



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

**AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE DRENAGEM COM**  
**GEOSINTÉTICOS PARA DIMINUIÇÃO DA UMIDADE NO**  
**MINÉRIO DE FERRO DA SERRA DE CARAJÁS**

**THIAGO BORGES GOMES MOREIRA**

**Belo Horizonte, 5 de Agosto de 2011**

Thiago Borges Gomes Moreira

**AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE DRENAGEM COM  
GEOSSINTÉTICOS PARA DIMINUIÇÃO DA UMIDADE NO  
MINÉRIO DE FERRO DA SERRA DE CARAJÁS**

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

Área de concentração: Geotecnia

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria das Graças Gardoni Almeida

Co-orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr. Lúcio Flávio de Souza Villar

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG

2011

M838a

Moreira, Thiago Borges Gomes.

Avaliação de sistemas de drenagem com geossintéticos para diminuição da umidade no minério de ferro da Serra de Carajás [manuscrito] / Thiago Borges Gomes Moreira. – 2011.

200 f., enc.: il.

Orientadora: Maria das Graças Gardoni Almeida.

Co-orientador: Lúcio Flávio de Souza Villar.

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

Bibliografia: f.219-227.

1. Engenharia de transportes – Teses. 2. Minérios de ferro – Teses. Teses. 3. Análise numérica – Teses. 4. Geossintéticos – Teses. I. Gardoni, Maria das Graças A. II. Villar, Lúcio Flávio Souza. III. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 625(043)



FOLHA DE APROVAÇÃO

"Avaliação de sistemas de drenagem com geossintéticos para diminuição da umidade no minério de ferro da Serra de Carajás"

**Thiago Borges Gomes Moreira**


Dissertação defendida e aprovada pela Banca Examinadora constituída pelos Senhores:

  
Prof.º Dr.º Lúcio Flávio de Souza Villar


  
Prof.º Dr.º Gustavo Ferreira Simões


  
Prof.º Dr.º Ennio Marques Palmeira

Aprovado pelo Colegiado do Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes

  
Prof. Gustavo Ferreira Simões  
Coordenador

Versão Final aprovada por

  
Prof.ª Maria das Graças G. Almeida  
Orientadora

  
Prof.º Lúcio Flávio de Souza Villar  
Coorientador

Belo Horizonte, 05 de agosto de 2011.

*Dedico este trabalho aos meus exemplos de vida, Ivanda Borges Gomes Moreira e Clautides Moreira dos Santos Filho, pessoas honestas, trabalhadoras, dedicadas, que sempre se esforçaram para que os nossos sonhos, meu e de meu irmão Diego, se tornassem possíveis. Estas duas pessoas sempre estiveram ao meu lado, me encorajando nas horas difíceis e me aplaudindo nos momentos vitoriosos. Agradeço a Deus por serem meus pais, fonte de inspiração, apoio e ensino diário.*

## AGRADECIMENTOS

Agradecimentos. Esta é, com certeza, a parte mais ansiada e comovente de uma dissertação. Nesse momento nos invade uma sensação de dever exercido e de sonho concretizado. Mas também nos traz na lembrança uma história de todos os momentos vividos e compartilhados por todos aqueles que, de alguma maneira, contribuíram para a realização deste trabalho. Foi muito árduo o caminho percorrido até chegar o dia de escrever esta parte da dissertação. Períodos de adaptação, mudanças de hábitos e rotinas, desânimo, cansaço, mas nunca entrega.

Agradeço primeiramente a Deus por tudo em minha vida e por me conceder oportunidades tão especiais. A fé Nele que me deu força para não desistir, para ter esperança quando tudo parecia sem solução. Foi Nele que conseguia coragem para persistir nessa empreitada.

Aos meus magníficos e amáveis pais, Ivanda e Clautides, que sempre me apoiaram e fizeram o possível e o impossível para hoje eu ser o que sou. O amor, a compreensão, a paciência, as palavras e a dedicação que eles me deram durante toda a vida foram fundamentais para a realização deste trabalho.

À Luiza, exemplo de amor, dedicação, carinho e compreensão nos momentos de dificuldade e paciência nos momentos de ausência durante esses dois anos e meio de trabalho. Tantas vezes me deu ânimo para nunca desistir deste sonho. Ajudas preciosas nas horas de aperto. A você, a minha eterna gratidão. Eu amo você!

Agradeço a minha orientadora, Professora Maria das Graças Gardoni Almeida que, durante estes longos meses de pesquisa acadêmica, nunca desistiu de mim e me confiou o desenvolvimento de um trabalho técnico-científico de alto nível. Acho que ela acreditou em mim mais do que eu mesmo. Brigou quando foi necessário, mas também me incentivou e me encorajou a chegar a este momento tão esperado. Todas as sugestões e contribuições foram de grande valia para a finalização dos trabalhos. À senhora, meus sinceros agradecimentos.

Ao Professor Lúcio Flávio de Souza Villar, detentor de um conhecimento ímpar. Ideias e sugestões imensuráveis que contribuíram para o desenvolvimento dos ensaios. Ótima

pessoa e excelente profissional. Sempre apto a trocar ideias, mesmo que seja na cantina da Escola de Engenharia. Foi um prazer tê-lo como parte integrante da minha orientação.

Ao Bruno de Paiva pela ajuda nos ensaios realizados, em sua grande maioria realizada durante os finais de semana, sempre com grande dedicação e competência. Várias ideias compartilhadas demonstraram o senso crítico e técnico deste futuro engenheiro. Com certeza um ótimo profissional que o mercado de trabalho e, porque não, a Geotecnia ganhará.

Aos colegas de mestrado que torceram por este momento, em especial a Luciene e Luciane, que compartilharam comigo o privilégio de ser a 1ª turma de mestrado do Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia (DETG) da UFMG.

Meus agradecimentos também aos professores do Programa de Pós Graduação em Geotecnia e Transporte da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) por compartilharem conhecimentos e experiência de vida.

Aos colegas de laboratório Denis, Saulo, Vinícius, Rodrigo, Tânia, Paula e Marcos pelas piadas e momentos extrovertidos no laboratório.

À Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG e aos professores do Departamento de Transportes e Geotecnia (DETG), em especial ao professor Gustavo Simões pelas valiosas contribuições nos resultados e discussões das análises numéricas.

Aos funcionários do DETG, em especial a Fátima, hoje aposentada, e Kátia, pelas informações e orientações prestadas.

Ao Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN) por possibilitarem e auxiliarem a utilização do equipamento para o ensaio de abrasão Amsler.

À MACCAFERRI por disponibilizar o material sintético utilizado nos ensaios.

À Companhia VALE por tornar possível a realização deste trabalho e aos seus funcionários pelas proveitosas trocas de experiências e informações.

Ao Centro de Microscopia Eletrônica (CME) da UFMG.

À FAPEMIG pelo apoio financeiro.

Por fim, meus sinceros agradecimentos a todos que passaram na minha vida ao longo desses meses de pesquisa e que por meio de um gesto, de uma palavra motivacional, de um

incentivo, da gentileza de um empréstimo de um livro ou de um artigo técnico relacionado ao tema da pesquisa, de uma sugestão, de um sorriso e de um abraço, me fizeram acreditar que este dia chegaria. E chegou!

A todos vocês, muito obrigado!

*“Hoje me sinto mais forte, mais feliz, quem sabe. Só levo a certeza de que muito pouco sei, ou nada sei.”*

Almir Sater

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>XIII</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>XXIII</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>XXV</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>XXVI</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XXVII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.2.1. <i>Objetivo geral</i> .....	2
1.2.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	3
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1. INTRODUÇÃO .....	5
2.2. COMPLEXO MINERADOR DE CARAJÁS .....	5
2.2.1. <i>Granulado ou lump</i> .....	9
2.2.2. <i>Sinter feed (SFCJ)</i> .....	9
2.2.3. <i>Pellet feed</i> .....	10
2.3. UMIDADE EM MINÉRIO DE FERRO.....	12
2.4. ESTABILIDADE INTERNA DO MINÉRIO DE FERRO .....	17
2.5. SOLOS NÃO SATURADOS .....	21
2.5.1. <i>Definição e características</i> .....	21
2.5.2. <i>Quantidade de água nos solos</i> .....	23

2.5.3.	<i>Retenção de água nos solos</i> .....	24
2.5.4.	<i>Tensão superficial</i> .....	25
2.5.5.	<i>Capilaridade</i> .....	26
2.6.	POTENCIAL DA ÁGUA NO SOLO .....	27
2.6.1.	<i>Potencial gravitacional (<math>P_g</math>)</i> .....	27
2.6.2.	<i>Potencial de pressão (<math>P_p</math>)</i> .....	28
2.6.3.	<i>Potencial osmótico (<math>P_{OS}</math>)</i> .....	28
2.6.4.	<i>Potencial matricial ou mátrico (<math>P_m</math>)</i> .....	28
2.7.	SUCÇÃO.....	29
2.7.1.	<i>Sucção matricial (<math>\psi_m</math>)</i> .....	29
2.7.2.	<i>Sucção osmótica (<math>\psi_o</math>)</i> .....	30
2.7.3.	<i>Medição de sucção</i> .....	30
2.7.4.	<i>Cavitação</i> .....	36
2.8.	CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA .....	37
2.8.1.	<i>Tipo de solo</i> .....	41
2.8.2.	<i>Arranjo estrutural</i> .....	41
2.8.3.	<i>Histerese</i> .....	42
2.9.	BALANÇO DE MASSA-ÁGUA .....	43
2.9.1.	<i>Ensaio com lisímetro</i> .....	43
2.9.2.	<i>Ensaio de coluna</i> .....	45
2.10.	GEOSSINTÉTICOS .....	48
2.10.1.	<i>Geotêxtil</i> .....	51
2.10.2.	<i>Critérios de projeto para filtros de geotêxteis</i> .....	52
2.10.3.	<i>Ensaio de filtração do tipo razão entre gradientes: Gradient Ratio (GR)</i> ..	57
2.10.4.	<i>Ensaio especiais com aplicação de vácuo</i> .....	60
2.10.5.	<i>Ensaio de abrasão Amsler</i> .....	60
2.11.	ANÁLISE COMPUTACIONAL.....	64
<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>67</b>
3.1.	MATERIAIS .....	67
3.1.1.	<i>Minério de ferro – Sinter Feed (SFCJ)</i> .....	67
3.1.2.	<i>Geossintéticos</i> .....	70
3.2.	CARACTERIZAÇÃO E AMOSTRAGEM DOS GEOSSINTÉTICOS .....	74

3.2.1.	<i>Amostragem aleatória estratificada</i> .....	74
3.2.2.	<i>Determinação da espessura e gramatura do geotêxtil</i> .....	74
3.2.3.	<i>Resistência à abrasão dos geossintéticos</i> .....	75
3.3.	ENSAIOS DE SECAGEM .....	80
3.3.1.	<i>Ensaio de balanço hídrico - lisímetro</i> .....	83
3.3.2.	<i>Ensaio de secagem – coluna de minério</i> .....	85
3.4.	INSTRUMENTAÇÃO.....	88
3.4.1.	<i>Monitoramento da sucção</i> .....	88
3.4.2.	<i>Monitoramento da temperatura</i> .....	88
3.4.3.	<i>Monitoramento da umidade</i> .....	89
3.4.4.	<i>Monitoramento da umidade relativa do ar e massa do sistema</i> .....	90
3.5.	CALIBRAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO .....	91
3.5.1.	<i>Calibração dos sensores Watermark®</i> .....	92
3.5.2.	<i>Calibração dos sensores de umidade</i> .....	93
3.5.3.	<i>Calibração dos termopares</i> .....	94
3.6.	ENSAIO DE FILTRAÇÃO DO TIPO RAZÃO ENTRE GRADIENTES (GR) .....	95
3.7.	ENSAIO COM APLICAÇÃO DE VÁCUO PARA REDUÇÃO DE UMIDADE .....	100
3.8.	ANÁLISE COMPUTACIONAL.....	101
3.8.1.	<i>Introdução</i> .....	101
3.8.2.	<i>Situações analisadas</i> .....	101
3.8.3.	<i>Malha de elementos finitos</i> .....	102
3.8.4.	<i>Parâmetros de entrada utilizados nas análises</i> .....	103
3.9.	PROJETOS DE DRENOS COM GEOSSINTÉTICOS PARA OS VAGÕES .....	109
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>114</b>
4.1.	RESULTADOS DOS ENSAIOS COM O MINÉRIO DE FERRO (SFCJ) .....	114
4.1.1.	<i>Caracterização geotécnica do SFCJ</i> .....	114
4.1.2.	<i>Estabilidade interna do SFCJ</i> .....	114
4.1.3.	<i>Ensaio com lisímetro</i> .....	117
4.1.4.	<i>Ensaio de coluna</i> .....	125
4.2.	RESULTADOS DOS ENSAIOS COM OS GEOSSINTÉTICOS.....	130
4.2.1.	<i>Ensaio de abrasão Los Angeles</i> .....	130
4.2.2.	<i>Ensaio de abrasão Amsler</i> .....	131

4.2.3.	<i>Ensaio de filtração do tipo Razão entre Gradientes (GR)</i> .....	136
4.2.4.	<i>Ensaio para redução de umidade com aplicação de vácuo</i> .....	159
4.3.	RESULTADOS DAS ANÁLISES COMPUTACIONAIS.....	167
4.3.1.	<i>Análise para calibração dos dados</i> .....	167
4.3.2.	<i>Simulação computacional dos sistemas de drenagem nos vagões</i> .....	169
4.3.3.	<i>Sistemas de drenagem – pátios de estocagem</i> .....	177
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>183</b>
5.1.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	183
5.2.	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .....	189
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>192</b>

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras Latinas

<i>%</i>	Porcentagem
<i>A</i>	Área da seção transversal do permeâmetro [m <sup>2</sup> ]
<i>A</i>	Desgaste do material por abrasão
<i>Atm</i>	Atmosfera
<i>Btu</i>	Unidade Térmica Britânica
<i>C</i>	Celsius
<i>C(θ)</i>	Capacidade de retenção específica
<i>cm</i>	Centímetro
<i>Cu</i>	Coefficiente de não-uniformidade
<i>D</i>	Diâmetro
<i>D</i>	Desgaste
<i>D</i>	Densidade relativa
<i>E</i>	Índice de vazios
<i>E</i>	Espessura
<i>F</i>	Fahrenheit
<i>Ft</i>	Pé
<i>g</i>	Gramas
<i>G1</i>	Geotêxtil não tecido com gramatura de 400 g/m <sup>2</sup>
<i>G2</i>	Geotêxtil não tecido com gramatura de 600 g/m <sup>2</sup>
<i>Gm</i>	Geocomposto com núcleo drenante de geomanta
<i>Gr</i>	Geocomposto com núcleo drenante de georrede
<i>GR</i>	Razão entre gradientes
<i>GTK</i>	Geotêxtil tricotado
<i>GTN</i>	Geotêxtil não-tecido
<i>GTNa</i>	Geotêxtil não-tecido agulhado
<i>GTNr</i>	Geotêxtil não-tecido resinado
<i>GTNt</i>	Geotêxtil não-tecido termoligado
<i>GTW</i>	Geotêxtil tecido
<i>h</i>	Hora

<i>hr</i>	Hora
<i>i</i>	Gradiente hidráulico
<i>IP</i>	Índice de Plasticidade
<i>J</i>	Joule
<i>k</i>	Coefficiente de condutividade hidráulica
<i>kg</i>	Quilograma
<i>kJ</i>	Quilojoule
<i>km</i>	Quilômetro
<i>kN</i>	Quilonewton
<i>kPa</i>	Quilopascal
<i>LL</i>	Limite de Liquidez
<i>LP</i>	Limite de Plasticidade
<i>m</i>	Metro
<i>mm</i>	Milímetro
<i>M</i>	Massa da mistura minério e água
<i>min</i>	Minuto
<i>Mpa</i>	Megapascal
<i>n</i>	Porosidade
<i>N</i>	Newton
<i>P</i>	Peso total da amostra antes do ensaio
<i>P'</i>	Peso do material após o ensaio
<i>PVC</i>	Policloreto de vinila
<i>r.p.m</i>	Rotações por minuto
<i>s</i>	Segundo
<i>S</i>	Grau de Saturação
<i>seg</i>	Segundo
<i>t</i>	Tonelada
<i>T</i>	Tensão
<i>u</i>	Poropressão
<i>UV</i>	Ultravioleta
<i>V</i>	Volume

## Letras Gregas

$\Delta u.$	Variação da poropressão
$\Delta\theta$	Variação de umidade
$\Delta\psi$	Variação de sucção
$\gamma$	Peso específico
$\psi$	Sucção
$\omega$	Teor de umidade gravimétrico
$\theta$	Teor de umidade volumétrico

## Subscritos

$\gamma_d$	Peso específico aparente seco
$\gamma_s$	Peso específico dos grãos
$\gamma_w$	Peso específico da água
$\psi_m$	Sucção matricial
$\psi_o$	Sucção osmótica
$\psi_t$	Sucção total
$\psi_b$	Sucção de entrada de ar
$\theta_r$	Teor de umidade residual
$\theta_s$	Teor de umidade saturado
$E_m$	Espessura média das amostras ensaiadas
$e_{máx}$	Índice de vazios máximo
$e_{mín}$	Índice de vazios mínimo
$GR_{3mm}$	Razão entre gradientes da UnB
$GR_{ASTM}$	Razão entre gradientes da ASTM
$GR_{Mod}$	Razão entre gradientes da UBC
$H_{CP}$	Altura do corpo de prova
$i_{i/j}$	Gradiente hidráulico entre piezômetros i e j
$M_a$	Massa de ar
$M_s$	Massa de sólidos
$M_w$	Massa de água
$T_s$	Tensão superficial
$V_a$	Volume de ar
$V_m$	Espessura média das amostras virgens

$V_s$	Volume de sólidos
$V_w$	Volume de água

### **Sobrescritos**

°	Grau
$cm^2$	Centímetro quadrado
$cm^3$	Centímetro cúbico
$m^2$	Metro quadrado

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Localização geográfica do complexo minerador de Carajás (SÁ, 2010 - modificado).....	6
Figura 2.2 - Mina de Carajás .....	6
Figura 2.3 - Fluxograma simplificado do processo de beneficiamento do minério de ferro (SAMPAIO et al., 2001).....	8
Figura 2.4 - Granulometria do minério produzido em Carajás (UFMG, 2009) .....	9
Figura 2.5 - <i>Sinter Feed (SFCJ)</i> .....	10
Figura 2.6 - <i>Pellet Feed</i> .....	10
Figura 2.7 - Correia transportadora de minério .....	11
Figura 2.8 - Pátios de estocagem de minério de ferro .....	12
Figura 2.9 - Embarque do minério de ferro em vagões .....	13
Figura 2.10 - (a) Furos nas laterais do vagão; (b) furo na parte inferior do vagão (FERREIRA, 2009).....	15
Figura 2.11 - Dreno de poliuretano utilizado pela VALE S.A. para drenagem dos vagões (VALE, 2003).....	16
Figura 2.12 - Vista inferior do dreno de poliuretano utilizado nos vagões (VALE, 2003). 16	
Figura 2.13 - Minério de ferro retirado da caixa coletora instalado na região inferior do dreno (VALE, 2003).....	17
Figura 2.14 - Metodologia de análise da estabilidade interna proposta por Sherard (1979) (BEIRIGO, 2009) .....	18
Figura 2.15 - Método de análise do formato das curvas granulométricas proposta por Kenney e Lau (1985) (MUÑOZ, 2005).....	20
Figura 2.16 - Curvas típicas para avaliação do potencial a instabilidade interna dos solos proposta por Lafleur <i>et al.</i> (1989) (BEIRIGO, 2005).....	21
Figura 2.17 - Elemento de solo não saturado em quatro fases (Fredlund <i>et al.</i> , 1978).....	22

Figura 2.18 - Retenção da água por agregados do solo após a drenagem (LIBARDI, 2005) .....	24
Figura 2.19 - Tensão superficial na interface ar-água. (a) Forças intermoleculares na película contráctil e água; (b) Pressões e tensão superficial agindo em uma superfície curva bidimensional (FREDLUND e RAHARDJO, 1993) .....	25
Figura 2.20 - Vista perspectiva e partes componentes de um tensiômetro munido de vacuômetro metálico (AZEVEDO e SILVA, 1999) .....	32
Figura 2.21 - Esquema do tensiômetro Imperial College (RIDLEY e BURLAND, 1999)	35
Figura 2.22 - Curva característica típica para um solo siltoso (FREDLUND e XING, 1994 – modificado).....	38
Figura 2.23 - Curvas características típicas de solos arenosos e argilosos (FREDLUND e XING, 1994 – modificado).....	39
Figura 2.24 - Curvas de retenção de água do SFCJ (GARDONI <i>et al.</i> , 2010).....	40
Figura 2.25 - Tipos de estruturas do solo. (a) Floculado; (b) Disperso (LAMBE e WHITMAN, 1969) .....	41
Figura 2.26 - Influência da histerese na curva característica de retenção (KONYAI <i>et al.</i> , 2009).....	43
Figura 2.27 - Estágios da evaporação (WILSON <i>et al.</i> , 1994).....	46
Figura 2.28 - Desaguamento de rejeito de mineração em tubos de geotêxteis (VIDAL e MARTINS, 2006).....	50
Figura 2.29 - Mecanismos de colmatação dos geotêxteis (PALMEIRA <i>et al.</i> , 2005) .....	56
Figura 2.30 - Esquema do permeâmetro utilizado em ensaios de filtração do tipo razão entre gradientes (GR) (GARDONI, 2000 – modificado) .....	58
Figura 2.31 - Ensaio especial de redução de umidade em minério de ferro (FERREIRA, 2009).....	60
Figura 2.32 - Máquina utilizada para o ensaio de Abrasão Amsler .....	61
Figura 2.33 - Desenho esquemático da máquina para a realização do ensaio de Abrasão Amsler (RIBEIRO, 2010).....	61

Figura 2.34 - Esquema do equipamento Amsler (ABNT, 1992 (a)) .....	62
Figura 2.35 - Dispositivos de medida para a perda de espessura (ABNT, 1992 (a)) .....	63
Figura 2.36 - Umidade das pilhas de minério na simulação, após 10 dias (ABRÃO e MARINHO, 2004).....	66
Figura 3.1 - Característica granulométrica do SFCJ passante pela peneira #100: a) partículas com formas geométricas bem definidas; b) material laminar; c) planos bem definidos e formato octagonal das partículas; d) partículas finas impregnadas em partículas maiores .....	68
Figura 3.2 - Geossintéticos utilizados na pesquisa: a) Geocomposto com núcleo de georrede; b) Geocomposto com núcleo de geomanta; c) Geotêxtil não-tecido.....	70
Figura 3.3 - Amostragem aleatória estratificada do geossintético para obtenção das amostras .....	74
Figura 3.4 - Equipamentos utilizados para obtenção da espessura do geossintético.....	75
Figura 3.5 - Máquina Los Angeles e as cargas abrasivas.....	75
Figura 3.6 - Amostra antes do início do ensaio .....	76
Figura 3.7 - Amostras dentro do tambor e marcador de revoluções.....	76
Figura 3.8 - Amostras de geotêxtil prontas para o ensaio Amsler. (a) amostra de geotêxtil colada ao bloco de rocha (b) bloco e amostra dentro da caixa de ensaio .....	77
Figura 3.9 - Acúmulo de minério no geotêxtil .....	78
Figura 3.10 - (a) Dreno de poliuretano utilizado pela Vale; (b) minério de granulometria equivalente ao passante pelo dreno de poliuretano .....	79
Figura 3.11 - Execução do ensaio de Abrasão Amsler com areia padrão do IPT .....	79
Figura 3.12 - Execução do ensaio de Abrasão Amsler com o minério CFCJ .....	80
Figura 3.13 - Coluna acrílica para ensaios de balanço água-minério de ferro (a) coluna completa com a localização da instrumentação; (b) detalhe da localização da instrumentação; (c) vista superior da coluna .....	82
Figura 3.14 - Lisímetro: (a) vista geral do corpo de prova; (b) detalhe da instalação da instrumentação.....	85

Figura 3.15 - Coluna de acrílico: (a) vista geral do equipamento utilizado no ensaio de coluna; (b) desenho esquemático da coluna de acrílico e locação da instrumentação utilizada .....	86
Figura 3.16 - Corpo de prova pronto para início do ensaio .....	87
Figura 3.17 - Tensiômetros Watermark® com sistema de aquisição de dados.....	88
Figura 3.18 - Termopar tipo espeto utilizado nos ensaios.....	89
Figura 3.19 - Sensor de umidade e sistema de aquisição de dados .....	89
Figura 3.20 - Higrômetro Digital para medição da umidade relativa do ar.....	90
Figura 3.21 - Andamento do ensaio de calibração .....	91
Figura 3.22 - Ensaio para calibração dos sensores de umidade e tensiômetros .....	92
Figura 3.23 - Tensiômetros de vácuo com cápsula cerâmica .....	93
Figura 3.24 - Processo de calibração dos termopares. (a) sensores no recipiente com gelo; (b) equilíbrio da temperatura ambiente; (c) termopares conectados ao data-logger para medição.....	95
Figura 3.25 - Montagem da parte inferior do permeâmetro .....	96
Figura 3.26 - Lubrificação com graxa automotiva e filme plástico.....	97
Figura 3.27 - Montagem do corpo de prova .....	98
Figura 3.28 - Ensaio de redução de umidade do minério com aplicação de vácuo.....	100
Figura 3.29 - Malha de elementos finitos e condições de contorno para a coluna de minério .....	102
Figura 3.30 - Malha de elementos finitos e condições de contorno para o vagão – fluxo bidimensional .....	103
Figura 3.31 - Malha de elementos finitos e condições de contorno para a pilha de minério – fluxo bidimensional .....	103
Figura 3.32 – Dados de temperatura e precipitação obtidos da Estação Serra dos Carajás/PA (Vale, 2011).....	105
Figura 3.33 – Dados de velocidade do vento e umidade obtidos da Estação Serra dos Carajás/PA (Vale, 2011).....	105

Figura 3.34 – Curva característica do minério de ferro utilizada nas análises com o software VADOSE/W .....	106
Figura 3.35 – Curva da condutividade hidráulica em função da sucção matricial.....	107
Figura 3.36 – Curva característica da condutividade térmica em função da umidade volumétrica do minério de ferro utilizada nas análises com o software VADOSE/W.....	108
Figura 3.37 – Curva do calor específico volumétrico em função da umidade volumétrica do minério de ferro utilizada nas análises com o software VADOSE/W.....	109
Figura 3.38 - Localização dos drenos de fundo de poliuretano e dos drenos laterais de geossintéticos.....	110
Figura 3.39 - Alternativa 1 para instalação dos drenos de geossintéticos .....	111
Figura 3.40 - Alternativa 2 para instalação dos drenos de geossintéticos .....	112
Figura 3.41 - Estrutura de suporte dos drenos de geossintéticos.....	113
Figura 3.42 - Estrutura de suporte sem os drenos de geossintéticos nas laterais .....	113
Figura 4.1 - Curva granulométrica do SFCJ.....	114
Figura 4.2 - Curvas granulométricas das frações obtidas para a amostra SFCJ a partir da metodologia proposta por Sherard (1979).....	115
Figura 4.3 - Curva granulométrica do SFCJ e características de concavidade.....	116
Figura 4.4 - Curva de descrição da curva granulométrica do minério de ferro (SFCJ).....	116
Figura 4.5 - Variação da evaporação real e potencial com o tempo.....	118
Figura 4.6 - Variação da razão entre as taxas de evaporação real e potencial com o tempo .....	119
Figura 4.7 - Variação da sucção com o tempo .....	120
Figura 4.8 - Variação da temperatura com o tempo .....	122
Figura 4.9 - Temperatura superficial e umidade relativa durante o ensaio .....	123
Figura 4.10 - Variação da umidade gravimétrica com o tempo .....	124
Figura 4.11 - Variação da umidade gravimétrica em função da sucção.....	125
Figura 4.12 - Variação da sucção com o tempo .....	126

Figura 4.13 - Perfil de sucção com o tempo .....	127
Figura 4.14 - Variação da temperatura com o tempo .....	128
Figura 4.15 - Perfil de temperatura com o tempo.....	128
Figura 4.16 - Variação da umidade com o tempo.....	129
Figura 4.17 - Perfil de umidade com o tempo .....	130
Figura 4.18 - Geocompostos após o ensaio .....	131
Figura 4.19 - Curva granulométrica da areia padrão do IPT e do SFCJ passante pelo dreno de poliuretano. ....	132
Figura 4.20 - Geotêxtil após 70 giros .....	133
Figura 4.21 - Amostras de geotêxteis virgens e após ensaio de abrasão Amsler com areia padrão IPT. (a) geotêxtil (GA); (b) geotêxtil (GB) .....	134
Figura 4.22 - Amostras de geotêxteis virgens e após ensaio de abrasão Amsler com o SFCJ. (a) geotêxtil (GA); (b) geotêxtil (GB).....	134
Figura 4.23 - Permeabilidade em função da variação do gradiente hidráulico – SFGA ...	137
Figura 4.24 - Variação da vazão em função do gradiente hidráulico total aplicado ( $1,0 < i < 10,0$ ) – SFGA .....	138
Figura 4.25 - Variação do gradiente hidráulico em função do gradiente total aplicado ( $1,0 < i < 10,0$ ) – SFGA .....	138
Figura 4.26 - GR em função da variação do gradiente hidráulico total aplicado ( $1,0 < i < 10,0$ ) – SFGA.....	139
Figura 4.27 - Variação da condutividade hidráulica em função do carregamento – SFGA .....	140
Figura 4.28 - Variação da vazão em função do carregamento – SFGA .....	140
Figura 4.29 - Variação do GR em função do carregamento para $i=10$ – SFGA .....	141
Figura 4.30 - Imagens de MEV do geotêxtil (GA) utilizado no ensaio de GR com o sistema SFGA, ensaiado com variação do gradiente hidráulico e carregamento variável: (a) vista geral; (b) e (c) partículas grandes no interior da amostra; (d) partículas de minério de ferro impregnando as fibras do geotêxtil.....	142

Figura 4.31 - Variação da condutividade hidráulica em função do gradiente hidráulico total aplicado ( $1,0 < i < 10,0$ ) – SFGB .....	143
Figura 4.32 - Variação da vazão em função do gradiente hidráulico total aplicado ( $1,0 < i < 10,0$ ) – SFGB.....	144
Figura 4.33 - Variação do gradiente hidráulico em função do gradiente total aplicado ( $1,0 < i < 10,0$ ) – SFGB .....	144
Figura 4.34 - GR em função da variação do gradiente hidráulico total aplicado ( $1,0 < i < 10,0$ ) – SFGB.....	145
Figura 4.35 - Variação da condutividade hidráulica em função do carregamento – SFGB .....	146
Figura 4.36 - Variação da vazão em função do carregamento – SFGB .....	146
Figura 4.37 - Variação do GR em função do carregamento – SFGB.....	147
Figura 4.38 - Imagens de MEV do geotêxtil (G2) utilizado no ensaio de GR do sistema SFGB, ensaiado com variação do gradiente hidráulico e carregamento variável: (a) vista geral (fibras soltas na amostra); (b) e (c) partículas no interior da amostra; (d) material impregnado nas fibras do geotêxtil.....	148
Figura 4.39 - Variação da condutividade hidráulica em função do gradiente hidráulico total aplicado ( $1,0 < i < 10,0$ ) – SFGm.....	149
Figura 4.40 - Variação da vazão em função do gradiente hidráulico total aplicado ( $1,0 < i < 10,0$ ) – SFGm .....	150
Figura 4.41 - Variação do gradiente hidráulico em função do gradiente total aplicado ( $1,0 < i < 10,0$ ) – SFGm.....	150
Figura 4.42 - GR em função da variação do gradiente hidráulico total aplicado ( $1,0 < i < 10,0$ ) – SFGm .....	151
Figura 4.43 - Variação da condutividade hidráulica em função do carregamento – SFGm .....	152
Figura 4.44 - Variação da vazão em função do carregamento – SFGm.....	152
Figura 4.45 - Variação do GR em função do carregamento – SFGm .....	153

Figura 4.46 - Imagens de MEV do geocomposto de geomanta (Gm) utilizado no ensaio de GR no sistema SFGm, ensaiado com variação do gradiente hidráulico e carregamento variável: (a) vista geral (fibras soltas na amostra); (b) e (c) partículas grandes no interior da amostra; (d) minério impregnado nas fibras do geotêxtil.....	154
Figura 4.47 - Variação da condutividade hidráulica em função do gradiente total aplicado ( $1,0 < i < 10,0$ ) – SFGGr .....	155
Figura 4.48 - Variação da vazão em função do gradiente hidráulico total aplicado ( $1,0 < i < 10,0$ ) – SFGGr .....	155
Figura 4.49 - Variação do gradiente hidráulico em função do gradiente total aplicado ( $1,0 < i < 10,0$ ) – SFGGr.....	156
Figura 4.50 - GR em função da variação do gradiente hidráulico total aplicado ( $1,0 < i < 10,0$ ) – SFGGr .....	156
Figura 4.51 - Variação da condutividade hidráulica em função do carregamento – Sistema SFGGr .....	157
Figura 4.52 - Variação da vazão em função do carregamento – Sistema SFGGr .....	158
Figura 4.53 - Variação do GR em função do carregamento – Sistema SFGGr.....	158
Figura 4.54 - Imagens de MEV do geocomposto utilizado no ensaio de GR do sistema SFGGr, ensaiado com variação do gradiente hidráulico e carregamento variável: (a) vista geral (fibras soltas na amostra); (b) e (c) partículas no interior da amostra; (d) material impregnado nas fibras do geotêxtil.....	159
Figura 4.55 - Variação do teor de umidade no corpo de prova ao final de ensaio – Sistema SFGA .....	160
Figura 4.56 - Imagens de MEV do geotêxtil do sistema SFGA: (a) vista geral ; (b) e (c) partículas no interior da amostra; (d) fibras parcialmente impregnadas .....	161
Figura 4.57 - Variação do teor de umidade no corpo de prova ao final de ensaio – Sistema SFGB .....	162
Figura 4.58 - Imagens de MEV do geotêxtil do sistema SFGB: (a) vista geral ; (b) partículas impregnadas nas fibras do geotêxtil; (c) e (d) fibras impregnadas com partículas finas .....	163

Figura 4.59 - Variação do teor de umidade no corpo de prova ao final de ensaio – Sistema SFGm.....	163
Figura 4.60 - Imagens de MEV do geocomposto com núcleo de geomanta, sistema SFGm: (a) partículas no interior da amostra ; (b) partícula de grande dimensão no interior da amostra; (c) e (d) fibras impregnadas com partículas finas.....	164
Figura 4.61 - Variação do teor de umidade no corpo de prova ao final de ensaio – Sistema SFGr .....	165
Figura 4.62 - Imagens de MEV do geocomposto com núcleo de georrede, sistema SFGr: (a), (b) e (c) partículas de grandes dimensões no interior da amostra ; (d) região do núcleo do geocomposto.....	166
Figura 4.63 - Resultado da análise paramétrica – umidade volumétrica.....	169
Figura 4.64 - Vista interna do vagão e drenos de poliuretano: (a) localização no fundo do vagão; (b) vista superior do dreno; (c) detalhe da abertura do dreno (VALE, 2003).....	170
Figura 4.65 - Vista geral do vagão carregado de minério de ferro.....	170
Figura 4.66 - Diagrama de umidade volumétrica no interior do vagão para a situação I (SD) .....	172
Figura 4.67 - Perfil de umidade de umidade volumétrica no interior do vagão para a situação II (DPF) .....	173
Figura 4.68 - Diagrama de umidade volumétrica no interior do vagão para a situação II (DPF) .....	173
Figura 4.69 - Perfil de umidade de umidade volumétrica no interior do vagão para a situação 3 (DGL) .....	174
Figura 4.70 - Diagrama de umidade volumétrica no interior do vagão para a situação 3 (DGL) .....	175
Figura 4.71 - Perfil de umidade de umidade volumétrica no interior do vagão para a situação 4 (DGL+DPF).....	176
Figura 4.72 - Diagrama de umidade volumétrica no interior do vagão para a situação 4 (DGL+DPF).....	176
Figura 4.73 - Condições de contorno analisadas (ABRÃO e MARINHO, 2004) .....	177

Figura 4.74 - Diagrama de umidade da pilha de minério sem sistema de drenagem na base (NE) .....	178
Figura 4.75 - Perfil de umidade na região central da pilha de minério (NE) .....	178
Figura 4.76 - Perfil de umidade na região central da pilha de minério (C1).....	179
Figura 4.77 - Diagrama de umidade da pilha de minério com sistema de drenagem centralizada na base (C1).....	179
Figura 4.78 - Perfil de umidade na região central da pilha de minério (C2).....	180
Figura 4.79 - Diagrama de umidade da pilha de minério com sistema de drenagem centralizada na base (C2).....	180
Figura 4.80 - Pilha de minério sem sistemas de drenagem na base (C3) .....	181
Figura 4.81 - Diagrama de umidade da pilha de minério com sistema de drenagem em toda base (C3).....	181

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Dados da análise química do SFCJ fornecidos pela VALE em NOV/2008 .....	7
Tabela 2.2 - Técnicas de medição de sucção (MARINHO e PEREIRA, 1998).....	31
Tabela 2.3 Critérios projetos de filtros têxteis (PALMEIRA e GARDONI, 2000 - modificado).....	53
Tabela 3.1 - Resumo dos estudos realizados com o minério de ferro (SFCJ).....	69
Tabela 3.2 - Propriedades dos geotêxteis não-tecido utilizados nos ensaios (Maccaferri, 2011).....	71
Tabela 3.3 - Propriedades do geocomposto drenante MacDrain R.2 utilizado nos ensaios (Maccaferri, 2011).....	71
Tabela 3.4 - Propriedades do geocomposto drenante MacDrain 2L 20.2 utilizado nos ensaios (Maccaferri, 2011) .....	72
Tabela 3.5 - Propriedades dos geossintéticos utilizados.....	73
Tabela 4.1 - Principais parâmetros geotécnicos do SFCJ (UFMG, 2009) .....	114
Tabela 4.2 - Resultado dos estudos de estabilidade interna .....	117
Tabela 4.3 - Resultados dos ensaios de Abrasão Amsler .....	135
Tabela 4.4 - Composição dos sistemas analisados nos ensaios de GR .....	136
Tabela 4.5 - Características dos ensaios de GR.....	136
Tabela 4.6 - Descrição dos ensaios de redução de umidade.....	160
Tabela 4.7 - Quadro resumo dos valores de umidades iniciais e finais.....	166
Tabela 4.8 - Quadro comparativo da umidade volumétrica na análise paramétrica simples .....	168
Tabela 4.9 - Quadro comparativo da umidade volumétrica na análise paramétrica simples .....	168
Tabela 4.10 - Programa de simulações numéricas efetuadas .....	171

Tabela 4.11 - Programa de simulações numéricas efetuadas .....	177
--	-----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
MA	Maranhão
MVE	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira
PA	Pará
PVC	Policloreto de vinila
SFCJ	Sinter Feed Carajás
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UnB	Universidade de Brasília
UV	Ultravioleta

## RESUMO

O minério de ferro produzido na região da Serra dos Carajás/PA, maior reserva de minério de ferro do mundo, possui umidade elevada quando comparado com minérios de ferro extraídos e beneficiados em outros países. Essa umidade elevada deve-se, principalmente, ao processo de beneficiamento por via úmida. Devido aos altos índices pluviométricos no estado do Pará, a umidade do minério se mantém elevada também durante o transporte e a estocagem. Isto vem causando custos adicionais ao produto tornando-o mais oneroso, uma vez que a água retida não agrega valor comercial. Este trabalho apresenta resultados de ensaios realizados em laboratório para avaliar a redução do teor de umidade do minério de ferro “*sinter feed*” (SFCJ) extraído pela Companhia VALE S.A. a partir de sistemas de drenagem com a utilização de geossintéticos.

Ensaio de razão entre gradientes (GR) foram realizados para avaliar as condições de drenagem dos materiais sintéticos em diferentes etapas de carregamento e gradientes hidráulicos. No mesmo equipamento, foram executados ensaios especiais para a avaliação da redução de umidade no minério de ferro, que consistiam na aplicação de vácuo com auxílio de uma bomba na base do corpo de prova. Os resultados apresentados demonstraram que a utilização de geossintéticos combinados com vácuo de aproximadamente 100 kPa foi capaz de reduzir a umidade do minério de ferro na ordem de 40% em relação ao teor de umidade inicial do corpo de prova.

Estudos para a avaliação do desgaste por abrasão dos materiais sintéticos em contato com o minério de ferro também foram realizados, simulando a condição a que estarão submetidos nos vagões. Além disso, foram realizados ensaios de secagem em coluna e em lisímetro, instrumentados com tensiômetros, medidores de umidade e medidores de temperatura para o acompanhamento do processo de secagem do minério de ferro.

Com os resultados obtidos foi efetuada uma simulação numérica utilizando o *software* VADOSE/W (*GEOSTUDIO International Ltda.*) variando as condições de drenagem ou os sistemas de drenagem com o objetivo de avaliar a eficiência no processo de redução da umidade do minério de ferro, tanto durante o transporte quanto a estocagem.

**Palavras chave:** minério de ferro, teor de umidade, geossintético, análise numérica.

## ABSTRACT

The iron ore produced in the Serra dos Carajás/PA, the largest reserves of iron ore in the world, has high moisture when compared with iron ore extracted and processed in other countries. Due to high rainfall in the state of Pará, the moisture content of the ore remains high during transportation and storage. This fact is causing additional costs, making the product more expensive since the retained water does not add value to the commercial product. This paper presents results of tests performed in the laboratory to evaluate the reduction of moisture content of iron ore "sinter feed" (SFCJ) extracted by the Company VALE SA in Carajás, PA, when geosynthetic drainage systems are used.

Gradient Ratio (GR) tests were performed to evaluate the drainage conditions of synthetic materials in different stages of loading and hydraulic gradients. Special tests were performed on the same equipment for the evaluation of the moisture reduction in the iron ore, which consisted of applying vacuum using a pump at the bottom of the specimen. The results presented show that the use of geosynthetics combined with a vacuum of approximately 100 kPa reduced the moisture content of iron ore at 40% of initial moisture content of the specimen.

Studies to evaluate the abrasive wear of synthetic materials in contact with the iron ore were also performed, simulating the condition that the ore will be subjected in the wagons. In addition, drying column tests and lysimeter were conducted instrumented with tensiometers, moisture meters and temperature gauges to monitor the drying process of iron ore.

With the results of a numerical simulation was performed using the software VADOSE / W (GEOSTUDIO International Ltda.), Varying the conditions of drainage or drainage systems in order to evaluate the efficiency in the process of moisture reduction of iron ore, both during transport and storage.

**Keywords:** iron ore, moisture content, geosynthetic, numerical analysis.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Considerações iniciais

A atividade mineira no Brasil tem posição de destaque no cenário mundial devido à quantidade e qualidade do minério de ferro que é produzido no país. Aliado a essa exposição mundial, vem ocorrendo significativo avanço científico e tecnológico em áreas do conhecimento relacionadas à mineração, principalmente na área geotécnica. Esses avanços são resultados da busca pela competitividade do produto no mercado internacional e pela sustentabilidade ambiental.

Devido ao tipo de processo de beneficiamento utilizado (peneiramento por via úmida), o minério de ferro extraído pela Companhia VALE S.A. em Carajás/PA possui umidade final elevada, o que torna o processo de comercialização oneroso, uma vez que a água absorvida pelo produto não agrega valor econômico. Diante disso, a redução da umidade adquirida durante os processos de estocagem e transporte até o porto de destino torna-se necessária.

A elevada umidade também compromete a estabilidade das pilhas de minério nos pátios de estocagem. Quando transportados pelos vagões dos trens, a água, ou pelo menos a parte que é drenada durante o percurso, carrega partículas que comprometem o lastro ferroviário, diminuindo sua vida útil e acarretando aumento no custo de manutenção.

O elevado índice pluviométrico é também um fator preponderante para a alta umidade do minério de ferro. Devido às constantes chuvas ocorridas no Terminal Marítimo de Ponta da Madeira, em São Luís/MA, o minério absorve mais água, a qual fica depositada nos compartimentos dos navios, acarretando aumento no custo de transporte e descarga no porto de destino.

Estudos recentes (ABRÃO *et al.*, 2001; MARINHO e PINTO, 2002; FERREIRA, 2009; GARDONI *et al.*, 2010) demonstraram que teores de umidade em torno de 9% ainda podem ser considerados elevados para o processo de estocagem e transporte do minério de ferro,

considerando a quantidade de material que é exportado por ano, em torno de 35 a 40 milhões de toneladas.

Dentro desse contexto, faz-se necessário um estudo adequado do comportamento deste minério de ferro com relação à sua capacidade de absorção e retenção de água. Uma vez conhecido este comportamento, medidas de engenharia poderão ser propostas, buscando solucionar o problema de umidade no minério de ferro durante a sua estocagem e transporte.

## **1.2. Objetivos**

A necessidade de avaliar as condições de umidade e, por consequência, as características de retenção de água em minério de ferro, está relacionada aos problemas de estocagem e transporte do material com elevada umidade. Diante disso, a seguir são apresentados os principais objetivos desta dissertação.

### **1.2.1. Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho é avaliar e estudar o comportamento de sistemas filtro-drenantes com a utilização de geossintéticos para a redução da umidade do minério de ferro “*sinter feed*” (SFCJ) do Complexo Minerador da Serra de Carajás, no Pará, pertencente à Companhia VALE S.A., buscando a redução nos custos de estocagem e transporte do material.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

Os objetivos específicos dos estudos realizados para avaliar os sistemas de drenagem com a utilização de geossintéticos foram:

- ✓ Avaliar a utilização de geossintéticos como dispositivos filtro-drenantes para o SFCJ de Carajás;

- ✓ Verificar a degradabilidade, com relação à resistência à abrasão, dos geossintéticos a serem utilizados como filtros/drenos no sistema de drenagem, avaliando quais os impactos resultantes do atrito entre o geossintético e o minério de ferro;
- ✓ Estudar a variação do teor de umidade do minério de ferro em diferentes condições de exposição, tais como: aplicação de vácuo, variação de temperatura e exposição à temperatura ambiente. Esses estudos foram realizados por meio de ensaios com coluna e lisímetros de laboratório instrumentados com tensiômetros, medidores de umidade e medidores de temperatura;
- ✓ Análise com a utilização do *software* VADOSE/W, que possibilitou simular computacionalmente os resultados obtidos nos ensaios de laboratório, bem como a sua aplicabilidade em diferentes condições de contorno;
- ✓ Avaliar condições de contorno em situações de campo, nos pátios de estocagem e vagões de transporte ferroviário, por meio de análise computacional, calibrado com os resultados de laboratório.

### **1.3. Estrutura da dissertação**

As atividades que subsidiaram o desenvolvimento da pesquisa e o cumprimento dos objetivos são descritos abaixo de maneira sucinta com o objetivo de auxiliar a leitura e a compreensão dos trabalhos realizados.

No Capítulo 1 foram apresentados os objetivos gerais e específicos da dissertação.

A revisão bibliográfica é apresentada no Capítulo 2 para esclarecimentos das propostas apresentadas nesta dissertação. São levantadas informações gerais acerca do assunto abordado, tais como: estudos já desenvolvidos acerca do minério de ferro SFCJ, aspectos gerais da mecânica dos solos não saturados, técnicas de medidas de umidade em solos, estudos com a utilização de geossintéticos como materiais dreno-filtrantes na mineração e comparação de alguns resultados já obtidos, além da análise computacional.

No Capítulo 3, a metodologia e os materiais ensaiados são apresentados. Neste capítulo, são discutidos também os procedimentos de calibração dos instrumentos (tensiômetros,

termopares e medidores de umidade) utilizados nos ensaios de coluna e lisímetro. Os ensaios de abrasão (Los Angeles e Amsler), realizados para a avaliação do desgaste abrasivo do geossintético, também são descritos neste capítulo.

Os resultados dos ensaios realizados são apresentados no Capítulo 4. Inicialmente são apresentadas as características geotécnicas do minério de ferro, os estudos da estabilidade interna e os ensaios de secagem com coluna e lisímetro instrumentados para a avaliação do teor de umidade. Os resultados dos ensaios de abrasão (Los Angeles e Amsler), realizados para a avaliação do desgaste abrasivo do geossintético, também são discutidos neste capítulo. Os resultados dos ensaios de filtração do tipo de razão entre gradientes (GR) realizados para avaliar a interface minério-geotêxtil são apresentados, bem como a avaliação e comentários acerca dos resultados obtidos. Os resultados dos ensaios especiais com aplicação de vácuo para a redução de umidade do minério de ferro são também apresentados e discutidos. Esses ensaios foram conduzidos com aplicação de vácuo na base do corpo de prova, moldado no mesmo equipamento utilizado para os ensaios de GR. Por fim, são apresentados os resultados obtidos com a análise computacional realizada com o auxílio do *software* VADOSE/W. Nesses resultados são apresentados os estudos realizados para diferentes condições de contorno, tanto para a condição de estocagem quanto para a condição de transporte por vagões.

Finalmente, no Capítulo 5 é feita uma avaliação geral das atividades e dos resultados obtidos nos estudos. Também são apresentadas sugestões de estudos para a continuidade da pesquisa nesta área e em áreas afins.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Introdução**

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica que amparou o desenvolvimento dos trabalhos. Inicia-se com uma breve descrição do processo de beneficiamento do minério de ferro, com exposição dos procedimentos de armazenamento e transporte. São apresentados, também, os estudos publicados sobre o minério de ferro “*sinter feed*” (SFCJ).

Os aspectos gerais da teoria de solos saturados e não saturados são apresentados como o embasamento teórico para as análises e resultados apresentados nos ensaios de secagem e de balanço hídrico, onde as condições climáticas e a presença ou não de dispositivos de drenagem podem influenciar os resultados esperados. Dessa maneira, são abordados alguns condicionantes que foram julgados importantes na avaliação do teor de umidade do minério de ferro, tais como fluxo interno e evaporação de água e pressão interna no solo.

São discutidos ensaios com geossintéticos e são descritas as contribuições já publicadas. Considerações a respeito do tipo e função dos geossintéticos também são apresentadas. Por fim, para a análise computacional, são apresentados alguns trabalhos já realizados com o *software* VADOSE/W (*Geostudio International Ltda.*).

### **2.2. Complexo minerador de Carajás**

O Complexo Minerador de Carajás (Figura 2.2), localizado na Serra dos Carajás, no município de Parauapebas, sudeste do Estado do Pará (Figura 2.1), engloba a operação de cinco cavas a céu aberto (N4E, N4W, N4WN, N5W e N5E), com bancadas de, aproximadamente, 15m de altura e a largura dos acessos de 35m. A lavra é realizada por 18 frentes simultâneas e o minério é transportado por caminhões “fora-de-estrada” de até 278 toneladas. A distância média de transporte praticada até as instalações de britagem é da

ordem de 2,7 km. Os materiais denominados estéreis são transportados por caminhões até as pilhas de estéril (MINÉRIOS & MINERALES, 2007).

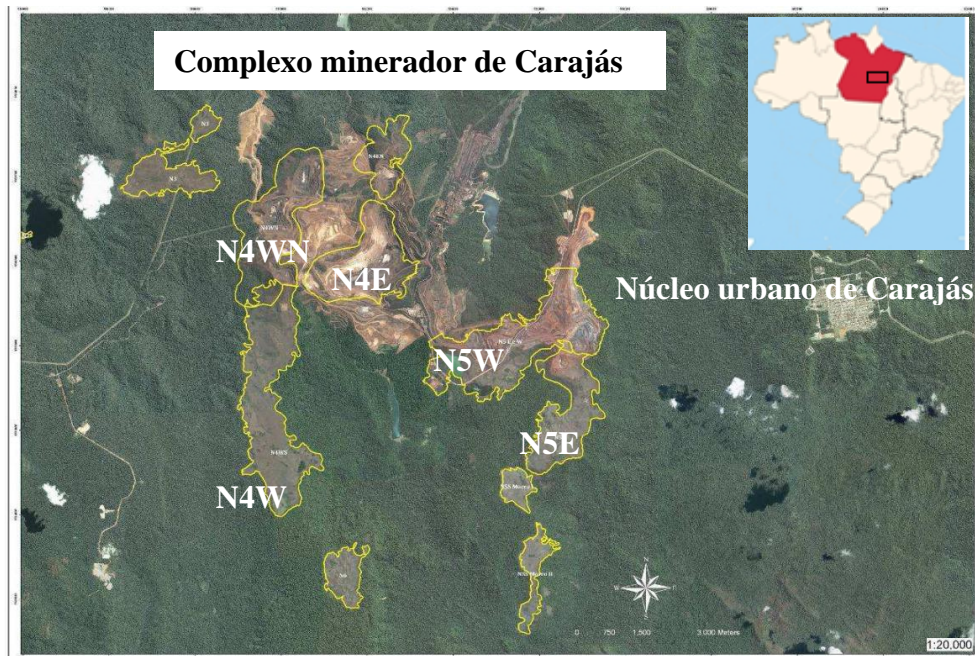


Figura 2.1 - Localização geográfica do complexo minerador de Carajás (SÁ, 2010 - modificado)



Figura 2.2 - Mina de Carajás

Segundo Atzingen *et al.* (2007), o clima em Carajás é tropical úmido nas áreas baixas revestidas pela floresta, mas nos platôs da Serra Norte há períodos do ano com clima muito seco. A pluviosidade anual é elevada, com a média anual, em onze anos, de 2.236 mm, variando de 382 mm em março, o mês mais chuvoso, a 26 mm, em agosto, o mais seco. Durante o dia, a temperatura eleva-se a 28°C e a noite ou ao amanhecer desce a 20°C nos platôs, sendo a temperatura média anual de 24°C.

O alto teor de ferro do minério beneficiado em Carajás, alcançando valores de 66% (Tabela 2.1), é responsável por considerável redução dos custos de beneficiamento do produto. O processo consiste basicamente em operações de britagem, peneiramento, ciclonagem, desaguamento, moagem e filtragem.

Tabela 2.1 - Dados da análise química do SFCJ fornecidos pela VALE em NOV/2008

Análise Química SFCJ	(%)
Fe	66,100
SiO <sub>2</sub>	1,400
P	0,034
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,260
Mn	0,570
CaO	0,016
MgO	0,036
TiO <sub>2</sub>	0,076
K <sub>2</sub> O	0,010
PPC	1,890
<b>Total</b>	<b>100,00</b>

Na Figura 2.3 é apresentado um fluxograma simplificado do processo de beneficiamento do minério de ferro na mina de Carajás.

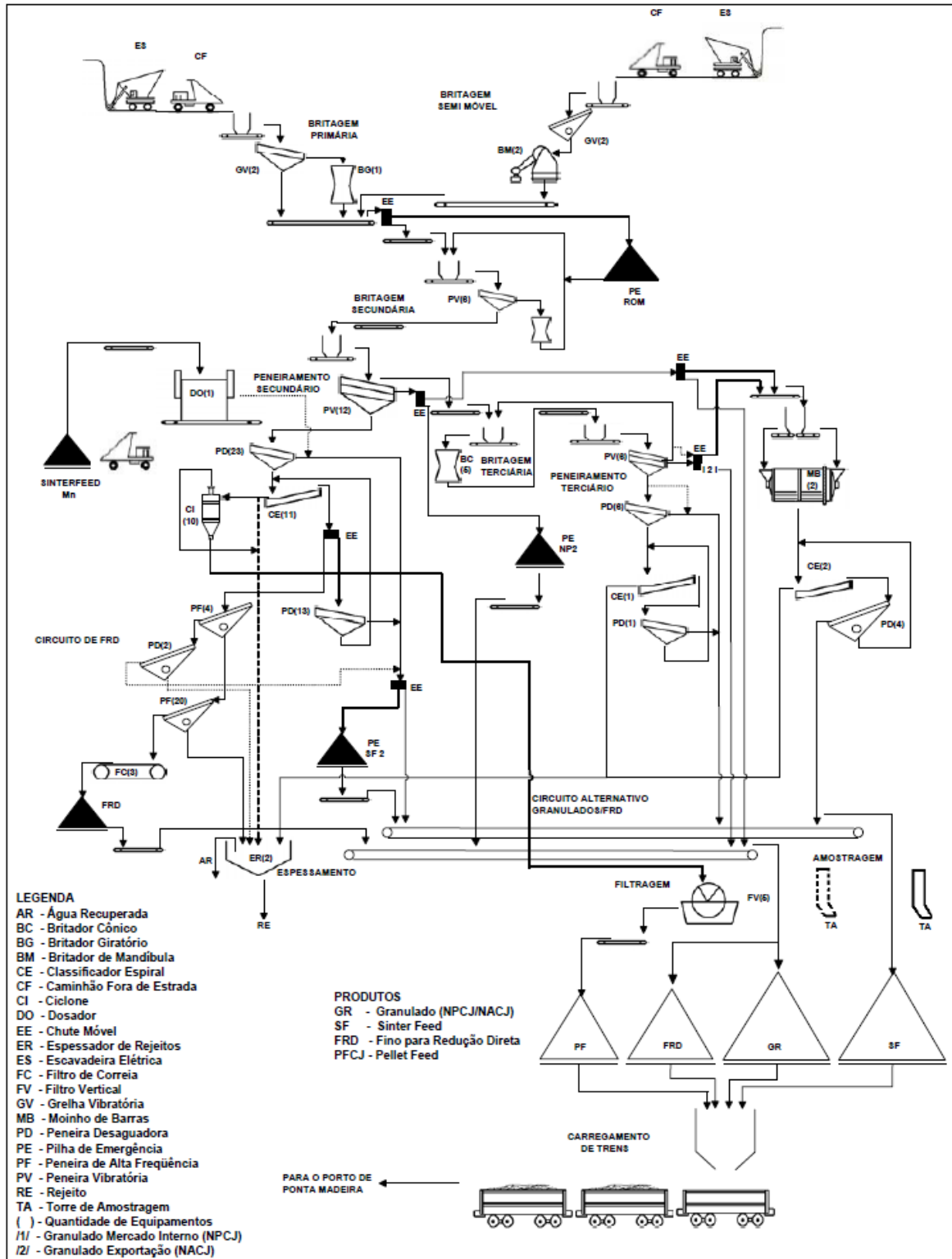


Figura 2.3 - Fluxograma simplificado do processo de beneficiamento do minério de ferro (SAMPAIO et al., 2001)

A seguir estão descritos os produtos beneficiados em Carajás e na Figura 2.4 são apresentadas as curvas granulométricas típicas desses produtos.

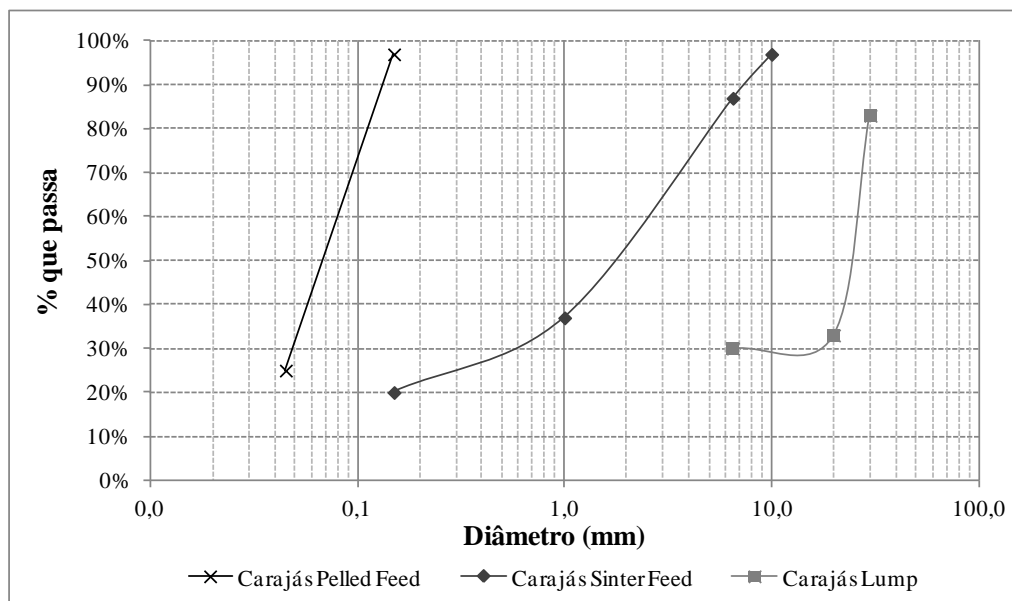


Figura 2.4 - Granulometria do minério produzido em Carajás (UFMG, 2009)

### 2.2.1. Granulado ou lump

Possui maior valor de mercado devido a sua maior granulometria. É um produto utilizado diretamente nos altos-fornos, após um peneiramento simplificado realizado apenas para a separação da parte grosseira.

### 2.2.2. Sinter feed (SFCJ)

É o produto de minério de ferro mais comercializado atualmente. É resultado de um processo de britagem que resulta em um material com maior teor de ferro. O processo seguinte, sinterização, tem como objetivo aglomerar as partículas mais finas de minério na presença de combustível sólido (coque ou carvão) e ligantes (calcário e cal). Esse processo possibilita a alimentação dos altos-fornos com um produto mais concentrado.

Apesar de ser o material mais comercializado atualmente, o *SFCJ* (Figura 2.5) possui elevada umidade, principalmente devido ao processo de beneficiamento do minério, que é realizado por via úmida. Dessa maneira, por se tratar do material mais comercializado atualmente pela VALE S.A., o *SFCJ* será o material utilizado na pesquisa para a realização dos ensaios que serão descritos e apresentados no Capítulo 3.



Figura 2.5 - *Sinter Feed (SFCJ)*

### 2.2.3. *Pellet feed*

O *pellet feed* (Figura 2.6) é a matéria-prima portadora de ferro que é adicionada a outros produtos para aglomeração de finos e, posteriormente, queimada em fornos a altas temperaturas. É o mais fino dos produtos de minério de ferro e o mais barato. Seu baixo preço em relação ao *lump* e ao *sinter feed* se deve à necessidade do material passar por um processo de pelotização para sua aplicação pela indústria siderúrgica.



Figura 2.6 - *Pellet Feed*

Depois de beneficiados, os produtos são estocados por meio de empilhadeiras móveis em pátios com capacidade para três milhões de toneladas. O carregamento dos trens da Estrada de Ferro Carajás é realizado por recuperadoras de roda de caçamba e correias transportadoras (Figura 2.7). Esse sistema permite o carregamento contínuo e simultâneo de duas composições ferroviárias, formada por até três locomotivas e 208 vagões de minério. Cada trem transporta por viagem 21.500 t de minério de ferro. A produção é transportada pela Estrada de Ferro Carajás, com 892 km de extensão, que atravessa a Amazônia Oriental Paraense e o oeste do Maranhão e tem como destino o Terminal Marítimo de Ponta da Madeira, situado em São Luís, capital maranhense, de onde os diversos produtos são exportados para todo o mundo. (MINÉRIOS & MINERALES, 2007).



Figura 2.7 - Correia transportadora de minério

### 2.3. Umidade em minério de ferro

Considerado como um dos melhores minérios de ferro do mundo, o produto final produzido em Carajás possui umidade elevada quando comparado com outros minérios, devido, principalmente, ao processo de peneiramento por via úmida que é realizado. De acordo com Abrão *et al.* (2001), o minério de ferro da província de Carajás tem umidade de formação da ordem de 9 a 11%, devido ao processo de beneficiamento a úmido. Ferreira (2009) relata, para o *sinter feed*, umidade da ordem de 12% em pilhas de minério com aproximadamente 20 metros de altura.

O minério de ferro de Carajás é obtido por via úmida e armazenado em pilhas após o primeiro beneficiamento, onde fica estocado, recebendo diretamente em sua superfície a água proveniente de chuvas, o que pode ocasionar o aumento da umidade do material. Conforme pode ser observado na Figura 2.8, a drenagem das pilhas é livre.



Figura 2.8 - Pátios de estocagem de minério de ferro

Apesar da qualidade do mineral ser o fator determinante da viabilidade econômica da extração do minério de ferro, os custos logísticos, tanto de estocagem quanto de transporte,

podem ser considerados, também, condicionantes para a comercialização do produto. O transporte representa grande parcela do custo final de produção do mineral, representando um item de grande importância na viabilidade de exploração comercial.

A água presente no minério de ferro, logo após a sua concentração, e aquela proveniente das chuvas que atingem e infiltram-se no mesmo não agregam valor ao material. Ao contrário, cria dificuldades operacionais de manuseio e gera custos adicionais, podendo ser citado, como exemplo, o aumento do custo com o transporte (ABRÃO, 2005).

Após o processo de estocagem em pilha, o minério de ferro é colocado em vagões e transportado ao Porto Ponta da Madeira/São Luís, de onde seguirá em navios ao destino final. Durante o transporte ferroviário, o material ainda permanece exposto às condições climáticas e a drenagem da água é livre. Além da perda do material fino que escorre com a água drenada livremente, esse carregamento causa danos ao lastro ferroviário. Na Figura 2.9 é apresentado o embarque do minério nos vagões de trem.



Figura 2.9 - Embarque do minério de ferro em vagões

Além da contaminação do lastro ferroviário por partículas finas, devido à elevada umidade do minério de ferro, a operação de descarga do material se torna difícil. O equipamento de descarga derrama uma polpa formada por água e minério sobre o piso das instalações do porto (ABRÃO *et al.*, 2001).

Para Marinho e Pinto (2002), a necessidade de investigar a retenção de água no minério de ferro está relacionada à logística do transporte e carregamento do minério desde o pátio de estocagem até o embarque nos portos. Diante disso, desenvolveram estudos para definir a quantidade de água considerada adequada para o embarque de minério de ferro em navios. Esses estudos concluíram que a água incorporada no minério de ferro pouco antes da transferência é a “água livre” dentro do navio.

Abrão e Marinho (2004) apresentam resultados importantes com relação ao sistema de drenagem de pilhas de minério de ferro tendo em vista a redução do teor de umidade durante o período de estocagem. Nos estudos realizados, o teor de umidade médio na pilha de minério, na ausência de sistema de drenagem, apresentou-se 0,5% superior ao teor de umidade em pilha semelhante dotada de sistema de drenagem. Esta pequena diferença pode se tornar significativa quando se leva em conta os grandes volumes de minério de ferro que são geralmente produzidos.

Estudos relacionados ao comportamento da água presente no minério de ferro nas etapas de produção, estocagem em pátios e transporte em vagões de trem e porões de navio até o porto de destino são apresentados por Abrão *et al.* (2001). Por meio de simulações numéricas, realizadas com o auxílio do *software* HYDRUS 1D, foi estudado o comportamento da umidade média em pilhas de minério em pátio de estocagem dotados de sistema de drenagem. Foi observada rápida redução da umidade média em pilhas nos cinco primeiros dias, estabilizando-se depois deste período. De acordo com Ferreira (2009), após um período de três dias de estocagem, a umidade do minério da província de Carajás tende a baixar de 12% para 10%.

Abrão (2005) aborda o comportamento da água no *sinter feed* nas etapas de estocagem em pilhas, nos pátios de Carajás, e de transporte em porões de navio até os portos de destino.

Para esses estudos foram utilizados ensaios de laboratório, testes de campo e modelagem computacional com o auxílio do *software* HYDRUS 1D na análise do fluxo de água de maneira unidimensional em meios não saturados. Os resultados demonstraram a importância de um eficiente sistema de drenagem para redução da umidade do minério de ferro, principalmente durante o transporte com navios.

Com relação ao preço comercial de exportação, Ferreira (2009) considera que a umidade em torno de 9% ainda seja muito elevada quando considerada a quantidade de minério de ferro que é exportada. Esse excesso de umidade aumenta significativamente o custo de transporte do produto.

Abrão *et al.* (2001) conclui que quando a umidade de embarque é da ordem de 9% chega a ser necessário o bombeamento de 25% da água presente nos porões dos navios para otimização do transporte.

Buscando alternativas para reduzir a umidade do minério de ferro durante o transporte ferroviário, furos nas laterais e no fundo dos vagões (Figura 2.10) foram feitos pela Companhia VALE S.A. No entanto, tal procedimento não vem apresentando resultados eficientes, principalmente pelo fato de não haver controle do material que é carregado juntamente com a água drenada.

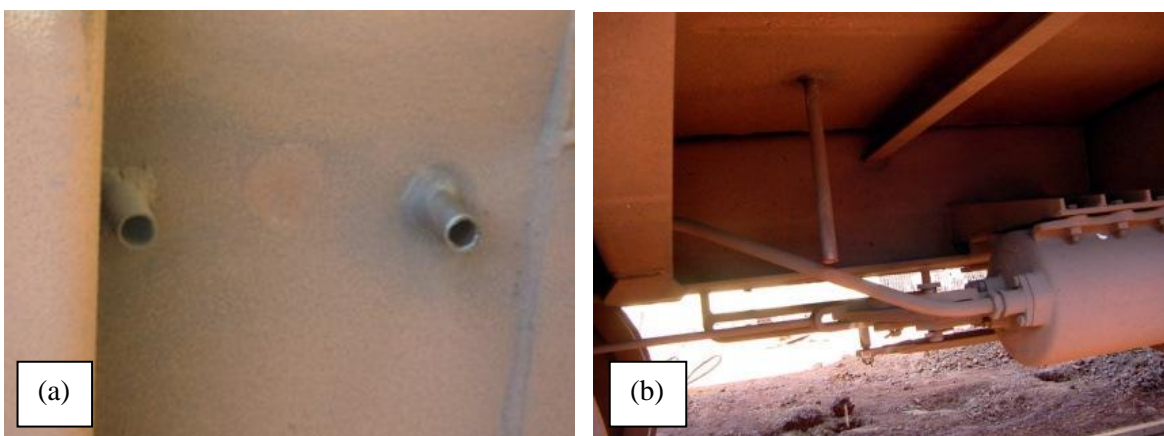


Figura 2.10 - (a) Furos nas laterais do vagão; (b) furo na parte inferior do vagão (FERREIRA, 2009)

Uma alternativa que vem sendo implementada pela Companhia VALE S.A. é a utilização de drenos de poliuretano (Figura 2.11), com dimensões de 275x145x35 mm (comprimento, largura e espessura, respectivamente), que são instalados no fundo dos vagões. A principal função desse material é a drenagem da água acumulada no minério durante o processo de beneficiamento e durante o transporte de trem até o porto em São Luís/MA. No entanto, assim como na alternativa dos furos nas laterais e no fundo dos vagões, esse sistema de drenagem não possibilita que o material passante pelas aberturas dos drenos seja filtrado, comprometendo o lastro ferroviário e as condições ambientais durante o transporte do minério de ferro.



