

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ESTUDOS SOBRE DRENAGEM E REDUÇÃO DE UMIDADE DO
MINÉRIO DE FERRO DE CARAJÁS COM A UTILIZAÇÃO DE
GEOSSINTÉTICOS**

JAQUELINE DO CARMO FERREIRA

ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA

CO-ORIENTADORA: MARIA DAS GRAÇAS GARDONI ALMEIDA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM-181/09

BRASÍLIA/DF, SETEMBRO DE 2009.

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ESTUDOS SOBRE DRENAGEM E REDUÇÃO DE UMIDADE DO
MINÉRIO DE FERRO DE CARAJÁS COM A UTILIZAÇÃO DE
GEOSSINTÉTICOS**

JAQUELINE DO CARMO FERREIRA

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

APROVADA POR:

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

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

**NEWTON MOREIRA DE SOUZA, DSc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**PAULO MÁRCIO FERNANDES VIANA, DSc. (UEG)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 24 DE SETEMBRO DE 2009.

FICHA CATALOGRÁFICA

FERREIRA, JAQUELINE DO CARMO

Estudos sobre Drenagem e Redução de Umidade do Minério de Ferro de Carajás com a Utilização de Geossintéticos. [Distrito Federal] 2009.

xvi, 92 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2009)

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

1. Geossintéticos	2. Drenagem	5. Sucção
3. Minério de Ferro	4. Redução de Umidade	
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)	

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FERREIRA, J. C. (2009). Estudos sobre Drenagem e Redução de Umidade do Minério de Ferro de Carajás com a Utilização de Geossintéticos. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-181/09, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 92 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Jaqueline do Carmo Ferreira

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Estudos sobre Drenagem e Redução de Umidade do Minério de Ferro de Carajás com a Utilização de Geossintéticos. GRAU / ANO: Mestre / 2009

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos.

O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Jaqueline do Carmo Ferreira
Rua Presidente Tancredo Neves, nº 1276, Bairro São Miguel.
CEP 35970-000 – Barão de Cocais/MG – Brasil.

“Agradeço primeiramente a Deus, que me deu força e todas as condições para execução e conclusão desse trabalho; A meus pais Geraldo e Rogéria, meus exemplos de coragem, honestidade, humildade e pelo apoio incondicional às minhas decisões; Aos meus irmãos, Gislaine, André e Diego em compensação à ausência do convívio familiar; A toda minha família que mesmo estando longe não deixaram de me brindar com carinho e apoio.”

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a todas as pessoas que se fizeram presentes, que se preocuparam, que foram solidárias, que torceram por mim. Obrigado por depositarem em mim a confiança para todas as horas.

A toda minha família em especial, aos meus pais e meus irmãos, pelo amor, carinho e dedicação, sem os quais não conseguiria alcançar os meus objetivos.

Ao meu noivo, Alexandre Resque, por ter sacrificado muitos momentos que poderíamos ter desfrutado juntos. Pelo incentivo, apoio e pela cobrança para que eu continuasse e concluísse mais esta etapa da vida.

Ao professor Ennio Marques Palmeira (orientador) e a Professora Maria das Graças Gardoni (co-orientadora) pelos conhecimentos compartilhados.

A todos os professores da Pós-Graduação em Geotecnia da UnB pela transmissão de conhecimentos e convivência acadêmica.

À Paola, minha eterna amiga e companheira de todas as horas.

A todos os amigos de mestrado e doutorado da Geotecnia pela convivência e amizade.

Aos amigos eternos e verdadeiros de Barão de Cocais e de Viçosa, que mesmo distantes, mantiveram-se sempre ao meu lado.

A todos aqueles que, de forma direta ou indireta, puderam contribuir com este trabalho.

Aos alunos da UFMG que contribuíram para a realização desse trabalho.

Às empresas Maccaferri e Reforsolo por cederem os geossintéticos utilizados nesta pesquisa.

Ao CNPq e a Companhia Vale pelo apoio financeiro.

RESUMO

A Companhia Vale extrai grande quantidade do minério de ferro que produz no Brasil, na mina de Carajás, Pará. No fim do processo de extração e deposição do minério nos pátios de armazenamento, o minério de ferro apresenta elevados valores de umidade o que aumenta os custos do transporte. No pátio de armazenamento, antes do transporte, o minério é depositado em pilhas com precárias condições de drenagem da base. Assim, a redução da umidade do minério nesta fase, ou durante o transporte para o porto de exportação pode gerar economias significativas, com importantes implicações econômicas. Este trabalho apresenta resultados de estudos laboratoriais para avaliar a utilização de geossintéticos como sistemas drenantes para reduzir o teor de umidade do minério. Geotêxteis não tecidos e geocompostos para drenagem foram testados em combinação com o minério de ferro. Parte do programa de ensaios de laboratório consistiu em ensaios de razão entre gradientes sob pressão, para investigar a compatibilidade entre os materiais geossintéticos filtrantes e o minério. Foram realizados testes especiais utilizando o equipamento de razão entre gradientes, onde diferentes valores de sucção foram aplicados com o auxílio de uma bomba de vácuo, com a intenção de se analisar a redução do teor de umidade do minério. Foram aplicadas tensões normais de até 2000 kPa, alguns ensaios com aplicação direta da carga total e alguns com estágios de 500 kPa. Os resultados obtidos demonstraram o potencial para a utilização de geossintéticos em sistemas de drenagem para reduzir a umidade contida. O uso combinado de geossintéticos e sucção foi capaz de reduzir a umidade do minério em até 50%.

ABSTRACT

Vale Mining Company extracts a large amount of the iron production in Brazil from its mining plant at Carajás, in the state of Pará, Brazil. At the end of the extraction process and deposition inside the plant facilities, the mass of ore presents large values of moisture content that increases transportation costs. In the mining plant, prior to transportation, the ore is deposited in piles with poor drainage conditions at the base. Thus, reductions of ore moisture content at this stage or during transportation to the harbour for exportation can yield to significant savings, with substantial economical implications. This paper presents results of laboratory studies to assess the use of geosynthetic drainage systems to reduce ore moisture content. Nonwoven geotextiles and geocomposites for drainage were tested in combination with ore products with varying particle sizes. Part of the laboratory testing programme consisted of gradient ratio tests under pressure to investigate the compatibility between geotextile filter and ore. Special tests using the gradient ratio apparatus where varying values of suction were applied to the drainage layer were also carried out to investigate reductions on ore moisture content. Normal stresses up to 2000 kPa were applied to the ore-geotextile systems tested. The results obtained showed the potential for the use of geosynthetic drainage systems to reduce ore moisture content. The combined use of geotextile and suction was able to reduce ore moisture content by over 50%.

ÍNDICE

1. CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 OBJETIVOS	3
1.3 ESCOPO DA DISSERTAÇÃO	5
2. CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS.....	6
2.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO E CARACTERÍSTICAS DO MINÉRIO DE FERRO DE CARAJÁS	7
2.3 PÁTIOS DE DEPOSIÇÃO DE MINÉRIO.....	8
2.4 TRANSPORTE DE MINÉRIO.....	9
2.5 INTEGRAÇÃO MINERAÇÃO E SIDERURGIA.....	10
2.6 GEOSSINTÉTICOS	12
2.7 APLICAÇÕES DE GEOSSINTÉTICOS EM MINERAÇÃO	16
2.7.1 GEOSSINTÉTICOS EM BARRAGENS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO COM FUNÇÃO DRENO-FILTRANTE.....	16
2.7.2 IMPERMEABILIZAÇÃO E DRENAGEM DE PILHAS DE LIXIVIAÇÃO DE MINÉRIO	18
2.7.3 TUBOS GEOSSINTÉTICOS PARA ACONDICIONAMENTO E DESAGUAMENTO DE REJEITOS.....	19
3. CAPÍTULO 3. MATERIAIS	24
3.1 INTRODUÇÃO	24
3.2 MATERIAIS	24
3.2.1 MINÉRIO DE FERRO	24
3.2.2 GEOSSINTÉTICOS	24
4. CAPÍTULO 4. METODOLOGIA DA PESQUISA.....	28
4.1 DADOS DE CAMPO	28
4.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO DO MINÉRIO DE FERRO REALIZADOS NO LABORATÓRIO DE GEOTECNIA DA UnB E NO CEFTRU	29
4.2.1 ENSAIOS DE GRANULOMETRIA	30
4.2.2 DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DE CONSISTÊNCIA	31
4.2.3 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA	31
4.2.4 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIOS MÁXIMO.....	32

4.2.5 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIOS MÍNIMO.....	32
4.2.6 MICROSCOPIA COM LUPA.....	32
4.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO REALIZADOS NO LABORATÓRIO DE GEOTECNIA DA UFMG.....	33
4.3.1 ENSAIOS DE PERMEABILIDADE À CARGA CONSTANTE E VARIÁVEL.....	33
4.3.2 DETERMINAÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DO MINÉRIO DE FERRO ..	35
4.4 ENSAIOS DE FILTRAÇÃO DO TIPO RAZÃO ENTRE GRADIENTES.....	41
4.5 ENSAIOS ESPECIAIS DE REDUÇÃO DA UMIDADE DO MINÉRIO DE FERRO..	49
4.5.1 ENSAIO ESPECIAL DE REDUÇÃO DA UMIDADE DO MINÉRIO DE FERRO COM APLICAÇÃO DE VÁCUO	49
4.5.2 ENSAIO ESPECIAL DE REDUÇÃO DA UMIDADE DO MINÉRIO DE FERRO SEM APLICAÇÃO DE VÁCUO	51
5. CAPÍTULO 5. RESULTADOS E ANÁLISES	52
5.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO REALIZADOS NO LABORATÓRIO DE GEOTECNIA DA UnB E CEFTRU	52
5.1.1 ENSAIOS DE GRANULOMETRIA	52
5.1.2 LIMITES DE CONSISTÊNCIA	55
5.1.3 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA	56
5.1.4 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIOS MÁXIMO	56
5.1.5 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIOS MÍNIMO.....	57
5.1.6 MICROSCOPIA COM LUPA.....	57
5.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO REALIZADOS NO LABORATÓRIO DE GEOTECNIA DA UFMG.....	62
5.2.1 ENSAIOS DE PERMEABILIDADE A CARGAS CONSTANTE E VARIÁVEL	62
5.2.2 DETERMINAÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DO MINÉRIO.....	62
5.3 ENSAIOS DE FILTRAÇÃO DO TIPO RAZÃO ENTRE GRADIENTES SOB TENSÃO (GR)	66
5.3.1 ENSAIO DE GR COM O MINÉRIO DO GRUPO PELLET FEED	66
5.3.2 ENSAIO DE GR COM O MINÉRIO DO GRUPO SINTER FEED	67
5.4 ENSAIOS ESPECIAIS DE REDUÇÃO DA UMIDADE DO MINÉRIO DE FERRO..	71
5.4.1 ENSAIO ESPECIAL DE REDUÇÃO DA UMIDADE DO MINÉRIO DE FERRO DO GRUPO PELLET FEED	71
5.4.2 ENSAIO ESPECIAL DE REDUÇÃO DA UMIDADE DO MINÉRIO DE FERRO DO GRUPO SINTER FEED	73

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	76
6.1 CONCLUSÕES.....	76
6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
ANEXO	84

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Descrição dos geossintéticos utilizados.	25
Tabela 3.2. Propriedades dos geotêxteis utilizados (Catálogo – Maccaferri).	26
Tabela 3.3. Propriedades dos geocompostos drenantes (Catálogo – Maccaferri).....	26
Tabela 4.1 - Dados da análise química do SFCJ e PFCJ - coleta Nov/2008 (Vale, 2008).	28
Tabela 4.2. Densidade aparente e umidade das pilhas - fornecidas pela Vale.	29
Tabela 4.3. Média das umidades das pilhas de minério fornecidas pela Vale em 2007.	29
Tabela 5.1. Classificação dos solos segundo a ASTM D422-63/2002 e a NBR 6502/95.	52
Tabela 5.2. Classificação PFCJ pela ASTM e ABNT– Granulômetro.	53
Tabela 5.3. Classificação PFCJ pelas normas ASTM e ABNT- Peneiramento e sedimentação.	54
Tabela 5.4. Classificação SFCJ - ASTM e ABNT.	55
Tabela 5.5. Resultados obtidos utilizando-se a norma NBR 6508/84 - material passante na peneira #4,8mm.	56
Tabela 5.6. Resultados obtidos utilizando-se a norma NBR 6458/84 - material passante e retido na peneira #4,8mm.	56
Tabela 5.7. Índice de vazios máximo das amostras PFCJ e SFCJ.	56
Tabela 5.8. Índice de vazios mínimo das amostras PFCJ e SFCJ.	57
Tabela 5.9. Coeficiente de permeabilidade dos minérios pellet e sinter feed.	62
Tabela 5.10. Valores dos gradientes hidráulicos do ensaio GAPF.	67
Tabela 5.11. Código e descrição dos sistemas geossintético - SFCJ.	67
Tabela 5.12. Código e descrição dos sistemas geossintéticos-PFCJ utilizados nos ensaios de redução de umidade com aplicação de vácuo.	72
Tabela 5.13. Umidade do pellet feed ao final dos ensaios.	72
Tabela 5.14. Código e descrição dos ensaios.	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Pátio de estocagem do Complexo Minerador de Carajás.	3
Figura 1.2. Vagões utilizados no transporte do minério de ferro.	4
Figura 2.1. Província Mineral de Carajás.	6
Figura 2.2. Processo de peneiramento do minério por via úmida.	7
Figura 2.3. Correia transportadora e umidade da pilha de minério.	8
Figura 2.4. Pilha e sistema de drenagem na lateral do pátio.	9
Figura 2.5. Sistema de transporte do minério de Carajás.	9
Figura 2.6. a) Furos na lateral do vagão; b) Furo na parte inferior do vagão.	10
Figura 2.7. Do recebimento da matéria-prima à produção do ferro gusa (modificado - IBS, 2009).	11
Figura 2.8. Lingotamento Contínuo (IBS, 2009).	12
Figura 2.9. Integração da mineração com a siderurgia (Quaresma, 1987).	12
Figura 2.10. Principais tipos de geossintéticos para filtração e drenagem. a) Geotêxteis não tecidos; b) Georredes; c) Geocompostos para drenagem.	13
Figura 2.11. Barragem do Germano.	17
Figura 2.12. Tulipa em gabião do sistema de drenagem da Barragem do Germano (Araújo, 2005).	17
Figura 2.13. Utilização de geossintéticos em mineração. a) Sistema extravasor; b) Canal de drenagem (OBER, 2009).	18
Figura 2.14. Enchimento, desidratação e consolidação de rejeito em tubos geotêxteis (modificado - Allonda, 2009).	20
Figura 2.15. a) Drenagem de rejeitos ácidos de mineração; b) Desaguamento; c) Abertura do tubo após desaguamento (Allonda, 2009).	21
Figura 2.16. Permeâmetro e posicionamento dos piezômetros.	23
Figura 3.1. a) Geotêxtil não-tecido; b) Geocomposto com núcleo de georrede; c) Geocomposto com núcleo de geomanta. (Maccaferri, 2009).	25
Figura 4.1. Unidade óptica e de preparação da amostra do granulômetro a laser.	31
Figura 4.2. Microscópio ProScope HR.	32
Figura 4.3. Ensaio de permeabilidade à carga constante – SFCJ.	34
Figura 4.4. Ensaio de permeabilidade à carga variável – PFCJ.	34
Figura 4.5. Curvas características para solos (Fredlund & Xing, 1994).	36
Figura 4.6. Histerese da curva característica de sucção.	36
Figura 4.7. Curva de retenção característica.	37
Figura 4.8. Detalhe da compactação realizada com martelo Marshall.	39
Figura 4.9. Moldador projetado para o ensaio.	39
Figura 4.10. Deformação e perda de consistência das amostras com saturação elevada.	40
Figura 4.11. Corpo de prova embalado com filme de PVC e papel alumínio.	40
Figura 4.12. Vista geral do equipamento de ensaios de filtração tipo razão entre gradientes (Gardoni, 2000).	42
Figura 4.13. Equipamento para ensaios de GR utilizado nesta pesquisa.	42
Figura 4.14. Esquema do permeâmetro do ensaio de GR (Modificado - Gardoni, 2000).	43
Figura 4.15. Amostra de geossintético - geotêxtil não-tecido.	45
Figura 4.16. Parte inferior do permeâmetro submersa em água destilada.	45
Figura 4.17. Geotêxtil sobre placa perfurada.	46
Figura 4.18. Colocação das buchas de geotêxtil nas saídas dos piezômetros.	46

Figura 4.19. Parte superior do permeâmetro com filme plástico, conectada a parte inferior do permeâmetro.....	46
Figura 4.20. Minério no interior do permeâmetro.....	47
Figura 4.21. Colocação do pistão e fechamento do permeâmetro.	48
Figura 4.22. Esquema do equipamento utilizado nos ensaios especiais de redução de umidade.	50
Figura 4.23. Seqüência da conexão do permeâmetro à bomba de vácuo.....	51
Figura 5.1. Granulometria do Pellet Feed - Granulômetro a laser.....	53
Figura 5.2. Granulometria do Pellet Feed - Peneiramento e sedimentação.	54
Figura 5.3. Granulometria do Sinter Feed - Granulômetro a laser.....	55
Figura 5.4. Visualização do geotêxtil que compõe o geocomposto com núcleo de geomanta, antes do ensaio.	57
Figura 5.5. Visualização do geotêxtil que compõe o geocomposto com núcleo de georrede, antes do ensaio.	57
Figura 5.6. Visualização do geotêxtil não tecido de gramatura 400 g/m ² , antes do ensaio.	58
Figura 5.7. Visualização do geotêxtil não tecido de gramatura 600 g/m ²	58
Figura 5.8. Visualização da face superior do geotêxtil que compõe o geocomposto com núcleo de geomanta, ampliada 100 vezes, após os ensaio.....	58
Figura 5.9. Visualização da face superior do geotêxtil que compõe o geocomposto com núcleo de geomanta, ampliada 400 vezes, após o ensaio.	59
Figura 5.10. Visualização da face inferior do geotêxtil que compõe o geocomposto com núcleo de geomanta, ampliada 100 vezes após o ensaio.....	59
Figura 5.11. Visualização da face inferior do geotêxtil que compõe o geocomposto com núcleo de geomanta, ampliada 400 vezes, após o ensaio.....	59
Figura 5.12. Visualização da face superior do geotêxtil que compõe o geocomposto com núcleo de georrede, ampliada 400 vezes, após o ensaio.	60
Figura 5.13. Visualização da face inferior do geotêxtil que compõe o geocomposto com núcleo de georrede, ampliada 400 vezes, após o ensaio.	60
Figura 5.14. Visualização da face superior do geotêxtil de gramatura igual 400 g/m ² , ampliada 400 vezes, após o ensaio.	60
Figura 5.15. Visualização da face inferior do geotêxtil de gramatura igual 400 g/m ² , ampliada 400 vezes, após o ensaio.	61
Figura 5.16. Visualização da face superior do geotêxtil de gramatura igual 600 g/m ² , ampliada 400 vezes, após o ensaio.	61
Figura 5.17. Visualização da face inferior do geotêxtil de gramatura igual a 600 g/m ² , ampliada 400 vezes, após o ensaio.....	61
Figura 5.18. Trajetória de umedecimento do pellet feed.....	63
Figura 5.19. Trajetória de secagem do pellet feed.	63
Figura 5.20. Trajetória mista do pellet feed.	63
Figura 5.21. Trajetória de umedecimento, secagem e mista do pellet feed.	64
Figura 5.22. Trajetória de umedecimento do sinter feed.....	65
Figura 5.23. Trajetória de secagem do sinter feed.	65
Figura 5.24. Trajetória mista do sinter feed.	65
Figura 5.25. Trajetórias de umedecimento, secagem e mista do sinter feed.....	66
Figura 5.26. GR x i - Sistema GASF.....	68
Figura 5.27. GR x Tensão aplicada - sistema GASF	68
Figura 5.28. GR x i - sistema GBSF.	69
Figura 5.29. GR x Tensão aplicada - sistema GBSF.....	69
Figura 5.30. GR x i - sistema GCSF.	70
Figura 5.31. GR x Tensão aplicada - sistema GCSF.....	70

Figura 5.32. GR x i - sistema GDSF.	71
Figura 5.33. GR x Tensão aplicada - sistema GDSF.	71
Figura 5.34. Umidade do pellet feed ao final do ensaio GAPF1.	72
Figura 5.35. Umidade do pellet feed ao final do ensaio GCPF1.....	73
Figura 5.36. Umidades ao final dos ensaios GASF1, GASF2, GASF3 e GASF4.	74
Figura 5.37. Umidades finais dos ensaios GBSF1, GBSF2 e GBSF3.	74
Figura 5.38. Umidades finais dos ensaios GCFS1, GCFS2 e GCFS3.	75
Figura 5.39. Umidades finais dos ensaios GDFS1, GDSF2 e GDSF3.....	75

LISTA DE ABREVIATÖES NOMENCLATURAS E SÍMBOLOS

%.....	Porcentagem;
°C.....	Graus Celsius.
A.....	Área da seção transversal do corpo de prova;
ABNT.....	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
ASTM.....	American Society for Testing and Materials;
C(θ).....	Capacidade de retenção específica;
C.....	Sucção de entrada de ar;
Cftru.....	Centro de Formação de Recursos Humanos em Transportes;
cm.....	Centímetro;
cm ²	Centímetro quadrado;
cm ³	Centímetro cúbico;
Cu	Coeficiente de não-uniformidade;
DR	Densidade relativa;
e	Índice de vazios;
EFC.....	Estrada de Ferro Carajás;
e _{máx}	Índice de vazios máximo;
e _{mín}	Índice de vazios mínimo;
Fe	Ferro solúvel;
FHWA.....	Federal Highway Administration;
g.....	Gramas;
GA.....	Geotêxtil não tecido
agulhado produzidos com fios de poliéster, MacTex N., M _A =400g/m ² ;	
GB	Geotêxtil não tecido
agulhado produzidos com fios de poliéster, MacTex N., M _A =600g/m ² ;	
GC	Geocomposto com núcleo drenante de georede MacDrain R.2;
GD	Geocomposto com núcleo drenante de geomanta, MacDrain 2L. 20.2;
GR	Razão entre gradientes;
GR _{3mm}	Razão entre gradientes da UnB;
GR _{ASTM}	Razão entre gradientes da ASTM;
GR _{Mod}	Razão entre gradientes da UBC;
H _{CP}	Altura do corpo de prova;
i.....	Gradiente hidráulico;
IBS.....	Instituto Brasileiro de Siderurgia;
i _{i/j}	Gradiente hidráulico entre piezômetros i e j;
IP	Índice de Plasticidade;
k.....	Coeficiente de condutividade hidráulica;
kg.....	Quilograma;
km.....	Quilômetro;
kPa.....	QuiloPascal;
LER.....	Laboratório de Engenharia Rodoviária;
LL.....	Limite de liquidez;
LP	Limite de plasticidade;
m.....	Metro;
m ²	Metro quadrado;
MA.....	Gramatura do geotêxtil;
mg.....	Miligrama;
ml.....	Mililitro;
mm.....	Milímetro;

mm ²	Milímetro quadrado;
mm ³	Milímetro cúbico;
Mta	Milhões de toneladas por ano;
PET.....	Poliéster;
PFCJ.....	Pellet Feed Carajás;
PLS	Solução de lixiviação rica;
PP.....	Polipropileno;
PVC	Policloreto de vinila;
ROM.....	Run of mine (minério bruto);
s	Segundo;
SFCJ.....	Sinter Feed Carajás;
t.....	Temperatura;
t _{GT}	Espessura do geotêxtil;
ton.....	Tonelada;
UFMG.....	Universidade Federal de Minas Gerais;
UnB	Universidade de Brasília;
w _f	Umidade do papel filtro;
γ _d	Massa específica aparente seca;
γ _{dcampo}	Massa específica aparente seca de campo;
γ _s	Massa específica dos grãos;
θ	Umidade Volumétrica;
θ _r	Umidade Volumétrica residual;
θ _s	Umidade Volumétrica para a situação de saturação;
ψ.....	Sucção;

1. CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O minério da Companhia Vale extraído em Carajás é reconhecido como um dos melhores do mundo, por apresentar um elevado teor de ferro, no entanto, possui umidade natural muito elevada. Esta característica é significativamente agravada pelo processo de peneiramento por via úmida da rocha matriz para obtenção da adequação granulométrica dos produtos finais e para eliminação dos finos e impurezas.

Segundo Abrão et al, (2001), por motivos devidos à sua própria gênese, os minérios encontrados em Carajás possuem uma dinâmica de desagregamento mais lenta, eles possuem como características alta porosidade e cristais muito pequenos, muitas vezes criptocristalinos, ou seja, de estrutura cristalina tão fina que os cristais individuais não são reconhecíveis nem com o microscópio. Enquanto os poros retêm água, a desagregação dos pequenos cristais gera ultrafinos diminuindo a permeabilidade e aumentando a área de contato minério-água. Essas características podem ser as responsáveis pela maior lentidão, tanto no desagregamento mecânico (peneiras desaguadoras), quanto nos processos subsequentes (estocagem e transporte).

O minério de ferro extraído em Carajás é dividido em três grupos devido a sua granulometria. O grupo de minério denominado de Lump possui diâmetro médio maior que 6,3 mm e é exportado diretamente para o mercado externo. O grupo do Sinter Feed de granulometria média possui diâmetro entre 0,15 mm e 6,3 mm, este constitui 70% dos tipos de minérios exportados pela Vale e é obtido depois do processo de adequação granulométrica juntamente com o Pellet Feed, grupo de granulometria fina com diâmetro menor que 0,15 mm. O Sinter Feed sai do processo de peneiramento com uma umidade da ordem de 12% e através de um sistema de correia transportadora ele é conduzido até o pátio da mineradora onde é depositado em pilhas de aproximadamente 20 m de altura e exposto para secagem por dois a três dias. Neste período, o minério fica exposto ao ambiente, sofrendo influência dos fenômenos da evaporação e da precipitação pluviométrica, que influenciam na quantidade de água que entra e que sai das pilhas.

O transporte do minério de ferro extraído em Carajás é feito pela Estrada de Ferro Carajás até o porto de Ponta da Madeira (MA), percurso de 892 km que dura cerca de 24 horas. Durante esse transporte, a água é drenada dos vagões do trem juntamente com os finos do minério, o

que compromete o lastro da ferrovia, diminuindo sua vida útil. No Terminal Marítimo de Ponta da Madeira, em São Luis (MA), o minério é estocado nos pátios, onde o produto adquire mais umidade devido às constantes chuvas na região Norte. Para o elevado volume de exportação, o teor de umidade final em torno de 9% corresponde a um volume elevado de água que está sendo transportada junto ao minério, o que acarreta um acréscimo significativo do custo final do produto, e que pode comprometer sua competitividade no mercado externo. Após o carregamento do navio, a água fica depositada na parte inferior do reservatório, impossibilitando sua remoção total o que acarreta alto custo no transporte e descarga. Devido a esse excesso de água e dependendo das condições dos elementos drenantes do porto de destino, a operação de descarga se torna difícil, levando o equipamento de descarga a derramar a polpa formada por essa água e o minério sobre o piso e instalações do porto. O manuseio em correias transportadoras também é afetado. Esses fatos geram despesas com limpeza e com perda de tempo de navio e instalações. Diante destes problemas, torna-se necessário uma avaliação adequada do comportamento deste minério em relação à sua capacidade de absorção/retenção de umidade e a proposição de medidas de engenharia para solucionar os problemas de redução da umidade do minério de ferro tanto nas etapas de estocagem quanto no transporte.

Devido à utilização de materiais naturais em sistemas drenantes tornar-se cada vez mais onerosa e ambientalmente prejudicial, propõe-se empregar materiais produzidos industrialmente que possuem funções semelhantes as dos materiais convencionais. Nesta pesquisa foram estudados alguns tipos de geossintéticos drenantes que podem ora trabalhar junto a materiais naturais reduzindo o volume que seria utilizado, ora substituindo estes materiais.

