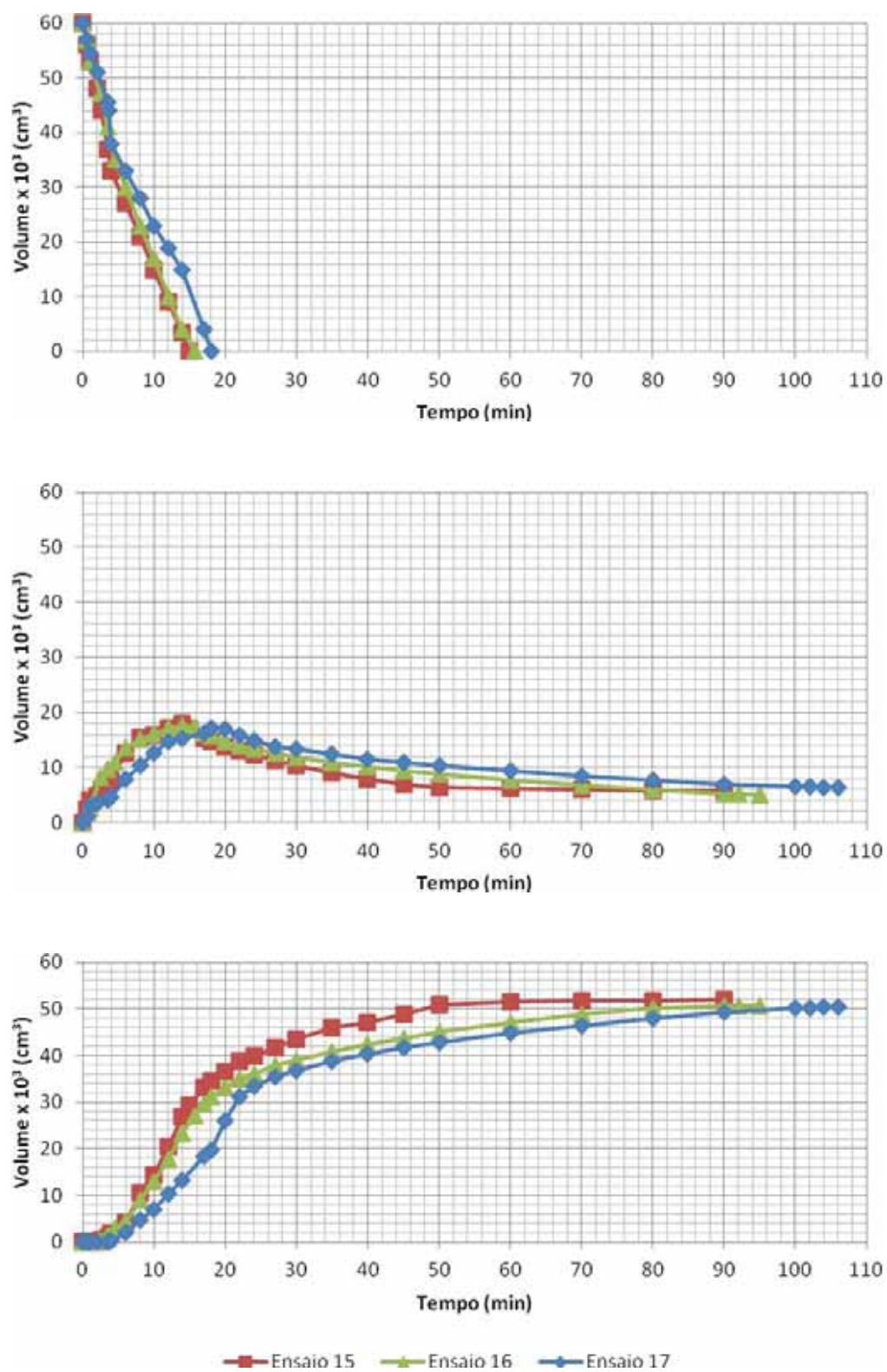


Figura 35: Superposição dos três resultados obtidos com o geotêxtil reutilizado de menor gramatura.

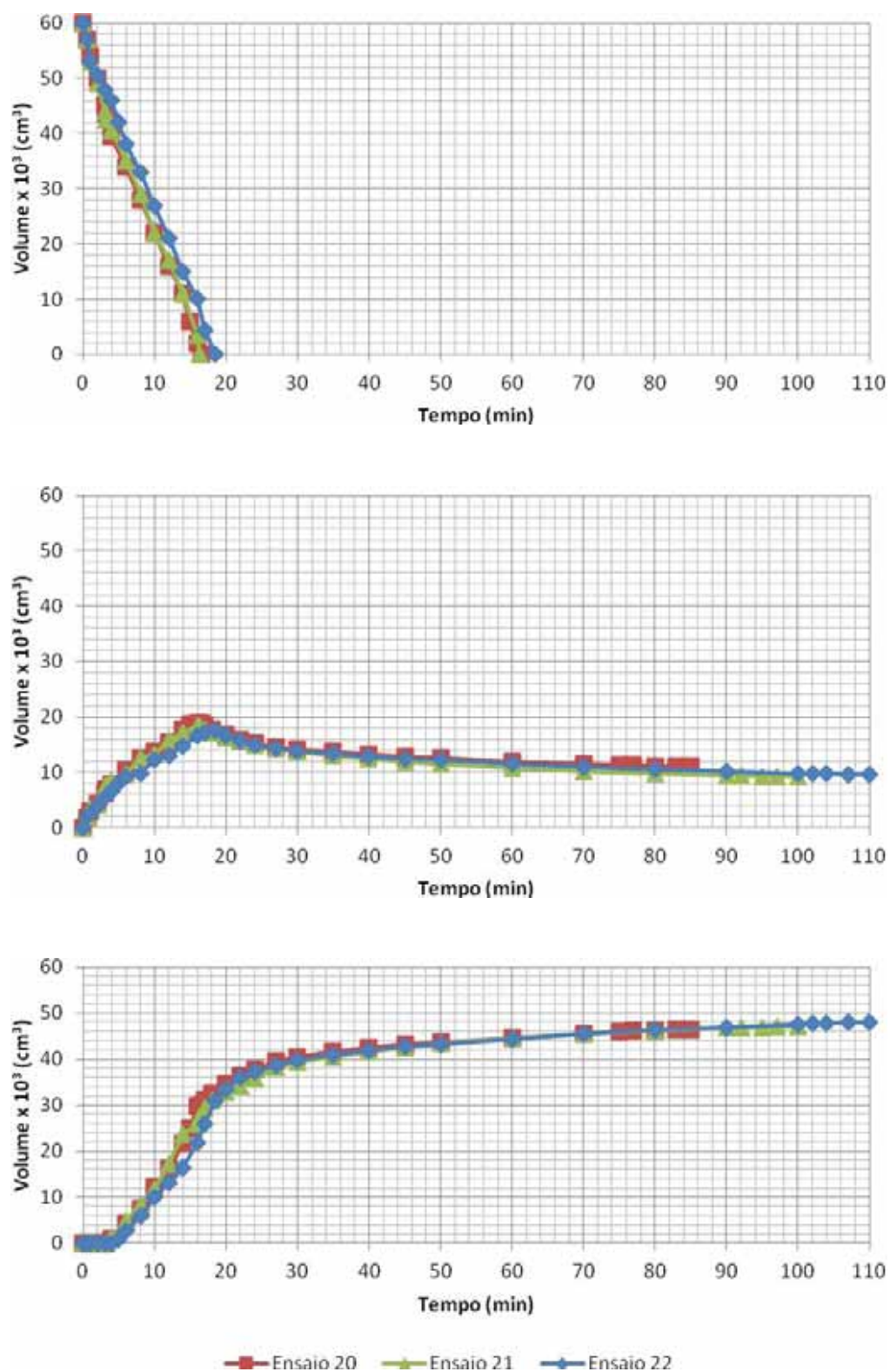


Figura 36: Superposição dos três resultados obtidos com o geotêxtil reutilizado de maior gramatura.

Situações observadas para os ensaios de repetibilidade

Para a figura 31, observou-se que para o geotêxtil novo de menor gramatura ocorreram duas situações distintas, uma para os ensaios 1 e 13 e outra para os ensaios 3 e 5. Neste caso a diferença dos ensaios foi de $15 \times 10^3 \text{ cm}^3$ de volume de saída, ou seja, os ensaios 3 e 5 obtiveram maior retenção do rejeito.

Para a figura 32, observou-se que para o geotêxtil reutilizado de menor gramatura suas distribuições e situações não ocorreram grandes variações, devido ao acúmulo de material retido no geotêxtil, mesmo após a lavagem. Na figura 37, podem-se observar os grãos finos do rejeito retido no geotêxtil, mesmo após a lavagem para reutilização do ensaio.



Figura 37: Rejeito fino retido no geotêxtil após a lavagem para a sua reutilização.

Para a figura 33, observou-se que o geotêxtil novo de maior gramatura não obteve nenhum parâmetro de comparação entre si, pois os ensaios apresentaram diferentes valores de material retido e material que sai isto ocorreu pelo tipo de geotêxtil utilizado nos ensaios que apresentou sua estrutura agulhada. Na figura 38 observa-se o rejeito passando pela estrutura agulhada do geotêxtil.



Figura 38: Rejeito passando pela estrutura agulhada do geotêxtil de maior gramatura.

Para a figura 34, observou-se que para o geotêxtil reutilizado de maior gramatura o ensaio 19 foi o diferencial devido ao controle de volume de entrada onde ocorreu um aumento no tempo de aproximadamente 10 minutos, porém não houve nenhuma diferença significativa no resultado final já que no gráfico de volume retido demonstrou equivalente para os quatros ensaios.

Para as figura 35 e 36, observou-se que para os geotêxteis n-reutilizado de menor e maior gramatura os gráficos demonstraram uniformidade em suas avaliações. Neste caso, podemos explicar pela perda de propriedades de suas estruturas, como no geotêxtil de maior gramatura, onde sua estrutura é agulhada.

Pela figura 39 pode-se observar o geotêxtil utilizado e altura de retenção do rejeito.



Figura 39: Mecanismo de retenção diferenciado ao longo do geotêxtil em função da altura.

7.2 Comparações dos comportamentos dos geotêxteis

Para a análise da figura 40 e 41 foi comparado o comportamento de retenção e filtração do rejeito, como: do geotêxtil novo de menor gramatura com o geotêxtil novo de maior gramatura; do geotêxtil reutilizado de menor gramatura com o geotêxtil reutilizado de maior gramatura.

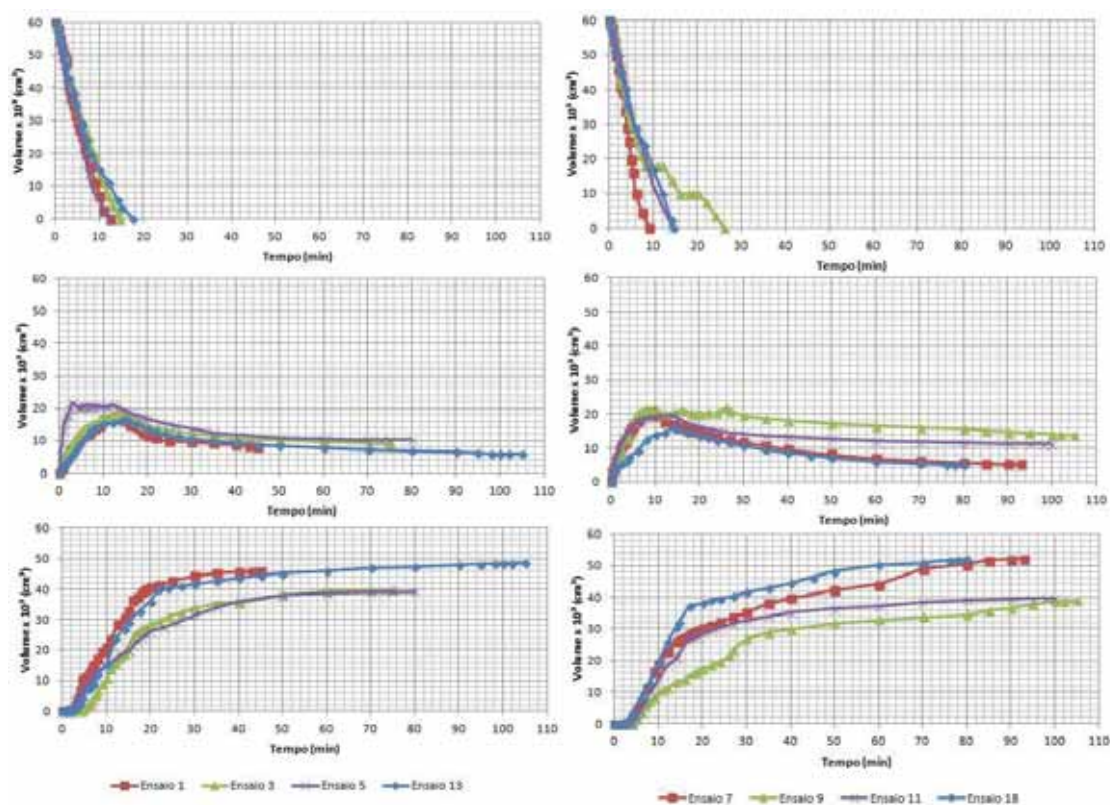


Figura 40: Comparação dos resultados dos Ensaio 1, 3, 5 e 13 e Ensaio 7, 9, 11 e 18.

Foi diagnosticado que para a filtração do rejeito o geotêxtil de menor gramatura tem um melhor aproveitamento em relação, comparado ao geotêxtil de maior gramatura, ao material final que vai atingir o córrego e seu comportamento é uniforme. Em relação à retenção o geotêxtil de maior gramatura exerceu uma boa função devido a sua estrutura agulhada.