Figura 2.11 - Dreno de poliuretano utilizado pela VALE S.A. para drenagem dos vagões (VALE, 2003)

Na tentativa de minimizar a quantidade de material passante pelo dreno de poliuretano, lançado diretamente no lastro ferroviário e meio ambiente, caixas coletoras foram instaladas na região inferior do vagão (área de instalação do dreno), conforme pode ser observado na Figura 2.12.

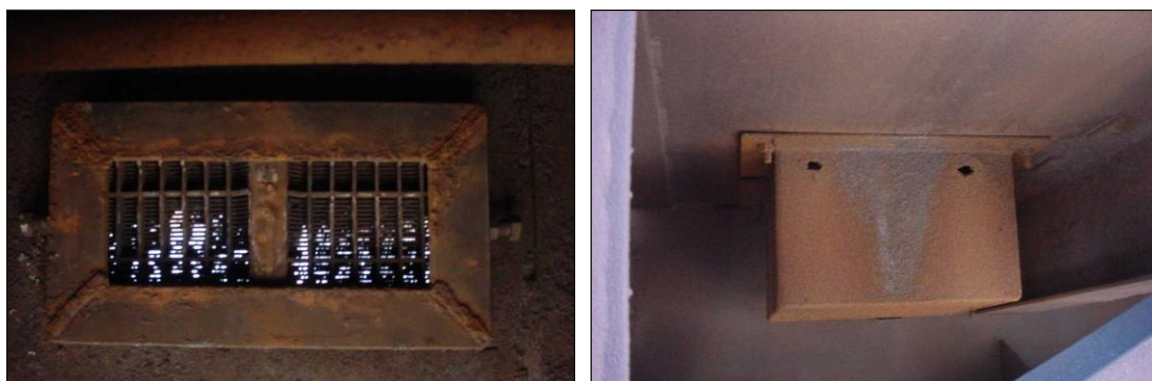


Figura 2.12 - Vista inferior do dreno de poliuretano utilizado nos vagões (VALE, 2003)

Apesar de apresentar boas condições de drenagem, o dreno de poliuretano utilizado demonstrou-se inadequado para a retenção de partículas finas, conforme mostrado na Figura 2.13. A quantidade de material retirada da caixa coletora não demonstra a real condição de coleta do minério de ferro passante pelo dreno, pois, durante ao processo de descarga do vagão, uma parcela desse material é escoada. No entanto, mesmo após esta perda, cerca de 20% do volume da caixa coletora (aproximadamente 7,3 kg de minério de ferro) permanece preenchido com o minério de ferro passante pelo dreno de poliuretano.



Figura 2.13 - Minério de ferro retirado da caixa coletora instalado na região inferior do dreno (VALE, 2003)

#### **2.4. Estabilidade interna do minério de ferro**

De acordo com Muñoz (2005), a estabilidade interna do solo a ser filtrado, comumente denominado solo base, possui papel fundamental no desempenho de um filtro, pois as forças de percolação atuantes devido ao fluxo podem gerar movimentos seletivos das partículas modificando sua estrutura e podendo ocasionar obstrução do filtro ou até mesmo colapso do solo. Estas modificações da estrutura do solo podem ser vantajosas para o funcionamento do sistema solo/geotêxtil se houver a formação de pré-filtro, constituído por uma formação reticulada em arco de partículas. Entretanto, as alterações podem ocasionar o colapso da estrutura se houver erosão excessiva sem retenção das partículas de solo pelo geotêxtil ou pode ocorrer ainda a colmatação do filtro, ocasionando perda da capacidade de fluxo do sistema.

No minério de ferro, a presença de uma sequência de partículas finas, resultantes do processo de beneficiamento do material, pode determinar uma curva granulométrica côncava, indicando um material potencialmente instável. Beirigo (2005) apresenta resultados de amostras de rejeito de mineração em condições de instabilidade interna, classificadas de acordo com as propostas de Sherard (1979), Kenney e Lau (1985) e Lafleur *et al.* (1989).

A primeira metodologia, proposta por Sherard (1979), sugere que a estabilidade interna dos solos seja avaliada por meio da subdivisão da curva granulométrica total do solo em duas frações. Em seguida elas são comparadas de acordo com um determinado critério de filtração, tratando-as como diferentes materiais, conforme pode ser observado no gráfico da Figura 2.14. Nessa metodologia, a curva granulométrica do solo é dividida em diversas combinações de duas frações e a estabilidade interna do material é avaliada de acordo com o critério de filtro apresentado na EQ. 2.1. Se as combinações forem aprovadas pelo critério de filtro, o material é considerado estável.

$$\frac{D_{15g}}{d_{85f}} < 5 \quad (2.1)$$

Em que:  $D_{15g}$  corresponde ao diâmetro por meio do qual passam 15% das partículas da fração mais grossa da combinação (mm) e  $d_{85f}$  corresponde ao diâmetro por meio do qual passam 85% das partículas da fração mais fina da combinação (mm).

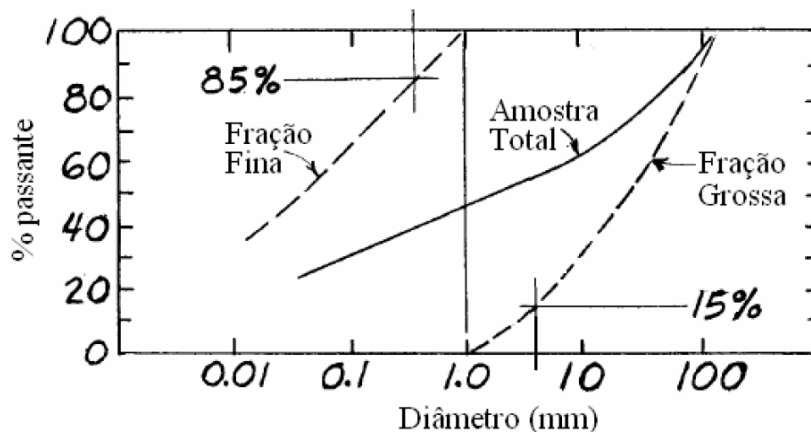


Figura 2.14 - Metodologia de análise da estabilidade interna proposta por Sherard (1979) (BEIRIGO, 2009)

Na segunda metodologia, proposta por Kenney e Lau (1985), o termo estabilidade interna refere-se à capacidade que o material granular possui de prevenir a perda de suas próprias partículas finas, provocada pela ação de agentes perturbadores, como vibração e/ou percolação. Um solo pode ser considerado com uma granulometria estável se não houver carreamento excessivo de suas partículas. A partir disso, é proposta a descrição da forma da curva granulométrica e avaliado o potencial do solo à instabilidade interna.

De acordo com Kenney e Lau (1985), para um solo possuir estrutura instável, é necessário atender a três condições:

- ✓ O material granular compactado deve possuir uma estrutura primária de partículas a qual suporta forças impostas. Essas partículas podem ser consideradas como sendo fixas em suas posições;
- ✓ No interior dos poros dessa estrutura primária devem existir partículas soltas, que podem ser carreadas devido às forças de percolação;
- ✓ O tamanho das constrições devem ser maiores que certa quantidade de partículas soltas, possibilitando que essas partículas sejam removidas.

A Figura 2.15 apresenta a metodologia proposta por Kenney e Lau (1985). No diagrama à esquerda, são indicados os eixos das ordenadas, correspondente à fração  $F$  da massa de partículas menores que o diâmetro  $D$ , e das abscissas, correspondente aos diâmetros  $D$  das partículas em escala logarítmica. A curva granulométrica do material é plotada neste diagrama, seguida da identificação de um par aleatório de valores de  $D$  e  $F_1$  correspondentes. A partir deste par de valores iniciais, é determinado outro par de valores correspondentes,  $4D$  e  $F_2$ . No diagrama localizado à direita, com eixo de abscissas equivalente à fração da massa entre  $4D$  e  $F_2$ , denominada  $H$ , e ordenadas equivalente à  $F$ , os valores de  $F_1$  e da diferença entre  $F_1$  e  $F_2$  são plotados como um ponto, em que  $F$  equivale à  $F_1$  e  $H$  equivale a  $(F_2 - F_1)$ . Este procedimento é repetido até se estabelecer a forma da curva  $H \times F$ . A reta  $H + F = 1$  limita a curva  $H \times F$  e a reta  $H = 1,3.F$  separa os materiais estáveis daqueles de granulometrias instáveis internamente (BEIRIGO, 2005).

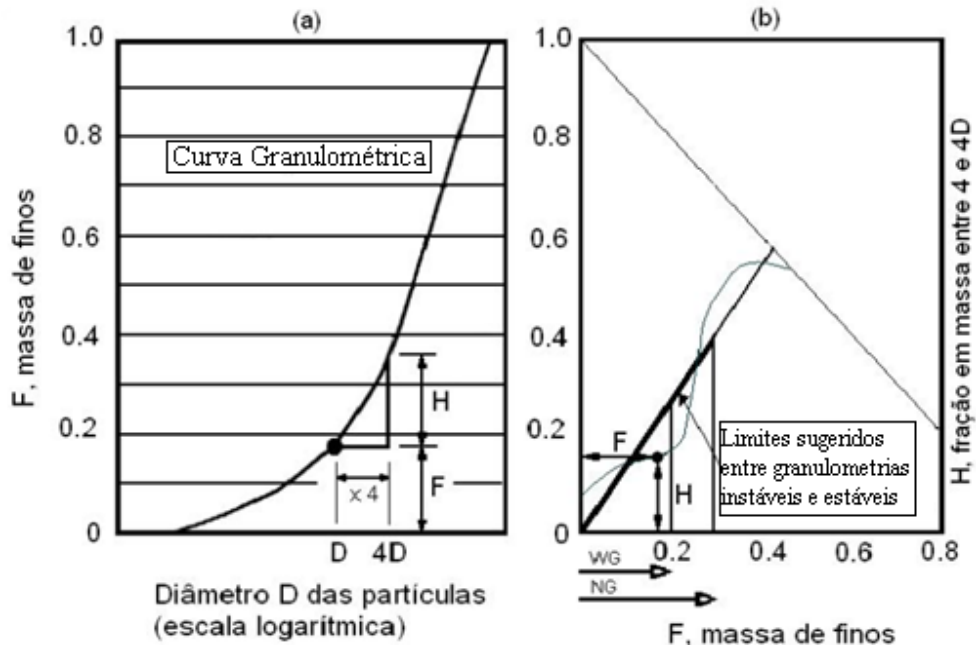


Figura 2.15 - Método de análise do formato das curvas granulométricas proposta por Kenney e Lau (1985) (MUÑOZ, 2005)

A última metodologia, proposta por Lafleur *et al.* (1989), pressupõe que os solos internamente instáveis são propícios de se auto-colmatarem, ocasionando a obstrução dos próprios vazios de maneira que dificulte a passagem do fluxo. Na avaliação desse fenômeno, por meio de estudos de filtração, foram verificados comportamentos distintos de solos caracterizados por três diferentes tipos de curvas granulométricas: linear, concavidade voltada para cima e descontínua (Figura 2.16). Concluiu-se que os materiais que tinham a curva granulométrica côncava para cima apresentaram maior potencial para a instabilidade interna, sendo as curvas lineares consideradas estáveis e as curvas descontínuas estáveis ou não.

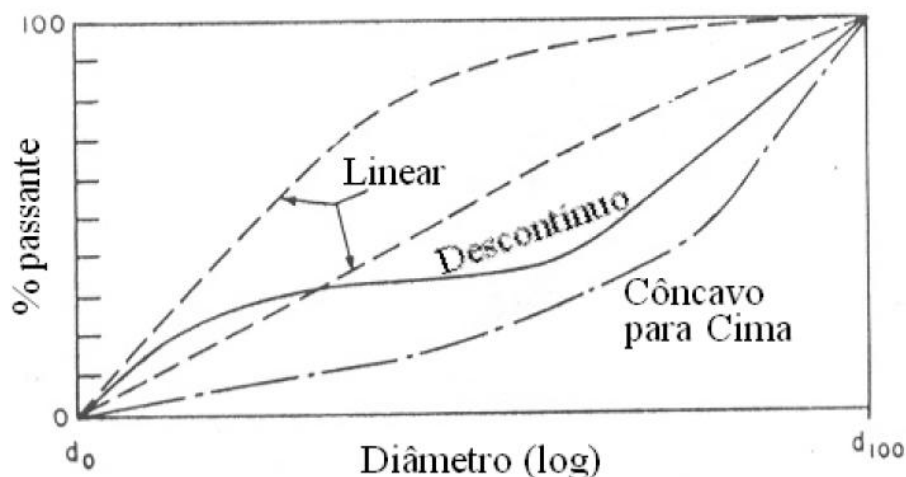


Figura 2.16 - Curvas típicas para avaliação do potencial a instabilidade interna dos solos proposta por Lafleur *et al.* (1989) (BEIRIGO, 2005)

## 2.5. Solos não saturados

Estados secos (0% de saturação) e completamente saturados são as duas condições extremas de um solo. No entanto, há na prática, diversos materiais que não sustentam os conceitos definidos na mecânica dos solos saturados. Em várias áreas da geotecnia, observa-se que o material não se encontra em condições de saturação total, não sendo viável, portanto, a aplicação das teorias de comportamento de solos saturados.

Para Fredlund e Rahardjo (1993), várias propriedades geotécnicas do solo estão relacionadas com a condição não saturada do mesmo. O coeficiente de permeabilidade de um solo, por exemplo, pode variar de acordo com o seu grau de saturação. Outro exemplo é a resistência ao cisalhamento que, dependendo do grau de saturação, poderá apresentar maior ou menor resistência devido a poro-pressão existente no solo que, para condições não saturadas, será negativa.

### 2.5.1. Definição e características

O solo não saturado geralmente é compreendido por um sistema trifásico, constituído por: uma fase sólida, onde estão presentes as partículas minerais; uma fase líquida, em geral, a água; e por uma fase gasosa, geralmente ar (LAMBE e WHITMAN, 1969).

Fredlund e Rahardjo (1993) fazem referência ao fato do ar se tornar muito compressível, quando se apresenta de forma oclusa no fluido. A presença destas três fases definidas cria uma contínua interação entre elas. Esta influência, seja em água adsorvida na partícula sólida, seja em ar dissolvido na água, pode explicar a complexidade de representação numérica do comportamento dos solos não saturados.

Devido à dinâmica das relações entre as fases, Fredlund *et al.* (1978) definem a interação ar-água como sendo a responsável pelo surgimento de uma quarta fase, a *membrana contrátil* ou *película contrátil*, que está associada às sucções matriciais.

A Figura 2.17 apresenta, esquematicamente, o maciço de solo com as quatro fases propostas por Fredlund *et al.* (1978).

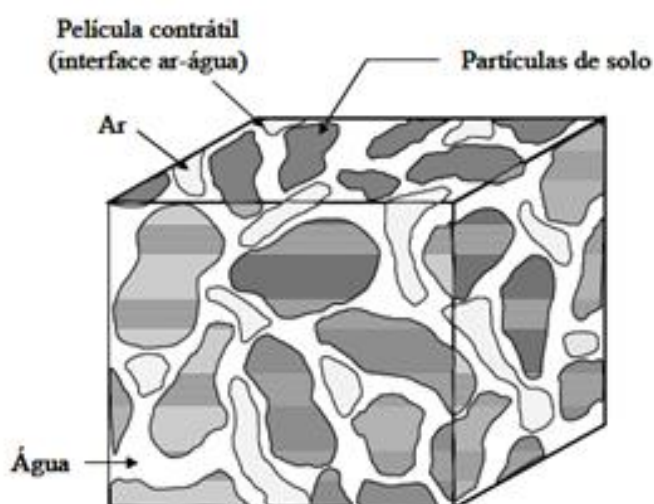


Figura 2.17 - Elemento de solo não saturado em quatro fases (Fredlund *et al.*, 1978)

A fase sólida é caracterizada pela textura dos grãos, proporcionada pela distribuição de partículas de areia, silte e/ou argila, e pela sua estrutura, composta pelo arranjo das diversas partículas e os efeitos de cimentação.

A fase líquida é constituída por água, seja ela pura ou contendo minerais e matérias orgânicas dissolvidas. Para a condição de saturação do solo, a água ocupa todos os vazios e no caso do solo se encontrar não saturado, a fase líquida ocupará apenas alguns espaços, não ocorrendo, neste caso, a saturação. A fase gasosa, composta por ar com composição

variável, dependendo do caso, ocupa o espaço vazio deixado pela fase líquida ou dissolvido na água.

A *película contrátil* apresenta-se desenvolvendo uma importante função quando o ar no solo está interconectado. Em termos de relação massa-volume, a membrana contrátil pode ser considerada como parte da fase líquida sem acrescentar erros significativos. Neste caso, o solo não saturado é considerado como um sistema trifásico. No caso da fase gasosa consistir de ar ocluso, ou seja, a fase gasosa não é mais contínua, o solo não saturado pode ser considerado como um sistema bifásico, assumindo-se que um fluido compressível preenche os poros (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

#### 2.5.2. Quantidade de água nos solos

Na mecânica dos solos os índices físicos que são utilizados para a determinação da quantidade de água em um solo são:

##### 2.5.2.1 Umidade gravimétrica ( $w$ )

A umidade gravimétrica de uma amostra de solo é a relação entre a massa da água e a massa dos sólidos nela contido, conforme apresentado na EQ. 2.2:

$$w = \frac{M_w}{M_s} \quad (2.2)$$

Em que:  $w$  = umidade gravimétrica (%);  $M_w$  = massa de água (g);  $M_s$  = massa de sólidos (g).

##### 2.5.2.2 Umidade volumétrica ( $\theta$ )

A umidade volumétrica é a relação entre o volume de água numa amostra do solo e o volume total da amostra, conforme apresentado na EQ. 2.3:

$$\theta = \frac{V_w}{V_T} \quad (2.3)$$

Onde:  $\theta$  = umidade volumétrica (%);  $V_w$  = volume de água;  $V_T$  = volume total.

### 2.5.3. Retenção de água nos solos

A estrutura do solo é constituída por um conjunto de partículas com diversos tamanhos e formas, intercalados poros, também de tamanhos variados, interconectados. Dessa maneira, pode-se dizer que o solo é composto por uma parte sólida (partículas ou matriz do solo) e uma parte de espaço vazio (poros do solo), conforme apresentado na Figura 2.18.

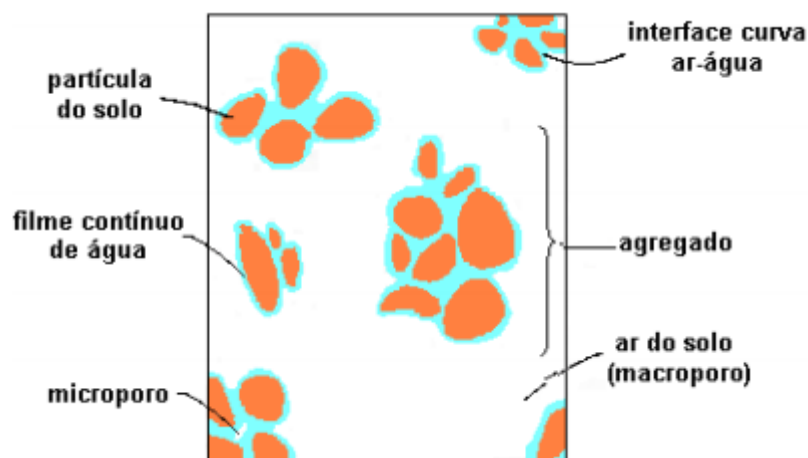


Figura 2.18 - Retenção da água por agregados do solo após a drenagem (LIBARDI, 2005)

De acordo com Libardi (2005), dois processos explicam o fenômeno de retenção de água num solo não saturado. No primeiro, a retenção ocorre nos chamados poros capilares do solo (fenômeno da capilaridade), o qual está sempre associado a uma interface curva água-ar. No entanto, o solo não possui uma estrutura tubular única, mas sim uma composição irregular de tubos capilares e poros formados pelas suas partículas sólidas.

No segundo processo, a retenção ocorre nas superfícies dos sólidos do solo, caracterizando o processo de adsorção. Ainda de acordo com Libardi (2005), três são os mecanismos principais propostos para explicar este fenômeno da água sobre as superfícies sólidas, conforme apresentado a seguir:

- ✓ A superfície dos minerais de argila é coberta com átomos de oxigênio e grupos oxidrilas negativamente carregados devido à substituição isomorfa de cátions. Dessa maneira, cria-se ao redor das partículas desses minerais um campo elétrico

cuja intensidade decresce com a distância da superfície da partícula. Devido à natureza bipolar das moléculas de água, elas se orientam neste campo elétrico e sofrem uma força na direção da superfície da partícula, a qual decresce gradualmente com a distância desta superfície, até se tornar nula num ponto em que não há mais influência do campo elétrico;

- ✓ Os pares de elétrons não compartilhados do átomo de oxigênio das moléculas de água podem ser eletricamente atraídos a cátions trocáveis que podem estar adsorvidos sobre a superfície da argila, ou seja, os cátions que são retidos à superfície negativamente carregada de argila (a concentração iônica é crescente na direção da superfície sólida) ocasionam também a adsorção das moléculas de água;
- ✓ Finalmente, as moléculas de água podem ainda ser atraídas às superfícies sólidas pelas forças de van der Waals que são forças de curto alcance que decrescem rapidamente com a distância da superfície, de modo que uma camada muito fina é adsorvida desta maneira ao redor das partículas de solo.

#### 2.5.4. Tensão superficial

A interface ar-água (película contráctil) possui uma propriedade conhecida como tensão superficial. O fenômeno da tensão superficial resulta de forças intermoleculares agindo nas moléculas da película contráctil. Essas forças são diferentes daquelas que agem nas moléculas no interior da água, conforme apresentado na Figura 2.19.

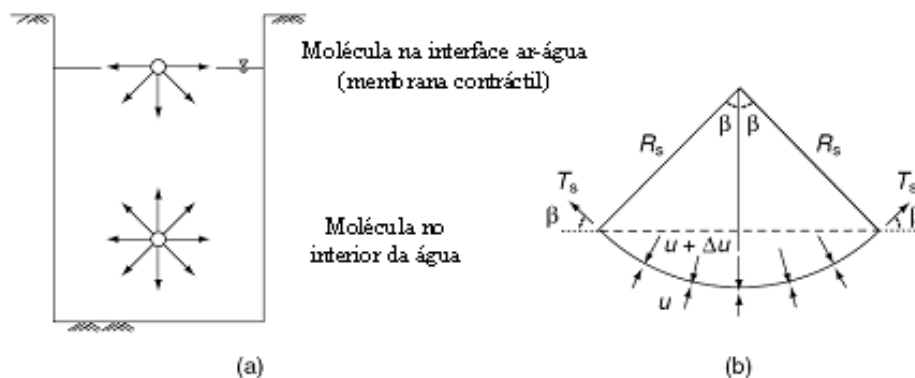


Figura 2.19 - Tensão superficial na interface ar-água. (a) Forças intermoleculares na película contráctil e água; (b) Pressões e tensão superficial agindo em uma superfície curva bidimensional (FREDLUND e RAHARDJO, 1993)

As moléculas que se encontram no interior da água receberão tensões iguais em todas as direções, o que significa que não há desequilíbrio de forças. Já as moléculas que se encontram na película contráctil estão sujeitas a diferentes tensões. Para que ocorra o equilíbrio de tensões da membrana contráctil, uma tensão de tração é gerada ao longo da superfície da mesma. Essa propriedade da membrana contráctil gerar o equilíbrio de tensões é denominada *tensão superficial*.

A tensão superficial resulta da existência de forças de atração de curto alcance entre as moléculas do líquido, chamadas forças moleculares de *van der Waals* de coesão, forças moleculares de coesão ou simplesmente forças de coesão. Além disso, pela ação dessas forças, a superfície do líquido se contrai, minimizando sua área, e adquire uma energia potencial extra que se opõe a qualquer tentativa de distendê-la, ou seja, ocorrendo uma distensão, a tendência da superfície é sempre voltar à posição original. Em outras palavras, devido a essas forças, a superfície do líquido se torna *contrátil*. Essa energia potencial extra adquirida pela superfície do líquido, devido às forças moleculares de coesão é denominada energia potencial superficial (LIBARDI, 2005).

A tensão superficial faz com que a película contráctil tenha um comportamento de uma membrana elástica. Esse comportamento é semelhante a um balão inflado que possui uma pressão, no interior, maior do que a pressão externa. Se uma membrana flexível de duas dimensões é submetida a pressões diferentes em cada lado, a membrana deve assumir uma curvatura côncava no sentido da maior pressão e deve exercer uma tensão na membrana, a fim de permanecer em equilíbrio (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

#### 2.5.5. Capilaridade

A capilaridade, segundo Cavalcante (2006), pode ser definida como a ascensão da água acima do nível freático do terreno, através dos espaços intersticiais do solo, em um movimento contrário à gravidade. Cavalcante (2006) ainda relata a importância dos fenômenos capilares em diversas situações, entre as quais se pode destacar a coesão aparente da areia úmida.

De acordo com Holtz e Kovacs (1981) a capilaridade nos solos ocorre entre as superfícies de água, grãos minerais e ar, ocasionada pelo fenômeno da tensão superficial.

## **2.6. Potencial da água no solo**

A diferença entre os níveis de energia de um local para outro determina a direção e a taxa de movimento da água no solo. Potencial total da água no solo é definido como o trabalho realizado para levar, reversível e isotermicamente, uma quantidade infinitesimal de água pura, desde um ponto situado a uma altura conhecida, sob condição atmosférica, até um ponto considerado da água do solo (JUCÁ, 1990).

Na EQ 2.4 é apresentado o potencial total da água no solo, cujos componentes são: o potencial gravitacional, o potencial osmótico, o potencial de pressão e o potencial matricial.

$$P_t = P_g + P_{OS} + P_p + P_m \quad (2.4)$$

Em que:  $P_t$  é o potencial total;  $P_g$  é o potencial gravitacional;  $P_{OS}$  é o potencial osmótico;  $P_p$  é o potencial de pressão;  $P_m$  é o potencial matricial.

### **2.6.1. Potencial gravitacional ( $P_g$ )**

Considerando apenas o campo gravitacional, a água tem uma energia potencial gravitacional que depende da posição na qual ela se encontra em relação a um dado plano referencial (REICHARDT,1987). O potencial gravitacional tem valor zero no plano de referência, é positivo acima dele e negativo abaixo dele. O plano de referência é o estado-padrão para a gravidade e o plano mais comumente escolhido é a superfície do solo.

### 2.6.2. Potencial de pressão ( $P_p$ )

O potencial de pressão é medido em relação à condição padrão, tomado como sendo a da água submetida à pressão atmosférica local e, nestas condições, admite-se que o potencial de pressão seja igual à zero. O potencial de pressão considera somente pressões manométricas positivas (acima da pressão atmosférica), portanto, este componente só existirá se existir água livre exercendo carga hidráulica sobre solo saturado (REICHARDT,1987). Quando o solo estiver na condição não saturada, o potencial mátrico passará a atuar no lugar do potencial de pressão.

### 2.6.3. Potencial osmótico ( $P_{os}$ )

O potencial osmótico surge em função da diferença de composição entre a água do solo (presença de sais minerais e substâncias orgânicas) e a água pura. Esta diferença de composição só causará movimento de água pura quando o sistema estiver “separado” por uma membrana semipermeável. Membrana semipermeável é aquela que só permite passagem de solvente (no caso a água pura), não deixando passar o soluto. Como no solo, de uma maneira geral, não existem membranas semipermeáveis, qualquer diferença de potencial osmótico que se estabeleça provoca um movimento de solutos (que se redistribuem) e um movimento desprezível de água (REICHARDT,1987).

### 2.6.4. Potencial matricial ou mátrico ( $P_m$ )

O potencial mátrico é resultante tanto do efeito da capilaridade quanto do efeito de adsorção que surgem da interação entre as partículas sólidas e a água do solo. Quando o solo se encontra na condição saturada, a componente matricial é nula. À medida que o solo vai se tornando não saturado, o efeito da capilaridade começa a atuar e o potencial mátrico torna-se negativo. Para altos valores de umidade, a capilaridade é o principal fenômeno que determina o potencial mátrico. Nestas condições, o arranjo poroso determinado pela estrutura, textura e composição das partículas é de enorme importância. Para baixos valores de umidade, o fenômeno de capilaridade deixa de ter importância e a adsorção passa a governar os valores de potencial mátrico (REICHARDT,1987).

## 2.7. Sucção

O fenômeno da sucção, segundo Fredlund & Rahardjo (1993), corresponde à força que um elemento poroso absorve água, quando esta se encontra em estado de energia livre para se mover, sendo os principais fatores condicionantes a fração granulométrica, a densidade e a umidade do solo. A existência desta propriedade nos solos é definida na engenharia geotécnica como sucção, sendo dada pela diferença entre a pressão de ar e a pressão da água dentro dos poros de um material não saturado.

Segundo Fredlund & Rahardjo (1993), a sucção no solo é formada por dois componentes: sucção matricial e sucção osmótica. A soma dessas duas componentes é definida como sucção total. A sucção matricial é devida à capilaridade, textura e às forças existentes na interface ar-água. A sucção osmótica é originada dos sais dissolvidos contidos na água presente no solo. O efeito mútuo das duas parcelas é conhecido como sucção total ou simplesmente sucção do solo, conforme apresentado na EQ. 2.5:

$$\psi_t = \psi_m + \psi_o \quad (2.5)$$

Em que:  $\psi_t$  = sucção total;  $\psi_m$  = sucção matricial e  $\psi_o$  = sucção osmótica.

### 2.7.1. Sucção matricial ( $\psi_m$ )

Representa a sucção equivalente derivada da medição da pressão parcial de vapor de água em equilíbrio com a água do solo (intersticial), relativa à pressão parcial de vapor d'água em equilíbrio com uma solução de composição idêntica à água do solo.

A sucção matricial é conhecida por variar com o tempo devido às mudanças ambientais. Qualquer mudança na sucção afeta o equilíbrio global da massa de solo. As diferenças na sucção podem ser causadas por mudanças em uma ou em ambas as componentes da sucção do solo.

### 2.7.2. Sucção osmótica ( $\psi_o$ )

Representa a sucção equivalente derivada da medição da pressão parcial de vapor de água em equilíbrio com a solução de composição idêntica a da água do solo (intersticial), relativa à pressão parcial de vapor d'água em equilíbrio com a água pura, "livre".

O papel da sucção osmótica tem sido comumente mais associado com os solos não saturados do que com solos saturados. Entretanto, a sucção osmótica está relacionada ao conteúdo salino da solução do solo, o qual está presente tanto em solos não saturados quanto em solos saturados. O papel da sucção osmótica é então igualmente aplicável em ambas as condições de solo. Havendo mudanças na sucção osmótica haverá uma mudança global no seu volume e nas cargas elétricas do solo. A sucção osmótica relaciona-se com a difusão da dupla camada em torno das partículas de argila, considerando que a sucção matricial está principalmente associada com a interface água-ar nos poros do solo (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

### 2.7.3. Medição de sucção

Existe atualmente uma grande variedade de equipamentos comercialmente disponíveis para a medição de sucção no solo. Os métodos para a medição da sucção podem ser divididos em duas categorias: métodos diretos e métodos indiretos. Métodos de medição direta medem a quantidade de energia da água dos poros. Na medição indireta, parâmetros como umidade relativa, resistividade e condutividade são medidos e são relacionados com a sucção atuante por meio de uma calibração.

De acordo com Agus e Schanz (2005), os métodos diretos são utilizados para medidas de sucção matricial e métodos indiretos para a matricial, para a osmótica e para a sucção total. Na Tabela 2.2 são apresentadas algumas técnicas utilizadas para a medição da sucção em solos.

Tabela 2.2 - Técnicas de medição de sucção (MARINHO e PEREIRA, 1998)

<b>Técnicas</b>	<b>Tipo de sucção medida</b>	<b>Intervalo de medição (kPa)</b>
Tensiômetros	Matricial e total	0 – 90
Translação de eixos	Matricial	0 – 1500
Condutividade térmica	Matricial	0 – 400
Condutividade elétrica	Matricial e osmótica	20 – 1500
Psicrômetro	Total e osmótica	100 – 8000
Papel filtro	Matricial e total	0 – 29000

### 2.7.3.1 Tensiômetro

Tensiômetros são equipamentos utilizados para medir valores de sucção matricial em solos não saturados. Dispondo-se da relação entre o conteúdo de água no solo e a tensão em que ela se encontra, pode-se estabelecer, indiretamente, o teor de água no solo a partir das leituras desse aparelho.

O tensiômetro consiste em uma cápsula porosa, geralmente de cerâmica ou porcelana, conectada a um medidor de vácuo (que pode ser um vacuômetro metálico ou um manômetro de mercúrio) por meio de um tubo plástico ou de outro material, tendo todas as partes preenchidas com água. A cápsula porosa é permeável à água e aos solutos na solução de solo, sendo, entretanto, impermeável à gases e à matriz do solo, até determinado nível de tensão (AZEVEDO e SILVA, 1999). A Figura 2.20 é uma representação esquemática de um dos tipos de tensiômetro com vacuômetro.

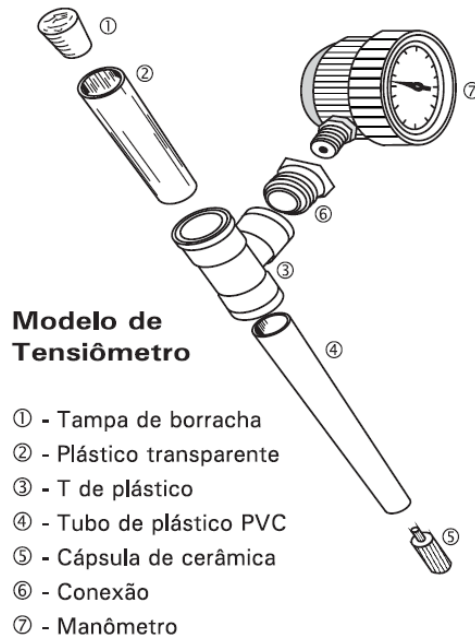


Figura 2.20 - Vista perspectiva e partes componentes de um tensiômetro munido de vacuômetro metálico (AZEVEDO e SILVA, 1999)

Diene (2004) faz um relato simples dos principais elementos constituintes dos tensiômetros.

✓ Elemento Poroso

Geralmente é uma pedra porosa de cerâmica e desenvolve a importante função de interface entre solo e sistema de medição. As pedras porosas de cerâmica são naturalmente molháveis e são hidrofílicas. Pedras porosas de cerâmicas são geralmente inertes e podem ser produzidas com uma grande consistência e uniformidade da estrutura de seus poros. As pedras com estrutura e elementos fabricados com paredes grossas podem sofrer cargas elevadas numa instalação mecânica sem danos.

Existem vários tipos de pedras porosas com dimensões e permeabilidades diferentes. Essa diferença de permeabilidade faz com que as pedras tenham um comportamento diferenciado na sua função de manutenção da continuidade hidráulica do fluxo entre o solo e sistema de medição. A variação do fluxo depende da granulometria e esta governa a ausência ou presença de ar no sistema.

✓ Corpo Cilíndrico

Tem a função de reservatório da água e exige certos aspectos importantes para o bom funcionamento do equipamento, tais como: uma superfície bastante lisa de maneira que não permita a fixação de bolhas de ar e uma boa resistência, principalmente à corrosão. Ele é geralmente constituído por aço, vidro ou acrílico. O tipo de material influencia a tensão de adesão desenvolvida entre a porção de solo e o líquido que este contém.

✓ Sensor de Pressão

A sua função é a mensuração da tensão local do solo. Existem basicamente três tipos:

- Manômetros de mercúrio: não necessitam de calibração, mas precisam de correção da densidade para evitar erro de leitura, que geralmente é da ordem de 0,25%. No entanto, são os mais simples e acurados sensores de pressão.
- Manômetros de vácuo: são de fácil manutenção, mas de baixa precisão e medem tensões entre zero e um Atm. O elemento de vácuo posiciona-se quase na base do tubo do tensiômetro e assim o espaço superior serve de captação de ar.
- Transdutores de pressão: Quando devidamente calibrados, desenvolvem alta acurácia e precisão. A necessidade de pouco fluxo de água para o seu equilíbrio com o solo reduz o tempo de resposta e a interferência da água do sistema no solo. Permitem acúmulo de grande quantidade de dados e favorecem um monitoramento contínuo. O elemento medidor é geralmente resistivo como um *Strain Gage* e sempre acoplado a um diafragma. Quando é aplicada uma tensão, ele se deforma a resistência varia.

O funcionamento do tensiômetro é simples. Após estar completamente cheio de água e em solo saturado, nenhuma água passará pela cápsula e não haverá vácuo. À medida que o solo seca, a água sai do tensiômetro por meio da cápsula porosa, criando um vácuo no interior do tubo equivalente à tensão da água no solo. A magnitude desse vácuo será indicada no manômetro conectado ao tensiômetro. De forma inversa, após o procedimento de molhagem, o teor de água no solo é aumentado e a água passa do solo para o tensiômetro por meio da cápsula e as leituras de vácuo ficam mais baixas (AZEVEDO e SILVA, 1999).

A capacidade do tensiômetro de medir valores superiores a 100 kPa depende do grau de saturação do filtro poroso e do reservatório existente na sonda de medição. Na medição, deve-se, também, ter atenção à possibilidade de cavitação, que é desencadeada logo que se formam bolhas de gás no interior do reservatório (LOURENÇO *et al.*, 2006).

### 2.7.3.2 Tensiômetro de alta capacidade

Tensiômetros de alta capacidade são transdutores de pressão de pequena dimensão para medição de sucções superiores a 100 kPa, possibilitando uma medição rápida e direta da sucção matricial em solos não saturados. É um equipamento que possibilita a medição de sucções tão altas quanto um MPa. Consistem basicamente em um transdutor, uma placa porosa e água.

Ridley e Burland (1999) conseguiram medições de sucção da ordem de 1500 kPa. Já Lourenço *et al.* (2006), em equipamento desenvolvido com a colaboração da Durham University e Wykeham Farrance Limited, conseguiram alcançar valores de sucção da ordem de 800 a 1000 kPa, onde, próximo a este último valor, foi verificado que houve a cavitação.

Embora a medida da sonda de sucção do Imperial College seja eficiente para obtenções de sucção do solo até, aproximadamente, 1500 kPa, ela foi bem menos sucedida para medições em longo prazo. Os principais problemas com este equipamento foram associados ao grande volume de água no reservatório e em outras regiões, onde o ar poderia facilmente ficar preso (RIDLEY e BURLAND, 1999). Na Figura 2.21 é apresentado um esquema da sonda de sucção do tensiômetro desenvolvido no Imperial College, Londres, e proposta por Ridley & Burland (1999).

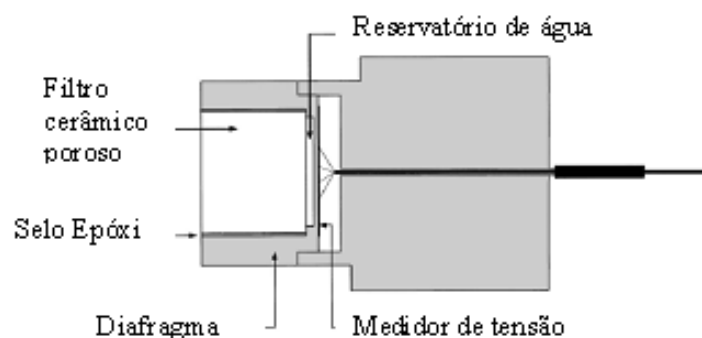


Figura 2.21 - Esquema do tensiômetro Imperial College (RIDLEY e BURLAND, 1999)

### 2.7.3.3 Psicrômetro

O psicrômetro é um transdutor térmico. Funciona com a combinação de dois efeitos (FREDLUND e RAHARDJO, 1993):

- ✓ Efeito *Seebeck*: Quando uma força eletromotriz é gerada entre dois metais diferentes num circuito fechado, cujas junções tenham temperaturas diferentes, pode se medir a força eletromotriz gerada pelo efeito *Seebeck* usando um microvoltímetro. Uma das junções do circuito servirá de referencial com temperatura constante e a outra junção servirá de sensor diferencial de temperatura.
- ✓ Efeito *Peltier*: Na passagem de corrente em um circuito composto com dois metais diferentes, uma das junções resfria enquanto a outra esquenta. Na inversão de direção da corrente elétrica é provocado efeito de reversão térmica nas duas junções.

### 2.7.3.4 Papel filtro

A determinação da curva de retenção de água no solo, utilizando técnicas convencionais, como o método do papel de filtro, envolve a medição simultânea dos valores do teor de água e sucção em um discreto número de estágios durante o umedecimento ou secagem de uma amostra de solo (LOURENÇO *et al.*, 2006).

O método do papel filtro (ASTM, 2003) consiste em uma técnica indireta para determinação da sucção no solo. Os procedimentos experimentais utilizados para a medição são simples, sendo, basicamente, a colocação de um pedaço de papel filtro em

contato com a amostra de solo. Logo em seguida, a amostra e o papel são isolados do ambiente, objetivando a equalização e equilíbrio do sistema.

No método do papel filtro, solo e papel filtro atingem um equilíbrio com relação à umidade com contato (sucção matricial) ou sem contato direto (sucção total) em um ambiente de temperatura constante. O contato direto entre o papel filtro e o solo permite o equilíbrio do sistema por meio do movimento livre da água na fase líquida. Uma barreira de vapor entre papel filtro e o solo impede somente o movimento de solutos. Medições de sucção matricial usando o método do papel filtro são semelhantes às medições de sucção total, com exceção do contato entre solo e papel filtro.

Uma vez conhecida a correlação entre a sucção e o teor de umidade do papel filtro, a sucção existente no solo (teoricamente igual a do papel após o período de equilíbrio) pode ser estimada a partir da curva de calibração. No entanto, de acordo com Villar (2002), o método do papel filtro mostra histerese se usado em trajetória de umedecimento ou secagem, de modo que é importante usá-lo de acordo como a curva de calibração de referência que foi obtida. Ou seja, se a curva foi obtida por uma trajetória de umedecimento, o ensaio deve começar com papel seco.

Villar (2002) apresenta uma avaliação completa sobre o método do papel filtro, bem como as curvas de calibração utilizadas para alguns tipos mais comuns de papel filtro.

#### 2.7.4. Cavitação

Cavitação é definida como a formação e atividade de bolhas (ou cavidades) em um líquido. Estas bolhas podem ser suspensas no líquido ou podem estar presas em pequenas rachaduras ou na superfície do líquido ou em sólidos em suspensão no líquido. As bolhas podem conter gás ou vapor d'água ou uma mistura de ambos (YOUNG, 1999).

Young (1999) salienta que a água dos poros nos solos pode manter elevadas pressões negativas (sucção) e é possível estimar essa pressão utilizando diferentes métodos indiretos. No entanto, as tentativas de medir diretamente sucção maior do que um atm

(aproximadamente 100 kPa) muitas vezes sem êxito, até recentemente, devido à cavitação no sistema de medição. É reconhecido que a água tem uma elevada resistência à tração, e esta característica está em conflito com o fenômeno de cavitação observado em sistemas de medição.

Marinho e Pinto (1997) observam que, embora a água pudesse sustentar a tensão, as tentativas para medir a sucção do solo superior a um atm, com a utilização de tensiômetros, falharam. A razão para isso está associada ao aprisionamento de ar dentro das microfissuras no sistema. Existem muitas teorias que tentam explicar o aprisionamento de ar entre o líquido e um recipiente sólido.

Agus e Schanz (2005) relatam que uma das desvantagens para a utilização do tensiômetro é a ocorrência de cavitação quando as medidas de sucção são superiores a 100 kPa e recomendam diminuir a quantidade de água no tensiômetro para minimizar o efeito da cavitação.

Diene (2004) menciona que a faixa de mensuração nos tensiômetros não ultrapassava 100 kPa devido à problemas de cavitação do sistema. Porém, com o desenvolvimento de tensiômetros de alta sucção, este problema foi solucionado.

## **2.8. Curva característica de retenção de água**

Considerando um sistema saturado em estado de equilíbrio, a poro pressão é superior ou igual à pressão atmosférica. Quando aplicada sucção, ocorre drenagem da água presente nos vazios do solo, gerando uma pressão negativa nos mesmos. A aplicação de altos níveis de sucção afeta a água livre nos vazios, provocando a perda de umidade do solo.

A curva característica de retenção de água para solos não saturados é definida como a relação entre a quantidade de água existente no interior de uma massa de solo e a sua respectiva sucção. Este volume de água pode ser quantificado em termos de teor de umidade volumétrico ( $\theta$ ), definido como a relação entre o volume de água e o volume total

e teor de umidade gravimétrico ( $\omega$ ), cuja magnitude é obtida em função da relação entre pesos de água e de sólidos, ou em termos de grau de saturação. Fredlund e Xing (1994) consideram uma equivalência entre a sucção total e a matricial quando estas atingirem valores de ordem superior a 1500 kPa.

Na Figura 2.22 é apresentada uma curva característica para um solo siltoso e suas principais características. A aplicação de uma pequena sucção não gerará um fluxo de água até que esta atinja um determinado valor crítico capaz de deslocar a água nos vazios maiores. Esta é definida como sucção de entrada de ar ( $\psi_b$ ). O aumento gradual da sucção ocasiona a retirada de água dos vazios menores até que se alcance elevados valores de sucção. A partir de então, é necessário a aplicação de valores muito altos de sucção para a retirada de umidade do solo, que é definida como teor de umidade residual ( $\theta_r$ ). A curva é uma curva de secagem. A curva de umedecimento é diferente da curva de secagem devido ao resultado da histerese. O ponto final da curva de umedecimento pode diferenciar do ponto de início da curva de secagem por causa do aprisionamento de ar dentro do solo.

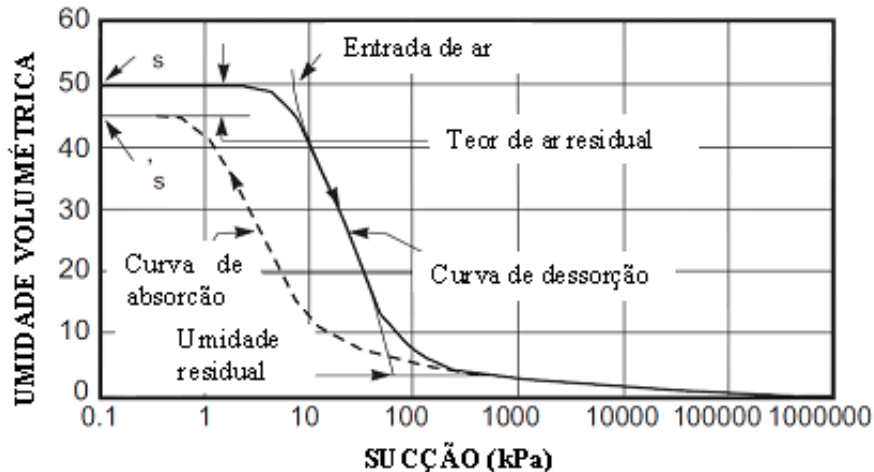


Figura 2.22 - Curva característica típica para um solo siltoso (FREDLUND e XING, 1994 – modificado)

A forma mais utilizada para a representação de curva característica é aquela que relaciona o teor de umidade volumétrico e a sucção. Entretanto, o índice de vazios ( $e$ ) e, conseqüentemente, a distribuição granulométrica, influenciam o formato da curva. Diante disso, o decréscimo brusco de umidade nos solos arenosos, quando aplicado um valor de

sucção, determina uma tendência para estes tipos de solos, enquanto solos argilosos tendem a apresentar curvas suaves.

Curvas características típicas para diferentes tipos de solos são apresentados no gráfico da Figura 2.23. O teor de umidade saturado ( $\theta_s$ ) e o valor da sucção de entrada de ar ( $\psi_b$ ), geralmente aumentam na medida em que aumenta a plasticidade do solo. Estão indicados neste gráfico os parâmetros mais importantes que são associados a esta função:  $\psi_b$ ,  $\theta_r$ ,  $\theta_s$  e  $C(\theta)$ .

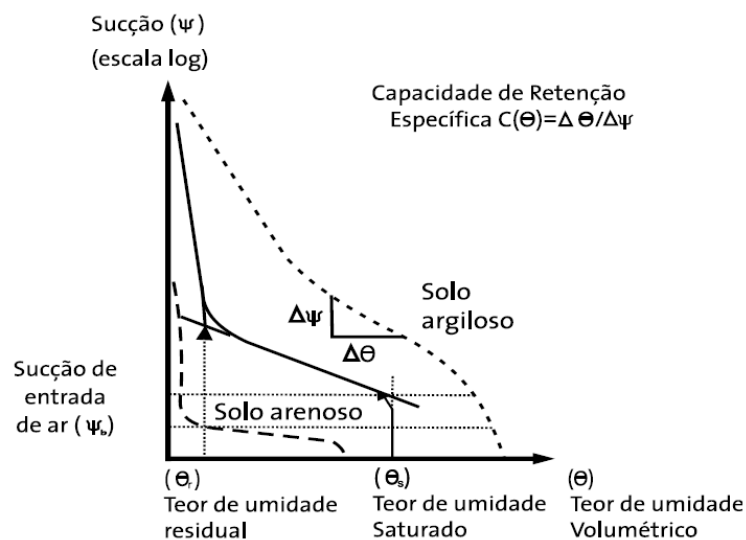


Figura 2.23 - Curvas características típicas de solos arenosos e argilosos (FREDLUND e XING, 1994 – modificado)

Em que:  $\psi_b$ , que é a sucção de entrada de ar, ou seja, o valor crítico, pequeno, a partir do qual a água presente no maior vazio começa a sair;  $\theta_r$ , que é o teor de umidade volumétrica residual, limite inferior a partir do qual qualquer aumento na sucção pouco afeta a umidade;  $\theta_s$ , que é o teor de umidade volumétrica na condição de saturação, dado pelo produto da porosidade e do grau de saturação ( $n \times S$ ); a capacidade de retenção específica ( $C(\theta)$ ) é a variação de umidade ( $\Delta\theta$ ) pela variação na sucção ( $\Delta\psi$ ). Observa-se que, se o gráfico estiver com abscissas e ordenadas invertidas em relação à Figura 2.23, pode-se dizer que a capacidade de retenção é a tangente da curva característica e varia com o nível de sucção.

A curva característica do solo pode ser obtida em laboratório por meio de dois procedimentos: o umedecimento do solo, que consiste em tomar uma amostra seca ao ar e umedecê-la gradualmente, provocando redução do potencial matricial; ou a secagem do solo, que consiste em tomar uma amostra de solo na condição saturada e expulsar a água. A perda de água do solo pode ser obtida mediante a aplicação de pressões na amostra ou deixando a amostra evaporar ao tempo.

Em escala pontual, as curvas características de retenção de água no solo dependerão do tipo de solo, estrutura, temperatura em que se encontra a massa analisada, bem como o processo dinâmico de umidade do solo, que é chamado de histerese (TIAN *et al.*, 2009).

Gardoni *et al.* (2010) realizaram ensaios com papel filtro para determinar a curva característica do SFCJ. Observaram, por meio da trajetória mista, que o minério de ferro perderia rapidamente a umidade e sua condição saturada até alcançar a taxa de umidade gravimétrica de aproximadamente 12%. A partir desse ponto, o minério teria dificuldades para perder umidade. Na Figura 2.24 são apresentadas as curvas do minério de ferro para a condição mista, para a condição de secagem e para a de umedecimento.

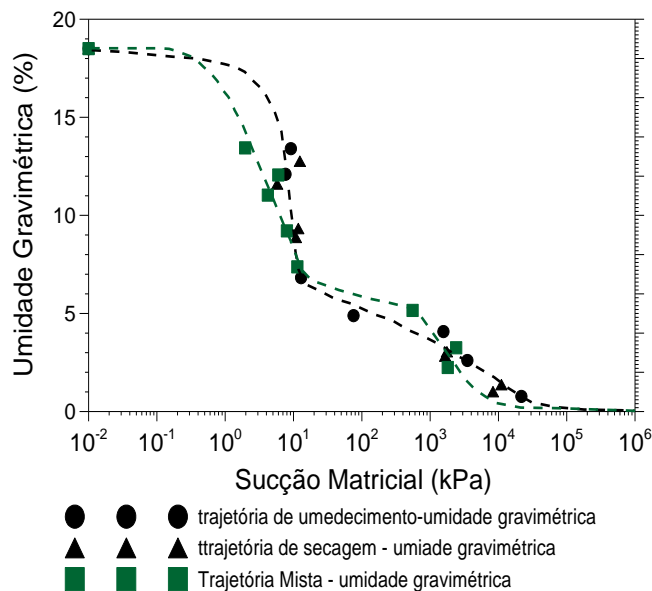


Figura 2.24 - Curvas de retenção de água do SFCJ (GARDONI *et al.*, 2010)

### 2.8.1. Tipo de solo

O teor de umidade volumétrico na condição saturada e o valor de entrada de ar geralmente aumentam com a plasticidade do solo. Para baixos valores de sucção, a quantidade de água retida no solo depende, principalmente, dos efeitos de capilaridade, que estão diretamente ligados com a distribuição granulométrica e estrutura do solo. Para altos valores de sucção, a quantidade de água retida no solo dependerá dos mecanismos de adsorção, que são influenciados pela composição mineralógica e pela superfície específica da partícula (FREDLUND e XING, 1994).

### 2.8.2. Arranjo estrutural

A estrutura do solo também influencia bastante na relação sucção-umidade, já que o sistema de poros controla as forças capilares. A curva de retenção é influenciada pela disposição das partículas nos solos finos, que podem apresentar estrutura floculada (os contatos se fazem entre as faces e arestas das partículas, por meio da água adsorvida) e estrutura dispersa (as partículas se posicionam paralelamente). A maior permeabilidade em solos com a estrutura floculada resulta da existência de maior quantidade de “canais” para o fluxo (LAMBE e WHITMAN, 1969). Na Figura 2.25 são apresentadas as estruturas de solos floculada e dispersa segundo Lambe e Whitman (1969).

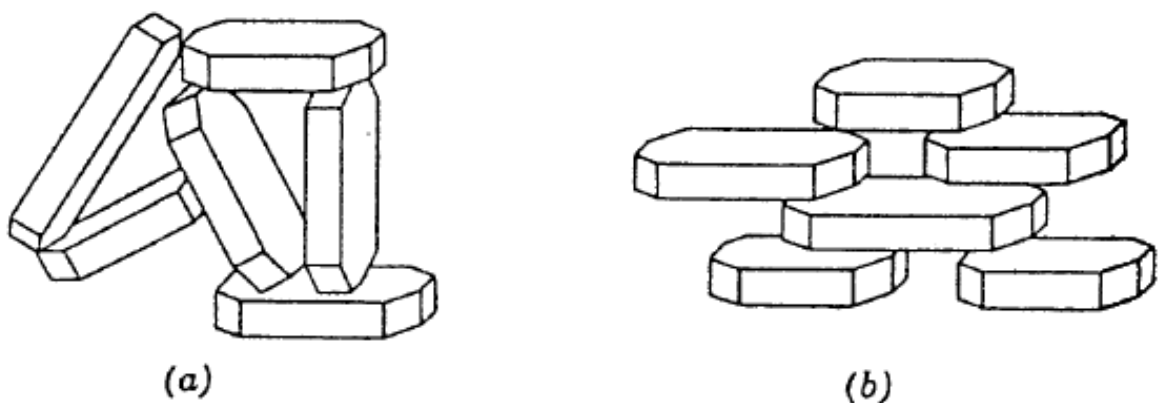


Figura 2.25 - Tipos de estruturas do solo. (a) Floculado; (b) Disperso (LAMBE e WHITMAN, 1969)

### 2.8.3. Histerese

Histerese é a diferença na curva de retenção obtida pelos procedimentos que segue a curva de umedecimento e a que segue a curva de secagem (FREDLUND e XING, 1994). É um fator importante a ser considerado na trajetória de secagem e umedecimento da curva de sucção, de tal forma que a quantidade de água retida durante a trajetória de secagem é maior que na trajetória de umedecimento. Isso ocorre por diversos fatores tais como: a geometria dos poros individuais não ser uniforme e serem conectados por pequenos canais; influência do ângulo de contato solo-água que devido à rugosidade da superfície do grão varia de acordo com o avanço ou recuo do menisco; ocorrência de ar aprisionado nos poros, redução do teor de umidade no processo de umedecimento e a liberação gradual do ar dissolvido na água.

A curva de retenção de água no processo de umedecimento no estágio inicial de solo seco até a condição de saturação é uma curva única, definida como curva primária de umedecimento. Similarmente, a curva primária de secagem é obtida pelo processo de drenagem do solo saturado até que o solo esteja bastante seco. Os processos de umedecimento e secagem do solo nas condições de solo saturado e solo seco reproduzem o comportamento do solo nas duas situações extremas. Dessa maneira, entre estas duas curvas estarão representadas os caminhos possíveis para o procedimento de secagem e umedecimento do solo em questão, conforme apresentado na Figura 2.26. Este fenômeno é conhecido como histerese (KONYAI et al., 2009).

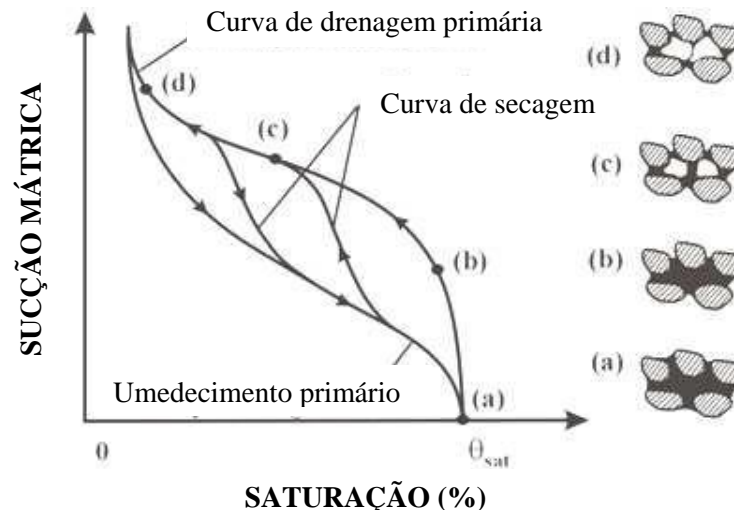


Figura 2.26 - Influência da histerese na curva característica de retenção (KONYAI *et al.*, 2009)

## 2.9. Balanço de massa-água

A medida do balanço massa-água de um solo pode ser obtida por diversos métodos, como: colunas formadas por vários segmentos conectados e selados por *o' rings* onde se coloca o minério com uma densidade específica e a água (ABRÃO, 2005). Mas dentre eles, existe um equipamento muito utilizado pelos agrônomos que é o lisímetro, recipiente físico que normalmente é instalado em profundidade em um perfil de solo e é projetado para coletar a água que percola verticalmente na massa de solo. Em intervalos regulares, a água que entrou no lisímetro é medida e a quantidade de água coletada sobre um determinado período de tempo é interpretado como sendo igual à taxa de infiltração que ocorreu ao longo do perfil do solo. A medida da taxa de infiltração pode então ser utilizada para avaliar situações, por exemplo, como a eficácia de um sistema de cobertura do solo para uma obra de engenharia ou para prever o movimento de contaminantes com a variação do tempo.

### 2.9.1. Ensaio com lisímetro

Lisímetros também são utilizados em laboratório para estudos das condições de secagem e umedecimento de solos. Nestas condições, na maioria das vezes, o lisímetro é preenchido

com o material o qual se deseja estudar e faz-se o acompanhamento da quantidade de água no seu interior por meio de instrumentos de medição (umidade, temperatura, sucção etc.).

Os lisímetros têm sido utilizados como instrumentos de medidas dos parâmetros hidráulicos do solo por aproximadamente 100 anos. Quando projetados, construídos, instrumentados, gerenciados, operados e interpretados de forma satisfatória, os lisímetros podem fornecer dados precisos (XINGFA *et al.*, 1999; Hansen *et al.*, 2000).

A interpretação do desempenho do lisímetro depende inteiramente do conhecimento que se tem sobre os processos envolvidos e as propriedades para o controle do fluxo. No passado, questionamentos eram levantados sobre a eficiência e a confiabilidade dos lisímetros, especialmente os dispositivos que eram utilizados para o controle e acompanhamento. A utilização de modelos de elementos finitos foi fundamental para aprender mais sobre o funcionamento dos lisímetros e ajudar a entender os processos fundamentais envolvidos.

Em estudos envolvendo lisímetros de laboratório, considera-se que a massa de material a ser estudada possui as mesmas características em todo o corpo de prova. Alguns lisímetros são projetados para reter a água que foi acrescida ao sistema, outros possuem sistemas de drenagem para o escoamento da mesma. No primeiro caso, a água evapora-se sem que haja um alívio do sistema, ou seja, o balanço de massa de água é feito com o auxílio ou não de outros processos de secagem, como por exemplo, aumento de temperatura do sistema. Normalmente, devido ao fato mencionado, estes ensaios são mais demorados. No segundo caso, o sistema de drenagem permite que a água escoe pela massa de material estudado e então se processa os estudos de evaporação da água contida no sistema, sempre em condições drenadas.

Com relação à poro-pressão no fundo do lisímetro, nas condições não drenadas o nível da freática fornecerá a pressão exercida pela água. Para ensaios nas condições drenadas, a pressão no fundo do lisímetro causado pela água não existirá, devido à existência de sistemas de drenagem para dissipar a poro-pressão.

Ensaio de percolação em colunas são relativamente comuns, uma vez que as condições de contorno são facilmente controladas e o fluxo é unidimensional. Em análises de fluxos de água isotérmicos este tipo de ensaio é utilizado no estudo da relação entre gradiente e velocidade. Em estudos de evaporação, colunas foram utilizadas por Jame e Norum (1980) e Wilson (1990) na investigação experimental de fluxos de massa e calor, incluindo estudos de evaporação e evapotranspiração.

Oliveira (2003) apresentou resultados de estudos da interação solo-atmosfera em solos tropicais não saturados, com ênfase na evaporação. O objetivo do estudo foi o entendimento e modelagem dos fenômenos e das variáveis que controlam a interação solo-atmosfera em função de solicitações ambientais. No estudo foram apresentados os modelos físicos e matemáticos de evaporação e fluxos internos de água e calor, inclusive equações diferenciais parciais que governam o fluxo bidimensional de água líquida, vapor de água e calor em solos saturados e não saturados. A curva característica de retenção de umidade a condutividade hidráulica, o coeficiente de difusão de vapor, a condutividade térmica, o calor específico e o calor latente de vaporização são as propriedades associadas às equações diferenciais parciais utilizadas na elaboração do modelo.

### 2.9.2. Ensaio de coluna

Segundo Pinto *et al.* (1976), a evaporação pode ser definida como o conjunto dos fenômenos da natureza que transformam em vapor a água da superfície do solo, dos cursos de água, lagos, reservatórios de acumulação e mares. A perda por evaporação pode ser definida como a quantidade de água evaporada por unidade de área durante certo intervalo de tempo.

O conceito de evaporação pode ser dividido em evaporação potencial e evaporação real. Segundo Hillel (1982), a evaporação potencial é a taxa de evaporação controlada pelas condições da atmosfera, ou seja, quando a água disponível na superfície é ilimitada. O conceito de evaporação real refere-se à evaporação da água controlada pelas condições/disponibilidades de água da superfície, geralmente limitada pela umidade do solo.

A evaporação real das superfícies de solo, com ou sem vegetação, é considerada como sendo aproximadamente igual à evaporação de uma superfície de água livre quando o solo se encontra em condições de saturação ou próximos a isso. No entanto, ela torna-se inadequada quando o solo começa a sofrer evaporação.

Existem dois processos principais que governam o fluxo de água entre a superfície do solo e a atmosfera: a água que entra na superfície do solo como líquido, por meio do processo de infiltração; e a água que sai da superfície do solo como vapor, por meio do processo de evaporação. O processo de infiltração depende principalmente das propriedades do solo, como a condutividade hidráulica. Já o processo de evaporação é mais difícil de ser avaliado, pois depende tanto das propriedades do solo quanto das condições climáticas.

A Figura 2.27 mostra uma relação típica para a razão de evaporação real pela evaporação potencial ( $er/ep$ ) versus água disponível na superfície de um solo arenoso. A evaporação real é igual à evaporação potencial ( $er/ep = 100\%$ ) quando a areia está na sua capacidade de campo (quantidade de água contida no solo após ter sido drenado o excesso de água capacidade ou pouco abaixo deste valor). A razão de evaporação ( $er/ep$ ) diminui quando a superfície da areia começa a secar, chegando a um valor residual.

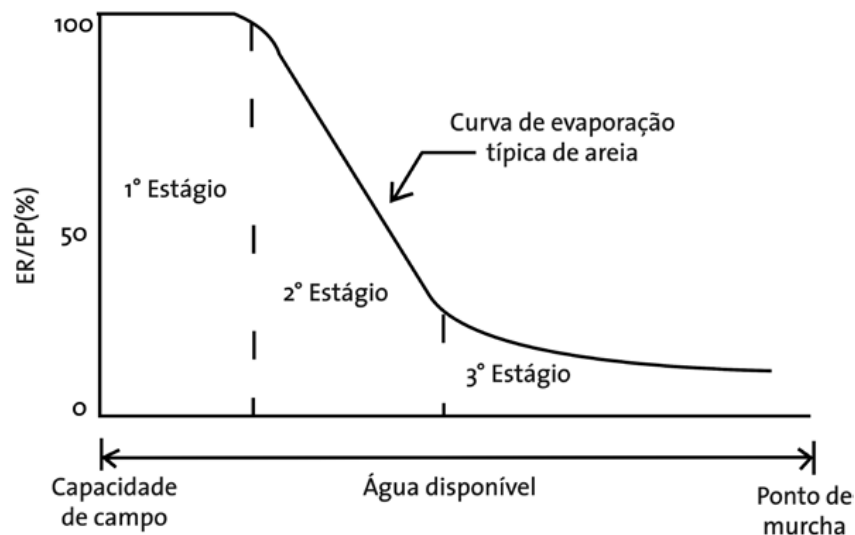


Figura 2.27 - Estágios da evaporação (WILSON *et al.*, 1994)

Outro ponto importante que está destacado na Figura 2.27, são os três estágios de evaporação da água no solo. O 1º estágio é o potencial máximo de secagem que ocorre

quando o solo está saturado ou bem próximo da saturação. Esse potencial é determinado pelas condições climáticas. O 2º estágio começa quando as propriedades do solo não permitem um fluxo de água suficiente para a camada de superfície, para manter o potencial máximo de evaporação. A razão de evaporação continua a declinar durante o 2º estágio até um baixo valor residual definido como 3º estágio de secagem. O 3º estágio começa a ocorrer após a superfície do solo se tornar suficientemente seca, causando assim descontinuidade da fase líquida da água. O fluxo de água líquida da superfície cessa e as moléculas de água só podem migrar para a superfície através do processo de difusão de vapor d'água (WILSON *et al.*, 1994).

Wilson *et al.* (1994) realizaram um ensaio de secagem em colunas de areia a fim de medir as taxas de evaporação real e compará-las com os valores previstos pela simulação do *software* Soilcover, que avalia fluxo evaporativo em solos saturados e não saturados. O ensaio foi realizado em colunas de PVC, com 16,9 cm de diâmetro externo e 30 cm de altura, seladas na base. Duas colunas foram preenchidas com areia (média a fina) saturada, e uma coluna foi preenchida com água pura. O ensaio foi realizado em uma sala com temperatura constante de 38°C e umidade relativa do ar de aproximadamente 10%, durante um período de 42 dias.

As colunas de areia tiveram as paredes laterais cobertas por um material isolante para minimizar os efeitos do fluxo de calor lateral. O peso destas colunas foi monitorado durante todo o ensaio por meio de balanças, e os dados foram armazenados em um computador, que fazia a aquisição de dados em intervalos de 15 minutos. Ao longo do perfil das colunas foram instalados aparelhos de medida de temperatura, cujos dados também eram armazenados em intervalos de 15 minutos. A evaporação das colunas foi calculada com base na variação do seu peso. A razão de evaporação potencial encontrada neste ensaio foi de oito mm/dia.

Durante o ensaio foram retiradas amostras de solo para obtenção de medida direta de teor de umidade do material ao longo do perfil da coluna. Valores de evaporação real, perfil de teor de umidade e perfil de temperatura computados pelo *software* Soilcover foram comparados, por Wilson *et al.* (1994), àqueles obtidos nos ensaios de secagem das colunas

de areia. Os referidos autores encontraram uma boa concordância entre os resultados medidos e calculados.

Fazendo uma análise de sensibilidade do programa em relação à condutividade hidráulica, Wilson *et al.* (1994) verificaram uma mudança significativa em relação à razão de evaporação do solo quando se alterava a condutividade hidráulica saturada. Ressalta-se que uma das propriedades do solo que tem maior importância sobre a capacidade de retenção de umidade no solo é a condutividade hidráulica saturada, por controlar o fluxo de água líquida no perfil de solo.

A seguir são apresentados resumidamente alguns fatores que influenciam a evaporação.