1.2 OBJETIVOS

Nos tempos atuais de mercado globalizado, o grande desafio para as empresas é como melhorar a performance e a eficiência dos processos operacionais, reduzir custos e maximizar os lucros. A Companhia Vale despense grande quantidade de recursos no transporte de minério de ferro, em parte em decorrência da grande umidade desses minérios. Assim, o desenvolvimento de técnicas de drenagem para redução dessa umidade pode acarretar substanciais economias em despesas de transporte, aumentando a competitividade do minério brasileiro no mercado externo.

Geossintéticos são freqüentemente utilizados como drenos e filtros em obras geotécnicas e de proteção ambiental e a utilização desses materiais em obras de mineração no país tem se acelerado nos últimos anos. Motivadas pela boa atuação das mantas sintéticas sob diversas solicitações, várias pesquisas vêm sendo realizadas para melhorar o conhecimento do comportamento desses materiais, dando origem a inúmeros critérios para seu dimensionamento em obras geotécnicas.

Dentro deste contexto, e devido à escassez de pesquisas relacionadas à finalidade dos geossintéticos a ser investigada nesse projeto, propôs-se o desenvolvimento do presente trabalho de pesquisa, que teve como objetivo melhorar as condições de drenagem do minério de ferro, durante o armazenamento no pátio de estocagem (Figura 1.1) e durante o transporte nos vagões (Figura 1.2), com a intenção de reduzir sua umidade utilizando-se geossintéticos.



Figura 1.1. Pátio de estocagem do Complexo Minerador de Carajás.



Figura 1.2. Vagões utilizados no transporte do minério de ferro.

Diante do objetivo geral de caracterizar o comportamento de geossintéticos quando utilizados em dispositivos de drenagem de minério de ferro, foram buscados os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar o minério de ferro com base em normas utilizadas na Geotecnia para caracterização de solos, visando verificar adequabilidade das mesmas;
- Verificação da variação da permeabilidade do minério de ferro sob compressão;
- Avaliar a utilização do ensaio de razão entre gradientes (GR) na análise do comportamento de geossintéticos em situações de drenagem com minério de ferro;
- Avaliar a variação do GR quando vários níveis de tensão são aplicados, já que os critérios de dimensionamento dos filtros de geotêxtil não consideram a pressão, baseando-se apenas em comparações dos diâmetros das partículas do solo e de tamanho de poros do geotêxtil, não prevendo, assim, o comportamento real da obra;
- Avaliação do desempenho dos geossintéticos quanto à capacidade de descarga e retenção quando em contato com o minério de ferro. O entendimento do comportamento do geotêxtil e geocompostos com o minério de Carajás foi efetuado por meio da realização de ensaios de filtração utilizando combinações de quatro tipos de geossintéticos drenantes e dois tipos de minério de granulometrias diferentes.

1.3 ESCOPO DA DISSERTAÇÃO

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

No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica realizada para elucidação acerca do tema. São apresentadas informações sobre a obtenção do minério de ferro estudado, maneiras de armazenamento e transporte destes materiais e respectivos sistemas de drenagem. Ao final são apresentadas as propriedades dos geossintéticos e questões relativas à sua utilização em dispositivos de drenagem.

O Capítulo 3 é utilizado para apresentar os materiais empregados nos trabalhos realizados.

No capítulo 4 é apresentado o detalhamento das metodologias utilizadas. Quando pertinente são apresentados os equipamentos utilizados.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização, os ensaios de filtração sob compressão, do tipo razão entre gradientes (GR), realizados em laboratório sob gradientes hidráulicos e níveis de tensão variáveis. Também são apresentados os resultados obtidos por meio de ensaios especiais realizados de forma a complementar os de GR. Associada à apresentação dos resultados, é feita uma análise específica de cada um deles.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho. Também são apresentadas sugestões para pesquisas futuras relacionadas ao tema.

Ao final, no item Anexo, são apresentadas as planilhas de medição dos ensaios de filtração, do tipo razão entre gradientes e dos dados fornecidos pela Vale.

2. CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS

A Serra dos Carajás é uma formação vulcano-sedimentar que faz parte do grupo Grão-Pará e está localizada na região central do Estado do Pará. Na região, além do minério de ferro, são encontrados também ouro, cobre, zinco, manganês, prata, bauxita, níquel, cromo, estanho e tungstênio em quantidades ainda desconhecidas e que fizeram da “Província Mineral de Carajás” uma das regiões do mundo mais ricas em minérios.

O minério de ferro extraído em Carajás é importante não apenas pela quantidade em que se encontram, mas também pela qualidade: é o melhor minério de ferro do mundo, ou seja, o que possui maior teor de ferro já encontrado.

Descoberta em 1967, a Província Mineral de Carajás (Figura 2.1) possui reservas de aproximadamente 16 bilhões de toneladas de minério de ferro de alto teor e tem uma capacidade de produção de 100 milhões de toneladas por ano (Mta). Para permitir a adequação granulométrica dos produtos, a usina de beneficiamento possui equipamentos que realizam operações de moagem, peneiramento a úmido e classificação do minério. Ao chegar ao Terminal Marítimo de Ponta da Madeira, o minério é estocado em pátios e, posteriormente, destinado para embarque – à exceção do pellet-feed, que segue para a produção de pelotas na Usina de São Luís (Vale, 2009).



Figura 2.1. Província Mineral de Carajás.

2.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO E CARACTERÍSTICAS DO MINÉRIO DE FERRO DE CARAJÁS

O alto teor de ferro (66% de Fe) e a ausência de contaminantes do minério encontrado na Serra de Carajás proporcionam redução dos custos de produção, porque uma parcela expressiva dos produtos é gerada apenas por etapas de britagem e classificação, dispensando a etapa de concentração. Nesse contexto, o processamento do minério consiste apenas das operações de britagem, classificação, desaguamento, moagem e filtragem. O objetivo da usina de beneficiamento é obter três produtos de granulometrias distintas: pellet-feed, sinter-feed e granulado (lump). Esses produtos são destinados ao mercado interno e à exportação.

O minério da companhia Vale extraído em Carajás apresenta como característica particular em relação a outros minérios uma elevada umidade, a qual é significativamente agravada durante o processo de peneiramento, pois este é efetuado por jateamento de água sob pressão do produto nas peneiras. A quantidade de água misturada ao minério influi decisivamente na qualidade dos produtos oferecidos, pois de maneira geral, os clientes que compram minério exigem baixas quantidades de água em seus produtos. A (Figura 2.2) mostra o processo de peneiramento em Carajás.



Figura 2.2. Processo de peneiramento do minério por via úmida.

2.3 PÁTIOS DE DEPOSIÇÃO DE MINÉRIO

Após o beneficiamento, o material com uma umidade em torno de 12% é conduzido por correia transportadora até os pátios de deposição, grandes áreas abertas localizadas na planta da mineradora, onde o minério é depositado em pilhas para secagem. Nos pátios, providos de sistema de drenagem, o minério fica depositado por no máximo três dias, e a sua umidade tende a baixar para 10%. A Figura 2.3 mostra o transporte do minério da usina de beneficiamento até a deposição em pilhas, feito através de correias transportadoras e o produto empilhado nos pátios. Nesta figura pode-se notar a elevada umidade do material na correia transportadora, nas pilhas de minério e no pátio, ao redor das pilhas. A Figura 2.4 mostra como o material é empilhado e o sistema de drenagem lateral dos pátios.

Foram fornecidos pela Vale desenhos (Anexo I) onde são detalhados os sistemas de drenagem dos pátios da mina de Carajás, sendo estes desenhos datados de 1982. Não são disponíveis informações de como se encontram esses sistemas atualmente e se houve alguma manutenção no período.



Figura 2.3. Correia transportadora e umidade da pilha de minério.



Figura 2.4. Pilha e sistema de drenagem na lateral do pátio.

2.4 TRANSPORTE DE MINÉRIO

Para realizar o transporte do minério da mina até a usina de beneficiamento são utilizados caminhões fora-de-estrada, com capacidade para transportar 252 toneladas de carga, 10 vezes mais do que um caminhão típico utilizado na construção civil. Já o transporte das britagens que ficam próximas às frentes de lavra até a usina industrial é realizado por meio de correias transportadoras, que reduzem os custos de transporte.

Após o período de deposição nos pátios, o produto é transportado por trem (Figura 2.5) ao longo dos 892 km da Estrada de Ferro Carajás (EFC), até o Terminal Marítimo de Ponta da Madeira, em São Luis (MA), onde é novamente estocado nos pátios, e posteriormente destinado para embarque em navios ou, no caso do pellet feed, para a produção de pelotas na Usina de São Luis. Nesta última etapa de estocagem, a umidade atinge valores de até 9%.



Figura 2.5. Sistema de transporte do minério de Carajás.

Uma das medidas adotadas pela Vale para redução da umidade do minério durante o transporte são furos nas laterais e no fundo dos vagões (Figura 2.6), o que não tem apresentado a eficácia desejada.

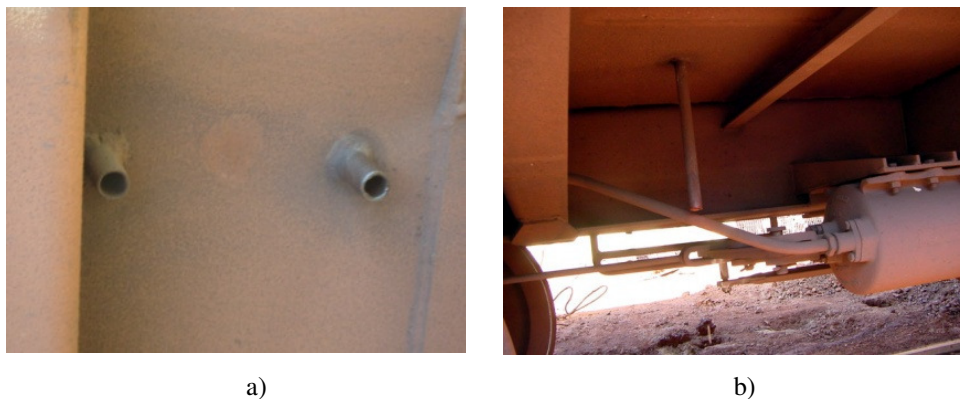


Figura 2.6. a) Furos na lateral do vagão; b) Furo na parte inferior do vagão.

Os furos existentes nos vagões, além de não serem tão eficientes para a redução da umidade excessiva do minério, também não são ambientalmente corretos, pois, juntamente com a água que escoava dos vagões, ocorre também perda do material que se espalha pela ferrovia. Com uma das propostas desta pesquisa, de colocar geossintético com função filtro-drenante no fundo dos vagões, o minério fica retido e apenas a água escoava, reduzindo assim a umidade, minimizando problemas ambientais e perda de material.

2.5 INTEGRAÇÃO MINERAÇÃO E SIDERURGIA

A fronteira entre o ferro e o aço foi definida na Revolução Industrial, com a invenção de fornos que permitiam não só corrigir as impurezas do ferro, como adicionar-lhes propriedades como resistência ao desgaste, ao impacto, à corrosão, etc. Por causa dessas propriedades e do seu baixo custo, o aço passou a representar cerca de 90% de todos os metais consumidos pela civilização industrial.

Basicamente, o aço é uma liga de ferro e carbono. O ferro é encontrado em toda crosta terrestre, fortemente associado ao oxigênio e à sílica. O minério de ferro é um óxido de ferro, misturado com areia fina. O carbono é também relativamente abundante na natureza e pode ser encontrado sob diversas formas. Em siderurgia, usa-se mais comumente o carvão mineral, e em alguns casos, o carvão vegetal.

O carvão tem função de combustível e redutor na fabricação do aço. Como combustível, permite alcançar altas temperaturas (cerca de 1.500° C) necessárias à fusão do minério. Como

reductor, associa-se ao oxigênio que se desprende do minério com a alta temperatura, deixando livre o ferro (IBS, 2009). O processo de remoção do oxigênio do ferro para ligar-se ao carbono chama-se redução e ocorre dentro do alto forno (Figura 2.7), onde outras matérias-primas são acrescentadas no processo.

Antes de serem levados ao alto forno, o minério e o carvão são previamente preparados para melhoria do rendimento e economia do processo.

As usinas siderúrgicas, na sua maioria, classificam-se segundo seu processo produtivo em integradas, semi integradas e não-integradas.

As usinas integradas operam três fases do processo siderúrgico: redução, refino e laminação. As semi-integradas operam apenas duas fases: refino e laminação. Estas usinas partem de ferro gusa, ferro esponja ou sucata metálica adquiridas de terceiros para transformá-los em aço. As não integradas não produzem aço, apenas dispõem de unidade de redução ou processamento.

No processo de redução nas usinas integradas, o ferro se liquefaz e é chamado de ferro gusa ou ferro de primeira fusão. Impurezas como calcário, sílica etc. formam a escória, que é matéria-prima para a fabricação de cimento.

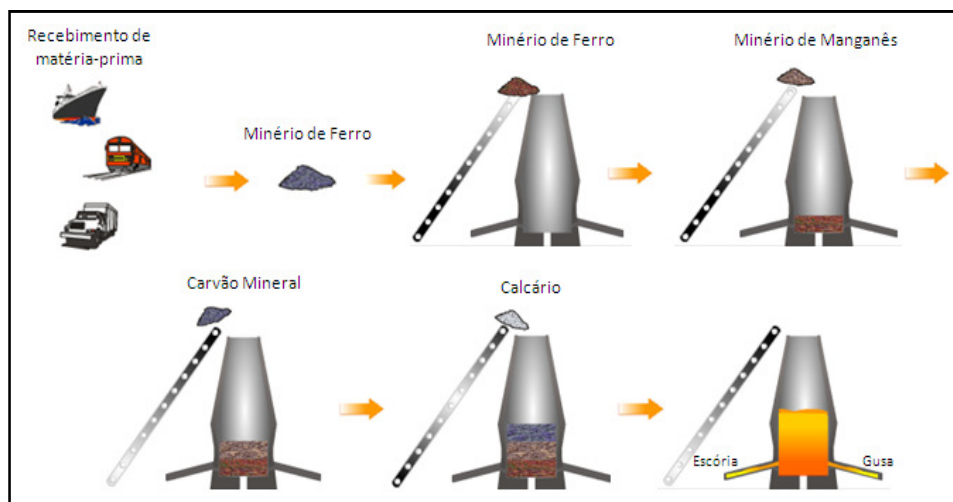


Figura 2.7. Do recebimento da matéria-prima à produção do ferro gusa (modificado - IBS, 2009).

A etapa seguinte do processo é o refino. O ferro gusa é levado para a aciaria, ainda em estado líquido, para ser transformado em aço, mediante queima de impurezas e adições. O refino do aço se faz em fornos a oxigênio ou elétricos (Tipos de fornos: Thomas-Bessemer, Siemens-Martin, Linz-Donawitz e Elétrico).

Finalmente, a terceira fase do processo de fabricação do aço é a laminação. O aço, em processo de solidificação, é levado ao lingotamento contínuo (Figura 2.8), e ali vazado em um distribuidor com diversos veios. Este é deformado mecanicamente e transformado em produtos siderúrgicos utilizados pela indústria de transformação, como chapas grossas e finas, bobinas, vergalhões, arames, perfilados, barras etc.

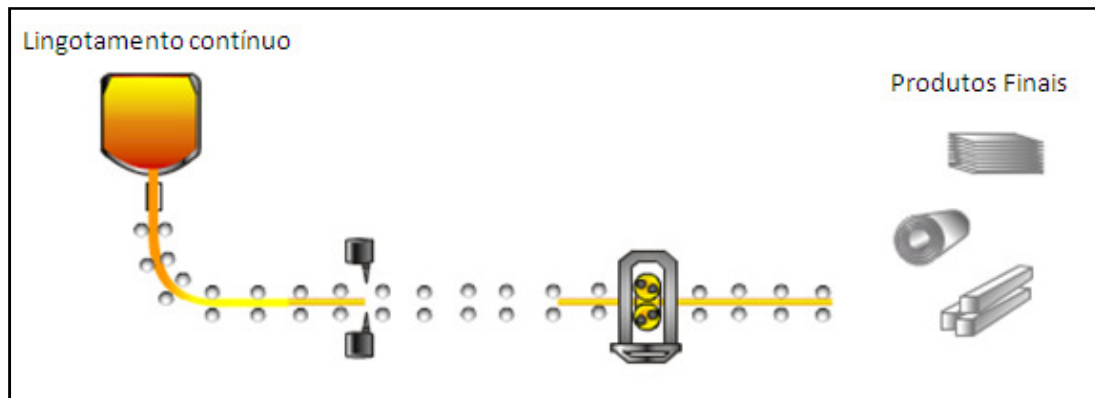


Figura 2.8. Lingotamento Contínuo (IBS, 2009).

No aproveitamento comercial, em geral, o granulado é de utilização direta nos fornos de redução (gusa) e os minérios finos são utilizados nos processos de aglomeração em sinterização e pelotização. Na Figura 2.9 é apresentado um fluxograma simplificado do processo de produção do aço.

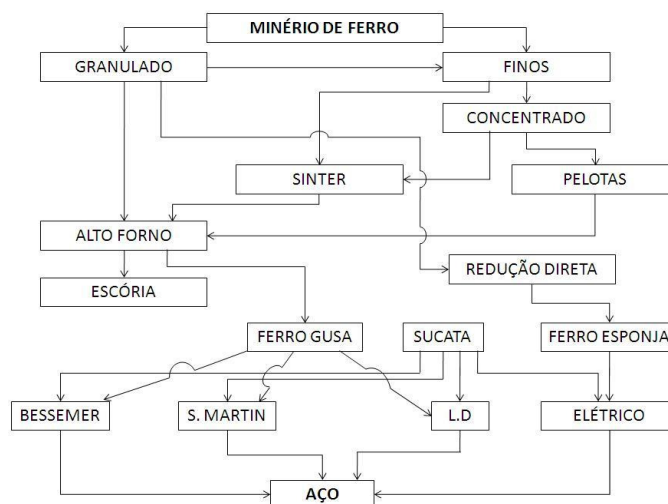


Figura 2.9. Integração da mineração com a siderurgia (Quaresma, 1987).

2.6 GEOSSINTÉTICOS

Geossintéticos são materiais industrializados poliméricos (sintéticos ou naturais), cujas propriedades contribuem para melhoria de obras geotécnicas e de proteção ambiental, nas

quais eles desempenham principalmente funções de filtração, drenagem, reforço, proteção, separação, barreira para fluidos e gases e controle de erosão superficial.

Os geossintéticos estão se consolidando cada vez mais como importantes materiais de construção em vários países, devido ao fato de proporcionarem soluções mais atrativas em termos técnicos e econômicos que as soluções convencionais e também por possuírem fácil transporte e armazenamento, redução de mão de obra e tempo de execução dos serviços.

As aplicações dos geossintéticos têm sido numerosas, variando de acordo com o processo de fabricação e com a matéria prima utilizada em sua fabricação, podendo exercer diversas funções. Os tipos de geossintéticos mais utilizados em obras de engenharia são os geotêxteis (tecidos e não tecidos), os geocompostos, os geodrenos, os geotubos, as georredes, as geomantas, as geogrelhas, as geomembranas, entre outros. A Figura 2.10 ilustra alguns tipos de geossintéticos usados em sistemas de filtração e drenagem.

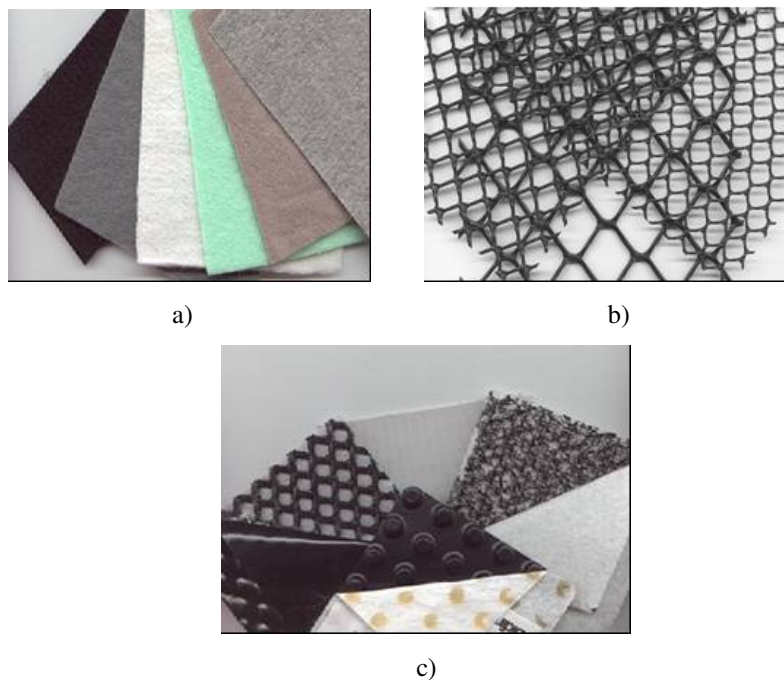


Figura 2.10. Principais tipos de geossintéticos para filtração e drenagem. a) Geotêxteis não tecidos; b) Georredes; c) Geocompostos para drenagem.

A utilização dos geossintéticos em sistemas de drenagem de obras de engenharia é uma das mais comuns. Vários tipos de geossintéticos para filtros e drenos encontram-se disponíveis atualmente. Em obras de drenagem, além da capacidade de retenção do filtro, é necessário estudar a variação da permeabilidade do sistema filtro/material retido com o tempo, de modo que o projeto contemple os períodos de troca do filtro e a variação das perdas de carga

hidráulicas impostas pelo sistema ao longo de sua vida útil (Urashima et al., 2007). Segundo Koerner (1994), alguns dos tipos mais empregados em filtração e/ou drenagem em obras geotécnicas são:

- **Geotêxteis:** tipos de geossintéticos confeccionados por arranjos de fibras, para utilização em obras de drenagem, filtração e reforço. Filtro em sistema de drenagem é uma das aplicações mais comuns para os geotêxteis não-tecidos. O geotêxtil confina algum material drenante, tipicamente brita, com ou sem um tubo perfurado no seu interior. O geotêxtil atua como filtro e como separador, permitindo o fluxo da água e impedindo a migração das partículas finas do solo. Isto permite a vazão da água e impede a contaminação do agregado e a conseqüente colmatagem do sistema.
- **Georrede:** são empregadas como elementos drenantes. São constituídas pela extrusão contínua de uma série de barras poliméricas paralelas interconectadas, formando angulos agudos entre si. A malha resultante é relativamente aberta, com configuração de grelha, formando pequenos canais que conduzem fluidos de todos os tipos e também gases, no seu plano. A matéria-prima típica da georrede é o PEAD - polietileno de alta densidade, polímero que apresenta excelente resistência química. A georrede não deve ficar em contato direto com o solo ou com o resíduo; ela deve ser usada em forma de sanduíche com geotêxtil não tecido ou geomembrana quando em contato com superfícies de concreto, para que seus canais não sejam obstruídos. A georrede substitui drenos de agregados naturais de brita ou de areia, com vantagens de maior rapidez de execução do dreno e maior espaço para armazenamento dos resíduos, no caso de valas, pois sua espessura varia tipicamente de 5 a 7 mm.
- **Geocomposto:** produto industrializado formado pela superposição ou associação de um ou mais geossintéticos entre si ou com outros produtos, geralmente concebido para desempenhar mais de uma função específica;
- **Geoespaçador:** produto com estrutura tridimensional constituída de forma a apresentar grande volume de vazios, utilizado como meio drenante.

No que diz respeito às obras de drenagem de áreas de disposição de minérios, a utilização de materiais naturais (areia, brita, etc.) tem sido a prática mais comum. Recentemente, os geossintéticos vêm se consolidando como materiais de construção que podem prover soluções técnicas e economicamente atrativas em obras de disposição de minérios e rejeitos, pilhas de

estéril e barragens de terra, etc, além de reduzir e evitar a exploração e uso de materiais naturais, o que repercute favoravelmente para a preservação do meio ambiente.

Em um grande número de obras de engenharia, o sistema drenante é fundamental, tanto no que diz respeito à redução de ocorrência de poropressões durante a construção e vida útil da obra, como também no direcionamento do fluxo para um local adequado. São inúmeros os casos de utilização de geotêxteis em substituição aos filtros granulares em barragens, desempenhando principalmente as funções: filtro para rip-rap do talude de montante, camadas de alívio de montante, filtro de drenos vertical e horizontal, poços de alívio e filtro de enrocamento de pé e proteção do talude à jusante (Bentel et al., 1982, Dib & Aguiar, 1982, Tong-Kang et al., 1986, Montez, 1987, Chammas et al., 1987, Faure et al., 1999). A sua utilização no sistema drenante de obras de disposição de rejeitos e barragens é atualmente uma alternativa técnica e econômica comprovada pelo seu excelente desempenho verificado por diversas avaliações em laboratório (Palmeira, 1996, Palmeira e Fannin, 1998, Gardoni, 2000, Palmeira e Gardoni, 2000a, 2000b, Gardoni e Palmeira, 2002, Araújo, 2005, Beirigo, 2005 e Heibaum et al., 2006, por exemplo).

As principais vantagens dos geossintéticos em relação às soluções convencionais em obras geotécnicas são:

- O geossintético é um material de construção manufaturado e, portanto, submetido a controle de qualidade que garante a consistência e confiabilidade nas suas propriedades e características relevantes para este tipo de aplicação;
- A instalação de camadas de geossintéticos para impermeabilização (geomembranas ou GCL's) ou para drenagem e filtração (geotêxteis e georredes) é substancialmente mais fácil que a compactação de camadas granulares. Em vista disso, a redução do tempo para a execução da obra pode ser bastante significativa;
- Os geossintéticos são camadas de pequena espessura e, por isso, ocupam pouco espaço na área de disposição em contraste com camadas de argila compacta ou de drenos de areia. O volume economizado pode ser então ocupado pelo resíduo a ser disposto;
- A utilização de geossintéticos é particularmente interessante em regiões com escassez de materiais naturais apropriados ou em regiões de difícil acesso;

- A tecnologia de geossintéticos avança a cada dia, já se dispõem de características e funções diversas em um mesmo produto. Exemplos disso são geomembranas que permitem a localização de vazamentos através de monitoramento remoto e geotêxteis com propriedades eletrocinéticas, por exemplo.

2.7 APLICAÇÕES DE GEOSSINTÉTICOS EM MINERAÇÃO

Atualmente, dispõem-se de uma grande variedade de geossintéticos para utilização nas mais variadas obras da engenharia. Devido à suas múltiplas funções e por terem a sua eficiência comprovada, os geossintéticos passaram a ser aplicados com frequência em obras como rodovias, ferrovias, barragens, canais, controle de erosão, edificações, solos, entre outros projetos da construção civil. A grande versatilidade destes produtos associada ao desenvolvimento tecnológico das últimas décadas os torna presentes e indispensáveis em praticamente todas as obras geotécnicas da atualidade (Vidal e Palmeira, 2001).

O uso de geossintéticos em áreas relacionadas à mineração vem crescendo bastante nos últimos tempos, principalmente como barreiras ao fluxo de líquidos e em drenos de barragens de rejeitos de mineração. Além dessas utilizações, nos itens seguintes serão citadas outras obras correlatas onde foram utilizados alguns tipos de geossintéticos.

2.7.1 GEOSSINTÉTICOS EM BARRAGENS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO COM FUNÇÃO DRENO-FILTRANTE

Um exemplo de utilização de materiais geossintéticos em barragens de rejeitos de mineração é a Barragem do Germano (Figura 2.11), pertencente à Samarco Mineração S.A, onde a lama proveniente da planta industrial é armazenada em cinco baias de ressecamento para exposição solar e evaporação. Estas baias têm dimensões de 300 m x 300 m, para as quais os dispositivos de drenagem foram projetados com o emprego de geotêxteis não tecidos.