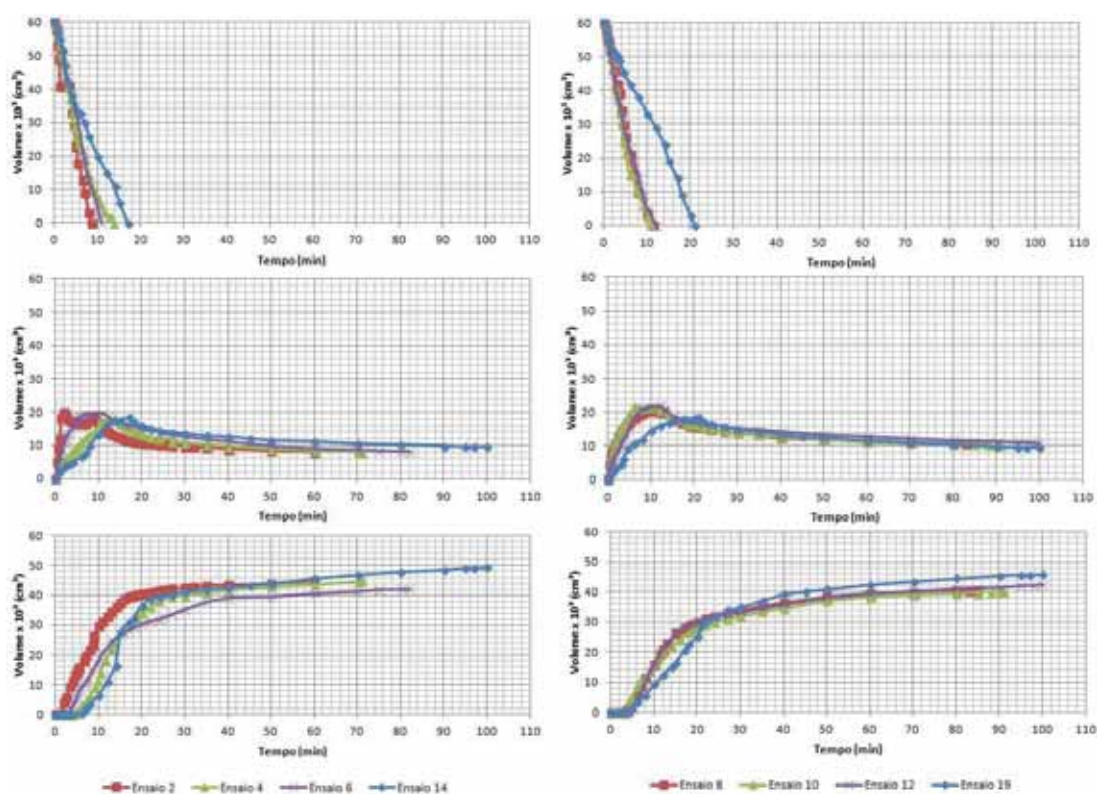


Figura 41: Comparação dos resultados dos Ensaio 2, 4, 6 e 14 e Ensaio 8, 10, 12 e 19.

Foi diagnosticado que para a filtração e retenção do rejeito o geotêxtil de menor gramatura e geotêxtil de maior gramatura apresentaram um comportamento uniforme, porém a filtração e retenção do geotêxtil reutilizado de menor gramatura apresentou uma maior eficiência em relação ao tempo que leva para que o rejeito não fique retido na barreira e também não contamine o córrego.

Para a análise da figura 42 foi comparado o comportamento de n-reutilização da barreira geotêxtil, como: do geotêxtil n-reutilizado de menor gramatura com o geotêxtil n-reutilizado de maior gramatura.

Para uma segunda análise, procurou-se avaliar o reuso do geotêxtil, após lavagem, de modo a verificar a sua reutilização após um evento de chuva.

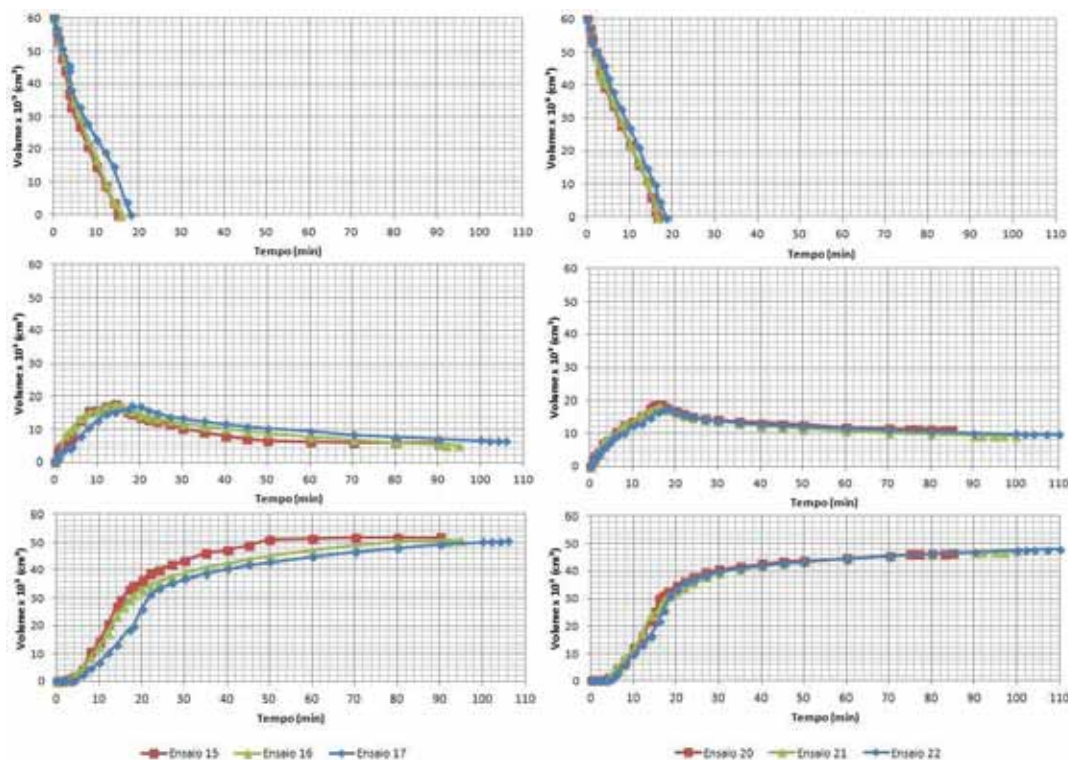


Figura 42: Comparação dos resultados dos Ensaios 15,16 e 17 e Ensaios 20, 21 e 22.

Foi diagnosticado que para a filtração e retenção do rejeito o geotêxtil n-reutilizado de menor gramatura e geotêxtil n-reutilizado de maior gramatura apresentaram um comportamento uniforme, porém a filtração e retenção do geotêxtil reutilizado de menor gramatura apresentou uma maior eficiência em relação ao tempo que leva para que o rejeito não fique retido na barreira e também não contamine o córrego.

No efeito das comparações de valores da eficiência dos geotêxteis utilizados a seguir são analisados, como:

- Na **Figura 40** notou-se que a porcentagem do material retido apresentou uma diferença maior de 0,59% do GT novo de menor gramatura em relação ao GT novo de maior gramatura. Ainda para este ensaio, notou-se que a porcentagem do material que passa tem uma diferença maior de 0,83% do GT novo de menor gramatura em relação ao GT novo de maior gramatura;
- Na **Figura 41**, notou-se que a porcentagem do material retido apresentou uma diferença menor de 2,92% do GT reutilizado de menor gramatura em relação ao GT reutilizado de maior gramatura. Ainda para este ensaio, notou-se que a

porcentagem do material que passa tem uma diferença menor de 7,92% do GT reutilizado de menor gramatura em relação ao GT reutilizado de maior gramatura;

- Na **Figura 42**, notou-se que a porcentagem do material retido apresentou uma diferença menor de 7,22% da média do GT três vezes reutilizado de menor gramatura em relação ao GT três vezes reutilizado de maior gramatura. Ainda para este ensaio, notou-se que a porcentagem do material que passa tem uma diferença menor de 7,78% do GT três vezes reutilizado de menor gramatura em relação ao GT três vezes reutilizado de maior gramatura.

7.3 Discussão

Os resultados indicam que o geotêxtil com maior abertura de filtração deixa passar uma quantidade maior de finos e o sistema consegue reter o volume do rejeito até terminar o processo de filtragem. Para esta discussão foi analisado e observado com as figuras 43 e 44 a seguir:



Figura 43: Máxima retenção do rejeito com o geotêxtil de menor gramatura.



Figura 44: Máxima retenção do rejeito, com o geotêxtil de maior gramatura.

Na fase inicial do contato com o geotêxtil pode-se observar a influência do agulhamento com saídas preferenciais de fluxo. No entanto esse fluxo era interrompido com o acúmulo de finos. Para o geotêxtil de maior abertura de filtração reutilizado o volume retido logo atingia o limite do reservatório.

8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

8.1 Conclusão

As barreiras com geotêxtil utilizado mostraram eficiência nas análises de filtração e retenção do material.

Para o ensaio da análise da eficiência do geotêxtil, notou-se a diferença da estrutura dos geotêxteis, sendo que o geotêxtil de maior gramatura tem sua estrutura agulhada, com isso, o rejeito passa com uma porcentagem maior pelo geotêxtil.

Ser o ensaio de vida útil do geotêxtil novo percebeu-se uma pequena diferença na passagem do material mais líquido, ou seja, com o rejeito sendo mais filtrado, em um intervalo de menor tempo em relação ao geotêxtil reutilizado, variando de 0,3 a 0,6 cm. Isto ocorre devido à carga atuante, do rejeito, no geotêxtil. Quando a carga do rejeito diminui o geotêxtil reutilizado comporta-se melhor para a fluidez do material mais líquido.

Com a utilização do geotêxtil de maior gramatura, notou-se que sua estrutura é agulhada, mas suas características se perdem quando este é reutilizado.

Para o ensaio de retenção do rejeito e do volume de saída, notou-se que o geotêxtil de menor gramatura reteve uma maior porcentagem maior de rejeito em relação ao geotêxtil de maior gramatura.

Com essas análises, foi possível concluir que o geotêxtil de menor gramatura demonstrou ser mais eficiente e de maior durabilidade mesmo que ainda não consiga a retenção total de finos.

8.2 Recomendações

Espera-se que o presente trabalho tenha contribuído na avaliação da situação atual de contenção do lançamento de rejeitos no córrego Pinheirinho, com vista na diminuição das fontes poluentes da atividade mineral.

Porém, para que se faça uma avaliação mais criteriosa da situação atual, se faz necessário à realização dos ensaios de campo, com a necessidade de comparar com os resultados obtidos nos ensaios de laboratório.

Recomenda-se também realizar um monitoramento contínuo do desaguamento, na bacia de retenção, no período mais chuvoso do ano, para avaliar a retenção de rejeitos pelo geotêxtil em relação à casa de luz.

Assim, recomenda-se a continuidade dos estudos nessa área para a extrapolação dos seus resultados para outras áreas com problemas semelhantes.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRÃO, P.C. Sobre a disposição de rejeitos de mineração no Brasil. Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, REGEO'87, 1987, Rio de Janeiro, v. 1, p. 1-9.

ABNT (1993). Elaboração e apresentação de projeto de disposição de rejeitos de beneficiamento, em barramento, em mineração. NBR 13028, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 10p.

ABNT (1984). Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Método de ensaio. NBR 6459, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 6p.

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

ADAM, K.; KONTOPOULOS, A. A review of passive systems for the treatment of acid mine drainage. *Minerals Engineering*, v. 9, n. 1, p. 23-42, jan. 2006.

ARAÚJO, L.M.A.d (2008). Mecanismos de interação solo – geossintético – Ensaio de arranque. Departamento de Engenharia Civil, Aveiro, Portugal, Universidade de Aveiro. Mestrado: 128 p.

ARROYO, et al. (1991). Condicionantes e estudos geológico-geotécnicos associados ao armazenamento de rejeitos radioativos de alta intensidade em cavernas subterrâneas em rocha. Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos, REGEO'91, Rio de Janeiro, RJ, PP.283-294.

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.

BARRON, K. (1986). Waste Embankments. Mining Engineering Department, University of Alberta, Edmonton, Canada.

BARTH, R.C. (1989). Avaliação da recuperação de áreas mineradas no Brasil. Boletim Técnico no 1. SIF/UFV, Viçosa, MG. 41p. In: Curso Recuperação de áreas degradadas, vol. II. UFPr/FUPEF-Pr/Associação Paranaense de Engenheiros Florestais. Curitiba, 5 - 15/07/93.

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.

BENTEL, et al. (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 ensaios de filtração sob tensão. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-120A/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 139 p.

BEZERRA, O. Avaliação da Recuperação de Áreas Mineradas Degradadas no Brasil. In: Geologia Ambiental – UFC. Disponível em: <http://www.geologiaambientalufc.hpg.ig.com.br> Acesso em: 30 out. 2012.

BIDIM. Tabela de Especificações – Linha Geotêxtil Bidim RT. Bidim Ind. E Com. Ltda., 2009.

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

BUSH, R.G. (1987). Construções de barragens de rejeitos de fosfato. Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, REGEO'87, 1987, Rio de Janeiro, p. 379-396.

CASTRO, N. P. B. (2005) Sistemas tubulares para contenção de lodo e sedimentos contaminados. Tese de Douturamento. Instituição Tecnológica de Aeronáutica. São José dos Campos/SP.

CAZUFFI, et al (1999). A new test apparatus for the study of geotextiles behaviour as filters in unsteady flow conditions: relevance and use. *Geotextiles & Geomembranes*, 17, pp. 313-319.

CENTENO, J. R. C. (2006). A Gestão de Recursos Hídricos na Mineração da Companhia Vale do Rio Doce. Agência Nacional de Águas, 2006. p.128-138.

CETEM. 2002. **Informativo CETEM**. ano III, nº 3

CICARELI, P.M. (2006). Recursos hídricos e mineração: os desafios das particularidades do setor e as oportunidades de desenvolvimento tecnológico. Seminário Nacional Geociências do Projeto Setor Mineral: Tendências Tecnológicas – Painel Recursos Hídricos, Rio de Janeiro, julho, 2006.

CHAMAS, R. (1989). Notas de Aula do Curso de Barragens de Contenção de Rejeitos, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, UFOP, Ouro Preto, Minas Gerais.

CHRISTOPHER, B. R.; HOLTZ, R. D. (1985). *Geotextile engineering manual*. [s.l.]: U.S. Federal Highway Administration. 1985. 1044 p. (Report nº FHWA-TS-86/203).

CHRISTOPHER, B. R., et al. (1993). *Filters in geotechnical and hydraulic engineering*. Rotterdam: Balkema. 1993. p. 19-26. (Proc. First International Conference GeoFilters 1992, Karlsruhe).

COMITE FRANÇAIS DES GEOTEXTILES ET GEOMEMBRANES. (1986). *Recommandations pour l'emploi des géotextiles dans les systèmes de drainage et de filtration*. Boulogne Billancourt, 1986.

COLMANETTI, J.P. (2000). Comportamento de filtros geotêxteis em sistema de drenagem para resíduos sólidos municipais. Dissertação de Mestrado, Publicação nº G.DM-076/2000, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 126 p.

Departamento Nacional de Produção Mineral. Disponível em: <http://www.dnprm.gov.br>. Acesso em: 22 de agosto de 2012.

FAURE, et al. (1999). Analysis of geotextile filter behaviour after 21 years in Valcros dam. Geotextile and Geomembrane, 17:353-370.

FAURE, Y. H., KEHILA, Y. (1998). Filter behaviour of hydraulically and mechanically damaged geotextiles, Sixth International Conference on Geosynthetics, Atlanta, Georgia, USA, pp. 1017-1020.

FIGUEIREDO, A. G. Análise da produção e transporte de sedimentos nas bacias do rio do Peixe e rio Aguapeí. Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. São Paulo. ABRH, 2v , 1989.

FISHER, G. R. & HOLTZ, R. D. (1996). A critical review of granular soil filter retention criteria. Geofilters'96, Montreal, Canada, PP. 409-418.

FONSECA, F. Os Efeitos da Mineração sobre o Meio Ambiente. In: Geologia Ambiental – UFC. Disponível em: <<http://www.geologiaambientalufc.hpg.ig.com.br>> Acesso em: 19 out. 2012.

FREITAS, R. A. S. (2003). Comportamento de geotêxteis como filtro em resíduos: fosfogesso e lama vermelha. 122 f. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

GARDONI, M.G.A. (2000). Estudo do comportamento dreno-filtrante de geossintéticos sob compressão. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-003ª/2000, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 313 p.