- Radiação solar: é a fonte energética necessária ao processo evaporativo, sendo que a incidência direta fornece mais energia ao processo;
- Temperatura da superfície: a variação da intensidade da radiação solar recebida na superfície reproduz uma variação na temperatura da superfície, modificando a energia cinética das moléculas. A alta temperatura, mais moléculas são desprendidas para o ambiente, devido a sua maior energia cinética;
- Temperatura e umidade do ar: o aumento da temperatura torna maior a quantidade de vapor d'água que pode estar presente no mesmo volume de ar.
- Vento: o vento modifica a camada de ar vizinha à superfície, substituindo uma camada muitas vezes saturada por uma com menor conteúdo de vapor d'água. Na camada em contato com a superfície (aproximadamente um mm), o movimento de vapor é por moléculas individuais (difusão molecular), mas acima dessa camada limite superficial, o responsável é o movimento turbulento do ar (difusão turbulenta).

## **2.10. Geossintéticos**

Nas últimas quatro décadas, a utilização de geossintéticos em obras geotécnicas vem sendo cada vez mais difundida. Esses apareceram como alternativas ao emprego de materiais convencionais, e o desempenho apresentado é um dos principais motivos por sua elevada utilização na engenharia. Os geossintéticos são empregados em obras de engenharia

geotécnica e de proteção ambiental, para um aprimoramento ou, até mesmo, para a substituição das técnicas convencionais.

Um tipo de geossintético muito utilizado na engenharia geotécnica é o geotêxtil - produto têxtil permeável. Uma das principais aplicações de geotêxteis é como elemento filtrante, em substituição aos materiais granulares convencionais e, mais recentemente, em obras de proteção ambiental, tanto em filtros permanentes quanto em casos de partículas em suspensão que necessitam de substituição ou retrolavagem periódica ou ao longo da vida útil do sistema.

De acordo com Gardoni (1995), os primeiros filtros em uso, os granulares, passaram por tentativas de acertos que vão desde um extremo de se confiar que um pavimento é impermeável, e, portanto, a drenagem não é relevante no projeto, até outro ponto, onde por medo da infiltração passaram a utilizar materiais bem graduados, mas contendo tantos finos que os filtros já iniciavam o funcionamento pré-colmatados.

Em 1970, geotêxteis não tecidos foram usados pela primeira vez em uma barragem de terra, cuja principal função foi drenagem. Em 1992, as amostras foram retiradas de dois locais para testes de desempenho realizados em laboratório (FAURE *et al.*, 1999). Nesses ensaios, realizados em amostras exumadas de geotêxteis para a validade dos critérios de filtração para geotêxteis utilizados em uma barragem, os resultados apresentaram dados satisfatórios para os filtros de geotêxteis. Diante disso, concluíram que o geotêxtil, após um período de vinte e um anos, não sofreu qualquer alteração significativa no comportamento (propriedades do material) desde a sua instalação e ainda ressalta que um geotêxtil protegido contra os raios UV não perde as suas propriedades mecânicas e hidráulicas e não há evidência significativa de envelhecimento.

Beirigo (2005) estudou o desempenho dos dispositivos de drenagem e filtração da Barragem de Rejeitos da Cava do Germano/Samarco, Mariana/MG. De acordo com os resultados obtidos nos estudos, os sistemas rejeito-geotêxtil ensaiados se comportaram de maneira estável, inclusive em contraposição a alguns resultados de avaliações por critérios de projetos disponíveis na literatura.

Vidal e Martins (2006) apresentam uma discussão sobre a técnica de mineração utilizando tubos geotêxteis (Figura 2.28). Discutem casos de obras e fazem uma análise das solicitações hidráulicas e mecânicas que esses materiais sintéticos ficam submetidos. Por fim, concluem que a técnica do desaguamento de rejeitos finos de mineração utilizando tubos geotêxteis mostra-se de grande importância, principalmente, devido ao crescimento da produção e escassez de áreas para disposição deste tipo de resíduo.



Figura 2.28 - Desaguamento de rejeito de mineração em tubos de geotêxteis (VIDAL e MARTINS, 2006)

Empregados como elemento de filtração, os materiais sintéticos não se diferenciam dos materiais granulares, uma vez que, assim como os granulares, as mantas sintéticas têm poros (vazios) e filamentos ou fibras (partículas) e, em ambos os casos eles devem atender a duas necessidades básicas: 1ª) manter uma capacidade drenante eficiente de forma a permitir uma adequada capacidade de fluxo e conseqüente redução da carga hidráulica no solo; 2ª) proporcionar uma retenção das partículas do solo provenientes de um carreamento pelo fluido percolante, de modo a garantir a estabilidade do solo protegido (FREITAS, 2003).

A identificação e caracterização de geossintéticos são de fundamental importância para a seleção apropriada destes materiais para uso em obras geotécnicas e de proteção ambiental. Sob este aspecto, as propriedades físicas mais importantes do geossintético são a sua

gramatura, porosidade, espessura, forma e diâmetro dos fios, arranjo estrutural dos fios e forma e distribuição dos poros (GARDONI, 1995).

### 2.10.1. Geotêxtil

Segundo a NBR 12553 (ABNT, 2003), os geotêxteis são produtos têxteis bidimensionais permeáveis, compostos por fibras cortadas, filamentos contínuos, monofilamentos, laminetes ou fios, formando estruturas tecidas, não tecidas ou tricotadas, cujas propriedades mecânicas e hidráulicas permitem que desempenhe várias funções em uma obra geotécnica.

Em virtude da técnica de fabricação adotada ocorrem mudanças no tipo de estrutura do geotêxtil, sendo eles classificados, segundo a NBR 12553 (ABNT, 2003) em:

- ✓ Geotêxtil não-tecido (GTN): produto composto por fibras cortadas ou filamentos contínuos, distribuídos aleatoriamente, os quais são interligados por processos mecânicos, térmicos ou químicos, sendo:
  - geotêxtil não tecido agulhado (GTNa): fibras interligadas mecanicamente por processo de agulhagem;
  - geotêxtil não tecido termoligado (GTNt): fibras interligadas por fusão parcial obtida por aquecimento;
  - geotêxtil não tecido resinado (GTNr): fibras interligadas por meio de produtos químicos.
- ✓ Geotêxtil tecido (GTW): produto oriundo do entrelaçamento de fios, monofilamentos ou laminetes (fitas), segundo direções preferenciais de fabricação denominadas trama (sentido transversal) e urdume (sentido longitudinal).
- ✓ Geotêxtil tricotado (GTK): produto oriundo do entrelaçamento de fios por tricotamento.

Palmeira e Gardoni (2002) estudaram a variação das propriedades físicas e hidráulicas dos geotêxteis não tecidos sob aplicação de tensões que variam de 0 a 2000 kPa. Esse estudo foi avaliado devido às tensões normais que barragens de grandes dimensões ou pilhas de rejeitos de mineração pode causar no sistema de drenagem, chegando a alcançar em torno de um MPa.

O comportamento do filtro geotêxtil não tecido em uma obra será influenciado pelo nível de tensões, já que estes materiais são muito compressíveis, quando comparados a camadas filtrantes granulares. Outro aspecto que pode influenciar o comportamento do filtro geotêxtil é a possibilidade da sua impregnação por partículas de solo durante o espalhamento e compactação de solo sobre o mesmo (PALMEIRA e GARDONI, 2000; PALMEIRA e GARDONI, 2002; PALMEIRA *et al.*, 2005).

Ferreira (2009) apresenta estudos referentes à utilização de geocompostos, com núcleos de georrede e geomanta, em sistemas filtro-drenantes para o SFCJ. Nesses estudos, com variação do gradiente hidráulico e tensão vertical aplicada, concluiu, por meio dos ensaios de filtração (GR), a boa aplicabilidade do geocomposto no sistema de drenagem para o SFCJ.

#### 2.10.2. CrITÉRIOS de projeto para filtros de geotêxteis

Para a utilização dos geossintéticos em sistemas de drenagem e filtração, é requerido que os filtros sintéticos atendam a quatro critérios básicos, sendo dois deles já propostos por Terzaghi, retenção e permeabilidade e, mais outros dois que são os critérios de colmatação e de sobrevivência à instalação.

Os dois primeiros critérios são opostos, pois enquanto o filtro deve ser permeável o bastante para possibilitar a passagem da água por meio do mesmo, ele deve, ao mesmo tempo, reter o solo evitando uma excessiva migração das partículas, porém, permitindo o fluxo contínuo da água presente no interior do solo. Além dos requisitos de retenção e permeabilidade, um critério contra a colmatação é requerido para assegurar que, se as partículas do solo bloquearem pequenas aberturas do geotêxtil, a compatibilidade solo-geotêxtil não será afetada significativamente. Na Tabela 2.3 são apresentados os critérios de projeto para filtros têxteis.

Tabela 2.3 Critérios projetos de filtros têxteis (PALMEIRA e GARDONI, 2000 - modificado)

Autor	Condutividade Hidráulica <sup>(1)</sup>	Retenção <sup>(2)</sup>	Observações	
		$O_{95}/d_{50} < C'_u$	Para $I_D < 35\%$ e $1 < C'_u < 3$	
		$O_{95}/d_{50} < 9/C'_u$	Para $I_D < 35\%$ e $C'_u > 3$	
		$O_{95}/d_{50} < 1.5C'_u$	Para $35\% < I_D < 65\%$ e $1 < C'_u < 3$	
		$O_{95}/d_{50} < 13.5/C'_u$	Para $35\% < I_D < 65\%$ e $C'_u > 3$	
		$O_{95}/d_{50} < 2C'_u$	Para $I_D > 65\%$ e $1 < C'_u < 3$	
Giroud (1982)	$k_{GT} > k_s$ e $k_{GT} > 10 k_s i_s$	$O_{95}/d_{50} < 18/C'_u$	Para $I_D > 65\%$ e $C'_u > 3$	
FHWA (1985)	$k_{GT} > C k_s$		Para $d_{50} > 0,074\text{mm}$ , $C_u < 2$ ou $C_u > 8$ e fluxo permanente.	
		$B = 1$		
		$AOS < B d_{85}$	$B = 0,5$	Para $d_{50} > 0,074\text{mm}$ , $2 < C_u < 4$ e fluxo permanente.
			$B = 8/C_u$	Para $d_{50} > 0,074\text{mm}$ , $4 < C_u < 8$ e fluxo permanente.
		$AOS < d_{15}$		Para $d_{50} > 0,074\text{mm}$ e fluxo dinâmico.
		$AOS < 1,8 d_{85}$		Para $d_{50} < 0,074\text{mm}$ e fluxo permanente.
Lafleur (1999)	$k_{GT} > 20 k_s$	$AOS < 0,5 d_{85}$	Para $d_{50} < 0,074\text{mm}$ e fluxo dinâmico.	
			$d_i = d_{85}$	Para $C_u \leq 6$ .
			$d_i = d_{50}$	Para $C_u > 6$ e granulometria linear.
		$FOS/d_i < 1$	$d_i = d_G$	Para $C_u > 6$ e $C_c > 3$ .
			$d_i = d_{30}$	Para $C_u > 6$ e granulometria côncava para cima.
	$1 < FOS/d_i < 5$	$d_i = d_{30}$	Para $C_u > 6$ e $C_c > 3$ e/ou granulometria côncava para cima.	

Notas: FOS é a abertura de filtração baseada no peneiramento hidrodinâmico (mm); AOS é a abertura de filtração aparente (mm);  $d_i$  e  $d_g$  correspondem, respectivamente, ao diâmetro característico e ao diâmetro mínimo da eventual descontinuidade granulométrica das partículas do solo adjacente ao geotêxtil (mm);  $C_u$  é o coeficiente de não-uniformidade do solo;  $C'_u$  é o coeficiente linear de uniformidade do solo, dado por  $(d'_{100}/d'_{10})^{0.5}$ ;  $I_D$  é a densidade relativa do solo;  $C_c$  é o coeficiente de curvatura do solo, dado por  $(d_{30})^2/(d_{60} \cdot d_{10})$ .

### 2.10.2.1 Critério de retenção

O critério de retenção para geotêxtil foi desenvolvido a partir dos critérios de filtração aplicados a materiais convencionais e com referência à extensivos estudos desenvolvidos em laboratório e experiências de campo. Para a função de retenção, o filtro deve reter as partículas de solo, ou seja, a abertura dos poros do filtro deve ser menor que um valor máximo especificado.

Os critérios empíricos para a retenção do solo com filtros granulares densos e uniformemente graduados podem ser expressos de acordo com a EQ. 2.6:

$$D_{15}/d_{85} < RR \quad (2.6)$$

Em que:  $D_{15}$  – dimensão característica do filtro tal que 15% das partículas têm dimensões inferiores;  $d_{85}$  – dimensão do solo de base tal que 85% das partículas têm dimensões inferiores;  $RR$  – razão de retenção.

A literatura indica valores de 4 a 5 para o valor de  $RR$  (razão de retenção), no sentido de garantir a compatibilidade entre o filtro e o solo. No caso de filtros executados com geotêxteis, a dimensão a considerar para a compatibilidade filtro/solo é a abertura de filtração do geotêxtil, considerada diretamente pela sua própria estrutura. Essa dimensão é definida como a dimensão aparente dos poros ( $O_i$ ), de maneira que o critério de retenção para os filtros de geotêxteis pode ser expresso conforme apresentado na EQ. 2.7:

$$O_{90}/d_i < RR \quad (2.7)$$

Em que:  $O_{90}$  – abertura de filtração do geotêxtil correspondente a 90% de passados;  $d_i$  – dimensão do solo de base tal que,  $i\%$  das partículas têm dimensões inferiores;  $RR$  – razão de retenção.

### 2.10.2.2 Critério de permeabilidade

Para a função de permeabilidade, o filtro deve ser permeável o bastante para possibilitar a passagem da água através do mesmo, implicando que a abertura dos poros do filtro deve ser maior que um valor mínimo especificado. O dimensionamento do filtro para o critério de permeabilidade é realizado de acordo com a EQ. 2.8:

$$D_{15}/d_{15} > 5 \quad (2.8)$$

Em que:  $D_{15}$  – dimensão característica do filtro tal que 15% das partículas têm dimensões inferiores;  $d_{15}$  – dimensão do solo de base tal que 15% das partículas têm dimensões inferiores.

Os filtros em geotêxteis, em especial os não tecidos, são geralmente mais permeáveis que os filtros granulares que tenham a mesma dimensão de poros. Assim, o filtro em geotêxtil não tecido, deve ser genericamente preferido ao filtro granular nas aplicações em que a permeabilidade é essencial (GIROUD, 2010).

O critério de permeabilidade para geotêxteis impõe uma relação entre as permeabilidades normais do geotêxtil ( $k_g$ ) e do solo ( $k_s$ ), de modo a que não sejam gerados excessos de pressão intersticial. Assim, a permeabilidade do geotêxtil deve ser superior à do solo, ainda mais se for verificada a compatibilidade em longo prazo (critério de colmatção) (PINTO 2005). Essa pode ser expressa pela EQ. 2.9:

$$k_g \geq c.k_s \quad (2.9)$$

Onde:  $c = 10$  para solos granulares ou geotêxteis não tecidos finos ( $t < 2$  mm);  $50 < c < 100$  para silte ou solos coesivos;  $c = 100$  para geotêxteis não tecidos espessos ( $t > 2$  mm).

### 2.10.2.3 Colmatação do geotêxtil

De acordo com Palmeira *et al.* (2005), a condição de colmatação de um geotêxtil ocorre quando os seus poros ou aberturas encontram-se de tal forma obstruídos que a passagem de água é impedida ou severamente limitada. Os mecanismos de colmatação que podem ocorrer são: colmatação física, colmatação química ou colmatação biológica.

Na Figura 2.29 (a) admite-se que uma grande proporção dos vazios do geotêxtil estaria preenchida por partículas de solo. Esta situação extrema é muito improvável, a menos de uma combinação muito desfavorável de condições de fronteira, relação entre dimensões de grãos de solo e de poros do geotêxtil e elevados níveis de tensões. Na Figura 2.29 (b) a colmatação do geotêxtil seria provocada pelo fechamento de suas aberturas superficiais.

Tal mecanismo seria mais aplicável a geotêxteis do tipo tecido e também, certamente, muito pouco provável de ocorrer com geotêxteis não tecidos. Já o mecanismo apresentado na Figura 2.29 (c), denominado cegamento do geotêxtil, mostra um comprometimento da sua capacidade em deixar passar a água em decorrência do acúmulo de pequenas partículas de solo sobre a sua superfície (PALMEIRA *et al.*, 2005).

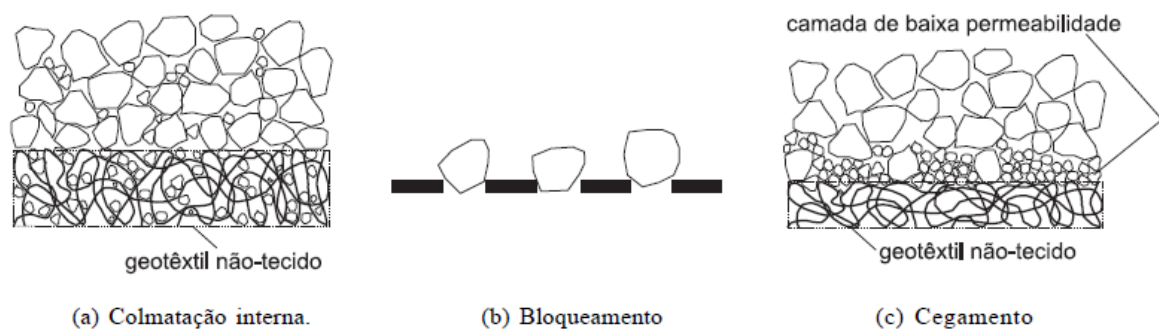


Figura 2.29 - Mecanismos de colmatação dos geotêxteis (PALMEIRA *et al.*, 2005)

A colmatação interna, ou *clogging*, consiste no acúmulo excessivo de partículas de solo nos poros do geotêxtil, o que impede o fluxo livre de água. Este impedimento pode ocorrer também devido à precipitação de substâncias químicas (sais) ou como resultado de atividade bacteriológica.

O bloqueamento superficial, ou *blocking*, as partículas de solo possuem dimensões muito próximas às dimensões dos poros dos geotêxteis, impedindo o fluxo de água.

O cegamento do filtro, ou *blinding*, ocorre quando o geotêxtil está em contato com solos internamente instáveis, onde se verifique a tendência para o movimento de pequenas partículas de solo, que ficam retidas na fronteira formada pelo geotêxtil e o solo. Esta acumulação tende a formar uma camada de baixa permeabilidade, que impede o fluxo de água. Segundo Muñoz (2005) este tipo de colmatação causa a formação de uma camada de baixa permeabilidade denominada “*cake*”, a qual pode levar a uma redução significativa da permeabilidade global do sistema solo/filtro.

### 2.10.3. Ensaio de filtração do tipo razão entre gradientes: Gradient Ratio (GR)

O ensaio de filtração é uma forma de se obter a compatibilidade entre o geotêxtil e o solo, além de avaliar o potencial de colmatação do filtro do geotêxtil. A utilização de geotêxteis como sistema drenante em obras de disposição de rejeitos e barragens é atualmente uma alternativa eficiente, tanto técnica quanto economicamente comprovada, devido aos resultados obtidos em diversas avaliações de laboratório (GARDONI, 2000; PALMEIRA e GARDONI, 2000; BEIRIGO, 2005).

Um dos métodos para avaliar a compatibilidade entre um filtro de geotêxtil e uma base de material granular é a utilização do *gradient ratio* (GR). A proposta do ensaio de GR mostra que o nível de colmatação do geotêxtil pode ser inferido a partir das medidas de gradientes hidráulicos em diferentes locais ao longo do sistema solo-geotêxtil no ensaio de filtração (GARDONI, 2000).

Na Figura 2.30 é apresentado esquematicamente o permeâmetro utilizado em ensaios de filtração do tipo razão entre gradientes (GR) proposto por Gardoni (2000).

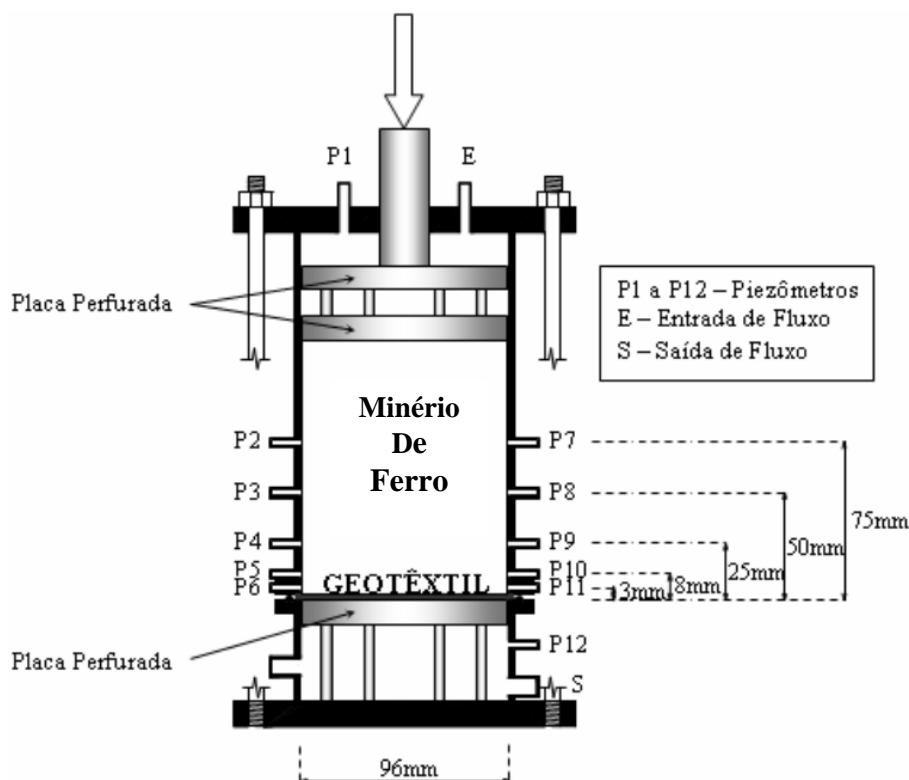


Figura 2.30 - Esquema do permeâmetro utilizado em ensaios de filtração do tipo razão entre gradientes (GR) (GARDONI, 2000 – modificado)

Normalmente, o valor do GR pode ser definido conforme apresentado na EQ. 2.10:

$$GR = i_{LG} / i_S \quad (2.10)$$

Em que: GR é o razão entre gradientes,  $i_{LG}$  é o gradiente hidráulico através de uma espessura de solo e o geotêxtil e  $i_S$  é a referência do gradiente hidráulico no solo, medido em uma região fora do geotêxtil.

Segundo ASTM (1991), a razão entre gradientes (GR) é definida conforme apresentado na EQ. 2.11:

$$GR_{ASTM} = i_{9/12} / i_{7/9} \quad (2.11)$$

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

hidráulico no solo ensaiado, medido ao longo do trecho compreendido entre 25 e 75 mm acima do nível do geotêxtil.

Fannin *et al.* (1994) introduz o conceito de razão entre gradientes modificado ( $GR_{MOD}$ ), definida em termos de interface mais próxima da amostra de geotêxtil (8mm), sendo definida pela EQ. 2.12:

$$GR_{MOD} = i_{10/12} / i_{7/9} \quad (2.12)$$

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

Gardoni (2000) propõe uma nova definição para a razão entre gradientes, em que o gradiente da interface solo-geotêxtil é definido numa região ainda mais próxima (3 mm) da interface, conforme apresentada na EQ. 2.13:

$$GR_{3mm} = i_{11/12} / i_{7/9} \quad (2.13)$$

Em que:  $i_{11/12}$  = gradiente hidráulico entre os piezômetros 11 e 10, no trecho da amostra incluindo o geotêxtil e a camada de 3 mm do solo imediatamente acima.

Valores elevados de GR podem indicar colmatção do sistema, enquanto valores muito baixos podem indicar a ocorrência de *piping*. Segundo ASTM (1991) um valor de GR unitário indica que a presença do geotêxtil não está afetando o regime de fluxo do sistema e valores de GR acima de um são indicativos de algum nível de colmatção do sistema.

De acordo com Beirigo *et al.* (2006), além da condutividade hidráulica, o acompanhamento da variação da vazão pode auxiliar na avaliação dos resultados dos ensaios.

#### 2.10.4. Ensaio especiais com aplicação de vácuo

Ferreira (2009) realizou ensaios especiais com aplicação de vácuo, com a utilização do mesmo equipamento usado para fazer os ensaios de GR. Nesses ensaios, foi aplicado vácuo na região inferior do corpo de prova e o objetivo principal foi a redução de umidade do minério de ferro. Os ensaios foram realizados com dois tipos de geotêxtil e dois tipos de geocompostos. Os resultados mostraram redução de umidade da ordem de 50%. Na Figura 2.31 é apresentado o ensaio especial de redução do teor de umidade do minério de ferro realizado por Ferreira (2009).



Figura 2.31 - Ensaio especial de redução de umidade em minério de ferro (FERREIRA, 2009)

#### 2.10.5. Ensaio de abrasão Amsler

O ensaio de abrasão consiste em desagregar a superfície e remover partículas de um determinado material submetido a forças de atrito, sendo muito utilizado em rochas ornamentais para mensurar o comportamento de uma determinada rocha a ser utilizada em revestimento de pisos. O valor obtido tem significado apenas relativo. O processo mais comum para determinação do desgaste abrasivo é o uso da máquina Amsler, apresentada na Figura 2.32.



Figura 2.32 - Máquina utilizada para o ensaio de Abrasão Amsler

Na Figura 2.33 é apresentado um desenho esquemático do equipamento para o ensaio de abrasão Amsler. Ribeiro (2010) apresenta maiores detalhamentos sobre o ensaio de abrasão em rochas.

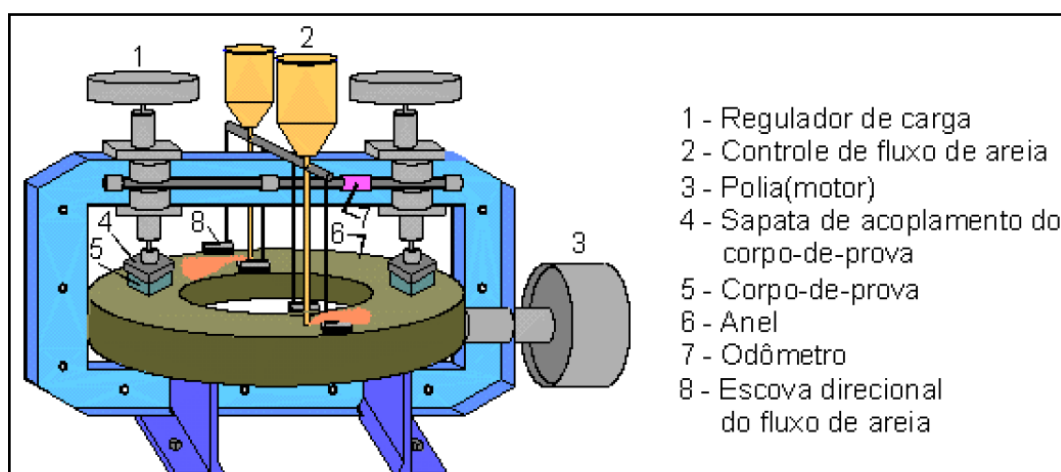


Figura 2.33 - Desenho esquemático da máquina para a realização do ensaio de Abrasão Amsler (RIBEIRO, 2010)

Com a necessidade de estimar o desgaste por abrasão de geossintéticos para sua implantação em sistemas de drenagem de vagões ferroviários e correias de transporte de

minérios de ferro, observou-se a possibilidade de alcançar boas estimativas de desgaste em geossintéticos utilizando do ensaio Amsler com algumas alterações, devido às propriedades do material ensaiado.

Por ser um ensaio novo, não há uma norma que o regulamente. Dessa maneira, foi desenvolvida uma metodologia de ensaios a partir de critérios gerados de vários testes e da norma de Determinação de Desgaste por Abrasão (NBR 12042, 1992 (a)). Esses critérios serão apresentados no tópico de metodologia de ensaios.

#### 2.10.4.1 Ensaio Amsler para Rochas Ornamentais

Este ensaio é regido pela norma NBR 12042 (ABNT, 1992 (a)) e ASTM D4886 (ASTM, 1988), que prescreve o método para a determinação do desgaste por abrasão de rochas ornamentais por meio do atrito entre sua superfície de uso e a superfície do anel de ferro fundido, que é continuamente abastecido com material abrasivo, no caso, areia quartzosa normatizada. O desgaste por abrasão é determinado pela perda de espessura do corpo de prova. A Figura 2.34 apresenta um desenho esquemático do equipamento.

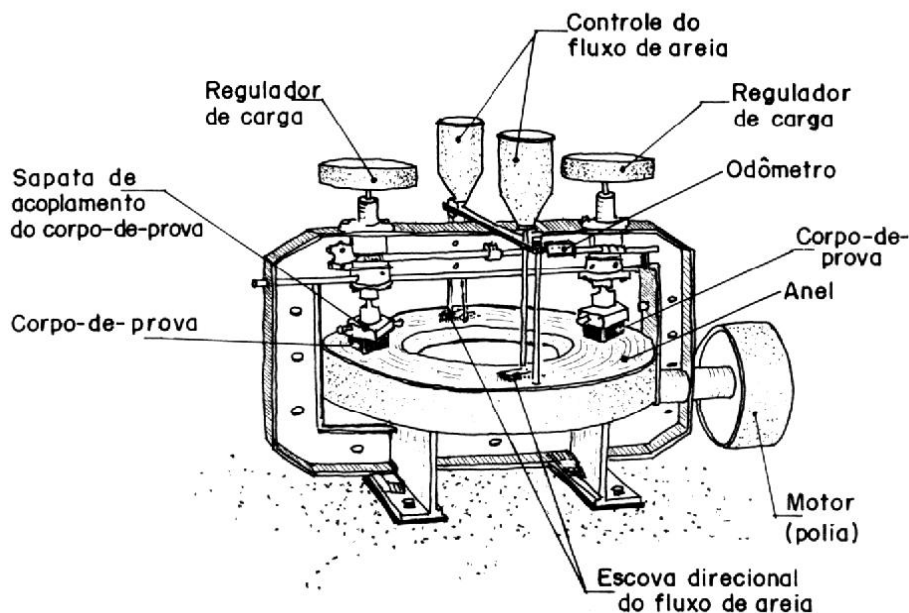


Figura 2.34 - Esquema do equipamento Amsler (ABNT, 1992 (a))

O dispositivo para medida da perda de espessura, composto por chapa metálica provida de dois apoios laterais, perpendiculares entre si, três pinos para apoio do corpo de prova e relógio comparador, fixado à garra magnética, é mostrado na Figura 2.35.

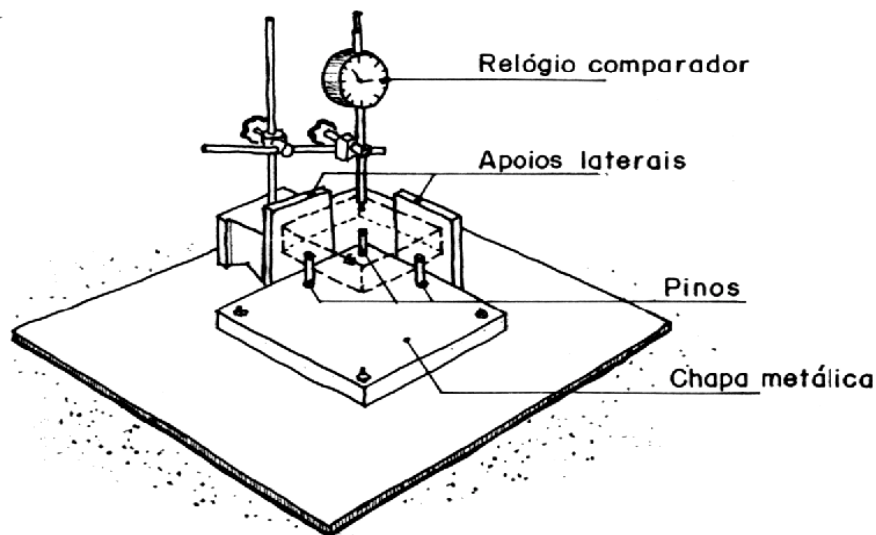


Figura 2.35 - Dispositivos de medida para a perda de espessura (ABNT, 1992 (a))

A execução do ensaio é realizada com corpos de prova a forma de paralelepípedo regular, com lados de base medidos  $(70 \pm 2)$  mm e altura entre 25 e 50 mm. Com auxílio do dispositivo apresentado na Figura 2.35 são efetuadas leituras iniciais de espessura do corpo de prova e é calculada a sua média. Aplica-se sobre cada corpo de prova uma carga de 66N. Antes de ligar a máquina, regula-se à vazão de areia em  $(72 \pm 6)$  cm<sup>3</sup>/min.

Coloca-se o equipamento em funcionamento, até que se obtenha 250 voltas, que equivalem a um percurso dos corpos de prova em relação ao anel de aproximadamente 500 m. Deve-se medir novamente a espessura, sendo esta leitura a intermediária. Após a leitura reinicia-se o equipamento, mas invertendo a posição os corpos de prova nas sapatas de acoplamento.

Terminado o novo percurso de aproximadamente 500 m, medem-se as espessuras e calcula-se a média para obter a leitura final. Os resultados relativos a 500 m e a 1000 m de percurso são obtidos respectivamente pela diferença entre a leitura final e a leitura intermediária, e pela diferença entre a leitura final e a leitura inicial.

## 2.11. Análise computacional

A modelagem computacional é a técnica que se baseia na utilização de um software para ajustar e validar modelos conceituais de processos observados em vários campos de estudo. O modelo conceitual é formado a partir da relação entre um conjunto de observações e uma série de hipóteses e aproximações. A validação é possível quando o modelo proposto, baseado nas hipóteses e aproximações, produz resultados calculados mais próximos possíveis dos resultados observados. Após a calibração do modelo computacional são possíveis simulações numéricas para aplicação do modelo na avaliação de outros processos semelhantes e em diversificadas condições de contorno.

O desenvolvimento da modelagem numérica deve começar com a definição de quais dados ele deve gerar e posteriormente devem ser definidas as simplificações, aproximações e hipóteses relacionadas ao processo que se pretende validar. A etapa seguinte é a definição das condições de contorno que serão estudadas e parâmetros a serem inseridos para a resolução numérica dessas diferentes situações de campo, possibilitando, dessa maneira, uma posterior interpretação dos resultados.

Para avaliação experimental da distribuição de umidade em minério de ferro, pôde-se utilizar a modelagem numérica para análise do comportamento da água em meios porosos. Os parâmetros para análise numérica de testes de coluna que simulam o fluxo de água no minério, obtidos por meio de medidores de umidade, medidores de temperatura e tensiômetros foram analisados com o auxílio do software VADOSE/W, desenvolvido pela *GEOSTUDIO INTERNATIONAL LTDA*. Trata-se de um programa que utiliza o método dos elementos finitos, em situações bi-dimensionais, que simula o fluxo em meios porosos não saturados.

Dois estudos recentes que utilizaram de forma satisfatória o software para avaliação de fluxos em meios não saturados foram os trabalhos de Santos (2009) e Santos (2010). O primeiro utilizou o VADOSE/W na modelagem das diversas camadas do solo de um aterro em estudo e o segundo utilizou o programa computacional na complexa modelagem dos muitos problemas de transporte de contaminante em água subterrânea.

O mesmo software foi utilizado por Triane (2010) em sua modelagem para simulação do o balanço hídrico de uma cobertura de rejeito de mineração. Pelo programa mais os dados de instrumentação de campo foi constatada a eficácia do uso da barreira capilar dupla como material de cobertura na região estudada, por meio da diminuição do fluxo de água e oxigênio para dentro do rejeito, tanto em período seco quanto no úmido, apresentando um bom desempenho para a mitigação dos efeitos da drenagem ácida de minas.

Amorim (2008) e Ribeiro (2011) utilizaram o VADOSE/W para avaliar a eficiência de sistemas de cobertura em minas a partir de resultados obtidos em ensaios experimentais de campo. Com o auxílio do software, estudaram o balanço hídrico dos sistemas de cobertura (precipitação, escoamento superficial, evapotranspiração e infiltração) e avaliaram os perfis de umidade ao longo do tempo.

Outro software foi utilizado por Abrão e Marinho (2004) para a avaliação de dispositivos de drenagem em base de pilhas de minério de ferro. As análises numéricas do fluxo em meio não saturado foram executadas com o auxílio do software HYDRUS 2D. Os resultados mostraram que a existência de um sistema de drenagem é importante quando o objetivo é a redução de umidade do minério de ferro durante a estocagem do material. Nos estudos realizados foi considerada uma pilha de minério com altura de 20 m e base de 56 m. Na primeira condição (C=0) foi analisada a condição de ausência de sistemas de drenagem na base da pilha. Na segunda condição analisada (C=28) foi considerada a existência de um dreno centralizado de 28 m de comprimento. E por fim, a última alternativa foi a análise do sistema de drenagem em toda a extensão da base da pilha de minério de ferro. Na Figura 2.36 são apresentados os resultados obtidos por Abrão e Marinho (2004).

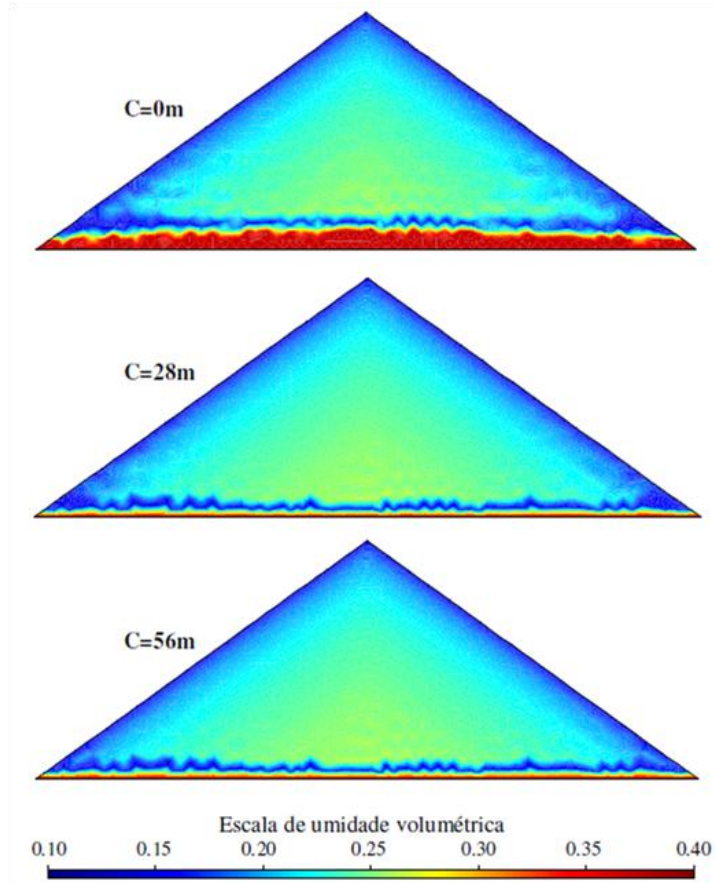


Figura 2.36 - Umidade das pilhas de minério na simulação, após 10 dias (ABRÃO e MARINHO, 2004)

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e a metodologia utilizada na realização dos ensaios. Inicialmente foram realizados ensaios de caracterização dos geossintéticos e do minério de ferro. Para este, além dos ensaios de caracterização, foram realizados estudos para avaliar as condições de estabilidade interna do material pelas 3 metodologias – Sherard (1979), Kenney e Lau (1985) e Lafleur (1999). Ensaios de filtração do tipo razão entre gradientes (GR) foram realizados para verificar o desempenho dos geossintéticos como materiais filtro-drenantes. Ainda no equipamento dos ensaios de filtração, foram realizados ensaios especiais de secagem com a utilização de vácuo para acelerar o processo. A avaliação do desgaste abrasivo dos materiais sintéticos foi verificada por meio dos ensaios de abrasão Los Angeles e Amsler. O ensaio de secagem utilizando lisímetro de laboratório foi realizado para avaliar as condições de temperatura, umidade e sucção com o tempo, procurando identificar a influência da sucção na taxa de evaporação. Esses parâmetros foram acompanhados por meio de instrumentação instalada no equipamento (tensiômetros, medidores de umidade e termopares). Os ensaios de coluna possibilitaram avaliar os perfis de sucção, umidade e temperatura do minério de ferro com a profundidade. Assim como no ensaio do lisímetro, a coluna também foi instrumentada. Finalmente, com o auxílio do *software* VADOSE/W, buscou-se analisar computacionalmente os resultados obtidos, objetivando o emprego da análise nas condições de campo.

#### 3.1. Materiais

##### 3.1.1. Minério de ferro – Sinter Feed (SFCJ)

O material utilizado nos ensaios foi o minério de ferro *sinter feed*, aqui representado por SFCJ, produzido pela companhia VALE S.A.. O SFCJ é o minério de ferro mais comercializado atualmente. Ele é o resultado de um processo de britagem, o qual permite uma maior concentração de teor de ferro.

### 3.1.1.1. Microscopia eletrônica do minério de ferro (SFCJ)

Na Figura 3.1 é apresentada uma visão microscopia da estrutura do *sinter feed* passando pela peneira #100 (0,15 mm). Pode ser observada uma grande variabilidade de tamanho das partículas, desde partículas muito grandes até partículas muito fina. Observam-se partículas sólidas com planos bem definidos, mas também a existência de material lamelar e de formas irregulares, além de material muito fino aglomerado nas partículas maiores.

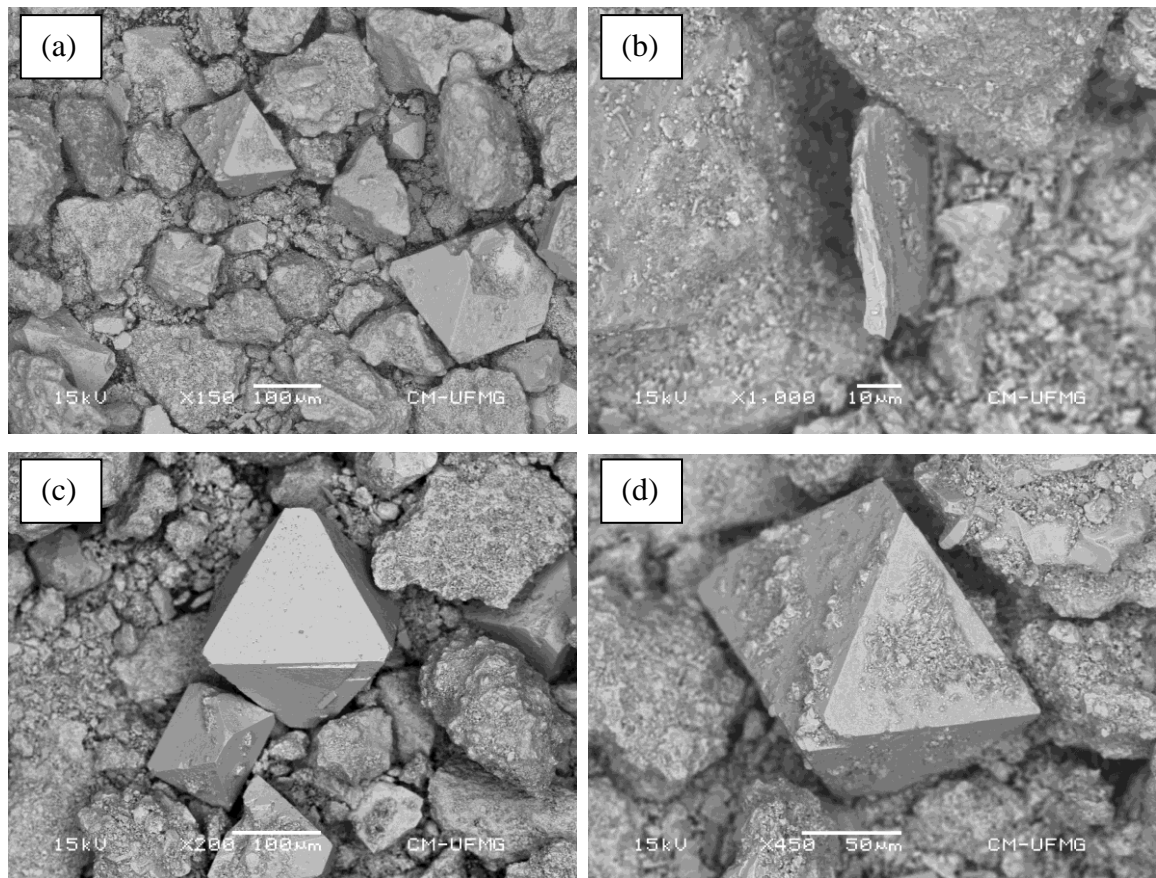


Figura 3.1 - Característica granulométrica do SFCJ passando pela peneira #100: a) partículas com formas geométricas bem definidas; b) material lamelar; c) planos bem definidos e formato octogonal das partículas; d) partículas finas impregnadas em partículas maiores

### 3.1.1.2. Estudos realizados com minério de ferro (SFCJ)

Na Tabela 3.1 são apresentados os ensaios realizados com o minério de ferro (SFCJ).

Tabela 3.1 - Resumo dos estudos realizados com o minério de ferro (SFCJ)

<b>Material</b>	<b>Código</b>	<b>Estudos realizados</b>
Minério de ferro ( <i>sinter feed</i> )	SFCJ	- ensaios de caracterização
		- estabilidade interna do minério
		- ensaios de secagem com lisímetro
		- ensaios de secagem com coluna

### 3.1.1.3. Estabilidade interna do minério de ferro (SFCJ)

Os estudos do potencial à instabilidade interna do minério de ferro foram realizados com o auxílio das metodologias propostas por Sherard (1979), Kenney e Lau (1985) e Lafleur *et al.* (1989), conforme apresentado no capítulo anterior.

Seguindo a metodologia proposta por Sherard (1979), a granulometria minério de ferro foi dividida em três conjuntos de duas frações, uma fração fina e uma fração grossa. Nesta divisão optou-se por porcentagens tomadas como representativas de solos em projetos de filtração na literatura (BEIRIGO, 2005). Dessa maneira, a amostra do SFCJ foi dividida em conjunto de frações: mais fina que 15% e mais grossa que 15% da amostra total; mais fina que 30% e mais grossa que 30% da amostra total; e mais fina que 50% e mais grossa que 50% da amostra total. A partir dessa divisão, cada uma das frações mais grossas foi verificada como filtro da respectiva fração mais fina, de maneira que  $D_{15G}/d_{85F} < 5$  para materiais internamente estáveis.

A partir da metodologia proposta por Lafleur *et al.* (1989), a definição das condições de estabilidade interna do minério de ferro foi obtida por meio da comparação com modelos de curvas granulométricas típicas. A metodologia proposta por Kenney e Lau (1985) para avaliar a condição de estabilidade interna do minério de ferro de ferro foi descrita detalhadamente no item 2.4.

### 3.1.2. Geossintéticos

Os geossintéticos utilizados, tanto nos ensaios de razão entre gradientes (GR) quanto os ensaios especiais de secagem com vácuo, constituem amostras limpas (virgens), fornecidos pela empresa Maccaferri e apresentados na Figura 3.2:

- ✓ Geotêxteis não-tecidos agulhados produzidos com fibras de poliéster, com gramatura de 400 e 600g/m<sup>2</sup>;
- ✓ MacDrain R.2: geocomposto drenante cujo núcleo é formado por uma georrede composta de polietileno de alta densidade, em formato de malha, fabricada por meio da sobreposição de uma dupla série de fios paralelos. A georrede é termo-soldada em seus pontos de contato a dois geotêxteis não-tecidos de poliéster;
- ✓ MacDrain 2L 20.2: geocomposto com núcleo drenante de geomanta tridimensional, composta por filamentos de polipropileno e termo-soldada entre dois geotêxteis não-tecidos de poliéster nos pontos de contato.

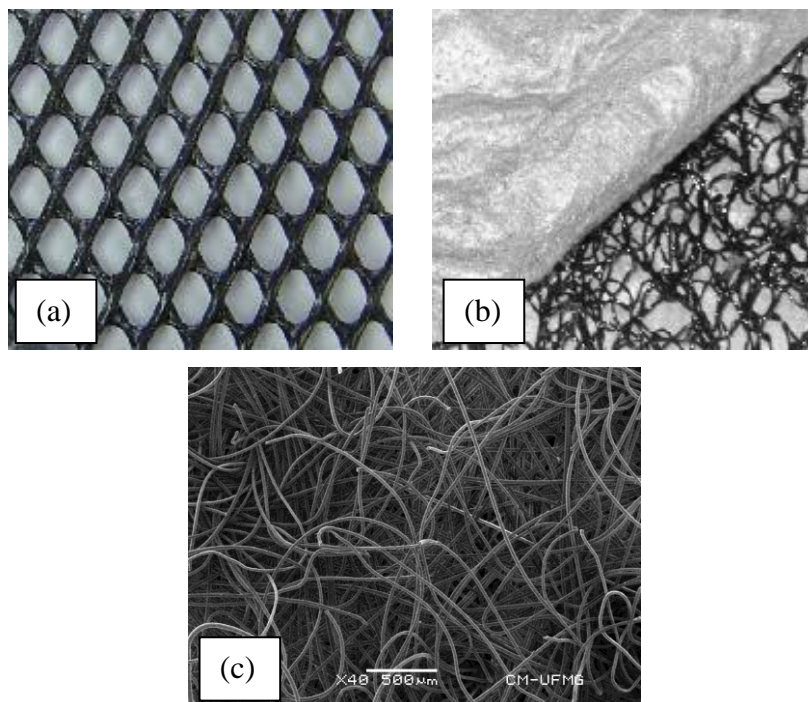


Figura 3.2 - Geossintéticos utilizados na pesquisa: a) Geocomposto com núcleo de georrede; b) Geocomposto com núcleo de geomanta; c) Geotêxtil não-tecido

Na Tabela 3.2 são apresentadas as principais características dos geotêxteis não tecido utilizado nos ensaios.

Tabela 3.2 - Propriedades dos geotêxteis não-tecido utilizados nos ensaios (Maccaferri, 2011)

<b>MacTex N – Geotêxtil agulhado produzido com fios de poliéster</b>				
<b>Propriedades</b>			<b>N 40.2</b>	<b>N 60.2</b>
Resistência longitudinal à tração (faixa larga)	kN/m	ABNT NBR 12824	10	16
Alongamento longitudinal (faixa larga)	%	ABNT NBR 12824	50-65	50-65
Resistência transversal à tração (faixa larga)	kN/m	ABNT NBR 12824	9	14
Alongamento transversal (faixa larga)	%	ABNT NBR 12824	60-75	60-75
Resistência longitudinal à tração (Grab Test)	N	ASTM D 4632	750	1115
Alongamento longitudinal (Grab Test)	%	ASTM D 4632	>60	>60
Resistência transversal à tração (Grab Test)	N	ASTM D 4632	660	980
Alongamento transversal (Grab Test)	%	ASTM D 4632	>70	>70
Resistência ao puncionamento	N	ASTM D 4833	380	550
Resistência ao puncionamento – CBR	kN	ABNT NBR 13359	2	3,1
Resistência longitudinal ao rasgo trapezoidal	N	ASTM 4533	300	440
Resistência transversal ao rasgo trapezoidal	N	ASTM 4533	270	400
Gramatura	g/m <sup>2</sup>	ASTM D 5261	400	600
Permeabilidade normal	cm/s	ASTM D 4491	0,35	0,35
Permessividade	s <sup>-1</sup>	ASTM D 4491	2	1,5
Fluxo de água	l/s/m <sup>2</sup>	ASTM D 4491	100	75
Abertura aparente mínima de filtração	mm	ASTM D 4751	0,13	0,11
Abertura aparente máxima de filtração	mm	ASTM D 4751	0,23	0,19

Na Tabela 3.3 são apresentadas as principais características do geocomposto drenante com núcleo de georrede utilizado nos ensaios.

Tabela 3.3 - Propriedades do geocomposto drenante MacDrain R.2 utilizado nos ensaios (Maccaferri, 2011)

<b>MacDrain R.2 – Geocomposto drenante com núcleo de georrede</b>				
<b>Georrede</b>		<b>PEAD<sup>(1)</sup> estabilizado</b>		
<b>Geotêxtil</b>		<b>Poliéster (PET)</b>		
		<b>2R5</b>		
Propriedades mecânicas do geocomposto			20.2	40.2
Resistência longitudinal à tração	kN/m	ISO 10319	7,0	9,0
Alongamento longitudinal	%	ISO 10319	30	30

<b>MacDrain R.2 – Geocomposto drenante com núcleo de georrede</b>				
<b>Georrede</b>	<b>PEAD<sup>(1)</sup> estabilizado</b>			
<b>Geotêxtil</b>	<b>Poliéster (PET)</b>			
Propriedades hidráulicas				
Geocomposto				
Transmissividade	m <sup>2</sup> /s	ASTM D 4716	0,40	0,28
Geotêxtil				
Permeabilidade	cm/s	ASTM D 4491	1,1x10 <sup>-1</sup>	0,35
Abertura de filtração do geotêxtil	mm	AFNOR G 38017	0,145	0,23
Propriedades físicas				
Geocomposto				
Gramatura	g/m <sup>2</sup>	ISO 9864	950	1150
Espessura	mm	ISO 9863	6,4	8,2
Geotêxtil				
Gramatura	g/m <sup>2</sup>	ASTM NBR 12569 ASTM D 5199	100	200
Espessura	mm	ASTM NBR 12569 ASTM D 5199	0,7	1,6

Na Tabela 3.4 são apresentadas as principais características do geocomposto drenante com núcleo de geomanta utilizado nos ensaios.

Tabela 3.4 - Propriedades do geocomposto drenante MacDrain 2L 20.2 utilizado nos ensaios (Maccaferri, 2011)

<b>MacDrain 2L 20.2 – Geocomposto drenante com núcleo de geomanta</b>												
<b>Capacidade de vazão</b>												
ASTM D 4716	Drenagem Horizontal										Drenagem Vertical	
	i = 0,01		i = 0,02		i = 0,03		i = 0,10		i = 0,50		i = 1,00	
Gradiente Hidráulico												
Pressão	l/s.m	l/h.m	l/s.m	l/h.m	l/s.m	l/h.m	l/s.m	l/h.m	l/s.m	l/h.m	l/s.m	l/h.m
10 kPa	0,64	2340	0,70	2556	0,77	2772	1,26	4536	2,17	7848	2,84	10224
20 kPa	0,23	828	0,29	1080	0,33	1224	0,74	2700	1,54	5544	2,17	7848
50 kPa	0,11	432	0,14	540	0,17	648	0,41	1476	0,85	3096	1,35	4860
100 kPa	0,04	144	0,05	180	0,06	216	0,12	432	0,26	936	0,41	1512
200 kPa	0,02	72	0,02	72	0,02	108	0,04	144	0,08	324	0,13	468

Propriedades Mecânicas			Geocomposto		Geotêxtil	
			Direção longitudinal	Direção transversal	Direção longitudinal	Direção transversal
Resistência a tração	kN/m	ABNT NBR 12824	14,21	8,57	5,26	2,92
		ASTM D 4595				
Deformação na ruptura	%	ABNT NBR 12824	33,23	37,33	37,38	36,26
		ASTM D 4595				
Puncionamento	N	ABNT NBR 12824			602,5	
Características físicas			Geocomposto		Geotêxtil	
Espessura	mm	ASTM D 4632	11,0		0,7	
Gramatura	g/m <sup>2</sup>	ASTM D 4632	700		100	

A escolha de geotêxteis não tecidos se deu por possuírem permeabilidade que garante o eficiente escoamento da água através de sua estrutura, podendo substituir com vantagens técnicas, econômicas, construtivas e de durabilidade os tradicionais filtros granulares, que compõem diversos sistemas drenantes. Eles são constituídos por uma distribuição aleatória das fibras, cujo processo de solidarização geralmente utilizado é a agulhagem. A espessura, da ordem de milímetros, permite ao geotêxtil filtrar e conduzir fluidos em seu plano, simultaneamente.

Para facilitar o entendimento e discussão dos resultados apresentados nos itens posteriores, na Tabela 3.5 é apresentada a nomenclatura utilizada para os materiais sintéticos empregados nos ensaios.

Tabela 3.5 - Propriedades dos geossintéticos utilizados

Tipo	Código	Estrutura	Tipo de Geossintético
Geotêxtil	GA	Não tecido, agulhado, de filamentos contínuos	Geotêxtil não tecido com gramatura de 400 g/m <sup>2</sup>
	GB		Geotêxtil não tecido com gramatura de 400 g/m <sup>2</sup>
Geocomposto	Gm	Geotêxtil com núcleo de geomanta	Geocomposto com núcleo drenante de geomanta
	Gr	Geotêxtil com núcleo de georrede	Geocomposto com núcleo drenante de georrede

## 3.2. Caracterização e amostragem dos geossintéticos

### 3.2.1. Amostragem aleatória estratificada

No estudo dos geossintéticos utilizados neste trabalho, objetivando analisar a variação da distribuição espacial da gramatura, utilizou-se o procedimento estatístico de amostragem aleatória estratificada, conforme metodologia proposta por GARDONI (2000).

Primeiramente houve a divisão de toda a manta em áreas de 1,0 m<sup>2</sup>, onde foram realizadas escolhas aleatórias de pontos para a retirada das amostras. Em seguida as amostras foram pesadas para a obtenção da gramatura e, por fim, submetidas à medição da espessura. Na Figura 3.3 é apresentado o processo para a obtenção das amostras com os geossintéticos.



Figura 3.3 - Amostragem aleatória estratificada do geossintético para obtenção das amostras

### 3.2.2. Determinação da espessura e gramatura do geotêxtil

O ensaio para a determinação da gramatura dos geotêxteis foi feito de acordo com a norma NBR 12568 (ABNT, 1992 (b)). Após a definição aleatória das unidades extraídas da manta, realizou-se a medição da espessura de cada amostra com o auxílio de duas placas de acrílico. Os valores foram obtidos com o auxílio de um paquímetro digital, onde foram realizadas 3 (três) medições, objetivando minimizar possíveis erros de leitura e no manuseio das amostras e equipamentos. Na Figura 3.4 são apresentados o paquímetro digital e as placas de acrílico utilizadas para a obtenção da espessura.



Figura 3.4 - Equipamentos utilizados para obtenção da espessura do geossintético

### 3.2.3. Resistência à abrasão dos geossintéticos

Os ensaios de resistência à abrasão foram realizados para avaliar as condições de trabalhabilidade dos materiais sintéticos juntamente com o minério de ferro (SFCJ).

#### 3.2.3.1 Ensaio de abrasão Los Angeles

Este ensaio consiste em determinar o desgaste por abrasão de um agregado com o emprego do equipamento Los Angeles (Figura 3.5). O desgaste é obtido com o uso de cargas abrasivas (esferas de aço) que são atritadas com o agregado enquanto a máquina gira a uma determinada velocidade estipulada pela norma NBR NM 51 (ABNT, 2001).

O dano mais grave para as funções de filtração/separação é aquele que altera a dimensão característica dos poros do geossintético, ou seja, os cortes e as perfurações na superfície do material. Neste sentido, uma das características mais relevantes para este dano é a forma do material granular que lhe vai ficar subjacente, isto é, do tipo angular ou esférico.



Figura 3.5 - Máquina Los Angeles e as cargas abrasivas

O ensaio prescrito pela norma mostra que os resultados de abrasão são obtidos a partir da EQ. 3.1.

$$A = [(P - P') / P] \cdot 100 \quad (3.1)$$

Em que:  $A$  é o desgaste do material por abrasão, com aproximação de 1%;  $P$  é o peso total da amostra, antes do ensaio;  $P'$  é o peso do material após o ensaio.

Os ensaios de Abrasão Los Angeles foram realizados nos geocompostos com núcleo de georrede e com núcleo de geomanta, em amostras com dimensões da ordem de 10 cm de largura por 20 cm de comprimento. Na Figura 3.6 é apresentado o tipo de amostra utilizada para os ensaios.



Figura 3.6 - Amostra antes do início do ensaio

As amostras foram colocadas no equipamento Los Angeles junto com as cargas abrasivas, sendo realizadas 500 revoluções do tambor, com uma velocidade de 30 a 33 r.p.m, conforme pode ser observado na Figura 3.7.



Figura 3.7 - Amostras dentro do tambor e marcador de revoluções

### 3.2.3.2 Ensaio de abrasão Amsler

Os ensaios de abrasão Amsler com geossintéticos seguiu a norma NBR 12042 (ABNT, 1992 (a)) com algumas adequações nos procedimentos do ensaio uma vez que este ensaio é próprio para rochas ornamentais.

Apesar de ter normatização da ABNT, os ensaios de abrasão em geossintéticos não foram efetuados no Brasil até o momento, e nenhuma instituição de pesquisa ou laboratório de ensaios possui o equipamento especificado pela norma. Dessa maneira, o grupo de pesquisa da UFMG concluiu por utilizar o equipamento existente no laboratório da Engenharia de Minas, com algumas adequações orientadas pela norma de ensaios de abrasão para geossintéticos. Uma das adequações realizadas foi efetuar o ensaio rodando-o em 70 giros do equipamento e submetendo-o a uma carga igual ao peso da haste de sustentação das sapatas de acoplamento, correspondente a uma tensão normal de 19,6 N. Na Figura 3.8 é apresentada uma amostra pronta para a realização do ensaio.

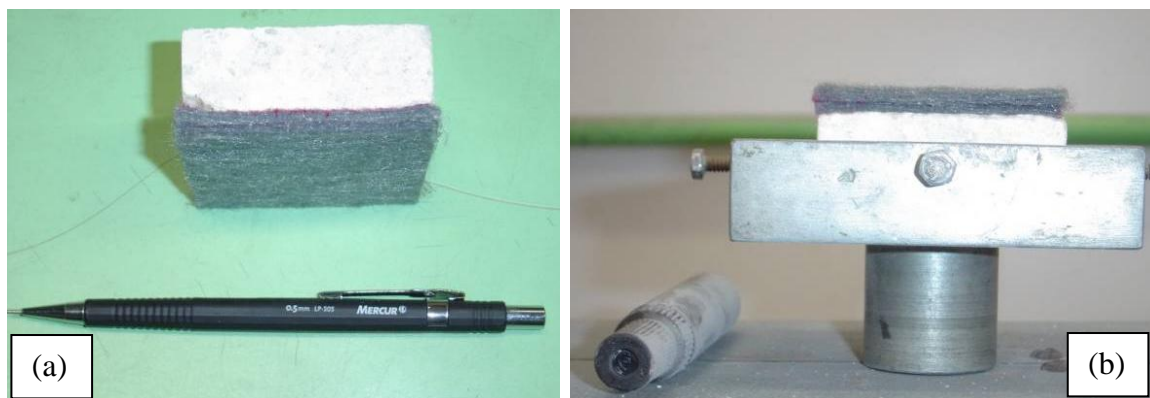


Figura 3.8 - Amostras de geotêxtil prontas para o ensaio Amsler. (a) amostra de geotêxtil colada ao bloco de rocha (b) bloco e amostra dentro da caixa de ensaio

A amostra de geotêxtil submetida ao desgaste foi afixada com resina Epóxi em corpos de prova de rochas ornamentais, sendo duas amostras de geotêxtil por corpo de prova. A primeira amostra foi colada com resina epóxi ao corpo de prova de rocha e a segunda amostra de geotêxtil, que foi submetida ao desgaste por abrasão, colada a primeira sem, contudo, permitir ser afetada pela resina.

O geotêxtil em contato com a rocha foi embebido com resina epóxi de maneira que o geossintético a ser avaliado não fosse prejudicado pelo endurecimento da resina. As medidas de espessuras foram obtidas por um paquímetro digital, segundo a norma NBR 12042 (ABNT, 1992 (a)). Estas medidas foram realizadas antes e depois do ensaio com tensão atuante de 5,45 kPa, tendo em vista ser o geossintético um material bastante compressível. Esta é a tensão que o geotêxtil é submetido durante a realização do ensaio.

Ensaio testes foram realizados utilizando o SFCJ no lugar de areia como material abrasivo, buscando representar a situação de campo no contato entre o minério de ferro e o geossintético. Esta análise visa simular a situação de vibração do minério de ferro nos vagões durante o transporte do material da planta da mineradora em Carajás até o porto de São Luís/MA. No entanto, durante a execução dos ensaios, verificou-se um acúmulo de minério na superfície de contato do geotêxtil com anel de ferro fundido, formando uma camada pastosa na superfície do material sintético devido à alta umidade do minério, o que impossibilitou o desgaste do espécime, conforme pode ser observado na Figura 3.9.

Uma vez que a camada de material formada na superfície do material sintético não possibilitou a avaliação real do desgaste ocorrido, foi necessário avaliar uma nova alternativa para a realização dos ensaios de abrasão Amsler com a utilização do minério de ferro.



Figura 3.9 - Acúmulo de minério no geotêxtil

Assim, optou-se por ensaiar apenas a fração mais fina do minério passando pelas aberturas do dreno de poliuretano, uma vez que o geotêxtil provavelmente não entrará em contato

direto com o material mais grosseiro do minério, quando instalado no sistema de drenagem, uma vez que a VALE S.A. pretende manter os drenos de poliuretano (Figura 3.10 (a)) juntamente com os geossintéticos.

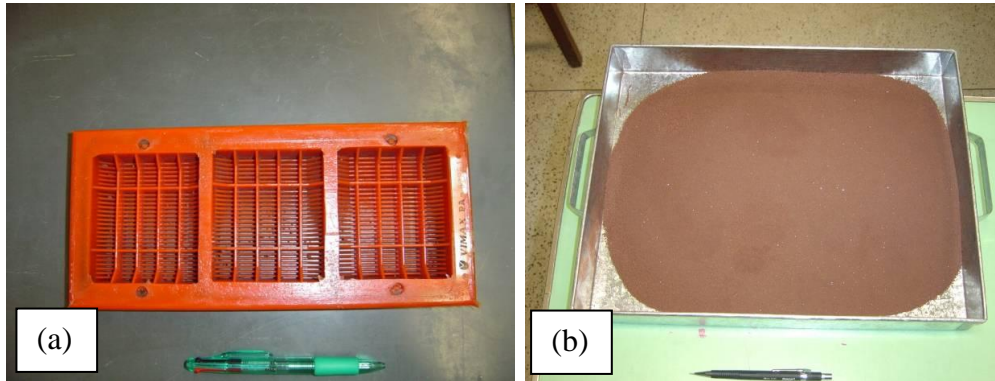


Figura 3.10 - (a) Dreno de poliuretano utilizado pela Vale; (b) minério de granulometria equivalente ao passante pelo dreno de poliuretano

Um dos inconvenientes na utilização conjunta dos dois dispositivos é o acúmulo de material fino que ocorrerá no geossintético, uma vez que, a passagem de material pelo dreno ainda é considerável. Na Figura 3.11 e Figura 3.12 é apresentada a execução do ensaio de abrasão Amsler com a areia padrão do IPT e com o minério de ferro, respectivamente.

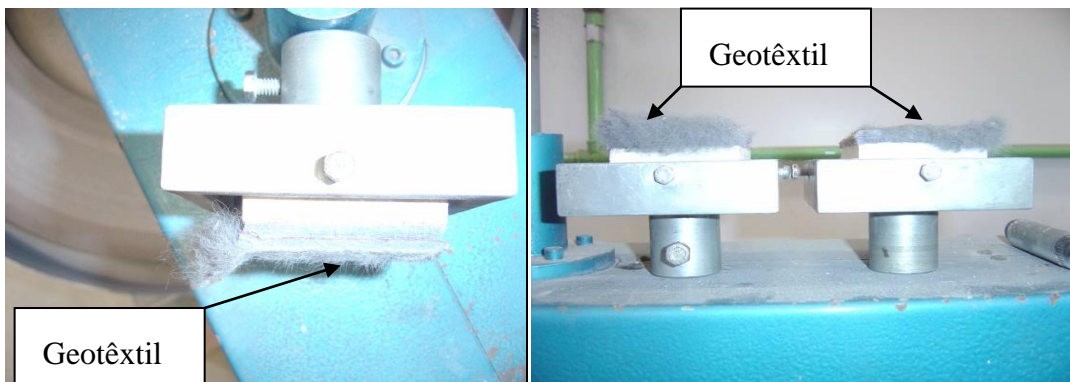


Figura 3.11 - Execução do ensaio de Abrasão Amsler com areia padrão do IPT



Figura 3.12 - Execução do ensaio de Abrasão Amsler com o minério CFCJ

### 3.3. Ensaio de secagem

Nestes ensaios, foram utilizados dois tipos de lisímetros monitorados por tensiômetros, medidores de temperatura (termopares) e medidores de umidade posicionados no interior da massa de minério de ferro. O primeiro deles consistiu de uma coluna em acrílico de 1,50 m formada por segmentos, conforme apresentado na Figura 3.13, onde são apresentados os locais de instalação dos instrumentos. A montagem do ensaio foi feita por recipientes e consistiu na colocação do minério dentro da coluna ao mesmo tempo em que são acondicionados os equipamentos para a instrumentação do ensaio.

Outro tipo de lisímetro utilizado foi formado por um cilindro metálico de 37 cm de profundidade e diâmetro de 36 cm com um fundo frisado e com uma saída ao centro e um flange que serviu para fixar o cilindro ao fundo. O cilindro foi posicionado sobre uma balança de plataforma com capacidade de 300 kg durante o ensaio, a qual foi o principal indicador do balanço de massa de água.

O ensaio de secagem teve seu processo acelerado com a utilização de lâmpadas halógenas incidindo sobre a amostra de minério, o que possibilitou a variação da temperatura incidente no corpo de prova.

Durante o ensaio foi realizado o monitoramento da variação de sucção, temperatura e umidade em vários pontos ao longo da coluna de minério.

✓ Taxa de evaporação

A taxa de evaporação real foi monitorada diariamente, por meio de controle da massa do conjunto. A taxa de evaporação potencial, obtido com a utilização de um recipiente idêntico nas mesmas condições de ensaio, preenchido com água, foi baseada na relação entre os valores da umidade relativa do ar e valores medidos de evaporação potencial. A umidade relativa do ar dentro da sala foi monitorada com o auxílio de um higrômetro digital.