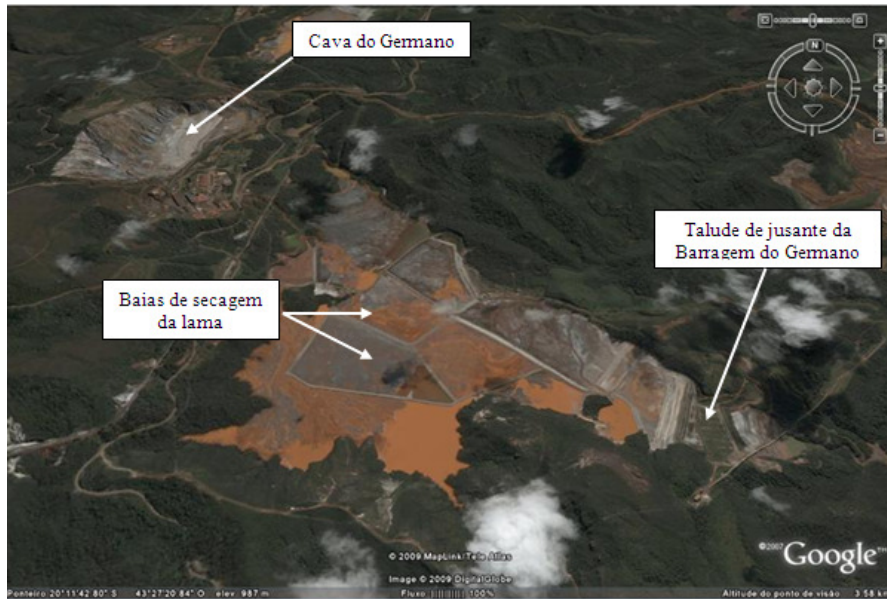


Figura 2.11. Barragem do Germano.

Em cada baía, o sistema de drenagem da água da lama é constituído por um extravasor em gabião tipo caixa. Os extravasores são formados pela associação de um dique de rejeito em forma de espigão e uma tulipa em gabião (Figura 2.12), revestida com geotêxtil não tecido, em sua porção frontal e dotada de um tubo drenante em aço carbono.

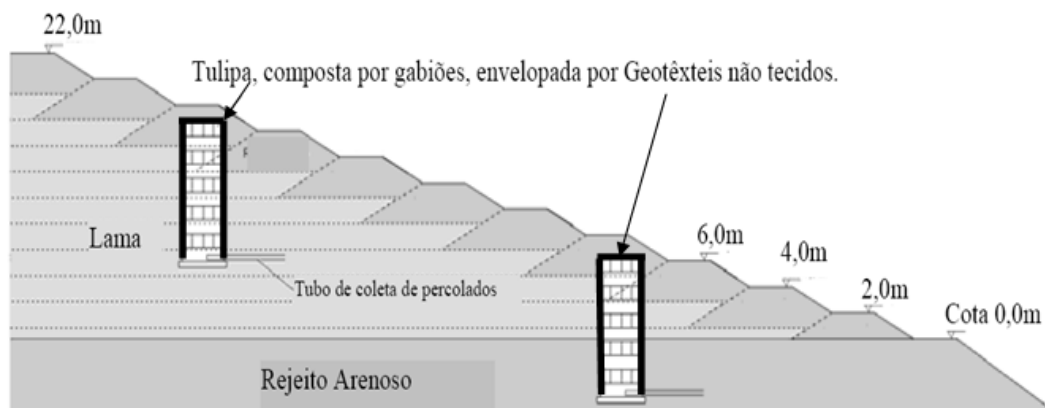


Figura 2.12. Tulipa em gabião do sistema de drenagem da Barragem do Germano (Araújo, 2005).

Como outro exemplo, na Figura 2.13 é apresentada parte da obra da barragem da mineradora MBR, onde foram utilizadas geocélula e a geogrelha na estrutura do sistema extravasor e, em seguida, a execução de um canal de drenagem com geogrelha.



Figura 2.13. Utilização de geossintéticos em mineração. a) Sistema extravasor; b) Canal de drenagem (OBER, 2009).

A necessidade de confinar e estocar materiais perigosos, em condições de confinamento cada vez mais rigorosas exigidas pelos órgãos ambientais, vem impondo uma utilização crescente de produtos sintéticos. No Brasil pode-se observar, nas últimas décadas, um interesse crescente no uso de geotêxteis para drenagem e filtração em obras de proteção ambiental e em projetos de disposição de rejeito, bem como o uso de geomembranas e de geocompostos argilosos como elementos de barreira nestes tipos de obras.

Empregados como elementos filtro-drenantes, os geotêxteis devem manter suas propriedades inalteradas por muitos anos. Este problema passa a ter importância fundamental no caso de barragens de rejeitos, tendo em vista a constituição agressiva do meio (Freitas, 2003) e a vida útil esperada para a obra.

2.7.2 IMPERMEABILIZAÇÃO E DRENAGEM DE PILHAS DE LIXIVIAÇÃO DE MINÉRIO

Lixiviação em pilhas é uma tecnologia de processamento de minerais usada nas pilhas de minério britado ou de ROM - minério de mina, quando os minérios são lixiviados com várias soluções químicas que extraem minerais valiosos. As maiores instalações em termos da área da pilha e tonelagem anual são associadas com as minas de cobre, onde o minério de cobre é irrigado com uma solução fraca de ácido sulfúrico. Esta solução dissolve o cobre do minério e a Solução de Lixiviação Rica (PLS) resultante é filtrada pela pilha de minério e recuperada no fundo do “pad” de lixiviação, que normalmente consiste em um revestimento de geomembrana ou de argila (para criar um revestimento composto ou simplesmente instalado como uma camada de base de boa qualidade para a geomembrana) e uma camada de proteção de rocha britada permeável (overliner) com rede de tubulação de drenagem (Smith e Zhao, 2008).

O sistema de revestimento mais comum é uma geomembrana colocada no subleito preparado ou em uma seção magra composta de argila (tipicamente de 200 a 300 mm de espessura). Considerando que instalações de pilhas de lixiviação aplicam um sistema de lixiviação ativo, irrigando o minério para recuperar os metais, o assunto de drenagem de pilhas é crítico para a estabilidade, controle de filtrações e recuperação de metal. Adicionalmente, o sistema de drenagem serve como a camada protetora de revestimento, e este sistema combinado (freqüentemente chamado “overliner”) normalmente consiste em uma camada de rocha britada de 300 a 1500 mm com tubos de drenagem perfurados instalados a curta distância (de 2 a 10m). As camadas de drenagem geossintéticas são ocasionalmente usadas, principalmente para aplicações de aterros nos taludes de vales íngremes, onde a colocação de pedregulho é difícil e arriscada.

A drenagem das pilhas é feita por um geocomposto drenante, que pode ser a combinação de uma georrede com geotêxtil não tecido. O núcleo, composto por pequenos canais, é responsável pelo escoamento dos fluidos e o geotêxtil atua como filtro e separador, mantendo o solo e os resíduos fora dos canais da georrede.

Durante o processo de avaliação e seleção de camadas de drenagem potenciais para pilhas de lixiviação, um engenheiro projetista tipicamente pode considerar duas opções: materiais naturais ou produtos de drenagem geossintéticos. As vantagens dos materiais naturais são a familiaridade dos engenheiros geotécnicos e maior conhecimento da espessura de seções transversais. Porém, o uso de materiais naturais pode causar problemas de viabilidade de construção e garantia de qualidade, incluindo: estabilidade de taludes laterais; danos às geomembranas (se presentes); cronograma de instalação; consistência e qualidade do tipo de aterro e sua profundidade.

2.7.3 TUBOS GEOSSINTÉTICOS PARA ACONDICIONAMENTO E DESAGUAMENTO DE REJEITOS

O uso de tubos e bolsas de geotêxteis teve início durante os anos 70 e primeiramente foi empregado com propósito estrutural, principalmente em obras costeiras. Porém, desde 1980 a técnica de utilização de tubos geotêxteis preenchidos com sedimentos dragados, tem sido aplicada em todo o mundo em diversos tipos de obras como, por exemplo, para o desaguamento, drenagem de escoamento superficial, controle de erosão e contenção de materiais contaminados ou não.

O método envolve o bombeamento do material dragado, lama ou lodo para dentro dos tubos geotêxteis, os quais permitem que a água seja filtrada pelas aberturas do geotêxtil. Os tubos retêm os sedimentos e promovem um efetivo desaguamento, reduzindo o volume e aumentando a porcentagem de matéria sólida (Figura 2.14). Em alguns casos, o efluente pode ser lançado no meio ambiente, reaproveitado, ou, quando necessário, pode ser encaminhado para tratamento.



Figura 2.14. Enchimento, desidratação e consolidação de rejeito em tubos geotêxteis (modificado - Allonda, 2009).

Estes tubos podem ser de vários tamanhos dependendo de alguns fatores, tais como a quantidade de material a ser contido e a disponibilidade de espaço físico para acomodá-los durante o desaguamento. Eles podem ser preenchidos com qualquer material capaz de ser transportado hidraulicamente e são projetados para resistir às pressões atuantes durante o enchimento e sua disposição. Atualmente a disposição de resíduos em lagoas de sedimentação, é a técnica comumente utilizada, porém esta apresenta uma série de dificuldades, tais como: são construídas em grandes áreas; envolvem altos custos em sua construção; podem apresentar falhas na estanqueidade de fundo da lagoa, o que pode acarretar contaminação do solo e das águas subterrâneas; e o fato dessas lagoas estarem associadas a uma barragem de contenção, logo, sujeitas a ruptura por acúmulo de resíduos, além de aspectos ambientais. Além disso, o período de chuvas agrava a demora na separação da parte líquida da sólida, trazendo o risco de transbordamento da mesma (Castro, 2005).

A técnica de desaguamento por tubos de geotêxtil permite reduzir o teor de umidade de resíduos e conter contaminantes eventualmente presentes, mostrando, em alguns casos, um melhor desempenho em relação a técnicas convencionais e podendo também ser aproveitada como um recurso para otimização do processo de desaguamento (Newman et al, 2004, Castro, 2005 e Martins, 2006). A Figura 2.15 mostra os tubos geotêxteis sendo utilizados em substituição a uma barragem de rejeitos ácidos de mineração, o desaguamento e a abertura de um tubo geotêxtil após o desaguamento.



a)



b)



c)

Figura 2.15. a) Drenagem de rejeitos ácidos de mineração; b) Desaguamento; c) Abertura do tubo após desaguamento (Allonda, 2009).

Geotêxteis têm sido utilizados em projetos de mineração há mais de 30 anos (Bentel et al. 1982, Haas 1982, Scheurenberg 1982, Montez 1987, Bush 1987, Abadjiev Kaltchev 1990, por exemplo). Bentel et al. (1982) descrevem o uso de geotêxteis em barragens de rejeitos de uma mina de ouro na África do Sul, o que resultou em benefícios na redução dos custos de construção e de tempo. Montez (1987) apresenta um caso histórico de sucesso na utilização de geotêxteis em barragens de rejeito de nióbio, onde esses materiais foram utilizados em diferentes componentes de drenagem dessas barragens.

Um dos aspectos negativos da utilização de geotêxteis em mineração são as possibilidades de ataque químico e colmatção do filtro (Haas 1982, Bentel et al. 1982, Scheurnberg 1982). Scheurenberg (1982) descreve os problemas no sistema de drenagem dos rejeitos da barragem Ergo, África do Sul, relacionados com a precipitação do hidróxido de ferro no filtro. O autor comenta que isto ocorre com mais frequência quando são utilizados filtros granulares e afirma que drenos geotêxteis semelhantes apresentaram desempenho satisfatório em outros locais. Diferentes níveis de colmatção de filtros geotêxteis são relatados por Ford (1982), Van Zanten e Thabet (1982), Puig et al. (1986), Mendonça (2000) e Abromeit (2002). Vários casos

de formação de ocre e colmatação completa dos filtros granulares em algumas barragens brasileiras são relatados por Infanti Jr. e Kanji (1974), Ferreira (1978) e Lindquist e Bonsegno (1981).

Abadjiev e Kaltchev (1990) realizaram testes de permeabilidade em amostras de geotêxteis sujeitos a diferentes processos de deposição dos rejeitos. Esses autores observaram reduções na permeabilidade do geotêxtil de até 40 vezes, dependendo do processo de deposição considerado. Abdjiev e Kaltchev recomendam a colocação de um tecido geotêxtil ou de uma camada seca de rejeitos sobre o geotêxtil para protegê-lo do fluxo hidráulico. Segundo esses autores, o geotêxtil colmatará, em certa medida, mas irá manter uma boa e constante capacidade de drenagem da água.

Sistemas de drenagem em barragens ou pilhas de rejeitos também podem ser submetidos a elevados níveis de compressão em função da sua altura e peso unitário dos rejeitos. Para barragens de altura moderada, o nível de compressão pode facilmente ultrapassar 1000 kPa. Neste contexto, por serem materiais compressíveis, o desempenho de filtros geotêxteis sob altos níveis de tensão também devem ser estudados.

Compressão e impregnação do geotêxtil por partículas de solo durante o enchimento e compactação, ou devido à ação de forças de percolação transportando partículas soltas do solo podem aumentar significativamente a capacidade de retenção do geotêxtil (Gardoni 2000, Palmeira e Gardoni 2000, Palmeira e Gardoni 2002, Gardoni e Palmeira 2002). O acúmulo de partículas de solo também influencia o potencial de colmatação desses filtros, devido à redução da abertura de filtração do geotêxtil. Os estudos realizados por Gardoni e Palmeira (2002), não levam em conta a influência de tais mecanismos sobre a capacidade de retenção e potencial de entupimento dos filtros geotêxteis.

Um dos métodos para avaliar a compatibilidade entre um geotêxtil e um filtro de material granular é a utilização do ensaio de filtração do tipo razão entre gradientes (GR). Em geral, o gradiente hidráulico (GR) pode ser definido como:

$$GR = \frac{i_{LG}}{i_s} \quad (1)$$

onde GR é a razão entre gradientes, i_{LG} é o gradiente hidráulico do solo de uma espessura L (dada por um ponto em certa posição no permeâmetro) e o geotêxtil, e i_s é o gradiente hidráulico do solo, medido entre 75 mm e 25 mm de distância do geotêxtil.

ASTM (1996) define GR utilizando L igual a 25 mm, que é medido para os 50 mm de espessura do solo, com segmento começando a 25 milímetros da camada de geotêxtil. Outros pesquisadores apresentaram diferentes definições do GR com o objetivo de analisar a interação entre a base do material e o filtro geotêxtil em uma região próxima a este último. Fannin et al. (1994) definiu uma Razão entre Gradientes Modificada (antes designado GR_{8mm}) utilizando uma região situada a 8mm ($L = 8mm$) acima da camada de geotêxtil. Para avaliar a interação solo-geotêxtil mais próxima à interface solo-filtro, Gardoni (2000) propôs uma definição de razão entre gradientes (GR_{3mm}) usando uma região 3mm acima do filtro geotêxtil. Em todos os casos, a definição do i_s é a mesma. Na Figura 2.16 é possível verificar o posicionamento dos piezômetros.

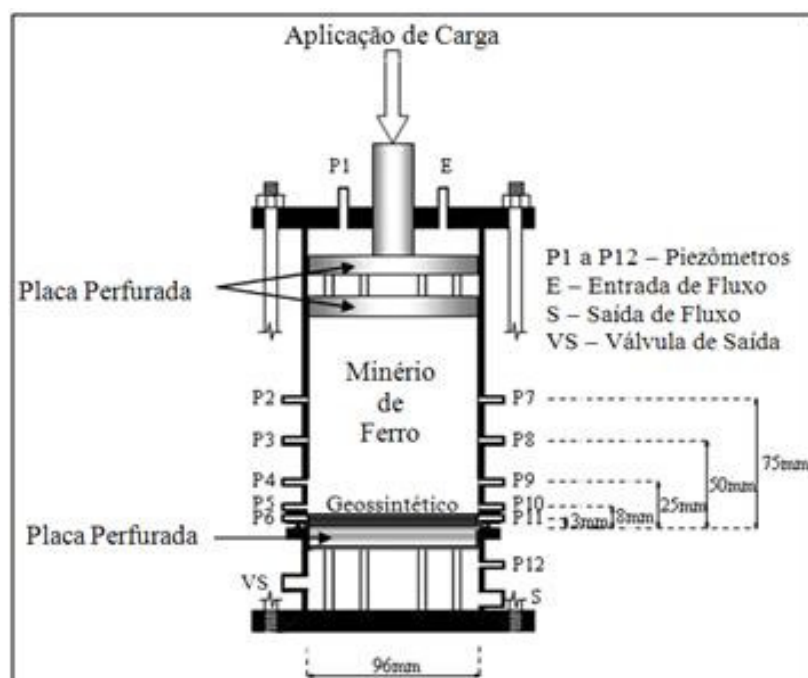


Figura 2.16. Permeâmetro e posicionamento dos piezômetros.

3. CAPÍTULO 3. MATERIAIS

3.1 INTRODUÇÃO

Visando alcançar os objetivos propostos pela presente pesquisa, uma série de ensaios de laboratório foi elaborada com a finalidade de se obter informações sobre o comportamento de geossintéticos em sistemas de drenagem de minério de ferro, a qual será descrita a seguir.

3.2 MATERIAIS

3.2.1 MINÉRIO DE FERRO

Os minérios utilizados nos ensaios são o “Pellet Feed” (PFCJ) e o “Sinter Feed” (SFCJ), que foram fornecidos pela companhia Vale. Os dois tipos de minério para o estudo foram propostos pela Vale por apresentarem maior umidade e maior dificuldade de drenagem da água do seu interior. A coleta foi feita pela empresa em duas etapas, sendo uma primeira etapa, realizada em julho/2008, onde foram coletados 500 kg de cada um dos dois tipos de minérios (SFCJ e PFCJ) e uma segunda coleta, realizada em novembro/2008, onde foram coletados 1000 kg de cada tipo de minério a ser estudado. As amostras foram coletadas pela Vale antes de serem armazenados nas pilhas para evitar a possível segregação do material granular e obtenção de uma amostra representativa do produto.

As amostras da primeira coleta foram enviadas para a UnB e UFMG, em dois tonéis plásticos hermeticamente vedados, contendo 500 kg de cada tipo de minério (SFCJ e PFCJ). No laboratório, foram coletadas 3 porções em cada saco do material para determinação da umidade. As amostras obtidas após homogeneização (uma de PFCJ e outra de SFCJ) são consideradas como as amostras representativas do minério de Carajás.

Para a segunda coleta, o minério foi acondicionado pela empresa diretamente em dois tonéis metálicos de 1000 kg cada um.

3.2.2 GEOSSINTÉTICOS

A seleção dos geossintéticos para atender às exigências da obra deve basear-se em propriedades de engenharia que satisfaçam aos seus requisitos técnicos. Essas propriedades são determinadas a partir de ensaios de campo ou, mais comumente, de laboratório, os quais para serem realistas, precisam reproduzir os aspectos importantes na interação do

geossintético com o meio em que será inserido. Além disso, esses materiais devem apresentar vida útil compatível com as obras onde são empregados (Bueno, 2003).

Os geossintéticos utilizados nos ensaios foram: geotêxteis não-tecidos agulhados produzidos com fibras de poliéster, com gramaturas de 400 e 600g/m², geocompostos com núcleo de georrede do tipo MacDrain R.2 e com núcleo de geomanta do tipo MacDrain 2L 20.2, fornecidos pela Maccaferri. Na Figura 3.1 são apresentados os tipos de geossintéticos usados nos ensaios de desempenho do tipo Razão entre Gradientes.

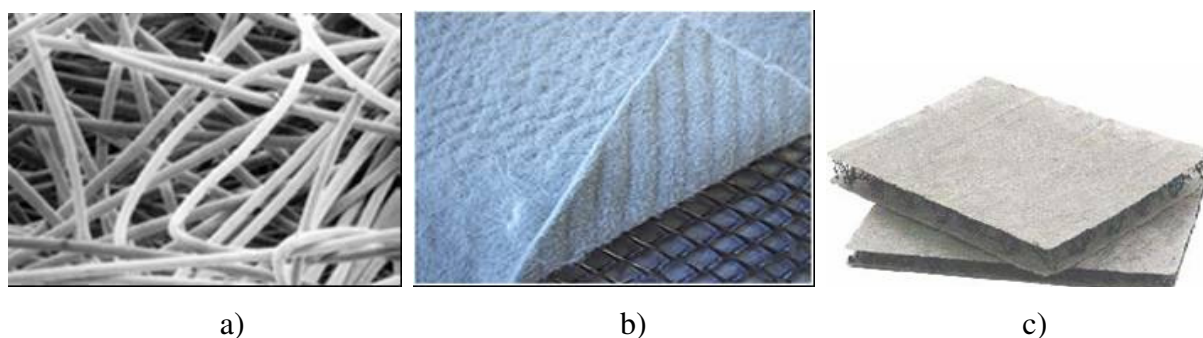


Figura 3.1. a) Geotêxtil não-tecido; b) Geocomposto com núcleo de georrede; c) Geocomposto com núcleo de geomanta. (Maccaferri, 2009).

Na Tabela 3.1 têm-se o código de cada tipo de geossintético utilizado para facilitar a compreensão dos resultados.

Tabela 3.1. Descrição dos geossintéticos utilizados.

Código do geossintético	Descrição do geossintético
GA	Geotêxtil não tecido com gramatura de 400 g/m ²
GB	Geotêxtil não tecido com gramatura de 600 g/m ²
GC	Geocomposto com núcleo drenante de georrede
GD	Geocomposto com núcleo drenante de geomanta

Foram escolhidos geotêxteis do tipo não tecido, por possuírem 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, concomitantemente. A sua permeabilidade garante o eficiente escoamento da água através de sua estrutura, podendo substituir, com vantagens técnicas, econômicas e construtivas e de durabilidade, os tradicionais filtros granulares, que compõem os diversos sistemas drenantes.

Nas Tabelas 3.2 e 3.3 são apresentadas as propriedades dos geossintéticos utilizados.

Tabela 3.2. Propriedades dos geotêxteis utilizados (Catálogo – Maccaferri).

MacTex N - Geotêxtil agulhado produzido com fios de poliéster				
Propriedades			N 40.2	N 60.2
Resist. Longitudinal à tração (Faixa Larga)	kN/m	ABNT NBR 12824	10	16
Along. Longitudinal (Faixa Larga)	%	ABNT NBR 12824	50-65	50-65
Resist. Transversal à tração (Faixa Larga)	kN/m	ABNT NBR 12824	9	14
Alongamento transversal (Faixa Larga)	%	ABNT NBR 12824	60-75	60-75
Resist. Longitudinal à tração (Grab Test)	N	ASTM D 4632	750	1115
Alongamento longitudinal (Grab Test)	%	ASTM D 4632	>60	>60
Resist. 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
Resist. Longitudinal ao rasgo trapezoidal	N	ASTM 4533	300	440
Resist. Transversal ao rasgo trapezoidal	N	ASTM 4533	270	400
Gramatura	g/cm ³	ASTM D 5261	400	600
Permeabilidade normal	cm/s	ASTM D 4491	0,35	0,35
Permissividade	s ⁻¹	ASTM D 4491	2	1,5
Fluxo de água	l/s/m ²	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

Tabela 3.3. Propriedades dos geocompostos drenantes (Catálogo – Maccaferri).

MacDrain 2L 20.2 - Geocomposto drenante com núcleo de geomanta												
Capacidade de Vazão												
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	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
Pressão												
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 ASTM D 4595	14,21	8,57	5,26	2,92
Deformação na ruptura	%	ABNT NBR 12824 ASTM D 4595	33,23	37,33	37,38	36,26
Puncionamento	N	ABNT NBR 13359 ASTM D 4833	---		602,5	
Características físicas			Geocomposto		Geotêxtil	
Espessura	mm	ABNT NBR 12569	11,0		0,7	
		ASTM D 5199				
Gramatura	g/m ²	ABNT NBR 12568	700		100	
		ASTM D 5261				

MacDrain R.2 - Geocomposto drenante com núcleo de georrede

Georrede			PEAD ⁽¹⁾ estabilizado	
Geotêxtil			Poliéster (PET)	
Propriedades mecânicas do geocomposto			2R5	
Resistência longitudinal à tração	kN/m	ISO 10319	20.2	40.2
Alongamento longitudinal	%	ISO 10319	7.0	9.0
			30	30
Propriedades hidráulicas			2R5	
Geocomposto			20.2	40.2
Transmissividade ⁽²⁾	m ² /s	ASTM D 4716	0.40	0.28
Geotêxtil			2R5	
			20.2	40.2
Permeabilidade	cm/s	ASTM D 4491	1,1 x10 ⁻¹	0.35
Abertura de filtração do geotêxtil	mm	AFNOR G 38017	0.145	0.23
Propriedades físicas				
Geocomposto			2R5	
			20.2	40.2
Gramatura	g/m ²	ISO 9864	950	1150
Espessura	mm	ISO 9863	6.4	8.2
Geotêxtil			2R5	
			20.2	40.2
Gramatura	g/m ²	ASTM NBR 12569 ASTM D 5199	100	200
Espessura	mm	ASTM NBR 12569 ASTM D 5199	0.7	1.6

4. CAPÍTULO 4. METODOLOGIA DA PESQUISA

As propriedades hidráulicas dos geossintéticos relacionam-se à capacidade do material de conduzir fluido e/ou de atuar como filtro, impedindo o movimento de partículas de solo sem prejuízo do fluxo. Seguindo essa linha de raciocínio, foram realizados ensaios para verificação da eficiência dos geossintéticos como elementos drenantes do minério de ferro.

4.1 DADOS DE CAMPO

Os dados obtidos em campo sobre a análise química dos minérios referentes à segunda coleta foram fornecidos pela Vale em novembro de 2008. Essa análise revela a porcentagem dos minerais presentes no sinter e no pellet feed (Tabela 4.1). Nessa tabela pode-se observar o elevado teor de ferro presente nos dois tipos de minério.

Tabela 4.1 - Dados da análise química do SFCJ e PFCJ - coleta Nov/2008 (Vale, 2008).

Análise Química		
(%)	SFCJ	PFCJ
Fe	66,1	66,82
SiO ₂	1,4	0,96
P	0,034	0,022
Al ₂ O ₃	1,26	0,98
Mn	0,57	0,39
CaO	0,016	0,011
MgO	0,036	0,035
TiO ₂	0,076	0,084
K ₂ O	0,01	0,0072
PPC	1,89	1,83
Total	100	99,99

Foram fornecidos também dados de densidade aparente e umidade de amostras retiradas em 2004 e 2005 (Tabela 4.2) e dados de umidades em pilhas de minério de ferro de amostragens feitas em 2007 (Tabela 4.3).

Tabela 4.2. Densidade aparente e umidade das pilhas - fornecidas pela Vale.

Densidade Aparente - Amostragens realizadas em 2004 e 2005

Sinter Feed Carajás	Densidade Aparente (g/cm ³)	Umidade (%)	Ano
Sinter Feed	2,80	11,0	2004
SFCK pátio - D Bal: 008 a 045	2,83	8,8	2005
SFCK pátio - D Bal: 045 a 053	2,82	7,4	2005
SFCK pátio - C Bal: 002 a 008	2,76	7,6	2005
SFCK pátio - C Bal: 008 a 036	2,81	7,9	2005
SFCK pátio - C Bal: 036 a 048	2,85	8,6	2005
SFCK pátio - B Bal: 057 a 066	3,06	10,5	2005
SFCK pátio - B Bal: 066 a 083	3,08	10,3	2005
Média	2,88	9,0	
Desvio padrão	0,12	1,4	

Pellet Feed Carajás	Densidade Aparente (g/cm ³)	Umidade (%)	Ano
Pellet Feed	2,50	11,0	2004
PFCJ - Am 01	2,01	11,2	2005
PFCJ - Am 02	2,09	10,6	2005
PFCJ - Am 03	2,08	11,9	2005
PFCJ - Am 04	2,25	11,8	2005
PFCJ - Am 05	2,07	10,2	2005
Média	2,17	11,1	
Desvio Padrão	0,18	0,7	

Tabela 4.3. Média das umidades das pilhas de minério fornecidas pela Vale em 2007.

Tipo do minério	Umidade (%)		
	Abril	Julho	Setembro
Pellet feed	12,89	12,55	12,89
Sinter feed	11,71	11,28	11,54

4.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO REALIZADOS NO LABORATÓRIO DE GEOTECNIA DA UnB E NO CEFTRU

Os ensaios de caracterização dos dois tipos de minério de ferro fornecidos pela Vale foram realizados seguindo-se a orientação de normas utilizadas em laboratórios de solos de geotecnia. Os ensaios de granulometria, de determinação dos limites de consistência e microscopia foram realizados no Laboratório de Geotecnia da UnB. Os ensaios de determinação dos índices de vazios máximo e mínimo foram realizados no Laboratório de Engenharia Rodoviária (LER - CEFTRU/UnB).