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

GOURC, J. P., FAURE, Y. H. (1990). Soil particles, water...and filters – a fruitful interaction now controlled, IVth International Conference and Related Products, volume 3 (pós-congresso), Balkema, Rotterdam, pp. 947-972.

HAAS, W.M. (1982). Geotextiles in tailings dike construction: laboratory and field observations. 2nd International Conference on Geotextiles, Las Vegas, USA, 1: 205-210.

HANCOCK, G. R. T. et al. A methodology for the assessment of rehabilitation success of post mining landscapes - sediment and radionuclide transport at the former Nabarlek uranium mine, Northern Territory, Austrália. Science of the Total Environment. n. 354, p. 103-119, 2006.

HEERTEN, G. (1984). Geotextiles in coastal engineering – 25 years experience. Geotextiles & Geomembranes, 1, pp. 119-141.

HEIBAUM, M. H. (1999). Coastal scour stabilization using granular filter in geosynthetic nonwoven containers, Geotextiles & Geomembranes, 17, pp. 341-352.

HONJO, Y. & VENEZIANO, D. (1989). Improved filter criterion for cohesionless soils. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 115 (1): 75-94.

IBAMA - Instituto do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (1990). Manual de recuperação de áreas degradadas pela mineração: técnicas de vegetação. Brasília, 96p.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em 27 de agosto de 2012.

INDRARATNA, B. & VAFAI, F. (1997). Analytical model for particle migration within base soil-filters system. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 123 (2): 100-109.

KENNEY et al. (1985). Internal stability of granular filters. *Canadian Geotechnical Journal*, 22: 215-225.

KLOHN, E.J. (1982). Tailings dam design. *Seminar on Geotechnical Aspects of Mine Design and Tailings Containment*, Edmonton, Canada, p. 1-53.

LAFLEUR, J. (1999). Selection of geotextiles to filter broadly cohesionless soils. *Geotextiles and Geomembranes*, 17: 299-312.

LAMEGO SIMÕES Fº, F. F. et al. Impactos de mineração e sustentabilidade no semi-árido. Estudo de caso: Unidade de Concentração de Urânio - URA (Caetité, BA) In: *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 15., 2003, Curitiba. Anais: Porto Alegre: ABRH, 2003.

LANNA, A. E. L. (2006), Projeto Setor Mineral:Tendências Tecnológicas: alguns temas para debates e prospecção, *Seminário Nacional Geociências do Projeto Setor Mineral: Tendências Tecnológicas – Painel Recursos Hídricos*, Rio de Janeiro, jul.

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 rejeito – considerações gerais. *10º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental*, ABGE/ABMS, Ouro Preto, MG, 13p.

MARANHÃO, N. (2006). Planejamento de recursos hídricos e a atividade mineral. *Seminário Nacional Geociências do Projeto Setor Mineral: Tendências Tecnológicas – Painel Recursos Hídricos*, Rio de Janeiro, julho, 2006.

MARQUES, M. (1993). A importância da mineração para a economia do Brasil. *BRASILMINERAL*, Edição Extra, pp7-13.

MENDONÇA, M. B., ERLICH, M. (2001). Estudo da formação de biofilme de ocre em filtros têxteis, GEOSSIGA'2001 – Seminário Nacional sobre Geossintéticos na Geotecnia Ambiental, São José dos Camps, SP, pp. 93-98.

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, p. 333-348.

MOTA, S. Introdução à Engenharia Ambiental. 2 ed. Rio de Janeiro: ABES, 2000.

MOURÃO, M. A. A. (2006), Água e Mineração, Seminário Nacional Geociências do Projeto Setor Mineral: Tendências Tecnológicas – Painel Recursos Hídricos, Rio de Janeiro, jul.

MUÑOZ, Catarina Silveira. (2005). Desempenho de geotêxteis na filtração de solos internamente instáveis. 2005. 119p. Tese de mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

NEALA, C. et al. The water quality of the River Carnon, west Cornwall, November 1992 to March 1994: the impacts of Wheal Jane discharges Science of the Total Environment. n. 338, p. 23-39, 2005.

NORDIN, C. F. & McQUIVEY, R. S. 1971. Suspended load. In : SHEN, Hsieh Wen, ed. River mechanics. Fort Collins. V.1., cap. 12.

PACHECO, E. B.; MELO, C. E. Sedimentação, drenagem e compressibilidade de rejeitos em teste de grandes dimensões. Simpósio de Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, Rio de Janeiro. **Anais:** ABMS, v.1, 1987. p.24-37.

PILARCZYK, K. W. (2000). Geosynthetics and geosystems in hydraulic and coastal engineering. A. A. Balkema.

POMPÊO, M. L. M. et al. Qualidade da água em região alterada pela mineração de carvão na microbacia do rio Fiorita (Siderópolis, Estado de Santa Catarina, Brasil). Maringá. Acta Scientiarum. Biological Sciences, v. 26, n. 2, p. 125-136, 2004.

PRIMACK, R. B. & RODRIGUES, E. (2002). *Biologia da conservação*. Primack & Rodrigues. Londrina, 328p.

RADAMPOLA, S. S. (2001). *Geohydraulic Aspects of Dams Filters*. Master of Engineering Thesis, Faculty of Engineering, University of Wollongong, Australia, 173p.

RAVENGAI, S. et al. Water quality in an abandoned gold mining belt, Beatrice, Sanyati Valley, Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth*, n. 30, p. 826-831, 2005.

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

REDDI, et al. (2002). Permeability reduction of soil filters due to physical clogging. *Jornal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 126 (3): 236-246.

ROCHA, G. (2006). Subsídios para o Programa Nacional de Águas Subterrâneas, Seminário Nacional Geociências do Projeto Setor Mineral: Tendências Tecnológicas – Painel Recursos Hídricos, Rio de Janeiro, jul.

ROLLIN, A. L., LOMBARD, G. (1988). Mechanism affecting long-term filtration behavior of geotextiles. *J. Geotextiles & Geomembranes*, 7, pp. 119-145.

ROLLIN, A. L, et al. (1989). Long term behavior of geotextile in drainage systems. *Proc. XII Int. Conf. on Soil Mechanics and Found. Eng.*, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 1683-1688.

SAXENA, S. K., HSU, T. S. (1986). Permeability of geotextiles included in railroad bed under repeated load. *Geotextiles and Geomembranes*, 4, pp. 31-51.

SCHEURNBERG, R.J. (1982). Experiences in the use of geofabric in underdrainage of residue deposits. *2nd International Conference on Geotextiles*, Las Vegas, USA, 1: 199-204.

SCHULER, U. (1996). Scattering of the composition of soils – na aspect for the stability of granular filters. Geofilters'96, Montreal, Canada, pp. 21-34.

SHEN, H. W. (1976). Sediment transport models. In: Stochastic approaches to water resoucers. Fort Collins. V. 2, cap 26.

SHERARD, et al (1984a). Basic properties of sand and gravel filters. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 110 (6): 684-700.

SHERARD, et al (1984b). Filters for silts and clays. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 110 (6): 701-718.

SILVA RAMOS, M.L. (2006). A gestão de águas subterrâneas e a atividade mineral. Seminário Nacional Geociências do Projeto Setor Mineral: Tendências Tecnológicas – Painel Recursos Hídricos, Rio de Janeiro, julho, 2006.

SILVEIRA, A. (1965). Na analysis of the problem of washing through in protective filters. Sixth Internacional Conference on Soil Mechanics anf Foundation Engineering, Canada, vol 2: 551-555.

SPERLING, V. M. (1996). Introdução das águas e ao tratamento de esgotos. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais; 2005.

TAYLOR, D. W. (1948). Fundamentals of Soil Mechanics. John Wiley and Sons, Inc., New York, USA, 700p.

UMEZAWA, P.K. Previsão de deplúvio (washload) em rios de áreas elevadas. 1979. 217 p. Dissertação (Mestrado em Hidrologia Aplicada). Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1979.

URASHIMA, D. C. (1996). Dimensionamento de filtros têxteis por teoria probabilística. 103f. 1996. Dissertação (Mestrado em Infra-Estrutura de Transportes) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

URASHIMA, D. C. (2002). Simulação do processo de retenção de partículas por filtros têxteis. São José dos Campos: CTA/ITA, 2002 – Tese de Doutorado.

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.

VIDAL, D., RIGUETTI, C. C. (1990). Propriedades hidráulicas dos geotêxteis, VI CBGE / XI COBRAMSEF, Salvador, pp. 35-44.

VIDAL, D. (1992). Propriedades hidráulicas dos geotêxteis – Condições críticas de filtração e drenagem, I – Sem. Sobre Aplicações de Geossintéticos à Geotecnia, Brasília, 9 a 11 nov., pp. 78-92.

VIDAL, D., et al (1999). O conceito de fatores de redução aplicados às propriedades dos geossintéticos, 3º Simpósio Brasileiro de Geossintéticos, Rio de Janeiro.

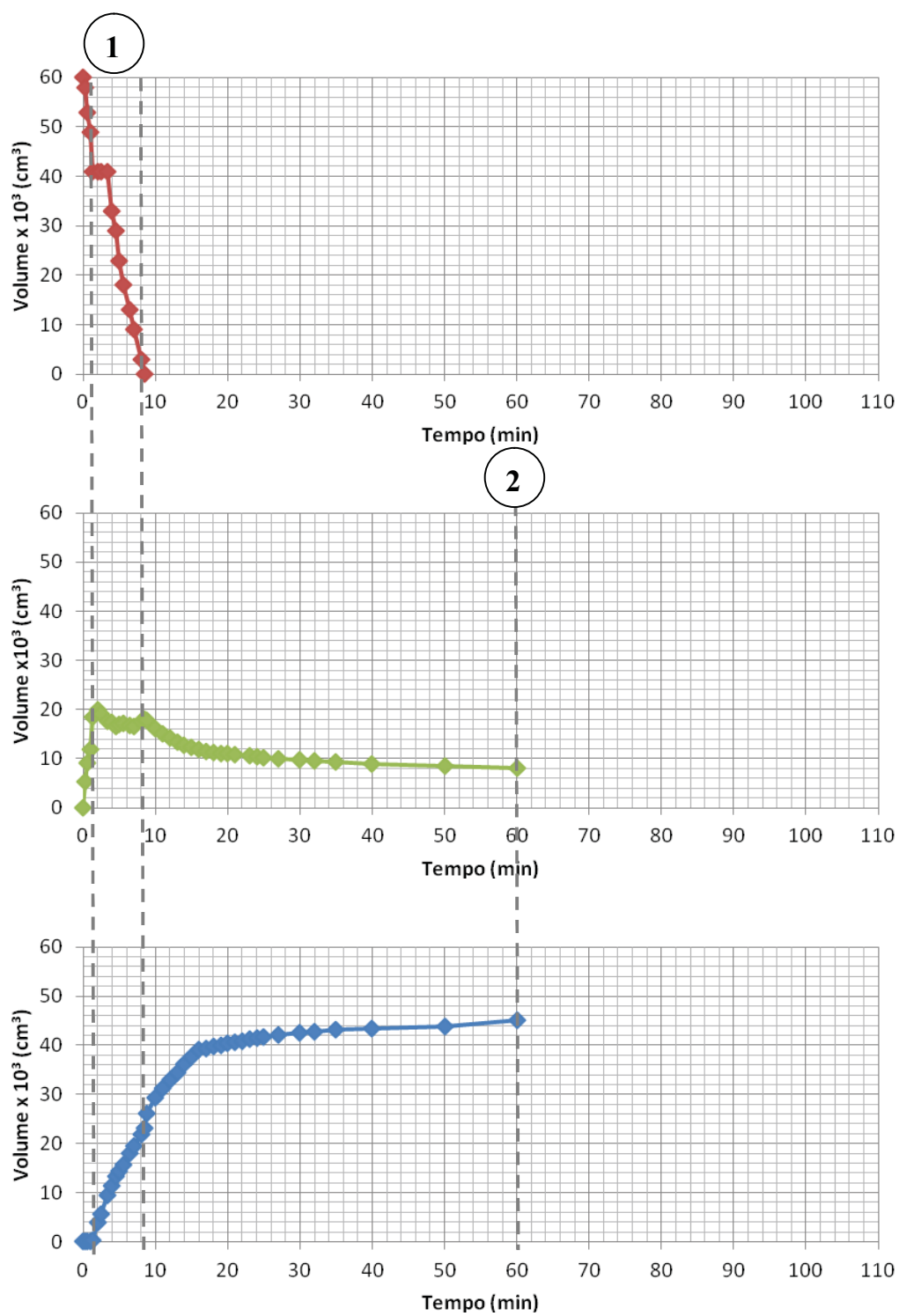
VIEIRA, V. P. P. B. Análise de riscos em recursos hídricos – fundamentos e Aplicações. Porto Alegre-RS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), nov. 2005.

VICK, S. G. - Planning, Design and Analysis of Tailings Dams. Willey Series in Geotech. Eng. 1983.

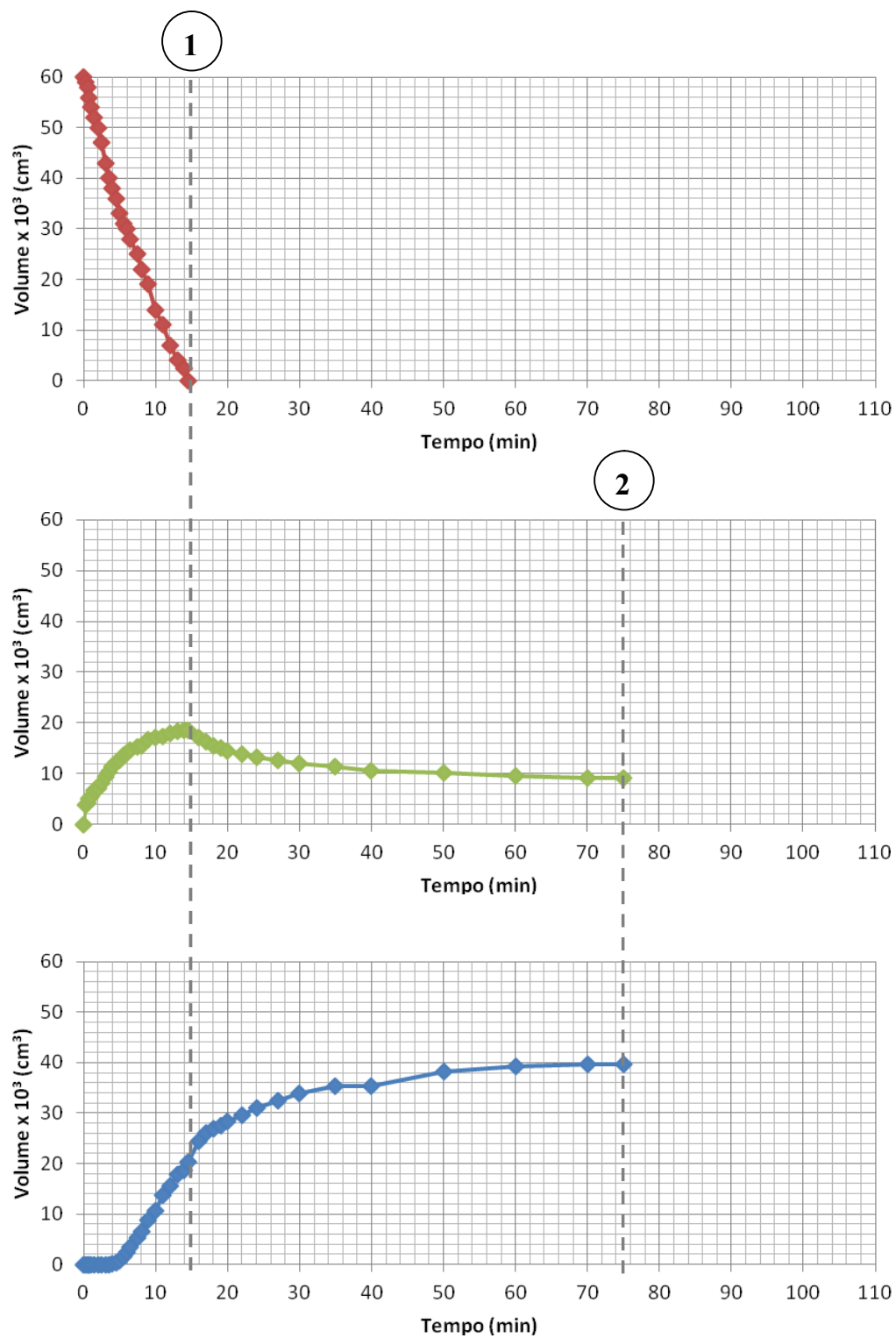
WHITEHEAD, P. G.; PRIOR, H. Bioremediation of acid mine drainage: an introduction to the Wheal Jane wetlands project. Science of the Total Environment. n. 338, p. 15-21, 2005.