✓ Sucção e grau de saturação do minério de ferro durante a secagem

Durante todo o ensaio foi realizado o monitoramento da variação de sucção em vários pontos ao longo da coluna de minério. Uma vez que o minério estará sofrendo processo de secagem, espera-se que a sucção aumente com o passar do tempo. É esperado, ainda, que os sensores mais próximos da superfície apresentem maior sensibilidade diante das variações de temperatura.

✓ Temperatura

A variação de temperatura no lisímetro e na coluna de minério de ferro foi monitorada com a utilização de termopares. A variação de temperatura foi provocada com o auxílio de um conjunto de lâmpadas quentes (fonte de calor). Assim, quando a água evapora, calor é retirado do corpo e a temperatura, inicialmente em equilíbrio com o ambiente, diminui. Com o passar do tempo, o teor de água diminui e o solo mais seco torna a entrar em equilíbrio com o ambiente. A calibração dos sensores de temperatura (termopares) apresentou excelentes respostas com relação à variação brusca de temperatura, conforme será descrito posteriormente.

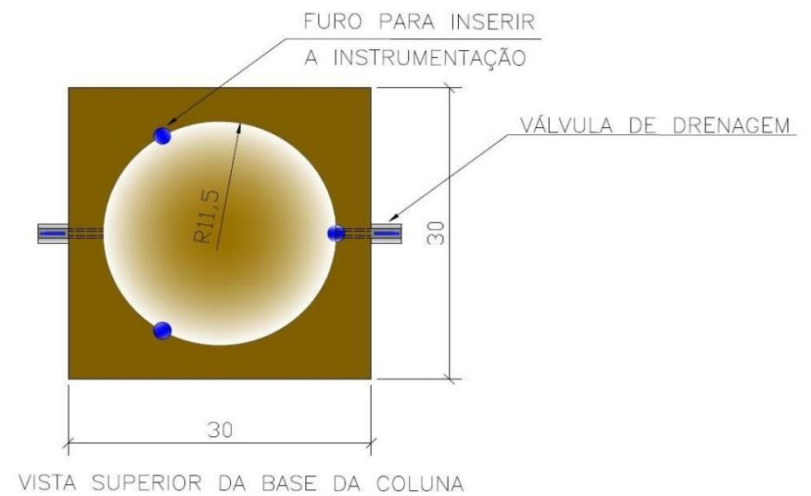
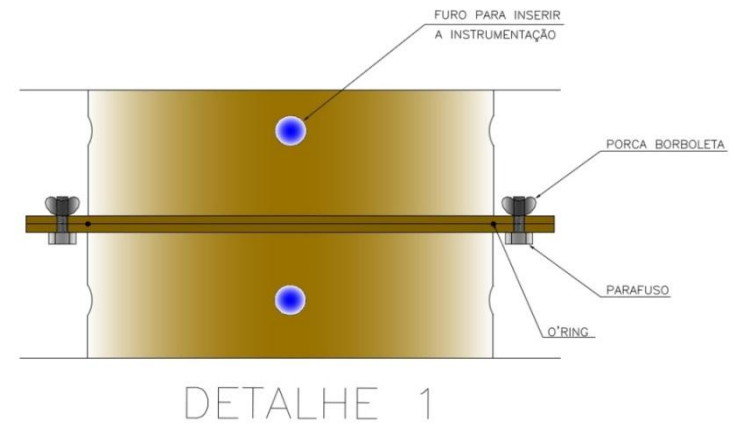
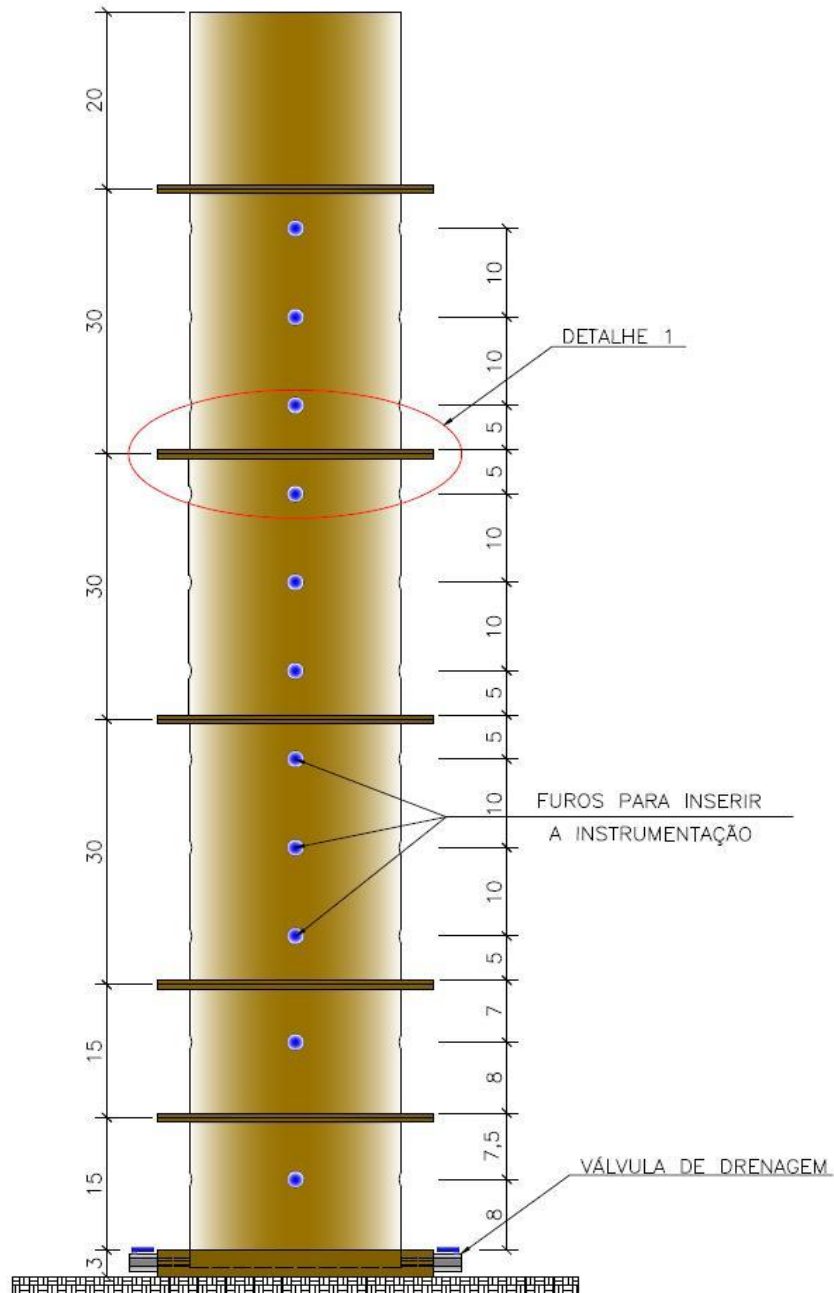


Figura 3.13 - Coluna acrílica para ensaios de balanço água-minério de ferro (a) coluna completa com a localização da instrumentação; (b) detalhe da localização da instrumentação; (c) vista superior da coluna

### 3.3.1. Ensaio de balanço hídrico - lisímetro

No ensaio com o lisímetro foram avaliados os resultados da taxa de evaporação com o tempo, que procuraram identificar os principais estágios da evaporação e a influência da sucção na taxa de evaporação. Foram analisadas a variação da sucção, temperatura e umidade em função do tempo. No ensaio de secagem com a coluna, são analisados os perfis de sucção, temperatura e umidade em relação ao tempo e ao longo da coluna de minério. Os resultados obtidos a partir da instrumentação são discutidos e avaliados em das condições de contorno utilizadas no ensaio.

Previamente à preparação do ensaio, foi realizada a secagem do minério de ferro em estufa, de maneira que fossem conhecidas a massa de material e a massa de água presentes no início do ensaio.

Por se tratar de um material com massa específica elevada, na preparação do corpo de prova o adensamento da amostra foi realizado pelo peso próprio do material. No entanto, foi observada, durante a montagem de um “ensaio piloto”, certa dificuldade em inserir a instrumentação depois da finalização do corpo de prova, pois após 24 horas o material se tornava muito sedimentado. Após esse período, foi verificado que o corpo de prova sofria muitas perturbações durante a colocação da instrumentação, o que comprometia as características iniciais do ensaio.

Dessa maneira, a montagem do ensaio foi feita em etapas. Esse processo possibilitou a inserção dos instrumentos, principalmente na base do lisímetro, pois o corpo de prova foi preparado em camadas de, aproximadamente, 2 cm até alcançar a altura final de 33 cm, sempre com o material saturado. Durante a preparação do ensaio, tomou-se o cuidado de permanecer um pequeno filete de água acima da superfície do material, garantindo a saturação do corpo de prova.

Inicialmente, o lisímetro foi limpo e montado com o auxílio de um *o'ring* na parte inferior para vedação. A massa de minério foi pesada em etapas para evitar ganho de umidade durante a montagem do ensaio. Após lançada a camada de 2 cm, foram feitas vibrações na lateral do lisímetro com o auxílio de um martelo de borracha. Esse procedimento foi

realizado para garantir que o corpo de prova ficasse o mais homogêneo possível e proporcionar maior contato do minério com a instrumentação.

A instrumentação foi inserida à medida que o corpo de prova foi sendo montado. Na parte inferior do lisímetro foram colocados instrumentos para medição de temperatura, sucção e umidade (termopares, tensiômetros e medidores de umidade, respectivamente). Estes instrumentos foram instalados após o corpo de prova ter alcançado altura de 3,5 cm de altura (base do corpo de prova). Para o monitoramento da região superior do corpo de prova (topo), a instrumentação foi instalada quando o corpo de prova possuía 28,0 cm de altura.

Depois de montado o corpo de prova, com a instrumentação já inserida, o mesmo foi deixado em repouso por 24 h para que a amostra alcançasse o equilíbrio térmico e houvesse a acomodação dos instrumentos com o minério de ferro. Após a preparação do ensaio, foi feita a medição da altura do corpo de prova para verificar a ocorrência de recalques posteriores. No entanto, devido ao processo de montagem (densificação da amostra) e o peso próprio do material ensaiado, não ocorreu recalque do corpo de prova durante o ensaio.

Um termômetro de mercúrio foi colocado na região superficial do corpo de prova para acompanhar a variação da temperatura no topo da amostra. Ressalta-se que o termômetro não entrou em contato direto com o minério, ficando a sua instalação próxima à superfície. Além de possibilitar o acompanhamento da variação de temperatura superficial, foi possível averiguar quanto da temperatura efetivamente chega à base da amostra (variação do gradiente de temperatura).

No início do ensaio, o processo de secagem do minério de ferro foi realizado em condições ambientes de temperatura e ventilação. No entanto, devido à baixa taxa de evaporação proporcionada por estas condições, foi utilizado um conjunto de lâmpadas halógenas para acelerar o processo de ressecamento, conforme apresentado por VILLAR (2002). As lâmpadas permaneceram ligadas por 24 h durante todo o ensaio. Inevitavelmente, sempre que possível, as lâmpadas, quando queimadas, eram, imediatamente trocadas, buscando variar o mínimo possível a temperatura superficial proporcionada pelas mesmas.

A taxa de evaporação real foi monitorada continuamente por meio de controle da massa do conjunto. A umidade relativa do ar na superfície do corpo de prova foi monitorada com o auxílio de um higrômetro digital. A taxa de evaporação potencial foi acompanhada por meio de um recipiente de mesmas características do lisímetro preenchido com o minério de ferro, porém preenchido com água.

Durante o ensaio foram monitoradas as variações de sucção, umidade e temperatura no topo e base do corpo de prova (Figura 3.14).

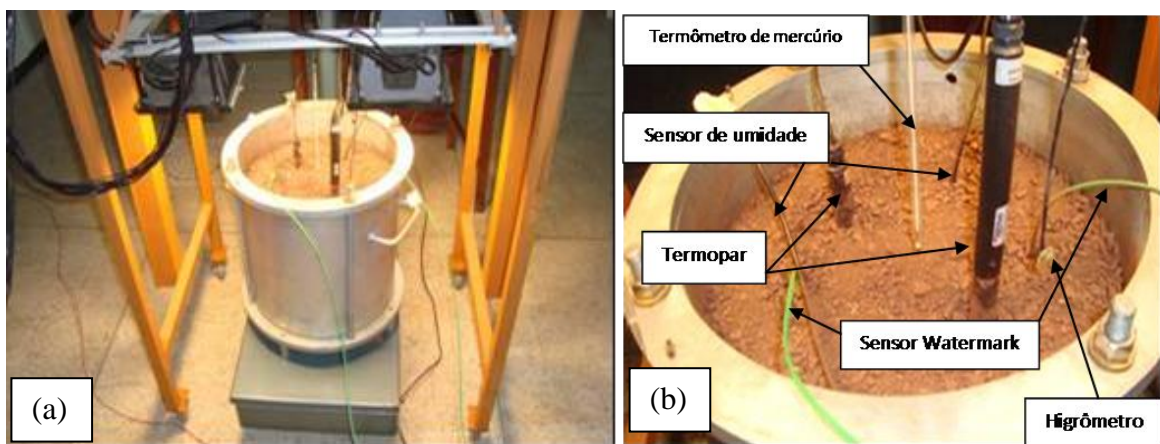


Figura 3.14 - Lisímetro: (a) vista geral do corpo de prova; (b) detalhe da instalação da instrumentação.

### 3.3.2. Ensaio de secagem – coluna de minério

Assim como o ensaio de secagem no lisímetro, o objetivo desse ensaio é quantificar e caracterizar o processo de evaporação e transferência de calor de uma amostra de minério. A principal diferença entre os dois ensaios é basicamente a altura do corpo de prova que para este ensaio foi de, aproximadamente, 1,3 metros.

Sendo as condições de contorno facilmente controladas e o fluxo unidimensional (apenas na vertical), este ensaio se torna relativamente simples. No entanto, a preparação do corpo de prova foi demorada devido a sua altura.

Na Figura 3.15(a) é apresentada uma visão geral da coluna de acrílico e na Figura 3.15(b) é mostrado um desenho esquemático da coluna com todos os módulos utilizados na montagem do ensaio. Na figura ainda pode ser observado os pontos de instalação da

instrumentação: medidores de sucção (S), medidores de temperatura (T) e medidores de umidade (U).

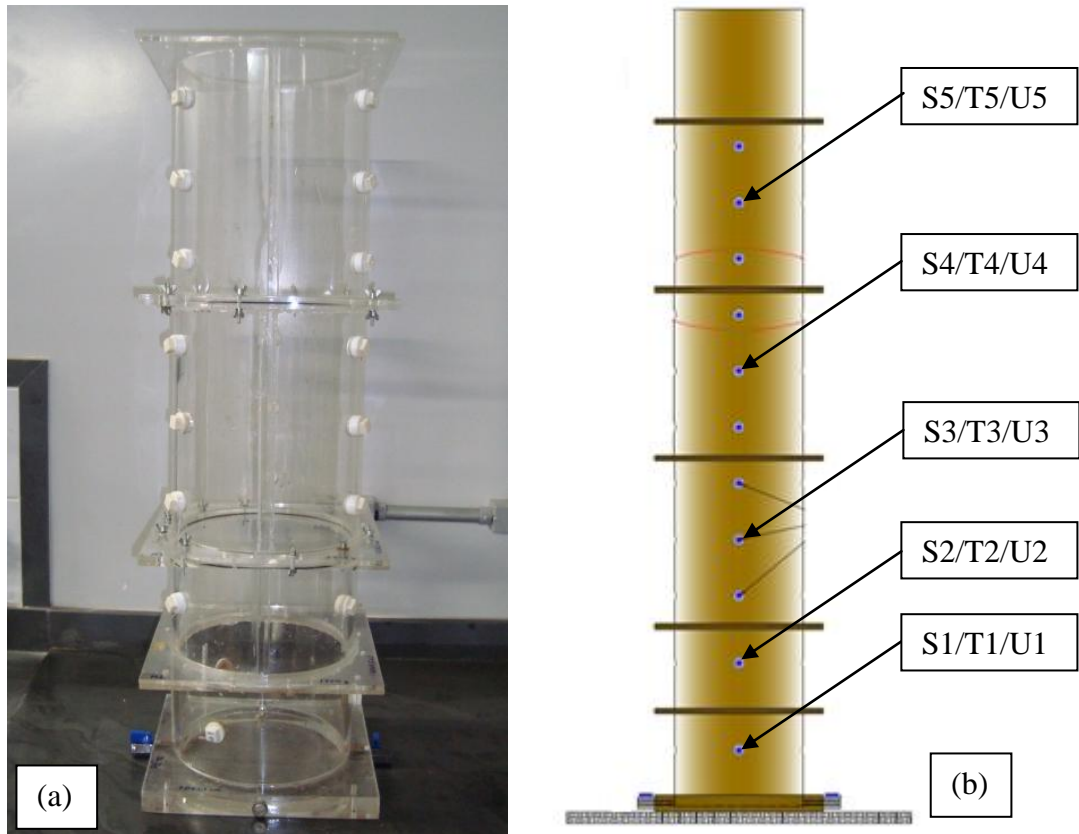


Figura 3.15 - Coluna de acrílico: (a) vista geral do equipamento utilizado no ensaio de coluna; (b) desenho esquemático da coluna de acrílico e locação da instrumentação utilizada

Como no ensaio realizado com o lisímetro, o minério de ferro foi previamente seco em estufa e a metodologia de montagem segue as mesmas condições já descritas no item anterior, com as seguintes ressalvas:

- ✓ A montagem do ensaio de coluna foi realizada em partes. Cada módulo foi montado por vez, o que torna a montagem um processo demorado;
- ✓ Para a densificação do corpo de prova não foi utilizado o martelo de borracha, pois isso poderia comprometer o equipamento. Ao invés disso, para a confecção do corpo de prova, foi utilizado um escarificador de solo e o acompanhamento da altura do minério dentro de cada módulo da coluna;
- ✓ A instrumentação foi preparada no mínimo 24 horas antes da montagem do ensaio. Os equipamentos foram colocados nos tampões de PVC e vedados com o auxílio de silicone. O tempo mencionado foi para que ocorresse a cura do silicone.

O objetivo da vedação nos pontos de entrada dos instrumentos é garantir que a evaporação ocorra somente pelo topo da amostra. Na Figura 3.16 é apresentado o corpo de prova montado e a instrumentação instalada para a aquisição de dados. Observa-se que, devido ao peso do material, o corpo de prova foi montado diretamente na balança. Ainda na Figura 3.16 pode ser observada a estrutura de lâmpadas utilizada no ensaio.



Figura 3.16 - Corpo de prova pronto para início do ensaio

Após a montagem do último módulo, foi realizada uma leitura na instrumentação e o corpo de prova foi deixado em descanso para atingir o equilíbrio térmico e hidrostático, aproximadamente 24 horas. Esse período permitiu também que a instrumentação se acomodasse ao minério de ferro. Antes do início do ensaio, foram realizadas novas leituras de sucção, temperatura e umidade iniciais do corpo de prova. Em seguida, as lâmpadas foram acesas e deu-se início ao ensaio de secagem do minério.

Durante a execução do ensaio foram realizadas leituras periódicas de temperatura, sucção e teor de umidade no interior do corpo de prova. A taxa de evaporação foi acompanhada por

meio do balanço de massa do conjunto e a temperatura superficial foi monitorada com o auxílio de um tensiômetro de mercúrio.

### 3.4. Instrumentação

#### 3.4.1. Monitoramento da sucção

Para o acompanhamento da variação da sucção nos ensaios de secagem foram utilizados sensores Watermark<sup>®</sup>. Trata-se de um sensor do tipo resistência elétrica. A quantidade de água no sensor varia de acordo com a quantidade de água disponível no solo, sendo as diferenças elétricas entre os dois eletrodos transmitidas ao sensor. É composto por dois eletrodos concêntricos num conglomerado envolto por uma membrana sintética e encapsulado em um fundo em aço inoxidável com capacidade de leitura de 200 kPa e precisão de 1 kPa. Na Figura 3.17 é apresentado o instrumento e seu respectivo sistema de aquisição de dados.



Figura 3.17 - Tensiômetros Watermark<sup>®</sup> com sistema de aquisição de dados

#### 3.4.2. Monitoramento da temperatura

O monitoramento da temperatura foi realizado com o auxílio de termopares, dispositivos para medição de temperatura. Seu funcionamento é baseado em efeitos termoelétricos, consistindo em dois condutores metálicos distintos, na forma de metais puros ou de ligas homogêneas. Ao sensor de medição, chamado junta de medição, os fios são soldados. A extremidade oposta dos fios é ligada ao equipamento de medição, fechando dessa forma

um circuito elétrico capaz de fluir a corrente. A precisão das leituras é de 0,1 °C e faixa de medição entre -199 °C a 199 °C. Na Figura 3.18 é apresentado o termopar, “tipo espeto”, utilizado para fazer o controle da variação da temperatura durante os ensaios de secagem.



Figura 3.18 - Termopar tipo espeto utilizado nos ensaios

### 3.4.3. Monitoramento da umidade

O sensor para a medição da umidade no minério é composto por dois eletrodos que funcionam como um capacitor, sendo que o material em torno serve como dielétrico, o que possibilita a formação de um circuito. A permissividade dielétrica da água é muito maior do que do ar, dos minerais e da matéria orgânica. Dessa maneira, mudanças na quantidade de água podem ser detectadas pelo sensor e correlacionadas com a umidade presente no minério. A faixa de medição do instrumento é de 0 a 100%, com precisão de 0,01%. Na Figura 3.19 é apresentado o conjunto para a aquisição dos dados de umidade do minério durante a realização do ensaio.



Figura 3.19 - Sensor de umidade e sistema de aquisição de dados

#### 3.4.4. Monitoramento da umidade relativa do ar e massa do sistema

Para o monitoramento das condições de umidade relativa do ar na região superficial do corpo de prova, foi utilizado um higrômetro digital, conforme apresentado na Figura 3.20. A faixa de medição do instrumento é de 0 a 100% com precisão de 1%.



Figura 3.20 - Higrômetro Digital para medição da umidade relativa do ar

Com o intuito de observar a variação da massa total, por meio da evaporação de água do sistema, foram utilizadas duas balanças digitais. Este equipamento foi introduzido em uma estrutura metálica onde foram instaladas lâmpadas incandescentes para aumentar a temperatura durante a realização dos ensaios, possibilitando a aceleração do processo de secagem da pasta de minério de ferro. É importante ressaltar que, devido à precisão da balança ser de duas casas decimais, não foi estudado a influência do calor gerado pelas lâmpadas nas medições da balança.

Na Figura 3.21 podem ser observadas as estruturas construídas para a sustentação das lâmpadas que foram utilizadas para a variação de temperatura durante a realização do ensaio. Essas estruturas são móveis, de maneira que as lâmpadas podem sofrer variações de altura, alterando dessa maneira a quantidade de calor fornecida ao conjunto ensaiado.



Figura 3.21 - Andamento do ensaio de calibração

### 3.5. Calibração da instrumentação

Para a calibração dos sensores de umidade e tensiômetros foi montado um sistema de secagem com a utilização da base da coluna de acrílico. O recipiente foi preenchido com minério de ferro saturado e homogeneizado. Em seguida, foi promovida a inserção dos instrumentos de maneira que ficassem equidistantes entre si. Na Figura 3.22 está apresentada a montagem para a calibração dos tensiômetros e sensores de umidade. Observa-se a utilização do tensiômetro de vácuo com placa cerâmica porosa para a aferição dos dados.

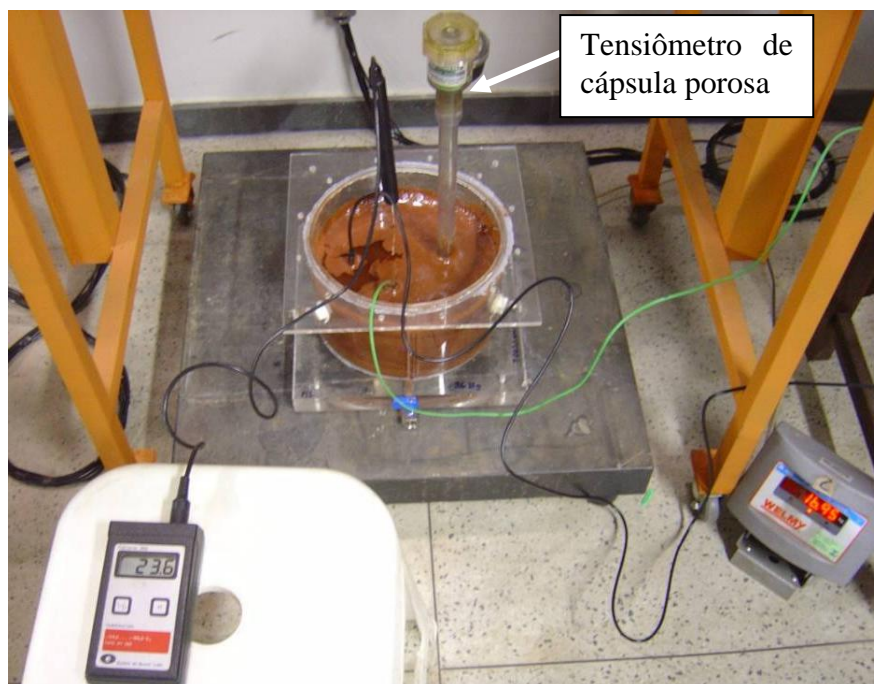


Figura 3.22 - Ensaio para calibração dos sensores de umidade e tensiômetros

Para o preparo da “pasta de minério de ferro”, previamente foi estimada uma quantidade de material que seria utilizada a cada módulo de montagem da coluna. O minério de ferro foi então homogeneizado em água destilada. Este processo buscou garantir que o material utilizado no ensaio tivesse as mesmas características, ou características parecidas. Ao terminar a homogeneização, o teor de umidade da “pasta de minério” foi medida e, após, foi realizada a colocação dentro da base com a densidade controlada. O recipiente foi colocado sobre a balança de modo que pudesse ser registrada a variação da massa de água presente no sistema (balanço hídrico).

A seguir são descritos os processos para a calibração da instrumentação utilizada nos ensaios de secagem.

### 3.5.1. Calibração dos sensores Watermark®

Foi utilizado um tensiômetro de cápsula porosa (Figura 3.23) para fazer a calibração dos sensores. Quando o solo está seco, uma porção da água deixa o tensiômetro por meio da cápsula para o solo, formando um vácuo parcial em seu interior, que é medido por um vacuômetro, geralmente acoplado próximo à extremidade superior do tubo. Após o solo ser

molhado, a água volta para o interior do tensiômetro pela ação do vácuo formado durante a condição de solo seco. Assim, o tensiômetro possibilita medir a tensão que está atuando na região especificada.

Leituras foram realizadas frequentemente para o acompanhamento da variação da sucção nos dois equipamentos, sensor Watermark® e no tensiômetro de cápsula porosa. Ressalta-se que o tensiômetro de capsula porosa sofreu processo de cavitação em, aproximadamente, 70 kPa.



Figura 3.23 - Tensiômetros de vácuo com cápsula cerâmica

### 3.5.2. Calibração dos sensores de umidade

Conforme descrito anteriormente, a calibração dos medidores foi realizada com a montagem de um ensaio de secagem (Figura 3.22). Como o início do ensaio de secagem é realizado com a amostra de minério saturada, a umidade gravimétrica do sistema é conhecida. Com o avanço do ensaio, por meio do balanço hídrico, é possível estimar a umidade em qualquer tempo. Assim, conhecendo-se as umidades gravimétricas inicial, parcial e final e também a densidade da amostra, é possível calcular a umidade volumétrica do sistema de acordo com a EQ. 3.2.

$$\theta = \omega \cdot (\gamma_d / \gamma_w) \quad (3.2)$$

Em que:  $\theta$  = umidade volumétrica (%);  $w$  = umidade gravimétrica (%);  $\gamma_d$  = peso específico seco ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) (determinado por meio da EQ. 3.4);  $\gamma_w$  = peso específico da água ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

### 3.5.3. Calibração dos termopares

Os sensores de temperatura foram submetidos a três faixas de temperatura:  $0^\circ\text{C}$ , temperatura ambiente e  $98,8^\circ\text{C}$  (temperatura de fervura da água). Foram realizadas três repetições para cada faixa de temperatura, totalizando nove leituras para cada sensor.

Para as leituras de temperatura de  $0^\circ\text{C}$ , os sensores foram submetidos a um recipiente com gelo, conforme apresentado na Figura 3.24 (a). A temperatura ambiente foi controlada com o apoio de um ar condicionado, que manteve a temperatura sempre constante. Ressalta-se que, antes do início do processo de calibração dos instrumentos, foi necessário que se obtivesse o equilíbrio entre a temperatura da sala e o recipiente que continha a água utilizada para as medições (Figura 3.24(b)). Para a temperatura mais elevada, foi utilizada uma placa aquecedora para a fervura da água.

Os termopares foram conectados a um sistema de aquisição de dados, que forneceu as leituras de temperatura medidas por cada sensor (Figura 3.24(c)). Para que fosse possível um controle das condições reais de temperatura, foi utilizado um termômetro de mercúrio com precisão de  $\pm 0,2^\circ\text{C}$ . Consiste basicamente de um tubo capilar de vidro, fechado a vácuo, e um bulbo (espécie de bolha arredondada) em uma extremidade contendo mercúrio, que sofre dilatação com a variação de temperatura. O termômetro de mercúrio também foi utilizado para fazer o acompanhamento da variação de temperatura na superfície dos corpos de prova.

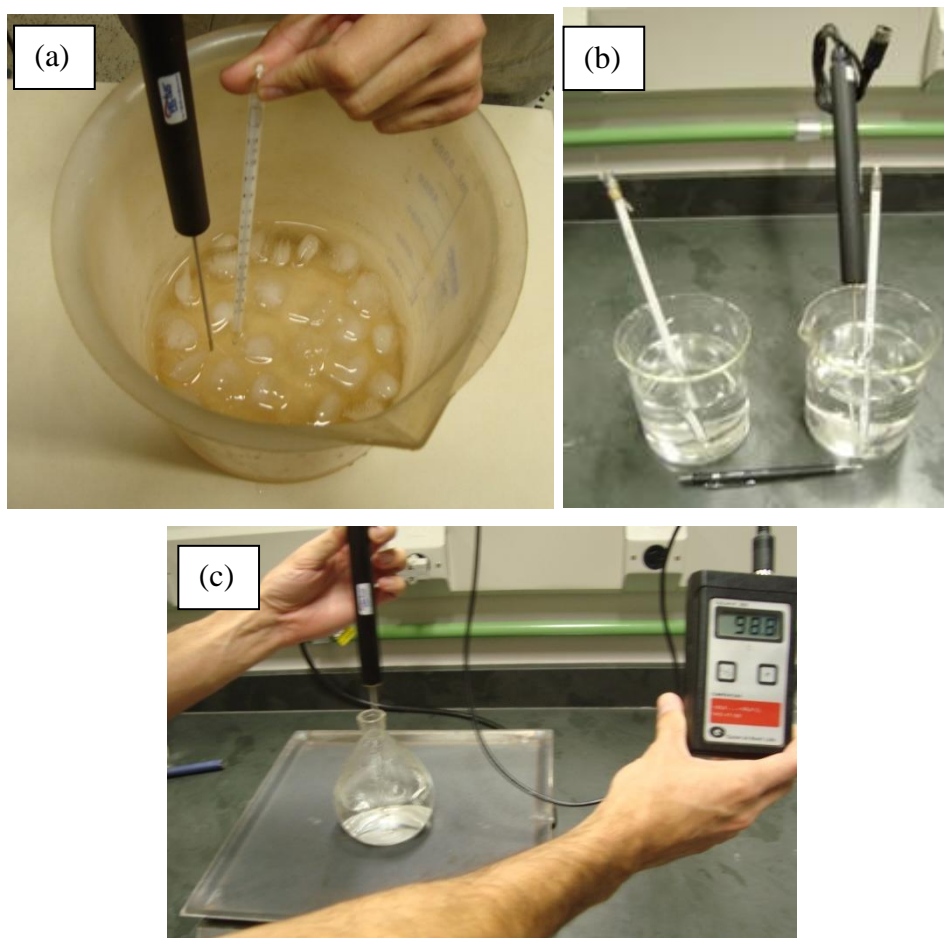


Figura 3.24 - Processo de calibração dos termopares. (a) sensores no recipiente com gelo; (b) equilíbrio da temperatura ambiente; (c) termopares conectados ao data-logger para medição.

### 3.6. Ensaio de filtração do tipo razão entre gradientes (GR)

Para a avaliação dos materiais sintéticos como sistemas filtro-drenantes foram realizados ensaios de filtração do tipo razão entre gradientes (GR) em condições variadas de gradiente e tensão normal.

A seguir será descrita a metodologia para execução do ensaio de filtração com a utilização do permeâmetro de pequenas dimensões. Esta metodologia foi proposta por Gardoni (2000) e Beirigo (2005).

O ensaio de filtração consiste, basicamente, em colocar a amostra de geossintético a ser ensaiado sobre uma placa perfurada apoiada no fundo do permeâmetro e em seguida

montar o corpo de prova, que receberá o carregamento. A amostra de geossintético que é utilizada no ensaio deve ser previamente saturada e mantida nesta condição durante a montagem do ensaio.

Buscando a homogeneidade dos corpos de prova durante a montagem dos ensaios, as amostras de minério de ferro foram preparadas pela técnica de deposição com densidade controlada seguindo a metodologia adotada por Gardoni (2000). Esta técnica visa obtenção de amostras homogêneas e saturadas com densidade controlada obtida a partir das propriedades do solo, tais como peso específico dos grãos ( $\gamma_s$ ) e índice de vazios máximo e mínimo ( $e_{máx}$  e  $e_{mín}$ ). Dessa maneira, uma mistura formada do minério de ferro com água destilada, cuja massa é conhecida, é levada à fervura. Uma vez conhecido o coeficiente de uniformidade ( $C_u$ ) do minério, emprega-se o processo de deposição ou por “pluviamento” ( $C_u < 2$ ) ou como lama ( $C_u > 2$ ).

Deve-se primeiramente colocar sob a base do cilindro a placa perfurada, que serve de apoio para a amostra de geotêxtil. Uma vez selecionada, a amostra de geotêxtil a ser ensaiada deve ser colocada em um recipiente com água destilada e submetida ao processo de saturação por no mínimo 24 horas. Ressalta-se que a amostra a ser ensaiada deve ter gramatura equivalente à média encontrada nos estudos de amostragem. Garantida a saturação, o geotêxtil deve ser colocado cuidadosamente sob a base perfurada para logo em seguida ser depositado sob este a lama devidamente preparada, conforme apresentado na Figura 3.25.



Figura 3.25 - Montagem da parte inferior do permeâmetro

Após preparada a parte inferior (cilindro + base perfurada + parte superior), o processo de moldagem dos corpos de prova para a realização do ensaio seguiu a metodologia apresentada por Beirigo (2005) e descrita a seguir:

a) misturar entre 4 e 5 kg do minério de ferro a ser ensaiado em uma porção de água destilada que permita a saturação do material. Após definir a sua massa e volume total, essa mistura (A1) foi submetida à fervura por, aproximadamente, 90 minutos, para retirada de possíveis bolhas de ar. Sendo o conjunto deixado à temperatura ambiente para o seu resfriamento;

b) no interior do permeâmetro, foi passada uma fina camada de graxa automotiva e em seguida foi colocado um filme plástico, exceto nas aberturas dos piezômetros (Figura 3.26), para minimizar o atrito lateral entre o corpo de prova e as paredes do cilindro;



Figura 3.26 - Lubrificação com graxa automotiva e filme plástico

c) a parte superior do permeâmetro foi, então, conectada à parte inferior, que continha a amostra do geossintético saturada;

d) conectou-se o tubo de saída e a válvula de saída nos locais adequados na parte inferior do permeâmetro, mantendo-os fechados. As válvulas de vedação também foram conectadas nas entradas dos piezômetros, na parte superior do permeâmetro;

e) com o auxílio de uma concha, a mistura de minério e água destilada previamente homogeneizada é colocada cuidadosamente sobre a amostra do geossintético (Figura 3.27).

Este procedimento foi seguido até a amostra atingir aproximadamente 11 cm de altura no interior do permeâmetro. O recipiente que continha a mistura de minério e água foi, com a massa restante de minério de ferro em seu interior, preenchido com água destilada até atingir o volume equivalente a A1. A massa desta nova mistura (A2) foi medida;



Figura 3.27 - Montagem do corpo de prova

f) os corpos de prova foram moldados com densidade relativa (DR) de 50% (FERREIRA, 2009) da densidade de campo. Dessa maneira, foi utilizada a EQ. 3.3 para determinar a altura do corpo de prova ( $H_{cp}$ ) a ser alcançada no processo de densificação:

$$H_{cp} = \frac{\gamma_s \cdot (M_1 - M_2) / (\gamma_s - 1)}{\gamma_d \cdot A} \quad (3.3)$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{\{1 - [DR \cdot (e_{m\acute{a}x} - e_{m\acute{i}n}) - e_{m\acute{a}x}]\}} \quad (3.4)$$

Em que:  $\gamma_d$  é o peso específico aparente seco do corpo de provas para a DR adotada ( $g/cm^3$ );  $\gamma_s$  é o peso específico dos grãos do solo ( $g/cm^3$ );  $M_1$  e  $M_2$  são, respectivamente, as massas das misturas A<sub>1</sub> e A<sub>2</sub> (g); e A é a área da seção transversal do permeâmetro ( $cm^2$ ).

g) densificar a amostra imprimindo uma vibração ao permeâmetro assim montado, por meio de batidas em sua parede lateral, com o auxílio de um martelo de borracha. Este processo de densificação foi conduzido até se alcançar a altura do corpo de prova calculada pela EQ. 3.3;

- h) após montado o corpo de prova, o excesso de água acumulado na parte superior do corpo de prova foi retirado e o topo da amostra foi protegido com um geotêxtil de gramatura inferior à 100 g/m<sup>2</sup>;
- i) colocar o pistão de aplicação de carga sobre o corpo de prova, tampá-lo e conectar o tubo de entrada de água e o piezômetro P1 e terminar de fechar o permeâmetro;
- j) desconectar o tubo de saída e a válvula de saída da parte inferior do permeâmetro e retirar as partículas passantes pelo geotêxtil durante a montagem do corpo de provas;
- k) reconectar o tubo de saída e a válvula de saída na parte inferior do permeâmetro, mantendo-os fechados;
- l) conectar os piezômetros P2 a P12, previamente preenchidos com água;
- m) posicionar a extremidade livre do tubo de saída na altura adequada ao gradiente hidráulico unitário no dispositivo de controle da carga piezométrica de saída;
- n) iniciar a aplicação de fluxo por meio do tubo de entrada e observar a ocorrência de bolhas de ar nos piezômetros, no tubo de saída e no tubo de entrada. Quando não foi observada a ocorrência de bolhas, realizou-se o controle da vazão pelo tubo de saída e se acompanhou as cargas hidráulicas nos piezômetros P1 a P12, realizando leituras a intervalos conhecidos;
- o) quando verificados que a vazão e as cargas hidráulicas se apresentavam estáveis, o sistema foi dado como estabilizado. Posteriormente, variando a altura do tubo de saída foram aplicados cinco estágios de gradientes hidráulicos: 1, 2,5, 5, 7,5 e 10. A partir deste último, se iniciou a aplicação das tensões verticais no topo da amostra, com valores de 300 kPa, 600 kPa, 1200 kPa e 3000 kPa.

### 3.7. Ensaio com aplicação de vácuo para redução de umidade

Para a realização dos ensaios com aplicação de vácuo objetivando a redução de umidade, a metodologia utilizada para a preparação da amostra do minério de ferro e do geotêxtil que foram ensaiados foi a mesma utilizada no ensaio de GR, conforme descrito no item anterior.

Os ensaios de secagem com aplicação de vácuo foram realizados no mesmo permeâmetro utilizado para o ensaio de GR, salvo que as saídas dos piezômetros de P2 a P12 foram mantidas fechadas, deixando somente o piezômetro de entrada aberto (FERREIRA, 2009). Após a finalização da montagem do corpo de prova, iniciou-se a aplicação de fluxo, mantendo somente a válvula de saída aberta, com o intuito de manter a amostra saturada. Foi feito o acompanhamento da vazão durante o período de 24 horas. Após verificar a constância da vazão, o fluxo foi interrompido e o ensaio deixado escoando por mais 24 horas, antes de se proceder a aplicação do vácuo. Passadas as duas etapas iniciais do ensaio, foi aplicado vácuo no fundo do permeâmetro por 2 horas, mantendo-se a saída do piezômetro superior aberta.

A sucção aplicada ao corpo de prova equivale à, aproximadamente, 100 kPa, sendo essa controlada com o auxílio do manômetro da bomba de vácuo. Na Figura 3.28 é apresentado detalhe do ensaio em andamento.

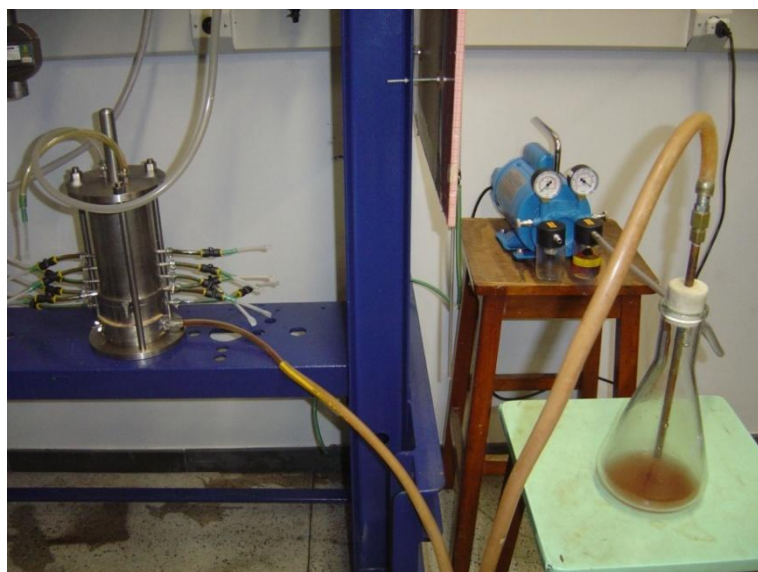


Figura 3.28 - Ensaio de redução de umidade do minério com aplicação de vácuo

### **3.8. Análise computacional**

#### **3.8.1. Introdução**

A análise computacional para as condições de drenagem do minério de ferro foi realizada com o auxílio do software VADOSE/W, desenvolvido pela *GEOSTUDIO International Ltda.*, sendo um programa que utiliza o método dos elementos finitos para a análise da interação solo-atmosfera, inclusive para condições climáticas variadas, e estima o comportamento da água no solo.

#### **3.8.2. Situações analisadas**

Inicialmente, foram realizadas as análises de ajustes dos parâmetros adquiridos no laboratório por meio dos ensaios de coluna. O principal objetivo dessas análises foi a aferição dos parâmetros utilizados para avaliar as condições de umidade do minério de ferro nos vagões e na pilha de minério.

Com os dados de temperatura, umidade relativa do ar, umidade volumétrica, saturação e evaporação potencial, obtidos pelos resultados dos ensaios de secagem com lisímetro e coluna, monitorados durante a realização do experimento, foi possível ajustar os dados de entrada do programa para extrapolar as análises para as condições de campo. Para as condições de laboratório, foi considerado um modelo de fluxo unidimensional, onde as condições de contorno utilizadas nas análises foram apenas as informações climáticas obtidas nos ensaios.

Basicamente, os passos seguidos para a simulação com o auxílio do VADOSE/W foram: criar e atribuir materiais e propriedades; criar e atribuir as condições de contorno nas quais se deseja analisar; e, finalmente, rever e aperfeiçoar a malha de elementos finitos gerada para a análise.

### 3.8.3. Malha de elementos finitos

A partir das características de contorno dos ensaios de laboratório e das condições de campo, foram definidas três malhas de elementos finitos: ensaio de coluna (aferição e ajustes dos parâmetros); vagão e pilha de minério (simulação das condições de campo).

Na Figura 3.29 é apresentada a malha de elementos finitos da coluna, definida para a aferição dos parâmetros de entrada do software.

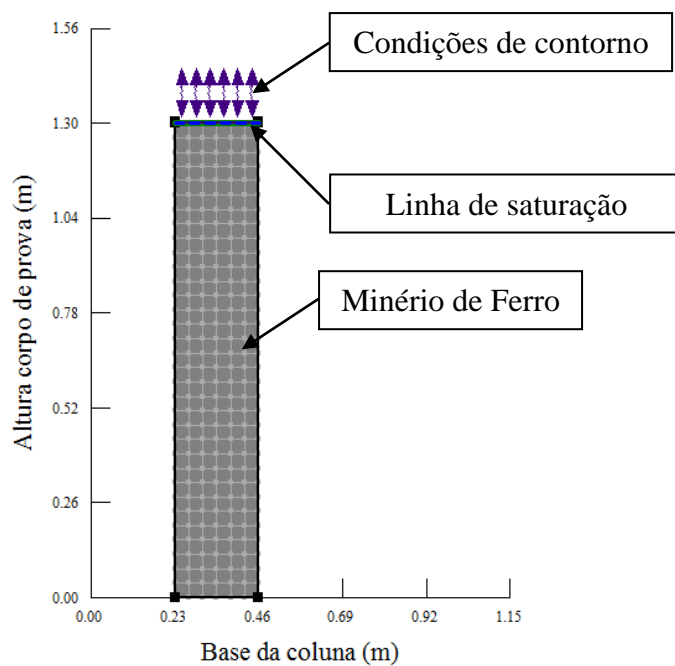


Figura 3.29 - Malha de elementos finitos e condições de contorno para a coluna de minério

Após o ajuste dos dados dos parâmetros, malhas de elementos finitos bidimensionais foram definidas para as simulações da unidade do minério de ferro nos vagões de transporte e pilha de minério, conforme apresentado nas Figuras 3.30 e 3.31, respectivamente.

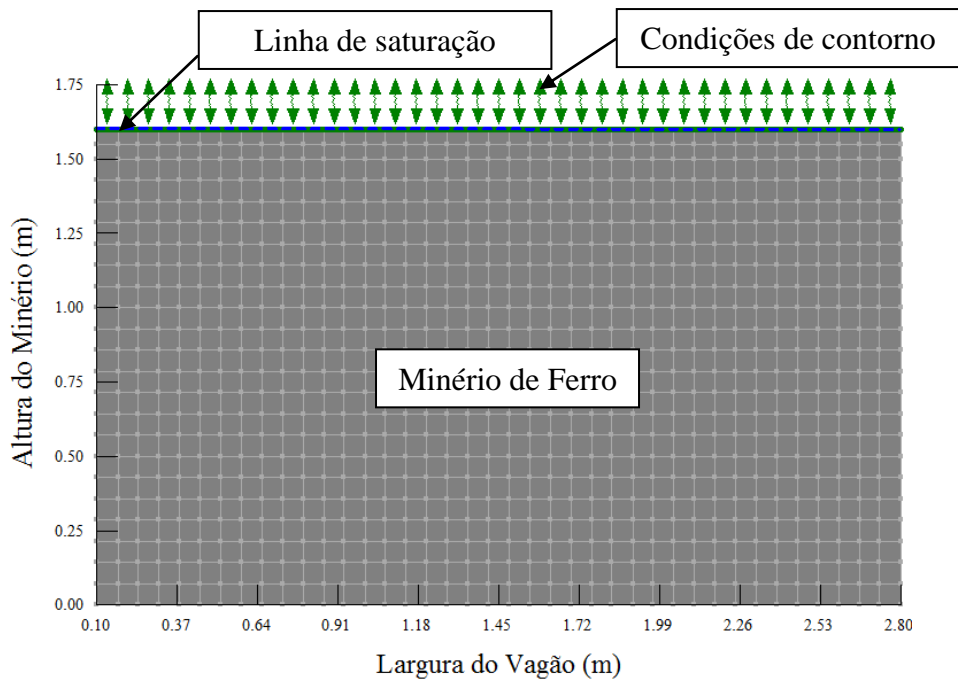


Figura 3.30 - Malha de elementos finitos e condições de contorno para o vagão – fluxo bidimensional

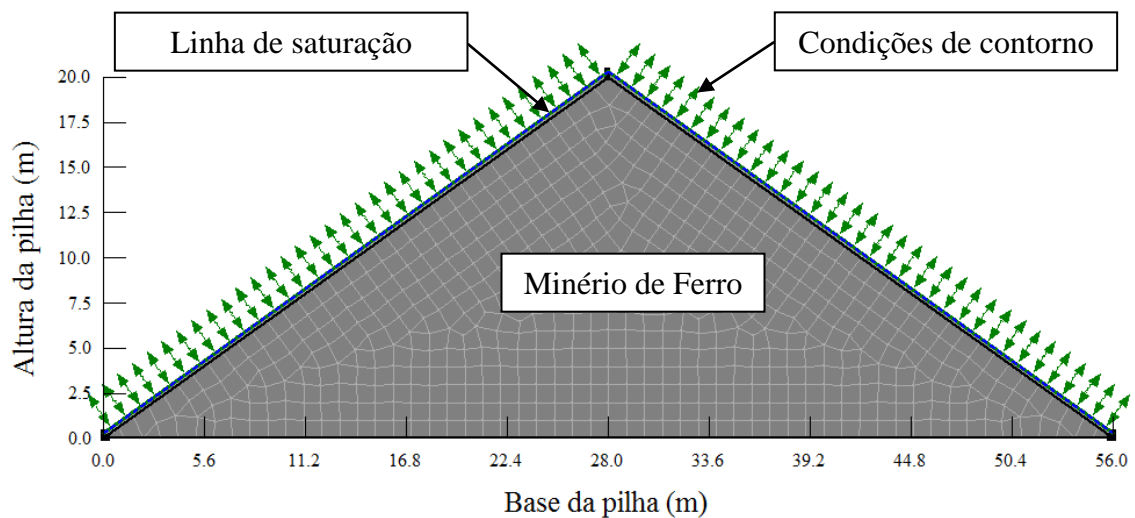


Figura 3.31 - Malha de elementos finitos e condições de contorno para a pilha de minério – fluxo bidimensional

#### 3.8.4. Parâmetros de entrada utilizados nas análises

Partindo-se do princípio que o minério de ferro estava saturado, o ajuste das simulações computacionais foi realizado a partir dos resultados obtidos nos ensaios de laboratório. Os parâmetros térmicos do minério de ferro (condutividade térmica e calor específico volumétrico) foram estimados de acordo com banco de dados do programa VADOSE/W, buscando associar os resultados de temperatura obtidos durante os ensaios. Esse processo foi necessário já que não foram realizados ensaios específicos para a definição de

propriedades térmicas do minério de ferro. Dessa maneira, análises de ajustes foram realizadas com o modelo unidimensional (coluna de minério), no intuito de ajustar os parâmetros utilizados.

### 3.8.3.1 Parâmetros climáticos

#### ✓ Ensaios de laboratório

Para a simulação dos ensaios de secagem realizados em laboratório, os parâmetros climáticos utilizados foram os mesmos obtidos no laboratório. Esses dados foram medidos durante a realização dos ensaios no período de março a junho de 2011, com valores de velocidade de vento e precipitações iguais a zero.

#### ✓ Simulações de campo

Com relação aos dados climáticos de campo, estes foram disponibilizados pela empresa Vale. São informações adquiridas a partir de pontos de monitoramento, controlados e operados pela própria empresa ao longo do percurso da mina até o porto. Além dos dados de precipitação e temperatura, também foram fornecidos velocidade do vento e umidade relativa do ar, medidas durante o período de Abril/2010 a Abril/2011.

As condições climáticas das situações de campo tornam-se um pouco complexas quando feita a seguinte análise: a primeira na condição de pilha de minério e a segunda na condição do transporte por vagões.

Dentro da mina, no pátio de estocagem, o minério de ferro permanece nas pilhas por, aproximadamente, 24h, sendo em seguida “embarcado” para o transporte. Para esta condição de análise, buscando representar a pior condição de campo, serão considerados os maiores e menores valores diários obtidos na Estação Serra dos Carajás (Figura 3.32 e Figura 3.33), estação mais próxima da Mina de Carajás, para uma simulação de 24h.

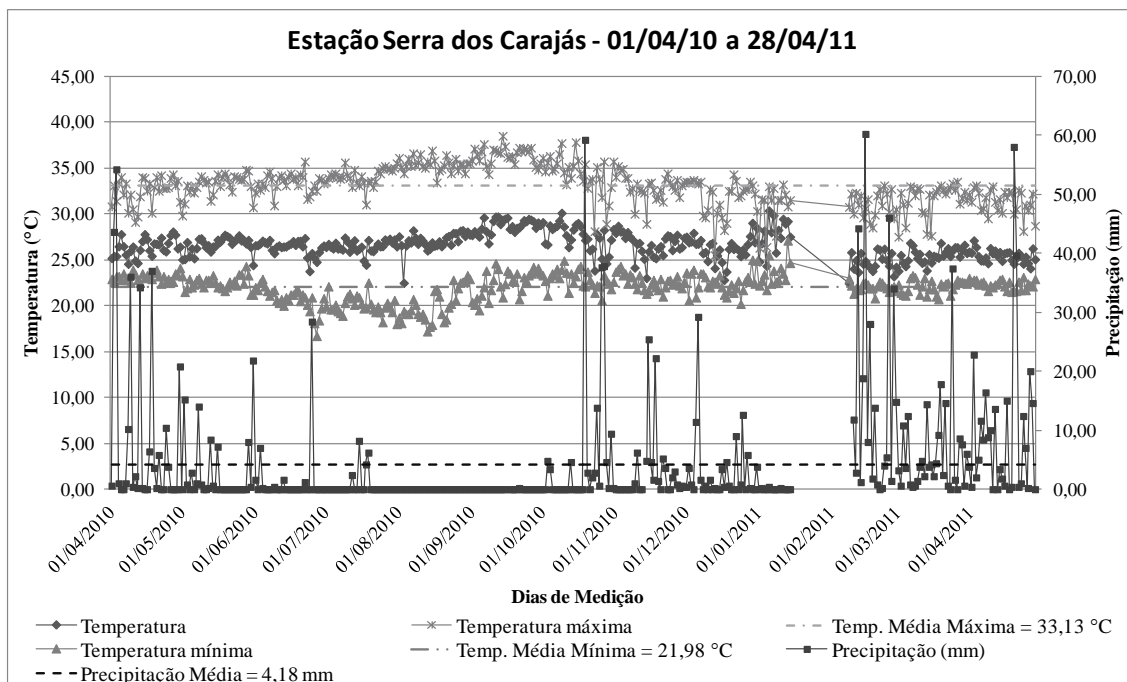


Figura 3.32 – Dados de temperatura e precipitação obtidos da Estação Serra dos Carajás/PA (Vale, 2011)

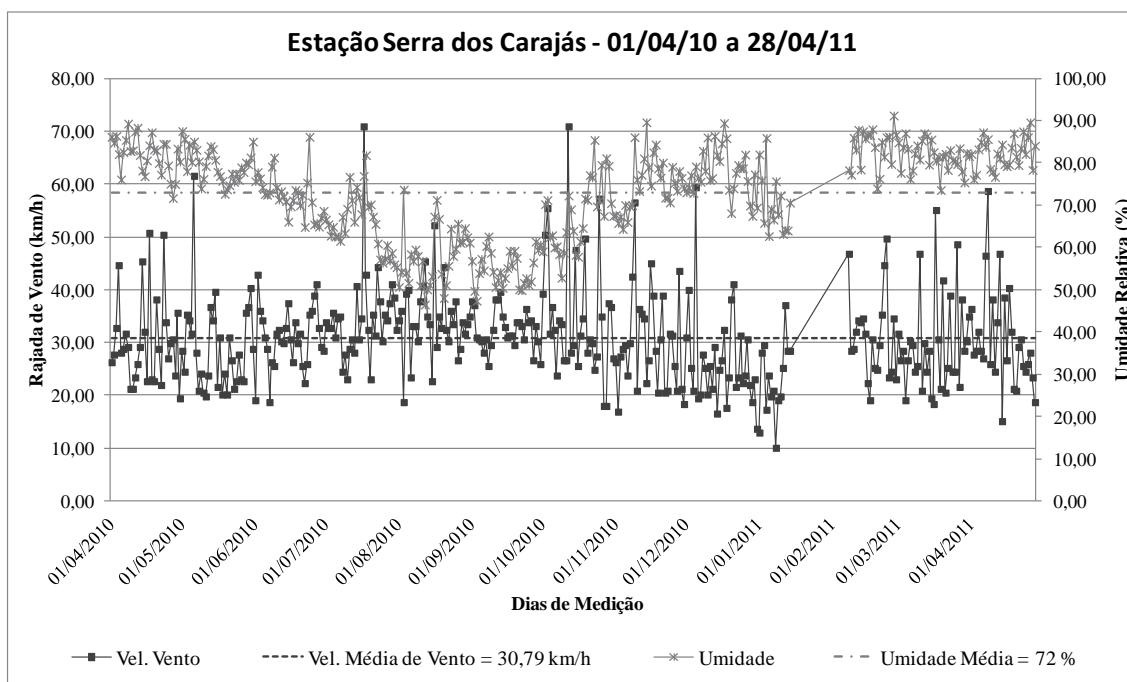


Figura 3.33 – Dados de velocidade do vento e umidade obtidos da Estação Serra dos Carajás/PA (Vale, 2011)

Durante o transporte, o minério viaja por 24h até o porto destino. Dessa maneira, para a aquisição de dados climáticos reais durante o transporte seria necessário a instalação de instrumentos dentro dos vagões. Como essa alternativa é praticamente inviável do ponto de vista operacional, os dados climáticos utilizados nas simulações com os vagões serão as

médias dos valores da Estação Serra dos Carajás. Esta alternativa se torna plausível quando observado que, durante todo o percurso de transporte, o minério de ferro não estará submetido às condições de chuvas contínuas. Por outro lado, devido ao deslocamento do trem de ferro, o valor da velocidade do vento pode ficar abaixo do valor real.

### 3.8.3.2 Parâmetros geotécnicos

Os parâmetros geotécnicos de entrada do software VADOSE/W são: curva de retenção de água, o coeficiente de permeabilidade saturada e a curva granulométrica do minério de ferro. Por meio do ensaio de secagem pode-se fazer um ajuste nesses parâmetros, de maneira a se obter uma modelagem numérica mais próxima dos resultados físicos encontrados nos ensaios. As características geotécnicas do minério de ferro foram apresentadas no item 3.1 deste capítulo.

#### ✓ Curva característica do minério

A curva característica do minério de ferro foi obtida a partir dos ensaios de papel filtro (Ferreira, 2009) e os ensaios de secagem com o lisímetro. Na Figura 3.34 é apresentada a curva característica utilizada nas análises com o software VADOSE/W.

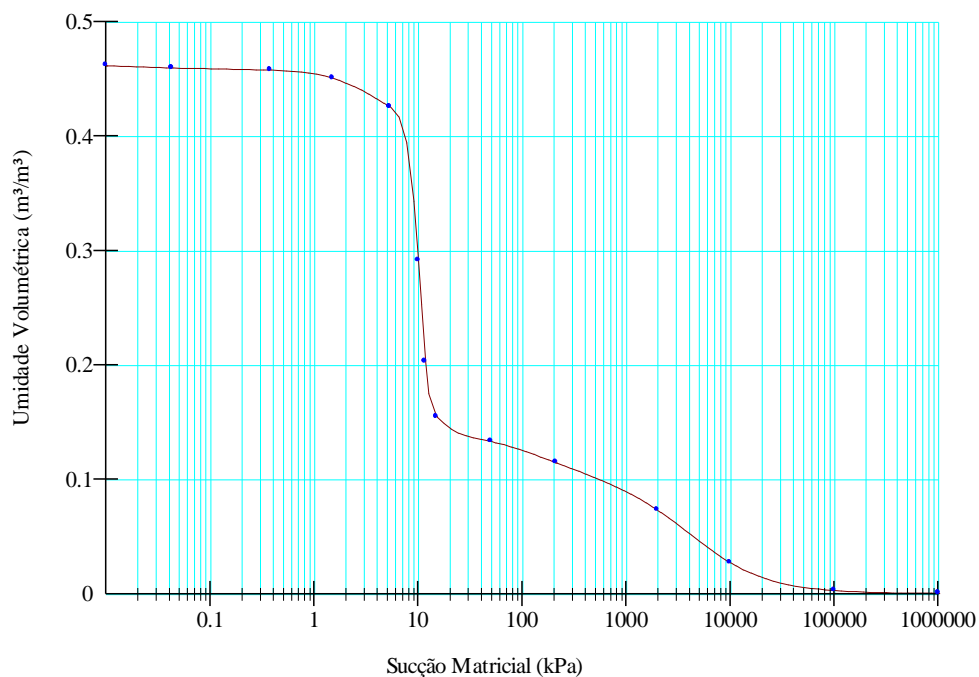


Figura 3.34 – Curva característica do minério de ferro utilizada nas análises com o software VADOSE/W

✓ Curva de condutividade hidráulica em função da sucção

A condutividade hidráulica do material varia em função da sucção. Na Figura 3.35 é apresentada a variação da condutividade hidráulica do minério de ferro em função da sucção. Essa variação foi obtida a partir da curva característica do minério fornecida ao programa, estimado através de Fredlund & Xing.

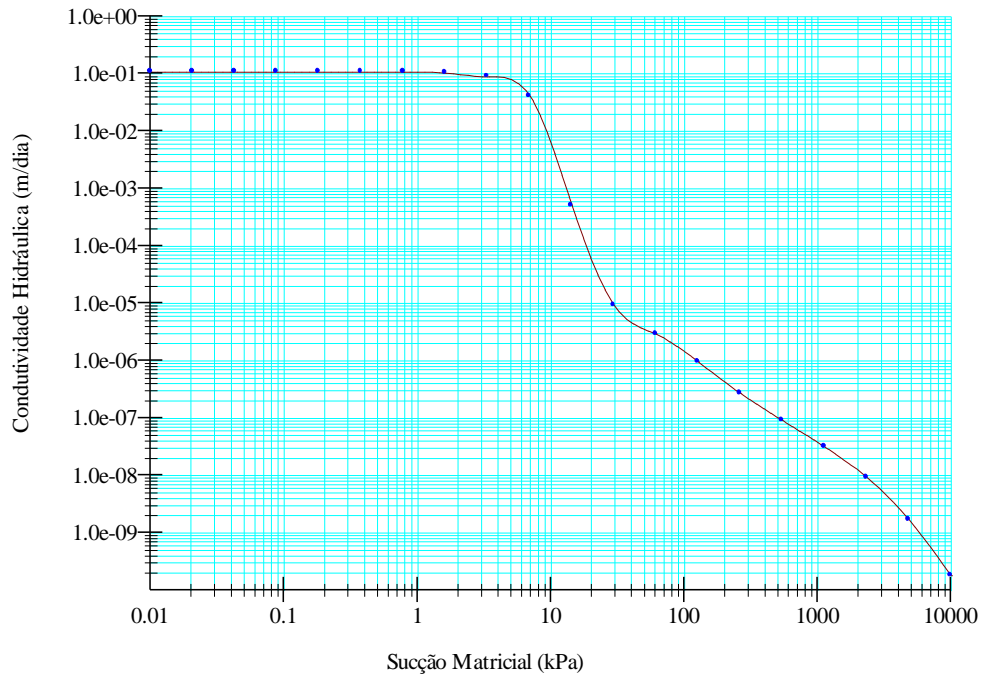


Figura 3.35 – Curva da condutividade hidráulica em função da sucção matricial

### 3.8.3.3 Parâmetros térmicos

Duas funções térmicas são requeridas pelo software VADOSE/W para que possibilite a resolução das equações de transferência de calor. A primeira função estabelece a relação entre a condutividade térmica e o teor de umidade volumétrica do solo. E, a segunda, entre o calor específico dos minerais dos solos e o teor de umidade volumétrica.

✓ Função de condutividade térmica

A condutividade térmica reflete a capacidade do material em conduzir calor. A taxa na qual o calor é transferido, depende do gradiente de temperatura e da condutividade térmica do solo. A condutividade térmica de um solo pode ser definida como a quantidade de calor que flui através de uma unidade de área de solo em uma unidade de tempo, sob uma

unidade de gradiente. As unidades para condutividade térmica são tipicamente  $\text{kJ}/(\text{dia.m.}^\circ\text{C})$  ou  $\text{Btu}/(\text{hr.ft.}^\circ\text{F})$  (RIBEIRO, 2011).

A função condutividade térmica do minério de ferro foi estimada a partir da curva característica do minério de ferro, partindo-se do princípio que a condutividade térmica do mineral é igual a  $190 \text{ kJ}/(\text{dia.m.}^\circ\text{C})$ . A curva da condutividade térmica em função da umidade volumétrica estimada no VADOSE/W para o minério de ferro é apresentada na Figura 3.36.

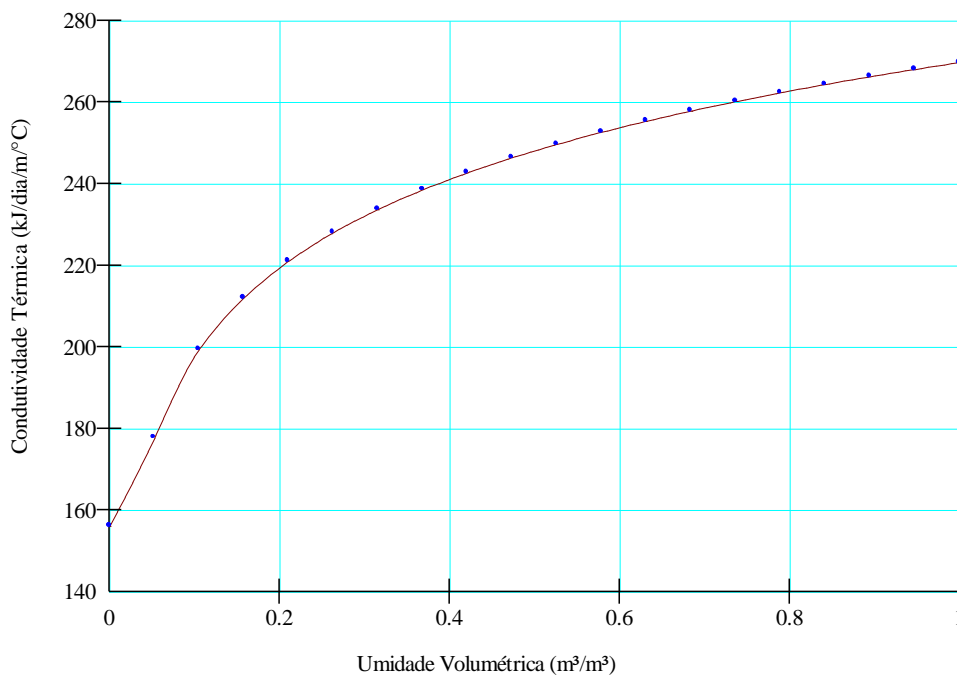


Figura 3.36 – Curva característica da condutividade térmica em função da umidade volumétrica do minério de ferro utilizada nas análises com o software VADOSE/W

#### ✓ Função de calor específico volumétrico

A capacidade de calor de um material é definida como a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura do material em uma unidade de grau. Quando expressa em termos de unidade de peso, esta quantidade de calor é referida como a capacidade de calor específico e quando expressa em termos de unidade de volume, a quantidade é conhecida como a capacidade de calor volumétrico. As unidades para a capacidade de calor específico são  $\text{J}/(\text{kg.}^\circ\text{C})$  e  $\text{Btu}/(\text{lb.}^\circ\text{F})$ , e as unidades para capacidade de calor volumétrico são  $\text{J}/(\text{m}^3.^\circ\text{C})$  e  $\text{Btu}/(\text{ft}^3.^\circ\text{F})$  (RIBEIRO, 2011).

A função de calor específico volumétrico do minério de ferro foi também estimada a partir da curva característica do minério de ferro, partindo-se do princípio que o calor específico volumétrico é igual a  $3000 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ . A curva do calor específico volumétrico em função da umidade volumétrica estimada do minério é apresentada na Figura 3.37.

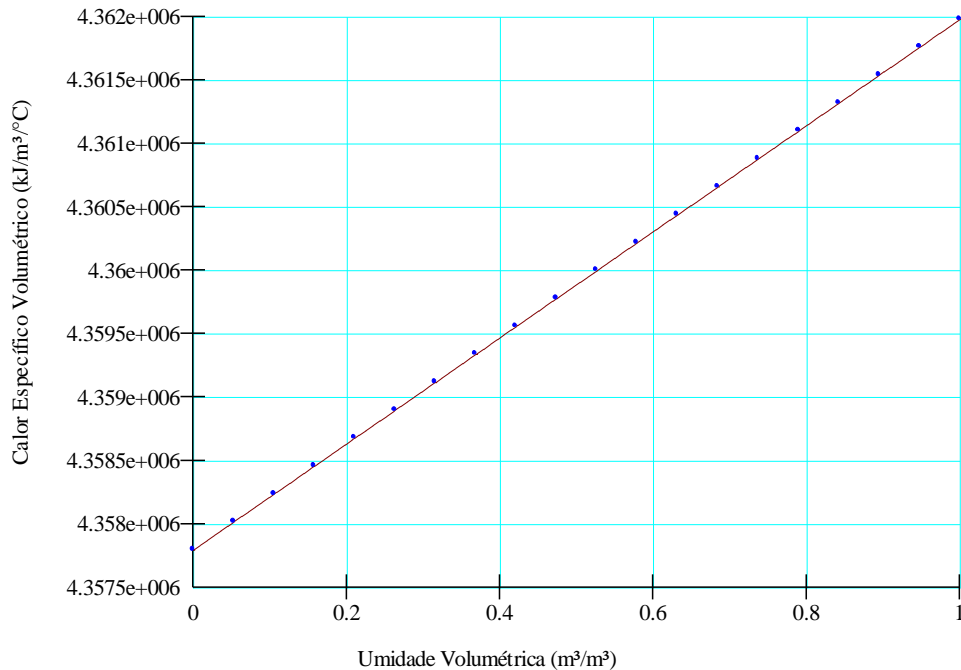


Figura 3.37 – Curva do calor específico volumétrico em função da umidade volumétrica do minério de ferro utilizada nas análises com o software VADOSE/W

### 3.9. Projetos de drenos com geossintéticos para os vagões

Buscando viabilizar a utilização do geossintético no sistema de drenagem dos vagões, foram elaboradas algumas sugestões de projetos para instalação dos drenos de geossintéticos nos vagões dos trens de carga de Carajás. Em conjunto com engenheiros da área de logística da Companhia VALE S.A., realizada em maio/2010, decidiu-se implantar os drenos geossintéticos nas paredes laterais, junto aos drenos de poliuretano de fundo do vagão. Foram comparados vagões com apenas drenos de fundo de poliuretano e com, além do conjunto de drenos de fundo, já existentes, drenos de geossintéticos nas paredes laterais.