Inicialmente, cada uma das amostras de minério coletadas foi preparada para os ensaios de laboratório, sendo submetidas à secagem ao ar, destorroamento, homogeneização e quarteamento, de acordo com as recomendações da NBR 6457 (ABNT, 1986).

4.2.1 ENSAIOS DE GRANULOMETRIA

Os ensaios de granulometria realizados foram feitos segundo a norma NBR 7181/84, que prescreve o método para análise granulométrica de solos, realizada por peneiramento ou por uma combinação de sedimentação e peneiramento.

Foram realizados ensaios por combinação de peneiramento e sedimentação e análise granulométrica com a utilização do granulômetro a laser do Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília (Figura 4.1).

Trata-se de um modelo Mastersizer S Standard Bench, produzido pela MALVERN INSTRUMENTS LTD. Este aparelho apresenta vantagens quanto à rapidez e precisão, além de permitir a reprodutibilidade e confiabilidade dos resultados para solos finos. O aparelho é composto por três unidades fundamentais: a unidade de preparação de amostras, a unidade óptica e um computador.

A unidade de preparação de amostras consiste de um tanque com capacidade máxima de 1000 cm³, onde após a preparação e agitação da amostra, a mesma é bombeada à unidade óptica para que possa ser medida.

A unidade óptica é usada para coletar os dados obtidos durante o processo de medida dos tamanhos das partículas da amostra, sendo constituída basicamente por 3 partes: transmissor, unidade de área da amostra e o receptor.

O transmissor contém o dispositivo de geração do feixe de laser que é usado para efetuar as medições nas amostras. A unidade de área da amostra situa-se entre o transmissor e o receptor, onde estão alojados a célula da amostra, a lente de alinhamento com o canhão laser e o difusor de irradiação que é colocado em frente ao conjunto formado pela célula da amostra e a lente de alinhamento. O receptor é a parte final da unidade óptica responsável pela coleta e armazenamento das informações recebidas pelo espalhamento do feixe de laser que passa pela amostra, enviando-as imediatamente para o sistema do computador para serem submetidas ao analisador. Finalmente, a última unidade é o computador que opera com o programa Malvern comandando as operações do sistema de medição.



Figura 4.1. Unidade óptica e de preparação da amostra do granulômetro a laser.

O modelo teórico que o granulômetro opera é baseado no espalhamento que um feixe de laser sofre ao passar pelas partículas de solo em suspensão dentro da unidade óptica. De acordo com o manual do equipamento (Malvern Instruments, 1997), o granulômetro utiliza as teorias de Fraunhofer e Mie. O modelo de Fraunhofer pode prever o padrão de espalhamento, mas não o descreve perfeitamente. Já o modelo de Mie prevê a trajetória da luz que passa ou é absorvida pela partícula.

Diferente do ensaio de sedimentação convencional, o uso do granulômetro não utiliza o peso específico das partículas como parâmetro base para a determinação da sua distribuição granulométrica. A partir da determinação dos volumes das partículas, o granulômetro converte estes volumes ao de esferas e, a partir destas, determina os seus diâmetros. Assim, com o uso do granulômetro, o diâmetro equivalente é determinado com base no volume da partícula e não nas medidas de aberturas de peneiras, como é o que ocorre no peneiramento.

O granulômetro a laser permite obter quatro curvas combinando-se a adição ou não de defloculante com a utilização ou não do ultrassom.

4.2.2 DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DE CONSISTÊNCIA

A determinação dos limites de consistência do minério foi feita seguindo-se as normas NBR 7180/84 e NBR 6459/84, que apresentam os métodos de determinação do limite de plasticidade e do limite de liquidez de solos, respectivamente.

4.2.3 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA

Foram feitas determinações de massa específica com a utilização das normas NBR 6458/84 e NBR 6508/84. Para o grupo do minério denominado Pellet Feed, foi utilizada apenas a

segunda norma citada, por se tratar de um material que não possui partículas que ficam retidas na peneira de 4,8 mm. Para a amostra do grupo de minério denominado Sinter Feed foram utilizadas as duas normas, sendo que esse possuiu partículas que passam e que ficam retidas na peneira com abertura de 4,8 mm. Para a parcela do minério que fica retido na peneira 4,8mm, foram determinadas, além da massa específica, a massa específica aparente e a absorção de água.

4.2.4 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIOS MÁXIMO

Os ensaios para determinação do índice de vazios máximo do minério, tanto o do grupo Pellet Feed quanto do grupo Sinter Feed, foram realizados seguindo-se a orientação da MB-3324, pelo método A citado na norma.

4.2.5 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIOS MÍNIMO

Para obtenção do índice de vazios mínimo do minério, tanto o do grupo Pellet Feed quanto do grupo Sinter Feed, foram obtidos seguindo-se a orientação da MB-3388, pelo método A.1 citado na norma.

4.2.6 MICROSCOPIA COM LUPA

Foi utilizado o microscópio ProScope HR “High Resolution” (Figura 4.2) para visualização das partículas do minério de ferro e dos geossintéticos antes e depois dos ensaios. Esse microscópio permite capturar imagens em tempo real, com ampliação de até 400x e armazená-las em formato PICT, JPEG, ou um filme QuickTime em um programa próprio. As fotos obtidas com este microscópio são de 1.3 Megapixels com resolução de 1280 x 1024.



Figura 4.2. Microscópio ProScope HR.

4.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO REALIZADOS NO LABORATÓRIO DE GEOTECNIA DA UFMG

Os ensaios que serão descritos a seguir de determinação da permeabilidade e da curva característica do minério de ferro foram realizados no Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Minas Gerais como ensaios complementares aos ensaios realizados na Universidade de Brasília. Estes ensaios foram realizados por dois alunos de iniciação científica da UFMG em função do convênio desta pesquisa entre a UnB, UFMG e a Vale.

4.3.1 ENSAIOS DE PERMEABILIDADE À CARGA CONSTANTE E VARIÁVEL

Para o grupo sinter feed foi realizado ensaio de carga constante conforme a NBR 13292, pelo fato deste material apresentar características de solos granulares e para o minério do grupo pellet feed foi realizado o ensaio de carga variável segundo a NBR 14545, para materiais de granulometria fina. Para o controle dos resultados de ensaios de permeabilidade à carga constante, foi necessário o conhecimento do grau de densidade relativa do material, o qual pode ser determinado usando a seguinte expressão:

$$DR = \frac{e_{\max} - e_{nat}}{e_{\max} - e_{\min}} \cdot 100 \quad (2)$$

Onde:

DR = compactidade relativa

e_{\max} = índice de vazios máximo

e_{\min} = índice de vazios mínimo

e_{nat} = índice de vazios natural, ou de campo

Para a moldagem dos corpos de prova para os ensaios de permeabilidade a carga constante do SFCJ, foi feita a compactação do material no permeâmetro por vibração. O material foi dividido em 13 camadas de mesma massa, cada qual compactada até atingir seu índice de vazios mínimo (0,72), valor este obtido através do ensaio da NBR 13292. A compactação do Pellet foi feita com controle de densidade da amostra, com a utilização de um soquete, visando obter uma massa específica aparente seca igual a 2,88g/cm³, devido ao valor de densidade média de campo fornecido pela Vale.

As Figuras 4.3 e 4.4 mostram os ensaios de permeabilidade à carga constante e variável respectivamente.



Figura 4.3. Ensaio de permeabilidade à carga constante – SFCJ.

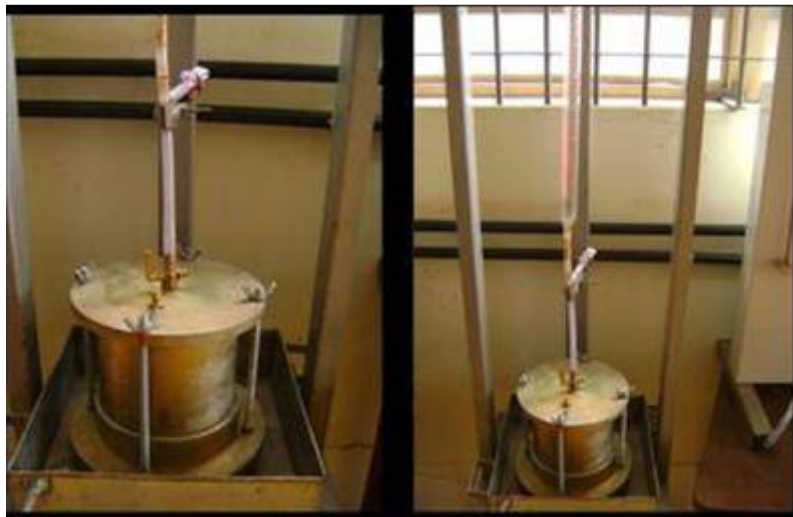


Figura 4.4. Ensaio de permeabilidade à carga variável – PFCJ.

4.3.2 DETERMINAÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DO MINÉRIO DE FERRO

4.3.2.1 SUCÇÃO

Devido ao fluxo de água ocorrer em um meio não saturado, a determinação da curva característica do minério se faz necessária para um melhor entendimento de como a água fluirá através desse material.

A sucção é um fator importante para se conhecer o comportamento do fluxo em um solo não saturado. Segundo Marinho (1997), a sucção pode ser compreendida como a pressão de água intersticial, fruto de condições físico-químicas, que faz com que o sistema água-solo absorva ou perca água, dependendo das condições ambientais.

O fluxo se dá devido a uma energia disponível na água que está no interior do solo. Esta energia disponível que pode realizar trabalho é denominada potencial total. O potencial total de um solo pode-se dar em pequenas parcelas. Dentre todos os componentes têm-se dois como principais, o componente matricial resultante de forças capilares e de adsorção e o componente osmótico, ou de soluto, correspondente à pressão osmótica da água do solo, ou seja, é devida à diferença de concentração química entre a água e o solo. Fredlund, (1994) e Alonso et al. (1987) consideram que somente a sucção matricial é relevante para o estudo, enquanto a sucção osmótica somente será relevante quando ocorre um aumento de concentração química ou sob umidades muito baixas.

4.3.2.2 CURVA CARACTERÍSTICA

A curva característica de sucção é a curva que relaciona graficamente o teor de umidade ou grau de saturação com a sucção. Nesta relação a umidade varia inversamente com a sucção. Na bibliografia pode-se observar que é mais utilizado o teor de umidade em relação à sucção, e esse teor é normalmente expresso volumetricamente, definido como a relação entre o volume de água e o volume de solo. Na Figura 4.5 são apresentados exemplos de curvas características para solos do tipo siltoso, argiloso e arenoso. Nesse gráfico é apresentada a relação entre a sucção e o teor de umidade volumétrica (θ).

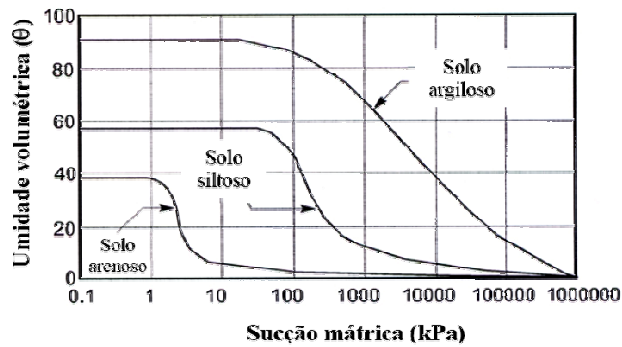


Figura 4.5. Curvas características para solos (Fredlund & Xing, 1994).

Outro fator importante que deve ser considerado na trajetória de secagem e umedecimento da curva de sucção é a histerese, 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, que 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 Figura 4.6 mostra a histerese da curva de sucção.

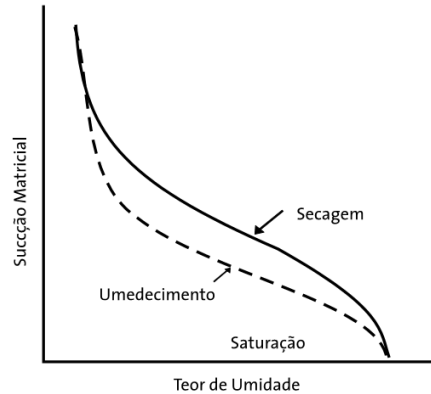


Figura 4.6. Histerese da curva característica de sucção.

Outro fator importante que tem influência na curva de sucção é a composição granulométrica do solo. Como ilustrado na Figura 4.5, pode-se observar que para solos argilosos tem-se uma maior retenção de umidade para uma mesma sucção, isso se deve ao fato das argilas apresentarem vazios muito pequenos e uma superfície específica grande. Estes solos também apresentam uma variação gradual entre umidade e sucção, e isso ocorre pelo fato das argilas terem poros pequenos. Os solos arenosos já possuem uma variação muito brusca e isso ocorre devido aos poros de grandes dimensões.

A composição mineralógica também pode afetar a curva característica, já que diferentes tipos mineralógicos possuem diferentes forças de adsorção. Outro fator que também deve ser levado em conta é a temperatura, já que esta afeta diretamente a tensão superficial na interface solo-água. O aumento da temperatura diminui essa tensão superficial e conseqüentemente a sucção. A temperatura também pode influenciar em solos que possuam ar incluso nos poros, que é uma característica de solos não-saturados. Esse ar expande com o aumento da temperatura podendo causar assim uma modificação na estrutura do solo.

Algumas características importantes podem ser observadas nas curvas de retenção de umidade mostradas na Figura 4.7. Uma delas é o teor de umidade para a situação de saturação (θ_s) que é obtido quando todos os vazios do meio poroso estão preenchidos com água. Como este valor θ_s pode variar em um processo de secagem do material inicialmente saturado, ou a amostra irá se dessaturar ao perder água sem sofrer contração ou irá permanecer saturado mesmo perdendo água, devido a uma contração por variação volumétrica (Marinho e Chandler, 1993). Segundo Stuermer e Marinho, (1998), o teor de umidade residual é aquele a partir do qual é necessário um grande aumento da sucção para a retirada de uma pequena quantidade de água no solo.

Outras características importantes da curva de retenção são relativas a valores de sucção, sendo que uma delas é a sucção de entrada de ar, e ela identifica o momento em que o ar começa a preencher os maiores poros formados pelo meio (Fredlund e Xing, 1994).

Na Figura 4.7 a inclinação da reta média da curva de retenção fornece o valor da capacidade de sucção $C = \Delta\theta/\Delta\psi$. Este parâmetro é utilizado na elaboração de modelos de ajuste de equações à curva de retenção (Marinho, 1994).

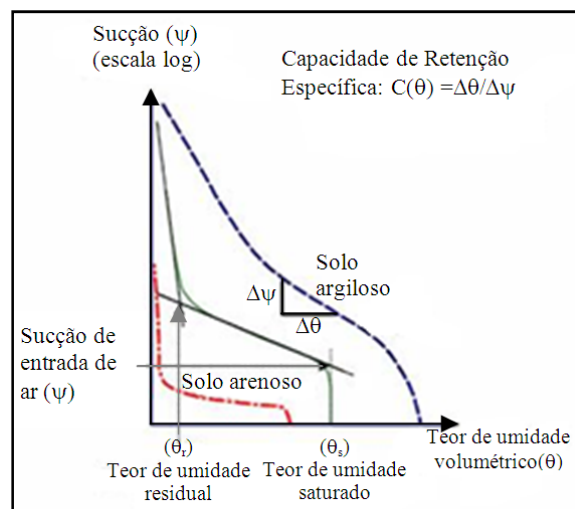


Figura 4.7. Curva de retenção característica.

4.3.2.3 MÉTODO DO PAPEL FILTRO

Atualmente existem muitos métodos de medição da sucção, que podem se dividir em duas categorias. O primeiro é de medição direta da sucção e utilizam instrumentos que medem a quantidade de energia da água nos poros. Outra categoria é a medição indireta onde se mede a umidade relativa e se relaciona a sucção atuante por meio de uma calibração.

Para ambas as categorias existem vários métodos que podem ser utilizados tanto para a medição da sucção total como para medição da sucção matricial. O presente trabalho irá utilizar o “Método do Papel Filtro”. O método do papel filtro, regido pela norma da ASTM (ASTM D 5298-03) baseia-se no princípio de que o papel entra em equilíbrio com o solo por meio do fluxo de vapor (sucção osmótica) ou do fluxo de líquido (sucção matricial). Para este ensaio é importante se manter um tempo de equilíbrio entre solo e papel. Segundo Marinho (1997) o tempo de sete dias é o suficiente para o equilíbrio para medições de sucção matricial, ou seja, quando o papel está em contato com o solo, e para medições totais, este tempo depende dos níveis de sucção. Maiores informações sobre este tipo de medição podem ser encontradas em Marinho (1997). Outros fatores podem influenciar no método do papel filtro tais como variação de temperatura, o fato de se exigir medições muito precisas do papel filtro e a variação muito rápida da umidade do papel filtro após ser retirado do recipiente em que está em contato com o solo.

Esta etapa da pesquisa tem como objetivo determinar a relação entre a sucção e os teores de umidade do minério de ferro de Carajás. Para isto, foi proposta a avaliação do desenvolvimento da sucção e da capacidade de retenção, seguindo as diferentes trajetórias, por meio da determinação da curva de retenção de água matricial do minério de Carajás, tanto da sua fração Pellet, como da fração Sinter.

As amostras de minério, tanto do grupo pellet quanto do grupo sinter feed, foram moldadas em laboratório procurando reproduzir suas densidades e umidades de campo fornecidas pela Vale, observando que como estes valores são valores médios, estes podem variar de pilha para pilha ou até mesmo dentro da mesma pilha de acordo com a profundidade.

A primeira tentativa para se obter a densidade desejada foi a compactação das amostras usando a energia de Proctor Normal com o martelo tipo Marshall. Foram compactadas 22 amostras (Figura 4.8), que correspondiam a uma curva para o PFCJ e outra para o SFCJ.

Como o SFCJ é um material de granulometria mais grossa, a amostra obtida não foi satisfatória, pois esta se desagregava facilmente ao ser manuseada.



Figura 4.8. Detalhe da compactação realizada com martelo Marshall.

Decidiu-se então, usar a técnica do pisoteamento, por se julgar a maneira mais aproximada para reproduzir o que realmente acontece em campo, onde as camadas inferiores das pilhas de minério são comprimidas pelas camadas superiores. O pisoteamento foi realizado após ter sido desenvolvido um moldador (Figura 4.9), onde foram inseridos anéis de PVC, dentro dos quais as amostras permaneceriam, facilitando o manuseio.

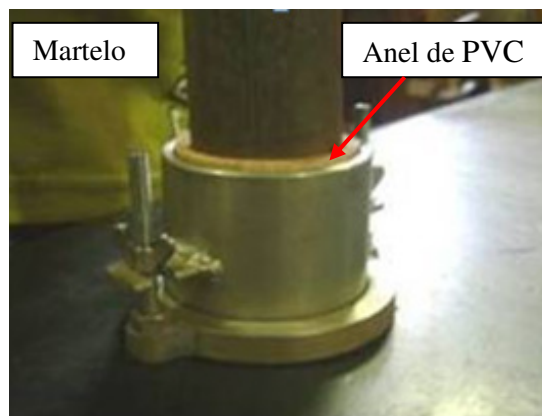


Figura 4.9. Moldador projetado para o ensaio.

Inicialmente foram feitos testes de saturação do minério seguindo uma trajetória de umedecimento por capilaridade. Cada corpo de prova possui um grau de saturação estipulado de 0 a 100%, ou seja, foram moldados, para cada curva característica de sucção, 11 corpos de prova. Durante a fase de testes, o minério apresentou alguns problemas essencialmente devido à falta de coesão. No processo de saturação, com a elevação do teor de umidade, as amostras se deformavam até o ponto de se tornarem sem forma e já não era possível manuseá-las. Isso acontecia a partir do grau de saturação de 50%, como pode ser observado na Figura 4.10.



Figura 4.10. Deformação e perda de consistência das amostras com saturação elevada.

O objetivo destes ensaios foi a obtenção de três curvas características: a trajetória de umedecimento, secagem e a curva intermediária a partir dos dados de densidade e umidade de campo apresentados anteriormente. Foram moldados 11 corpos de prova para cada curva descrita, para os dois tipos de minério, PFCJ e SFCJ, totalizando 66 amostras.

Na trajetória de secagem, as amostras foram inicialmente saturadas depois expostas à secagem. Ao atingirem o grau de saturação desejado eram colocadas em contato com o papel filtro, embaladas (Figura 4.11) e armazenadas em caixas de isopor em câmara úmida para se evitar as flutuações de umidade e temperatura.

Para obtenção da trajetória de umedecimento, acrescentou-se a quantidade de água necessária às amostras inicialmente com umidade higroscópica até se atingir umidade desejada. Da mesma forma como descrito anteriormente, foram embaladas e armazenadas em local adequado por dois dias, só então, após esse período, foram colocadas em contato com o papel filtro e retornaram à câmara úmida.

Na curva intermediária foram feitas dez amostras, sendo 5 preparadas como na trajetória de umedecimento e 5 como na trajetória de secagem, seguindo-se o mesmo critério supracitado, salvo que, o teor de umidade inicial destas foi o medido em campo. Sendo assim, ora eram umedecidas, ora eram colocadas para secar, dependendo do processo pretendido.



Figura 4.11. Corpo de prova embalado com filme de PVC e papel alumínio.

Após o período de equilíbrio da umidade das amostras, que foi de 10 dias, as amostras foram desmontadas e determinadas sua massa total e volume, para definição dos seus índices físicos neste momento. De posse dos resultados, foram plotados gráficos relacionando-os. Caso fossem identificados pontos muito fora da relação obtida, estes pontos eram descartados.

4.4 ENSAIOS DE FILTRAÇÃO DO TIPO RAZÃO ENTRE GRADIENTES

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

Quando no desempenho da função drenagem, os geossintéticos apresentam elevada capacidade de escoamento, o que, no entanto, pode variar significativamente dependendo das tensões confinantes de compressão a que estiverem sujeitos na obra (Aguiar & Vertematti, 2004).

O equipamento de GR da UnB, descrito em detalhes em Gardoni (2000) (Figura 4.12), foi desenvolvido para avaliar o efeito de elevados níveis de carregamento no comportamento em filtração de conjuntos solo-geossintético. Gardoni (2000), Bessa da Luz (2004) e Beirigo (2005) realizaram diversos ensaios com este equipamento, inclusive com variados conjuntos rejeito-geotêxtil. Com o objetivo de verificar também o efeito da variação imediata do gradiente hidráulico aplicado ao sistema, Beirigo (2005) realizou algumas adaptações no equipamento que foram mantidas nesta pesquisa: o quadro de leituras piezométricas foi substituído por outro de altura 60 cm maior; foi adaptado um dispositivo de variação controlada do nível piezométrico de saída do fluido passante pelo corpo de provas; e o reservatório de abastecimento direto do corpo de provas, foi elevado em 40 cm. A Figura 4.13 identifica os diferentes componentes do equipamento.

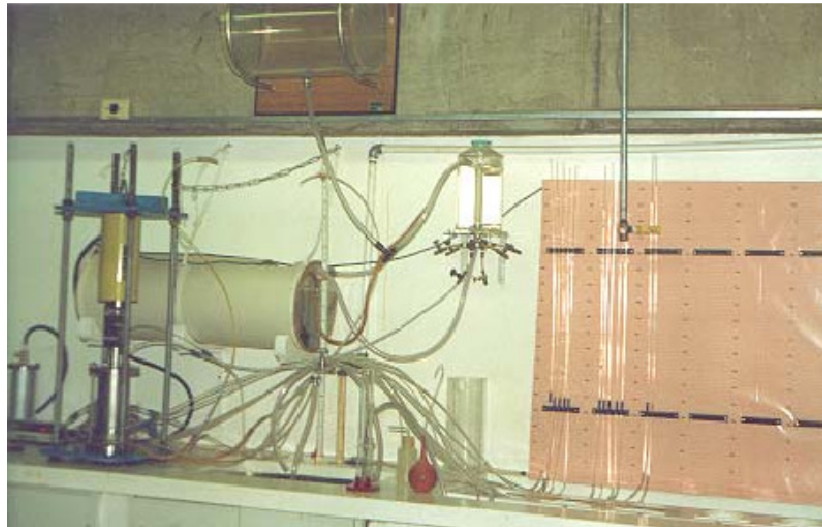


Figura 4.12. Vista geral do equipamento de ensaios de filtração tipo razão entre gradientes (Gardoni, 2000).

Esse ensaio foi realizado para avaliar o efeito do carregamento no comportamento em filtração de conjuntos minério-geossintético, submetidos a vários gradientes hidráulicos.

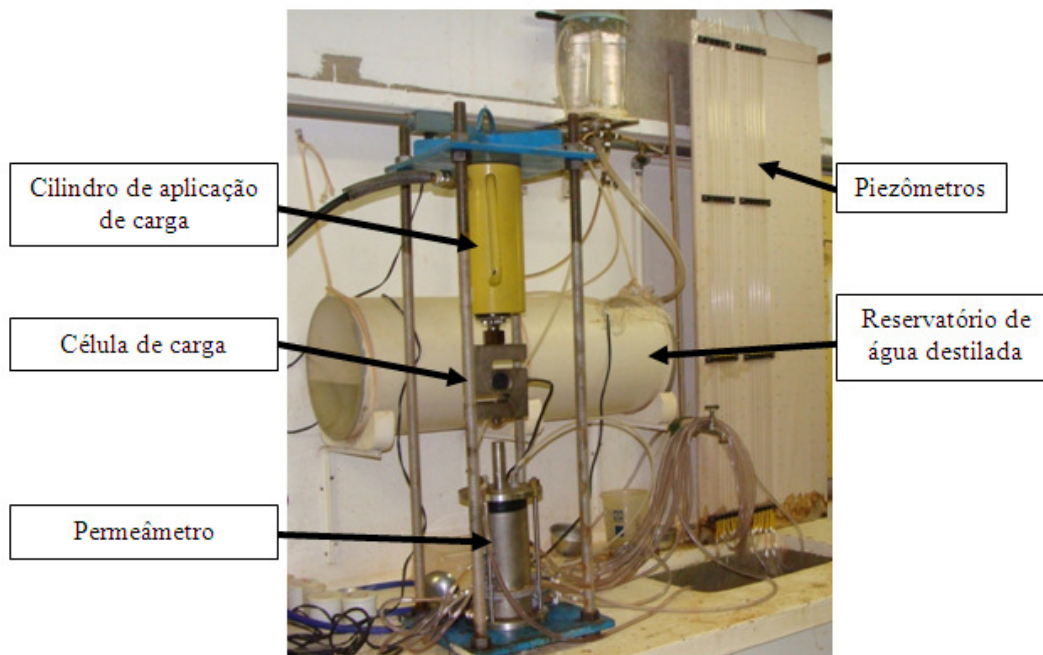


Figura 4.13. Equipamento para ensaios de GR utilizado nesta pesquisa.

No ensaio de GR, o nível de colmatção do geotêxtil é obtido a partir da medida de gradientes hidráulicos em diferentes regiões do sistema solo-geotêxtil. A Figura 4.14 apresenta as posições dos piezômetros na célula de ensaio, a partir dos quais é possível a obtenção de cargas hidráulicas em diferentes pontos. O ensaio permite a avaliação do efeito da variação do gradiente hidráulico e do nível de tensões no comportamento dos materiais ensaiados.

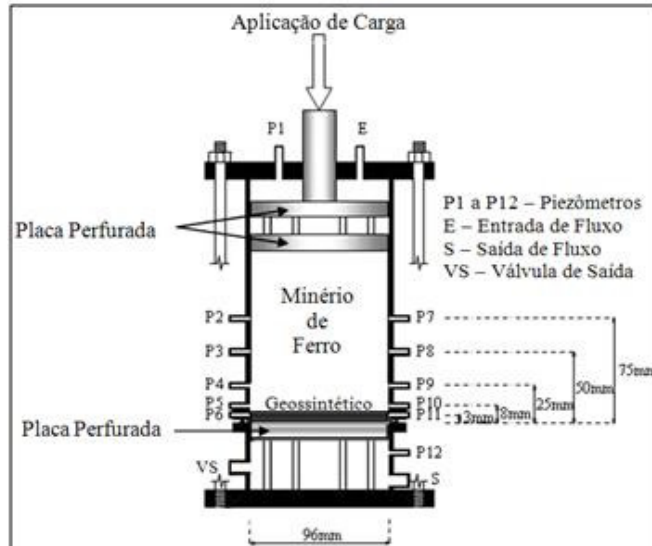


Figura 4.14. Esquema do permeâmetro do ensaio de GR (Modificado - Gardoni, 2000).