ZUQUETTE, L.V. & GANDOLFI, N. (1991). Análise da relação entre a disposição de rejeitos de baixa periculosidade e meio geológico receptor. Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos, REGEO'91, Rio de Janeiro, RJ, PP. 221-232.

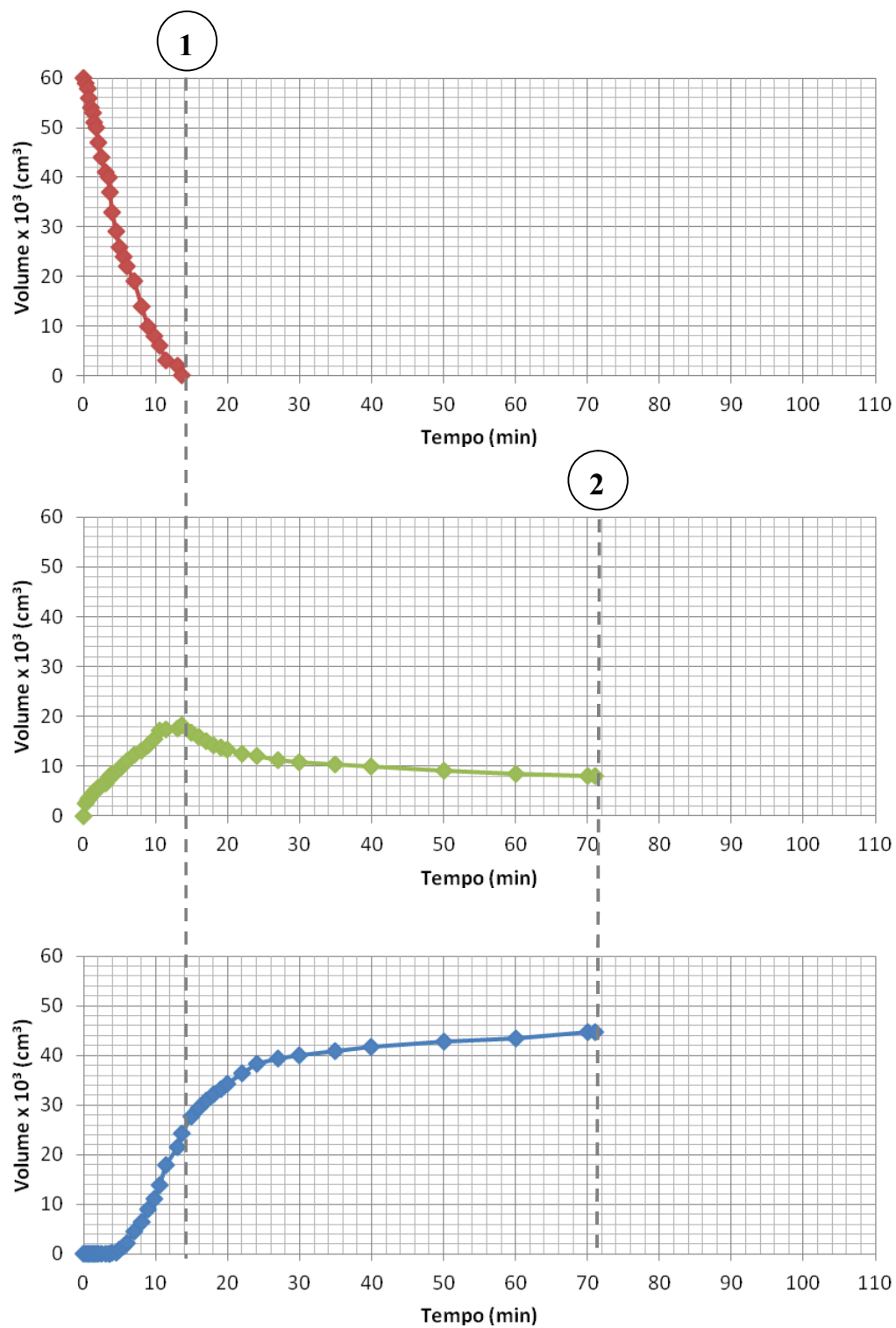
10 ANEXOS



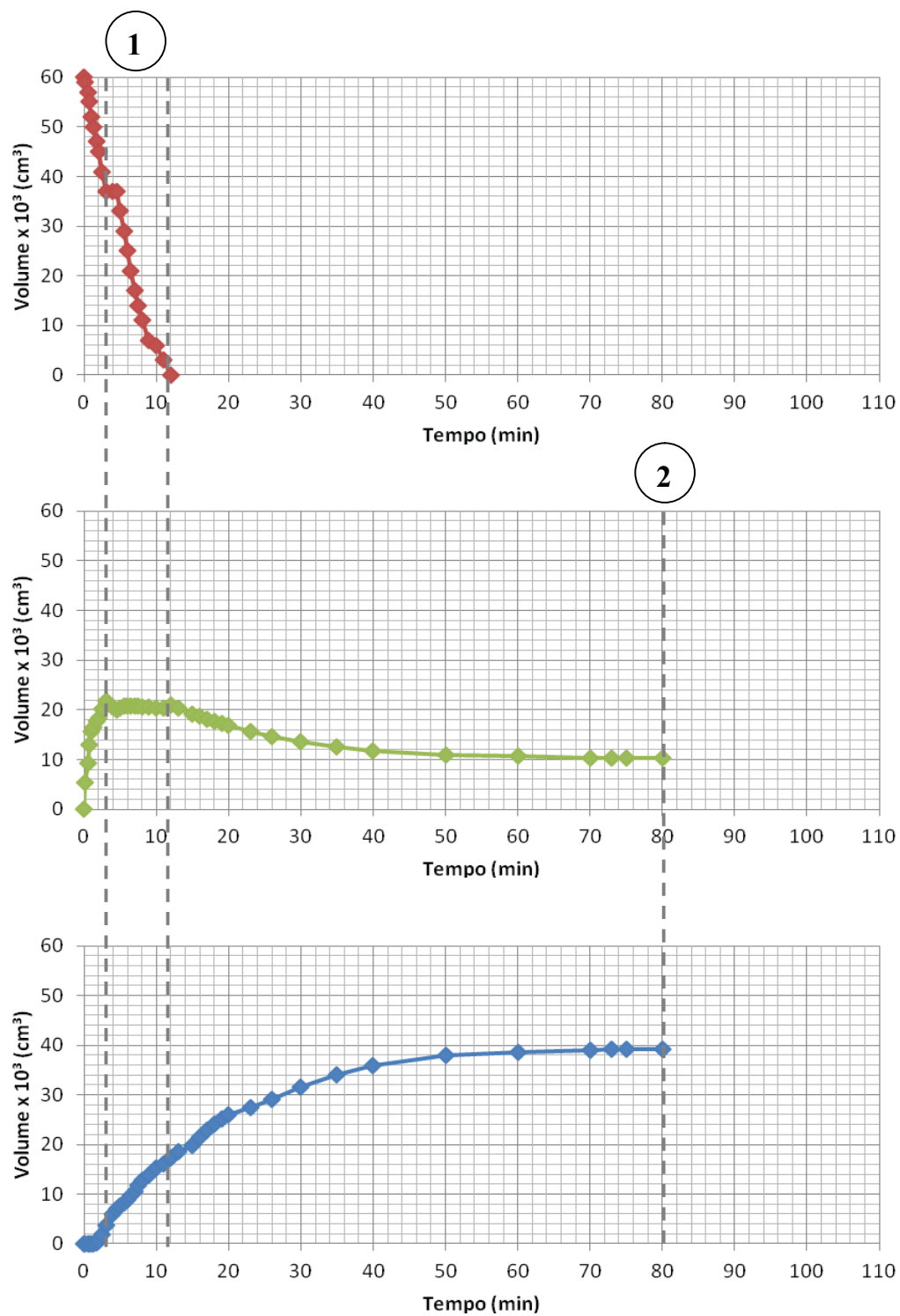
Anexo 1: Ensaio 2 – Geotêxtil Reutilizado de Menor Gramatura



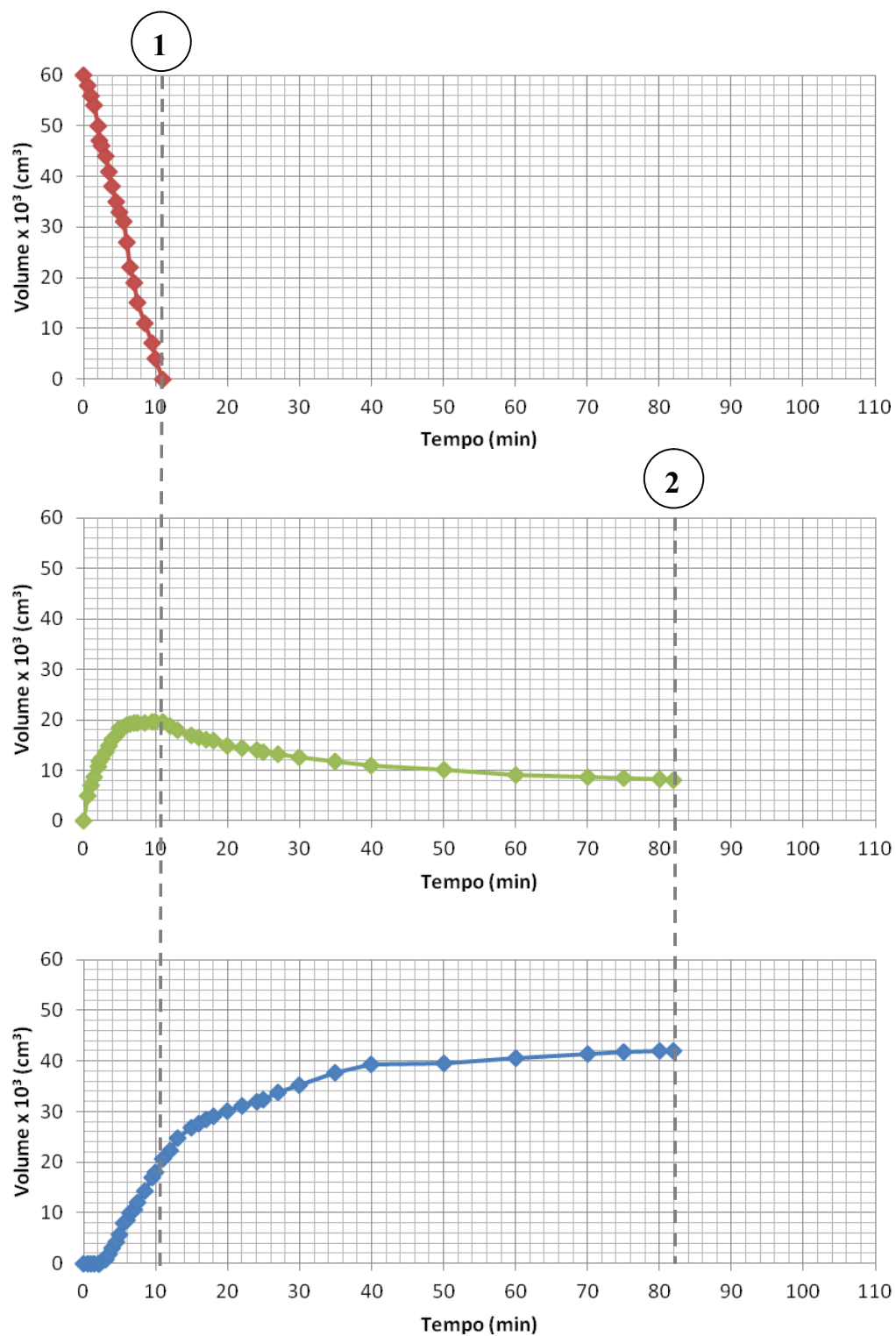
Anexo 2: Ensaio 3 – Geotêxtil Novo de Menor Gramatura