O objetivo era avaliar a eficiência dos drenos de geossintéticos e comparar o seu desempenho com o dos drenos de poliuretano, visando uma possível avaliação do custo-

benefício dos dois drenos. No entanto, até meados de 2011 não foi possível a realização desta comparação. Dessa maneira, essas condições de drenagem apresentadas nos projetos serão utilizadas para a avaliação numérica com o auxílio do *software* VADOSE/W, apresentada no capítulo 4. Na Figura 3.38 é apresentado um desenho esquemático com a localização proposta para a instalação dos drenos de geossintético nos vagões de transporte do minério de ferro.

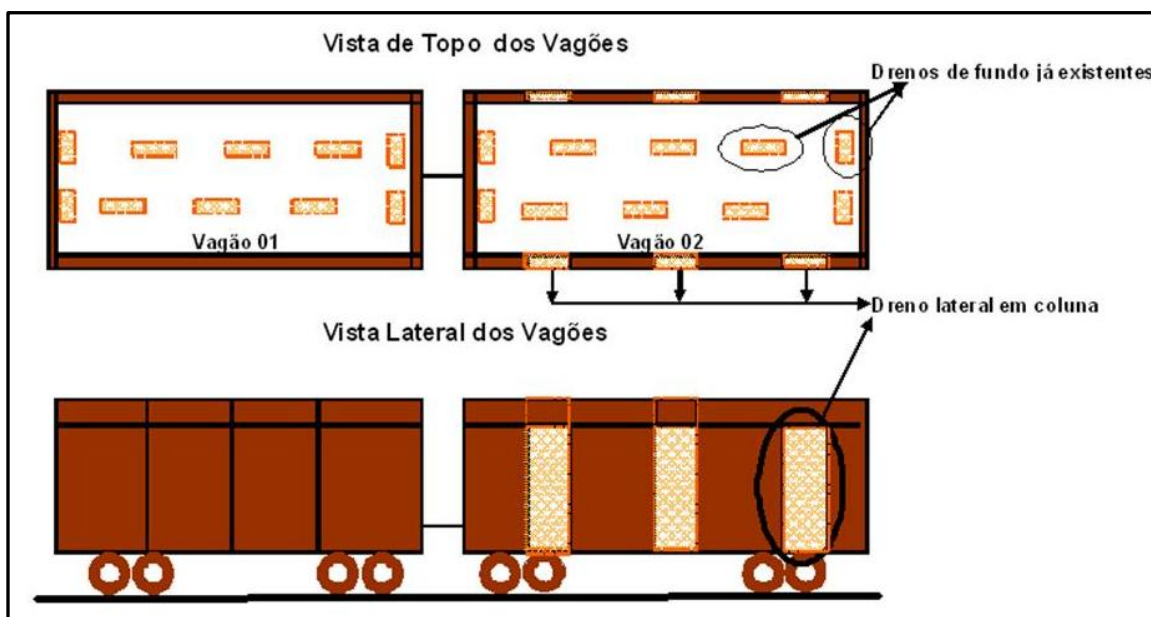


Figura 3.38 - Localização dos drenos de fundo de poliuretano e dos drenos laterais de geossintéticos

A primeira alternativa avaliada para a instalação do dreno com o geossintético no vagão de carga é apresentada na Figura 3.39. Nessa proposta, o dreno de geossintético seria instalado diretamente na parede lateral do vagão, sendo protegido por uma gaiola (tela de aço). A fixação da tira de geossintético seria feita na região superior do vagão.

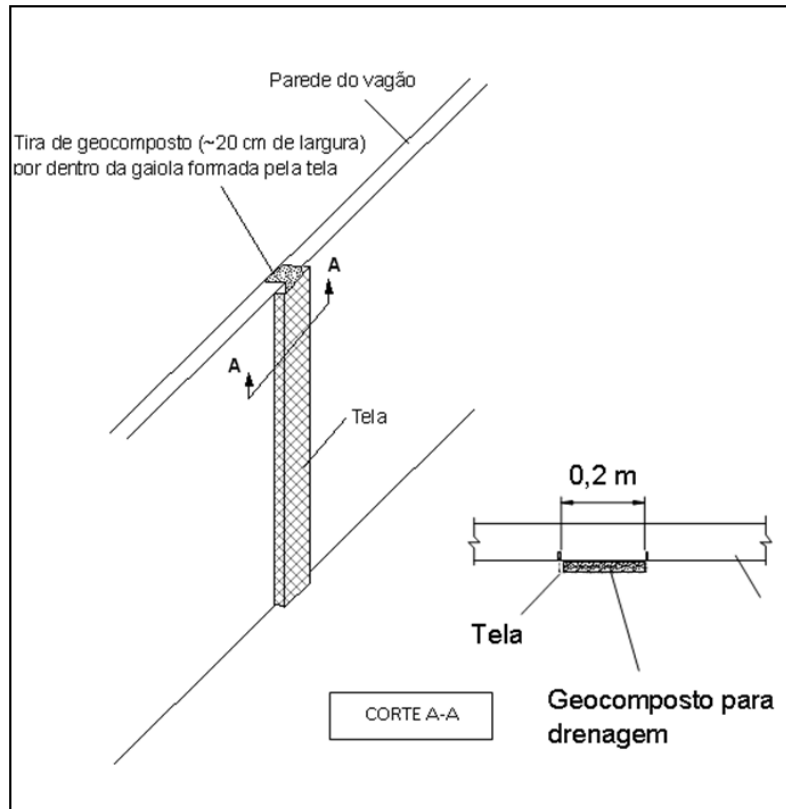


Figura 3.39 - Alternativa 1 para instalação dos drenos de geossintéticos

A segunda alternativa proposta seria a instalação do dreno de geossintético no vagão de carga com o auxílio de um chanfro feito na parede lateral do vagão, conforme apresentado na Figura 3.40. Nessa proposta, o dreno de geossintético seria instalado na região interna da parede lateral do vagão, sendo protegido por uma gaiola (tela de aço) que ficaria no mesmo plano da parede do vagão. A fixação da tira de geossintético seria feita na região superior do vagão. No entanto, devido ao risco estrutural que representaria a alteração das dimensões das paredes laterais dos vagões, essa alternativa seria inviável.

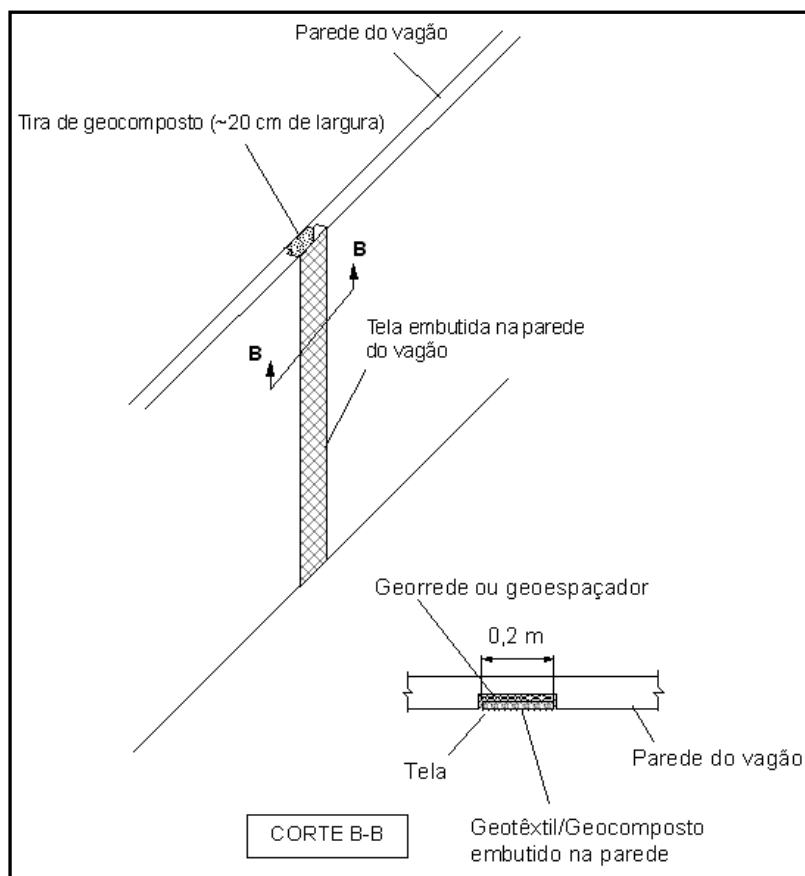


Figura 3.40 - Alternativa 2 para instalação dos drenos de geossintéticos

Com a impossibilidade de instalação do dreno de geossintético no interior da parede lateral do vagão, foi avaliada a possibilidade da instalação dos drenos em um suporte metálico, que seria, posteriormente, inserido dentro do vagão. Esse suporte seria encaixado dentro do vagão, antes do seu carregamento, ficando preso às laterais do vagão. Na Figura 3.41 é apresentado um desenho esquemático do sistema de drenagem com geossintéticos dentro da estrutura de suporte. Pode-se observar que, com essa alternativa de instalação, os drenos de poliuretano instalados no fundo do vagão e os drenos de geossintéticos instalados nas laterais do suporte metálico continuam atuando em conjunto.

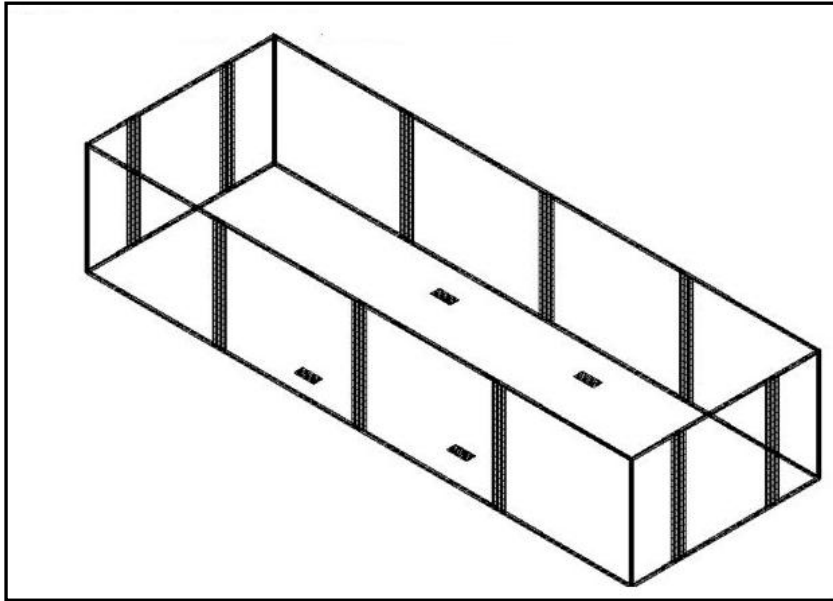


Figura 3.41 - Estrutura de suporte dos drenos de geossintéticos

Com a possibilidade da instalação dos drenos de geossintéticos na estrutura exterior aos vagões de transporte, esse dispositivo de drenagem poderia ser avaliado em diversas condições, como por exemplo, com os drenos de geossintéticos instalados apenas nas cabeceiras dos vagões, conforme apresentado na Figura 3.42.

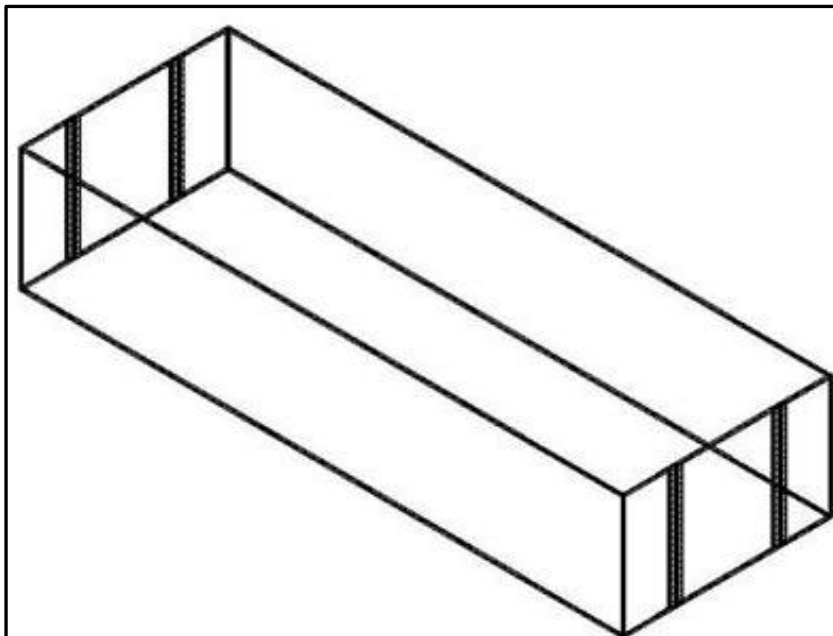


Figura 3.42 - Estrutura de suporte sem os drenos de geossintéticos nas laterais

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Resultados dos ensaios com o minério de ferro (SFCJ)

#### 4.1.1. Caracterização geotécnica do SFCJ

Na Tabela 4.1 são apresentados os principais parâmetros geotécnicos do SFCJ. Trata-se de um material não plástico e de granulometria arenosa, conforme apresentado Figura 4.1.

Tabela 4.1 - Principais parâmetros geotécnicos do SFCJ (UFMG, 2009)

Minério	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	IP	$e_{max}$	$e_{min}$	$k$ (cm/s)	w(%)	$d_{15}$ (mm)	$d_{50}$ (mm)	$d_{85}$ (mm)	$C_u$	$C_c$
SFCJ	4,82	NP	1,2	0,72	$3 \times 10^{-3}$	11,7	0,16	1,20	7,50	23,3	0,48

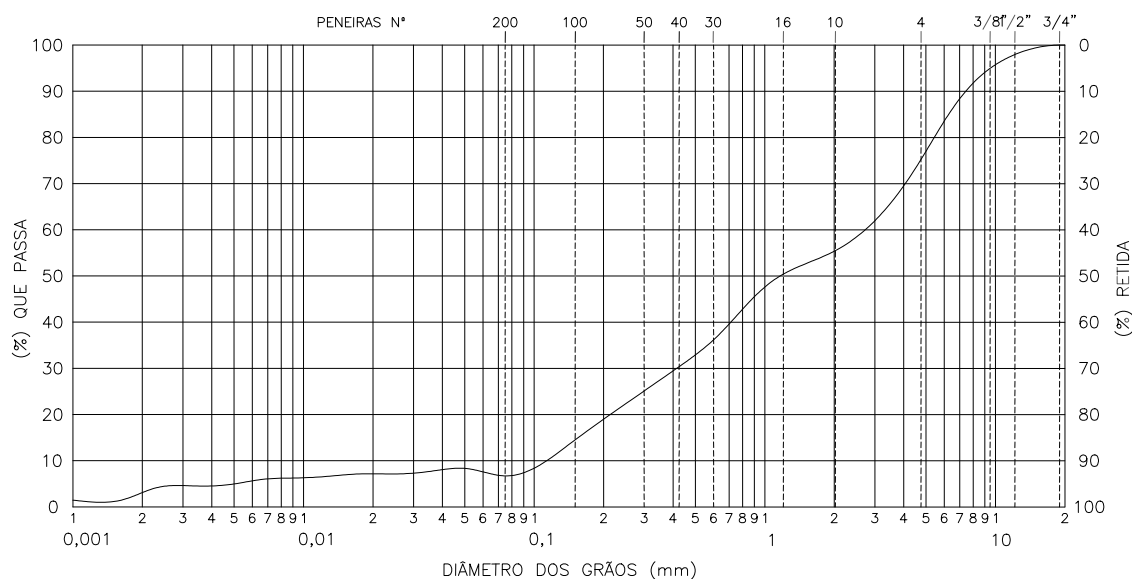


Figura 4.1 - Curva granulométrica do SFCJ

#### 4.1.2. Estabilidade interna do SFCJ

Através da metodologia proposta por Sherard (1979), a curva granulométrica do SFCJ, obtida no ensaio de granulometria, foi subdividida nas porções descritas nas metodologias

apresentadas. A Figura 4.2 apresenta o estudo realizado para a faixa granulométrica do minério SFCJ.

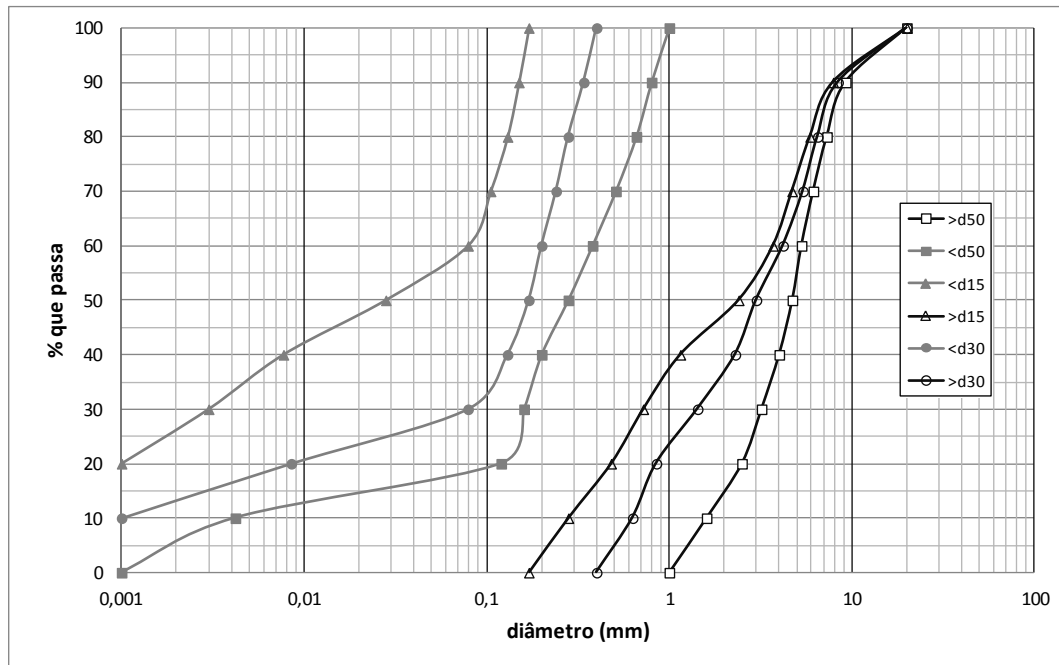


Figura 4.2 - Curvas granulométricas das frações obtidas para a amostra SFCJ a partir da metodologia proposta por Sherard (1979)

A forma da curva granulométrica obtida nos ensaios de granulometria do SFCJ foi comparada com os modelos típicos de curva apresentados na metodologia proposta por Lafleur *et al.* (1989). A classificação apresentou uma curva granulométrica com características de concavidade voltada para cima, conforme pode ser observado na Figura 4.3. Lafleur *et al.* (1989) afirmam que materiais com esta classificação geralmente possuem algum grau de instabilidade interna.

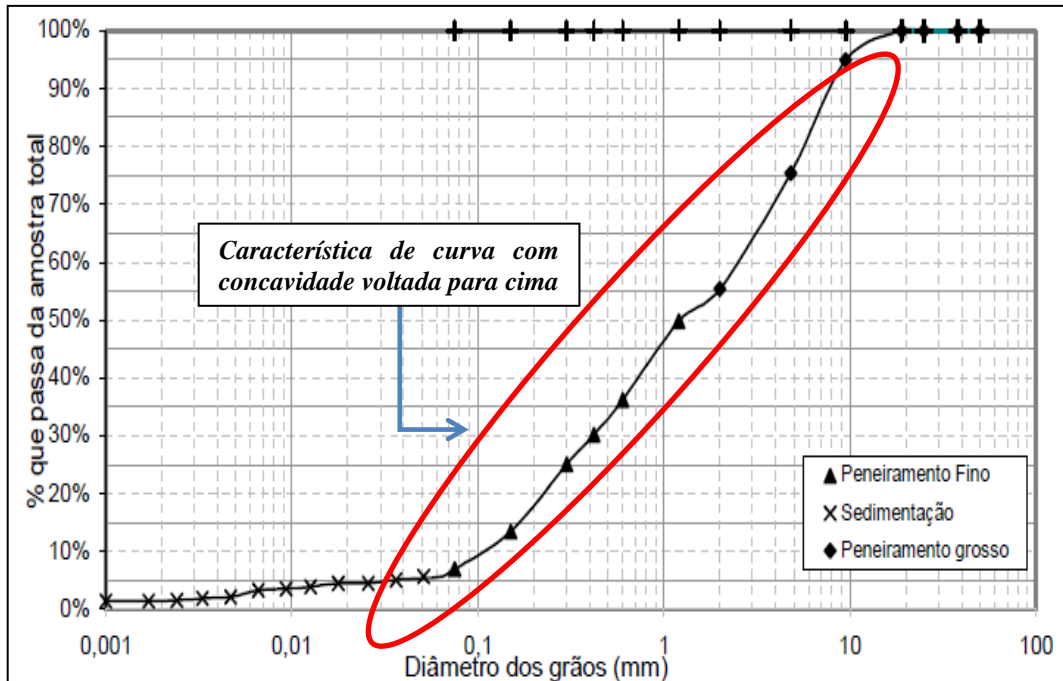


Figura 4.3 - Curva granulométrica do SFCJ e características de concavidade

Na Figura 4.4 é apresentado o estudo para a avaliação da estabilidade interna de acordo com a metodologia proposta por Kenney e Lau (1985). De acordo com esta metodologia, pode-se observar que o minério SFCJ apresenta algum grau de instabilidade interna.

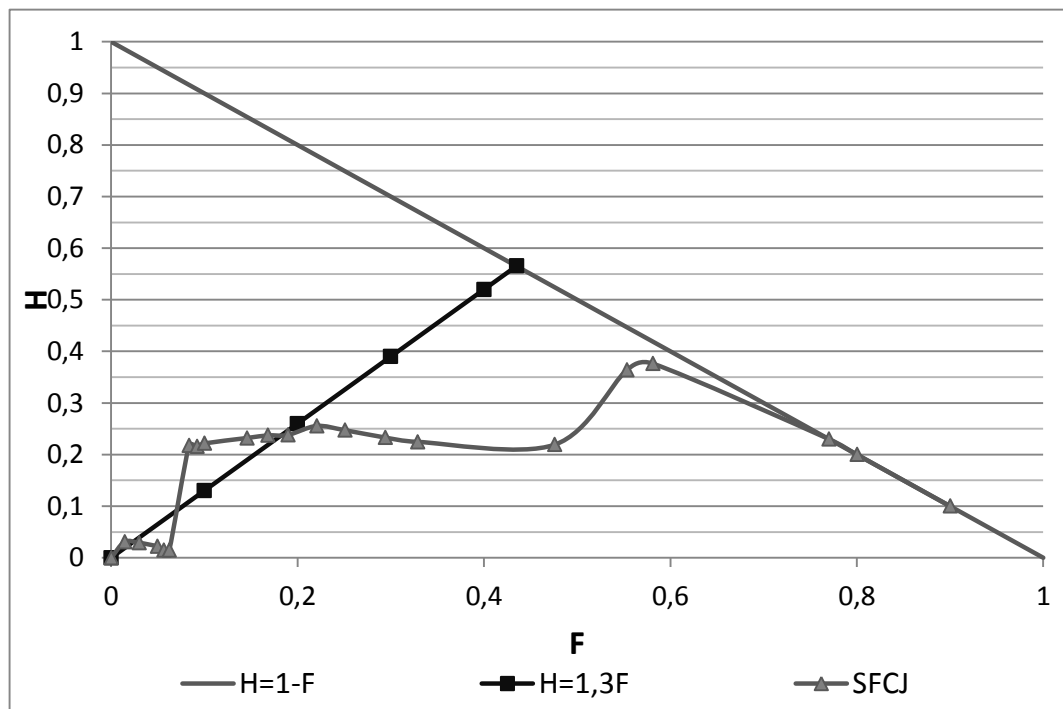


Figura 4.4 - Curva de descrição da curva granulométrica do minério de ferro (SFCJ)

Na Tabela 4.2 são apresentados os resultados do estudo da estabilidade interna do minério. Pelos resultados, observa-se que pela metodologia proposta por Sherard (1979) o minério de ferro foi classificado como internamente estável. No entanto, nas outras duas metodologias (Lafleur *et al.* (1989) e Kenney e Lau (1985)) o minério de ferro apresentou condições de instabilidade interna, podendo ocasionar carreamento de partículas finas pela matriz do material.

Tabela 4.2 - Resultado dos estudos de estabilidade interna

<b>Metodologia</b>	<b>Condições de estabilidade</b>
Sherard (1979)	Internamente estável
Lafleur <i>et al.</i> (1989)	Internamente instável
Kenney e Lau (1985)	Internamente instável

#### 4.1.3. Ensaio com lisímetro

Durante o ensaio de secagem com o lisímetro foi avaliada a variação da sucção, da temperatura e da umidade, na base e no topo da amostra. Foi avaliada também a variação de massa do sistema, com a qual foi calculada a variação da taxa de evaporação. O controle da temperatura da superfície do corpo de prova, bem como a umidade relativa também foi monitorado durante o ensaio de secagem. Os resultados obtidos no ensaio de secagem são apresentados a seguir.

##### 4.1.3.1 Taxa de evaporação

Inicialmente, a amostra permaneceu com uma lâmina d'água na superfície de, aproximadamente, 5 cm e a evaporação foi decorrente da temperatura ambiente. No entanto, para as condições ambientais normais, a evaporação foi muito lenta durante os 17 primeiros dias de ensaio, conforme pode ser observado na Figura 4.5. Devido a essa demora na evaporação da água, o processo foi acelerado com a utilização de lâmpadas halógenas.

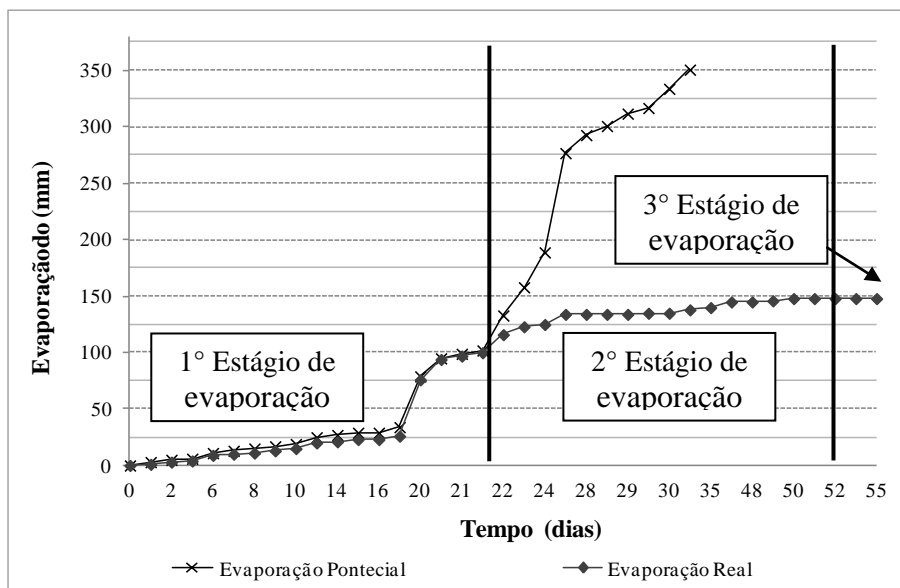


Figura 4.5 - Variação da evaporação real e potencial com o tempo

Com relação às taxas de evaporação real e potencial, observa-se que no início do ensaio as taxas são praticamente iguais enquanto a amostra possuía a lâmina d'água na região superficial. Entre o 17º e o 22º dia de ensaio, com o auxílio das lâmpadas, a taxa de evaporação real e potencial apresentaram a mesma tendência. A partir do 22º dia, observa-se que a taxa de evaporação real apresentou uma considerável redução. Isso já era esperado, pois à medida que o minério seca, reduz a quantidade de água disponível para evaporar. A partir do 49º dia de ensaio, percebe-se que a taxa de evaporação real apresenta pouca ou nenhuma variação.

De maneira geral, na Figura 4.5 podem ser destacados os três estágios de evaporação propostos por Hillel (1982). O primeiro estágio, denominada evaporação potencial, compreendido desde o início do ensaio até o 22º dia, ainda com o minério saturado, as condições externas influenciam na evaporação do material, sendo denominada de evaporação potencial. A região superficial possui grande disponibilidade de água, ficando exposta às variações de temperatura, umidade e ventilação. Esta fase tem fim quando é estabelecida uma resistência ao fluxo da água na superfície do solo e a velocidade de evaporação diminui.

No segundo estágio do processo de evaporação, entre o 22º e 49º dias de ensaio, as condições externas não são mais de importância fundamental (HILLEL, 1982). As

condições ambientais e a capacidade de retenção de água pelo solo são o que interferem neste estágio, o que contribui ainda mais para a redução da taxa de evaporação. Este estágio é denominado de fase de evaporação real. Esse estágio é marcado pelo insuficiente volume de água no solo para a evaporação. A evaporação real é menor do que a evaporação potencial. Neste caso, isso ocorre devido à alta demanda evaporativa provocada pela alta temperatura gerada pelo conjunto de lâmpadas.

O último estágio do processo de evaporação, entre 49° e 54° dias de ensaio, ocorre quando o movimento de água na massa de minério se torna muito lento e a condutividade hidráulica é muito baixa (HILLEL, 1982). Nesse estágio, a evaporação independe das condições ambientes, pois o seu valor é muito baixo e a evaporação torna-se dependente das propriedades físicas do minério de ferro.

Na Figura 4.6 é apresentada a taxa de evaporação real normalizada pela taxa de evaporação potencial. Observa-se que houve uma variação entre as taxas de evaporação real e potencial nos 4 primeiros dias de ensaio. Essa diferença pode ser explicada pela necessidade do sistema entrar em equilíbrio térmico com o ambiente, uma vez que, a partir de então houve certa tendência até a inserção de temperatura no sistema para acelerar o processo de secagem.

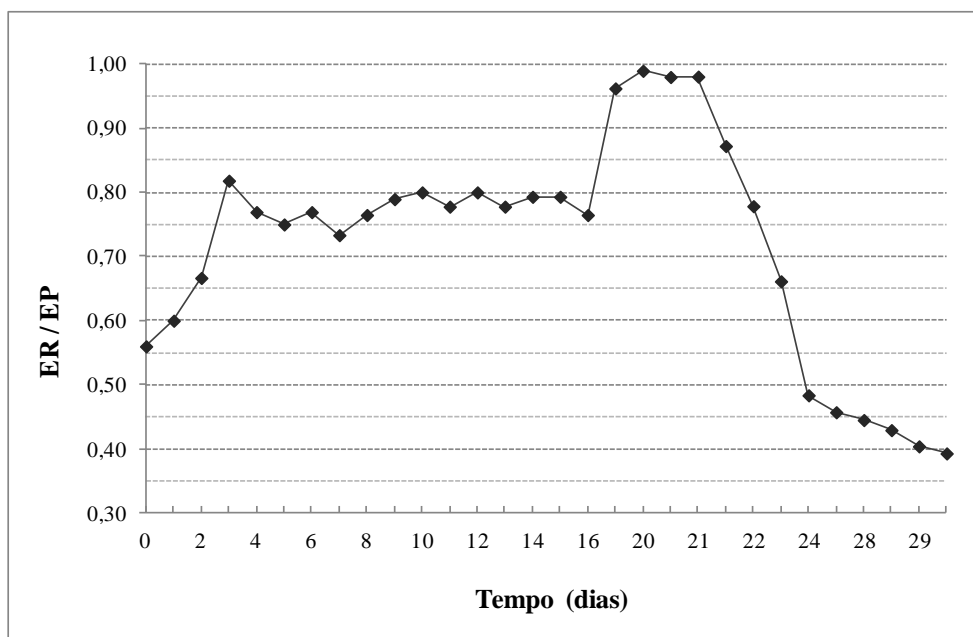


Figura 4.6 - Variação da razão entre as taxas de evaporação real e potencial com o tempo

#### 4.1.3.2 Evolução da sucção no minério de ferro durante a secagem

Durante a realização do ensaio, a variação da sucção no corpo de prova foi monitorada com o auxílio de sensores instalados na base e no topo do corpo de prova (aproximadamente na elevação 25 cm).

A Figura 4.7 apresenta a variação da sucção com o tempo. Pode-se observar que a sucção aumenta com o passar do tempo. Esse comportamento já era esperado, uma vez que o minério estava submetido ao processo de secagem. Devido à proximidade com a superfície e, conseqüente exposição à alta temperatura proporcionada pelas lâmpadas, a região superior do corpo de prova apresentou maior evaporação, ocasionando a elevação da sucção de maneira mais marcante do que a região da base.

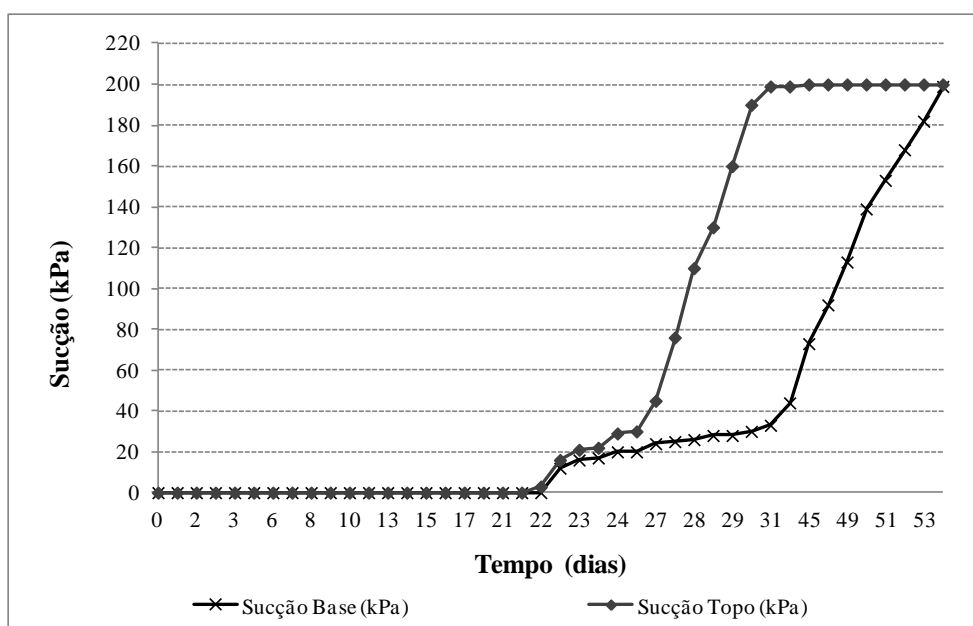


Figura 4.7 - Variação da sucção com o tempo

Nota-se que até, aproximadamente, o 22º dia os valores de sucção medidos nos dois instrumentos são semelhantes. Isso já era esperado, pois o corpo de prova ainda permanecia com umidade bastante elevada, próximo à de saturação. Outro ponto importante a ser observado é o início de medidas de sucção superiores à 0 kPa (3 kPa medido no topo) a partir desse mesmo período. Nesse momento, as taxas de evaporação real e potencial começam a se tornar distintas entre si e o declínio da taxa de evaporação real pode ser observado, conforme apresentado na Figura 4.7.

Pode-se observar que logo após o 29º dia de ensaio o instrumento instalado no topo da amostra alcançou o valor de 200 kPa de sucção (limitação do equipamento utilizado no ensaio). Isso pode ser explicado pelo fato desse instrumento estar próximo à superfície, onde a taxa de evaporação é superior à taxa de evaporação na base do lisímetro. Assim, por receber a incidência maior da temperatura, a região do topo da amostra apresentou uma redução no teor de umidade muito mais elevada do que a base da amostra.

#### 4.1.3.3 Temperatura e umidade relativa

Conforme explicado anteriormente, a temperatura nos extremos do corpo de prova foi monitorada durante a realização do ensaio com o auxílio de sensores de temperatura (termopares). O acompanhamento da temperatura dentro do corpo de prova se fez necessário, uma vez que o fenômeno da evaporação depende, entre outros, da quantidade de calor fornecida ao sistema.

Na Figura 4.8 é apresentada a variação da temperatura durante o ensaio. Além da temperatura do topo e base do corpo de prova, a temperatura superficial, medida Por meio do termômetro de mercúrio instalado logo acima do topo do corpo de prova também foi analisada. Pode ser observado que a partir do 22º dia houve uma considerável elevação na temperatura. A partir desse momento, as lâmpadas foram ligadas para acelerar o processo de evaporação, aumentando, conseqüentemente, a temperatura do sistema.

De maneira geral, a temperatura no corpo de prova foi influenciada diretamente pela variação da temperatura superficial, modificada pela incidência de lâmpadas na superfície do corpo de prova. Conforme esperado, a temperatura medida no topo da amostra se apresentou mais próximo às condições de temperatura superficial do corpo de prova. Ressalta-se que, devido à grande superfície de contato com o ambiente, tornou-se difícil alcançar temperaturas mais elevadas na região superior do corpo de prova.

Observa-se que entre o 46º e 50º dias de ensaio houve uma redução de temperatura no sistema em geral. Esse fato se deu devido à queima de duas lâmpadas do sistema de aquecimento.

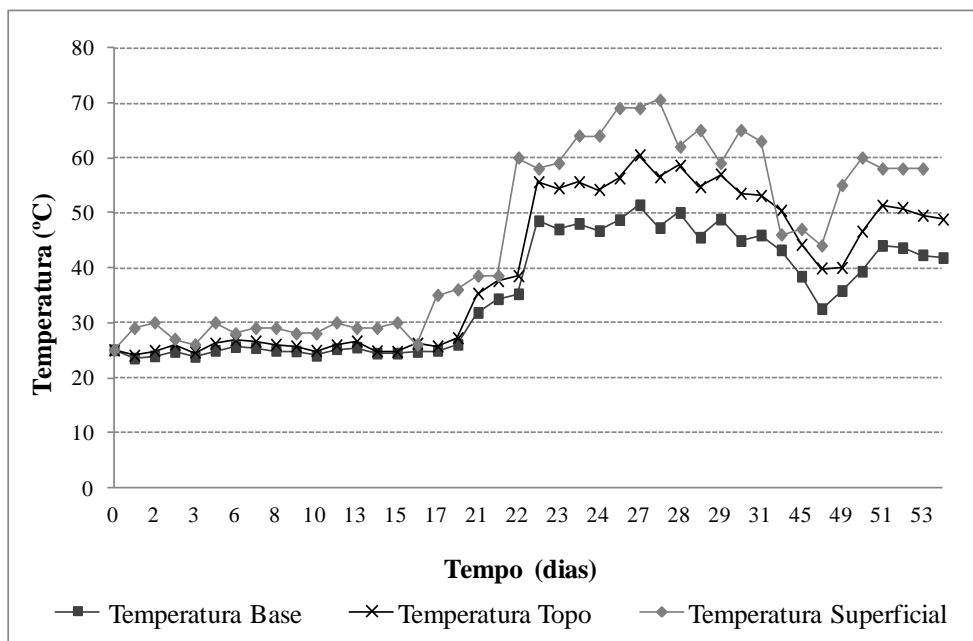


Figura 4.8 - Variação da temperatura com o tempo

Fazendo-se uma comparação com a evolução da sucção com o tempo, nota-se que, conforme já mencionado, a temperatura é um fator importante no processo de evaporação. Isso pode ser confirmado se observado a maior sucção no topo do corpo de prova em relação à base.

Observa-se que a taxa de evaporação, tanto real quanto potencial, são diretamente proporcionais à temperatura: quanto maior a temperatura, maior a taxa de evaporação. No entanto, quando a taxa de evaporação atinge o terceiro estágio, conforme Hillel (1982), a temperatura não tem muita influência no processo de evaporação real.

Juntamente com a temperatura superficial, a umidade relativa na superfície do corpo de prova também foi monitorada utilizando-se um higrômetro digital. Na Figura 4.9 é apresentada a variação da umidade relativa com o tempo. Observa-se que medições baixas de umidade foram obtidas em regimes de temperatura elevada.

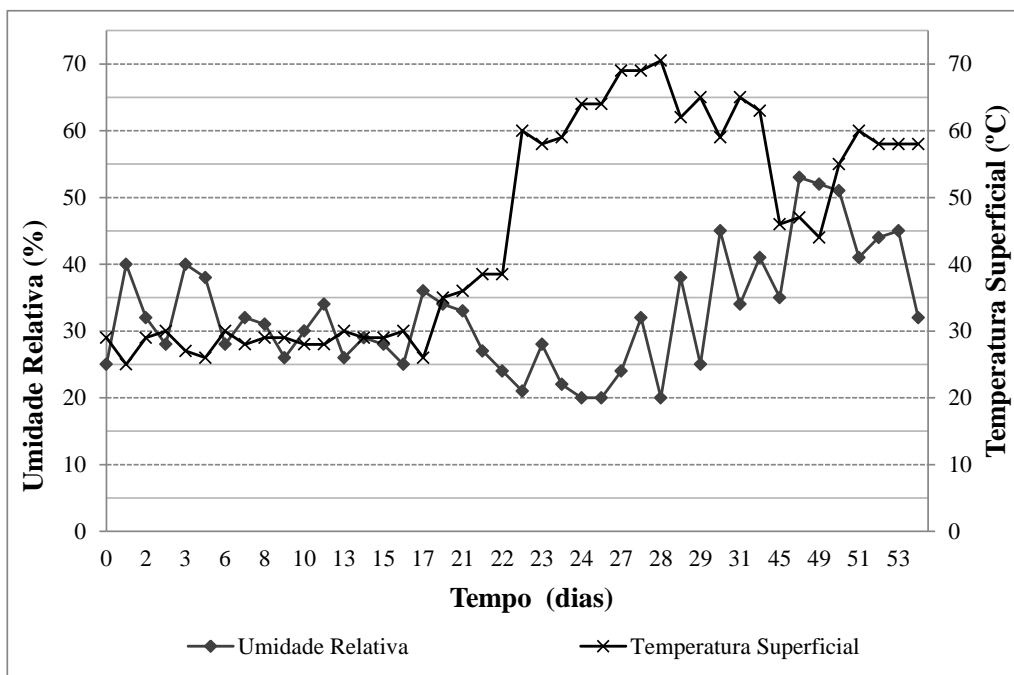


Figura 4.9 - Temperatura superficial e umidade relativa durante o ensaio

#### 4.1.3.4 Umidade gravimétrica

Por meio do acompanhamento da massa do sistema, foi possível monitorar a umidade gravimétrica em função do tempo. Observa-se na Figura 4.10 que o teor de umidade gravimétrica permaneceu na mesma condição inicial (condição de saturação) até aproximadamente o 23º dia. Isso ocorreu devido à lâmina d'água no topo da amostra, permitindo que o material permanecesse saturado.

Observando a variação do teor de umidade percebe-se que a redução da quantidade de água presente no sistema se deu, principalmente devido à elevação de temperatura provocada pelo conjunto de lâmpadas (VILLAR, 2002). A partir do 58º dia de ensaio observa-se que não houve variação do teor de umidade gravimétrico, ficando o valor residual na ordem de 5%.



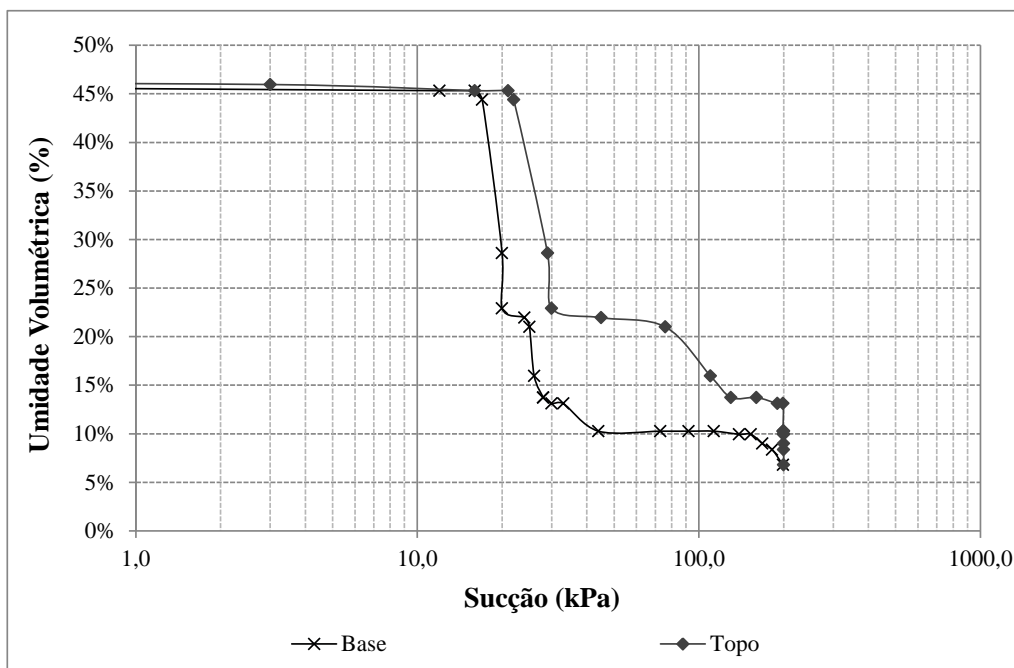


Figura 4.11 - Variação da umidade gravimétrica em função da sucção

#### 4.1.4. Ensaio de coluna

Durante a realização do ensaio de coluna de minério, procurou-se avaliar a variação da sucção, da temperatura e da umidade. Também foram medidas as temperaturas na região superficial do corpo de prova.

##### 4.1.4.1 Evolução da sucção do minério durante a secagem

A sucção ao longo da coluna de minério foi acompanhada em cinco pontos. Os sensores foram instalados a 8, 23, 45, 75 e 105 cm a partir da base, sendo o sensor S1 instalado na região inferior e o sensor S5 na região superior do corpo de prova, conforme apresentado na Figura 3.15.

Devido ao processo de secagem, como esperado, a sucção aumenta com o tempo, conforme pode ser observado na Figura 4.12. O comportamento da sucção durante o ensaio apresentou certa tendência. Observa-se que o sensor localizado na região superior apresentou maior variação e valores mais elevados de sucção. O sensor S1 apresentou variação no valor da sucção a partir do 21º dia, porém, não significativa. O sensor S5 apresentou, logo no início do ensaio, considerável variação, o que pode ser explicado pela

proximidade do sensor com a superfície da coluna de minério. No entanto, a partir do 5º dia de ensaio, não houve variação significativa. O sensor S4 apresentou maior variação entre o 8º e o 21º dia de ensaio, tendo uma variação menos significativa a partir de então. Embora todos os sensores tenham apresentado variações, percebe-se que após o 21º dia de ensaio as variações não são representativas.

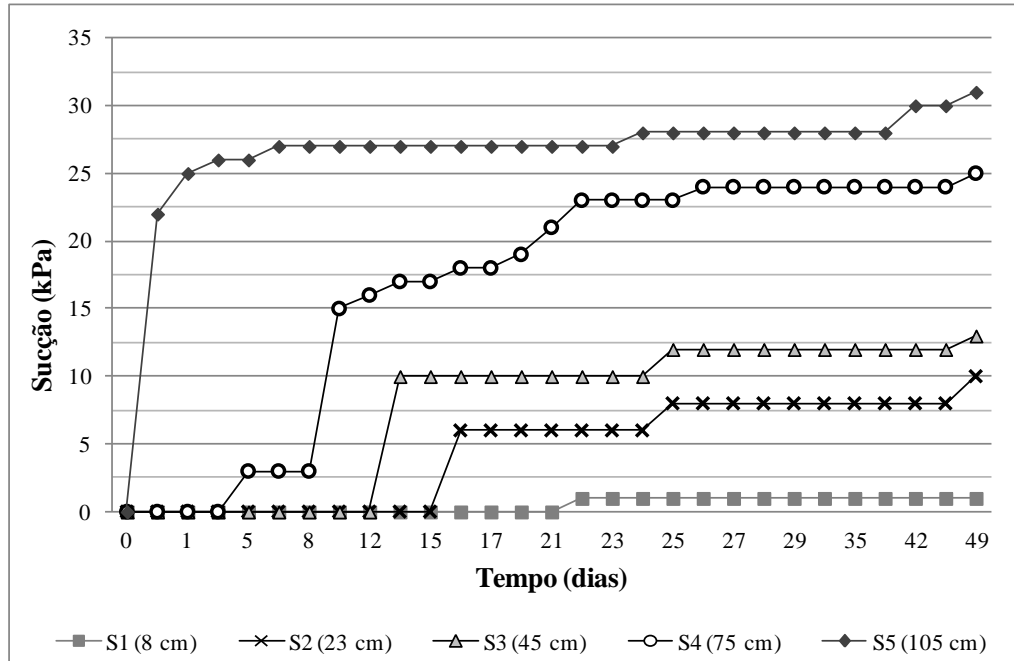


Figura 4.12 - Variação da sucção com o tempo

Traçando-se um perfil de sucção em diferentes etapas do ensaio, conforme apresentado na Figura 4.13, pode-se confirmar a pequena variação da sucção na coluna de minério. Ressalta-se que, devido à pequena ou nenhuma variação da sucção, para os outros dias de ensaio os resultados não serão apresentados. É possível notar que o perfil de sucção mostra o avanço de uma frente de secagem, sem, no entanto, gerar grandes valores de sucção nas profundidades analisadas.

De maneira geral, quanto maior a sucção, menor a condutividade hidráulica. Assim, o transporte de água da parte inferior para a parte superior se torna mais difícil. Isso pode explicar a pouca ou nenhuma variação da sucção durante a realização do ensaio, principalmente nas regiões inferiores da coluna de minério de ferro.

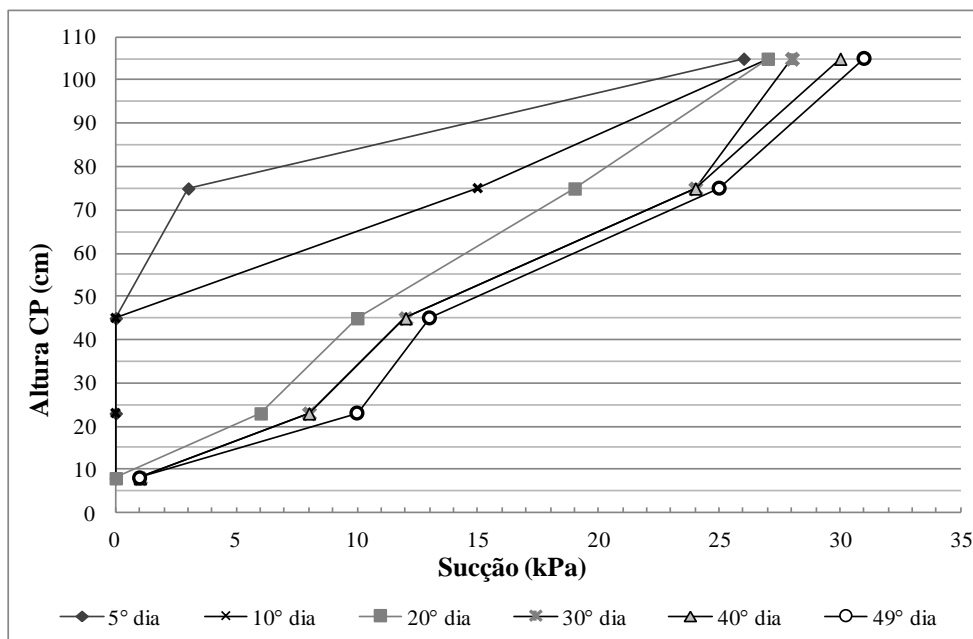


Figura 4.13 - Perfil de sucção com o tempo

#### 4.1.4.2 Evolução da temperatura na coluna de minério durante a secagem

A variação da temperatura na coluna de minério foi monitorada com o auxílio dos termopares inseridos no corpo de prova. Assim como os tensiômetros, os termopares foram instalados a 8, 23, 45, 75 e 105 cm a partir da base, sendo o sensor T1 instalado na região inferior e o sensor T5 na região superior do corpo de prova, conforme apresentado na Figura 3.15.

Na Figura 4.14 é apresentada a variação da temperatura na coluna de minério durante o ensaio. Pode-se observar que a temperatura no T5 permanece praticamente superior à 40°C durante todo o ensaio. A temperatura superficial (TS), medida por meio do termômetro de mercúrio no topo da coluna, manteve-se acima dos 70°C em praticamente todo ensaio. No entanto, observando os termopares da região intermediária (T4 e T3) e da região inferior da coluna de minério, percebe-se que a transferência de calor na coluna de minério não foi suficiente para essas regiões alcançarem valores de temperatura superiores à 35°C, o que dificultou a evaporação da água dessas áreas. Observa-se que entre o 21° e 25° dia as temperaturas dos sensores T1, T2 e T3 apresentaram valores inferiores à 30°C. Nesse período, praticamente todos os sensores apresentaram queda de temperatura.

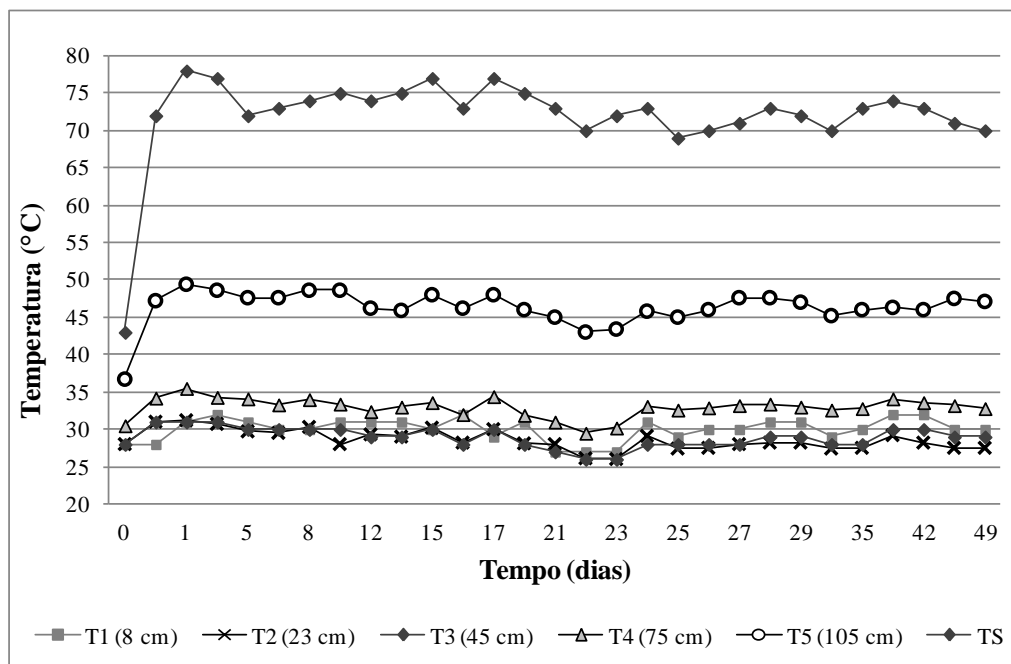


Figura 4.14 - Variação da temperatura com o tempo

Apesar da diferença de temperatura verificada ao longo da coluna de minério, o perfil de temperatura ao longo da mesma, durante o ensaio, apresentou a mesma tendência desde o início ao fim do ensaio, conforme pode ser observado na Figura 4.15. Podem ser observadas as baixas temperaturas nas regiões intermediária e inferior da coluna de minério, conforme já observado anteriormente.

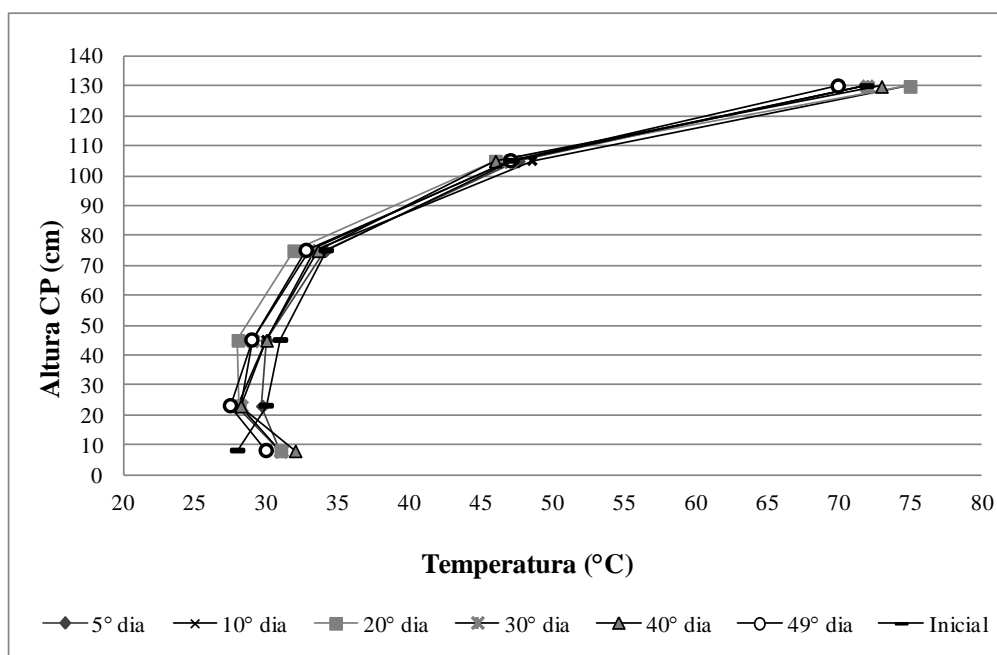


Figura 4.15 - Perfil de temperatura com o tempo

#### 4.1.4.3 Evolução da umidade na coluna de minério durante a secagem

Conforme observado no item anterior, a temperatura não favoreceu o processo de evaporação na coluna de minério de ferro. Verificando os resultados apresentados na Figura 4.16, o sensor U5 apresentou, conforme esperado, maior variação de umidade. Esse resultado se torna plausível uma vez que, para que haja um processo de evaporação eficiente (redução de umidade), um dos fatores preponderantes é a existência de uma fonte de energia e, nesse caso, a região que recebeu maior quantidade de calor apresentou maior redução de umidade.

A região inferior da coluna de minério praticamente não apresentou variação de umidade. Esse fato se deu devido a pouca energia (calor) transferida para a região inferior da coluna, como discutido anteriormente.

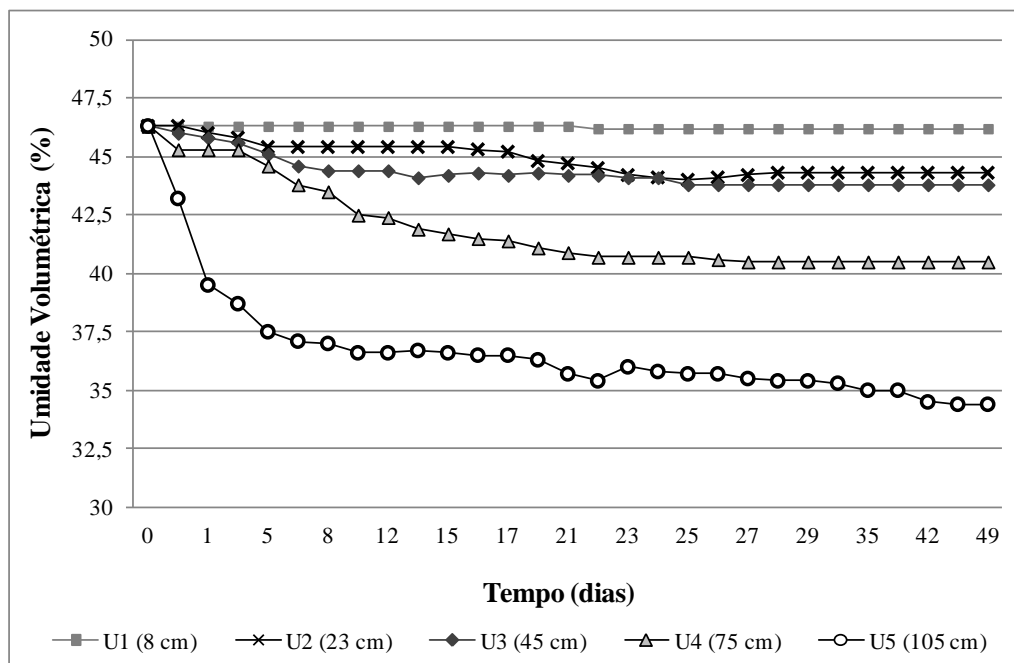


Figura 4.16 - Variação da umidade com o tempo

Observando o perfil de umidade da coluna de minério durante o ensaio, Figura 4.17, nota-se a dificuldade em reduzir a umidade na região inferior, conforme já discutido anteriormente. Na região superior (U5) pode ser observado que a redução de umidade foi da ordem de 27% quando comparado o início e o final do ensaio.

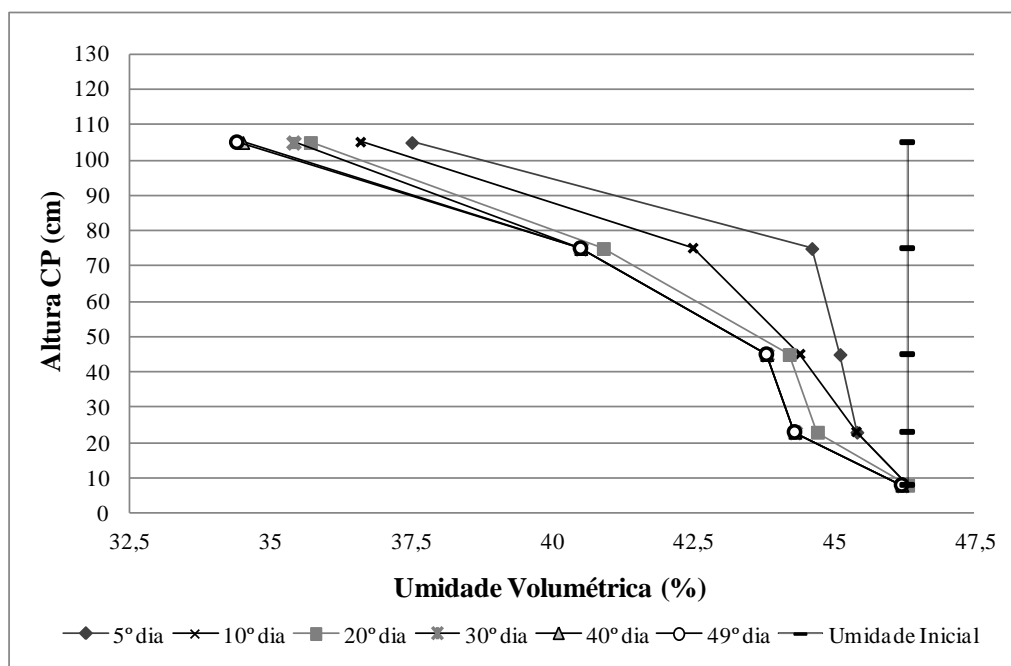


Figura 4.17 - Perfil de umidade com o tempo

## 4.2. Resultados dos ensaios com os geossintéticos

Para os geossintéticos utilizados nos ensaios, foram realizados ensaios de desempenho dos sistemas minério-SFCJ: filtração do tipo razão entre gradientes (GR), ensaios especiais para redução de umidade utilizando a aplicação de vácuo e ensaios de resistência à abrasão dos geossintéticos.

### 4.2.1. Ensaio de abrasão Los Angeles

Após os 500 giros do tambor, foi observado algum desmembramento do geocomposto e algumas marcas de desgaste sofrido pelos geotêxteis, conforme indicado pelas setas na Figura 4.18. Entretanto, observou-se que a colocação de um material granular com características menos agressivas, do tipo esférico, ou não angular, diminui drasticamente a danificação sofrida pelo geotêxtil, sendo o material sintético menos exigido durante o processo abrasivo.

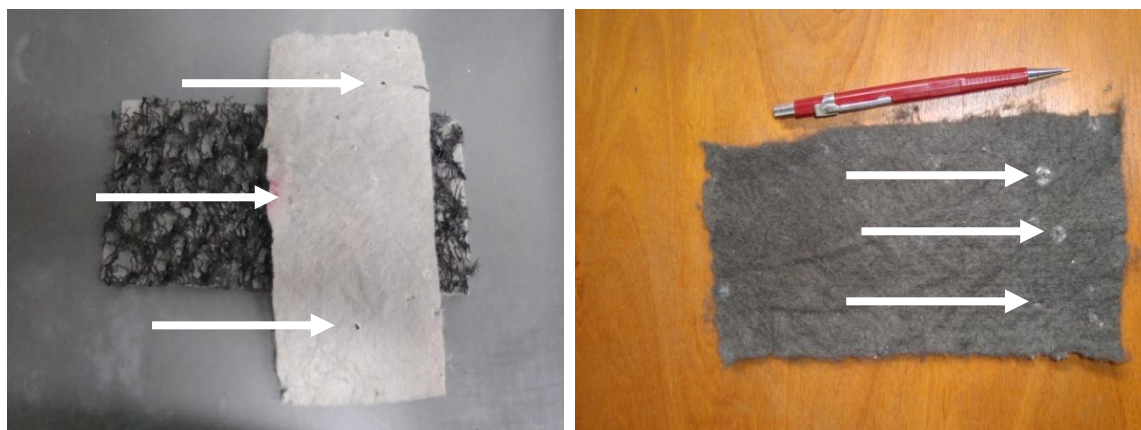


Figura 4.18 - Geocompostos após o ensaio

Ao final do ensaio, algumas amostras não apresentaram desgaste aparente. Isso pode ser explicado pela alta compressibilidade do geocomposto que absorve o impacto impedindo que o mesmo seja transferido para as outras amostras. No entanto, em outras amostras foram verificadas perfurações e desgastes nos corpos de prova, conforme pôde ser observado na Figura 4.18.

As perfurações e cortes são danos que prejudicam consideravelmente as propriedades hidráulicas dos geossintéticos, uma vez que aumentam a dimensão da abertura dos poros do geossintético, e modificam as características mecânicas, por causarem pontos de descontinuidade e fragilidade no material sintético. Dependendo da função que o geossintético vá desempenhar, a consequência do dano e consequente alteração das propriedades podem ser condicionantes no seu desempenho.

Tendo em vista que as correlações obtidas para este ensaio não se mostraram adequadas à realidade do projeto em questão, decidiu-se por utilizar apenas os resultados obtidos pelo ensaio de abrasão Amsler.

#### 4.2.2. Ensaio de abrasão Amsler

Os ensaios de Abrasão Amsler para geotêxteis foram realizados com dois tipos de materiais abrasivos: areia número #50 com 92% de sílica (areia padrão do IPT) e com o minério de ferro *sinter feed* (SFCJ) passante no dreno de poliuretano dos vagões, de maneira que os resultados fossem comparados. Para estes ensaios, os dois tipos de

geotêxteis (GA e GB) foram ensaiados, sendo retirados oito corpos de prova das mantas, quatro de cada gramatura, para a realização dos ensaios de abrasão utilizando a areia o padrão IPT (Figura 4.21 (a) e (b)), e o mesmo número para os ensaios com o SFCJ, conforme pode ser observado na Figura 4.22 (a) e (b).

#### 4.2.2.1 Areia padrão do IPT para ensaios de abrasão Amsler

Foi realizado ensaio de granulometria na areia padrão IPT e no *sinter feed* passante pelo dreno de poliuretano, para eventuais comparações (Figura 4.19).

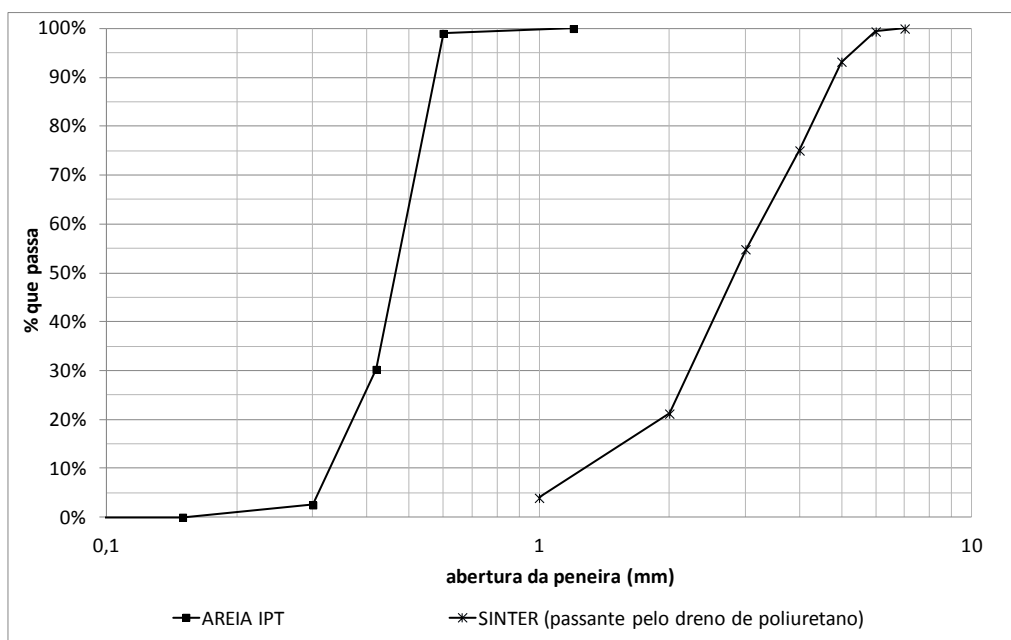


Figura 4.19 - Curva granulométrica da areia padrão do IPT e do SFCJ passante pelo dreno de poliuretano.