Atualmente, existem três metodologias para a obtenção do valor de GR, as quais se diferenciam pelos piezômetros onde os gradientes hidráulicos são medidos. A Equação 3 é proposta pela norma da ASTM (1991), denomina-se GR_{ASTM} , e onde as leituras são feitas nos piezômetros P7, P9 e P12, sendo que: $i_{9/12}$ é o gradiente hidráulico entre os piezômetros (P9 e P12) localizados na interface minério-geotêxtil, na região com 25mm de espessura englobando solo e geotêxtil; e $i_{7/9}$ é o gradiente hidráulico na amostra do solo ensaiado, medido entre os piezômetros P7 e P9 (Figura 4.14).

$$GR_{ASTM(1991)} = \frac{i_{9/12}}{i_{7/9}} \quad (3)$$

A equação 4 foi proposta por Fannin et. al (1994), sendo denominada de GR modificado (GR_{Mod}) onde as leituras são feitas nos piezômetros P7, P10 e P12, em que: $i_{10/12}$ é o gradiente hidráulico entre os piezômetros P10 e P12 (Figura 4.14) localizados na interface minério-geotêxtil a 8mm da face do geotêxtil.

$$GR_{Mod} = \frac{i_{10/12}}{i_{7/9}} \quad (4)$$

A equação 5 foi proposta por Gardoni (2000) (GR_{3mm}), onde as leituras são feitas nos piezômetros P7, P11 e P12 em que: $i_{11/12}$ é o gradiente hidráulico entre os piezômetros P11 e P12 (Figura 4.14) localizados, sendo P11 sendo localizado mais próximo à interface minério-geotêxtil, a 3mm da face do geotêxtil.

$$GR_{3mm} = \frac{i_{1/12}}{i_{7/9}} \quad (5)$$

Valores elevados de GR podem indicar colmatção do sistema, enquanto valores muito baixos podem indicar a ocorrência de piping. Segundo a norma ASTM (ASTM D 4491, 2001) um 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 colmatção significativa do geotêxtil ou incompatibilidade entre o solo e o filtro geotêxtil utilizado. Além da condutividade hidráulica, o acompanhamento da variação da vazão pode auxiliar na avaliação do desempenho do filtro no caso de obtenção de valores de GR elevados (BEIRIGO et al, 2006).

Com o objetivo de avaliar o comportamento minério-geossintético em condições de filtração em laboratório, foram utilizados dois tipos de geotêxteis não-tecidos, dois tipos de geocompostos drenantes e dois tipos de minério de ferro com granulometrias diferentes, cujas propriedades foram citadas anteriormente.

O ensaio de filtração de GR consiste, originalmente, em dispor a amostra de geotêxtil na base do permeâmetro seguido da amostra de solo, sobre a qual será aplicado o carregamento. Tanto a colocação do geossintético quanto a do solo, ou minério de ferro no caso, merecem atenção especial para um desempenho apropriado do ensaio. A amostra de geossintético a ser utilizada deve ser previamente saturada e esta condição deve ser mantida durante todos os processos de montagem e realização do ensaio. No caso do minério, além da saturação, também deve ser garantida a sua homogeneidade durante a montagem do corpo de provas. Com esta expectativa adotou-se a metodologia proposta por Shi (1993), cujo método de preparação da amostra depende do coeficiente de não uniformidade do solo (C_u), em que, conhecendo-se o C_u do minério, emprega-se o processo de deposição por pluviamento (para $C_u < 2$) ou como lama (para $C_u > 2$). Como neste trabalho todas as amostras ensaiadas apresentaram $C_u > 2$, foi utilizado o procedimento de deposição da mistura de minério e água destilada no permeâmetro na forma de lama. Durante a preparação da amostra, é possível controlar a densidade do corpo de provas, com base no peso específico dos grãos (γ_s), nos índices de vazios máximo e mínimo ($e_{máx}$ e $e_{mín}$) da amostra de minério de ferro utilizada e na sua altura dentro do permeâmetro.

Assim, o procedimento completo de montagem e condução do ensaio de GR consistiu em:

a) Selecionar uma amostra de geossintético (Figura 4.15) de gramatura equivalente à média encontrada nos estudos de amostragem e distribuição espacial aparente uniforme das fibras, e recortar um círculo de diâmetro aproximado de 10,0 cm, equivalente ao diâmetro do permeâmetro;



Figura 4.15. Amostra de geossintético - geotêxtil não-tecido.

b) Saturar esta amostra de geossintético com jateamento de água, deixando-a mergulhada em água destilada sob vácuo por 24 horas;

c) Misturar aproximadamente 5 kg do minério a ser ensaiado em uma porção de água destilada que permita fervê-lo para obter a sua completa saturação. Após definir a sua massa e volume total, esta mistura de água e minério denominada de A1 foi deixada reservada por 24 horas, sendo misturada algumas vezes, para retirada de bolhas de ar oclusas.

d) Montar a parte inferior do permeâmetro e submergí-la no vasilhame plástico, cheio de água destilada, até o seu recobrimento por uma lâmina de aproximadamente 0,5 cm de água (Figura 4.16);



Figura 4.16. Parte inferior do permeâmetro submersa em água destilada.

e) Colocar a amostra de geotêxtil saturada, submersa, sobre a placa perfurada da parte inferior do permeâmetro (Figura 4.17);



Figura 4.17. Geotêxtil sobre placa perfurada.

f) Colocar pequenas buchas de fibras de geotêxteis desfiados, nas entradas dos piezômetros, pelo lado externo da parte superior do permeâmetro para evitar a saída de partículas (Figura 4.18);



Figura 4.18. Colocação das buchas de geotêxtil nas saídas dos piezômetros.

g) Lubrificar a parte interna do permeâmetro com graxa automotiva e em seguida recobrir com um filme plástico, exceto na região de conexão dos piezômetros. A parte superior do permeâmetro foi, então, conectada à parte inferior, que continha a amostra de geotêxtil saturada, com auxílio de prendedores do tipo grampo em C (Figura 4.19);

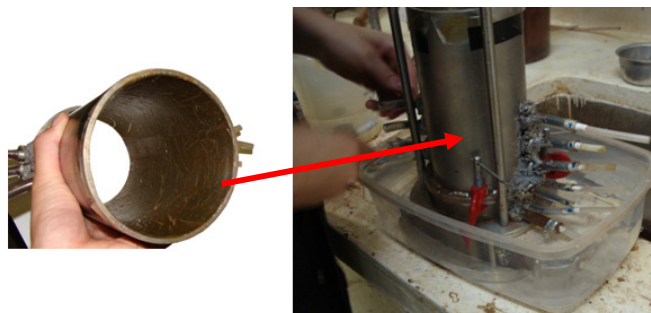


Figura 4.19. Parte superior do permeâmetro com filme plástico, conectada a parte inferior do permeâmetro.

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

i) Depositar, com auxílio de uma pequena concha, a mistura de minério e água destilada, previamente saturada e homogeneizada, cuidadosamente sobre a amostra de geotêxtil. Esta deposição seguiu até atingir aproximadamente 12 cm no interior do permeâmetro (Figura 4.20). O recipiente que continha a mistura de minério e água foi, com a massa restante de minério em seu interior, preenchido com água destilada até alcançar o volume equivalente ao de A1. A massa desta nova mistura denominada A2 foi anotada;



Figura 4.20. Minério no interior do permeâmetro.

j) Tendo-se optado por moldar corpos de prova com densidade relativa (DR) de 50%, para simular condições mais desfavoráveis para o filtro geotêxtil, foi utilizada a Equação 6 para determinar a altura do corpo de provas (H_{CP}) a ser alcançada no processo de densificação descrito no item abaixo;

$$H_{CP} = \frac{\gamma_s \cdot (M1 - M2) / (\gamma_s - 1)}{(\gamma_d \cdot A)} \quad (6)$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{\{1 - [DR \cdot (e_{\max} - e_{\min})] - e_{\max}\}} \quad (7)$$

Onde γ_d é o peso específico aparente seco do corpo de provas para a densidade relativa (DR) adotada (g/cm^3); γ_s é o peso específico dos grãos do solo (g/cm^3); M1 e M2 são respectivamente as massas das misturas A1 e A2 (g); e A é a área da seção transversal do permeâmetro (cm^2).

k) Densificar a amostra imprimindo uma vibração ao permeâmetro assim montado, por meio de batidas em sua parede lateral, com o auxílio de um martelo de borracha. Este processo de densificação foi conduzido até se alcançar a H_{CP} calculada pela Equação 6;

l) Retirar o excesso de água acumulado na parte superior do corpo de provas e colocar um geotêxtil de gramatura baixa (100 g/m^2) para não haver perda de material após colocação do pistão;

m) Colocar o pistão de aplicação de carga sobre o corpo de provas, tampá-lo e conectar o tubo de entrada de água e o piezômetro P1. Terminar de fechar o permeâmetro (Figura 4.21);

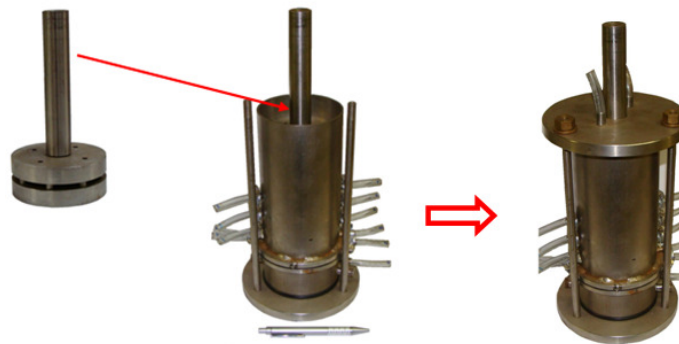


Figura 4.21. Colocação do pistão e fechamento do permeâmetro.

n) Desconectar o tubo de saída e a válvula de saída da parte inferior do permeâmetro e verificar se houve partículas passantes pelo geotêxtil, durante a moldagem do corpo de provas;

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

p) Conectar os piezômetros P2 a P12 (Figura 4.14), previamente preenchidos com água deaerada;

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

r) Iniciar a aplicação de fluxo por meio do tubo de entrada e observar a ocorrência de bolhas de ar nos piezômetros P1 a P12, no tubo da saída e no próprio tubo de entrada. Quando não foram encontradas bolhas realizou-se o controle da vazão pelo tubo de saída e se acompanhou as cargas hidráulicas nos piezômetros P1 a P12;

s) Quando a vazão e as cargas hidráulicas se mostraram estáveis o sistema foi dado como estabilizado. Posteriormente, variando a altura do tubo de saída foram aplicados quatro estágios de gradientes hidráulicos, 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 500 kPa, 1000 kPa, 1500 kPa e 2000 kPa.

Durante o ensaio verificou-se que o volume de partículas coletado da parte inferior do permeâmetro em cada estágio do ensaio não foi suficiente para a realização da granulometria. As amostras de geotêxtil oriundas de cada ensaio de GR foram secas ao ar e analisadas com uso da lupa.

4.5 ENSAIOS ESPECIAIS DE REDUÇÃO DA UMIDADE DO MINÉRIO DE FERRO

Foram realizados também ensaios onde se observou a redução da umidade do minério de ferro com e sem aplicação de vácuo.

4.5.1 ENSAIO ESPECIAL DE REDUÇÃO DA UMIDADE DO MINÉRIO DE FERRO COM APLICAÇÃO DE VÁCUO

Nos ensaios especiais de redução de umidade, a preparação da amostra do minério e do geossintético ensaiados foi a mesma utilizada no ensaio de filtração do tipo razão entre gradientes descritos no item anterior.

O permeâmetro utilizado foi o mesmo do ensaio de GR, salvo que as saídas dos piezômetros de P2 a P12 foram mantidas fechadas (Figura 4.14), não sendo necessário, portanto, tomar a precaução descrita na letra g) do item 4.4 de não cobrir as saídas dos piezômetros.

A colocação do material no interior do permeâmetro foi realizada seguindo-se o mesmo procedimento do ensaio de filtração do tipo GR descritos nas letras de a) a l) do item 4.4, com exceção do descrito na letra f). Como as saídas dos piezômetros foram mantidas vedadas durante todo o ensaio, não foi necessário colocar as buchas de geotêxtil.

Após fechamento do permeâmetro iniciou-se a aplicação de fluxo mantendo somente a válvula de saída aberta. Este fluxo foi realizado com o objetivo de manter a amostra de minério saturada. Aplicava-se então, um carregamento de 2000 kPa.

Ao ser verificado que a vazão de saída se manteve constante com o carregamento aplicado, o fluxo foi interrompido e os dois orifícios superiores, onde se conectam o P1 e o tubo de entrada de água, foram abertos (saídas superiores – Figura 4.22).

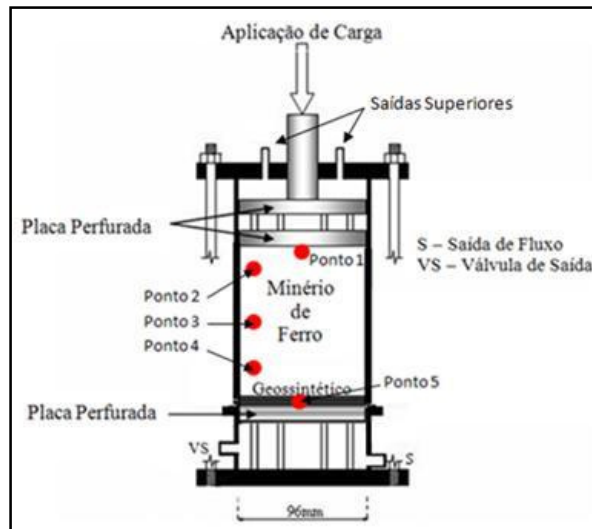
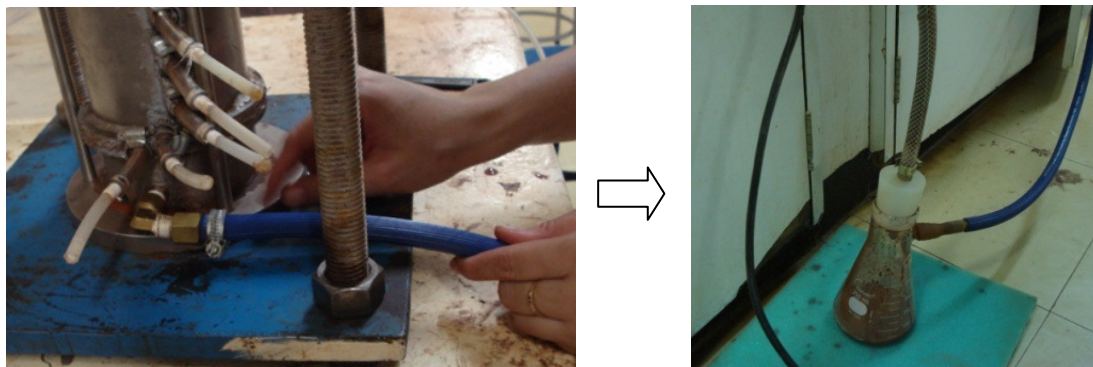


Figura 4.22. Esquema do equipamento utilizado nos ensaios especiais de redução de umidade.

Quando a vazão de saída cessou, foi conectada uma mangueira ao permeâmetro, e essa a um balão kitassato, recipiente utilizado no processo de filtração. Este era então conectado por outra mangueira a uma bomba de vácuo (Figura 4.23).

A bomba de vácuo utilizada tinha capacidade de sucção de até 780 mmHg, o que equivale a aproximadamente 104 kPa. Esta bomba, permite-se controlar a sucção máxima que se deseja atingir por meio de uma válvula, (Figura 4.23).



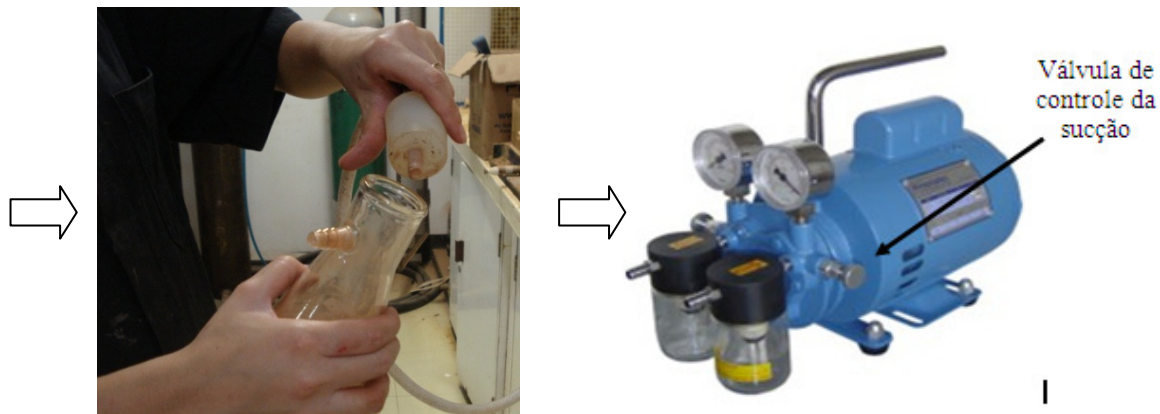


Figura 4.23. Seqüência da conexão do permeâmetro à bomba de vácuo.

A utilização da bomba de vácuo na parte inferior do permeâmetro, abaixo da amostra de geotêxtil, tem a finalidade de sugar a água restante que não escoou na primeira fase do ensaio e verificar a redução de umidade com esse processo.

Quando a vazão de saída cessava, o permeâmetro era desmontado e retiravam-se três espécimes em cinco regiões diferentes da amostra, para determinação da umidade ao final do ensaio. As amostras foram retiradas nas regiões dos pontos 1 e 5, topo e base da amostra, e pontos 2, 3 e 4, a aproximadamente 75, 50 e 25 mm da base do permeâmetro, respectivamente (Figura 4.22).

4.5.2 ENSAIO ESPECIAL DE REDUÇÃO DA UMIDADE DO MINÉRIO DE FERRO SEM APLICAÇÃO DE VÁCUO

Esse ensaio foi realizado com o objetivo de simular a drenagem do minério de ferro apenas sob influência da pressão atmosférica atuante, como ocorre no pátio de estocagem.

O procedimento deste ensaio foi o mesmo realizado no ensaio com aplicação de vácuo do item anterior. A única diferença é que o permeâmetro era desmontado antes da aplicação de vácuo descrita.

Seguiu-se o mesmo procedimento para retiradas das amostras e para determinação da umidade ao final do ensaio.

5. CAPÍTULO 5. RESULTADOS E ANÁLISES

5.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO DO MINÉRIO DE FERRO REALIZADOS NO LABORATÓRIO DE GEOTECNIA DA UnB E CEFTRU

5.1.1 ENSAIOS DE GRANULOMETRIA

A análise granulométrica do minério, como já dito anteriormente, foi realizada utilizando-se normas usuais de laboratórios de geotecnia. Sendo assim, serão mostradas duas classificações em relação ao tamanho das partículas que constituem o minério: uma segundo a ASTM D422-63/02 e outra segundo a NBR 6502/95, descritas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Classificação dos solos segundo a ASTM D422-63/2002 e a NBR 6502/95.

Classificação	Dimensão das partículas de solo em mm	
	ASTM D422-63/2002	NBR 6502/95
Argila	< 0,005	< 0,002
Silte	0,005 a 0,074	0,002 a 0,06
Areia Fina	0,074 a 0,42	0,06 a 0,2
Areia Média	0,42 a 2,0	0,2 a 0,6
Areia Grossa	2,0 a 4,76	0,6 a 2,0
Pedregulho Fino	4,76 a 76,20	2,0 a 6,0
Pedregulho Médio		6,0 a 20
Pedregulho Grosso		20 a 60

No gráfico da Figura 5.2 são apresentadas as curvas granulométricas do minério do tipo pellet feed obtida no ensaio com o granulômetro a laser com e sem ultra-som. No gráfico da Figura 5.2 encontram-se os resultados dos ensaios de análise granulométrica por peneiramento e sedimentação, com e sem a utilização de defloculante. Cabe ressaltar que no ensaio com utilização do granulômetro, é utilizada apenas a parcela que passa na peneira nº 40, com abertura de 0,42 mm. No caso do minério do tipo pellet feed, todas as partículas são passantes na peneira citada, portando representando 100% do minério.

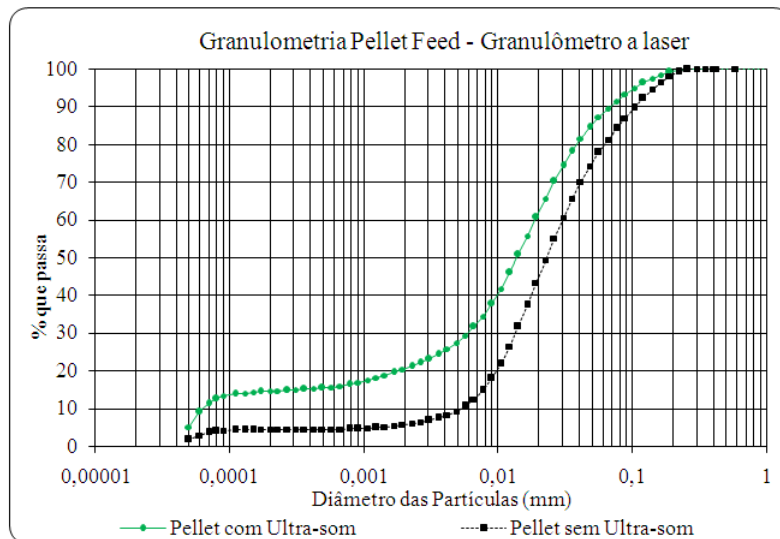


Figura 5.1. Granulometria do Pellet Feed - Granulômetro a laser

Analisando o gráfico da Figura 5.1 se tem a classificação do pellet feed (Tabela 5.2), segundo as normas da ASTM e da ABNT.

Tabela 5.2. Classificação PFCJ pela ASTM e ABNT– Granulômetro.

Classificação	ASTM D422-63/2002		NBR 6502/95	
	c/ultra-som	s/ultra-som	c/ultra-som	s/ultra-som
Argila	27,4%	9,2%	19,1%	5,4%
Silte	64,1%	75,0%	69,0%	73,8%
Areia Fina	8,5%	15,8%	11,3%	19,2%
Areia Média	-	-	0,6%	1,6%
Areia Grossa	-	-	-	-
Pedregulho Fino	-	-	-	-
Pedregulho Médio	-	-	-	-
Pedregulho Grosso	-	-	-	-
Total	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Segundo as duas classificações utilizadas, ASTM e ABNT, o minério do grupo pellet feed possui maior porcentagem de partículas na classe do silte.

No gráfico da Figura 5.2 foram plotados os resultados obtidos no ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação segundo a NBR 7181/84. Da mesma forma como foram analisados os resultados obtidos do ensaio com o granulômetro, as classificações do pellet feed segundo a ASTM e a ABNT são apresentadas na Tabela 5.3, obtidas a partir dos resultados dos ensaios de peneiramento e sedimentação.

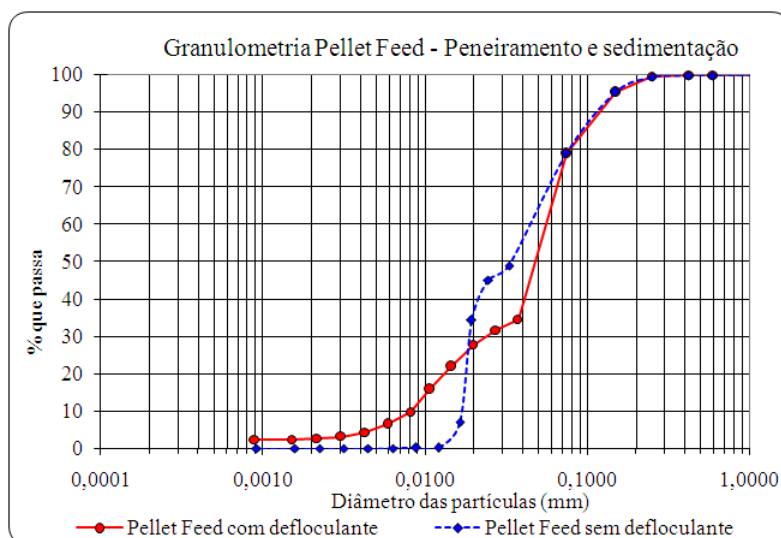


Figura 5.2. Granulometria do Pellet Feed - Peneiramento e sedimentação.

Tabela 5.3. Classificação PFCJ pelas normas ASTM e ABNT- Peneiramento e sedimentação.

Classificação	ASTM D422-63/2002		NBR 6502/95	
	c/defloculante	s/defloculante	c/defloculante	s/defloculante
Argila	5,5%	0,2%	2,9%	0,0%
Silte	73,7%	79,1%	59,2%	68,9%
Areia Fina	20,8%	20,8%	35,5%	28,7%
Areia Média	-	-	2,4%	2,4%
Areia Grossa	-	-	-	-
Pedregulho Fino	-	-	-	-
Pedregulho Médio	-	-	-	-
Pedregulho Grosso	-	-	-	-
Total	100,0%	100,1%	100,0%	100,0%

Analisando os gráficos e tabelas expostos anteriormente, verifica-se que o minério do grupo pellet feed possui a maior porcentagem de suas partículas na classe do silte, verificada nos ensaios com utilização do granulômetro e por peneiramento e sedimentação, tanto na classificação da ASTM quanto na ABNT. Pode-se notar também que a maior partícula classificada pela ASTM foi referente a uma areia fina, enquanto na classificação da ABNT, obteve-se como maior partícula, a classificação de areia média, classificação esta observada nos dois tipos de ensaio.

No gráfico da Figura 5.3 são apresentadas as curvas granulométricas do minério do tipo sinter feed. Neste gráfico foram plotadas quatro curvas, duas obtidas no ensaio de peneiramento e sedimentação, com e sem defloculante e duas unindo-se este resultado com o resultado obtido através do ensaio com o granulômetro a laser, com e sem ultra-som, já que com o granulômetro a laser é utilizada apenas a parcela que passa na peneira nº 40, com abertura de 0,42 mm.

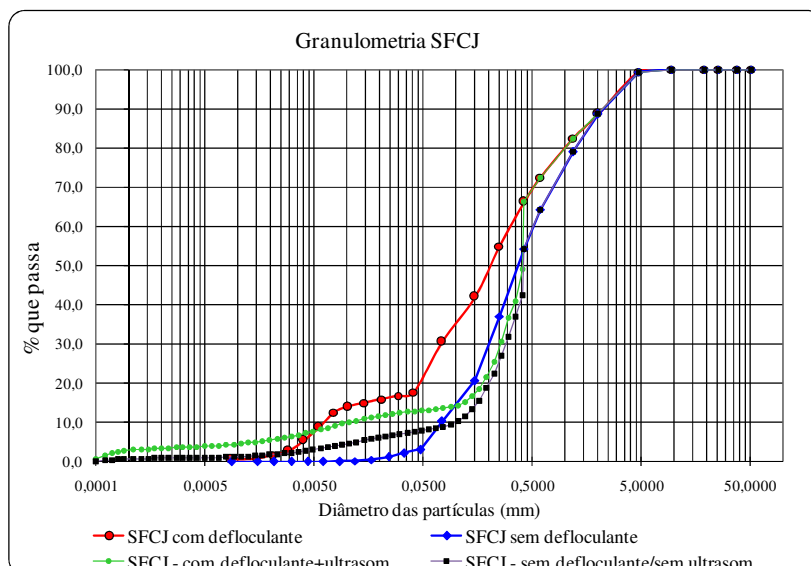


Figura 5.3. Granulometria do Sinter Feed - Granulômetro a laser.

Na Tabela 5.4 têm-se as classificações do sinter feed segundo a ASTM e a ABNT, respectivamente.

Tabela 5.4. Classificação SFCJ - ASTM e ABNT.