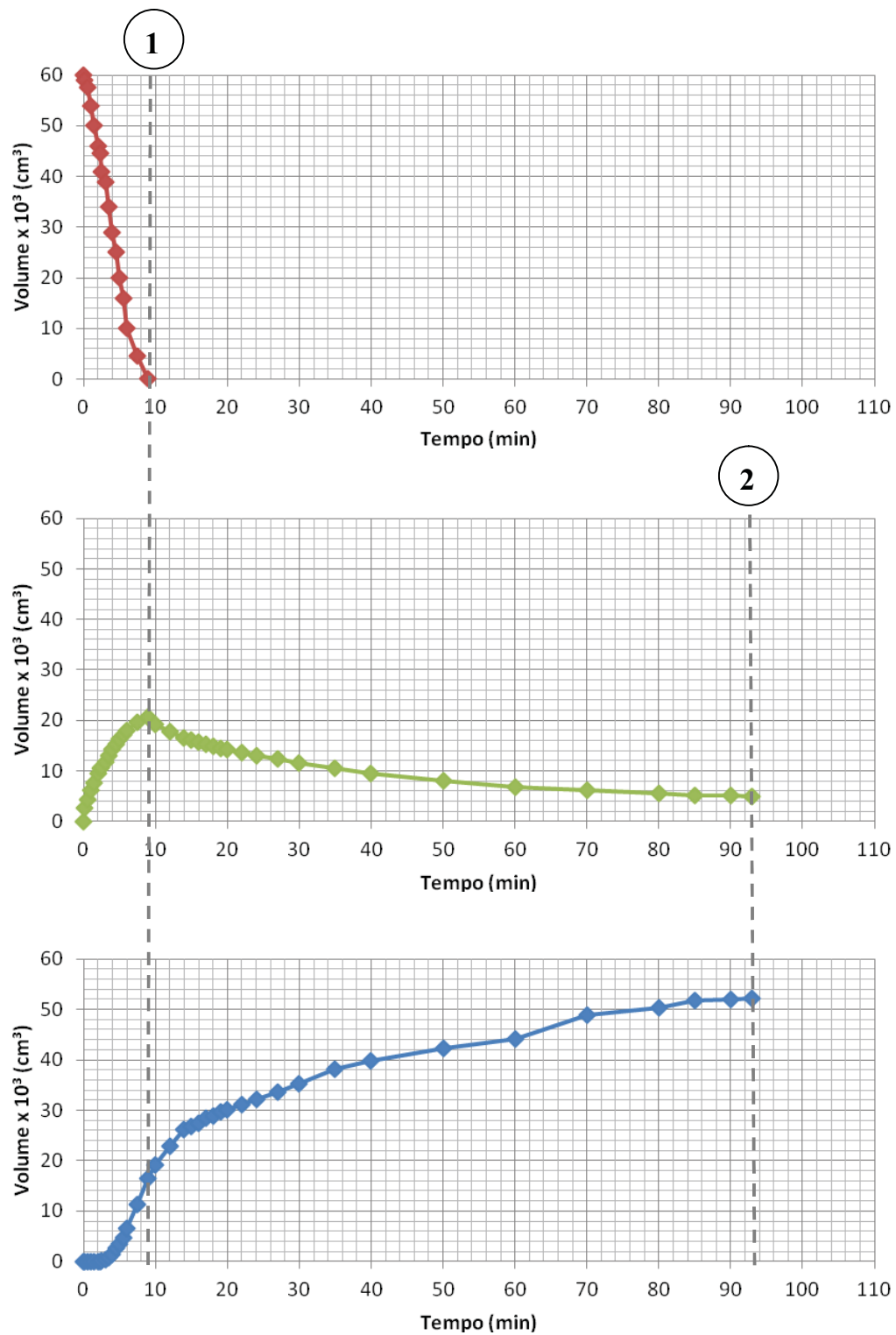
Anexo 3: Ensaio 4 – Geotêxtil Reutilizado de Menor Gramatura



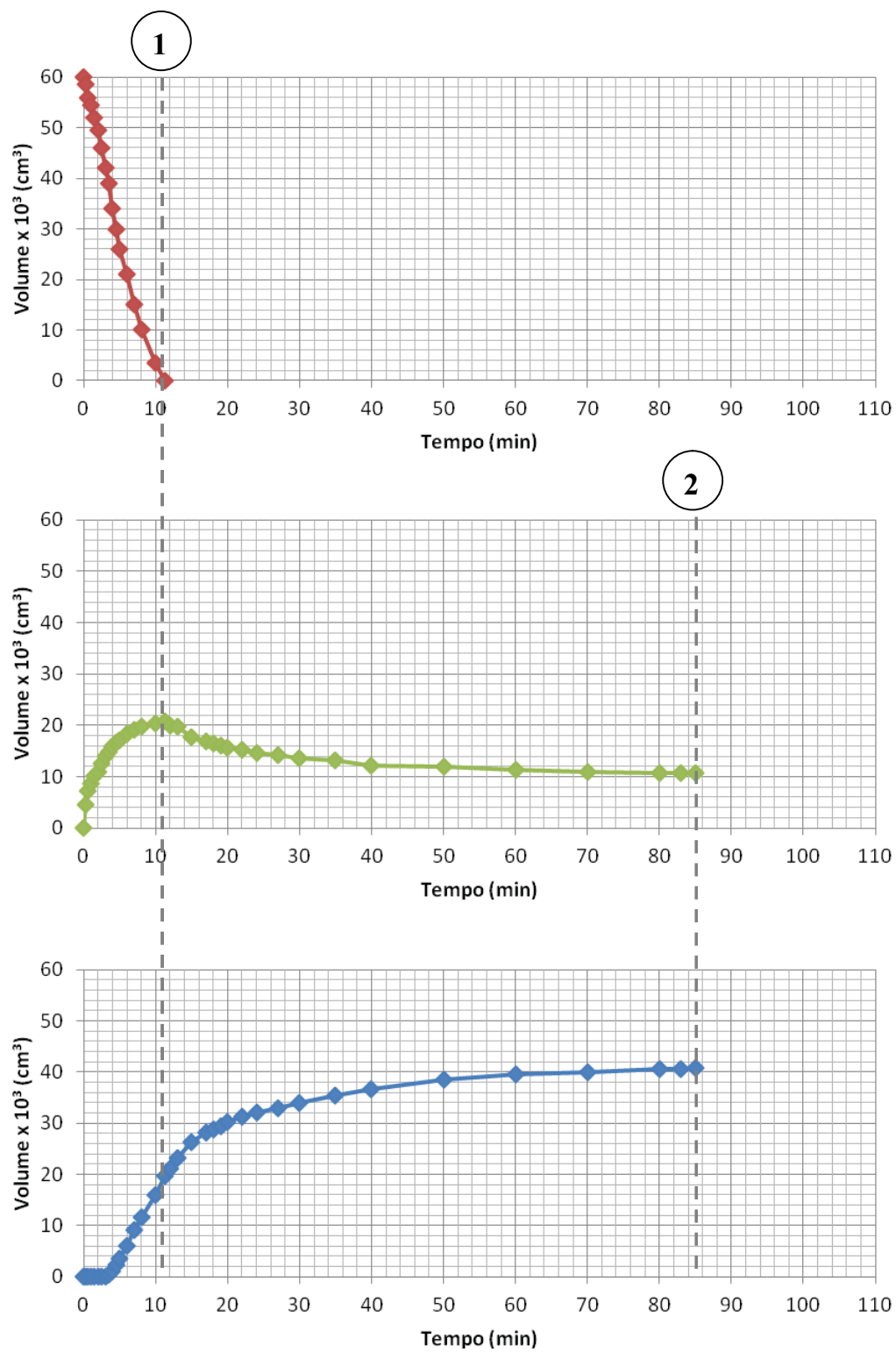
Anexo 4: Ensaio 5 – Geotêxtil Novo de Menor Gramatura



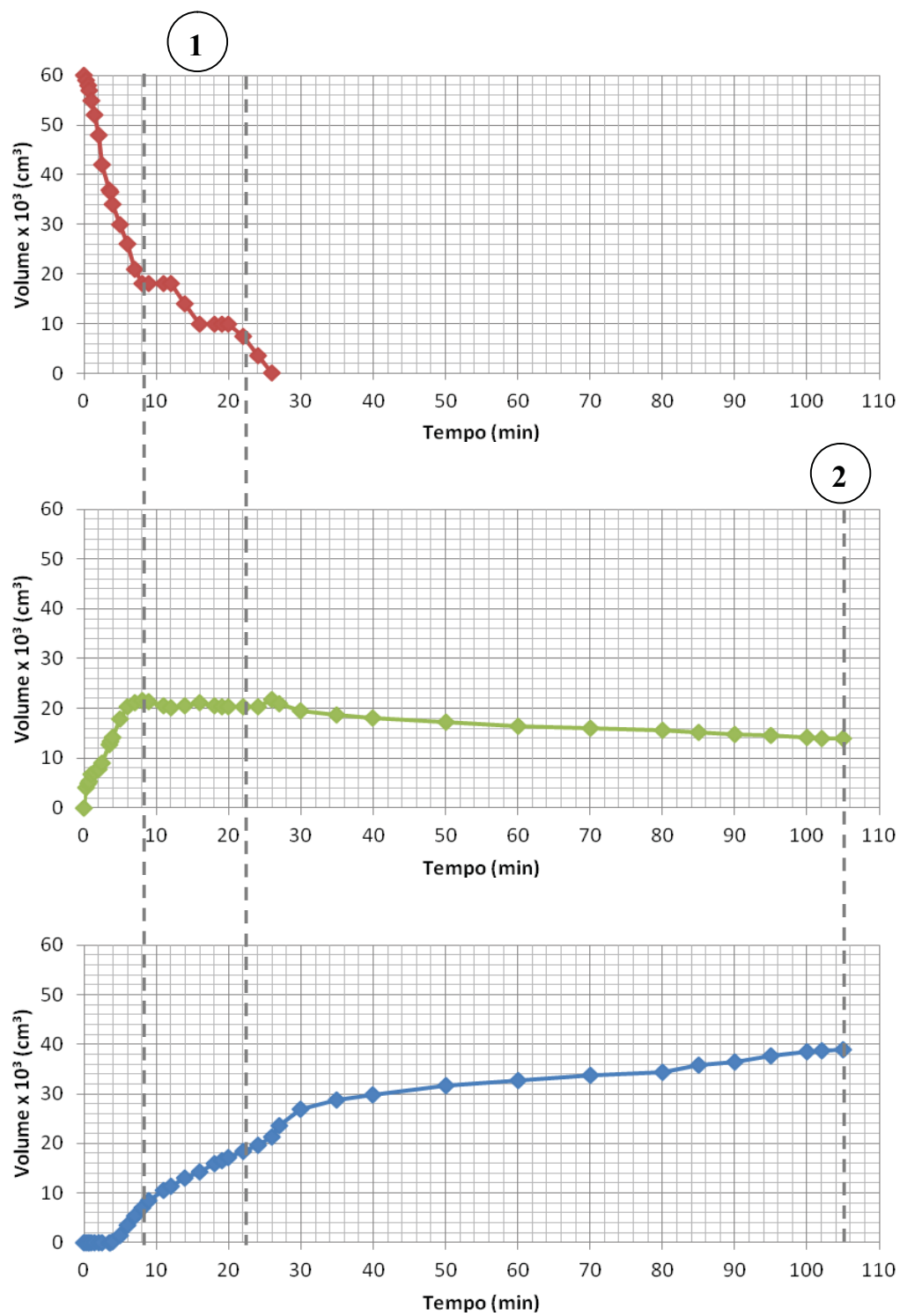
Anexo 5: Ensaio 6 – Geotêxtil Reutilizado de Menor Gramatura



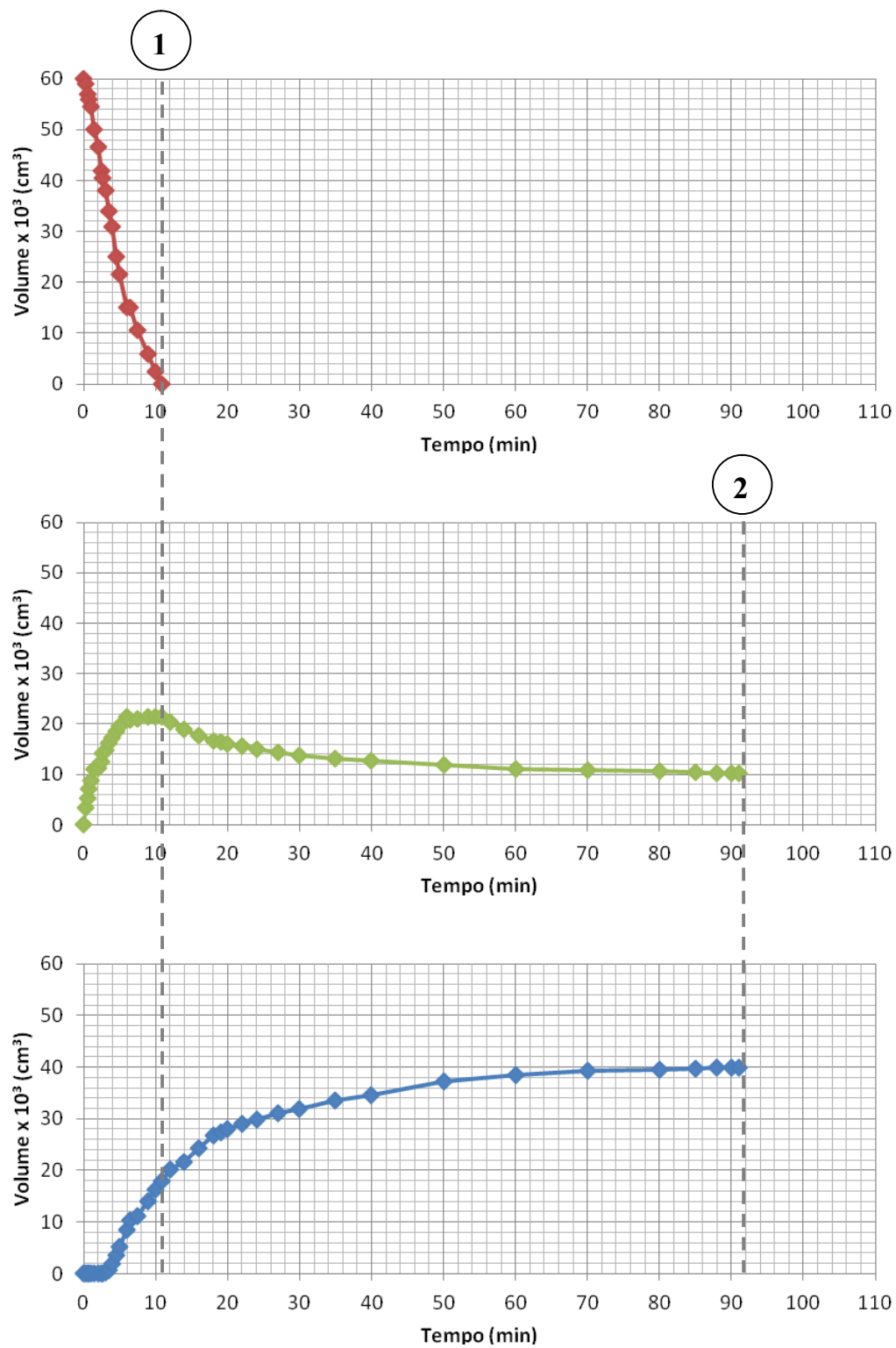
Anexo 6: Ensaio 7 – Geotêxtil Novo de Maior Gramatura