Na Figura 4.20 é apresentada a amostra do geotêxtil após os 70 giros do ensaio com a utilização de areia padrão IPT como carga abrasiva, conforme recomendado pela norma NBR 12042 (ABNT, 1992). A granulometria da areia padrão IPT foi apresentada na Figura 4.19.



Figura 4.20 - Geotêxtil após 70 giros

Para obter resultados da resistência à abrasão dos geossintéticos avaliados mais próximos à realidade de campo, optou-se por realizar os ensaios usando o minério de ferro (SFCJ) na granulometria passante pelo dreno de poliuretano que se encontra instalado nos vagões dos trens de carga utilizados em Carajás. Isto se justifica, uma vez que o geossintético dos drenos não estará em contato direto com a granulometria total do minério, mas sim, com a parcela mais fina semelhante àquela que passou pelos drenos de poliuretano.

Na Figura 4.22 são apresentados os ensaios realizados com o minério de ferro. O processo abrasivo que este ensaio tende a provocar é a desagregação superficial, total ou parcial, dos filamentos do geotêxtil, além do alinhamento dos filamentos na direção da passada do pincel do equipamento. Os ensaios forma realizados numa condição muito crítica a qual, possivelmente não deverá ocorrer no campo.

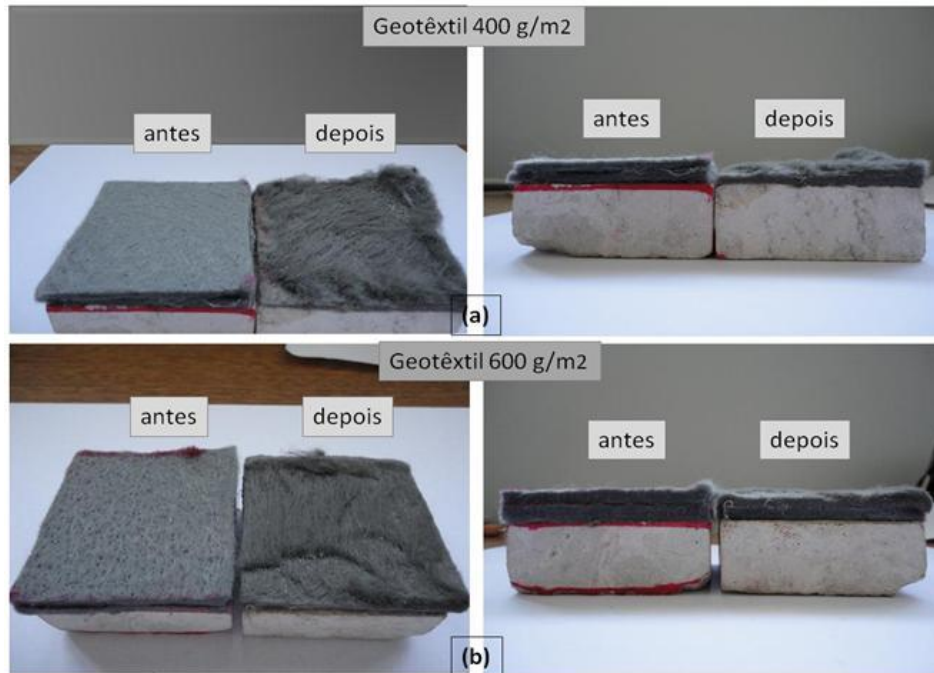


Figura 4.21 - Amostras de geotêxteis virgens e após ensaio de abrasão Amsler com areia padrão IPT. (a) geotêtil (GA); (b) geotêtil (GB)

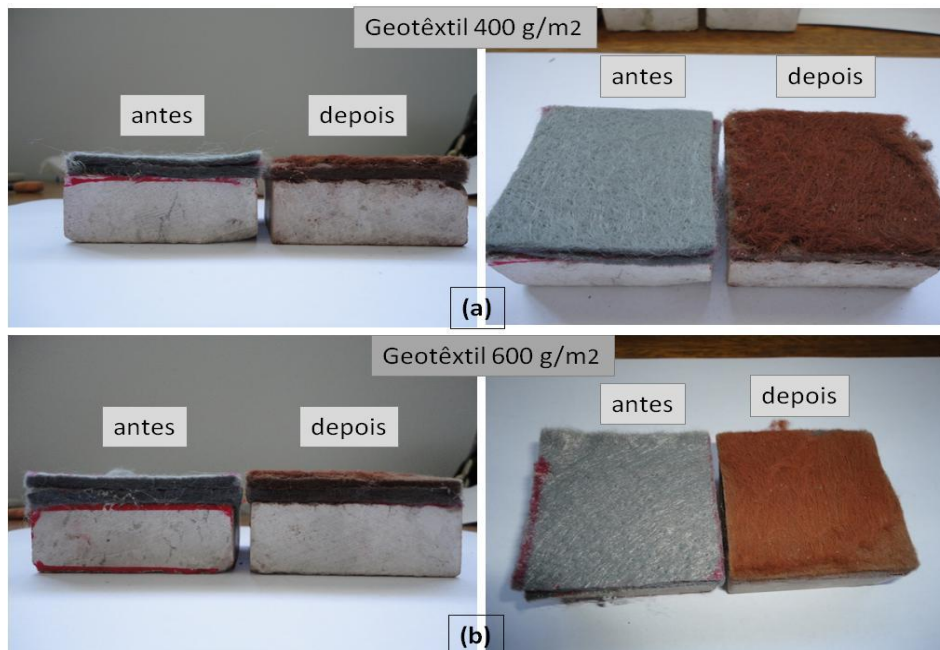


Figura 4.22 - Amostras de geotêxteis virgens e após ensaio de abrasão Amsler com o SFCJ. (a) geotêtil (GA); (b) geotêtil (GB)

Na Tabela 4.3 são apresentados os resultados obtidos para o desgaste à abrasão do tipo Amsler. Nesta tabela, a segunda coluna de cada gramatura corresponde ao resultado obtido para o ensaio efetuado com o minério de ferro (SFCJ). Conforme pode ser observado, os

resultados do desgaste abrasivo do material sintético para as amostras ensaiadas com minério de ferro foram aproximadamente 62% menores do que com areia.

O procedimento de cálculo utilizado para avaliar o desgaste abrasivo apresentado na Tabela 4.3 é descrito nas EQs. 4.1, 4.2 e 4.3.

$$D_A = V_m - E_m \quad (4.1)$$

$$D_S = V_m - E_m \quad (4.2)$$

$$D_T = 100 - \frac{D_S}{D_A} \quad (4.3)$$

Em que:  $D_A$  é o desgaste, em mm, abrasivo da areia;  $D_S$  é o desgaste, em mm, abrasivo do SFCJ;  $V_m$  é a espessura média das amostras virgens;  $E_m$  é a espessura média das amostras ensaiadas;  $D_T$  é o desgaste total do geotêxtil ensaiado com o minério em relação à areia.

Tabela 4.3 - Resultados dos ensaios de Abrasão Amsler

Amostras	Geotêxteis			
	400 g/m <sup>2</sup>		600 g/m <sup>2</sup>	
	Areia IPT	Minério SFCJ	Areia IPT	Minério SFCJ
1	51,08	51,41	47,97	47,78
2	50,93	51,45	48,08	47,92
3	51,11	51,31	48,20	47,74
4	51,08	51,40	48,10	47,69
<b>Média 1-4</b>	<b>51,05</b>	<b>51,39</b>	<b>48,09</b>	<b>47,78</b>
5	50,63	50,70	48,03	47,76
6	50,31	50,78	48,38	47,85
7	50,31	51,45	47,78	47,54
8	50,70	51,73	47,38	47,70
<b>Média 5-8</b>	<b>50,49</b>	<b>51,17</b>	<b>47,89</b>	<b>47,71</b>
<b>Desgaste</b>	<b>0,56</b>	<b>0,22</b>	<b>0,20</b>	<b>0,07</b>
<b>D<sub>T</sub> (%)</b>	<b>60,7</b>		<b>65,0</b>	

Os resultados obtidos nos ensaios mostraram que os processos de abrasão verificados para os dois tipos ensaiados foram de desagregação superficial e de separação das fibras do geotêxtil. O geotêxtil de menor espessura (400 g/m<sup>2</sup>) apresentou maior desgaste superficial.

#### 4.2.3. Ensaio de filtração do tipo Razão entre Gradientes (GR)

Na Tabela 4.4 são apresentados os sistemas analisados nos ensaios de filtração do tipo razão entre gradientes (GR) e na Tabela 4.5 as principais características do ensaio.

Tabela 4.4 - Composição dos sistemas analisados nos ensaios de GR

<b>Código</b>	<b>Sistema geossintético x SFCJ</b>
SFGA	Geotêxtil gramatura 400 g/m <sup>2</sup> combinado com o SFCJ
SFGB	Geotêxtil gramatura 600 g/m <sup>2</sup> combinado com o SFCJ
SFGm	Geocomposto com núcleo drenante de geomanta combinado com o SFCJ
SFGr	Geocomposto com núcleo drenante de georrede combinado com o SFCJ

Tabela 4.5 - Características dos ensaios de GR

<b>Sistema</b>	<b><math>i_{total}^{(1)}</math></b>	<b><math>\sigma_v^{(2)}</math> (kPa)</b>	<b><math>H_{cp}^{(3)}</math> (cm)</b>	<b><math>\Delta t^{(4)}</math> (dias)</b>
SFGA	10	2800	11,0	15
SFGB	10	3000	11,2	20
SFGm	10	2400	11,2	15
SFGr	10	2400	11,2	15

Nota: (1) = gradiente; (2) = tensão normal máxima aplicada; (3) = altura inicial do corpo de prova; (4) = tempo de ensaio.

##### 4.2.3.1. Ensaio de GR do sistema SFGA

A variação do gradiente hidráulico total (i), alterou, sensivelmente, a permeabilidade média do corpo de prova. Na Figura 4.23 é apresentada a variação da condutividade hidráulica (k) para os diferentes níveis de gradientes totais ensaiados.

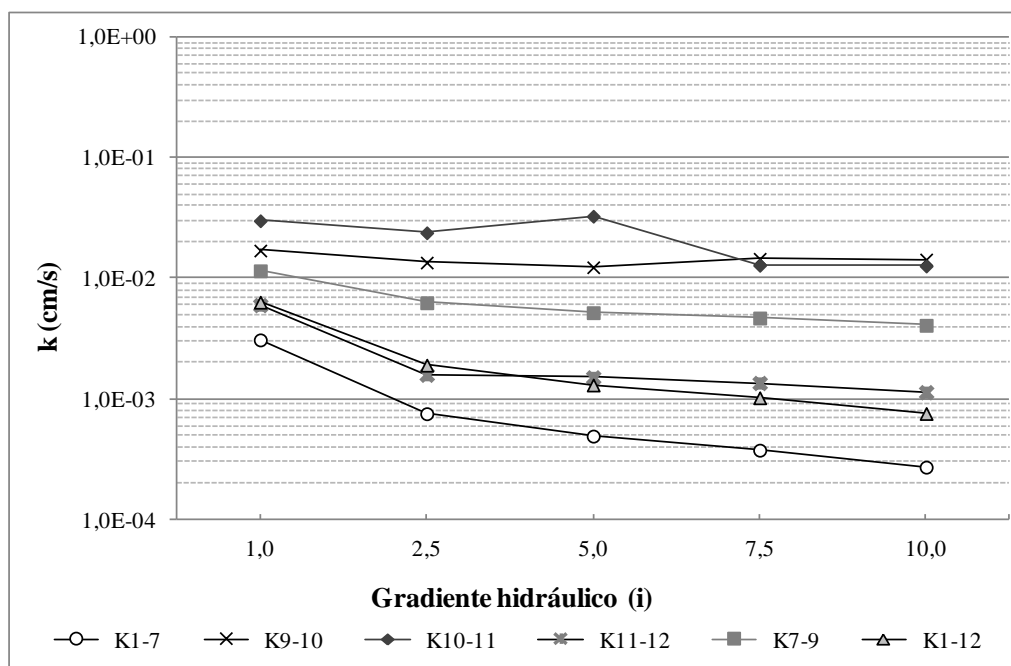


Figura 4.23 - Permeabilidade em função da variação do gradiente hidráulico – SFGA

Para a região superior do corpo de prova, k1-7, a permeabilidade apresentou uma variação da ordem de 10 vezes, possivelmente provocada pela deposição de partículas finas em suspensão no topo da amostra. No restante da amostra foi observada também uma redução da permeabilidade, no entanto, de menores proporções. Pode-se observar que a maior variação da permeabilidade ocorre ao final do primeiro estágio de ensaio. Na interface minério-geotêxtil (k11-12), após o gradiente hidráulico  $i=2,5$ , observa-se certa tendência de estabilidade, o que pode significar uma condição estável entre a interface minério-geotêxtil.

Na Figura 4.24 é apresentado o resultado da vazão em função da variação do gradiente hidráulico. De maneira geral, o aumento da vazão seguiu por aumentos do gradiente hidráulico. Observa-se que, para  $i=2,5$ , houve uma redução da vazão, o que pode ser explicado por uma possível migração de partículas finas no interior da amostra durante a primeira variação do gradiente hidráulico, tendo em vista a grande variabilidade de partículas do minério.

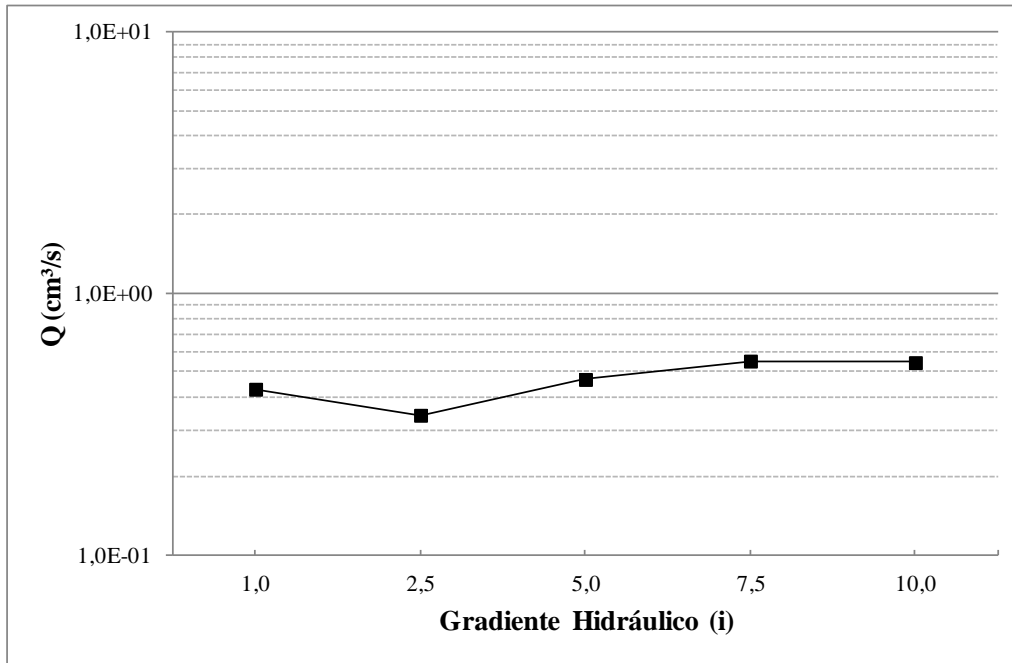


Figura 4.24 - Variação da vazão em função do gradiente hidráulico total aplicado ( $1,0 < i < 10,0$ ) – SFGA

Nos estágios seguintes, até  $i=10$ , o aumento da vazão ocorreu com o aumento no gradiente hidráulico, sem grande variação na condutividade hidráulica, indicando que não ocorreu alteração significativa no corpo de prova, conforme pode ser observado na Figura 4.25.

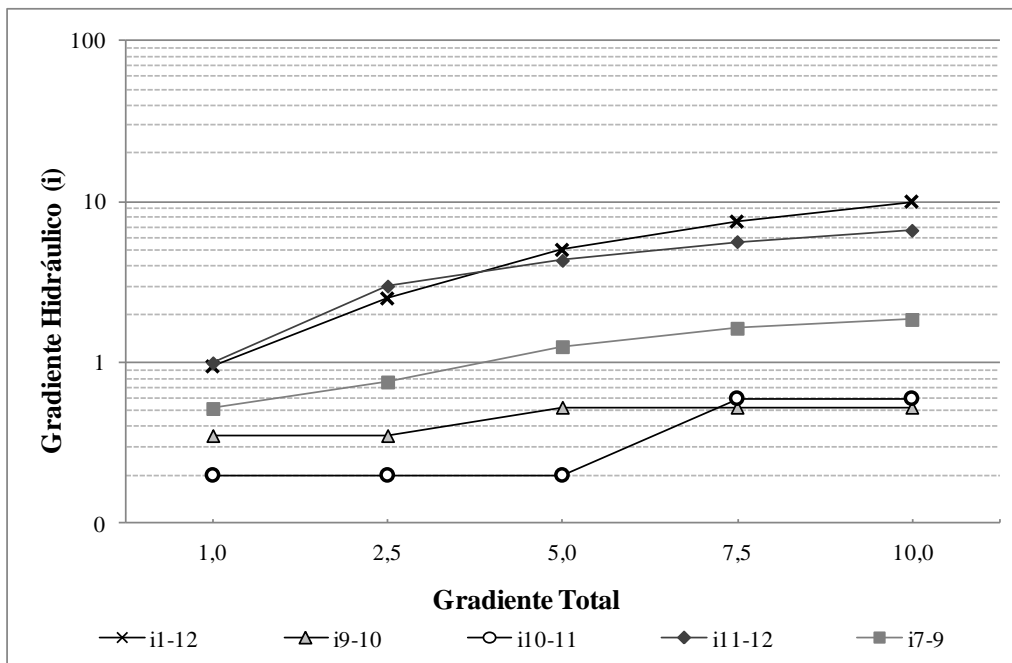


Figura 4.25 - Variação do gradiente hidráulico em função do gradiente total aplicado ( $1,0 < i < 10,0$ ) – SFGA

Na Figura 4.26 são apresentados os resultados de GR nos diferentes níveis de gradientes hidráulicos estudados. Observa-se que os resultados obtidos pela metodologia proposta pela ASTM (1991) apresentaram os valores mais baixos entre as três metodologias analisadas ao longo do ensaio, mostrando-se inferior a 1.

De acordo com os valores obtidos pela metodologia proposta por Gardoni (2000), pode ter ocorrido a colmatação parcial da amostra, uma vez que os valores de GR encontrados se apresentaram significativamente maiores do que 3 durante todo o ensaio. Os valores de  $GR_{3mm}$  são mais sensíveis às condições de alterações do sistema minério-geotêxtil e apresentaram valores muito maiores do que os valores  $GR_{ASTM}$  (1991) e  $GR_{8mm}$  (1994). Estes resultados foram observados também por Gardoni (2000) e Beirigo (2005).

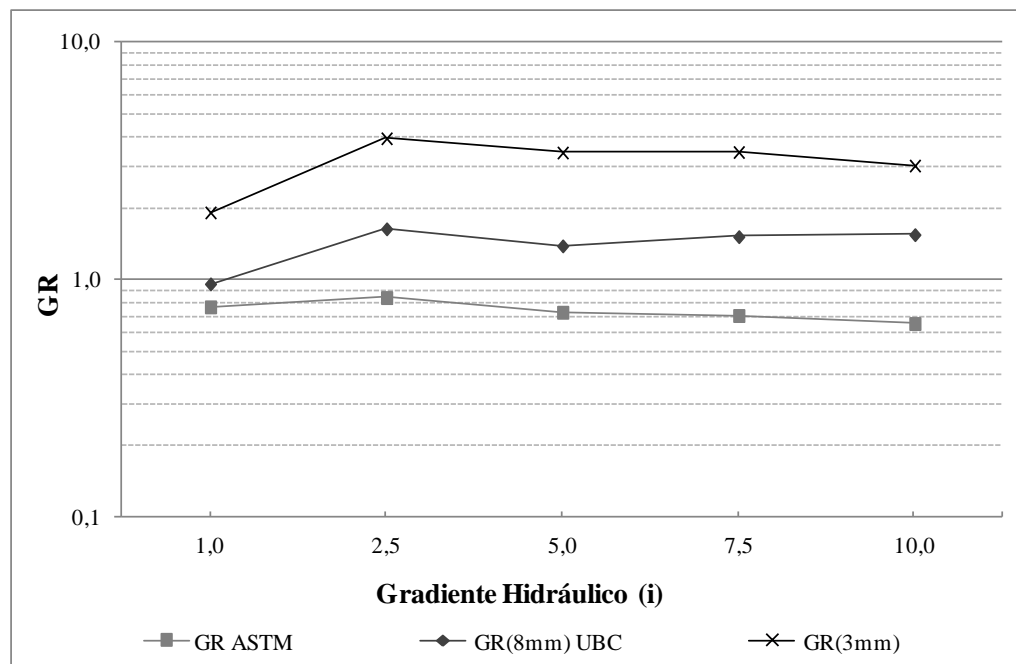


Figura 4.26 - GR em função da variação do gradiente hidráulico total aplicado ( $1,0 < i < 10,0$ ) – SFGA

Ao término da fase de carregamento constante (0 kPa) e gradiente variável, foi observada certa tendência no comportamento hidráulico do corpo de prova com o aumento da tensão. Isto foi confirmado com os resultados apresentados na Figura 4.27 e Figura 4.28.

Observa-se que não houve uma variação brusca da permeabilidade do corpo de prova com o aumento da tensão aplicada. Com relação à vazão, pode-se observar um comportamento

inverso ao carregamento. À medida o carregamento foi aumentando a vazão diminuía, conforme pode ser observado na Figura 4.28.

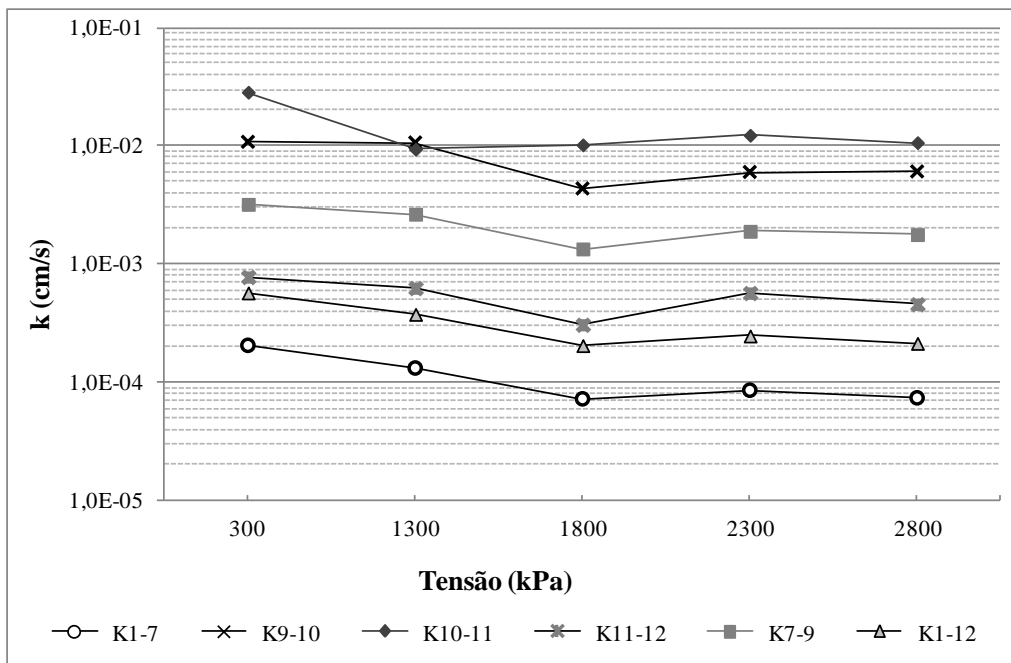


Figura 4.27 - Variação da condutividade hidráulica em função do carregamento – SFGA

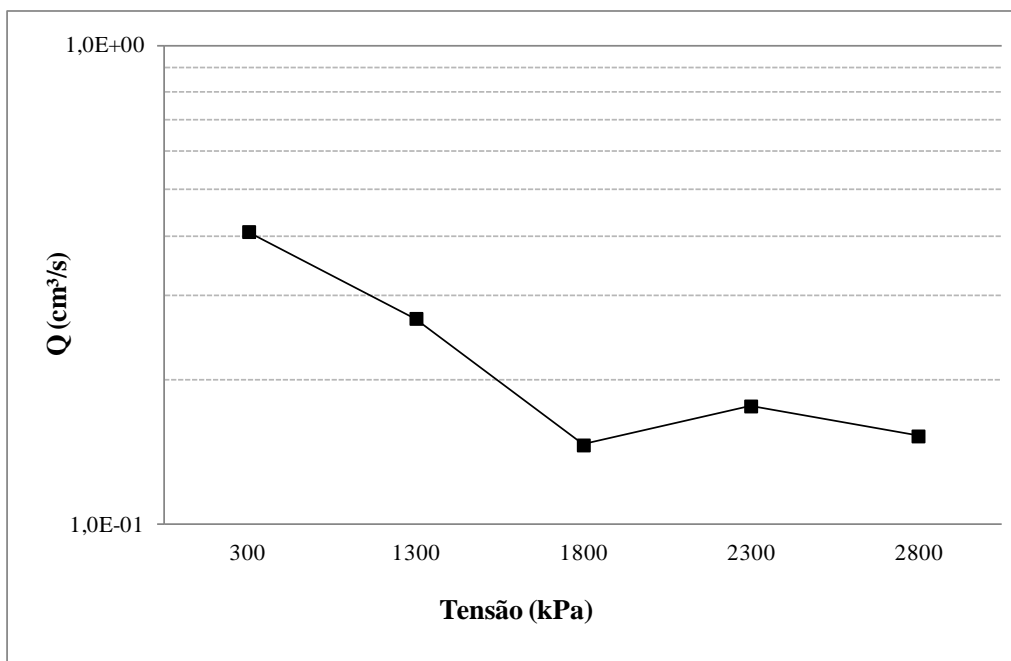


Figura 4.28 - Variação da vazão em função do carregamento – SFGA

Com relação à variação do GR em função do carregamento aplicado, observou-se que não houve variações consideráveis com o aumento da tensão aplicada (Figura 4.29).

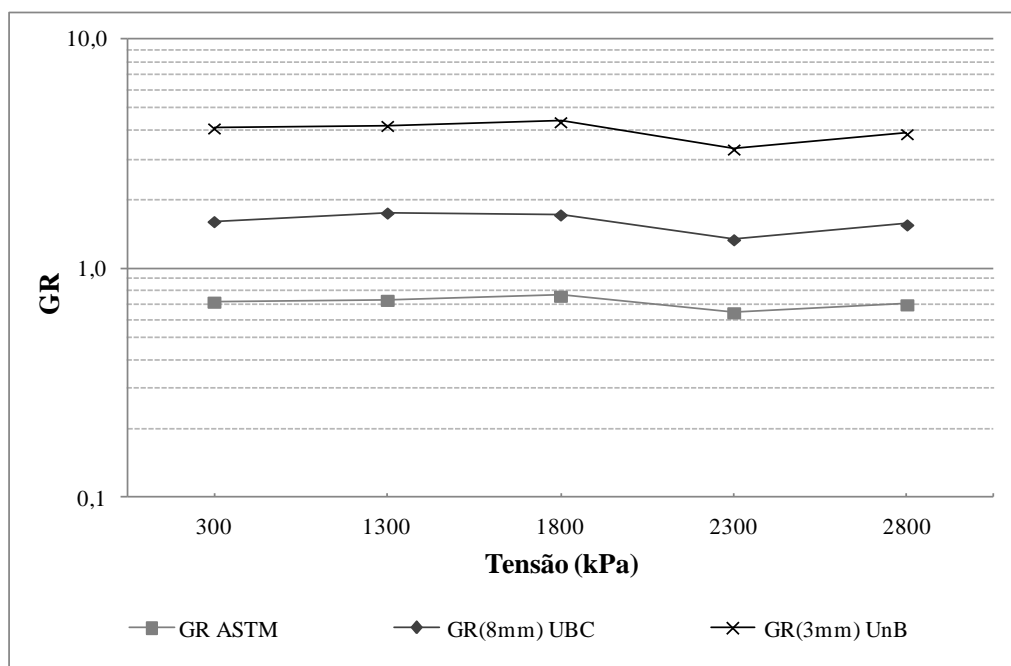


Figura 4.29 - Variação do GR em função do carregamento para  $i=10$  – SFGA

A análise dos resultados obtidos para a variação do GR em função do gradiente hidráulico e do carregamento mecânico mostra que, ao longo dos estágios de incremento de tensões sob gradiente hidráulico constante e igual a 10, partículas finas, eventualmente retidas no geotêxtil durante os estágios de carregamento, passaram através do geotêxtil, contribuindo para a variação de GR apresentado.

A visualização do geotêxtil pela microscopia eletrônica de varredura (MEV) permitiu a identificação de fibras muito impregnadas por partículas de minério de ferro. Observando a Figura 4.30 pode-se notar o considerável grau de impregnação que a amostra apresentou após o último carregamento mecânico aplicado. Partículas com diâmetros em torno de  $116\mu\text{m}$ , muito maiores do que a abertura de filtração do geotêxtil GA ( $\text{FOS} \leq 75\mu\text{m}$ ), também foram observadas. Dessa maneira, os resultados apresentados pelas imagens realizadas na microscopia podem confirmar a provável colmatação do sistema, conforme análise anterior. Na Figura 4.30(a) podem ser notados alguns furos na amostra de geotêxtil provocados possivelmente pelo processo de fabricação da manta (processo de agulhamento).

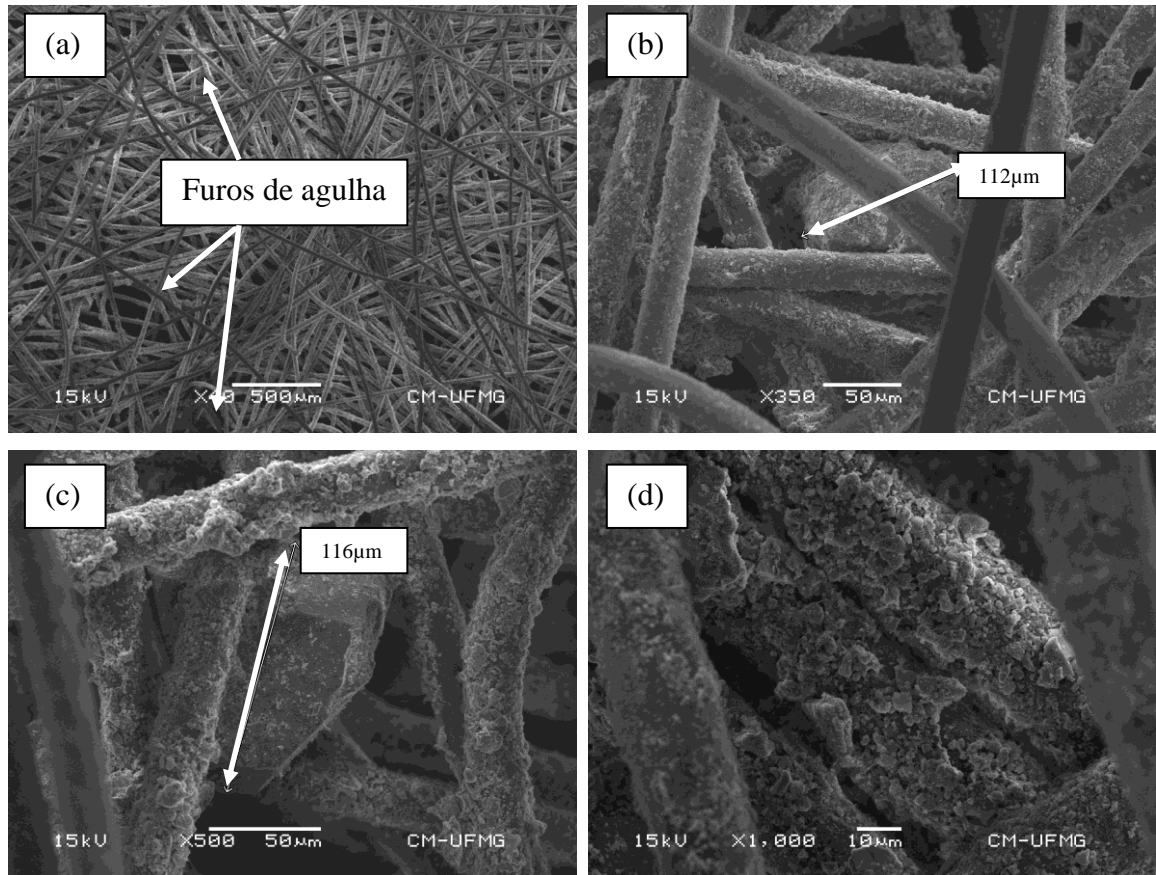


Figura 4.30 - Imagens de MEV do geotêxtil (GA) utilizado no ensaio de GR com o sistema SFGA, ensaiado com variação do gradiente hidráulico e carregamento variável: (a) vista geral; (b) e (c) partículas grandes no interior da amostra; (d) partículas de minério de ferro impregnando as fibras do geotêxtil

#### 4.2.3.2. Ensaios de GR do sistema SFGB

A variação do gradiente hidráulico total (i), alterou a permeabilidade média do corpo de prova. Na Figura 4.31 é apresentada a variação da condutividade hidráulica diante dos diferentes níveis de gradiente total ensaiados.

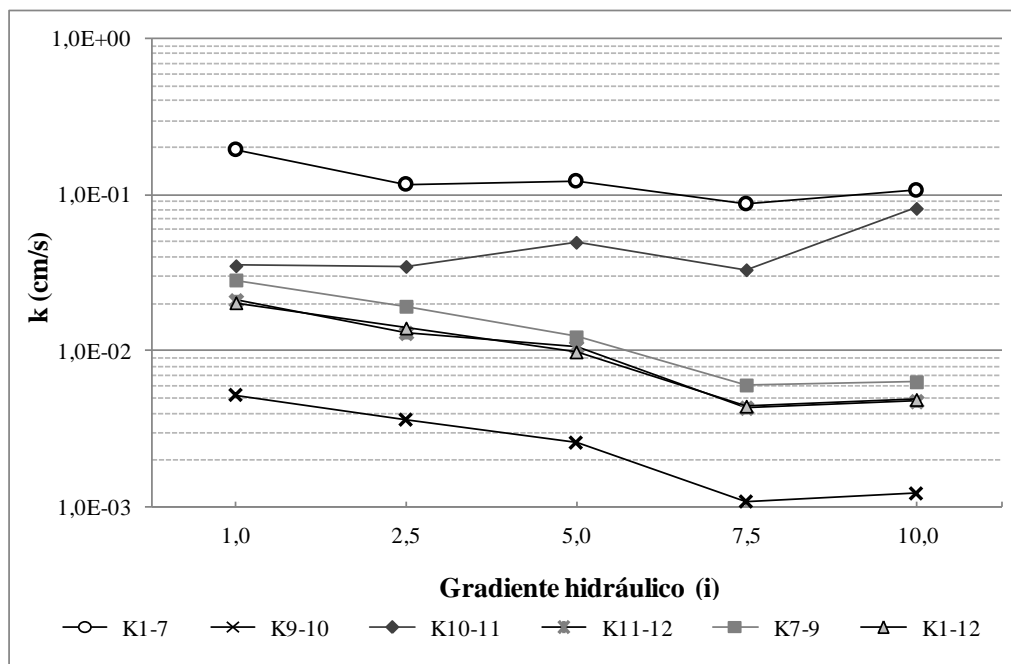


Figura 4.31 - Variação da condutividade hidráulica em função do gradiente hidráulico total aplicado ( $1,0 < i < 10,0$ ) – SFGB

Observa-se que a permeabilidade trecho k10-11 sofreu alteração considerável durante a variação do gradiente hidráulico, enquanto que as outras regiões apresentaram a mesma tendência de variação. Quando o gradiente foi elevado de  $i=5,0$  para  $i=7,5$ , houve uma significativa redução da vazão (Figura 4.32). A partir do gradiente hidráulico  $i=7,5$ , observa-se que a permeabilidade do corpo de prova praticamente não sofreu alteração quando o gradiente foi elevado para  $i=10$ , com exceção do k10-11. No entanto, observando o gráfico da permeabilidade em função do gradiente (Figura 4.33), percebe-se que a maior variação da permeabilidade do corpo de prova durante o ensaio ocorreu justamente na mudança do gradiente  $i=5,0$  para  $i=7,5$ . Este fato pode ser explicado por uma possível acomodação de partículas no interior do corpo de prova durante a variação do gradiente hidráulico.

Nota-se ainda que, em toda a região do corpo de prova, após o último estágio de gradiente ( $i=10$ ), houve tendência de estabilidade da permeabilidade, exceto k10-11, o que pode significar uma condição estável em toda amostra a partir de então. Nos estágios posteriores, até ser atingido o gradiente hidráulico de  $i=10,0$ , o aumento da vazão foi acompanhado de aumentos no gradiente hidráulico sem grande variação da condutividade hidráulica, indicando possivelmente que não houve alteração relevante no corpo de prova.

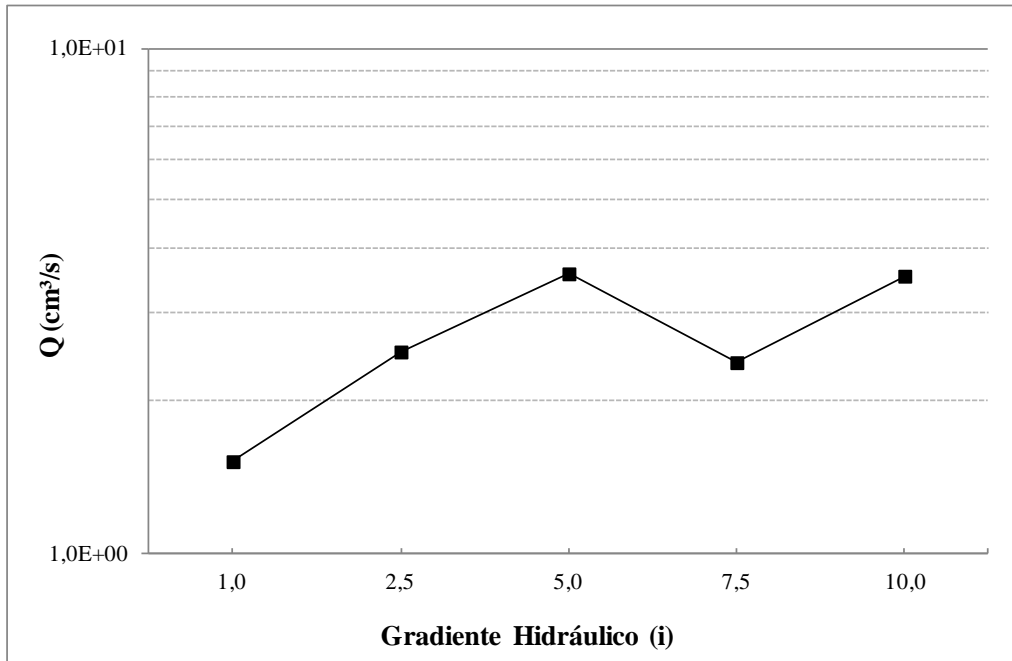


Figura 4.32 - Variação da vazão em função do gradiente hidráulico total aplicado ( $1,0 < i < 10,0$ ) – SFGB

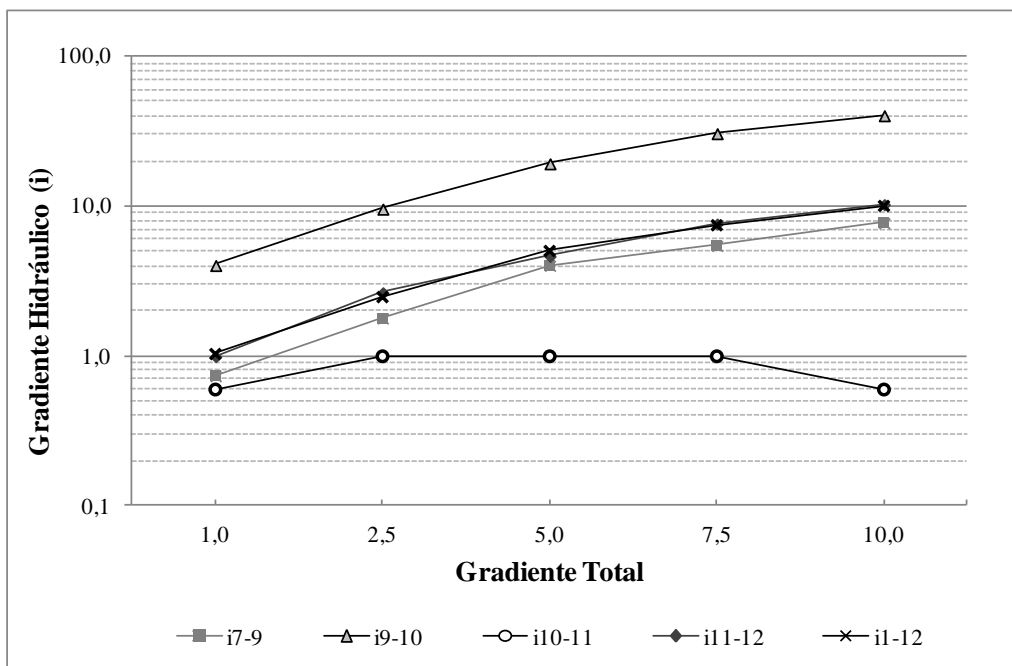


Figura 4.33 - Variação do gradiente hidráulico em função do gradiente total aplicado ( $1,0 < i < 10,0$ ) – SFGB

De maneira geral, os valores de GR se apresentam próximos à unidade para as metodologias  $GR_{8mm}$  e  $GR_{3mm}$ . Na Figura 4.34 são apresentados os resultados de GR nos diferentes níveis de gradientes estudados. Percebe-se que os valores obtidos pela metodologia proposta pela UBC apresentaram valores mais baixos entre as três

metodologias analisadas ao longo do ensaio. De acordo com os valores observados, pode ter ocorrido *piping* na região mais próxima da face do geotêxtil.

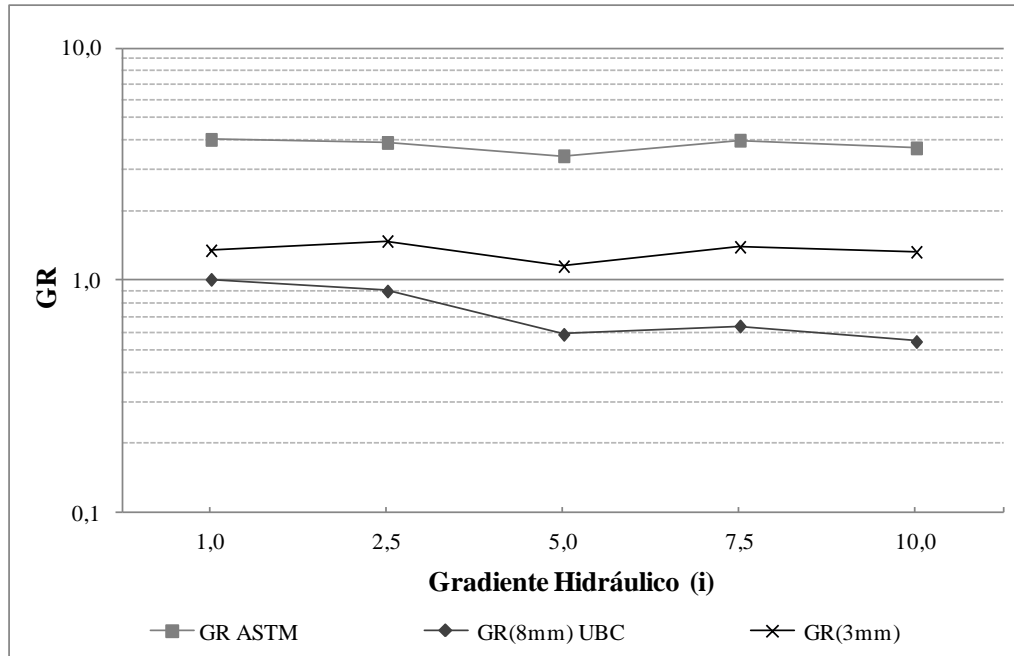


Figura 4.34 - GR em função da variação do gradiente hidráulico total aplicado ( $1,0 < i < 10,0$ ) – SFGB

Pela metodologia proposta por ASTM (1991) os valores elevados de GR indicam possível colmatação do sistema, mas como o  $GR_{3mm}$  apresenta valores próximos da unidade, assim como o  $GR_{8mm}$ , pode ter ocorrido uma colmatação no próprio minério de ferro, que possui comportamento de solos internamente instáveis (conforme verificado no item 4.1) causada pelas elevadas tensões aplicadas e pela acomodação das partículas do SFCJ, elevando o valor do  $GR_{25mm}$ , que é calculado a 25 mm da superfície do topo da camada do geotêxtil.

Ao término da fase de carregamento constante (0 kPa) e gradiente variável, foi observado certa tendência de estabilização no comportamento hidráulico do corpo de prova com o aumento da tensão. No entanto, com a aplicação da tensão houve uma pequena redução da permeabilidade do corpo de prova como um todo. Paralelamente, devido a essa redução de permeabilidade, a vazão também decresceu consideravelmente, conforme pode ser observado na Figura 4.35 e Figura 4.36.

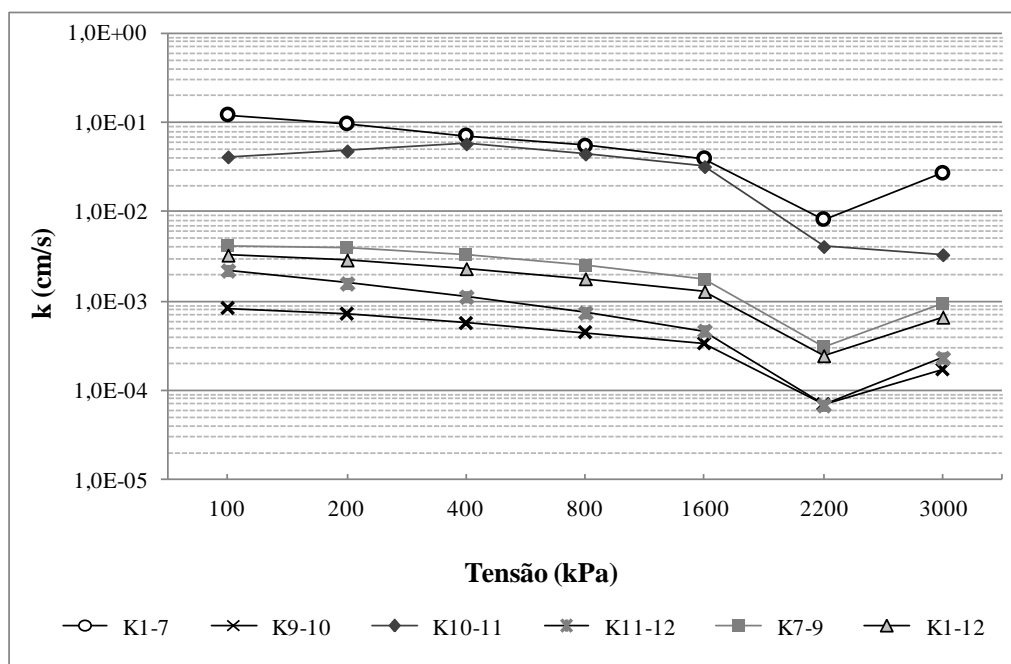


Figura 4.35 - Variação da condutividade hidráulica em função do carregamento – SFGB

Pode ser observado que a permeabilidade e a vazão apresentavam certa tendência até a tensão de 1600 kPa. No entanto, para a tensão normal de 2200 kPa houve um decréscimo muito considerável nos resultados. Os valores de permeabilidade e vazão apresentados para a tensão normal de 3000 kPa demonstram a tendência inicial do ensaio. Dessa maneira, pode ter havido um erro durante a leitura do ensaio para a tensão normal de 2200 kPa.

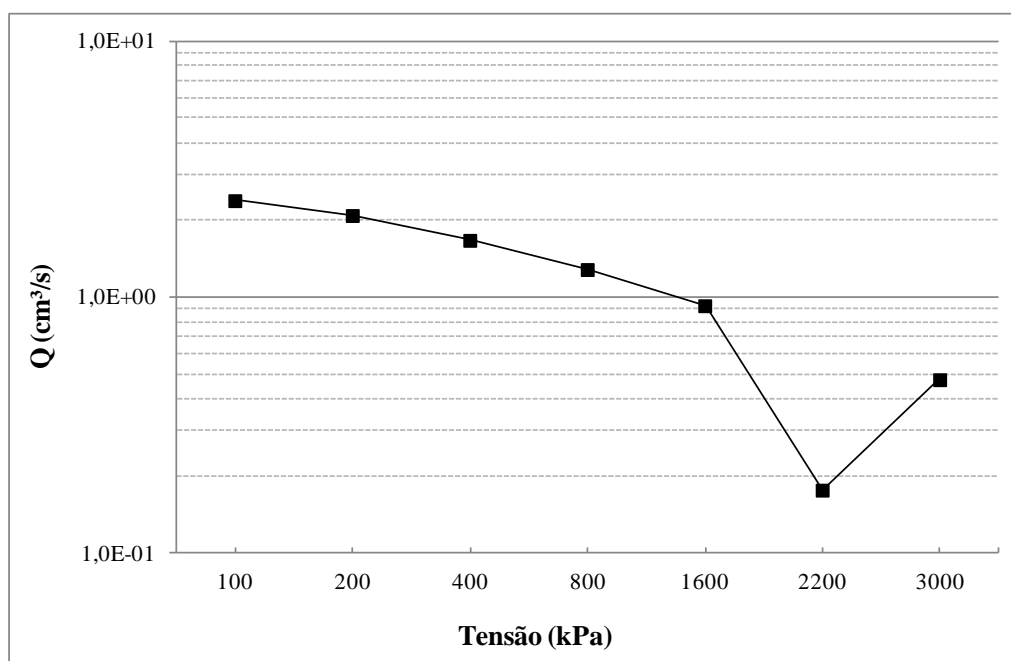


Figura 4.36 - Variação da vazão em função do carregamento – SFGB

Com relação à variação do GR em função do carregamento aplicado (Figura 4.37), observou-se que o valor de GR se apresentou bastante sensível com a variação do carregamento. Esse fato pode ser explicado por possíveis deslocamentos de partículas finas para a parte inferior do corpo de prova, justamente no contato do geotêxtil com o minério de ferro. Observa-se que ao final do ensaio, após a aplicação da tensão vertical de 3000 kPa, o valor de GR se apresentou superior a unidade para as três metodologias analisadas, o que pode significar algum grau de colmatção do geotêxtil.

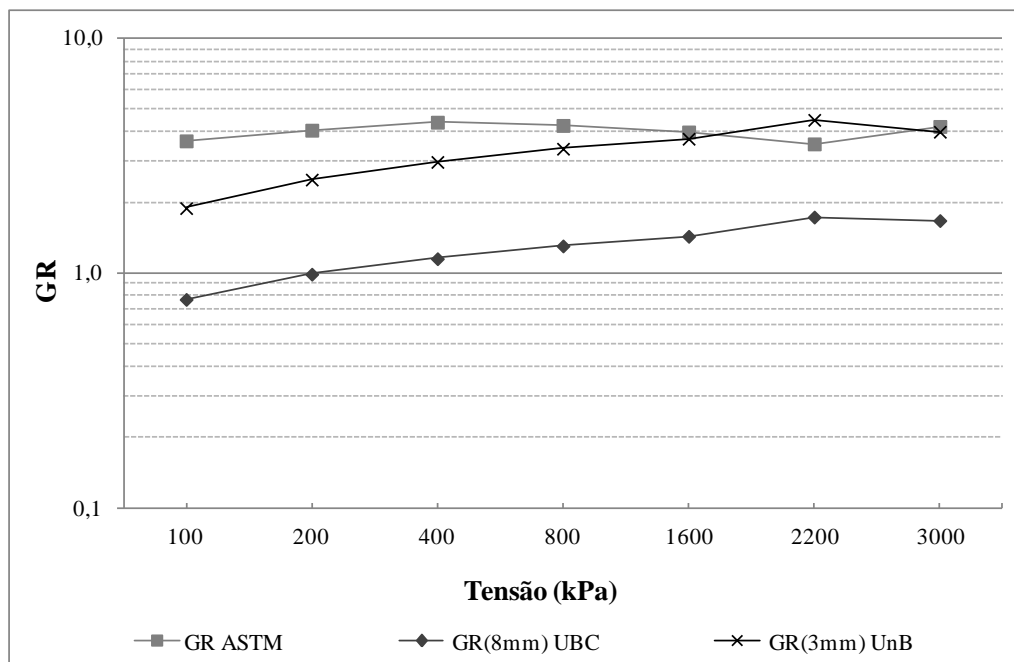


Figura 4.37 - Variação do GR em função do carregamento – SFGB

A análise destes resultados com a variação do GR em função do gradiente hidráulico e do carregamento mecânico mostra que, ao longo dos estágios de incremento de tensões sob gradiente hidráulico constante e igual a 10, partículas finas, eventualmente retidas no geotêxtil durante os estágios de carregamento, passaram através do geotêxtil, contribuindo para a variação de GR apresentada.

A visualização do geotêxtil obtidas por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV) permitiu a identificação de fibras relativamente impregnadas por partículas finas. Na da Figura 4.38 pode-se observar o baixo grau de impregnação que a amostra apresentou após o último carregamento mecânico aplicado. Dessa maneira, os resultados apresentados

pelas imagens realizadas na microscopia podem confirmar a provável colmatção do minério de ferro e não do sistema do geotêxtil, conforme análise anterior.

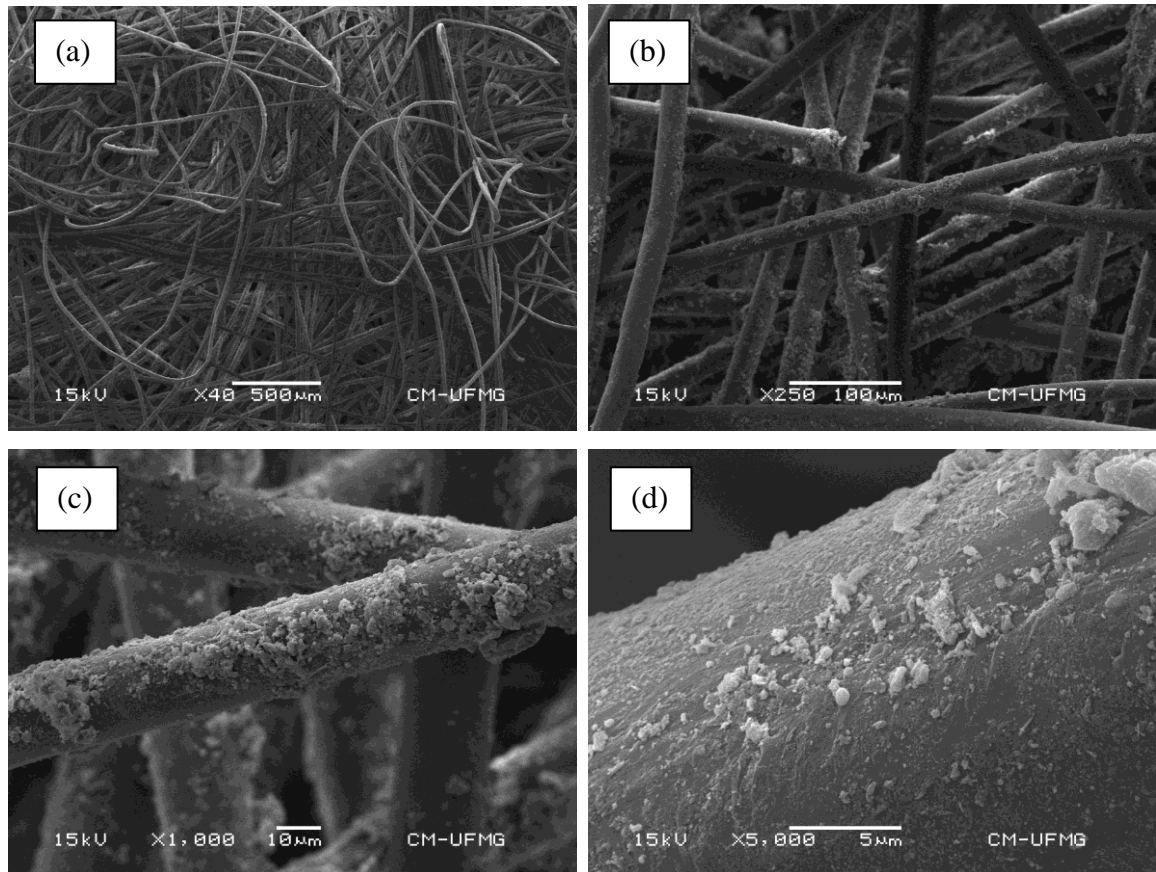


Figura 4.38 - Imagens de MEV do geotêxtil (G2) utilizado no ensaio de GR do sistema SFGB, ensaiado com variação do gradiente hidráulico e carregamento variável: (a) vista geral (fibras soltas na amostra); (b) e (c) partículas no interior da amostra; (d) material impregnado nas fibras do geotêxtil

#### 4.2.3.3. Ensaio de GR do sistema SFGm

A variação do gradiente hidráulico total ( $i$ ), alterou significativamente a permeabilidade do corpo de prova. Observa-se que a permeabilidade, de maneira geral, apresentou certa tendência durante a variação do gradiente hidráulico. No entanto, na região intermediária da amostra, foi observada uma grande variação da condutividade hidráulica. Isso pode ter ocorrido por possíveis deslocamentos de partículas no interior do corpo de prova. Na Figura 4.39 é apresentada a variação da condutividade hidráulica com diferentes níveis de gradiente total ensaiados. Nas regiões k1-7 e k1-12 a condutividade hidráulica reduziu com a elevação do gradiente hidráulico. Logo na primeira alteração de gradiente ( $i=2,5$ ), pôde-

se observar um comportamento diferenciado na permeabilidade do corpo de prova. Entre os gradientes  $i=2,5$  e  $i=7,5$  a permeabilidade média da amostra se manteve praticamente constante, ocorrendo a redução da mesma quando o gradiente hidráulico foi elevado para  $i=10$ .

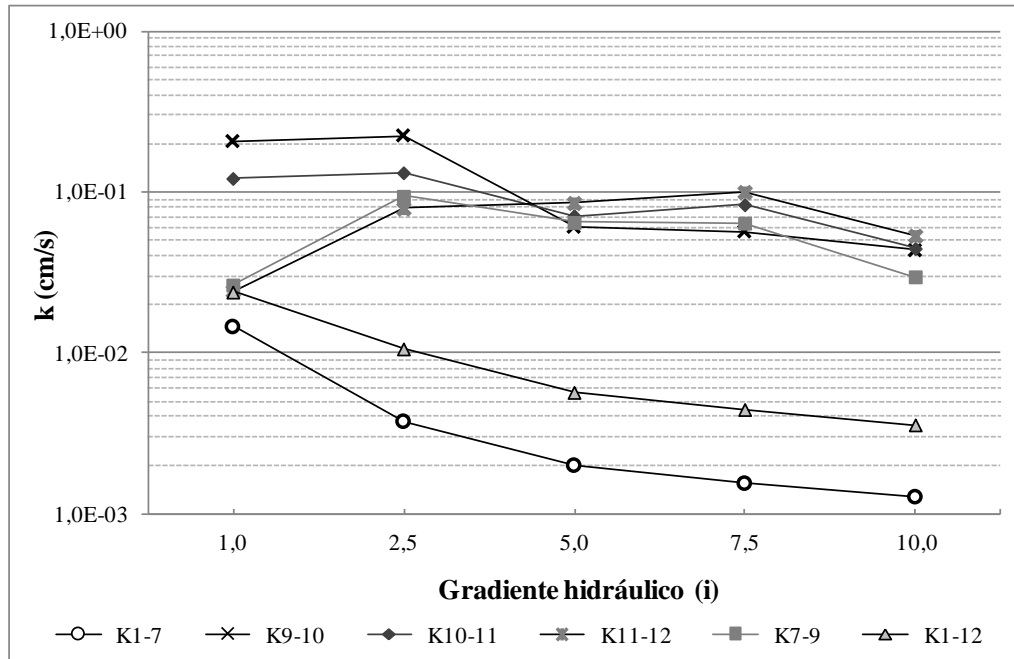


Figura 4.39 - Variação da condutividade hidráulica em função do gradiente hidráulico total aplicado ( $1,0 < i < 10,0$ ) – SFGm

Apesar de apresentar certa oscilação na permeabilidade, a variação da vazão apresentou tendência de aumento, acompanhando a elevação do gradiente hidráulico, conforme pode ser observado na Figura 4.40.

De modo geral, o gradiente no corpo de prova apresentou um comportamento de mesma tendência até o gradiente total aplicado igual a 10. Na Figura 4.41 pode-se notar que a parte inferior do corpo de prova ( $i9-10$  e  $i10-11$ ) não apresentou a tendência que ocorreu na parte intermediária e superior. Durante a primeira alteração no gradiente total, essa região do corpo de prova apresentou certa estabilidade. Nos estágios posteriores, até ser atingido o gradiente hidráulico de  $i=10,0$ , o aumento da vazão foi acompanhado de aumentos no gradiente hidráulico com uma pequena variação da condutividade hidráulica, indicando possivelmente a migração de partículas durante a variação do gradiente total.

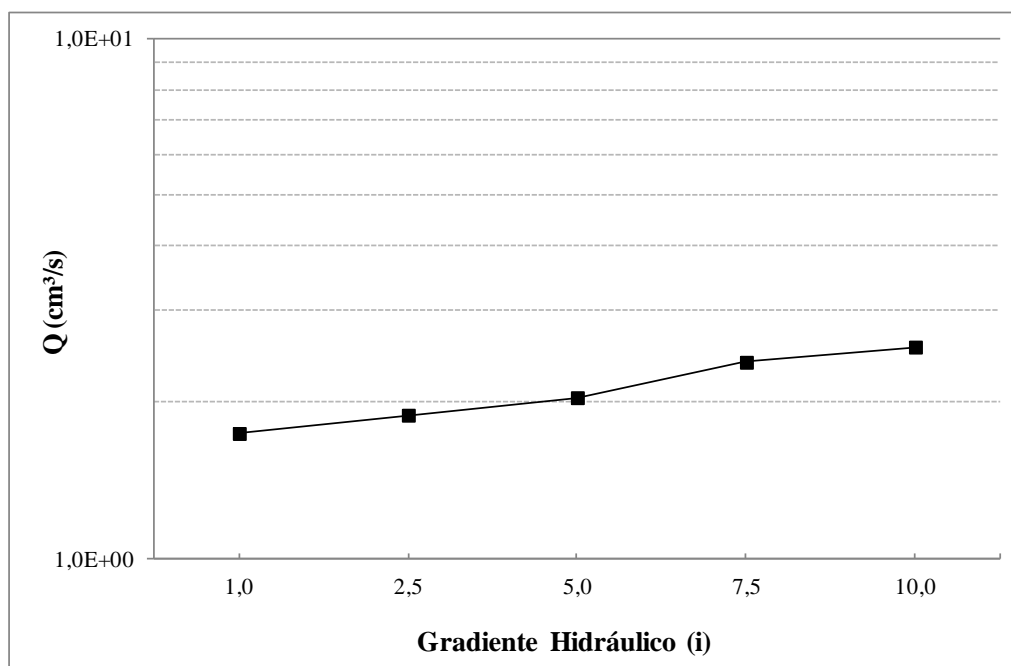


Figura 4.40 - Variação da vazão em função do gradiente hidráulico total aplicado ( $1,0 < i < 10,0$ ) – SFGm

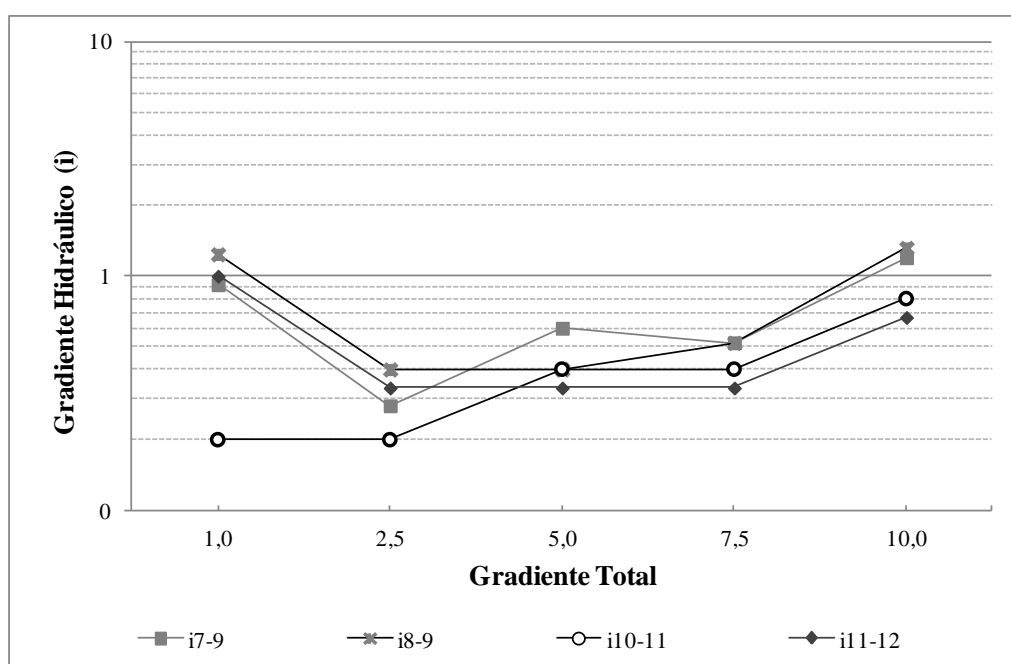


Figura 4.41 - Variação do gradiente hidráulico em função do gradiente total aplicado ( $1,0 < i < 10,0$ ) – SFGm

Na Figura 4.42 são apresentados os resultados de GR nos diferentes níveis de gradientes aplicados. Os valores de GR se apresentam, de modo geral, abaixo da unidade nas três metodologias (ASTM,  $GR_{8mm}$  e  $GR_{3mm}$ ). Percebe-se que os valores obtidos pela metodologia  $GR_{3mm}$  inicialmente se apresentaram pouco superiores à unidade enquanto

que as outras duas metodologias apresentaram valores abaixo de 1. No entanto, observa-se que, para  $i=10$ , os valores tenderam para o mesmo valor de GR.

Pela metodologia proposta por ASTM (1991) os valores baixos de GR indicam possível ocorrência de *piping* no início do ensaio. No gradiente  $i=5$  o sistema apresentou-se estável com o valor de  $GR=1$  até  $i=7,5$ , voltando a decrescer após a alteração do gradiente total.

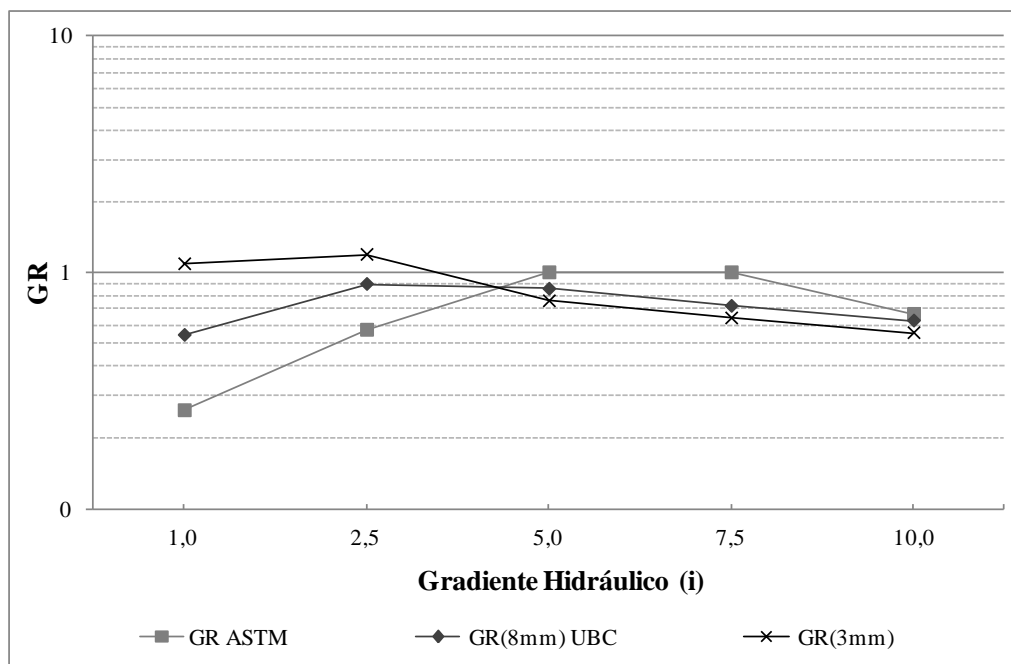


Figura 4.42 - GR em função da variação do gradiente hidráulico total aplicado ( $1,0 < i < 10,0$ ) – SFGm

Ao término da fase de carregamento constante (0 kPa) e gradiente variável, foi observado que não houve tendência de estabilização no comportamento hidráulico do corpo de prova com a variação do gradiente hidráulico total.

Com o início da aplicação do carregamento mecânico houve uma sensível redução da permeabilidade do corpo de prova como um todo. No entanto, ao final do carregamento (2400 kPa) houve uma considerável elevação da condutividade hidráulica, acompanhada, também, por uma elevação da vazão, conforme pode ser observada na Figura 4.43 e Figura 4.44.