Classificação	ASTM D422-63/2002		NBR 6502/95	
	c/ defloculante + ultrassom	sem defloculante/ sem ultrassom	c/ defloculante + ultrassom	sem defloculante/ sem ultrassom
Argila	8%	4%	2%	0%
Silte	11%	12%	23%	7%
Areia fina	49%	41%	23%	22%
Areia média	26%	37%	24%	36%
Areia grossa	6%	6%	16%	24%
Pedregulho fino	0%	0%	11%	11%
Pedregulho médio			0%	0%
Pedregulho Grosso			0%	0%
Total	100%	100%	100%	100%

Segundo a classificação da ASTM, a maior porcentagem das partículas se encontra na classe da areia fina. Já na classificação da ABNT, a maior porcentagem das partículas se encontra na classe da areia média. É observado também que na classificação da ABNT, no ensaio com utilização de defloculante, há uma distribuição quase que homogênea entre as classes do silte, areia fina e areia média. Sendo assim, essa classificação pode variar de ensaio para ensaio.

5.1.2 LIMITES DE CONSISTÊNCIA

Após a realização dos ensaios de limite de liquidez e de plasticidade dos minérios estudados, concluiu-se que se tratam de materiais não plásticos, ou seja, não foi possível a determinação

dos limites de consistência para nenhum dos dois tipos de minério estudados. Este resultado era esperado, devido à distribuição granulométrica dos minérios, onde a porcentagem de finos da fração argila é pequena, principalmente para o minério do tipo sinter feed.

5.1.3 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA

No ensaio de determinação da massa específica, algumas dificuldades foram encontradas para se atender às normas utilizadas no que se refere à aceitação dos resultados. Segundo estas normas, os resultados só são satisfatórios quando não se diferirem mais de 0,02 g/cm³. Como os minérios ensaiados possuem um peso específico elevado, qualquer perda de material durante o ensaio, por mínima que seja, já é suficiente para que não se atenda essa exigência. Foram necessários então, vários ensaios para que os resultados encontrados atendessem às condições da norma.

Nas Tabelas 5.6 e 5.7 apresentam-se os resultados desses ensaios.

Tabela 5.5. Resultados obtidos utilizando-se a norma NBR 6508/84 - material passante na peneira #4,8mm.

Massa Específica-Grãos passados na peneira de 4,8mm	
PFCJ	4,94 g/cm ³
SFCJ	4,95 g/cm ³

Tabela 5.6. Resultados obtidos utilizando-se a norma NBR 6458/84 - material passante e retido na peneira #4,8mm.

SFCJ	Di - Massa Específica dos Grãos	5,01 g/cm ³
	D - Massa Específica Aparente dos Grãos	3,63 g/cm ³
	S - Absorção de água	7,58%
	G - Massa Específica-Grãos passados e retidos na peneira de 4,8mm	4,97 g/cm ³

5.1.4 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIOS MÁXIMO

Para auxílio nos ensaios seguintes foi necessário o conhecimento do índice de vazios máximo dos minérios estudados. O resultado desses ensaios é apresentado na Tabela 5.7.

Tabela 5.7. Índice de vazios máximo das amostras PFCJ e SFCJ.

Amostras	Índice de vazios máximo e_{max}
PFCJ	1,40
SFCJ	1,17

5.1.5 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIOS MÍNIMO

Da mesma forma que o índice de vazios máximo, a determinação do índice de vazios mínimo foi necessária. Os valores encontrados estão apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8. Índice de vazios mínimo das amostras PFCJ e SFCJ.

Amostras	Índice de vazios mínimo e_{min}
PFCJ	0,89
SFCJ	0,85

5.1.6 MICROSCOPIA COM LUPA

A visualização dos geossintéticos com a lupa foi feita antes e depois dos ensaios. Nas Figuras 5.4, 5.5, 5.6, e 5.7 são apresentadas as fotos dos geotêxteis e geocompostos utilizados antes dos ensaios com ampliação de 400 vezes.

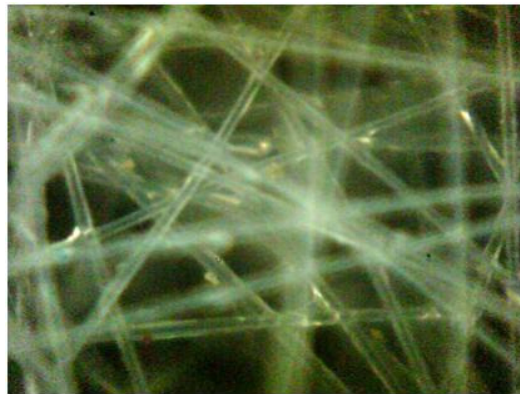


Figura 5.4. Visualização do geotêxtil que compõe o geocomposto com núcleo de geomanta, antes do ensaio.

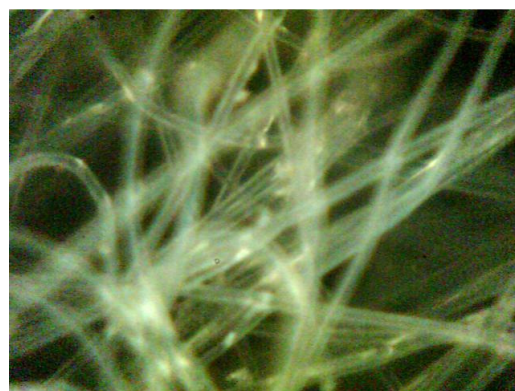


Figura 5.5. Visualização do geotêxtil que compõe o geocomposto com núcleo de georrede, antes do ensaio.

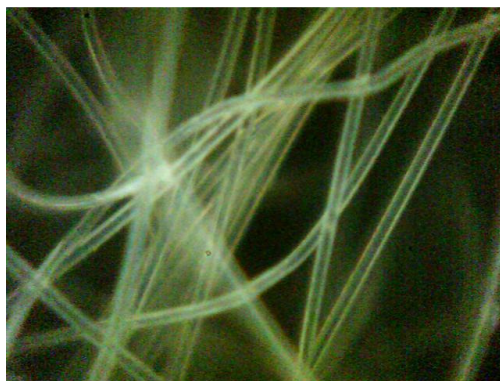


Figura 5.6. Visualização do geotêxtil não tecido de gramatura 400 g/m², antes do ensaio.

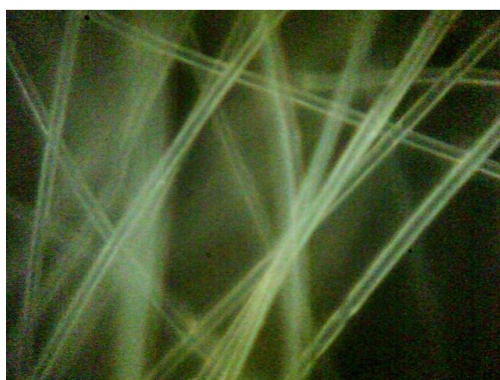


Figura 5.7. Visualização do geotêxtil não tecido de gramatura 600 g/m².

Após os ensaios foram feitas visualizações da face superior do geotêxtil, que fica em contato com o solo e da face inferior do geotêxtil.

Como foi observado que as fotos tiradas de cada material depois dos ensaios apresentaram grande semelhança, mesmo em ensaios com minérios de grupos diferentes, serão apresentadas apenas algumas fotos para se ter uma comparação dos materiais antes e depois dos ensaios.

Nas Figuras 5.8 e 5.9 são apresentadas as fotos do geotêxtil da parte de cima que compõe o geocomposto com núcleo drenante de geomanta, ampliadas 100 vezes e 400 vezes, respectivamente, que mostram certo nível de impregnação por partículas de minério.

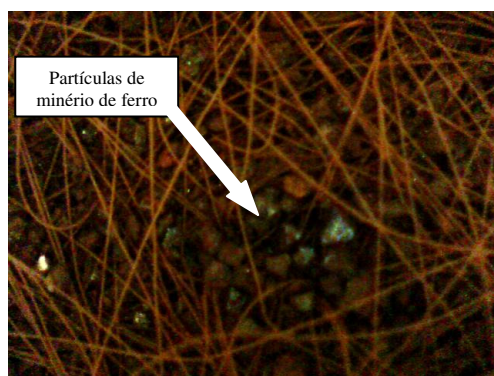


Figura 5.8. Visualização da face superior do geotêxtil que compõe o geocomposto com núcleo de geomanta, ampliada 100 vezes, após os ensaios.

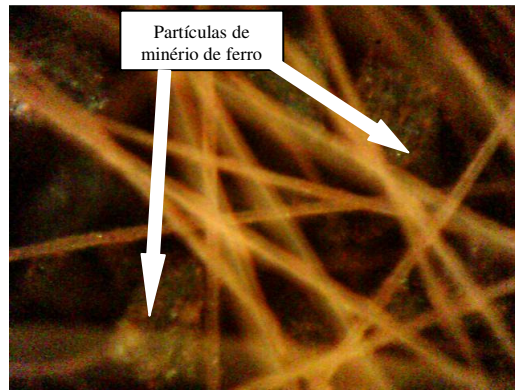


Figura 5.9. Visualização da face superior do geotêxtil que compõe o geocomposto com núcleo de geomanta, ampliada 400 vezes, após o ensaio.

Nas Figuras 5.10 e 5.11 são mostradas as fotos da face inferior do geotêxtil que compõe o geocomposto com núcleo drenante de geomanta, ampliadas 100 vezes e 400 vezes, respectivamente.

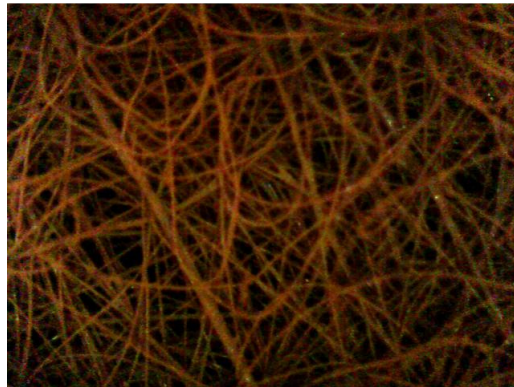


Figura 5.10. Visualização da face inferior do geotêxtil que compõe o geocomposto com núcleo de geomanta, ampliada 100 vezes após o ensaio.

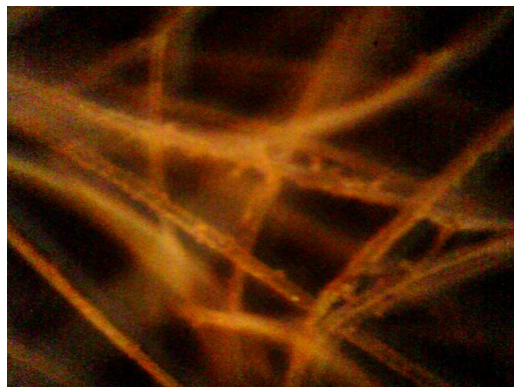


Figura 5.11. Visualização da face inferior do geotêxtil que compõe o geocomposto com núcleo de geomanta, ampliada 400 vezes, após o ensaio.

Na Figura 5.12 é apresentada a foto do geotêxtil que compõe o geocomposto com núcleo drenante de georrede, que fica em contato com o minério durante o ensaio, e na Figura 5.13 é apresentada a foto do geotêxtil da parte de baixo do geocomposto citado, ambas ampliadas em 400 vezes. Nessas fotos é possível também se visualizar partículas aderidas aos filamentos.

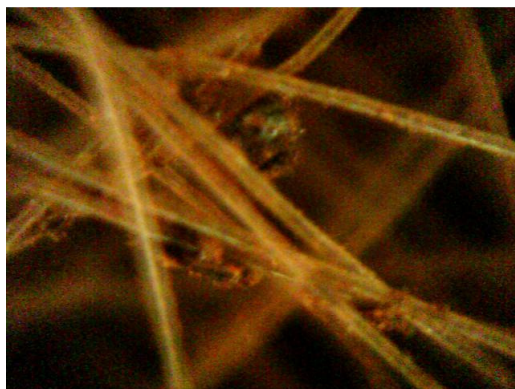


Figura 5.12. Visualização da face superior do geotêxtil que compõe o geocomposto com núcleo de georrede, ampliada 400 vezes, após o ensaio.

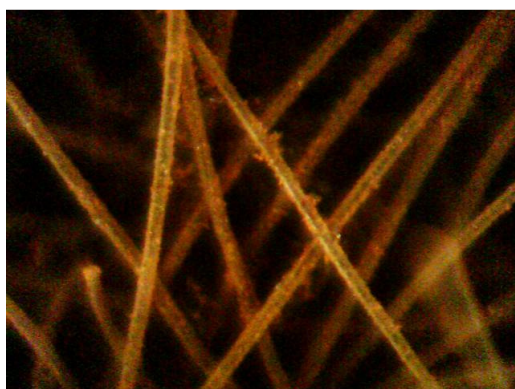


Figura 5.13. Visualização da face inferior do geotêxtil que compõe o geocomposto com núcleo de georrede, ampliada 400 vezes, após o ensaio.

Na Figura 5.14 é apresentada a foto da parte superior do geotêxtil com gramatura igual a 400 g/m² e na Figura 5.15 é apresentada a inferior do geotêxtil.

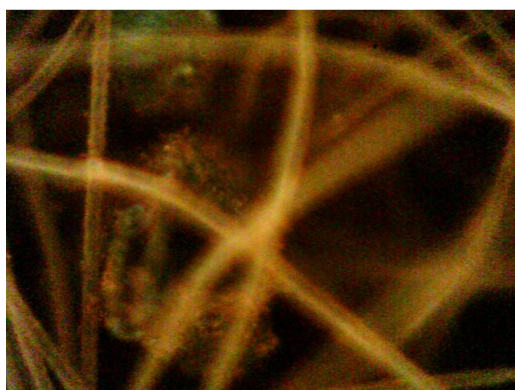


Figura 5.14. Visualização da face superior do geotêxtil de gramatura igual 400 g/m², ampliada 400 vezes, após o ensaio.

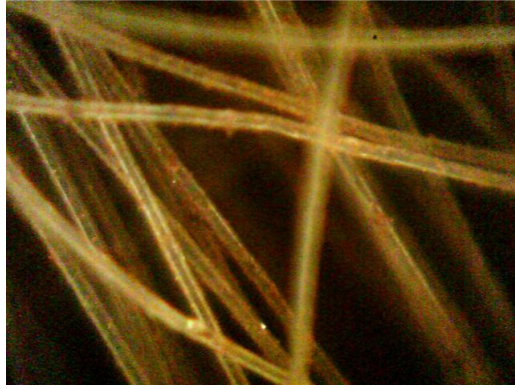


Figura 5.15. Visualização da face inferior do geotêxtil de gramatura igual 400 g/m², ampliada 400 vezes, após o ensaio.

Finalmente, na Figura 5.16 é apresentada a visualização da parte superior do geotêxtil de gramatura igual a 600 g/m², e na Figura 5.17 é apresentada a foto da parte inferior do geotêxtil citado, ampliadas em 400 vezes.



Figura 5.16. Visualização da face superior do geotêxtil de gramatura igual 600 g/m², ampliada 400 vezes, após o ensaio.

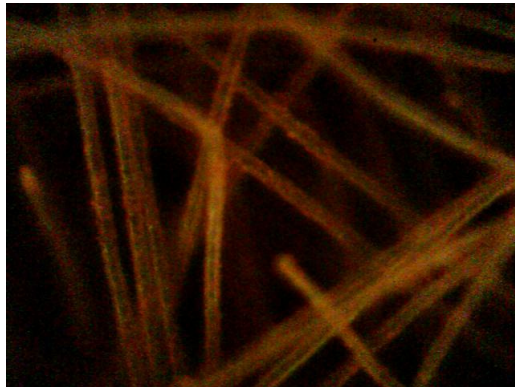


Figura 5.17. Visualização da face inferior do geotêxtil de gramatura igual a 600 g/m², ampliada 400 vezes, após o ensaio.

Analisando as figuras apresentadas, nota-se uma maior quantidade de solo impregnado na parte de cima dos geotêxteis analisados, que fica em contato com o solo ensaiado. Como era esperado, isso foi observado em todas as visualizações realizadas.

5.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO REALIZADOS NO LABORATÓRIO DE GEOTECNIA DA UFMG

5.2.1 ENSAIOS DE PERMEABILIDADE A CARGAS CONSTANTE E VARIÁVEL

Foram realizados ensaios de permeabilidade a carga constante e a carga variável de acordo com a granulometria dos grupos de minério.

Para o minério do grupo pellet feed, o ensaio foi a carga variável, por ser um minério com maior porcentagem de finos, e para o minério do tipo sinter feed foi realizado o ensaio de permeabilidade a carga constante por se tratar de um material de granulometria mais grossa. Os valores médios encontrados para os coeficientes de permeabilidade do PFCJ e SFCJ encontram-se na Tabela 5.9.

Tabela 5.9. Coeficiente de permeabilidade dos minérios pellet e sinter feed.

Amostras	Coeficiente de Permeabilidade k (cm/s)
PFCJ	$8,4 \times 10^{-5}$
SFCJ	$3,0 \times 10^{-3}$

5.2.2 DETERMINAÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DO MINÉRIO

A determinação da curva característica do minério foi realizada com o objetivo de entender melhor como é o processo de drenagem e de tentar identificar os fenômenos que regem o comportamento hidráulico do material, durante o seu manuseio, estocagem e transporte. Desta forma, foram realizados os processos de umedecimento, secagem e mista.

As curvas que representam a relação entre a sucção e a umidade do papel filtro foram obtidas pelas Equações 8 e 9, de Chandler et al. (1992), citadas por Marinho (1994).

A Equação 8 é utilizada quando a umidade gravimétrica do papel filtro é menor ou igual a 47% e a Equação 9 é utilizada quando a umidade do papel filtro for maior que 47%.

$$\log S = 4,84 - 0,0622 \cdot w_f, \text{ para } w_f \leq 47\% \quad (8)$$

$$\log S = 6,05 - 2,48 \cdot \log(w_f), \text{ para } w_f > 47\% \quad (9)$$

Onde:

w_f = umidade do papel filtro(%);

S = sucção (kPa)

w_f = umidade gravimétrica (%).

Nos gráficos das Figuras 5.18, 5.19 e 5.20, estão representadas as relações entre a sucção e a umidade do minério do grupo pellet feed nas trajetórias de umedecimento, secagem e mista, respectivamente.

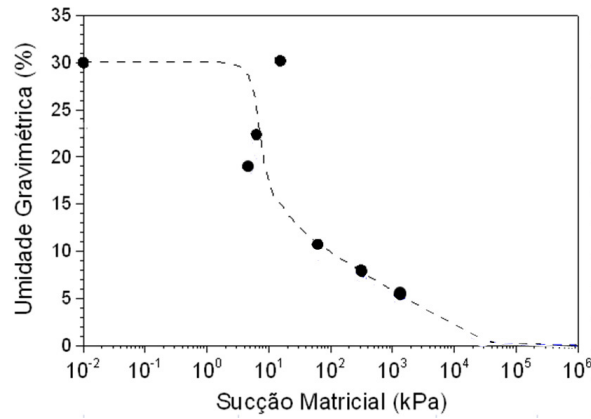


Figura 5.18. Trajetória de umedecimento do pellet feed.

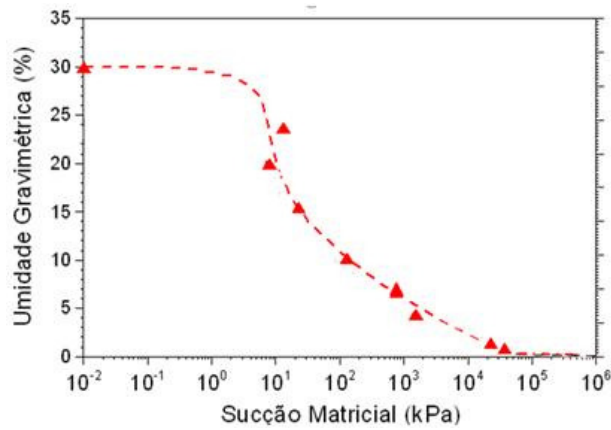


Figura 5.19. Trajetória de secagem do pellet feed.

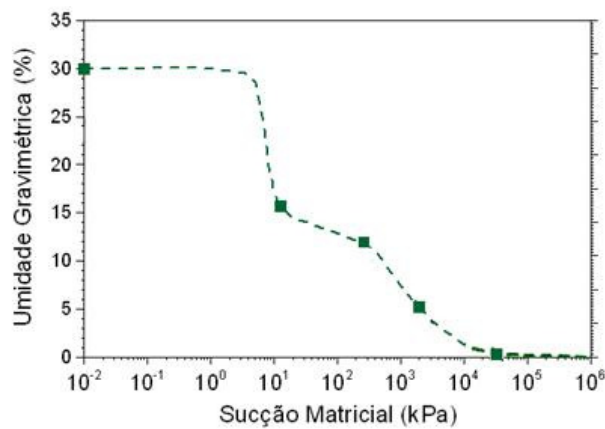


Figura 5.20. Trajetória mista do pellet feed.

Observando-se os gráficos apresentados, percebe-se um comportamento de material com baixa capacidade de retenção num primeiro momento, dessaturando-se rapidamente para valores baixos de sucção, o que é típico para solos silto-arenosos. Em seguida, a curva de retenção muda de inclinação, tornando-se mais suave, indicando que para valores de teor de umidade gravimétrico em torno de 16%, o minério começaria a secar mais lentamente, ou seja, teria mais dificuldade para secar a partir deste teor de umidade. Esse comportamento foi observado nas três trajetórias obtidas, sendo mais evidenciado na trajetória mista. Pode-se observar ainda uma nova mudança de inclinação na trajetória mista em torno de 12%. Isso pode ser melhor visualizado no gráfico da Figura 5.21, onde as três trajetórias são plotadas em um mesmo gráfico.

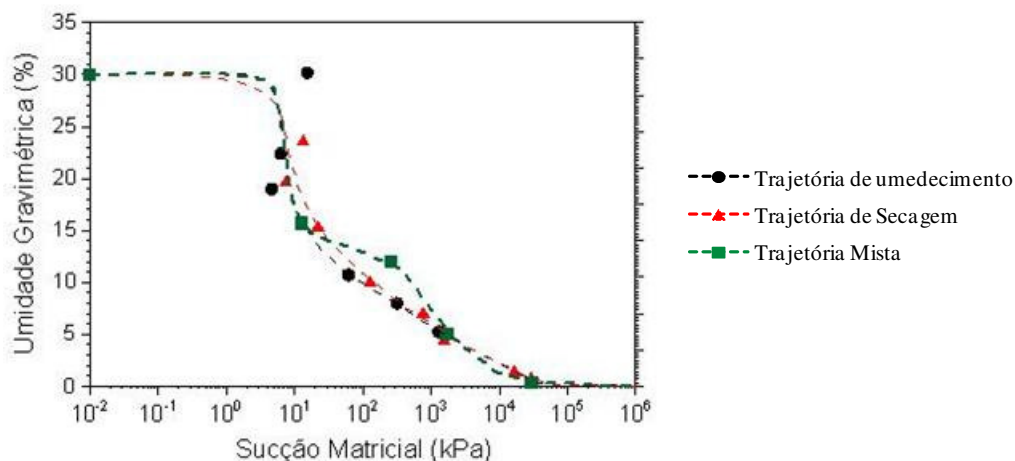


Figura 5.21. Trajetória de umedecimento, secagem e mista do pellet feed.

No gráfico da Figura 5.21 percebe-se um comportamento muito semelhante entre as três trajetórias, não tendo sido identificada nenhuma histerese marcante.

Nos gráficos das Figuras 5.22, 5.23 e 5.24, estão representadas as relações entre a sucção e a umidade do minério do grupo sinter feed, nas trajetórias de umedecimento, secagem e mista, respectivamente.

Observando-se os gráficos percebe-se que o sinter feed apresentou comportamento semelhante ao pellet feed, com baixa capacidade de retenção, dessaturando-se rapidamente para valores baixos de sucção. Em seguida, a curva de retenção muda de inclinação, tornando-se mais suave, indicando que para valores de teor de umidade gravimétrico em torno de 7%, o minério começaria a secar mais lentamente. Esse comportamento foi observado nas três trajetórias obtidas. Observou-se também que na trajetória mista houve uma nova mudança de inclinação em torno de 5%. Isso pode ser melhor visualizado no gráfico da Figura 5.25, onde

as três trajetórias são plotadas em um mesmo gráfico. No gráfico dessa figura percebe-se um comportamento muito semelhante entre as três trajetórias, onde se observa que a histerese novamente não foi marcante.

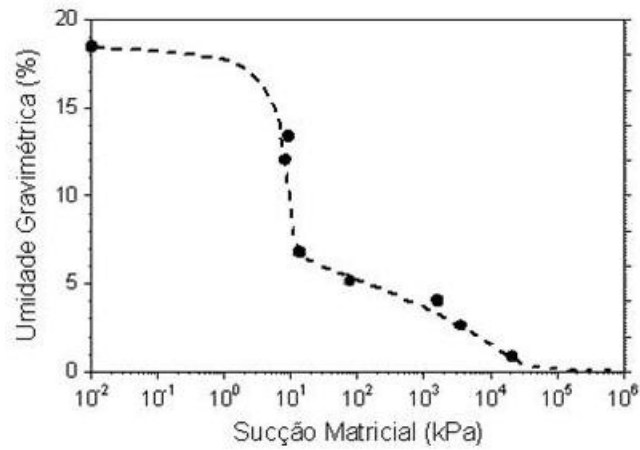


Figura 5.22. Trajetória de umedecimento do sinter feed.

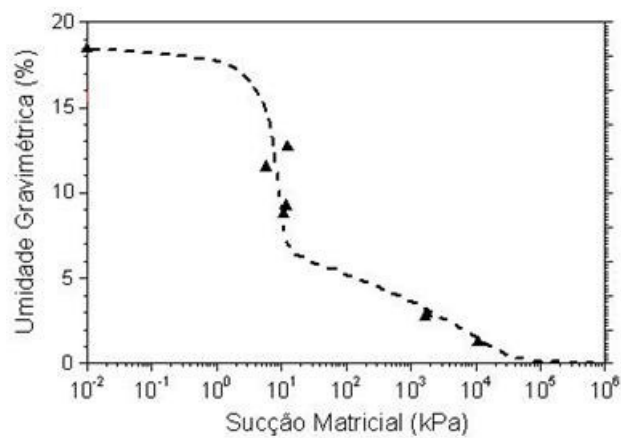


Figura 5.23. Trajetória de secagem do sinter feed.

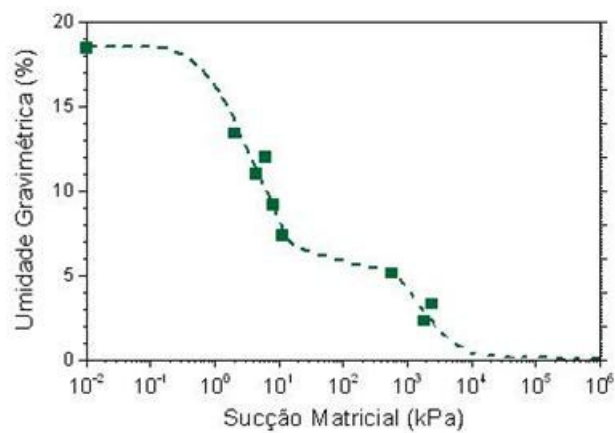


Figura 5.24. Trajetória mista do sinter feed.

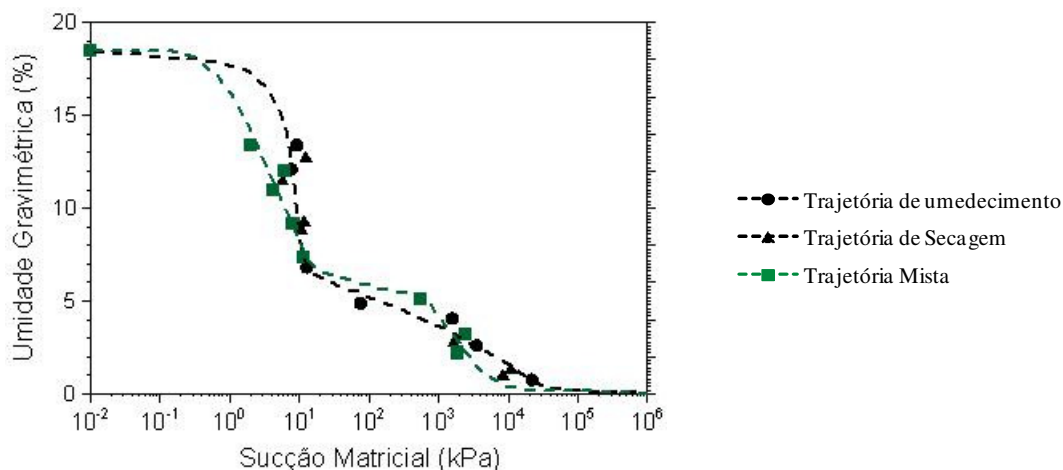


Figura 5.25. Trajetórias de umedecimento, secagem e mista do sinter feed.