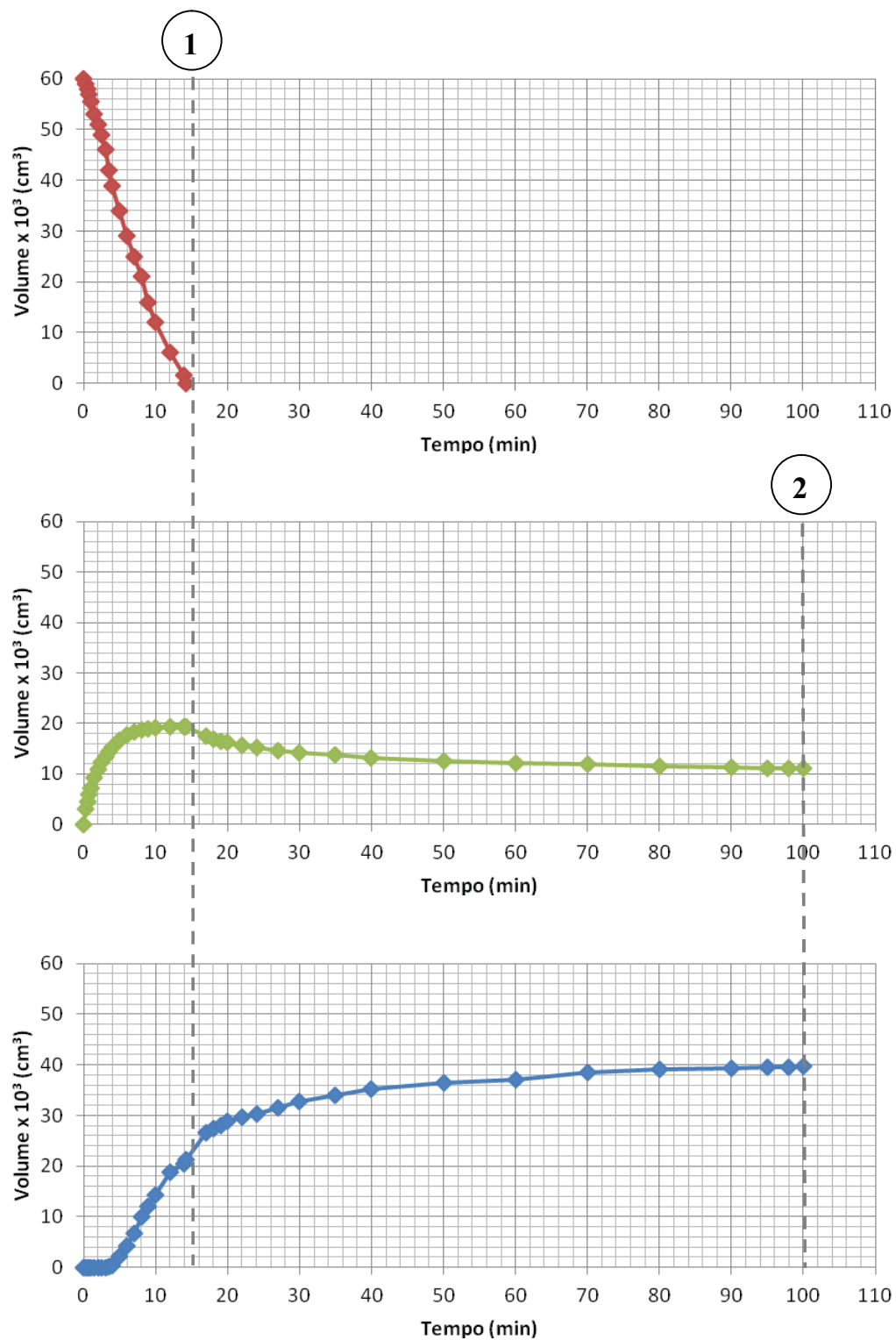
Anexo 7: Ensaio 8 – Geotêxtil Reutilizado de Maior Gramatura



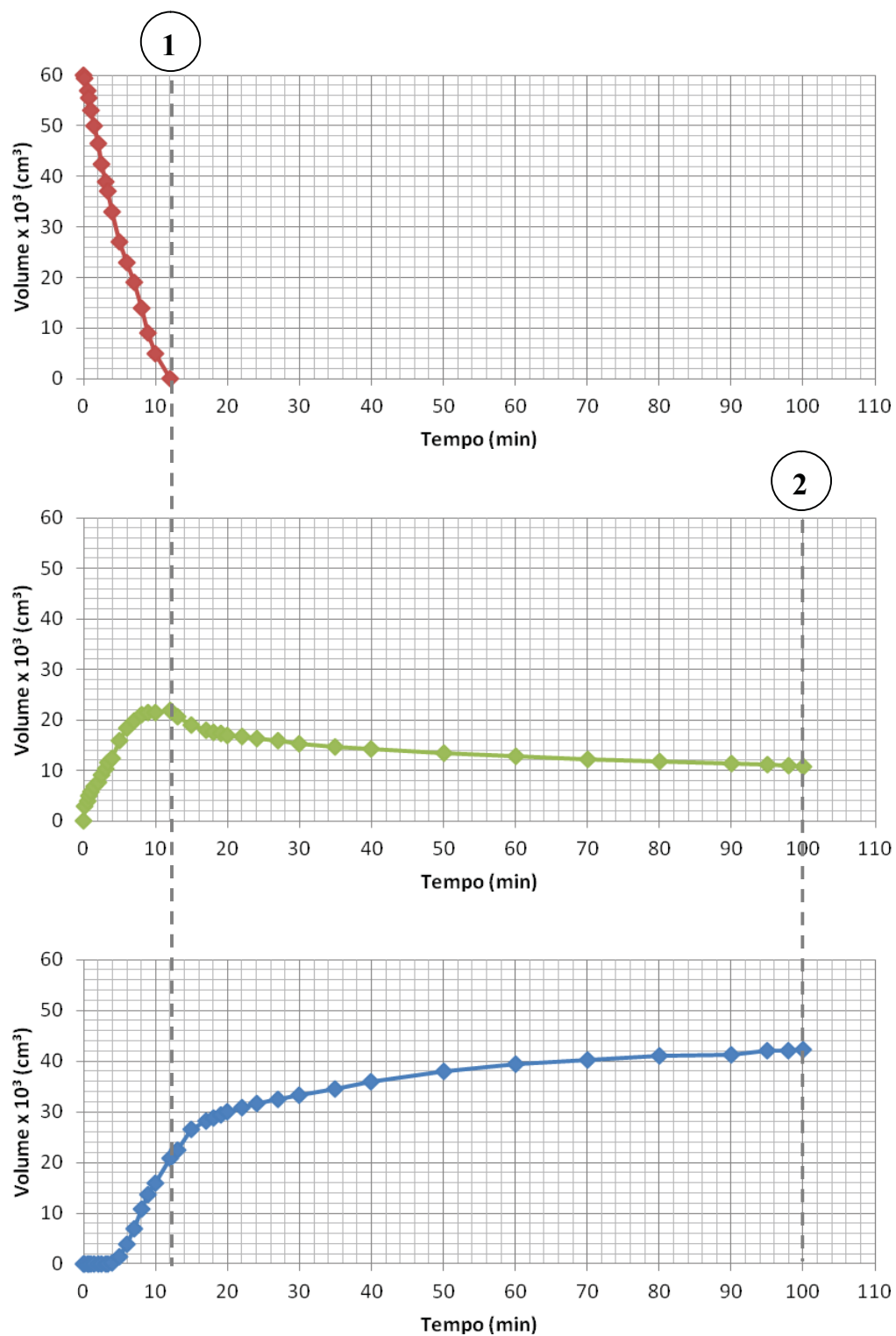
Anexo 8: Ensaio 9 – Geotêxtil Novo de Maior Gramatura



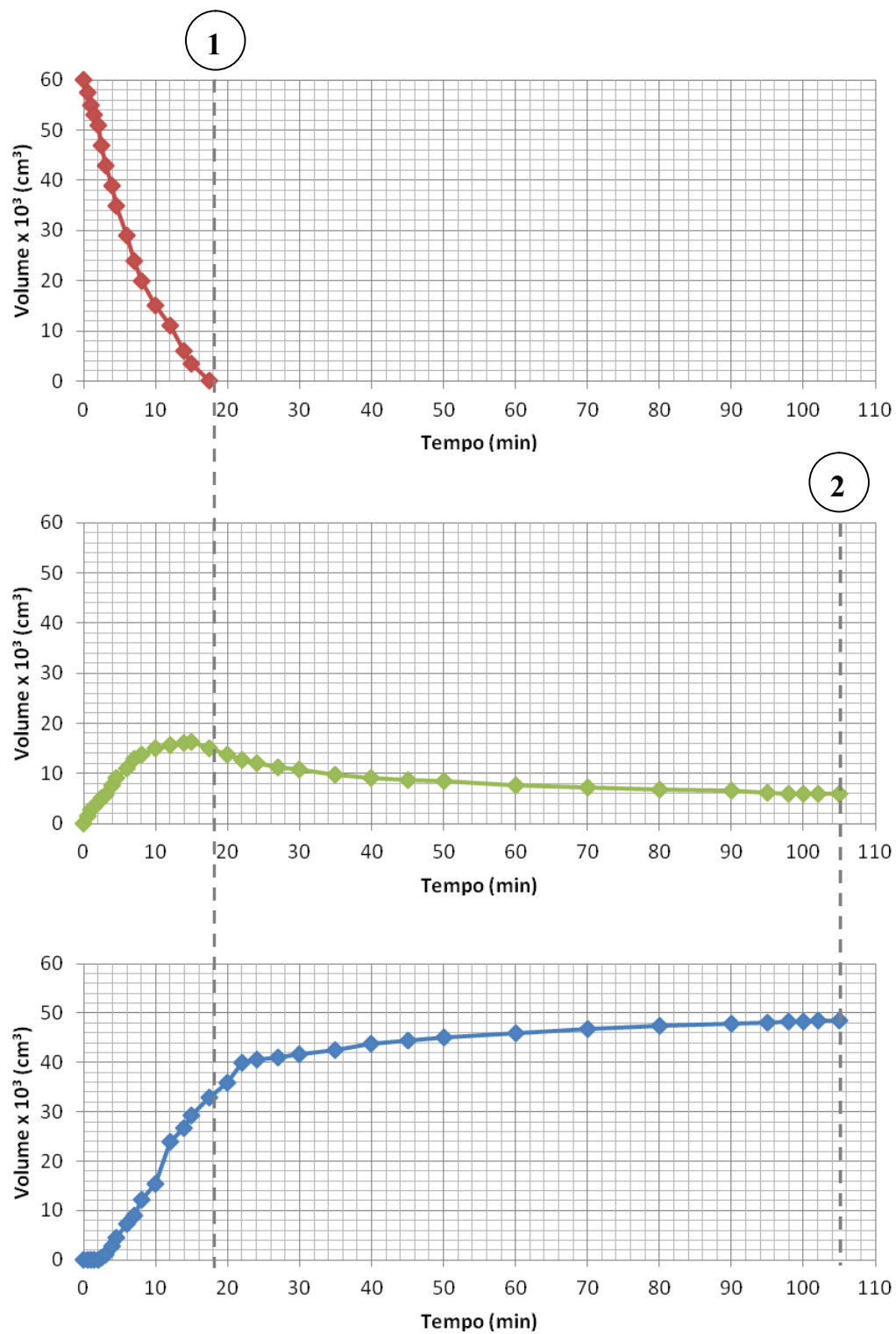
Anexo 9: Ensaio 10 – Geotêxtil Reutilizado de Maior Gramatura



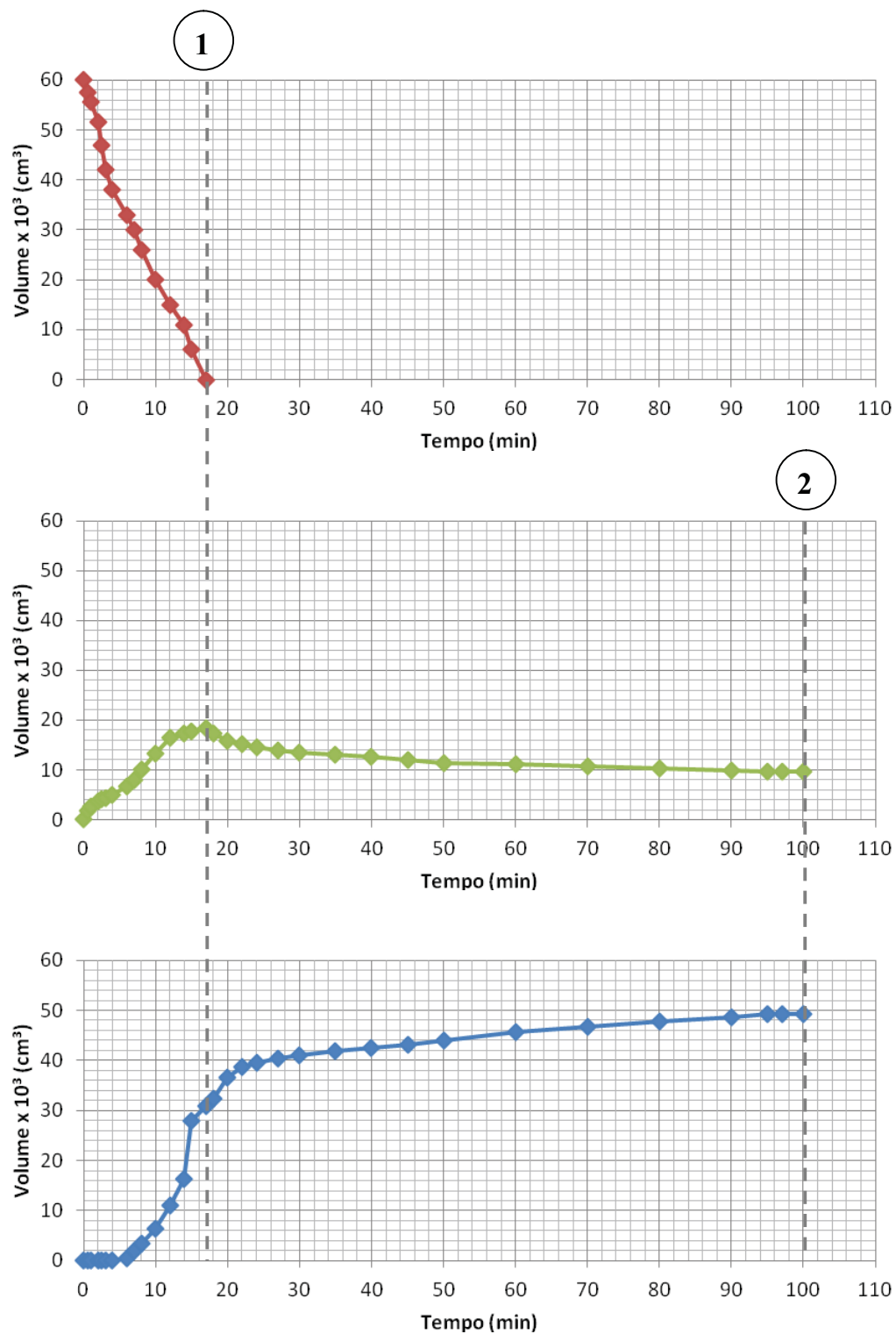
Anexo 10: Ensaio 11 – Geotêxtil Novo de Maior Gramatura