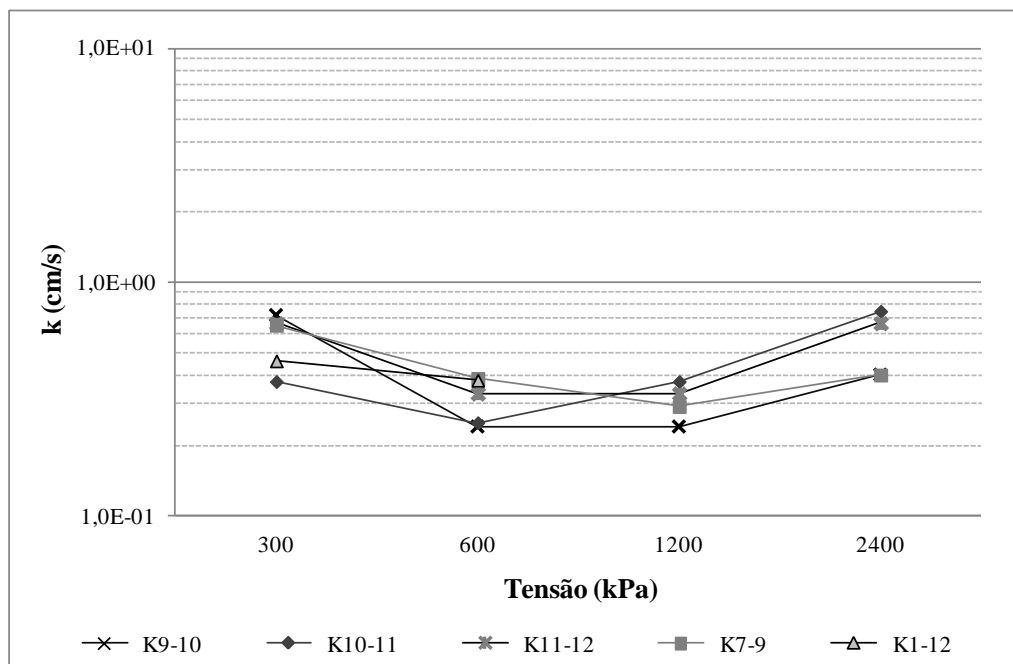


Figura 4.43 - Variação da condutividade hidráulica em função do carregamento – SFGm

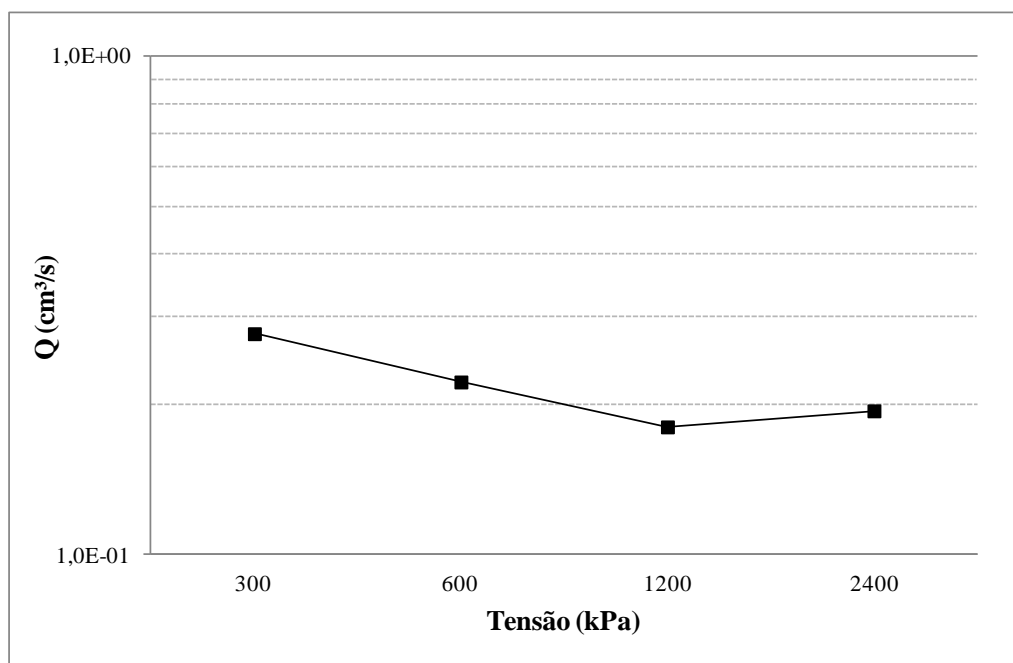


Figura 4.44 - Variação da vazão em função do carregamento – SFGm

Com relação à variação do GR em função do carregamento aplicado (Figura 4.45), observou-se que o valor de GR se apresentou pouco sensível com a variação do carregamento. De maneira geral, os resultados se apresentaram próximos de 1,0, sendo o valor mais elevado apresentado para a metodologia  $GR_{8mm}$ . Valor de GR próximo durante

toda a execução do ensaio indica que o geossintético utilizado não influenciou de forma significativa o regime de fluxo do sistema.

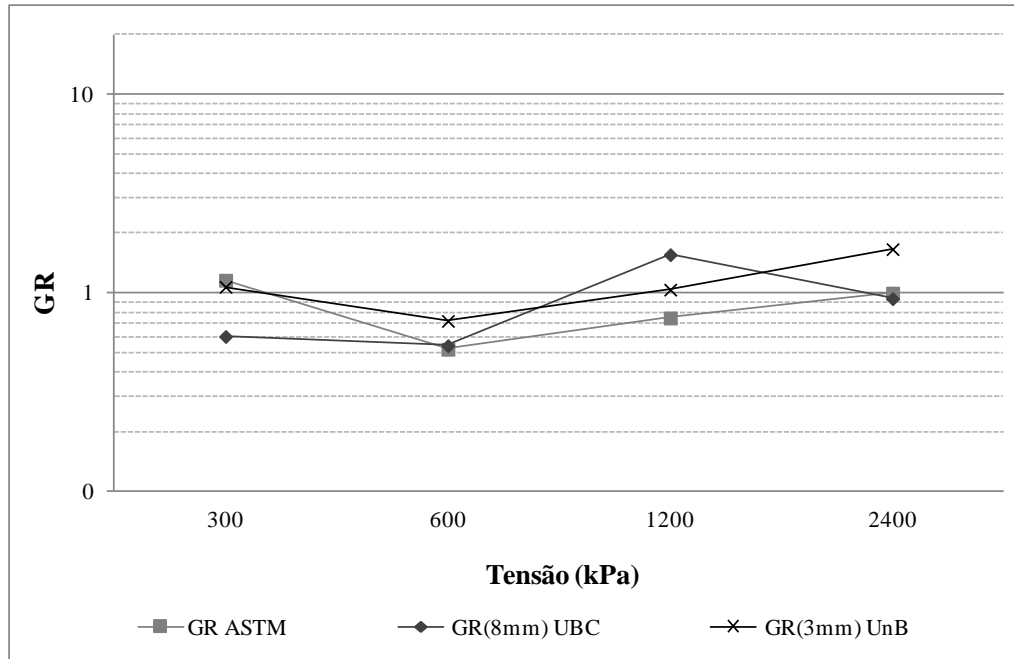


Figura 4.45 - Variação do GR em função do carregamento – SFGm

Na Figura 4.46 são apresentadas as imagens de MEV para o sistema SFGm. Pode-se observar que as fibras do geotêxtil estão impregnadas com partículas muito finas. Pode ser observada também a presença de partículas de maiores diâmetros. Isso pode ter ocorrido devido, principalmente, ao carregamento vertical aplicado ao sistema.

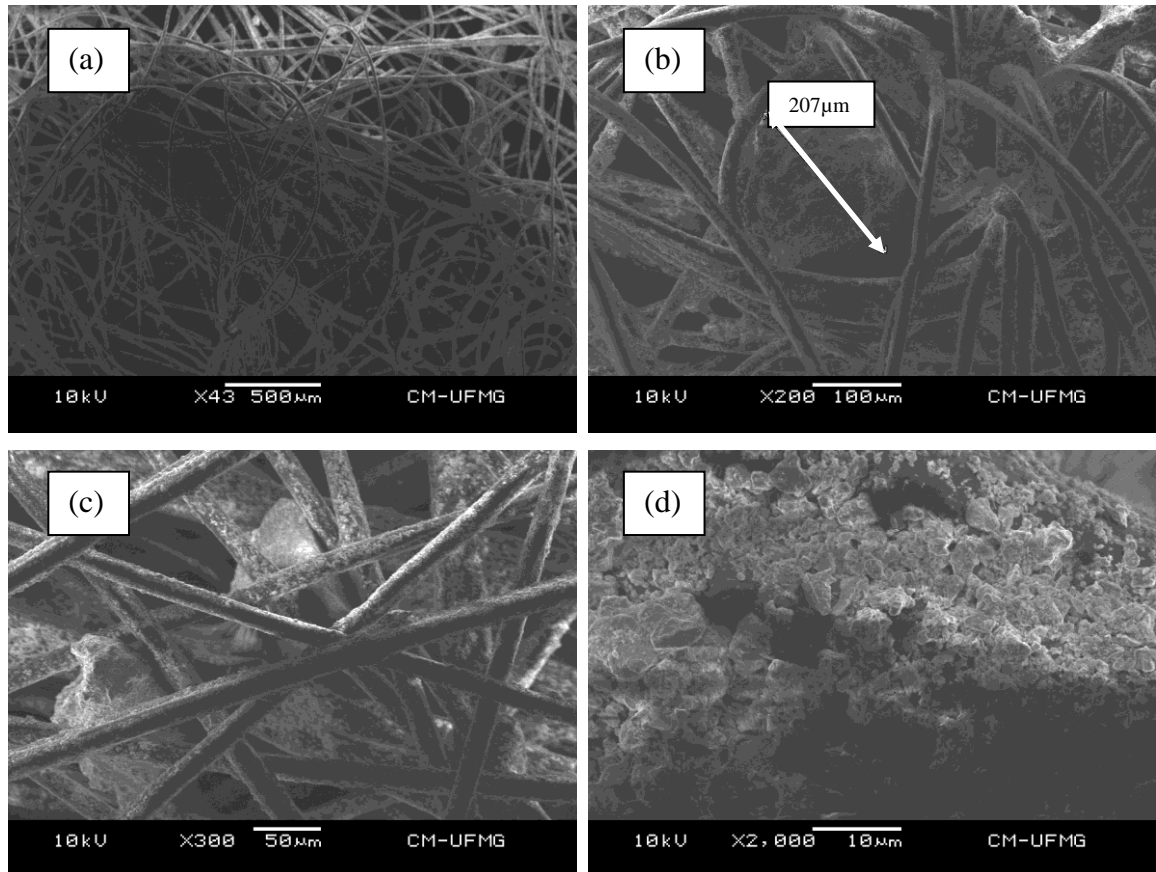


Figura 4.46 - Imagens de MEV do geocomposto de geomanta (Gm) utilizado no ensaio de GR no sistema SFGm, ensaiado com variação do gradiente hidráulico e carregamento variável: (a) vista geral (fibras soltas na amostra); (b) e (c) partículas grandes no interior da amostra; (d) minério impregnado nas fibras do geotêxtil

#### 4.2.3.4. Ensaio de GR com o sistema SFGGr

A variação do gradiente hidráulico total ( $i$ ), alterou significativamente a permeabilidade do corpo de prova apenas nas duas primeiras alterações do gradiente total. Observa-se que a permeabilidade, de maneira geral, apresentou certa estabilidade durante a variação do gradiente hidráulico, a partir de  $i=5,0$ . Entre os gradientes  $i=5,0$  e  $i=10,0$  a permeabilidade média da amostra se manteve praticamente constante. Na Figura 4.47 é apresentada a variação da condutividade hidráulica diante dos diferentes níveis de gradiente total aplicados.

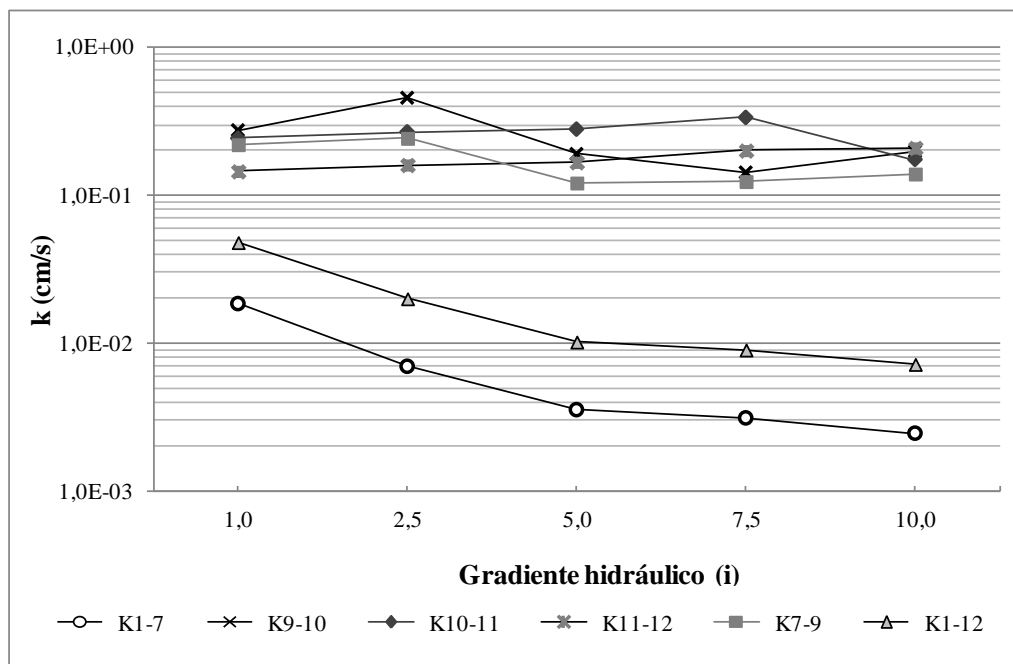


Figura 4.47 - Variação da condutividade hidráulica em função do gradiente total aplicado ( $1,0 < i < 10,0$ ) – SFGGr

Acompanhando a tendência na estabilidade da condutividade hidráulica, a vazão também não apresentou variações consideráveis, conforme apresentado na Figura 4.48.

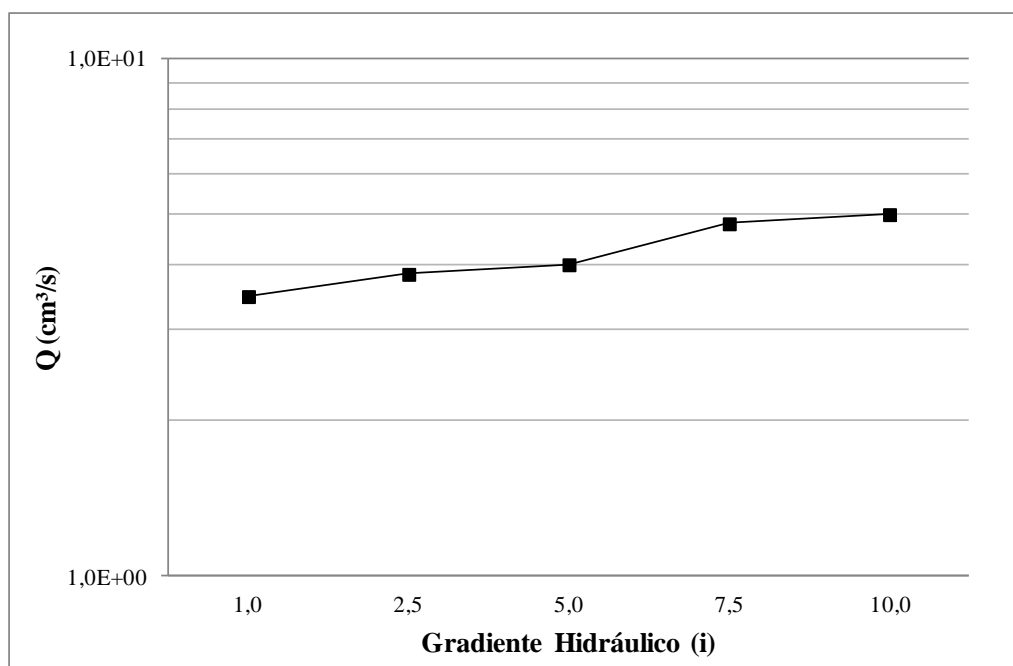


Figura 4.48 - Variação da vazão em função do gradiente hidráulico total aplicado ( $1,0 < i < 10,0$ ) – SFGGr

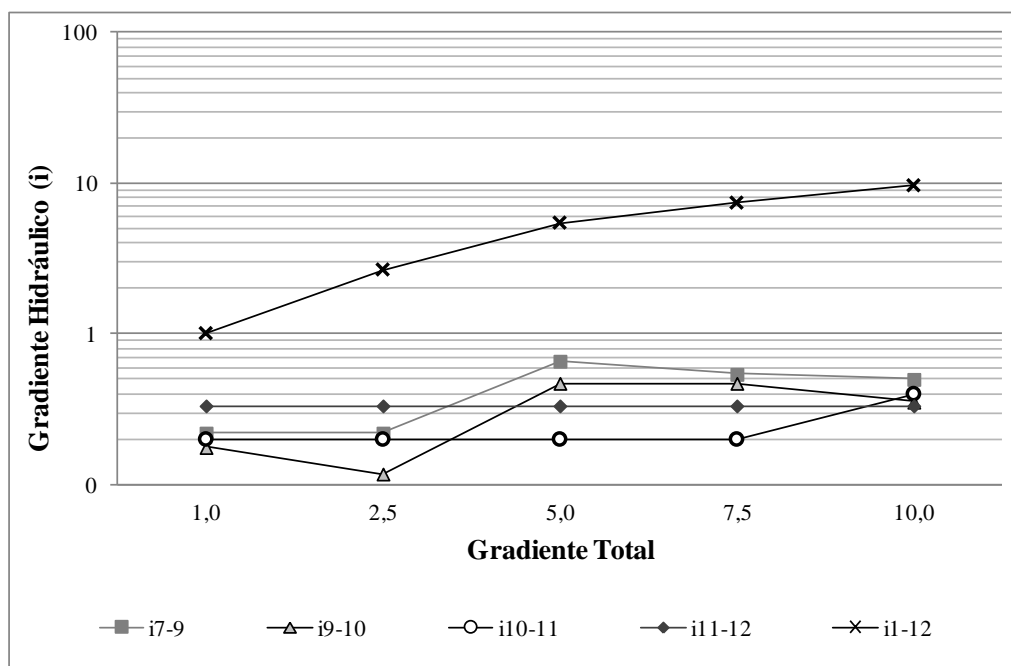


Figura 4.49 - Variação do gradiente hidráulico em função do gradiente total aplicado ( $1,0 < i < 10,0$ ) – SFG<sub>r</sub>

Os valores de GR se apresentam, de modo geral, sensíveis com a variação do gradiente total aplicado para as três metodologias (ASTM, GR<sub>8mm</sub> e GR<sub>3mm</sub>). Na Figura 4.50 são apresentados os resultados de GR nos diferentes níveis de gradientes aplicados. Percebe-se que os valores obtidos pelas três metodologias se apresentaram ligeiramente abaixo da unidade.

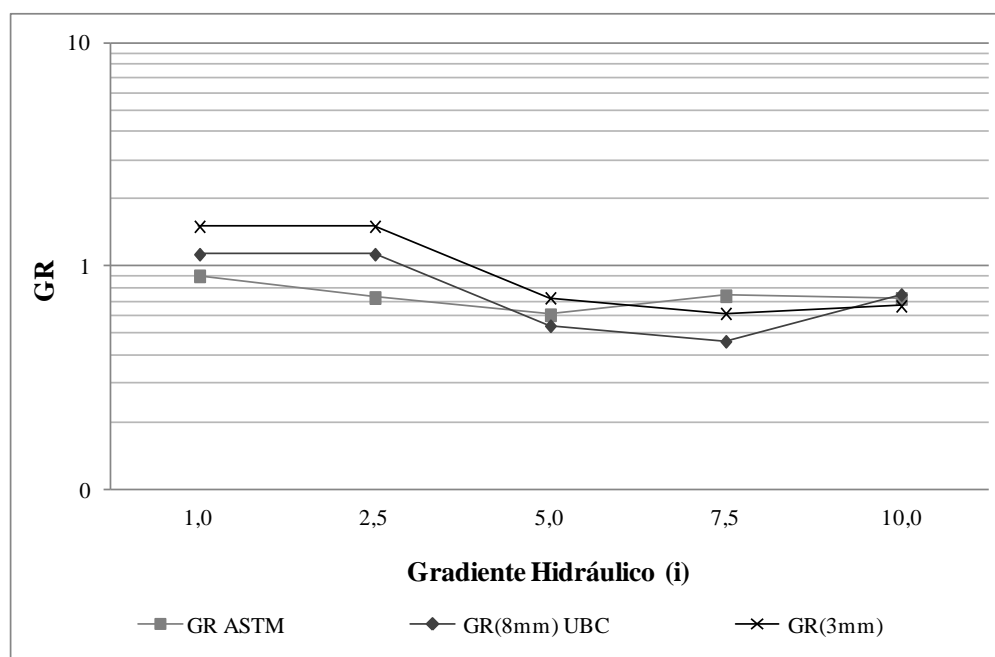


Figura 4.50 - GR em função da variação do gradiente hidráulico total aplicado ( $1,0 < i < 10,0$ ) – SFG<sub>r</sub>

Ao término da fase de carregamento constante (0 kPa) e gradiente variável, foi observado que a amostra apresentou certa tendência de estabilidade na condutividade hidráulica média.

Com o início da aplicação do carregamento mecânico não houve redução considerável da permeabilidade do corpo de prova. Durante a elevação do carregamento mecânico, não foram constatadas alterações significativas nas condições de condutividade hidráulica do sistema, conforme pode ser observado na Figura 4.51.

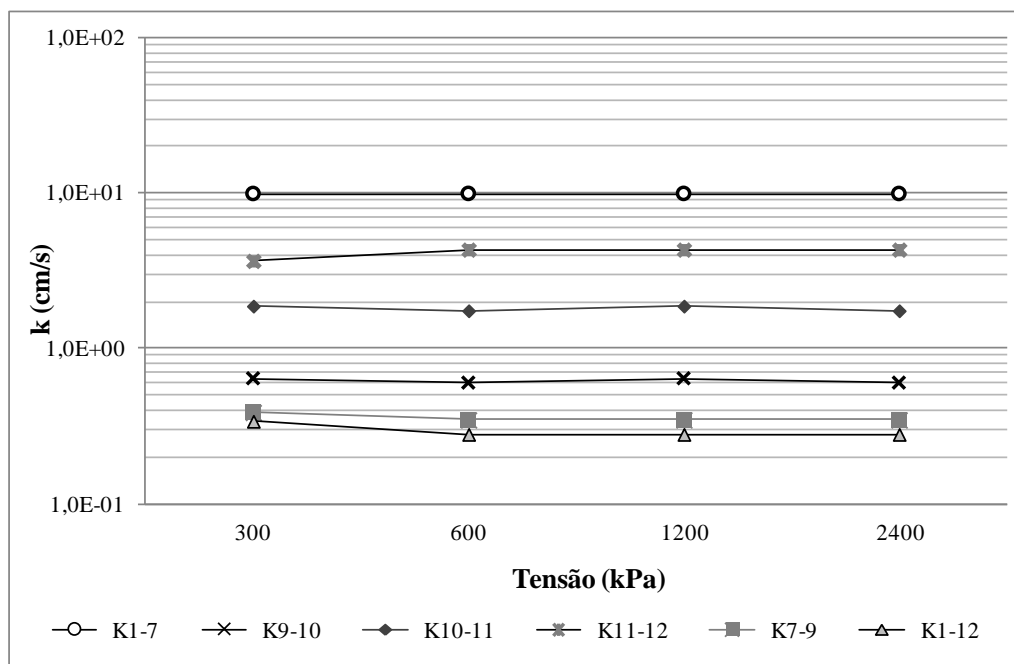


Figura 4.51 - Variação da condutividade hidráulica em função do carregamento – Sistema SFGGr

Com relação à vazão, pode-se observar que, assim como a permeabilidade da amostra, também apresentou tendência de estabilidade, conforme pode ser observado na Figura 4.52.

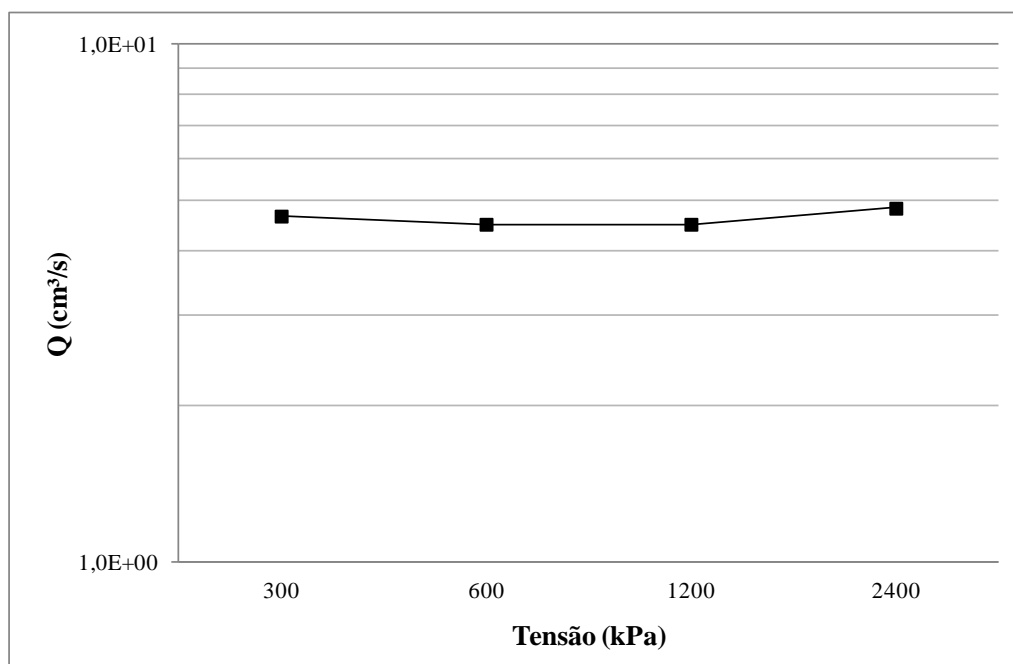


Figura 4.52 - Variação da vazão em função do carregamento – Sistema SFGGr

Com relação à variação do GR em função do carregamento aplicado (Figura 4.53), observou-se que o valor de GR não apresentou sensibilidade quanto à variação da tensão aplicada. De maneira geral, os resultados se apresentaram próximos de 1,0, sendo o valor mais elevado apresentado para a metodologia GR<sub>8mm</sub>. Pode-se concluir que o geossintético utilizado não influenciou de forma significativa o regime de fluxo do sistema.

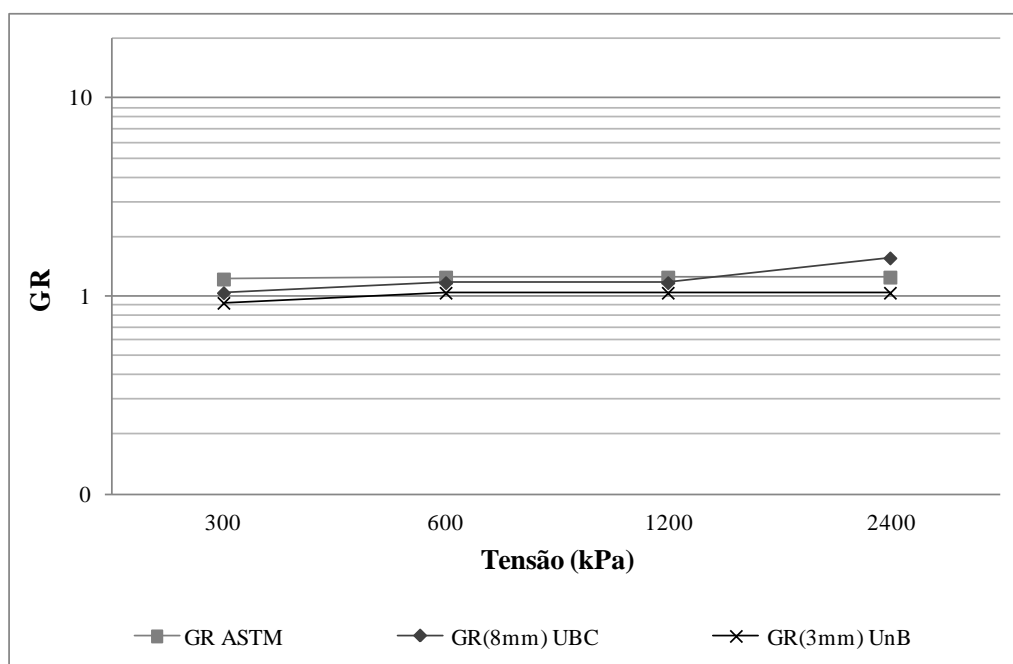


Figura 4.53 - Variação do GR em função do carregamento – Sistema SFGGr

Na Figura 4.54 são apresentadas as imagens de MEV para o sistema SFGGr. Para esse sistema, foi observada a presença de poucas partículas finas impregnadas nas fibras do geossintético.

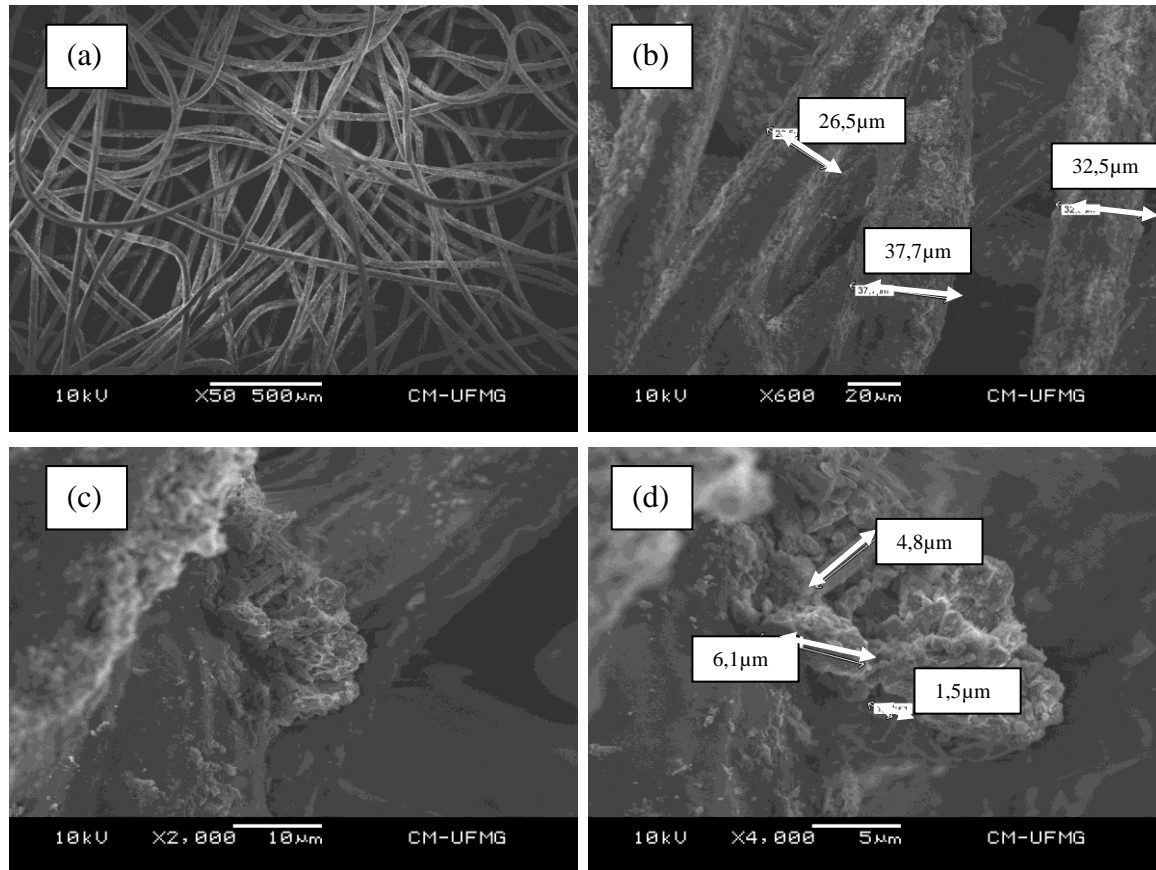


Figura 4.54 - Imagens de MEV do geocomposto utilizado no ensaio de GR do sistema SFGGr, ensaiado com variação do gradiente hidráulico e carregamento variável: (a) vista geral (fibras soltas na amostra); (b) e (c) partículas no interior da amostra; (d) material impregnado nas fibras do geotêxtil

#### 4.2.4. Ensaio para redução de umidade com aplicação de vácuo

Foram realizados 12 ensaios com os quatro tipos de geossintéticos, conforme apresentado na Tabela 4.6. Para cada material sintético foi realizado um ensaio sem a aplicação de vácuo. Este procedimento permitiu que se fizesse a comparação do teor de umidade nas condições iniciais e finais do ensaio.

Tabela 4.6 - Descrição dos ensaios de redução de umidade

Ensaio	Sistema	Aplicação de vácuo	Ensaio	Sistema	Aplicação de vácuo
1	SFGA1	Não	7	SFGr1	Não
2	SFGA2	Sim	8	SFGr2	Sim
3	SFGA3	Sim	9	SFGr3	Sim
4	SFGB1	Não	10	SFGm1	Não
5	SFGB2	Sim	11	SFGm2	Sim
6	SFGB3	Sim	12	SFGm3	Sim

Na Figura 4.55 são apresentados os valores de teor de umidade obtidos no final do ensaio realizado com o geotêxtil de 400 g/m<sup>2</sup> (sistema SFGA). Observa-se nos ensaios onde o vácuo foi aplicado que a umidade final, em comparação com a inicial, foi consideravelmente inferior. Analisando o ensaio realizado sem a aplicação de vácuo, nota-se que a umidade na base do corpo de prova é superior à 14%, sendo este, o maior valor de umidade. Após a aplicação do vácuo, o valor da umidade na base passou a ser da ordem de 8%, com redução da umidade de, aproximadamente, 43%.

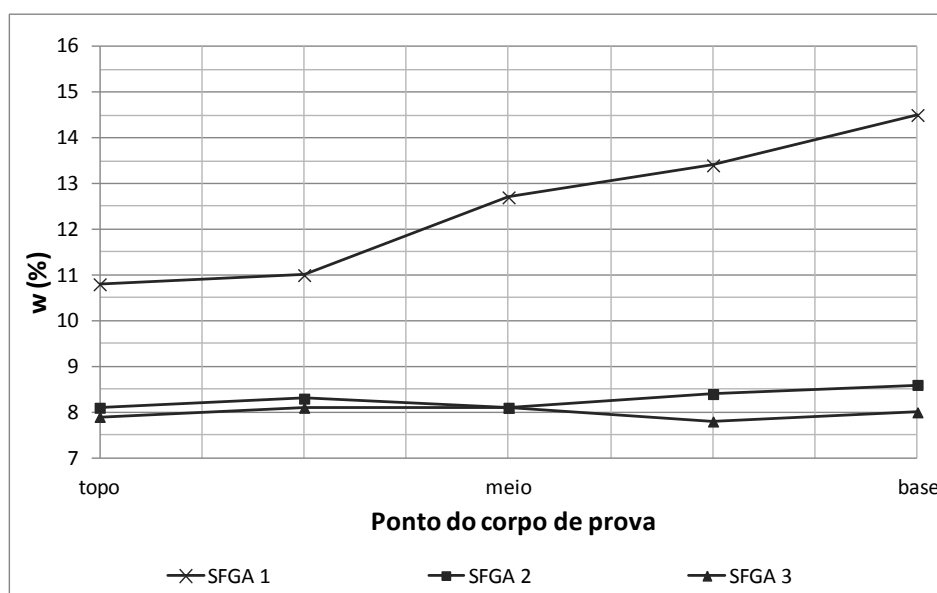


Figura 4.55 - Variação do teor de umidade no corpo de prova ao final de ensaio – Sistema SFGA

Pela Figura 4.56 pode-se observar a presença de partículas de grandes dimensões no interior da amostra após o ensaio com a aplicação de vácuo. Essa migração de partícula para o interior do geotêxtil pode ter ocorrido, possivelmente, devido à três fatores: tensão normal aplicada ao sistema (2400 kPa), sucção associada ao vácuo aplicado e ao fluxo de água.

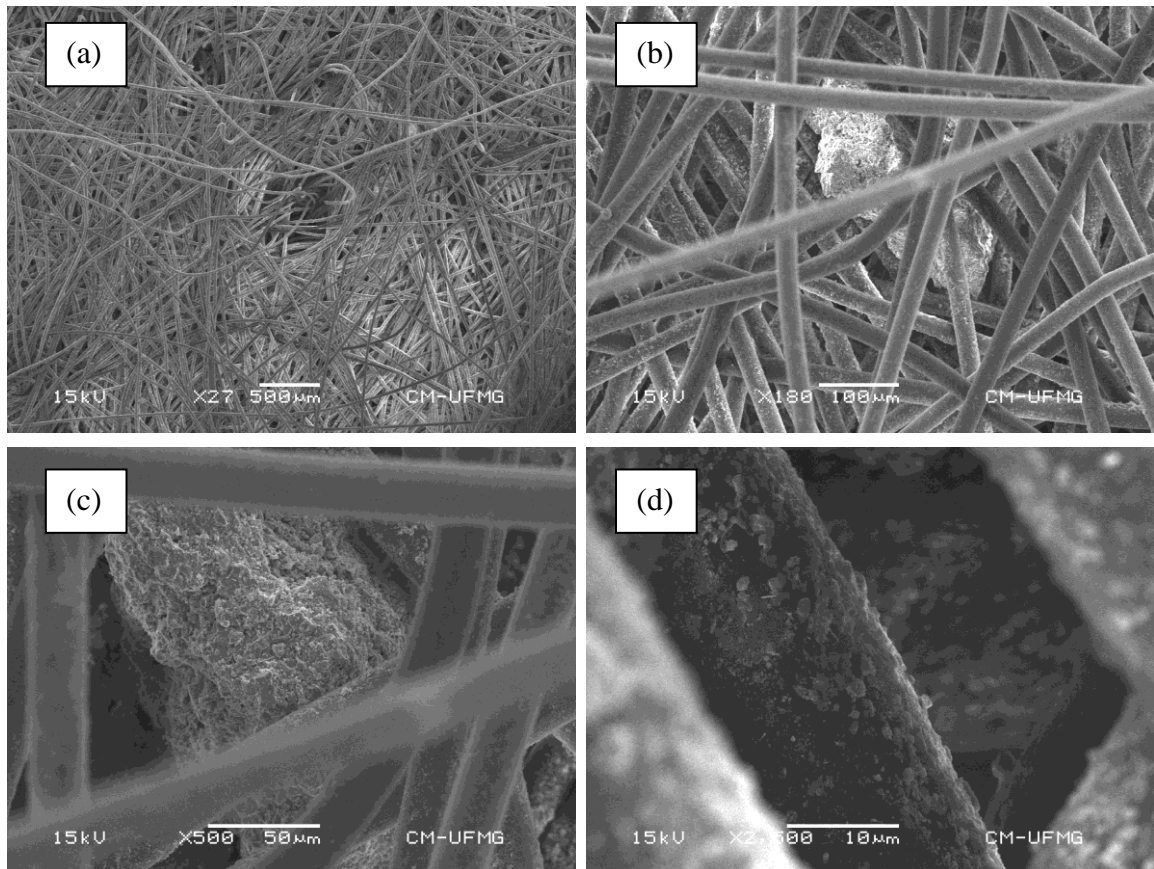


Figura 4.56 - Imagens de MEV do geotêxtil do sistema SFGA: (a) vista geral ; (b) e (c) partículas no interior da amostra; (d) fibras parcialmente impregnadas

Na Figura 4.57 são apresentados os valores de teor de umidade obtidos no final do ensaio para o sistema SFGB. Nota-se, nos ensaios com a aplicação do vácuo, que a umidade final, em comparação com a inicial, foi consideravelmente inferior. Analisando o ensaio realizado sem a aplicação de vácuo, nota-se que a umidade na base do corpo de prova é da ordem de 16%. Após a aplicação do vácuo, o valor da umidade decresce de aproximadamente 50%.

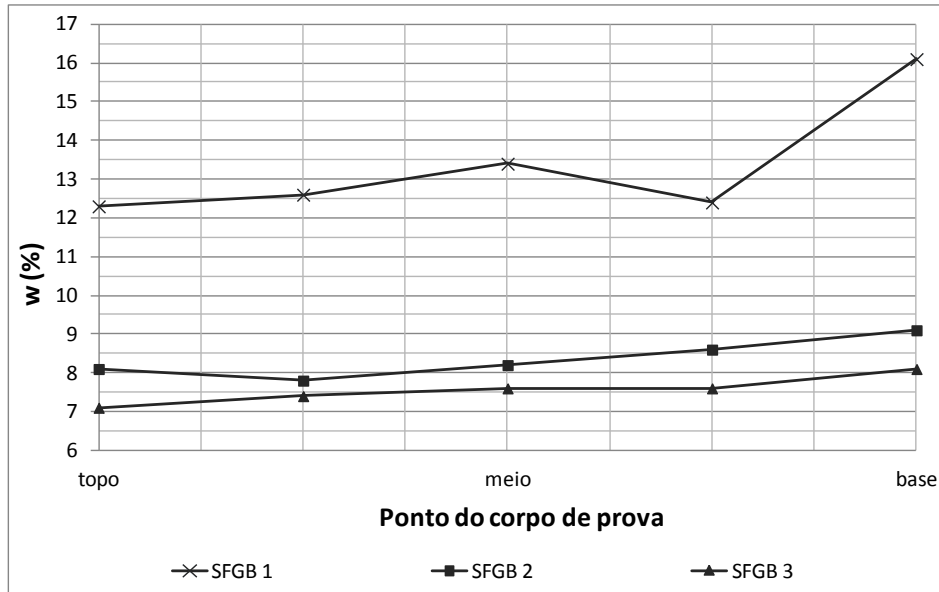
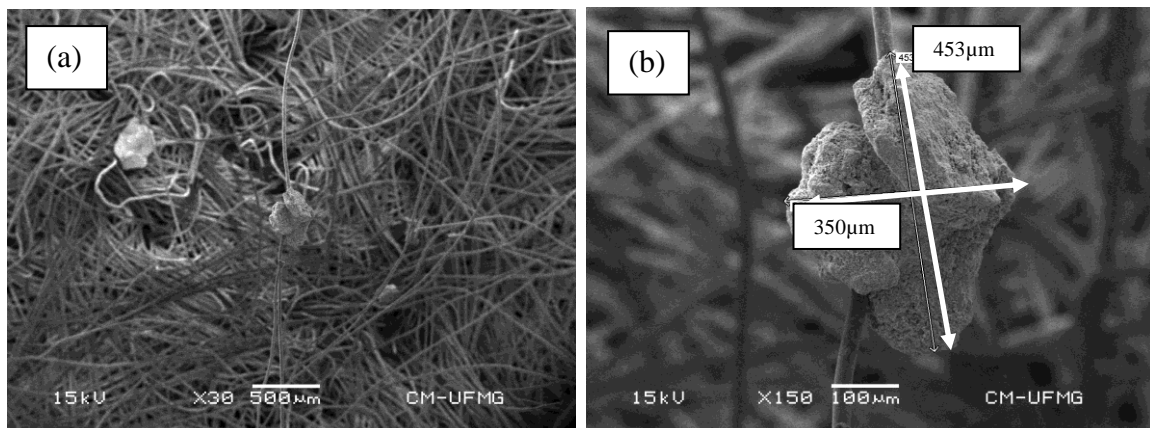


Figura 4.57 - Variação do teor de umidade no corpo de prova ao final de ensaio – Sistema SFGB

A partir da Figura 4.58 pode-se observar a presença de partículas de grandes dimensões agregadas às fibras internas da amostra de geotêxtil. Esta migração de partícula para o interior do geotêxtil pode ter ocorrido, possivelmente, devido ao fluxo de água, tensão normal e vácuo aplicado ao sistema.



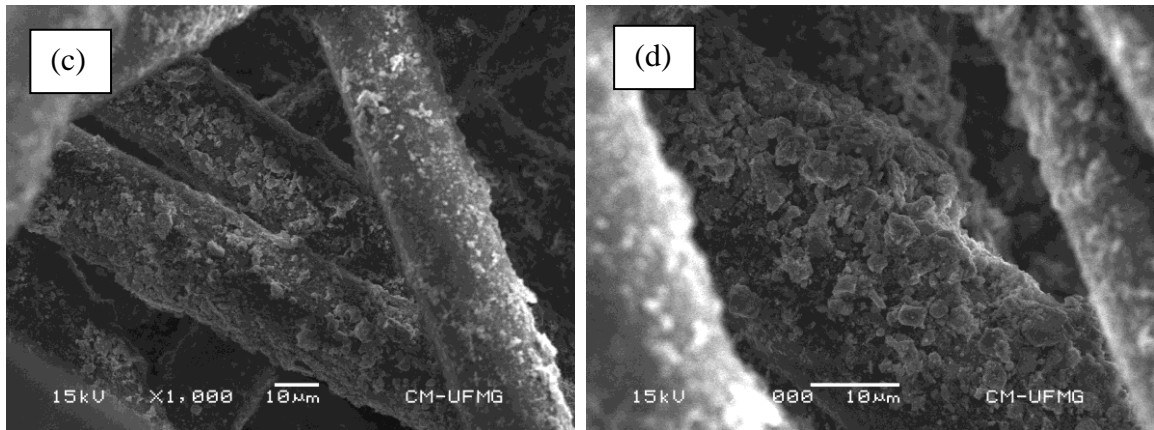


Figura 4.58 - Imagens de MEV do geotêxtil do sistema SFGb: (a) vista geral ; (b) partículas impregnadas nas fibras do geotêxtil; (c) e (d) fibras impregnadas com partículas finas

Na Figura 4.59 são apresentados os valores de teor de umidade obtidos no final do ensaio com o geocomposto com núcleo de geomanta (sistema SFGm). Nota-se, nos ensaios com a aplicação do vácuo, que a umidade final, em comparação com a inicial, foi consideravelmente inferior. Analisando o ensaio realizado sem a aplicação de vácuo, pode ser observado que a umidade na base do corpo de prova é da ordem de 14%. Após a aplicação do vácuo, o valor da umidade na base ficou na faixa de 9%.

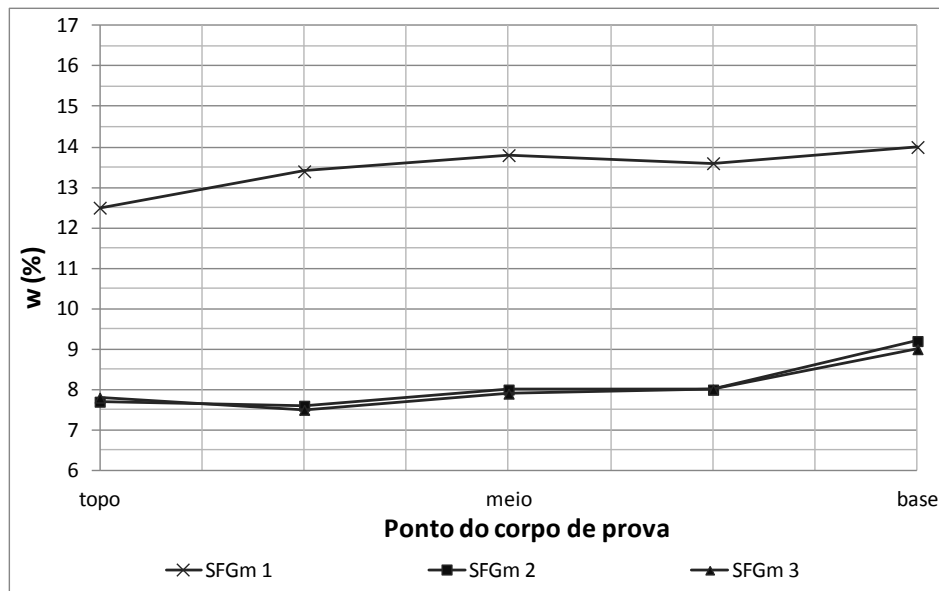


Figura 4.59 - Variação do teor de umidade no corpo de prova ao final de ensaio – Sistema SFGm

Na Figura 4.60 podem ser observadas partículas de grandes dimensões no interior da amostra após o ensaio. Pode-se observar a grande quantidade de partículas finas que

ficaram impregnadas nas fibras do geotêxtil. Esta migração de partícula para o interior do geotêxtil pode ter ocorrido, possivelmente, devido ao fluxo de água, tensão normal e vácuo aplicado ao sistema.

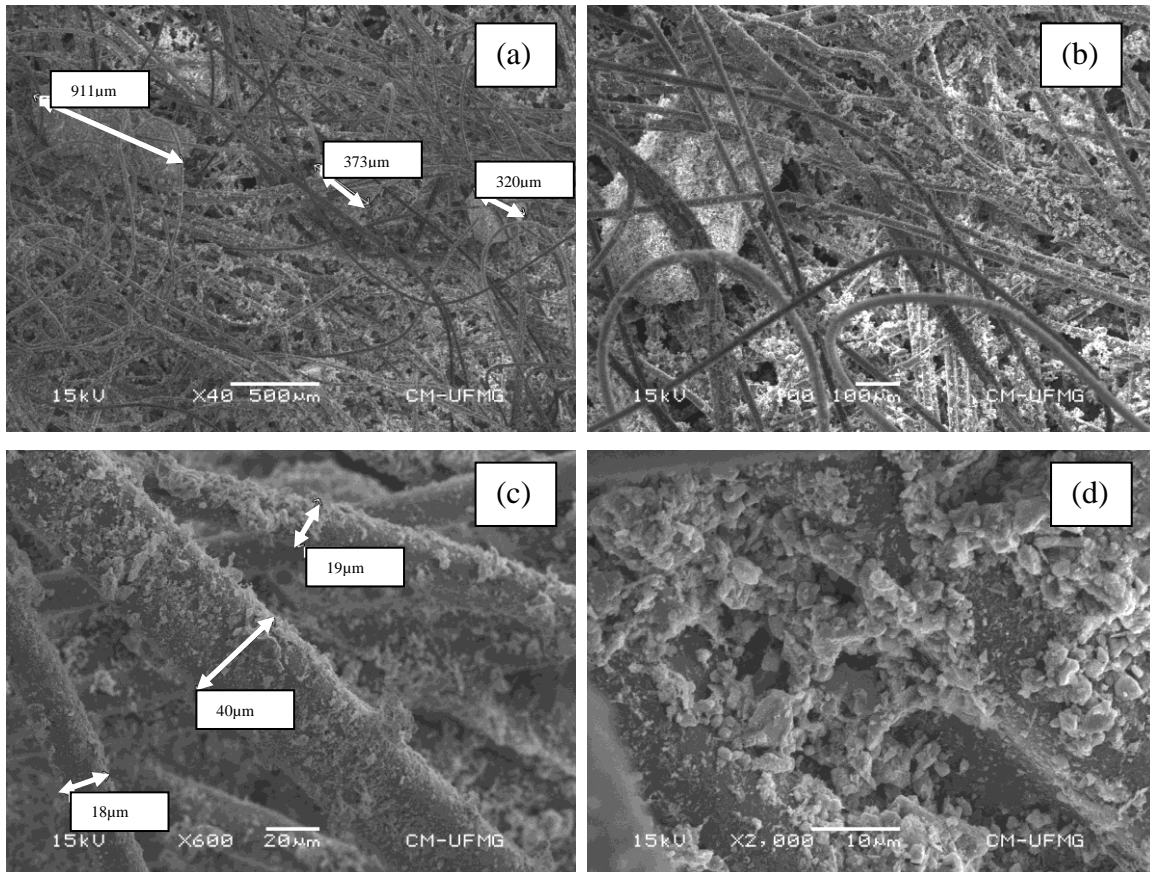


Figura 4.60 - Imagens de MEV do geocomposto com núcleo de geomanta, sistema SFGm: (a) partículas no interior da amostra ; (b) partícula de grande dimensão no interior da amostra; (c) e (d) fibras impregnadas com partículas finas

Na Figura 4.61 são apresentados os valores de teor de umidade obtidos no final do ensaio com o geocomposto com núcleo de georrede. Observa-se, nos ensaios com a aplicação do vácuo, que a umidade final, em comparação com a inicial, foi consideravelmente inferior. Analisando o ensaio realizado sem a aplicação de vácuo, pode ser observado que a umidade na base do corpo de prova é da ordem de 14%. Após a aplicação do vácuo, o valor da umidade na base ficou na faixa de 9,5%.

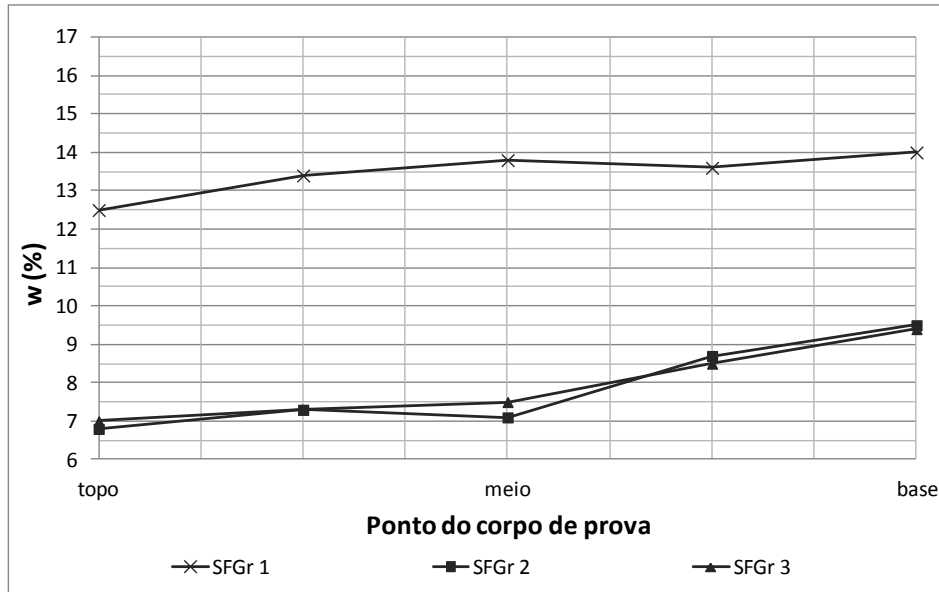
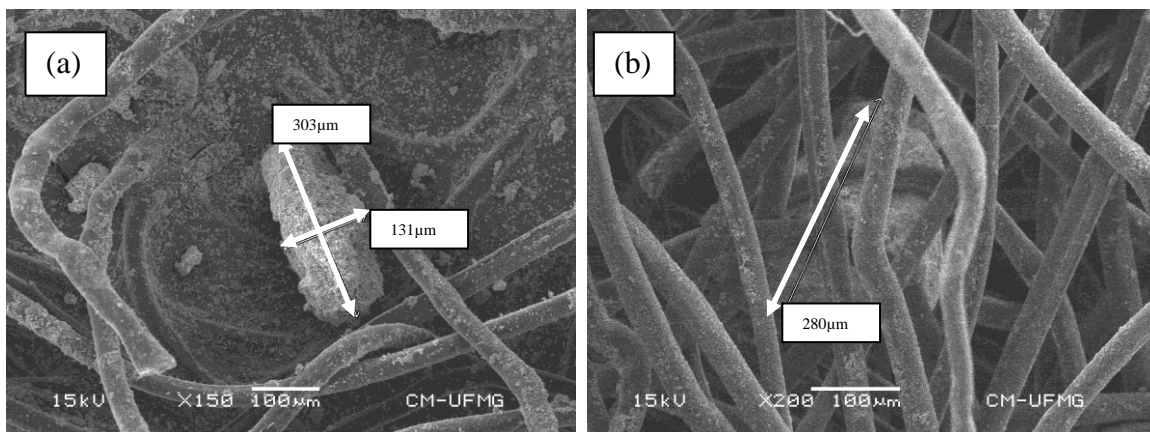


Figura 4.61 - Variação do teor de umidade no corpo de prova ao final de ensaio – Sistema SFGr

Na Figura 4.62 podem ser observadas partículas de grandes dimensões no interior da amostra após o ensaio. Pode-se observar a grande quantidade de partículas finas que ficaram impregnadas nas fibras do geotêxtil. Esta migração de partícula para o interior do geotêxtil pode ter ocorrido, possivelmente, devido ao fluxo de água, tensão normal e vácuo aplicado ao sistema.



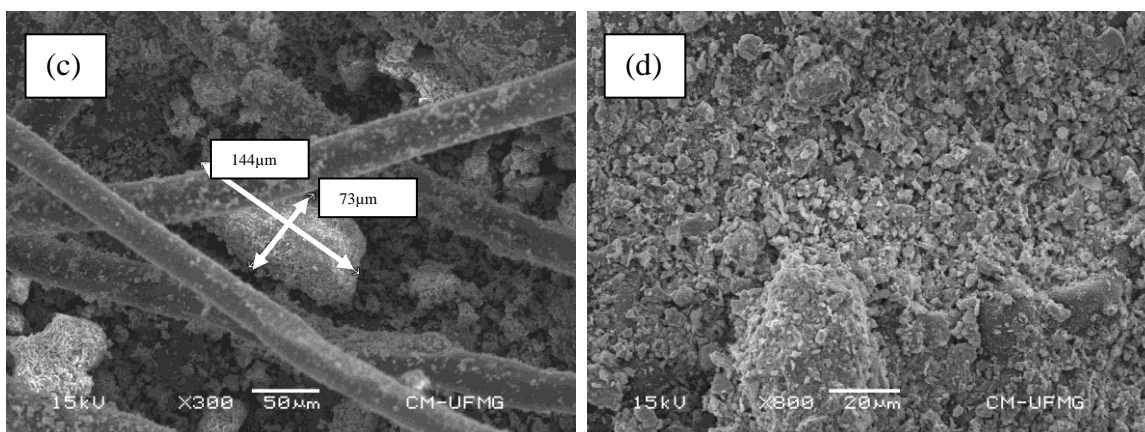


Figura 4.62 - Imagens de MEV do geocomposto com núcleo de georrede, sistema SFGr: (a), (b) e (c) partículas de grandes dimensões no interior da amostra ; (d) região do núcleo do geocomposto

Na Tabela 4.7 é apresentado o resumo dos resultados obtidos nos ensaios especiais para redução da umidade com a aplicação do vácuo. De maneira geral, pode ser observado que os valores de umidade obtidos no final dos ensaios foram em torno de 8% de umidade. Como esperado, os valores de umidade obtidos para a região do topo da amostra se apresentaram menores do que os valores de umidade na região da base. Isso pode ser explicado pelo fato do vácuo proporcionar um movimento vertical da água dentro do corpo de prova. Dessa maneira, ao sair do topo, também impulsionado pela gravidade, a água faz o percurso descendente.

Tabela 4.7 - Quadro resumo dos valores de umidades iniciais e finais

Ensaio	Sistema	Umidade inicial <sup>(1)</sup>	Umidade inicial <sup>(2)</sup>	Redução <sup>(1)</sup>	Redução <sup>(2)</sup>
1	SFGA1	10,8	14,5	Não houve aplicação de vácuo	
2	SFGA2	8,1	8,6	25	41
3	SFGA3	7,9	8,0	27	43
4	SFGB1	12,3	16,1	Não houve aplicação de vácuo	
5	SFGB2	8,1	9,1	34	44
6	SFGB3	7,1	8,1	42	50
7	SFGr1	12,5	14,0	Não houve aplicação de vácuo	
8	SFGr2	6,8	9,5	46	32
9	SFGr3	7,0	9,4	44	33
10	SFGm1	12,5	14,0	Não houve aplicação de vácuo	
11	SFGm2	7,7	9,2	38	34
12	SFGm3	7,8	9,0	38	36

Nota: (1) topo do corpo de prova; (2) base do corpo de prova; valores em porcentagem

### 4.3. Resultados das análises computacionais

Neste item serão apresentados os resultados da análise numérica. Os parâmetros de entrada para análise numérica foram obtidos nos ensaios de secagem na coluna e no lisímetro, cujos resultados foram apresentados anteriormente. A modelagem foi realizada com o auxílio do *software* VADOSE/W, que utiliza o método de elementos finitos para a simulação de fluxo em meios porosos não saturados.

A comparação entre os resultados obtidos pelo programa e os dados obtidos nos ensaios de laboratório, possibilitou a verificação do modelo computacional quanto à qualidade dos resultados, de maneira que os valores calculados e os medidos apresentaram as mesmas tendências. Para essa análise foram escolhidos aleatoriamente o 10°, 20°, 30°, 40° e o 49° dias dos ensaios realizados no laboratório.

Com o ajuste do modelo computacional para as condições de laboratório, foram realizadas simulações para diferentes condições de drenagem nos vagões, inclusive com as condições de contorno dos projetos propostos para utilização dos geossintéticos como drenos. Simulações numéricas do fluxo de água em pilhas de minério de ferro nos pátios de estocagem também foram realizadas, considerando um sistema de drenagem com a utilização do geossintético na base da pilha.

#### 4.3.1. Análise para calibração dos dados

A análise para calibração dos dados foi realizada no intuito de compatibilizar os resultados encontrados no laboratório com os resultados gerados na simulação computacional. A partir dos resultados obtidos nas análises, foi verificada a diferença entre os valores calculados e os valores obtidos nos ensaios. Depois de concluída essa verificação, os parâmetros foram utilizados para simular as condições de drenagem do campo, tanto nos vagões de transportes quanto nas pilhas de minério de ferro.

O resultado da simulação demonstrou a tendência de maior dificuldade na redução da umidade do minério de ferro, conforme observado nos ensaios de laboratório. Na Tabela 4.8 são apresentados os valores encontrados para as duas situações. Pode-se observar que

na base da coluna, praticamente não houve diferença entre a simulação e o ensaio. No entanto, a região intermediária da coluna apresentou na simulação valores superiores de umidade, enquanto que no topo, os valores de umidade encontrados foram maiores.

Tabela 4.8 - Quadro comparativo da umidade volumétrica na análise paramétrica simples

<b>Análise paramétrica simples da umidade volumétrica (%)</b>					
<b>Ensaio (E)</b>					
<b>Altura (cm)</b>	<b>10º dia</b>	<b>20º dia</b>	<b>30º dia</b>	<b>40º dia</b>	<b>49º dia</b>
105	36,6	35,7	35,4	34,5	34,4
75	42,5	40,9	40,5	40,5	40,5
45	44,4	44,2	43,8	43,8	43,8
23	45,4	44,7	44,3	44,3	44,3
8	46,3	46,3	46,2	46,2	46,2
<b>Análise numérica (A)</b>					
<b>Altura (cm)</b>	<b>10º dia</b>	<b>20º dia</b>	<b>30º dia</b>	<b>40º dia</b>	<b>49º dia</b>
105	39,0	38,5	38,5	38,0	38,0
75	40,0	39,0	39,0	38,5	39,0
45	41,0	40,0	40,0	39,0	40,0
23	43,0	42,0	41,5	41,5	41,5
8	46,4	46,4	46,4	46,4	46,4

Nota: (E) ensaio de laboratório; (A) análise numérica

Na Tabela 4.9 são apresentadas as diferenças entre os resultados de umidade do minério de ferro nas análises computacionais e nos ensaios de laboratório. Com exceção do 10º dia de ensaio, os outros valores apresentaram diferença da ordem de 5% entre os valores de umidade obtidos nas análises e os valores medidos durante os ensaios de laboratório.

Tabela 4.9 - Quadro comparativo da umidade volumétrica na análise paramétrica simples

<b>Diferença entre os resultados da análise numérica e do ensaio (%)</b>					
<b>Altura (cm)</b>	<b>10º dia</b>	<b>20º dia</b>	<b>30º dia</b>	<b>40º dia</b>	<b>49º dia</b>
105	-15%	-5%	-2%	-5%	-5%
75	-4%	-5%	-5%	-5%	-5%
45	-4%	-1%	-1%	-1%	-1%
23	-2%	-3%	-4%	-3%	-3%
8	0%	0%	0%	0%	0%

Na Figura 4.63 são apresentados os resultados gráficos obtidos pela modelagem numérica e os dados obtidos do ensaio de coluna realizado com o minério de ferro para o teor de umidade volumétrica. Pode-se observar que a análise numérica conseguiu representar, de forma adequada, o comportamento avaliado no ensaio de coluna. Assim como no ensaio, a simulação indicou uma redução de umidade na região superior, mais próxima ao topo, do que na base da coluna.

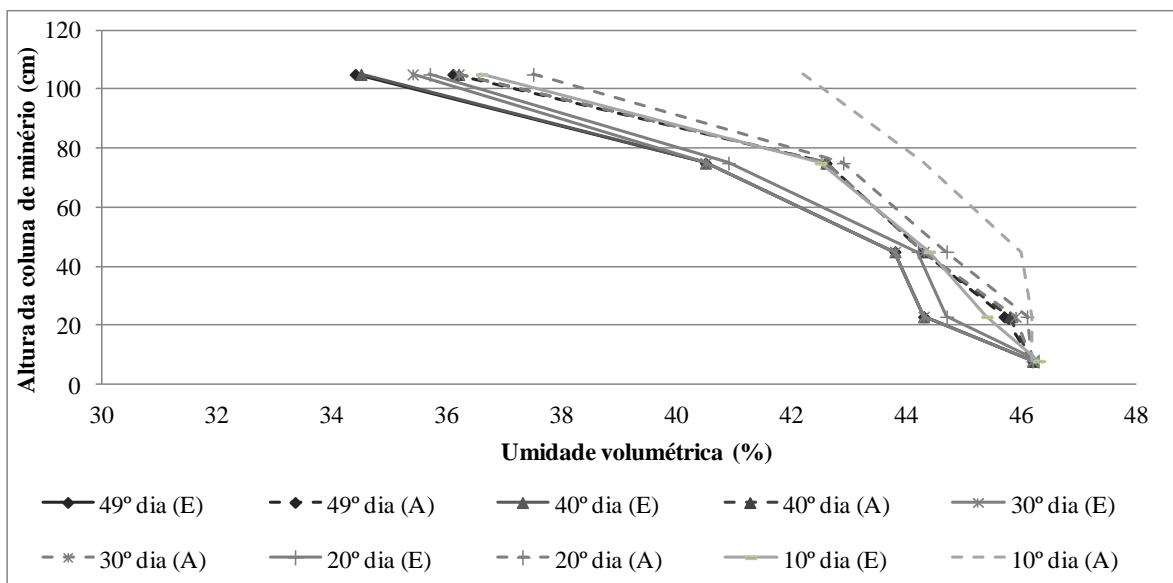


Figura 4.63 - Resultado da análise paramétrica – umidade volumétrica

#### 4.3.2. Simulação computacional dos sistemas de drenagem nos vagões

As simulações realizadas com o auxílio do software VADOSE/W buscaram avaliar a influência de dispositivos de drenagem nos vagões de transporte do minério de ferro. No entanto, deve-se ressaltar que, pelo fato de serem análises bidimensionais, os resultados tornam-se limitados ao plano de análise. Assim, para uma avaliação ao longo do comprimento do vagão torna-se necessário a utilização de um software 3D.

Foi considerada a instalação dos drenos de poliuretano nos vagões, de maneira que a superfície de drenagem fosse livre, sendo que as seções de análise interceptam a região de implantação dos drenos dentro dos vagões, conforme apresentado na Figura 4.64.

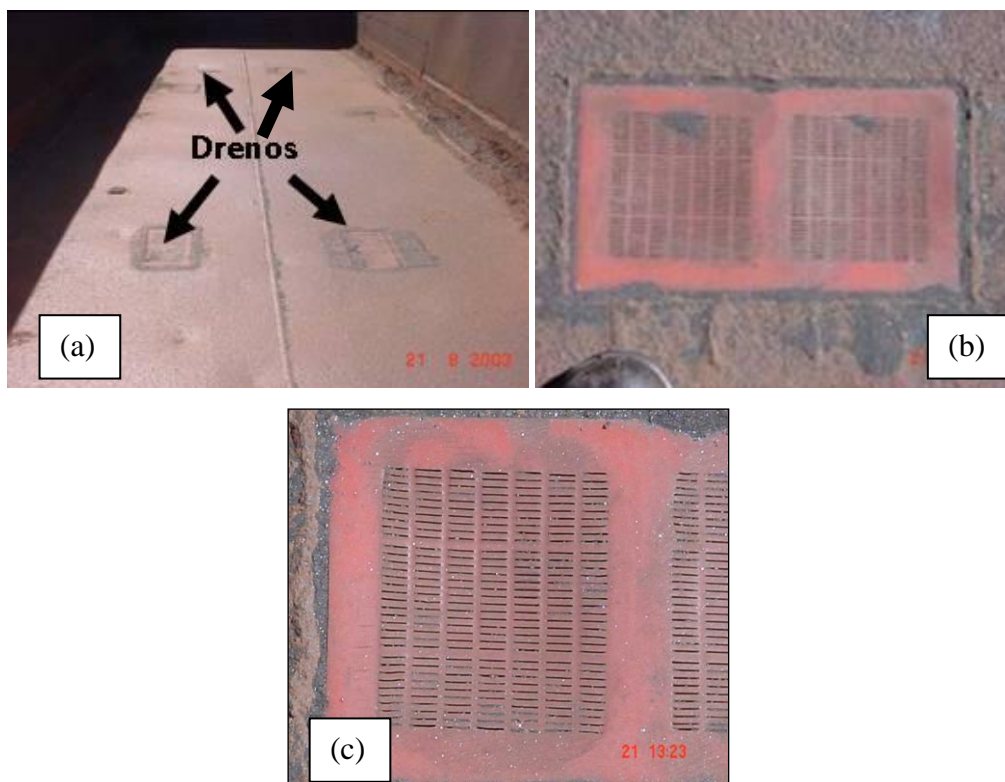


Figura 4.64 - Vista interna do vagão e drenos de poliuretano: (a) localização no fundo do vagão; (b) vista superior do dreno; (c) detalhe da abertura do dreno (VALE, 2003)

A seção típica analisada possui uma altura de 2,00 m e largura de 2,70 m, que são as dimensões aproximadas dos vagões. Para as análises considerou-se que a altura do minério de ferro dentro do vagão foi de 1,50 m. A Figura 4.65 mostra um dos vagões carregados de minério.