5.3 ENSAIOS DE FILTRAÇÃO DO TIPO RAZÃO ENTRE GRADIENTES SOB TENSÃO (GR)

5.3.1 ENSAIO DE GR COM O MINÉRIO DO GRUPO PELLET FEED

Foram realizados ensaios de filtração do tipo razão entre gradientes nos minérios dos dois grupos estudados neste trabalho. Porém, no minério do grupo pellet feed, por esse ser um material muito fino, não foi possível realizar o mesmo procedimento do ensaio de GR que o realizado com o sinter feed, por não haver estabilização do fluxo através do minério em tempo hábil.

A preparação da amostra foi como descrito na metodologia do ensaio, porém, ao realizar a aplicação dos gradientes hidráulicos, para os valores citados de 1, 2,5, 5, 7,5 e 10, o fluxo não ocorreu. Aumentou-se o valor do gradiente hidráulico para 11,2, e somente no último estágio de carregamento (3500 kPa) foi observado a ocorrência de fluxo. Sendo assim, mantendo-se o gradiente hidráulico em 11,2 e a pressão aplicada de 3500 kPa, foram feitas quatro leituras dos piezômetros em intervalos de uma hora, para verificar se ocorreria a estabilização dessas leituras, obtendo-se três valores de GR para cada leitura feita, calculados pelas três metodologias citadas: GR_{ASTM} , GR_{Mod} , GR_{3mm} , apresentados na Tabela 5.10. Esses valores de GR foram obtidos a partir das leituras dos piezômetros P7, P9, P10, P11 e P12 (Figura 4.14), cujo geossintético utilizado foi um geotêxtil não tecido de gramatura aproximada de 400 g/m².

Tabela 5.10. Valores dos gradientes hidráulicos do ensaio GAPF.

i	Leituras	GR _{ASTM}	GR _{MOD}	GR _{3mm}
11,2	1	0,81	0,34	0,27
	2	0,82	0,39	0,28
	3	0,84	0,45	0,30
	4	0,84	0,45	0,30

Analisando a Tabela 5.101, pode-se observar que os valores de GR calculados pelas três metodologias utilizadas chegaram a valores inferiores a um. Segundo a norma ASTM (1991), valores de GR menores que um podem indicar ocorrência de piping na amostra do solo utilizado. Pode-se observar também que os maiores valores de GR foram encontradas pela metodologia proposta por ASTM (1991), sendo tal valor apenas ligeiramente menor que 1.

5.3.2 ENSAIO DE GR COM O MINÉRIO DO GRUPO SINTER FEED

Com o minério do tipo sinter feed foram realizados quatro ensaios de GR, em que os sistemas minério-geossintético descritos na Tabela 5.11 foram submetidos a variados níveis de carregamentos mecânicos e gradientes hidráulicos, como descritos na metodologia. O seu comportamento foi acompanhado por meio de medidas da vazão pelo corpo de prova e da carga piezométrica em diferentes pontos do permeâmetro.

Tabela 5.11. Código e descrição dos sistemas geossintético - SFCJ.

Código	Sistema geossintético - minério de ferro
GASF	Geotêxtil com gramatura de 400 g/m ² combinado com o sinter feed
GBSF	Geotêxtil com gramatura de 600 g/m ² combinado com o sinter feed
GCSF	Geocomposto com núcleo drenante de georrede combinado com o sinter feed
GDSF	Geocomposto com núcleo drenante de geomanta combinado com o sinter feed

Nos gráficos em que os valores dos gradientes hidráulicos são plotados, pode-se observar que o maior gradiente hidráulico aplicado foi de aproximadamente 6, gradiente máximo que foi possível aplicar devido às limitações do equipamento utilizado. Como a vazão do fluxo que permeava o solo era muito alta, não foi possível aplicar gradientes hidráulicos maiores que 6, para esse solo.

Na Figura 5.26 apresentam-se os resultados de GR em função do gradiente hidráulico, e na Figura 5.27 tem-se a variação do GR com a tensão aplicada, calculado a partir das leituras dos piezômetros P7, P9, P10, P11 e P12 (Figura 4.14), para o sistema GASF (Tabela 5.11). No

gráfico da Figura 5.26, a linha preta tracejada refere-se ao valor de gradiente hidráulico em que se iniciou a aplicação de tensões verticais maiores que zero no topo da amostra.

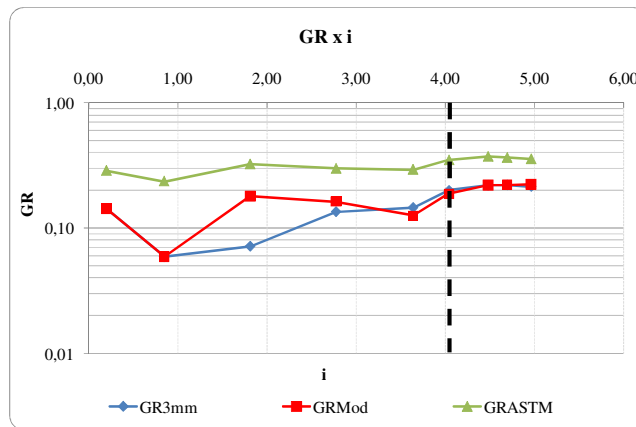


Figura 5.26. GR x i - Sistema GASF

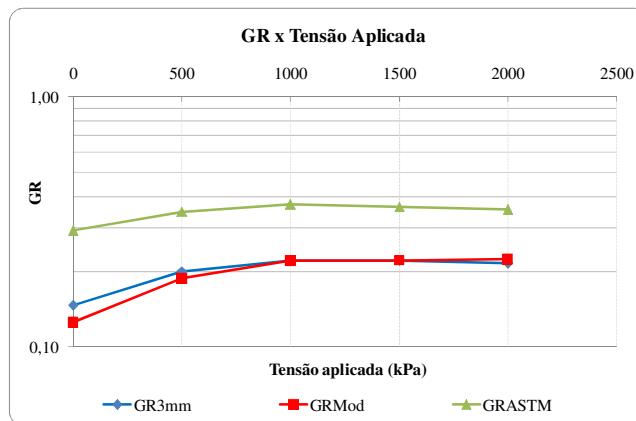


Figura 5.27. GR x Tensão aplicada - sistema GASF

Observando os gráficos das Figuras 5.26 e 5.27 percebe-se que os valores obtidos pela metodologia proposta por ASTM (1991) foram maiores que os encontrados pelas outras duas metodologias ao longo do ensaio. Foi observado também, que o aumento da tensão aplicada teve como consequência valores de GR maiores, porém estes acréscimos não foram significativos. Segunda a norma ASTM (1991), pode ter ocorrido piping na amostra pelos valores de GR serem significativamente menores que um durante todo o ensaio.

Na Figura 5.28 apresentam-se os resultados de GR em função do gradiente hidráulico, e na Figura 5.29 tem-se a variação do gradiente hidráulico em função da tensão aplicada para o sistema GBSF.

Observando os resultados, percebe-se que os valores obtidos pela metodologia proposta por ASTM (1991) novamente foram maiores que os encontrados pelas outras duas metodologias

ao longo do ensaio. Foi observado também, que os maiores valores de GR foram encontrados no início do ensaio, para uma tensão aplicada igual a zero. Como os valores de GR encontrados foram menores que um praticamente em quase todo ensaio, ocorreu algum nível de piping na interface minério-geotêxtil.

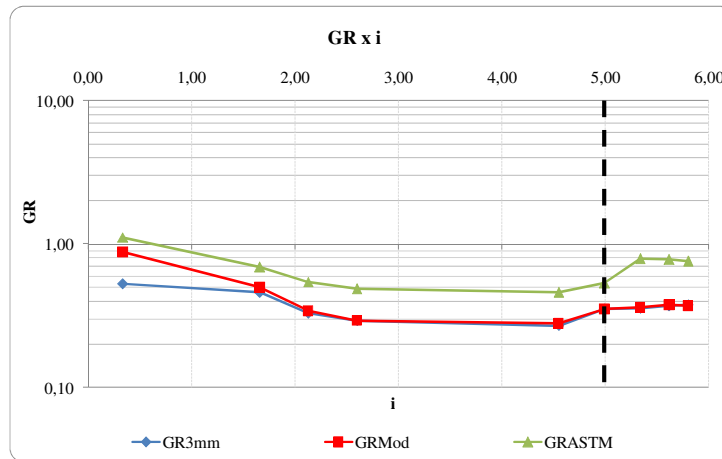


Figura 5.28. GR x i - sistema GBSF.

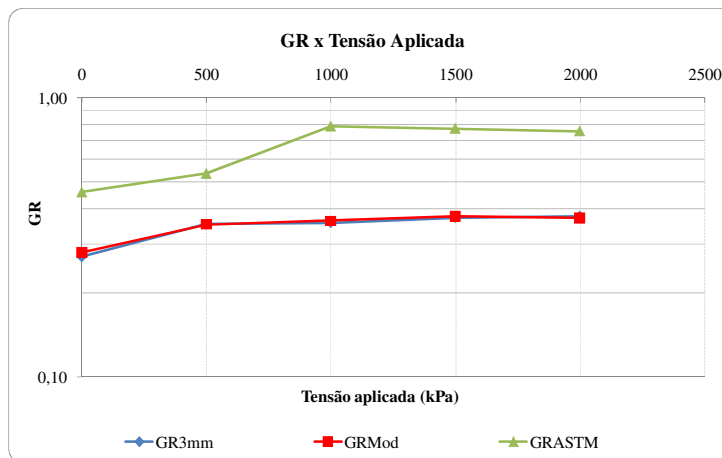


Figura 5.29. GR x Tensão aplicada - sistema GBSF

A Figura 5.30 mostra os resultados de GR em função do gradiente hidráulico, e na Figura 5.31 apresenta-se a variação do gradiente hidráulico em função da tensão aplicada para o sistema GCSF. Percebe-se novamente que os valores obtidos pela metodologia proposta por ASTM (1991) foram maiores que os encontrados pelas outras duas metodologias ao longo do ensaio. Foi observado também, que o maior valor de GR foi encontrado para uma tensão aplicada igual a zero e gradiente hidráulico próximo a 2.

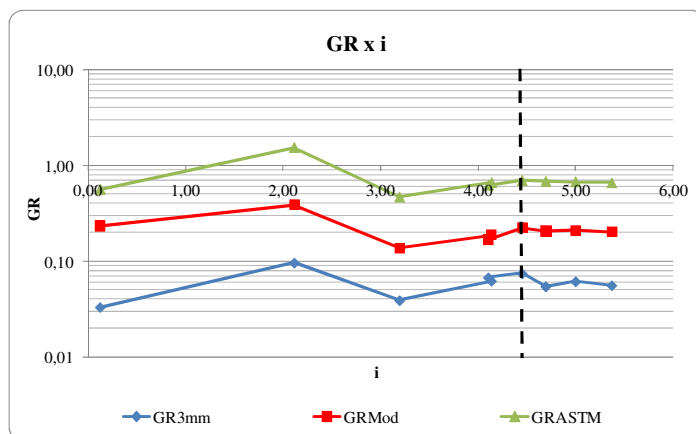


Figura 5.30. GR x i - sistema GCSF.

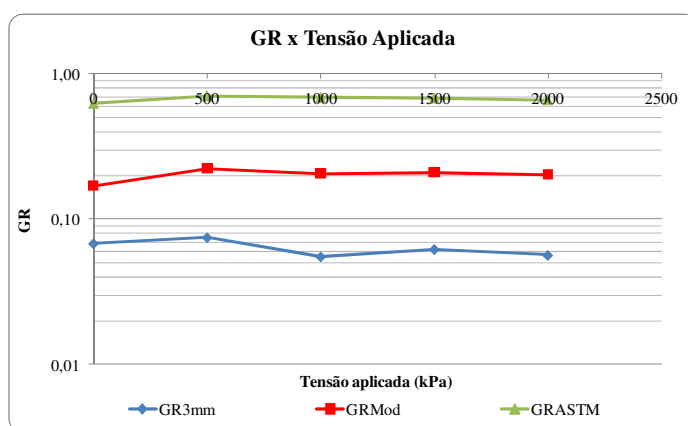


Figura 5.31. GR x Tensão aplicada - sistema GCSF

Na Figura 5.32 apresentam-se os resultados de GR em função do gradiente hidráulico, e na Figura 5.33 a variação do gradiente hidráulico em função da tensão aplicada para o sistema GDSF. Novamente, os maiores valores de GR foram os obtidos pela metodologia da norma ASTM (1991). Há também semelhança com os resultados obtidos com os sistemas GBSF e GCSF, em que os valores de GR são maiores no início do ensaio, em que não há tensão aplicada. Como os valores de GR encontrados pela metodologia da norma ASTM (1991) são próximos a um na maior parte da execução do ensaio, isto significa que o geossintético utilizado não influenciou de forma significativa o regime de fluxo do sistema.

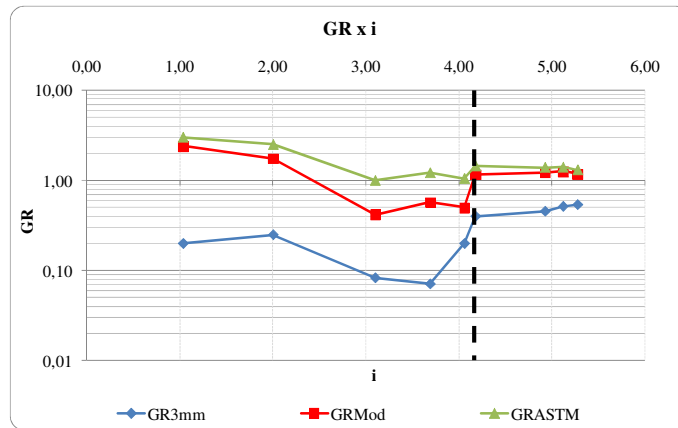


Figura 5.32. GR x i - sistema GDSF.

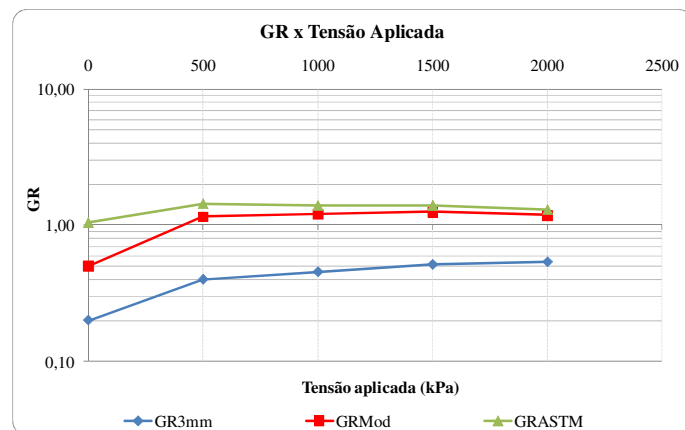


Figura 5.33. GR x Tensão aplicada - sistema GDSF.

5.4 ENSAIOS ESPECIAIS DE REDUÇÃO DA UMIDADE DO MINÉRIO DE FERRO

5.4.1 ENSAIO ESPECIAL DE REDUÇÃO DA UMIDADE DO MINÉRIO DE FERRO DO GRUPO PELLETT FEED

Com o minério do grupo pellet feed foram realizados dois ensaios, ambos com aplicação de vácuo, um com altura do corpo de prova (H_{CP}) de 11,5 cm combinado a um geotêxtil com gramatura de 400g/m² (GAPF1), e outro com o corpo de prova de altura 5,0 cm combinado com um geocomposto drenante com núcleo de georrede (GCPF1), como apresentado na Tabela 5.12.

Tabela 5.12. Código e descrição dos sistemas geossintéticos-PFCJ utilizados nos ensaios de redução de umidade com aplicação de vácuo.

Código	Hcp	Sistema geossintético - minério de ferro
GAPF1	11,5 cm	Geotêxtil com gramatura de 400 g/m ² combinado com o pellet feed, com aplicação de vácuo
GCPF1	5,0 cm	Geocomposto com núcleo drenante de georrede combinado com o pellet feed, com aplicação de vácuo

Os ensaios foram feitos com alturas diferentes, com o objetivo de investigar a influência das dimensões da amostra nos resultados obtidos. A menor umidade obtida para o corpo de prova de 11,5 cm de altura foi de 14,7%, e para o corpo de prova com 5,0 cm de altura, se obteve 15,45% como apresentado na Tabela 5.13, o que mostra que o tamanho da amostra teve pouca relevância.

Tabela 5.13. Umidade do pellet feed ao final dos ensaios.

Código	Hcp	Umidade Final
GAPF1	11,5 cm	14,70%
GCPF1	5,0 cm	15,45%

No gráfico da Figura 5.34 são apresentados os resultados das umidades ao final do ensaio GAPF1, em que o eixo das abscissas representa as regiões de onde foram recolhidas as amostras para a determinação da umidade final, como foi mostrado na Figura 4.22.

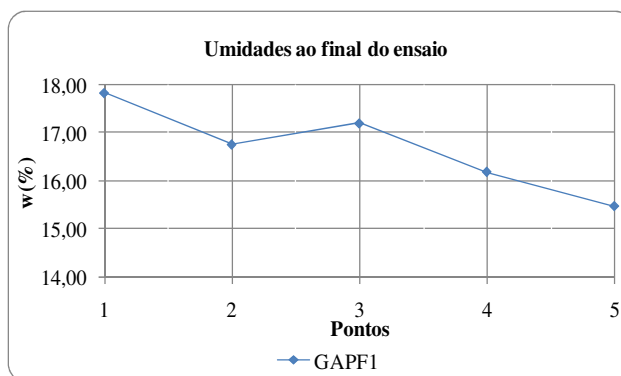


Figura 5.34. Umidade do pellet feed ao final do ensaio GAPF1.

Na Figura 5.3535 estão apresentadas as umidades do ensaio GCPF1. Como nesse ensaio o corpo de prova tinha altura menor que os outros ensaios, as regiões em que as amostras para determinação da umidade foram retiradas foi diferente. Como representado no gráfico da Figura 5.3535, as amostras foram retiradas no topo, no meio do corpo de prova, a aproximadamente 2,5 cm da base, e na base.

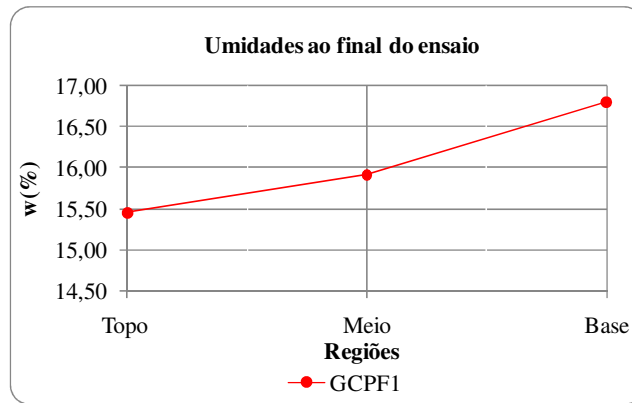


Figura 5.35. Umidade do pellet feed ao final do ensaio GCPF1.

Os valores de umidade encontrados ao final dos ensaios não atenderam os objetivos esperados, por serem umidades superiores às encontradas em campo, que giram em torno de 12%, segundo dados fornecidos pela VALE. Como no ensaio em que foi aplicado vácuo, a umidade encontrada já foi maior que a umidade encontrada em campo, o ensaio sem aplicação de vácuo não foi realizado.

5.4.2 ENSAIO ESPECIAL DE REDUÇÃO DA UMIDADE DO MINÉRIO DE FERRO DO GRUPO SINTER FEED

Com o minério do tipo Sinter Feed foram realizados 13 ensaios, variando-se o tipo de geossintético utilizado. Em alguns ensaios foi aplicado vácuo e em outros não, conforme apresentado na Tabela 5.14.

Tabela 5.14. Código e descrição dos ensaios.

Ensaio	Código	Descrição do sistema geossintético-minério de ferro	Vácuo
1	GASF1	Geotêxtil com gramatura de 400 g/m ² , combinado com o SFCJ	Sim
2	GASF2	Geotêxtil com gramatura de 400 g/m ² , combinado com o SFCJ	Sim
3	GASF3	Geotêxtil com gramatura de 400 g/m ² , combinado com o SFCJ	Sim
4	GASF4	Geotêxtil com gramatura de 400 g/m ² , combinado com o SFCJ	Não
5	GBSF1	Geotêxtil com gramatura de 600 g/m ² , combinado com o SFCJ	Sim
6	GBSF2	Geotêxtil com gramatura de 600 g/m ² , combinado com o SFCJ	Sim
7	GBSF3	Geotêxtil com gramatura de 600 g/m ² , combinado com o SFCJ	Não
8	GCSF1	Geocomposto com núcleo drenante de georrede, combinado com o SFCJ	Sim
9	GCSF2	Geocomposto com núcleo drenante de georrede, combinado com o SFCJ	Sim
10	GCSF3	Geocomposto com núcleo drenante de georrede, combinado com o SFCJ	Não
11	GDSF1	Geocomposto com núcleo drenante de geomanta, combinado com o SFCJ	Sim
12	GDSF2	Geocomposto com núcleo drenante de geomanta, combinado com o SFCJ	Sim
13	GDSF3	Geocomposto com núcleo drenante de geomanta, combinado com o SFCJ	Não

No gráfico da Figura 5.36 apresentam-se os resultados das umidades encontradas no final de cada ensaio realizado com o geotêxtil com gramatura de 400 g/m². Observando-se essa figura

percebe-se que os ensaios em que o vácuo foi aplicado apresentaram umidades menores que o ensaio sem aplicação de vácuo, o que demonstra a eficiência deste método de sucção já que as umidades foram menores que as encontradas em campo. Os pontos representados no gráfico representa as regiões em que as amostras para determinação da umidade foram retiradas, como foi apresentado na Figura 4.22.

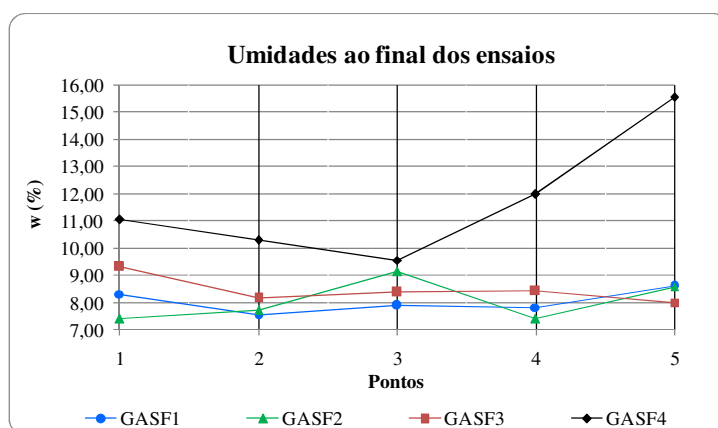


Figura 5.36. Umidades ao final dos ensaios GASF1, GASF2, GASF3 e GASF4.

No gráfico da Figura 5.3737 estão apresentados os resultados das umidades encontradas no final de cada ensaio com o geotêxtil com gramatura de 600 g/m². Observando-se o gráfico da Figura 5.37, percebe-se também que as menores umidades foram encontradas para os ensaios em que o vácuo foi aplicado.

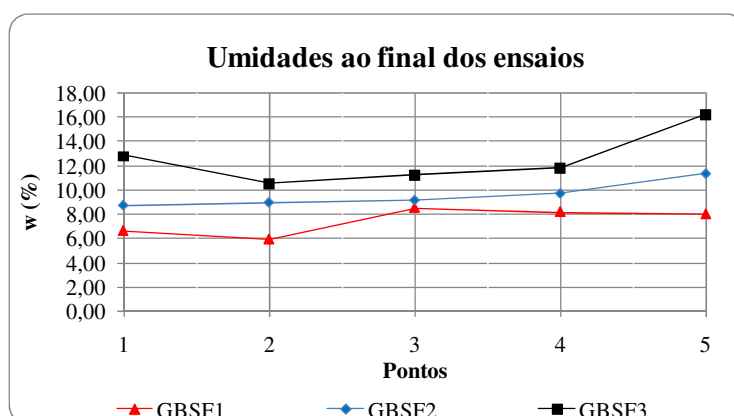


Figura 5.37. Umidades finais dos ensaios GBSF1, GBSF2 e GBSF3.

No gráfico da Figura 5.38 estão plotadas as umidades encontradas no final dos ensaios com o geocomposto drenante com núcleo de georrede. Novamente, pode-se observar que nos ensaios realizados com aplicação de vácuo obtiveram uma maior redução de umidade do minério de ferro.

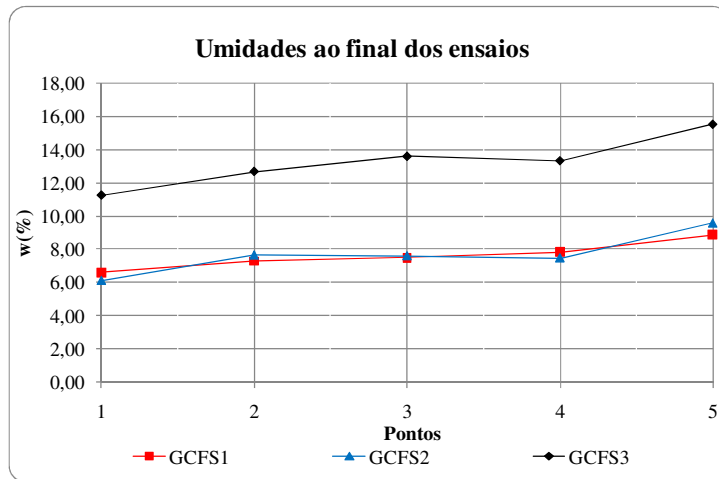


Figura 5.38. Umidades finais dos ensaios GCFS1, GCFS2 e GCFS3.

No gráfico da Figura 5.39 têm-se os resultados das umidades encontradas no final de cada ensaio realizado com o geocomposto drenante com núcleo de geomanta. Observando o gráfico da Figura 5.39 e os gráficos de umidades apresentados anteriormente com os sistemas que envolvem os outros tipos de geossintéticos, pode-se concluir que a aplicação da sucção é realmente eficiente para redução da umidade do minério de ferro.

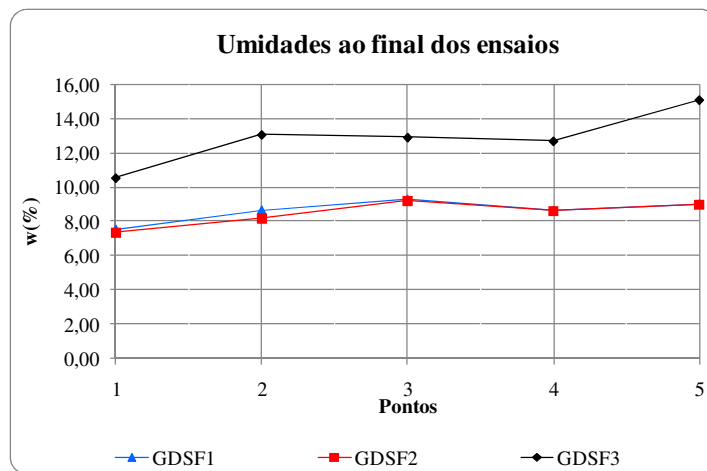


Figura 5.39. Umidades finais dos ensaios GDSF1, GDSF2 e GDSF3.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

6.1 CONCLUSÕES

Nesta dissertação foram realizados ensaios de sucção, ensaios de razão entre gradientes e ensaios especiais de redução da umidade do minério de ferro, tendo como o principal objetivo avaliar a compatibilidade dos geossintéticos com os materiais em estudo, em sistemas drenantes, e verificar uma possível influência da sucção como elemento controlador do escoamento hidráulico do minério.