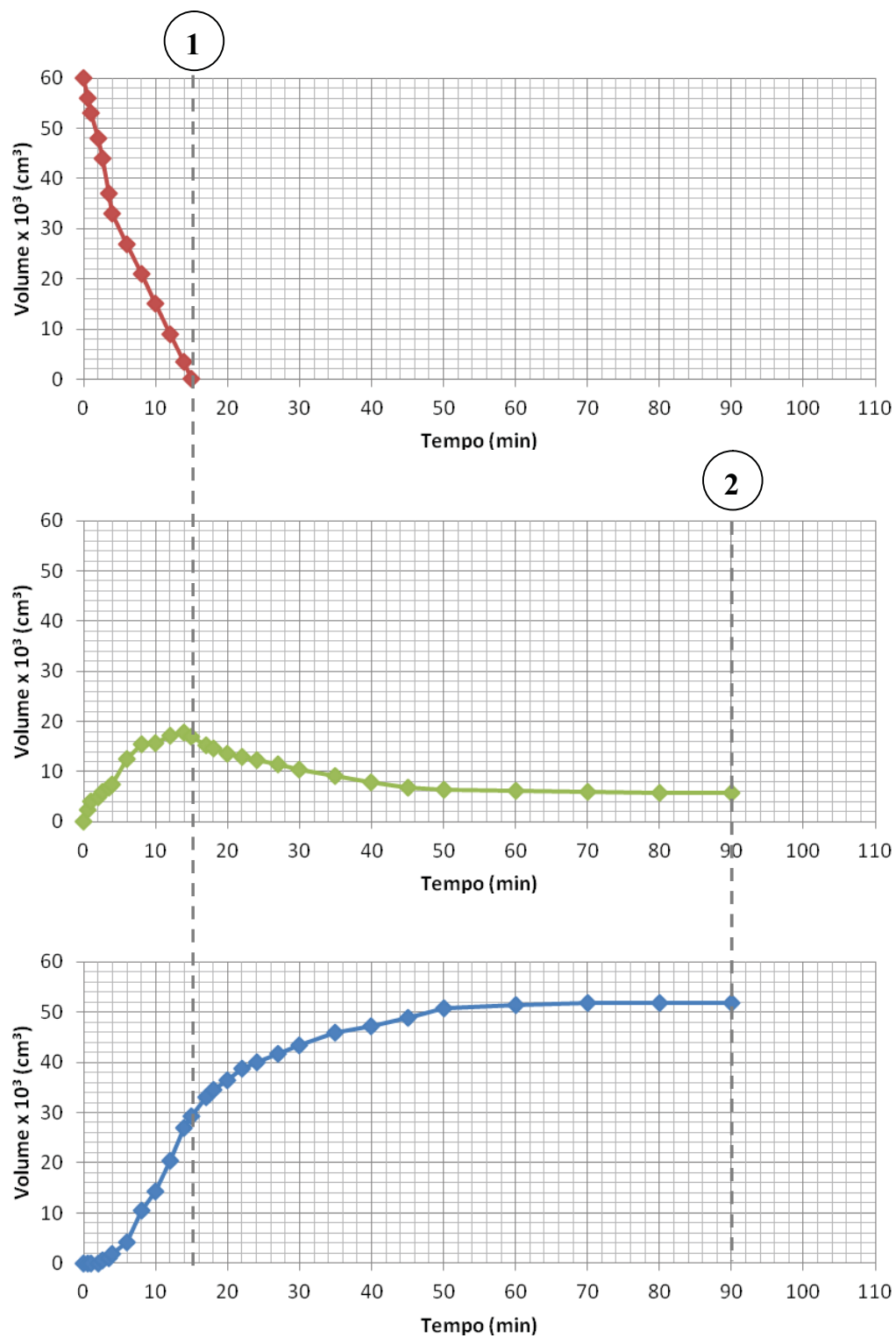
Anexo 11: Ensaio 12 – Geotêxtil Reutilizado de Maior Gramatura



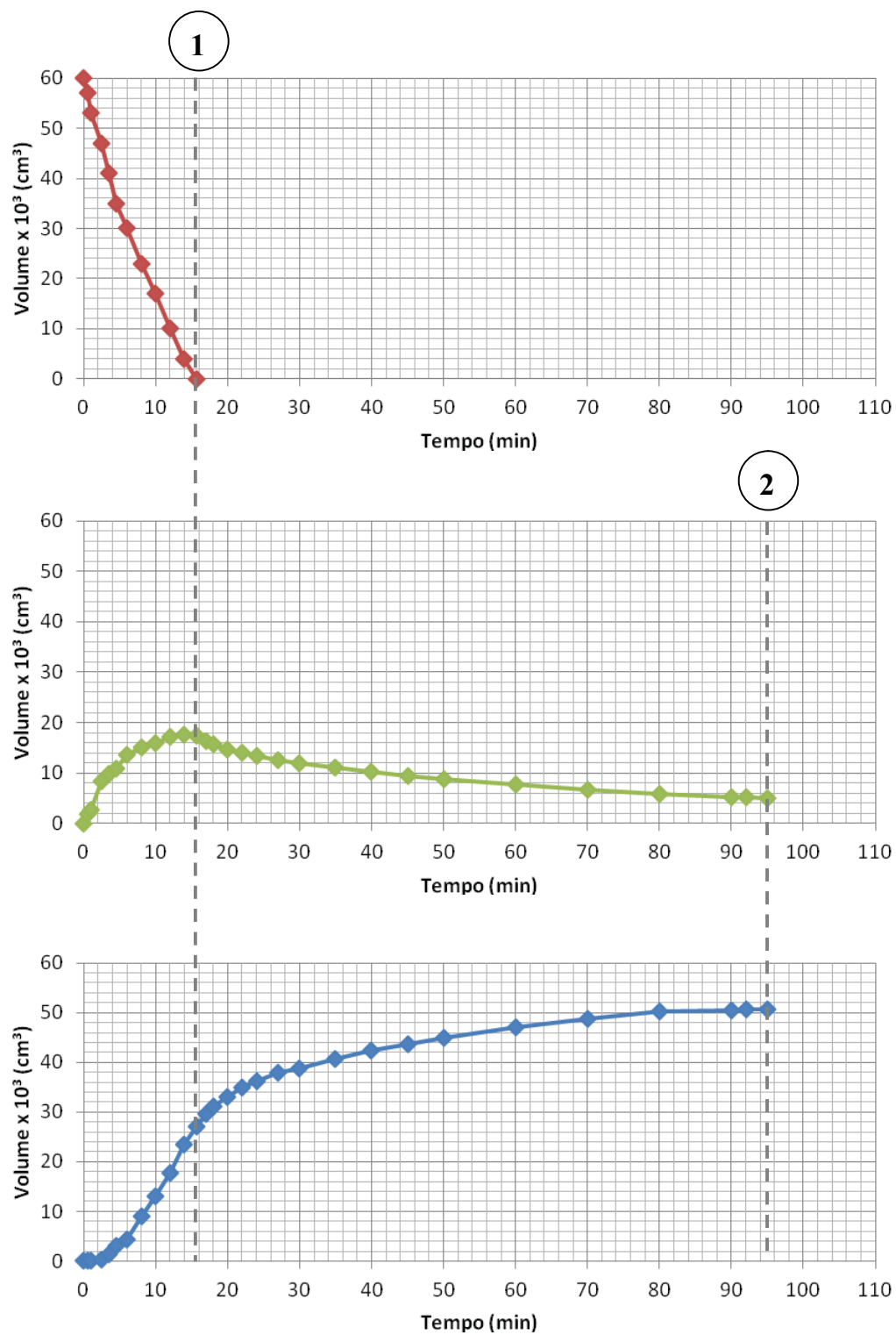
Anexo 12: Ensaio 13 – Geotêxtil Novo de Menor Gramatura



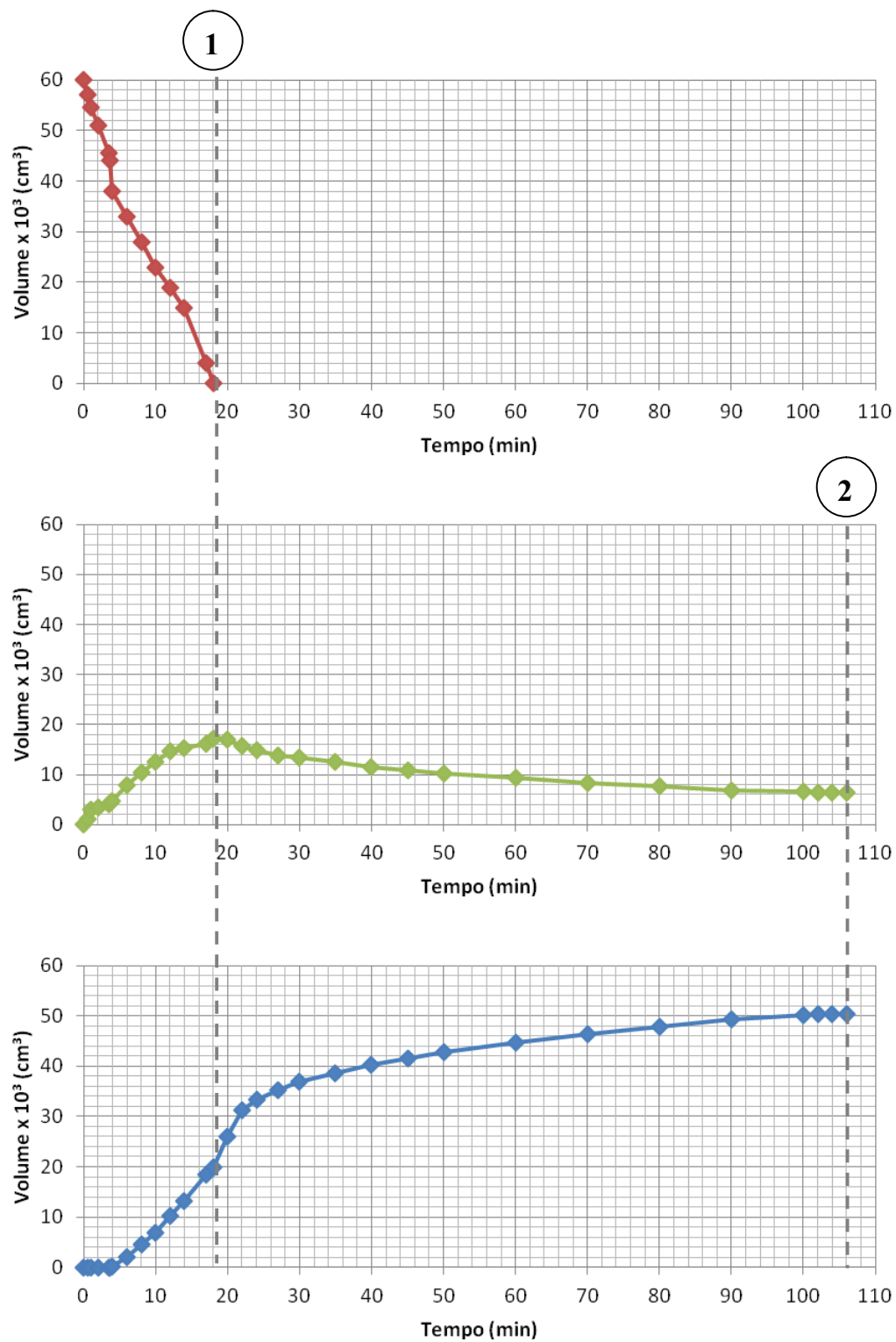
Anexo 13: Ensaio 14 – Geotêxtil Primeira Reutilização de Menor Gramatura



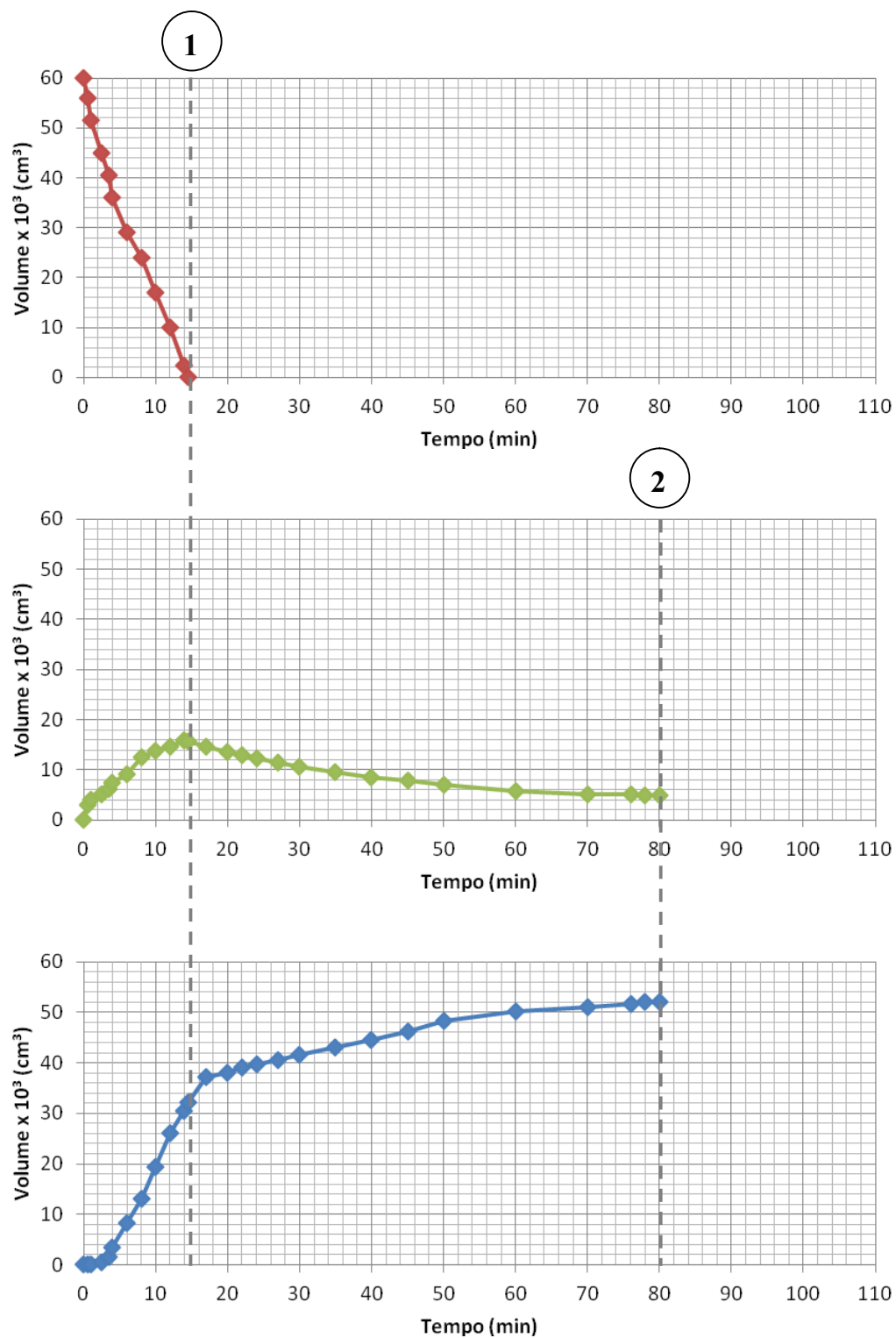
Anexo 14: Ensaio 15 – Geotêxtil Segunda Reutilização de Menor Gramatura