Figura 4.65 - Vista geral do vagão carregado de minério de ferro

O tempo estimado considerado para a análise foi de um dia, que é o tempo aproximado para o transporte do minério de ferro da mina de Carajás até o porto de São Luís/MA.

Na Tabela 4.10 são apresentadas as situações que foram analisadas. Para cada uma das situações, com exceção da primeira, foram simuladas diversas condições de contorno, tentando avaliar diferentes posicionamentos dos dispositivos de drenagem.

Tabela 4.10 - Programa de simulações numéricas efetuadas

<b>Simulações</b>	<b>Sistemas de drenagem</b>	<b>Descrição</b>
I	SD	Sem nenhum dispositivo de drenagem
II	DPF	Dreno de poliuretano no fundo do vagão
III	DGL	Somente os drenos de geossintéticos nas laterais do vagão
IV	DPF + DGL	Dreno de poliuretano no fundo do vagão e drenos de geossintéticos nas laterais do vagão

#### 4.3.2.1. Situação I – vagão sem dispositivo de drenagem (SD)

Essa simulação buscou apresentar as condições iniciais de umidade sem nenhum dispositivo de drenagem para avaliar a eficiência dos drenos de poliuretano e os drenos de geossintéticos, a partir dos resultados obtidos.

Na Figura 4.66 é apresentado um diagrama com a distribuição volumétrica do minério no interior do vagão (perfil de umidade) sem dispositivos de drenagem. Analisando o resultado, observa-se que, numa situação extrema e sem dispositivos de drenagem, o minério de ferro apresenta redução de umidade apenas por evaporação durante o período de análise (24 h), o que praticamente influencia somente a região superficial do minério de ferro.

É importante ressaltar que nas análises apresentadas não são consideradas a vibração dos vagões durante o trajeto, o que pode influenciar na densificação do minério de ferro e elevação da água livre dentro do vagão. Esse fato se agrava ainda mais nas condições de campo quando considerado a precipitação direta sobre o material. Em condições sem

capacidade de drenagem, foi observado que a umidade volumétrica é praticamente de 46% em todo o material.

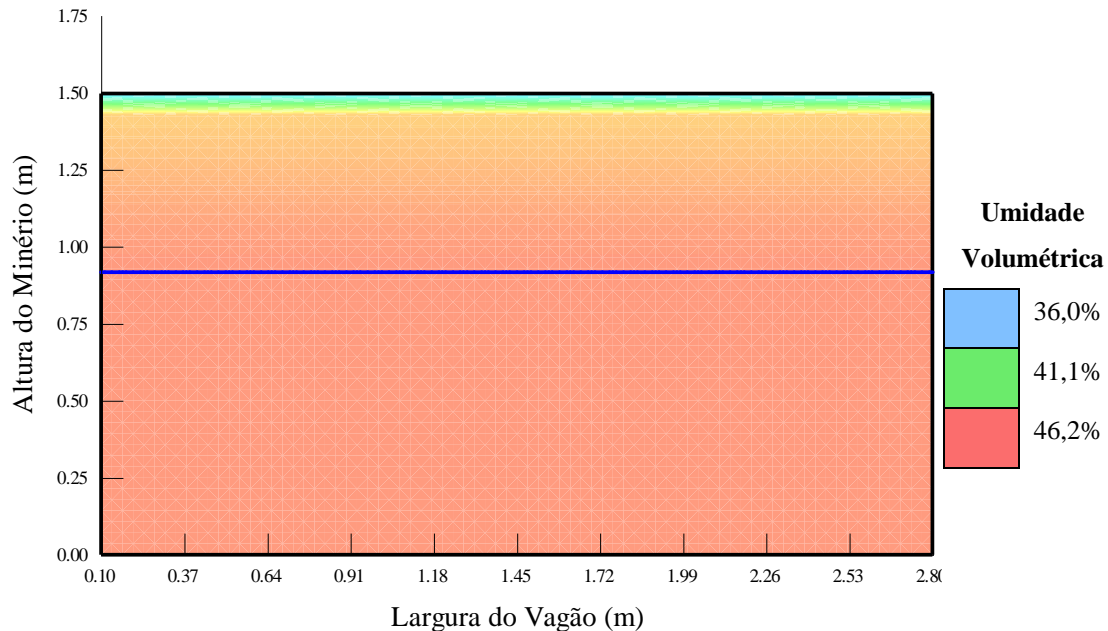


Figura 4.66 - Diagrama de umidade volumétrica no interior do vagão para a situação I (SD)

#### 4.3.2.2. Situação II – vagão com dreno de poliuretano no fundo do vagão (DPF)

Para esta condição de drenagem foi observada que, mesmo com a utilização dos drenos de poliuretano, a redução de umidade do minério de ferro é pequena, da ordem de 5%. Nota-se que região superior do vagão a umidade torna-se elevada devido à ação dos fatores climáticos, principalmente a precipitação. Isso pode ser explicado pela presença de água livre observada em campo.

De maneira geral, a redução média de umidade foi baixa. Pode-se notar pela Figura 4.67 que a umidade do minério de ferro dentro do vagão, nas laterais e no meio, apresentaram praticamente os mesmos valores.

Quando comparado com a condição inicial (SD), pode ser observado que o dispositivo de drenagem implantado apresentou certa eficiência, porém não foi capaz de reduzir a umidade em circunstâncias de precipitações.

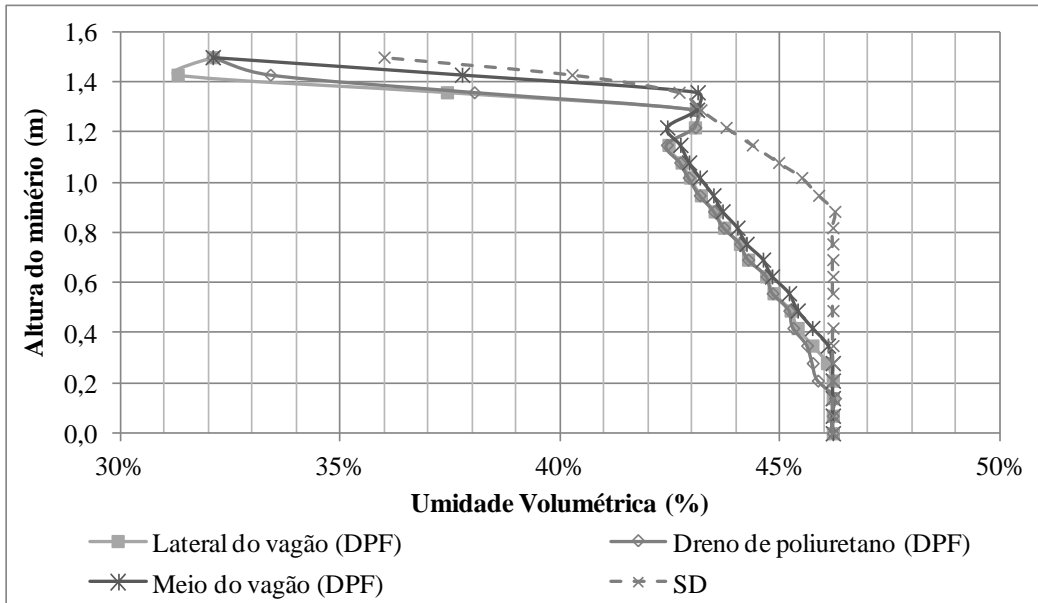


Figura 4.67 - Perfil de umidade de umidade volumétrica no interior do vagão para a situação II (DPF)

Na Figura 4.68 é apresentado um diagrama com a distribuição da umidade volumétrica no interior do vagão. Esse diagrama permite uma melhor visualização dos perfis de umidade nas regiões laterais, central e dos drenos de poliuretano.

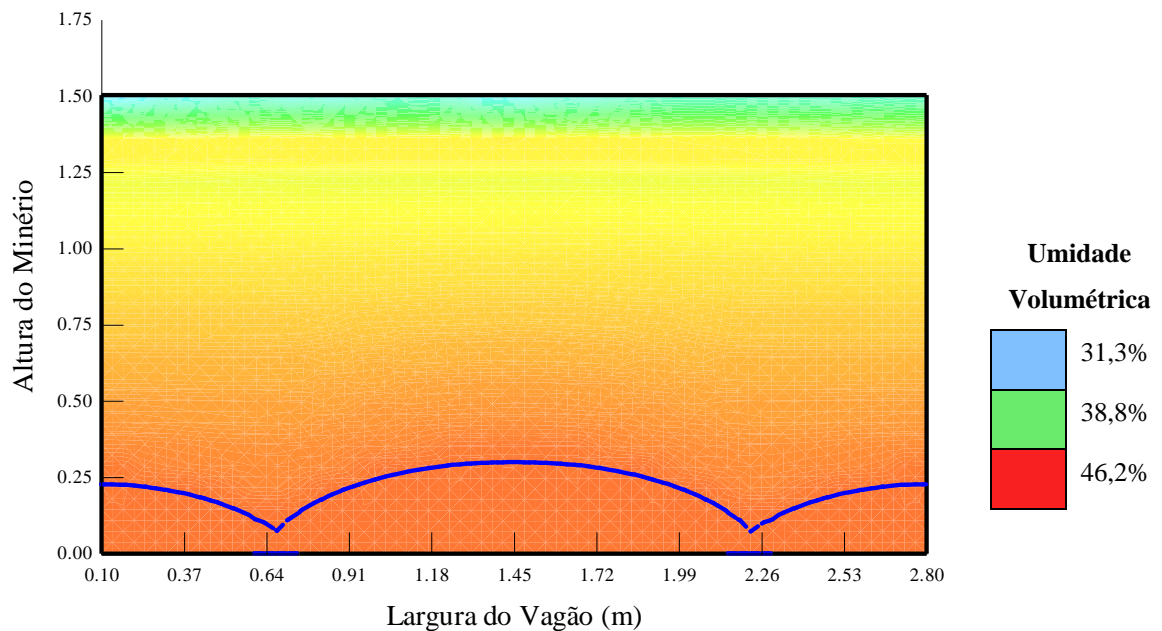


Figura 4.68 - Diagrama de umidade volumétrica no interior do vagão para a situação II (DPF)

#### 4.3.2.3. Situação III – vagão sem dispositivo de drenagem no fundo e com drenos laterais de geossintéticos (DGL)

Nesta alternativa foi considerado que o vagão não possui os drenos de poliuretano no fundo, de tal maneira que o dispositivo de drenagem somente será o geossintético. Esta análise tentou representar as condições que o sistema estaria atuando caso o dreno de fundo (poliuretano) colmatasse, deixando de exercer a sua função drenante.

Pode-se observar nos resultados apresentados na Figura 4.69 que, mesmo considerando a inoperância do dreno de fundo, o dreno sintético continuaria permitindo a drenagem do minério de ferro. Comparando-se os resultados de umidade volumétrica apresentadas nas análises anteriores, observa-se que a drenagem nas laterais do vagão com drenos de geossintéticos é significativa, da ordem de 29% de redução da umidade. Pode-se observar que a umidade do minério de ferro no meio do vagão é maior do que a umidade encontrada para a situação em que os dois dispositivos de drenagem (dreno de poliuretano e dreno de geossintético) trabalham em conjunto, conforme apresentado no próximo item.

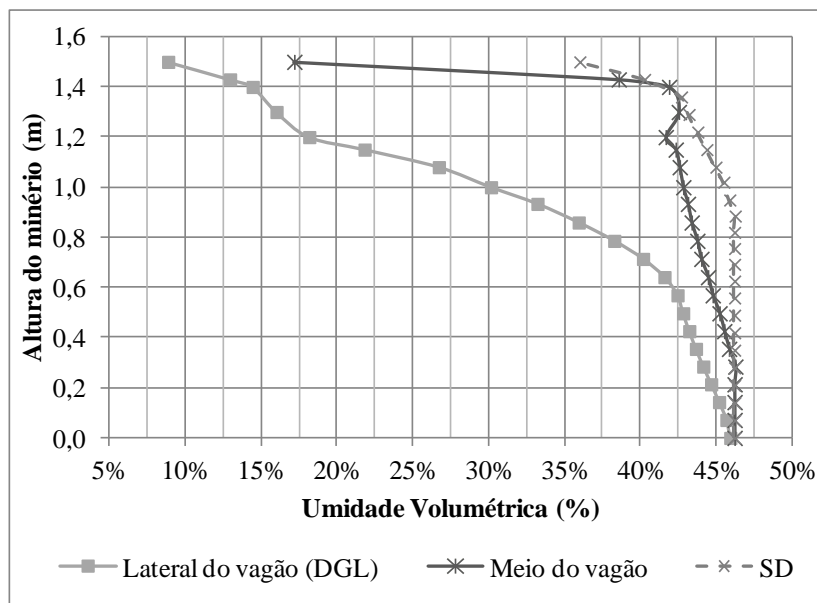


Figura 4.69 - Perfil de umidade de umidade volumétrica no interior do vagão para a situação 3 (DGL)

Na Figura 4.70 é apresentado um diagrama com a distribuição da umidade volumétrica no interior do vagão. Esse diagrama permite uma melhor visualização dos perfis de umidade nas regiões laterais, do meio e dos drenos de poliuretano.

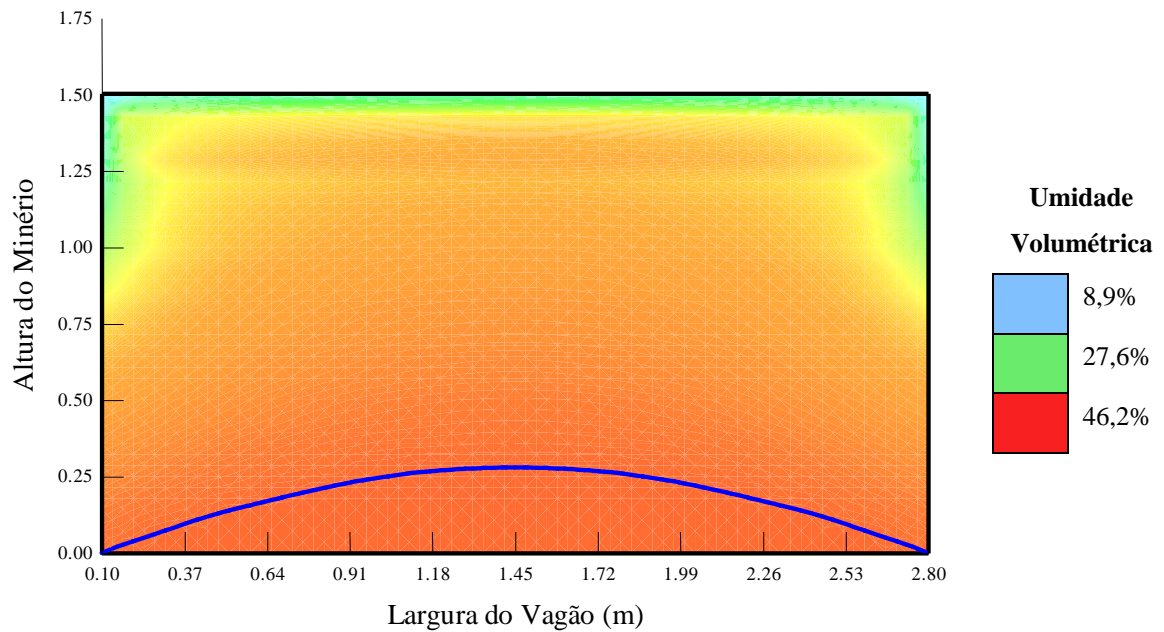


Figura 4.70 - Diagrama de umidade volumétrica no interior do vagão para a situação 3 (DGL)

#### 4.3.2.4. Situação IV – vagão com dispositivo de drenagem lateral e de fundo (DGL + DPF)

Nesta alternativa de análise foi considerada a instalação de um dreno de geossintético nas paredes laterais do vagão, além dos drenos de poliuretano de fundo, de maneira que os dois dispositivos trabalhem em conjunto.

Com a instalação dos drenos de geossintético pôde-se observar que houve uma redução da umidade volumétrica nas laterais do vagão, conforme pode ser observado na Figura 4.71. Pode-se observar que os valores de umidade nas laterais do vagão, região de instalação dos dispositivos, foram reduzidos significativamente.

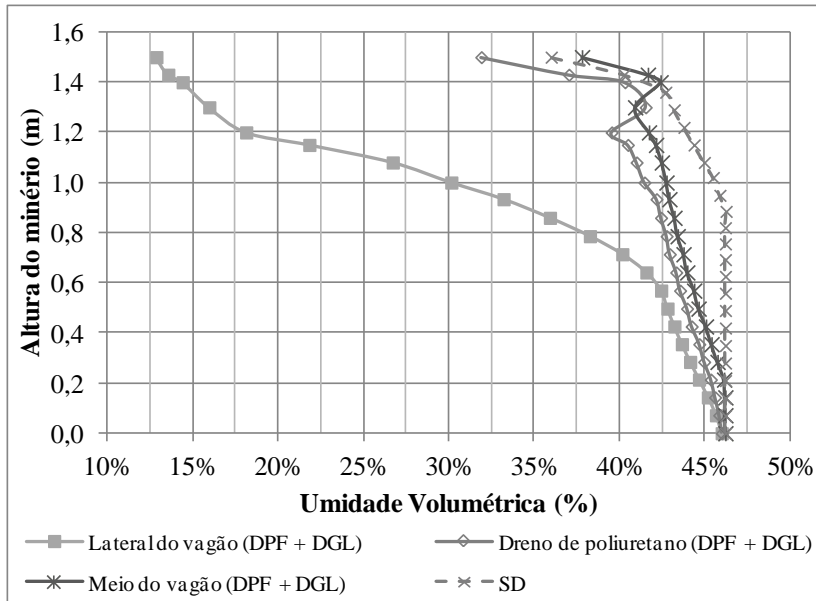


Figura 4.71 - Perfil de umidade de umidade volumétrica no interior do vagão para a situação 4 (DGL+DPF)

Observando o diagrama de distribuição de umidade volumétrica apresentada na Figura 4.72, é possível visualizar dos perfis de umidade nas regiões laterais e no meio do vagão, bem como a eficiência dos dispositivos de drenagem.

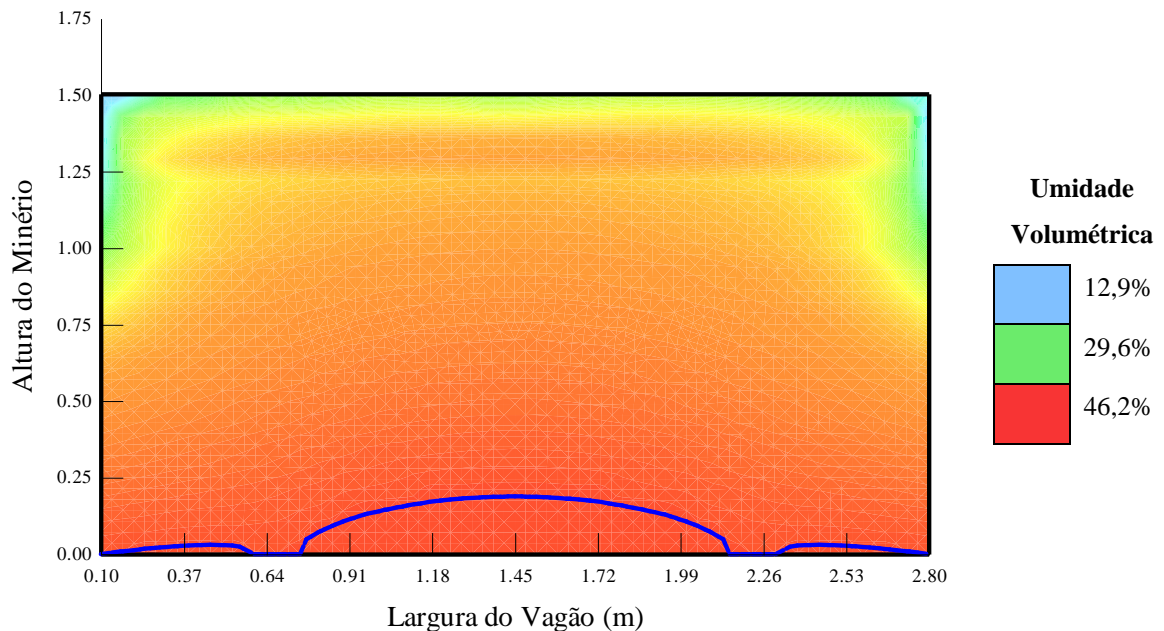


Figura 4.72 - Diagrama de umidade volumétrica no interior do vagão para a situação 4 (DGL+DPF)

#### 4.3.3. Sistemas de drenagem – pátios de estocagem

Na tentativa de avaliar a influência do sistema de drenagem na base das pilhas de minério de ferro foi utilizada uma seção usual de pilha praticada pelas mineradoras no Brasil. De maneira simplificada, foi considerada uma seção transversal típica com altura de 20 m e base com 56 m, resultando em um ângulo de repouso da ordem de 35,5°, conforme apresentada por ABRÃO e MARINHO (2004), e considerado um dia de permanência no pátio de estocagem.

O sistema de drenagem na base das pilhas de minério de ferro, podendo este ser de geossintético, foi analisado para três situações possíveis, conforme apresentado na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Programa de simulações numéricas efetuadas

<b>Simulações</b>	<b>Sistemas de drenagem</b>	<b>Descrição</b>
I	NE	Sem nenhum dispositivo de drenagem
II	C1	Centralizado com extensão de 5,6 m
III	C2	Centralizado com extensão de 28,0 m
IV	C3	Centralizado com extensão de 56,0 m

Na Figura 4.73 é apresentada uma seção esquemática da situação analisada com as condições de contorno aplicadas.

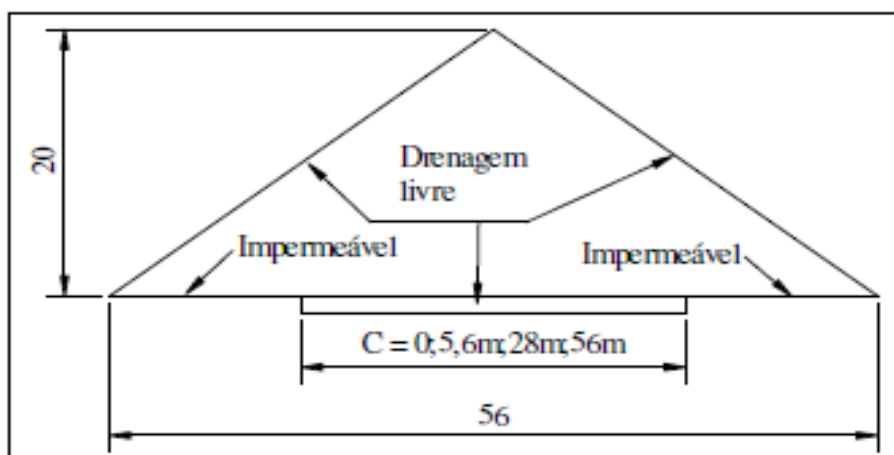


Figura 4.73 - Condições de contorno analisadas (ABRÃO e MARINHO, 2004)

#### 4.3.3.1. Pilha de minério sem nenhum dispositivo de drenagem na base (NE)

Considerando a existência de água livre na superfície da pilha de minério, para esta condição de análise, partiu-se do princípio que o minério de ferro encontra-se em condições de saturação, ou seja, umidade volumétrica da ordem de 46%, conforme apresentado na Figura 4.74.

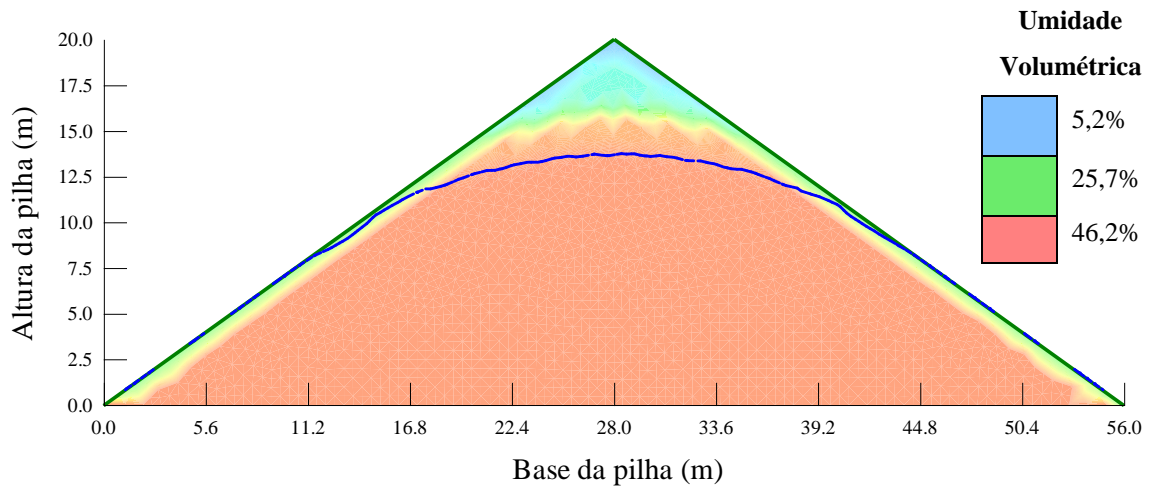


Figura 4.74 - Diagrama de umidade da pilha de minério sem sistema de drenagem na base (NE)

Na Figura 4.75 é apresentado o perfil de umidade médio da região central da pilha de minério, considerando o intervalo de análise de um dia. Pode-se observar que a umidade média na região superficial da pilha é da ordem de 25%, inferior aos valores obtidos para o minério dentro do vagão. Isso pode ser explicado pelo fato da pilha de minério apresentar superfície livre e inclinada, o que pode contribuir para essa pequena diferença de umidade.

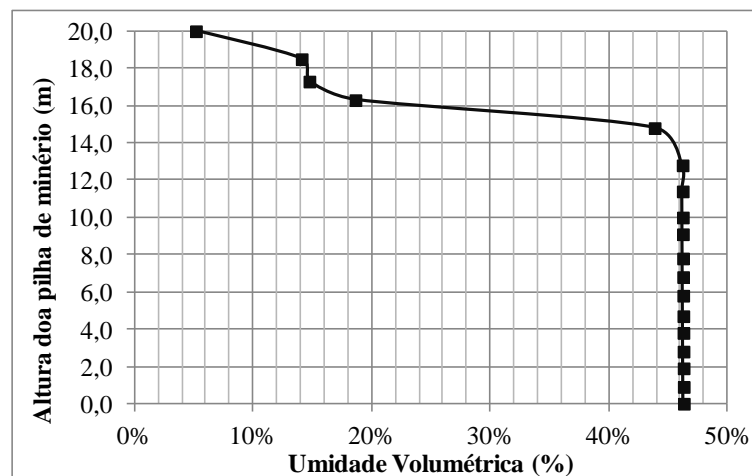


Figura 4.75 - Perfil de umidade na região central da pilha de minério (NE)

#### 4.3.3.2. Pilha de minério com dispositivo de drenagem centralizado de 5,6 m (C1)

Nessa situação observa-se que o dreno instalado trabalha de maneira localizada na região central da base da pilha de ferro. Observa-se que a umidade reduziu consideravelmente com a instalação do dispositivo de drenagem na base da pilha de minério, conforme pode ser observado na Figura 4.76.

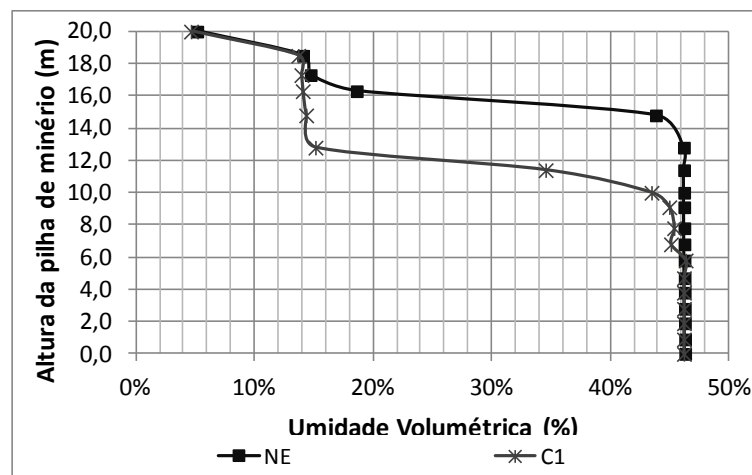


Figura 4.76 - Perfil de umidade na região central da pilha de minério (C1)

No diagrama de umidade da pilha de minério apresentado na Figura 4.77 pode-se observar que o sistema de drenagem utilizado (C1) proporcionou uma considerável redução da umidade na parte superior da pilha.

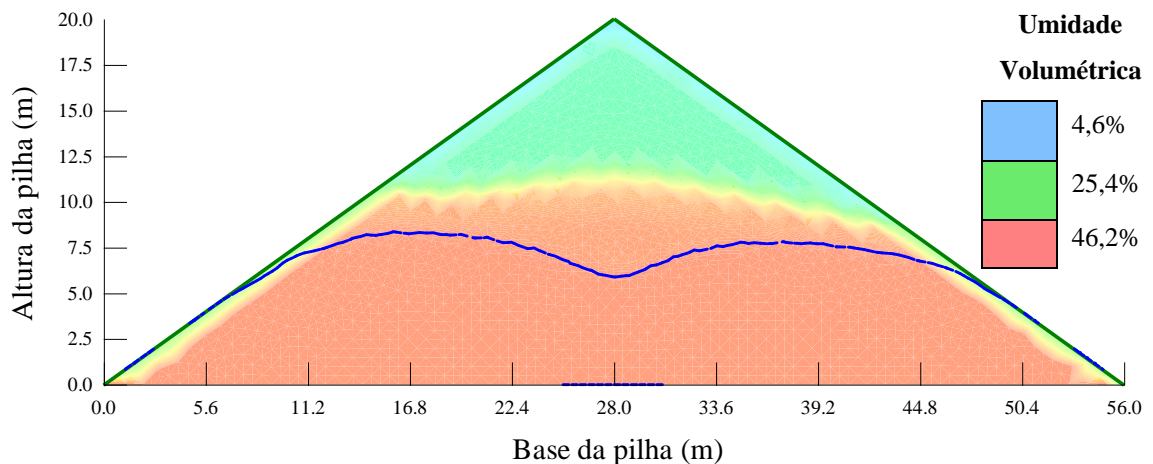


Figura 4.77 - Diagrama de umidade da pilha de minério com sistema de drenagem centralizada na base (C1)

#### 4.3.3.3. Pilha de minério com dispositivo de drenagem centralizado de 28,0 m (C2)

Nessa situação, o dreno instalado trabalha na região central da base da pilha. Por meio da Figura 4.78, pode-se observar que o perfil de umidade para esta situação se apresentou bastante eficiente no processo de drenagem.

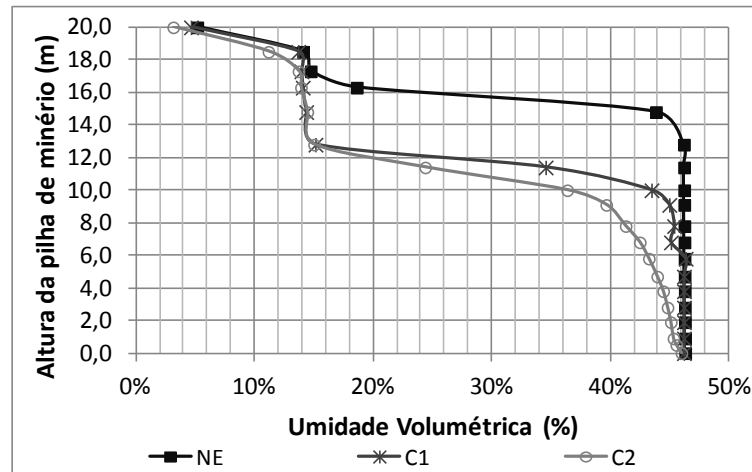


Figura 4.78 - Perfil de umidade na região central da pilha de minério (C2)

No diagrama de umidade da pilha de minério apresentado na Figura 4.79, observa-se que o sistema de drenagem C2 proporcionou uma redução considerável da umidade em toda a região superficial da pilha de minério.

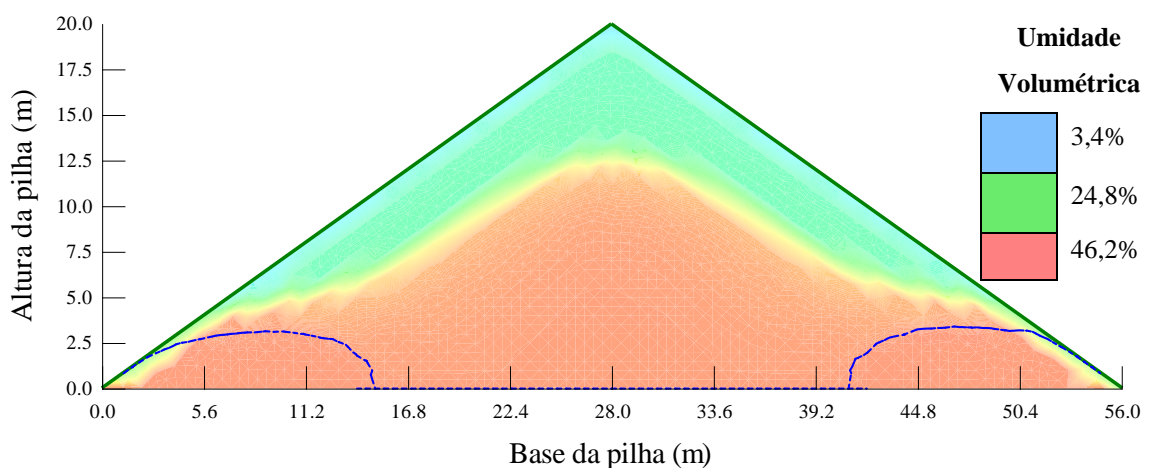


Figura 4.79 - Diagrama de umidade da pilha de minério com sistema de drenagem centralizada na base (C2)

#### 4.3.3.4. Pilha de minério com dispositivo de drenagem centralizado de 56,0 m (C3)

Nessa situação observa-se que o dreno instalado trabalha em praticamente toda a região da base da pilha de minério de ferro. Entretanto, a umidade média no meio da pilha nessas condições de drenagem (C3) são praticamente iguais às condições de umidade avaliadas para as condições de drenagem C2, conforme pode ser observado na Figura 4.80.

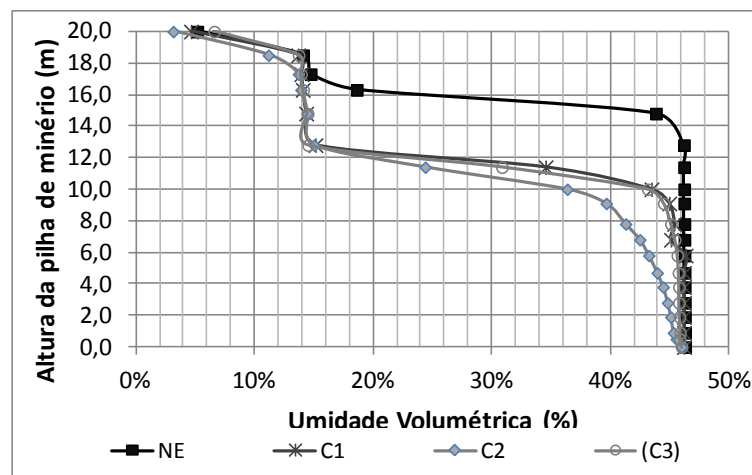


Figura 4.80 - Pilha de minério sem sistemas de drenagem na base (C3)

De maneira geral, a umidade volumétrica média na região central da pilha de minério para as duas últimas condições de análise (C3 e C4) é igual. No entanto, observando o diagrama de umidade da pilha de minério (Figura 4.81) nota-se que a umidade nas regiões laterais da pilha reduziu consideravelmente, mostrando a eficiência do dispositivo de drenagem.

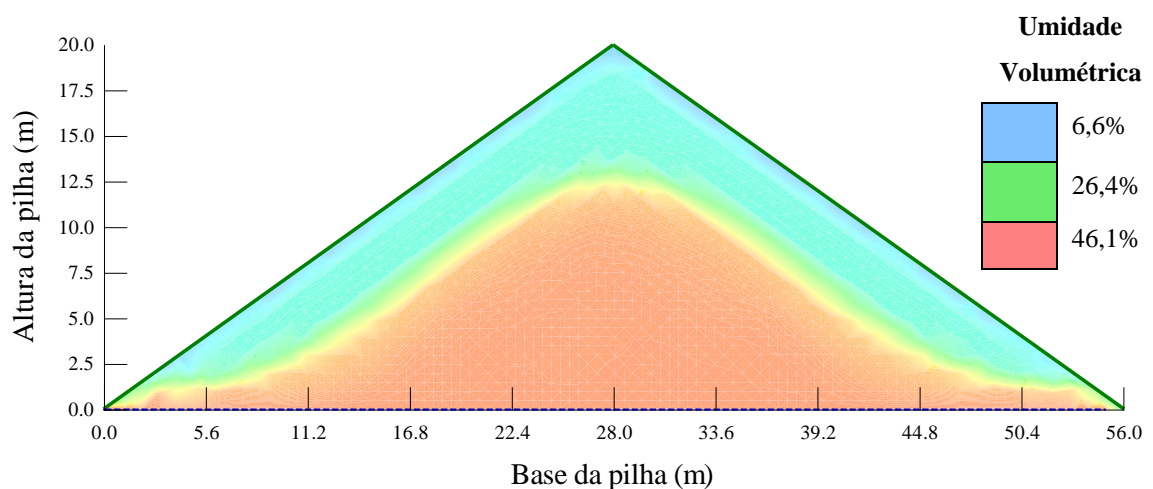


Figura 4.81 - Diagrama de umidade da pilha de minério com sistema de drenagem em toda base (C3)

Analisando de maneira geral, pode-se concluir que um dreno de 28 m, centralizado sob uma pilha de minério de ferro com base de 56 m, é tão eficiente quanto um sistema de drenagem em toda a base da pilha. Porém, quando analisada as regiões mais externas da pilha de minério, observa-se que o sistema de drenagem C3 apresenta maiores reduções com relação ao sistema C2.

## 5. CONCLUSÕES

### 5.1. Considerações finais

O trabalho apresentado procurou contribuir para o estudo do comportamento do minério de ferro, *sinter feed* (SFCJ), em condições variadas de drenagem/secagem, cujo principal objetivo foi redução de umidade. Foi avaliada, com o auxílio de ensaios de laboratório, a aplicabilidade de sistemas de drenagem com geossintéticos conjugados com fatores que acelerasse a redução da umidade. Esses ensaios possibilitaram uma compreensão razoável das características de retenção de água do minério de ferro.

Foram realizados estudos para avaliação dos respectivos potenciais à instabilidade interna do minério de ferro. Nesta avaliação foram utilizadas as propostas metodológicas de Sherard (1976), Kenney e Lau (1985) e Lafleur *et al.* (1989). Esses estudos foram de fundamental importância para uma avaliação do comportamento do minério durante os ensaios de filtração. Segundo a proposta de Sherard (1976), onde foi feita uma comparação dos diâmetros característicos do material estudado, todas as amostras foram classificadas como sendo potencialmente estáveis internamente. O minério de ferro *sinter feed* possui uma curva granulométrica com concavidade voltada para cima e pela análise de Lafleur *et al.* (1989), que propõe a avaliação qualitativa da forma da curva granulométrica do material, ele foi classificado como potencialmente instável. Do mesmo modo pela proposta de Kenney *et al.* (1985), que considera tanto os parâmetros da geometria das partículas quanto da forma da curva granulométrica, o minério SF também foi considerado potencialmente instável internamente. Os resultados obtidos nos ensaios de filtração constataram que o material é realmente instável internamente.

É importante ressaltar que as três metodologias propostas para a avaliação da condição de estabilidade dos solos levam em consideração apenas as características granulométricas do material, desprezando as forças de percolação, textura e forma dos grãos. Para o *sinter feed* foram observadas formas dos grãos em formatos octogonais com planos muito bem definidos, mas partículas lamelares e planares também foram verificadas na composição granulométrica do minério.

Os ensaios de filtração tipo GR realizados para o sistema SFGA mostrou que a condutividade hidráulica do minério reduzia apenas com a variação do gradiente hidráulico. Essa redução pode ser justificada por uma possível migração de partículas finas no interior da amostra, uma vez que esse minério foi classificado como instável internamente. Com relação ao valor de GR, a metodologia GR<sub>3mm</sub> apresentou valores superiores a 3 durante praticamente todo ensaio, inclusive após a aplicação de carga. O critério de colmatção proposto pelo FHWA (Federal Highway Administration) requer que para valores de GR<sub>ASTM</sub> maiores do que 3, o geotêxtil não deve ser utilizado (Gardoni, 2000). Analisando as imagens obtidas através da MEV, pode-se observar alto grau de impregnação das fibras do geossintético, inclusive com partículas maiores (da ordem de 100µm) do que a abertura de filtração do geotêxtil entre as fibras. Pode-se concluir que estas partículas maiores migraram para o interior do material sintético devido, principalmente, às condições de carregamento mecânico aplicadas no ensaio. Apesar da presença de partículas finas impregnadas no geotêxtil, os valores elevados de GR podem estar associados à instabilidade interna do minério, que pode ter proporcionado uma migração significativa de partículas finas para o geotêxtil, colmatando o sistema.

Como ocorrido para o sistema SFGA a variação do gradiente hidráulico alterou a permeabilidade do minério de ferro. Isso pode ser explicado por uma possível acomodação de partículas no interior do corpo de prova durante a variação do gradiente hidráulico. Pela metodologia proposta pela ASTM (1991), valores elevados de GR (acima de 3) indicam possível colmatção do sistema. No entanto, as outras duas metodologias (GR<sub>8mm</sub> e GR<sub>3mm</sub>) apresentaram valores próximos à unidade durante a variação do gradiente hidráulico. Dessa maneira, pode ter ocorrido uma colmatção no próprio minério de ferro, que possui características de solos internamente instáveis. Após a aplicação do carregamento mecânico, os valores de GR também variam. No entanto, observando as imagens de MEV (Figura 4.38), verificou-se pequena impregnação das fibras do geotêxtil, o que não caracteriza uma colmatção. Assim, pode-se concluir que a colmatção ocorreu na própria estrutura do minério de ferro.

Para os sistemas SFGm e SFGGr, a variação do gradiente hidráulico alterou significativamente a permeabilidade do corpo de prova, podendo ser explicado por possíveis deslocamentos de partículas para a região intermediária do corpo de prova. Os

ensaios de GR apresentaram valores abaixo ou próximos da unidade nas três metodologias, significando que o geossintético utilizado não influenciou de forma significativa o regime de fluxo do sistema.

O ensaio de secagem com o lisímetro, juntamente com a curva característica do minério de ferro, possibilitou compreender as características de retenção de água do material. Com o balanço hídrico do material durante o processo de evaporação, foi possível identificar o ponto onde a evaporação real e a evaporação potencial divergem. A partir desse ponto, eram esperadas alterações nos valores de sucção e umidade, o que de fato ocorreu. A curva de evaporação em função do tempo mostrou claramente os três estágios da evaporação bem descritos na literatura, isto é, um estágio inicial, com a taxa de evaporação constante e igual à evaporação potencial, um estágio onde a taxa de evaporação cai bruscamente até atingir o terceiro estágio, onde há uma taxa residual.

Foi observado que o minério de ferro perde umidade facilmente para baixos valores de sucção. Assim como ocorrido na curva de retenção do material, no ensaio realizado com o lisímetro foi possível notar novamente a tendência de comportamento bimodal da curva de secagem. Para valores de sucção da ordem de 30 kPa, observou-se a redução da umidade gravimétrica no topo do corpo de prova em, aproximadamente, 45%. Porém, o equipamento utilizado para a medição da sucção, cuja capacidade de leitura é de 200 kPa, não conseguiu acompanhar a trajetória de secagem do minério de ferro para valores maiores de sucção. A partir do 3º dia de ensaio com o conjunto de lâmpadas halógenas o equipamento atingiu o valor máximo de sucção, o que comprova a rápida perda de umidade do minério para regiões de temperaturas elevadas. No entanto, a base do minério permaneceu com umidade elevada durante mais 28 dias de ensaio, sendo a temperatura nessa região menor do que a superficial em, aproximadamente, 10°C após o início da secagem do minério com as lâmpadas.

No início do ensaio, optou-se por deixar a evaporação ocorrer em temperatura ambiente (aproximadamente 30°C). No entanto, devido à baixa evaporação proporcionada por esses valores de temperatura, foi necessária a utilização de uma fonte de calor adicional (lâmpadas halógenas).

Uma vez que o processo de secagem foi acelerado com o auxílio das lâmpadas halógenas, foi observado que o processo de secagem/evaporação foi acelerado e a região superior do corpo de prova do minério apresentou condições de secagem bastante favoráveis. Após a inserção da fonte de calor, a umidade relativa do ar na superfície do corpo de prova permaneceu relativamente baixa (da ordem de 20% a 40%) para valores de temperatura da ordem de 60°C.

O ensaio de coluna forneceu informações importantes sobre as condições de secagem do minério de ferro com a variação da profundidade. De modo diferente do ensaio com o lisímetro, este ensaio foi iniciado com o conjunto de lâmpadas halógenas ligadas para acelerar o processo de secagem.

Avaliando o perfil de sucção e de temperatura, foi observado que os maiores valores foram obtidos na região próxima ao topo da amostra. Observou-se que o perfil de sucção com o tempo mostrou o avanço de uma frente de secagem do minério, sem, no entanto, gerar grandes valores de sucção em relação à profundidade. Essa pouca ou nenhuma variação da sucção com a profundidade pode ser explicada pelo fato do valor da condutividade hidráulica reduzir com o aumento da sucção. Dessa maneira, a região superior ao apresentar uma sucção mais elevada dificultou o transporte de água entre a região inferior e a superior.

Com o auxílio do conjunto de lâmpadas, a temperatura superficial manteve-se acima dos 70°C praticamente durante todo ensaio. Porém, observou-se que a transferência de calor para a metade inferior (0 a 80 cm) da coluna não foi suficiente para alcançar valor de temperatura superior a 35°C. Esse fato também contribuiu para os valores de umidade serem elevados nessa região da coluna. Observando os perfis de temperatura da coluna durante o ensaio, verificou-se que não houve grande oscilação dos valores. Considerando que os valores médios de temperatura no campo no campo sejam da ordem de 35°C, é importante que seja feita uma análise *in situ* deste parâmetro para verificar realmente se as condições de campo permitem uma evaporação significativa.

Com relação à umidade, esta seguiu a tendência apresentando valores mais baixos para a região mais próxima da superfície devida, principalmente, à temperatura. No entanto,

observou-se que a umidade na base da coluna não apresentou variação significativa durante todo o ensaio, seguindo a mesma linha da sucção na mesma região. Assim, deduz-se que a temperatura não favoreceu o processo de secagem da coluna de minério na base da coluna. Para a região superior, a redução da umidade do minério de ferro foi da ordem de 26%, chegando próximo a 34% de umidade volumétrica no final do ensaio. Se comparados com os resultados apresentados pela análise paramétrica de ajuste do modelo, foi observado que a diferença entre a análise computacional e o resultado final do ensaio foi de apenas 5%.

Os ensaios especiais de redução de umidade com a aplicação de vácuo apresentaram resultados muito interessantes do ponto de vista da eficiência do sistema. De maneira geral, a redução média de umidade do minério de ferro obtida com a aplicação de vácuo foi da ordem de 40%, sendo os valores médios de umidade final na ordem de 7,5% para o topo e 8,9% na base do corpo de prova, o que, de certa maneira, é um resultado significativo.

Os resultados obtidos pelo ensaio de abrasão permitem concluir que houve um desgaste do geotêxtil. Entretanto, acredita-se que o desgaste observado no geotêxtil durante os ensaios de laboratório não seja representativo para as condições de campo, principalmente se ele for utilizado juntamente com o dreno de poliuretano já instalado pela VALE S.A. Os estudos realizados indicam que o grau de dano nos geotêxteis depende de vários fatores, como o tipo de geossintético, a granulometria do material abrasivo e a angulosidade do material granular ensaiado. Os ensaios de abrasão (Los Angeles) realizados para os geocompostos não foram representativos, uma vez que o material sintético não possibilitou uma abrasividade adequada das cargas abrasivas utilizadas para a realização do ensaio.

De posse dos dados do minério de ferro obtidos nos ensaios de secagem e das condições de trabalhabilidade do geossintético como dispositivos de drenagem avaliados nos ensaios de filtração, com a análise computacional buscou-se a junção das duas informações para avaliar a utilização dos geossintéticos nos dispositivos de drenagem dos vagões e nos pátios de estocagem (pilhas de minério de ferro). A simulação computacional realizada com o auxílio do *software* VADOSE/W apresentou bons resultados se considerada a existência de dispositivos de drenagem para a redução da umidade. No entanto, as condições de campo para as quais o modelo foi aplicado podem apresentar valores diferenciados dos resultados apresentados neste trabalho, uma vez que os dados utilizados

nas análises foram resultados dos ensaios de laboratório. A análise paramétrica simples realizada para o ajuste do modelo demonstrou que os resultados dos ensaios e a análise computacional apresentaram a mesma tendência.

Nas simulações realizadas para as condições de transporte (vagões) e estocagem (pilha), foram observados que a existência do dreno é eficiente na redução de umidade do minério. Na região de implantação do geossintético foi observado valores de umidade da ordem de 30%. No entanto, foi observado que a utilização conjunta dos drenos de poliuretano e o geossintético contribuem mais significativamente para a redução de umidade do minério de ferro.

Para as condições de estocagem do minério de ferro em pilhas com 20 m de altura e 56 m de base, pode-se concluir que o sistema de drenagem das pilhas de minério de ferro com a utilização de geossintético pode se tornar importante quando o objetivo é a redução de umidade durante a estocagem. Os resultados mostraram que um sistema de drenagem com 28 m de largura apresentaria um resultado tão bom quanto uma drenagem com 56 m de largura (base da pilha). Porém, notou-se que o interior da pilha de minério praticamente não alterou a umidade, tendo o dispositivo de drenagem maior (56 m) uma influência no fluxo superficial da pilha.

Para efeitos comparativos, os resultados das análises apresentados nos estudos de Abrão e Marinho (2004) demonstraram também a eficiência do dispositivo de drenagem na base da pilha de minério de ferro, porém com um período de estocagem de dez dias. Nesses estudos, o período estimado para a estocagem do minério de ferro (dez dias) contribuiu consideravelmente para a redução da umidade do material. Por outro lado, considerando que o tempo de estocagem não é superior a um dia, as análises apresentadas no capítulo quatro deste estudo, mostraram que a implantação dos dispositivos de drenagem na base da pilha contribui para a redução da umidade do minério de ferro.

Por fim, todos os resultados apresentados nos ensaios para situações em que houve apenas o sistema de drenagem atuante, sem vácuo e temperatura, mostraram que a umidade volumétrica média final do *sinter feed* é da ordem de 30% a 39% para as análises efetuadas nos vagões de transporte, variando em função da profundidade. Para a condição de

estocagem em pilhas, verificou-se valores médios de umidade volumétrica da ordem de 25%.

## 5.2. Sugestões para futuros trabalhos

Pelo fato de ser um assunto relativamente recente, alguns pontos foram levantados durante a realização da pesquisa e que merecem um aprofundamento, na tentativa de concretizar as informações e dados levantados até o momento a respeito do minério *sinter feed*.

- ✓ O estudo referente à interação minério-atmosfera foi bastante abordado nos trabalhos. No entanto, é sugerido que estes ensaios sejam repetidos, com a utilização de tensiômetros de alta capacidade que possibilite a medição de valores elevados de sucção, principalmente nos 10/15 cm mais próximos da superfície;
- ✓ A metodologia para os ensaios de abrasão realizados nos geossintéticos foi elaborada a partir de ensaios existentes para materiais rochosos, e não necessariamente apresenta a mesma eficiência quando aplicada aos geossintéticos. Sugere-se a realização dos ensaios com o equipamento sugerido pela norma, segundo a metodologia proposta, uma vez que o ensaio de abrasão do geossintético não vem sendo realizado no Brasil. Outros materiais, além do *sinter feed* e areia padrão do IPT, devem ser utilizados para uma avaliação comparativa com os resultados apresentados neste trabalho;
- ✓ Os ensaios de GR apresentados foram efetuados com variação de gradiente e carga mecânica. No entanto, a tensão vertical foi aplicada apenas para o gradiente hidráulico  $i = 10$ , sendo os gradientes 1, 2,5, 5 e 7,5 ensaiados sem a aplicação de carga. Sugere-se que os ensaios sejam realizados com outros tipos de geossintéticos e aplicação de carga para cada gradiente hidráulico utilizado no ensaio, obtendo-se assim uma maior variabilidade de resultados em diferentes condições de carregamento mecânico e gradiente hidráulico;

- ✓ É recomendado que os geossintéticos estudados neste trabalho fossem instalados no campo e verificados para as condições de utilização testadas nos ensaios de laboratório. Sugere-se, que sejam feitas exumações desses materiais utilizados nos testes de campo e que sejam efetuados ensaios de GR com a amostra obtida e feita a comparação com resultados de amostras virgens;
- ✓ Com relação aos ensaios especiais de redução de umidade com a aplicação de vácuo, sugere-se a utilização de uma bomba mais potente, que possibilite controlar a sucção aplicada, e um corpo de prova com maiores dimensões. Dessa maneira, poderia avaliar qual a real eficiência do vácuo para a redução de umidade em alturas variadas;
- ✓ Durante os ensaios de vácuo e ensaios de secagem, foi considerado que o geossintético estivesse sempre em condições de saturação, o que, de fato, não ocorreu. Dessa maneira, recomenda-se a realização dos ensaios de coluna que possibilitem a instrumentação do geossintético de forma que se consiga a obtenção de dados, pelo menos, na interface minério-geotêxtil. Uma sugestão interessante seria a realização de ensaios para a obtenção da curva característica do geossintético e a aplicação desses dados na análise numérica, considerando o geossintético como um novo material a ser analisado;
- ✓ A análise numérica apresentada neste trabalho procurou simular as condições de campo e laboratório, buscando a representação das condições de contorno encontradas no pátio de estocagem de minério e no vagão utilizado para o transporte do mesmo. No entanto, devem ser analisadas mais detalhadamente as condições de contorno para o fluxo de calor no minério de ferro, uma vez que não foram realizados ensaios específicos para tal. Recomenda-se a realização de ensaios específicos para a obtenção de parâmetros que possibilitem uma simulação mais eficiente em termos de condutividade térmica do minério de ferro em condições climáticas extremas;
- ✓ Os resultados apresentados pela simulação numérica devem ser validados, se possível, através de um modelo físico de campo com instrumentação, onde seria

feito o monitoramento das condições ambientais e de sucção no interior do maciço, que possibilite a obtenção de dados que possam ser confrontados com os resultados obtidos em ensaios de coluna realizados em laboratório. Os dados que serão obtidos devem apresentar a variação da temperatura, umidade relativa do ar, evaporação e radiação ao longo do dia.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 12553 – Geossintéticos: terminologia*. Rio de Janeiro, RJ, 2003. 3p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 12568: Geossintéticos – Determinação da massa por unidade de área*. São Paulo, SP, 2003. 2p.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR NM 51. Ensaio de Abrasão Los Angeles*, 2001.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 7181: Solo – Análise granulométrica*. São Paulo, SP, 1984b. 13p.

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 12042. Materiais inorgânicos - Determinação do desgaste por abrasão*. Rio de Janeiro, RJ, 1992. 3p. (a)

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas *NBR 12569: Geotêxteis – Determinação da espessura*. São Paulo, SP, 1992. 2p. (b)

ABRÃO, G. S. *Retenção de água em minério de ferro*. 2005. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ABRÃO, G. S.; MARINHO, F. A. M. *Influência do sistema de drenagem de base no fluxo de água em pilhas de minério de ferro*. In: 5º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 2004, São Carlos, SP. Anais: solos não saturados. São Paulo: SGS/EESC/USP, 2004. v.1, p.211-216.

ABRÃO, G. S.; BUSCH, R. G.; COOSSENS, M.; MARIONH, F. A. M.; PINTO, C. S.. *Estudo do Comportamento da Umidade em Minérios de Ferro*. In: 3º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO, 2001, Ouro Preto, MG. p. 100-108.

AGUS, S. S. and SCHANZ, T. Comparison of four methods for measuring total suction, *Vadose Zone Journal*. vol. 4, p. 1087-1095, 2005.

AMORIM, N. R. *Avaliação do desempenho de sistemas de cobertura na mina Rio Paracatu Mineração (RPM)*. 2008.164f. Tese Doutorado – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ASTM D 5298 – *Standard test Method for Measurement of Soil Potential (suction) Using Filter Paper*. Philadelphia, USA, 2003. 6 p.

ASTM D 4886 – *Standard test Method for Abrasion Resistance of Geotextiles (Sand Paper/Sliding Block Method)*. In Annual Book of ASTM Standards, ASTM, Philadelphia, USA, 1988.

ASTM: D 4491 – *Test methods for water permeability of geotextiles by permittivity*. ASTM Standard on Geosynthetics, Philadelphia, USA, 1991. p. 18-22.

ATZINGEN, N. Von; CUNHA JR. W. R.; CRESCENCIO, G. Estudos espeleológicos na Serra dos Carajás, município de Parauapebas-PA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 2007, Ouro Preto. Anais. Minas Gerais: Sociedade Brasileira de Espeleologia. p. 97-103.

AZEVEDO, J. A. e SILVA, E. M. *Tensiômetro: dispositivo prático para controle de irrigação*. Circular Técnica – EMBRAPA, 1999, Planaltina, DF. 37 p.

BANCO DE INFORMAÇÕES E MAPAS DE TRANSPORTES – BIT Mapas de Transportes Estado do Pará, Brasil. Disponível em: <http://www.transportes.gov.br/bit/mapas/mapclick/ufs/pa.jpg>. Acesso em: 14/07/2011.

BEIRIGO, E. A.; PALMEIRA, E. M.; GARDONI, M. G. *Comportamento em filtração de interfaces rejeito-geotêxtil sob diferentes solicitações*. In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA - COBRAMSEG, 2006, Curitiba. Anais. São Paulo: ABMS, 2006. v.3. p. 1861-1865.

BEIRIGO, E. A. *Comportamento Dreno-Filtrante de Geotêxteis em Barragens de rejeitos de Mineração*. 2005. 192 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2005.

CAVALCANTE, E. H. *Mecânica dos Solos II – Notas de Aula*. Centro de Ciências Exatas e Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Sergipe. 79 p.

DIENE, A. A. *Desenvolvimento de tensiômetros para sucção elevada, ensaiados em lisímetros de laboratório*. 2004. 193 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2004.

FANNIN, R. J.; VAID, Y. P.; SHI, Y. C. A critical evaluation of the gradient ratio test. *Geotechnical Testing Journal*, vol. 17, p. 35-42, 1994.

FAURE, Y. H., FARKOUH, B., DELMAS, P. & NANCEY, A. Analysis of geotextile filter behaviour after 21 years in Valcros dam. *Geotextile and Geomembrane*, Vol. 17, n. 5, p. 353-370, Oct. 1999.

FERREIRA, J. C. *Estudos sobre drenagem e redução de umidade do minério de ferro de Carajás com a utilização de Geossintéticos*. 2009. 92 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2009.

FREDLUND, D. G. and RAHARDJO, H. *Soil mechanics for unsaturated soils*. Mississauga, Canada: John Wiley and Sons, 1993. 567 p.

FREDLUND, D.G.; MORGENSTERN, N. R.; WIDGER, R. A. The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 15, n. 3, p. 313-321, 1978.

FREDLUND, D. G. and XING, A. Equations for the soil water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 31. p. 521-532, 1994.

FREITAS, R. A. S. *Comportamento de geotêxteis como filtro em resíduos: fosfogesso e lama vermelha*. 2003.122 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2003.

GARDONI, M. G. A. *Estudo do Comportamento Dreno-Filtrante de Geossintéticos sob Compressão*. 2000. 313 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, 2000.

GARDONI, M. G. A. *Avaliação da Aplicabilidade de Ensaios de Laboratório e Critérios de Filtro para a Utilização de Geotêxteis em Solos do Distrito Federal*. 1995. 177 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, 1995.

GARDONI M. G. A.; VILLAR, L.; FERREIRA, J. C.; MONTEIRO, M.C. *Performance of geosynthetic drainage systems in Carajás mining*. In: GEOSYNTHETICS FOR A CHALLENGING WORLD, 2010, Guarujá. 9th International Conference on Geosynthetics. São Paulo: IGS, 2010. v.02. p.1099 – 1102.

GIROUD, J. P. *Development of Criteria for Geotextile and Granular Filters*. In: 9<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, Guarujá, Brasil. 2010. 45-64.

HANSEN, J. B.; HOLM, P. E.; HANSEN, E. A.; HJELMAR, O. Use of lysimeters of characterization of leaching from soil and mainly inorganic waste materials. Nordest Technical Report 473, Horsholm, Denmark, 2000, *apud* AMORIM, N. R. *Avaliação do desempenho de sistemas de cobertura na mina Rio Paracatu Mineração (RPM)*. 2008.164f. Tese Doutorado – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

HILLEL, D. Introduction of soil physics. San Diego, USA: Academic Press, 1982. 364 p.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. An introduction to geotechnical engineering. Englewood Cliffs : Prentice Hall, 1981. 733 p.

JAME, Y., NORUM, D.I. *Heat and mass transfer in a freezing unsaturated porous medium*. Water Resources Research, 16(4). p.811-819. 1980.

JUCÁ, J. F. T. Comportamiento de los suelos parcialmente saturados bajo succión controlada – Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 1990 *apud* UBALDO, M. O; BORMA, L. S.; BARBOSA, M. C. *Gestão de resíduos sólidos geradores de drenagem ácida de minas com o uso de coberturas secas*. Coleção de Artigos Técnicos Nº2, CETEM/MTC, Rio de Janeiro/RJ, 2006, 51p.

KENNEY, T. C.; LAU, D. Internal stability of granular filters. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 22, p. 215-225, 1985 *apud* BEIRIGO, E. A. *Comportamento Dreno-Filtrante de Geotêxteis em Barragens de rejeitos de Mineração*. 2005. 192 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2005.

KONYAI, S.; SRIBOONLUE, V.; TRELO-GES, V. The effect of air entry values on hysteresis of water retention curve in saline soil. *American Journal of Environmental Sciences*. vol. 5, n. 3, p. 341-345, 2009.

LAFLEUR, J.; MLYNAREK, L; ROLLIN, A. L. Filtration of broadly graded cohesionless soil. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 115, n. 12, p.1747-1768, 1989 *apud* BEIRIGO, E. A. *Comportamento Dreno-Filtrante de Geotêxteis em Barragens de rejeitos de Mineração*. 2005. 192 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2005.

LAMBE, T. W. & WHITMAN, R. V. *Soil mechanics*. New York, USA: John Wiley and Sons, 1969. 553 p.

LIBARDI, P. L. *Dinâmica da água no solo*. Piracicaba, Brasil. EDUSP, 2005. 329 p.

LOURENÇO, S. D. N.; GALLIPOLI, D.; TOLL, D. & EVANS, F. *Use of Tensiometers for the Measurement of Soil Suction*. In: 10th CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA, 2006, Lisbon, Portugal.

MARINHO, F. A. M.; PEREIRA, J. H. F. Mini-Curso: Solos não saturados. In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 1998. Brasília, DF.

MARINHO, F. A. M.; PINTO, C. S. *Soil Suction Measurement Using a Tensiometer*. In: SYMPOSIUM ON RECENT DEVELOPMENTS AND PAVEMENT MECHANICS, 1997. Rio de Janeiro, RJ. v. 1, p. 249-254.

MARINHO, F. A. M.; PINTO, C. S. *Investigating the Water Retention in Iron Ore*. In: 3<sup>rd</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, 2002, Recife, PE. p. 1143-1146.

MINÉRIOS & MINERALES. 2007. As 200 maiores minas brasileiras. Minérios & Minerales XXXI, Ed. 298. São Paulo, SP, Brasil.

MUNÕZ, C. S. *Desempenho de Geotêxteis na Filtração de Solos Internamente Instáveis*. 2005. 109f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 2005.

OLIVEIRA, D. R. *Análise da Interação Solo-Atmosfera durante a Secagem para a Argila Porosa de Brasília*. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-110/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2003.

PALMEIRA, E. M.; LUZ, D. W. B.; GARDONI, M. G. A. *Soil-geotextile filter interaction under high stress levels in the gradient ratio test*. In: GEOSYNTHETICS INTERNATIONAL, 2005, 12 (4), p. 162-175.

PALMEIRA, E. M., GARDONI, M. G. A. Drainage and filtration properties of non-woven geotextiles under confinement using different experimental techniques. *Geotextile and Geomembrane*, Vol. 20, n. 2, p. 97-115, Apr. 2002.

PALMEIRA, E. M., GARDONI, M. G. *The influence of partial clogging and pressure on the behaviour of geotextiles in drainage systems*. Geosynthetics International, Vol. 7, n. 2, p. 403–431. 2000.

PINTO, A. E. S. *Aplicação de Geossintéticos em Linhas Férreas: Estudo Laboratorial dos Fenômenos de Danificação Durante a Instalação e Abrasão dos Materiais*. 2005. 203 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, PT, 2005.

PINTO, N. L. S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A. *et al.* (1976) *Hidrologia Básica*. Editora Edgard Blucher Ltda., 1976. 278 p.

REICHARDT, K. *A água em sistemas agrícolas* – Editora Manole. 1987 *apud* UBALDO, M. O; BORMA, L. S.; BARBOSA, M. C. *Gestão de resíduos sólidos geradores de drenagem ácida de minas com o uso de coberturas secas*. Coleção de Artigos Técnicos Nº2, CETEM/MTC, Rio de Janeiro/RJ, 2006, 51p.

RIBEIRO, A. G. C. *Metodologia para dimensionamento de sistemas de cobertura com base em estudo de caso realizado na mina da empresa Rio Paracatu Mineração (RPM) em Paracatu, Minas Gerais*. 190 p. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2011.

RIBEIRO, V. *Abrasividade pendular e a resistência das rochas*. 2010. 69 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2010.

RIDLEY, A.M and BURLAND, J.B. Discussion: Use of tensile strength of water for the direct measurement of high soil suction. *Canadian Geotechnical Journal*. v.36, p.178-180, 1999.

SÁ, G. *Caracterização litoestrutural e parametrização geomecânica das superfícies de ruptura em taludes na Mina de N4E – Carajás/PA*. 172 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas, NUGEO. Ouro Preto, MG, 2010.

SAMPAIO, J. A., LUZ, A. B., LINS, F. F. *Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil*, Publicação do CETEM, 2001.

SANTOS, G. C. *Influência da competitividade de cromo, cádmio, níquel e chumbo nos parâmetros de transporte de contaminante no solo residual de basalto de Passo Fundo*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, RS, 2010.

SANTOS, T. F. L. *Estudo experimental da camada de cobertura do aterro Morro do Céu, Niterói-RJ*. Dissertação de Mestrado, Centro de Tecnologia e Ciências, Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente, Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2009.

SHERARD, J. L. *Sinkholes in dams of coarse, broadly graded soils*. In: 13<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONGRESS ON LARGE DAMS, 1979, vol. 2, p. 25-35 *apud* BEIRIGO, E. A. *Comportamento Dreno-Filtrante de Geotêxteis em Barragens de rejeitos de Mineração*. 2005. 192 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2005.

TIAN F. Q.; MOU L. Q.; HU H. P. *Characteristics of soil water retention curve at the macro- scale. Science*. In: CHINA SERIES E: TECHNOLOGICAL SCIENCES, Vol. 52, p. 2990-2996, 2009.

TRIANE, B. P. *Avaliação geotécnica do desempenho de cobertura seca em barreira capilar dupla em rejeito de mineração*. Dissertação de Mestrado, COPPE/ Engenharia Civil, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2010.

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais. *Sistema de Drenagem com Geossintéticos dos Equipamentos de Transporte e dos Pátios de Disposição de Minério de Ferro do Complexo Minerador da Serra de Carajás*. Relatório de Atividades. Belo Horizonte, 2009.

VIDAL, D. M. e MARTINS, P. M. *Tubos geotêxteis para acondicionamento e desaguamento de rejeitos de mineração*. In: XII ENCITA, São José dos Campos, SP, 9 p., 2006.

VALE. Drenos de vagões GDE: Relatório de Inspeção. 2003. 6 f.

VILLAR, L. F. *Estudo do adensamento e ressecamento de resíduos de mineração e processamento de Bauxita*. 2002. 443 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil, PUC/RJ, Rio de Janeiro, RJ, 2002.

WILSON, G.W. *Soil Evaporative Fluxes for Geotechnical Engineering Problems*. PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 1990. 464 p.

WILSON, G.W.; FREDLUND, D. G.; BARBOUR, S. I.; Coupled soil atmosphere modeling for soil evaporation. *Canadian Geotechnical Journal*. 31. p. 151-161, 1994.

XINGFA, H.; VIRIYASENAKUL, V; DECHAO, Z. Design, construction and installation of filled-in drainage lysimeter and its applications. In: 99<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON AGRICULTURAL ENGINEERING. Beijing, China, December, 1999, p. 162-168 *apud* AMORIM, N. R. *Avaliação do desempenho de sistemas de cobertura na mina Rio Paracatu Mineração (RPM)*. 2008.164f. Tese Doutorado – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

YOUNG, F. R. *Cavitation*. Imperial College, London, 1999p. 454.