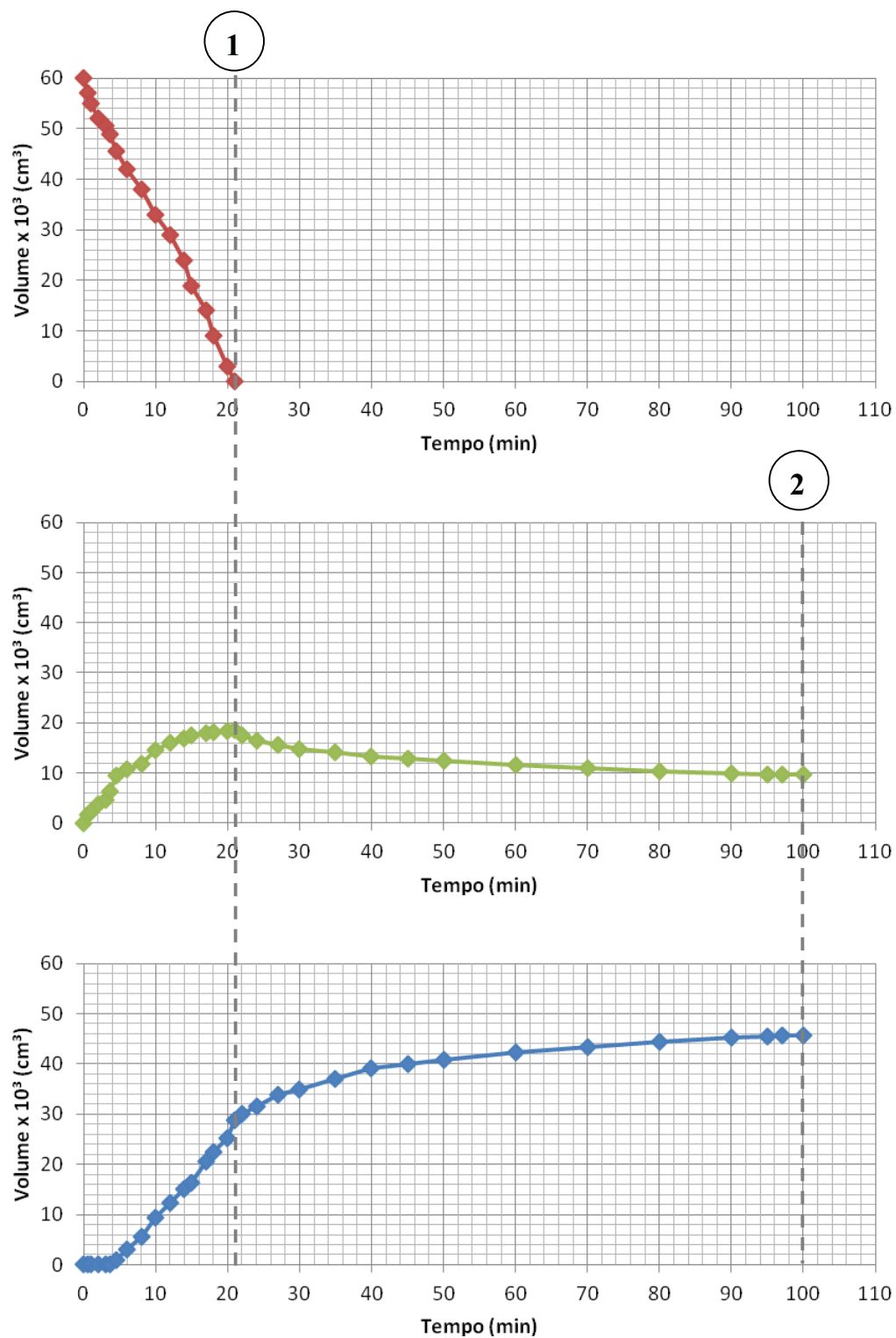
Anexo 15: Ensaio 16 – Geotêxtil Terceira Reutilização de Menor Gramatura



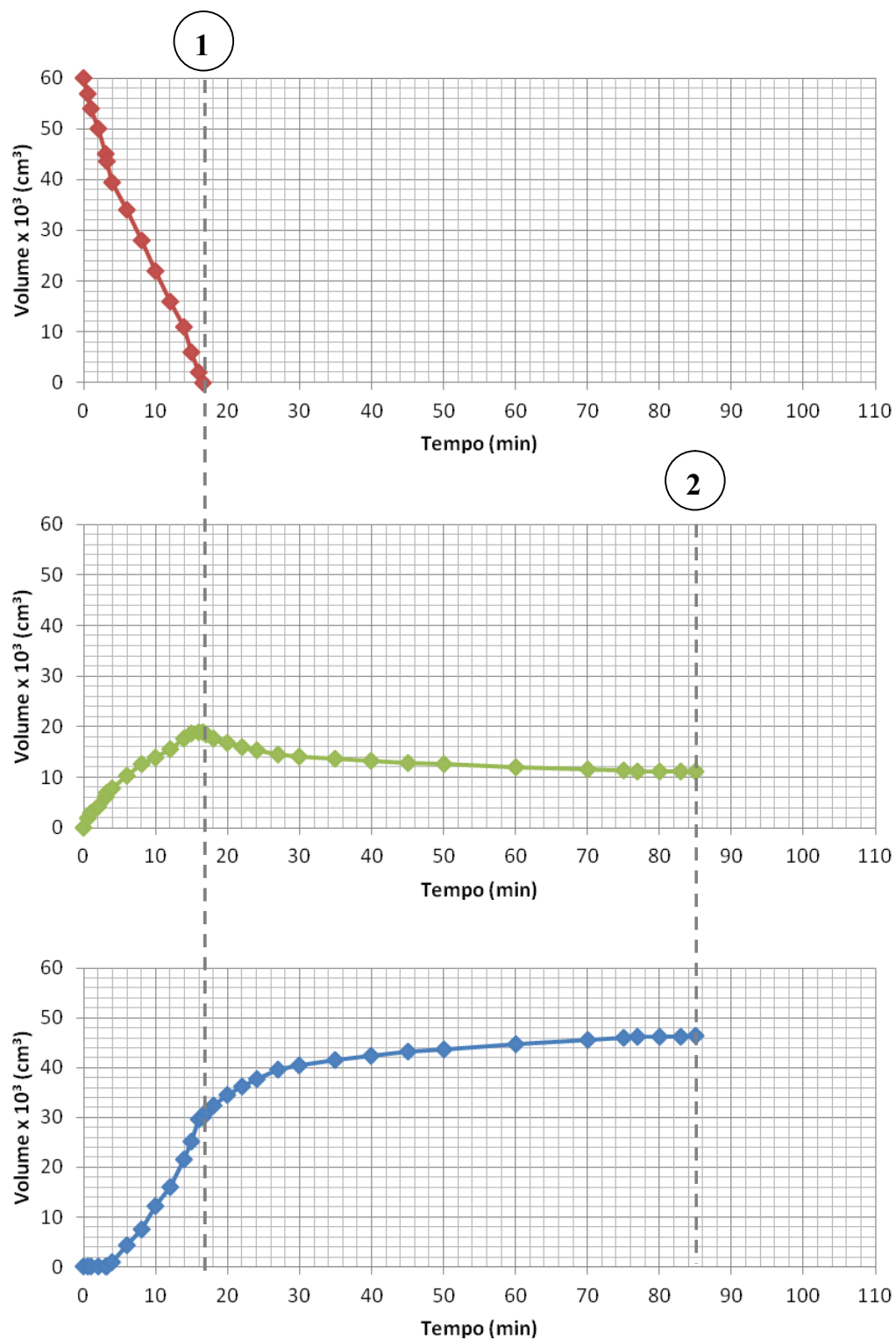
Anexo 16: Ensaio 17 – Geotêxtil Quarta Reutilização de Menor Gramatura



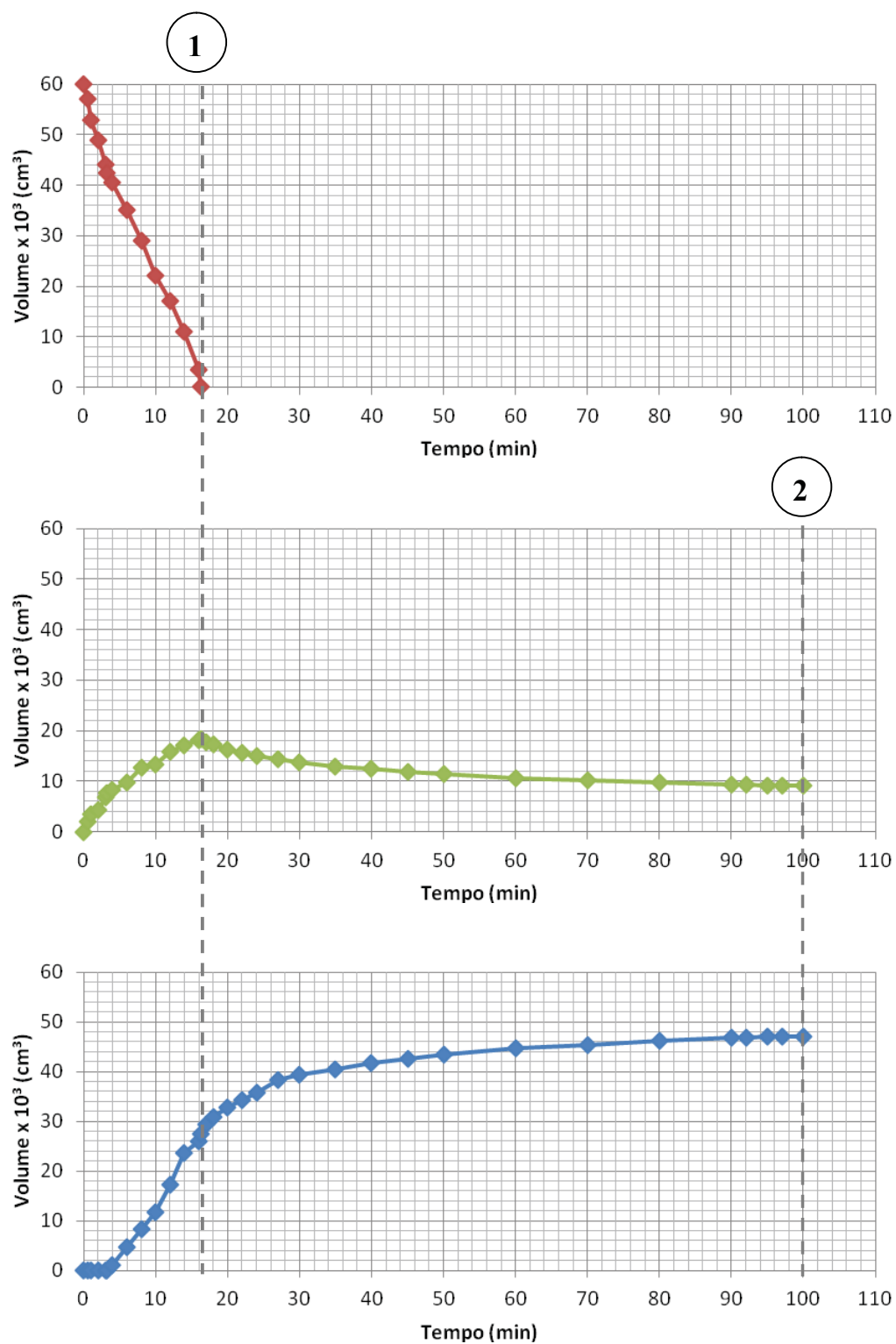
Anexo 17: Ensaio 18 – Geotêxtil Novo de Maior Gramatura



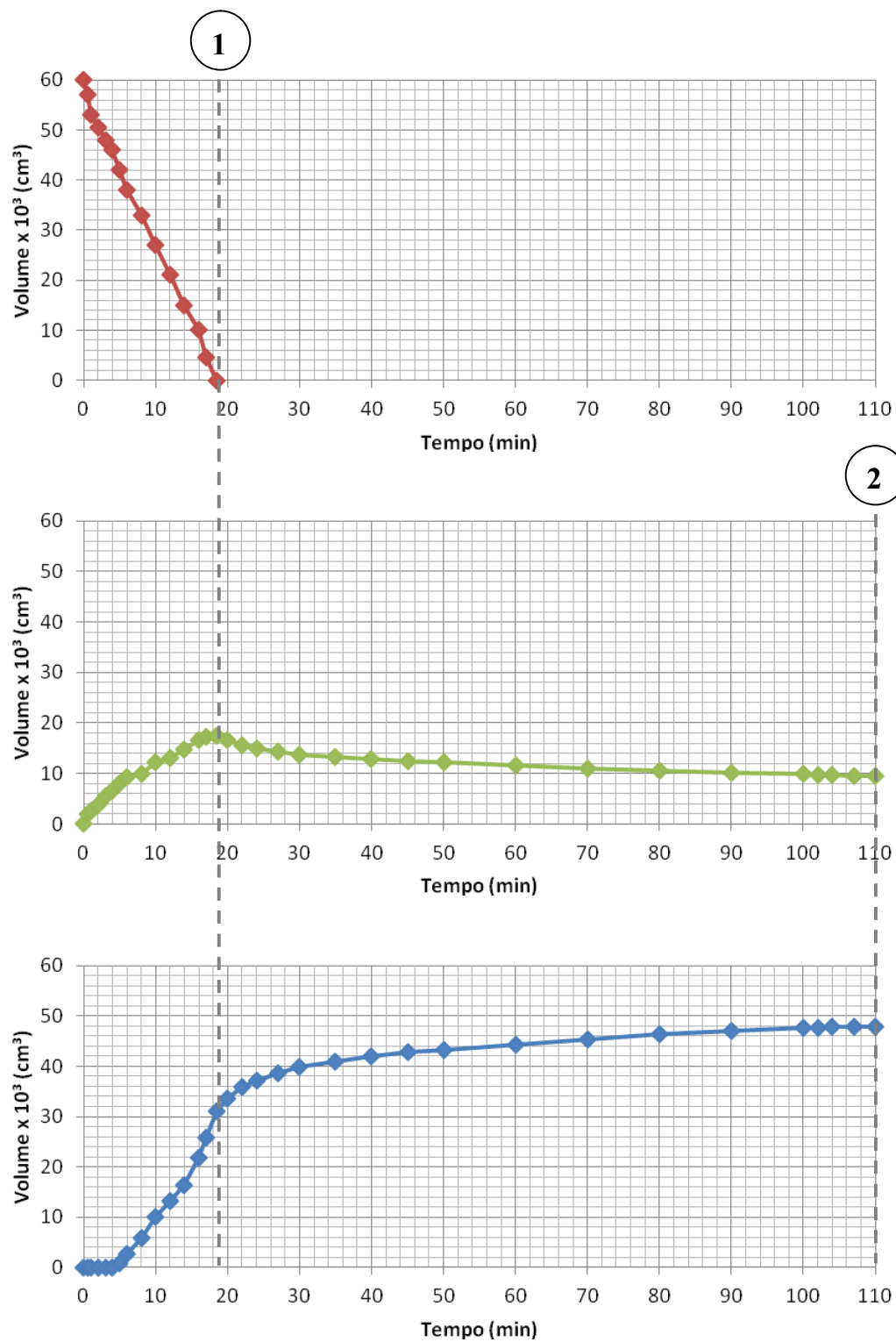
Anexo 18: Ensaio 19 – Geotêxtil Primeira Reutilização de Maior Gramatura



Anexo 19: Ensaio 20 – Geotêxtil Segunda Reutilização de Maior Gramatura



Anexo 20: Ensaio 21 – Geotêxtil Terceira Reutilização de Maior Gramatura



Anexo 21: Ensaio 22 – Geotêxtil Quarta Reutilização de Maior Gramatura