Foram avaliados dois tipos de minério de ferro e quatro tipos de geossintéticos. Os minérios foram o pellet feed, com maior porcentagem de finos, e o sinter feed, de granulometria mais grossa. Os geossintéticos foram geotêxteis não tecidos de gramaturas 400 g/m² e 600g/m², e dois geocompostos drenantes, um com núcleo de georrede e outro com núcleo de geomanta.

O equipamento utilizado no ensaio de razão entre gradientes demonstrou uma dificuldade de adaptação para os tipos de solos estudados, visto que, para o minério de granulometria fina não foi possível realizar o ensaio face a sua baixa permeabilidade. Para o solo de granulometria mais grossa, em que a vazão de saída foi elevada, não foi possível atingir o gradiente hidráulico proposto inicialmente ($i = 10$). Assim, as principais conclusões obtidas a partir dos resultados desses ensaios foram:

- Segundo Gardoni (2000), o critério de colmatação existente, em função do valor da Razão entre Gradientes (GR), é o proposto pelo FHWA (Federal Highway Administration). Segundo o critério, o geotêxtil não deve ser utilizado caso o GR seja maior que 3. Sendo assim, como em nenhum dos ensaios, o valor de GR foi superior a 3, os materiais estudados poderiam ser utilizados, visto que atenderam a esse critério. Sendo assim, considerando apenas o critério proposto pelo FHWA, os geossintéticos utilizados apresentaram desempenho satisfatório.
- Analisando-se os valores de GR encontrados nos ensaios GASF, GBSF e GCSF, percebe-se que os geossintéticos utilizados não interferiram de forma significativa no regime de fluxo dos materiais, já que esses valores foram próximos ou inferiores a um, ao longo dos ensaios. Somente no ensaio GDSF, foram encontrados valores de GR superiores a um, o que significa algum grau de interferência do geossintético utilizado neste ensaio.

- Os valores de GR encontrados após a aplicação das pressões, não foram muito sensíveis à aplicação da carga no topo da amostra.
- Em relação às três metodologias utilizadas para obtenção dos valores de GR, observou-se um resultado diferente dos resultados anteriores obtidos por Gardoni (2000), Beirigo (2005) e Bessa da Luz (2004), onde os maiores valores de GR encontrados foram com a utilização da metodologia proposta por Gardoni (2000) (GR_{3mm}). Neste trabalho, os maiores valores encontrados de GR foram obtidos pela metodologia proposta por ASTM (1991) (GR_{ASTM}), onde considera que o cálculo do GR deve ser efetuado a partir da leitura dos piezômetros P7 e P9, que se localizam a 75 mm e 25 mm da base da amostra, respectivamente. Menores valores para GR_{3mm} e GR_{8mm} foram consequência de algum nível de piping na interface minério-filtro geotêxtil.
- Analisando os resultados encontrados nos ensaios de sucção e os resultados dos ensaios especiais de redução da umidade, percebe-se que os valores de umidade dos pontos em que as curvas características do minério mudam de inclinação, 16% e 12% para o PFCJ, e 7% e 5% para o SFCJ, são muito próximos dos menores valores de umidade encontrados nos ensaios especiais, que foram 14,7% para o PFCJ (GAPF1) e 6,0% para o SFCJ (GCSF2). Isso indica que a sucção realmente influenciou no escoamento hidráulico dos minérios estudados

Os resultados obtidos demonstraram o potencial para a utilização de geossintéticos em sistemas de drenagem para reduzir a umidade do minério, encontrando-se, ao final do ensaio, umidades até 50% menores que a umidade encontrada em campo com o sistema de drenagem existente.

6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Ao longo da realização da pesquisa aqui apresentada, algumas questões surgiram, sendo necessários estudos adicionais para esclarecê-las. Com intuito de também contribuir com indicações de direções a serem tomadas em eventuais estudos futuros, abaixo são listadas algumas sugestões:

- Os resultados observados neste trabalho indicam a necessidade de mais estudos de projetos de filtros têxteis para criação de critérios específicos para o uso com minérios

de ferro. Mais ensaios de GR, como os realizados, com níveis de cargas menores, com outros tipos de geossintéticos, e com gradientes hidráulicos mais elevados, devem ser feitos para permitir o desenvolvimento desses critérios;

- Os geossintéticos estudados nesta pesquisa foram colocados em contato direto com o minério de ferro, e esta condição pode impor aos geotêxteis a ação química dos minérios e fluidos a eles associados e à ação física das partículas finas. Como a duração dos ensaios foi reduzida em relação ao tempo que o geotêxtil ficaria em contato com o minério em campo, estas ações podem não ter ocorrido. Então, sugere-se que sejam realizados ensaios com maior tempo de duração ou com reaproveitamento dos geossintéticos;
- Sugere-se que seja realizada a troca do reservatório de água por outro de maior capacidade, quando o solo a ser utilizado possuir partículas mais grossas. Nesses casos, como a vazão de saída é elevada, é necessária uma reposição da água com bastante frequência, o que pode prejudicar a realização das leituras. Sugere-se também que a vazão de entrada de água seja maior para esses tipos de solos;
- Como os espécimes de geossintéticos utilizados possuem diâmetro de aproximadamente 10 cm, a variabilidade de propriedades desses produtos deveria ser investigada. Neste contexto a realização de ensaios em escalas maiores é mais representativa que os realizados nesta pesquisa, considerando o volume de minério das pilhas em campo;
- A realização de testes em campo, nas pilhas de armazenamento e nos vagões de transporte do minério é essencial para se ter uma melhor avaliação da eficiência dos filtros estudados;
- Sugere-se a utilização de uma bomba de vácuo com capacidade de sucção mais elevada com o objetivo de se ter uma maior redução da umidade do minério;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdjiev, C.B., Kaltchev, I.S. (1990). Investigation of geotextiles as filter in hydraulic fill tailings dams. 4th International Conference on Geosynthetics, The Hague, The Netherlands, Vol. 1, pp. 307-310.
- ABNT (1984). NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,38 mm. Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 6p.
- ABNT (1984). NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 8p.
- ABNT (1984). NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 13p.
- ABNT (1984). NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 6p.
- ABNT (1984). NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 3p.
- ABNT (1986). NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 7p.
- ABNT (1990). MB 3324: Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 6p.
- ABNT (1991). MB 3388: Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 14p.
- ABNT (1995). NBR 13292: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 8p.
- ABNT (1995). NBR 6502: Rochas e solos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 18p.
- ABNT (2000). NBR 14545: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 12p.
- Abrão, G. S., Busch, R. G., Goossens, M., Marinho, F. A. M., Pinto, C. S. (2001). Estudo do Comportamento da Umidade em Minérios de Ferro. III Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, Ouro Preto/MG.

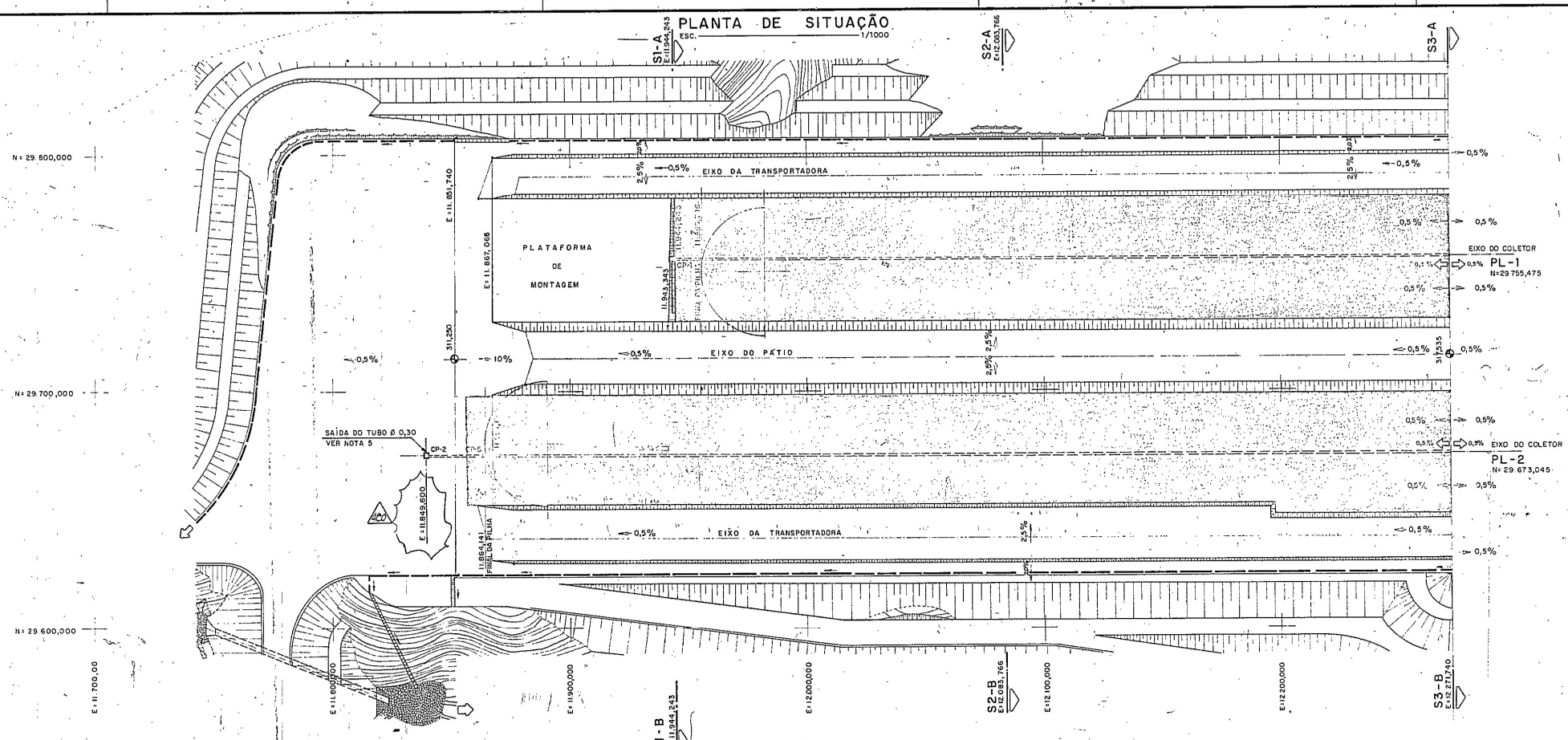
- Abromeit, H.-U. (2002). Revetment damage as a result of geotextile clogging by flocculated products and possible repair methods. 7th International Conference on Geosynthetics, Nice, France, Vol. 3, pp. 1085-1088
- Aguiar, P. R. & Vertematti, J. C. (2004). Aplicações em drenagens. Manual Brasileiro de Geossintéticos, Vertematti, J. C. (ed.), Edgard Blücher, São Paulo, pp. 225-240.
- ALLONDA (2009). www.allonda.com.br
- Araújo, G.S. (2005). Estudo Experimental do Comportamento Dreno-Filtrante de Interfaces de Rejeitos Finos-Geotêxteis. Dissertação de Mestrado, Escola de Minas, UFOP, Ouro Preto, MG, 171p.
- ASTM (1991). D 4491: Test methods for water permeability of geotextiles by permittivity. ASTM Standard on Geosynthetics, Philadelphia, USA, pp. 18-22.
- Beirigo, E. A. (2005). Comportamento Filtro-Drenante de Geotêxteis em Barragens de Rejeitos de Mineração. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-140/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 192 p.
- Beirigo, E. A.; Palmeira, E. M.; Gardoni, M. G. (2006) Comportamento em Filtração de Interfaces Rejeito-Geotêxtil sob Diferentes Solicitações. In: XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - XIII COBRAMSEG, 2006, Curitiba. Anais. São Paulo: ABMS, 2006. v. 3. p. 1861-1865.
- Bessa da Luz, D. W. (2004). Compatibilidade de Sistemas Solo-Geotêxtil em Ensaios de Filtração sob Tensão. Dissertação de Mestrado, Publicação no G.DM-120A/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 139 p.
- Bentel, D., Robbertze, J., Smith M., (1982). The use and behaviour of geotextiles in underdrainage systems of gold mine tailings dam in South Africa. 2nd International Conference on Geosynthetics, Las Vegas, USA, Vol. 1, pp. 183-188.
- Bueno, B.S. (2003). Propriedades, Especificações e Ensaios. Anais IV Congresso Brasileiro de Geossintéticos e V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 2003, Porto Alegre, RS.
- Bush, R.G., (1987). Construction of dams with phosphate tailings. Symposium on Tailings Dams and Disposal of Industrial and Mining Waste, REGEO'87, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, Vol. 1, pp. 379-396 (in Portuguese).
- Castro, N. (2005). Sistemas tubulares para contenção de lodo e sedimentos contaminados. 103f. Tese de mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos.

- Chandler, R. L.; Crilly, M. S.; Montgomery-Smith, G. (1992), "A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings". Proc. of the Institution of Civil Engineering, 82-89
- Fannin, R.J., Vaid, Y.P., Shi, Y., 1994. A critical evaluation of the gradient ratio test. Geotechnical Testing Journal 17, (1), 35-42.
- Faure, Y.H., Farkouh, B., Delmas PH., Nancey, A., (1999). Analysis of geotextile filter behaviour after 21 years in Valcros dam. Geotextiles and Geomembranes, 17, (5-6), pp. 353-370.
- Ferreira, R.C., (1978). Physico-chemical clogging of filters: a trial simulation in the laboratory. 6th Brazilian Congress on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Brazil, Vol. 1, pp. 81-100 (in Portuguese).
- Ford, H.W. (1982). Biological clogging of synthetic drain envelopes. 2nd International Drainage Workshop, Washington, USA.
- Fredlund, D. G., XING, A. (1994), "Equations for the soil-water characteristic curve" Can. Geotech. J. 31 pp 521-532.
- Freitas, R. A. (2003). Comportamento de geotêxteis como filtro em resíduos – Fosfogesso e Lama Vermelha, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Gardoni, M.G. (2000). Estudo do Comportamento Dreno-Filtrante de Geossintéticos sob Compressão. Tese de Doutorado, Publicação G.T.D.-003A/2000, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 313 p.
- Gardoni, M.G., Palmeira, E.M., (2002). Microstructure and pore characteristics of synthetic filters under confinement. Geotechnique 52, (6), 405-418.
- Haas, W.M., (1982). Geotextiles in tailings dike construction: laboratory and field observations. 2nd International Conference on Geosynthetics, Las Vegas, USA, Vol. 1, pp. 205-210.
- IBS (2009). Instituto Brasileiro de Siderurgia.
- Infanti Jr., N., Kanji, M.A., (1974). Preliminary considerations on geochemical factors affecting the safety of earth dams. In 2nd International Congress of the Association of Engineering Geology, Vol. 1, pp. IV.33.1-IV.33.11.
- Koerner, R. M. (1994). Designing with Geosynthetics. Prentice-Hall Inc., New Jersey, EUA, 783p.
- Lindquist, L.N., Bonsegno, M. C., (1981). Analyses of the performance of nine CESP's earth dams drainage systems through geotechnical instrumentation. XIV Brazilian Seminar on Large Dams, Theme II, Recife, Brazil, Vol. 1, pp. 267-290 (in Portuguese).

- Maccaferri (2009). www.maccaferri.com.br
- Marinho, F. A. M (1994). “Medição de sucção com o método do papel filtro”, X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, vol 2, pp. 515-522.
- Marinho, F. A. M. (1997). “Medição de sucção em solos”. 3º Simpósio Brasileiro de Solos não Saturados, Rio de Janeiro, RJ, Vol. 2, pp373-397.
- Martins, Paula de Mello (2006). Utilização de tubos geotêxteis para o desaguamento de rejeitos de mineração. 161p. Tese de mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- Mendonça, M.B., (2000). Evaluation of ochre formation on the performance of geotextile filters. PhD Thesis, Coppe/Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil, 320 p. (in Portuguese).
- Montez, F.T., (1987). Utilization of geotextiles in tailings dams. Symposium on Tailings Dams and Disposal of Industrial and Mining Waste, REGEO’87, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, Vol. 1, pp. 333-348 (in Portuguese).
- Newman, P., Hodgson, M. e Rosselot, E. (2004). The disposal of tailings and minewater sludge using geotextile dewatering techniques. Minerals Engineering, v. 17, n.2, pp 115 – 121.
- OBBER (2009). www.obber.com.br
- Palmeira, E. M. & Gardoni, M. G. A. (2000a). Geotextiles in filtration: a state of the art review and remaining challenges. International Symposium on Geosynthetics in Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, in association with GeoEng2000, Melbourne, Australia, pp.85-110.
- Palmeira, E. M. & Gardoni, M. G. A. (2002). Drainage and filtration properties of non-woven geotextiles under confinement using different experimental techniques. Geotextiles and Geomembranes, 20: 97-115.
- Palmeira, E. M., Fannin, R. J., & Vaid, Y. P. (1996). A study on the behaviour of soil geotextile systems in filtration tests. Canadian Geotechnical Journal, 33: 899-912.
- Palmeira, E.M., Gardoni, M.G., (2000b). The influence of partial clogging and pressure on the behaviour of geotextiles in drainage systems. Geosynthetics International 7, (4-6), pp. 403-431.
- Puig, J., Gouy, J.-L., Labroue, L., (1986). Ferric clogging of drains. 3rd International Conference on Geosynthetics, Vienna, Austria, Vol. 2, pp. 569-574 (in French).

- Quaresma, L. F. (1987). O mercado brasileiro de minério de ferro: sua instabilidade e a possibilidade de associação dos países exportadores. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da UNICAMP, Campinas, SP.
- Scheurnberg, R.J., 1982. Experiences in the use of geofabric in underdrainage of residue deposits. 2nd International Conference on Geosynthetics, Las Vegas, USA, Vol. 1, pp. 199-204.
- Shi, Y. (1993). Filtration Behaviour of Non-Woven Geotextiles in the Gradient Ratio Test. Dissertação de Mestrado, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 125p.
- Smith, M.E. e Zhao, A. (2008). Rede de drenagem em pilhas de lixiviação em termos de melhor serviço e redução de custos, Vector Engineering, www.vectorengineering.com.
- ASTM D422 – 63 (2002). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils
- Urashima, D.C., Vidal, D.M., Marques, G.F. e Carvalho Neto, J.F. (2007). Simulação Computacional do processo de desaguamento de rejeitos de mineração por mantas têxteis. VI Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, REGEO, Recife, PE, 5p.
- Vale (2009), www.vale.com.br
- Van Zanten, R.V., Thaber, R.A.H., 1982. Investigation on long-term behaviour of geotextiles in bank protection works. 2nd International Conference on Geosynthetics, Las Vegas, USA, Vol. 1, pp. 259-264.
- Vidal, D. M. e Palmeira, E.M. (2001). Geossintéticos na Engenharia Civil, Curso Básico, IGS Brasil.

PROJ. TÉCNICO
 CVRD / SUCAR

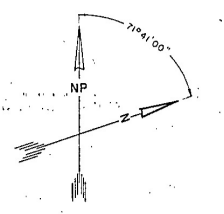


CONVENÇÕES

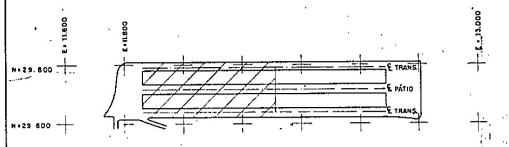
- COLETOR
- 0,5% DECLIVIDADE DE TERRAPLENAGEM
- ↔ 0,5% DECLIVIDADE LONGITUDINAL DAS CAMADAS DRENANTES E DO COLETOR
- CAIXA DE PASSAGEM - 1,50 x 1,50
- TUBO Ø 0,30m
- ⊕ NÍVEL DA TERRAPLENAGEM
- ⊞ CAMADAS DRENANTES

NOTAS

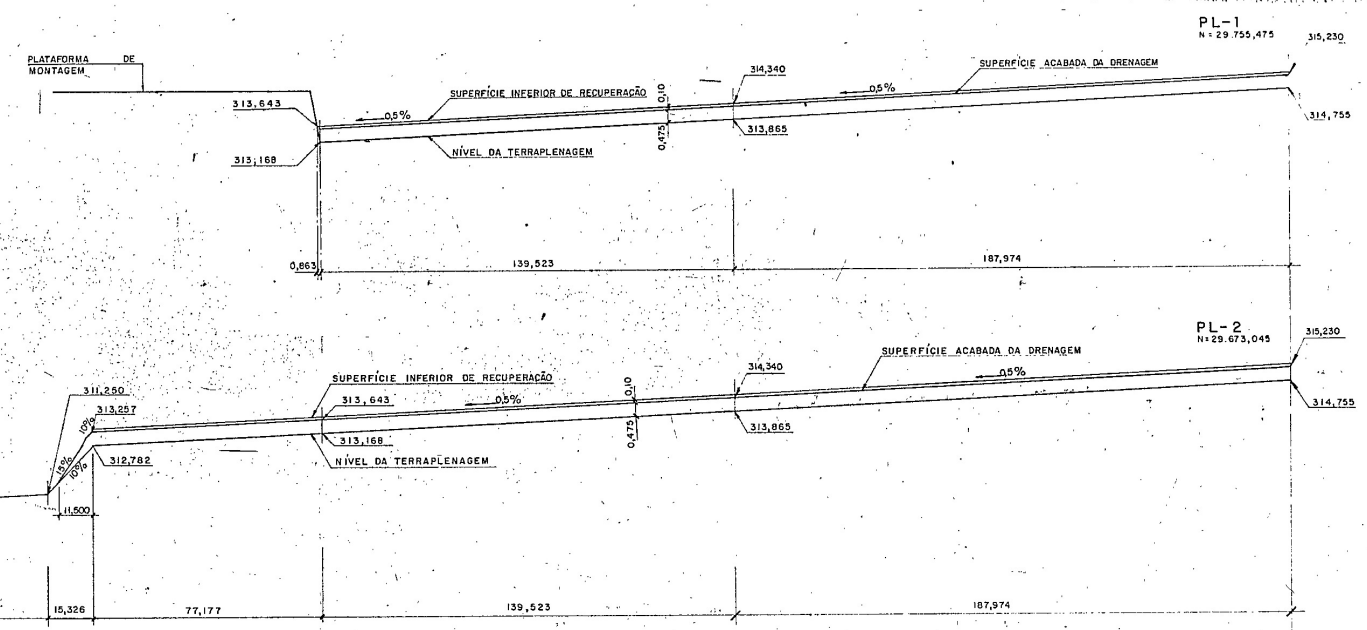
- 1- COTAS E NÍVEIS EM METROS.
- 2- VER PLANTA DE SITUAÇÃO - 2ª PARTE Nº 1510-19-201.
- 3- VER SEÇÕES TRANSVERSAIS NOS DES. Nº 1510-19-202 E 1510-19-203.
- 4- VER PERFILES LONGITUDINAIS NOS EIXOS DOS COLETORES, DETALHADO, NOS DES. Nº 1510-19-204 E 1510-19-205.
- 5- A SAÍDA DAS CAIXAS DE PASSAGEM SERÁ ATRAVÉS DE TUBO Ø 0,30 CLASSE CA-1, O QUAL DEVERÁ SER LIGADO À DRENAGEM EXISTENTE.
- 6- ACHADA NA SUPERFÍCIE ACABADA DA DRENAGEM DEVERÁ SER MANTIDA UMA CAMADA DE 10 cm DE MÍNÉRIO SINTER-FED, PARA PROTEÇÃO DA DRENAGEM PROJETADA.
- 7- VER DETALHE DAS CAMADAS DRENANTES E DO COLETOR (EM SOLO) NO DES. Nº 1510-19-206 E (EM ROCHA) NO DES. Nº 1510-19-208.
- 8- VER FORMA DAS CAIXAS DE PASSAGEM NO DES. Nº 1510-19-209.
- 9- A AMARRAÇÃO DO RÁTIU FOI OBTIDA A PARTIR DOS DES. Nº CVRD 1000-17-011 (REV. 6 09/08/82) E 1000-17-012 (REV. 5 20/08/82).



PLANTA CHAVE
ESC. 1:10000



PERFIL LONGITUDINAL
ESC. 1:1000



DESENHOS DE REFERÊNCIA

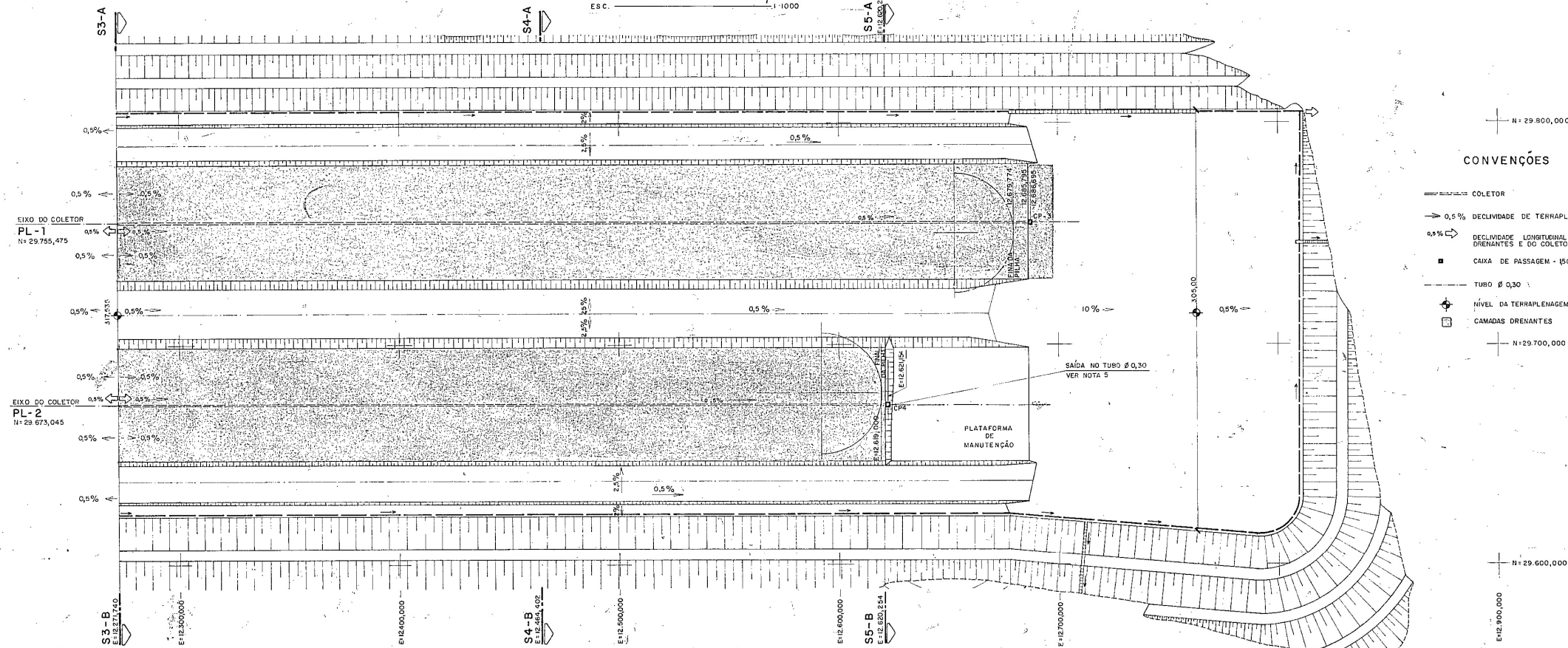
1000-17-011	1510-19-203	1510-19-211
1000-17-012	1510-19-204	
1000-19-005	1510-19-205	
1000-19-006	1510-19-206	
1510-19-201	1510-19-208	
1510-19-202	1510-19-209	

REV	DATA	TIPO	DESCRIÇÃO DAS REVISÕES
401	15/01/82	G	Alterado tipo de emissão.
400	03/01/82	E	Onde indicado.
4	25/10/84	E	ALTERAÇÃO NAS LOCALIZAÇÕES DAS CAIXAS DE PASSAGEM 1 e 2.
3	16/07/84	E	ALTERAÇÃO NAS LOCALIZAÇÕES DAS CAIXAS DE PASSAGEM, COTAS E DECLIVIDADES.
2	26/03/83	E	ALTERAÇÃO NO TÍTULO DO DESENHO.
1	08/02/83	C	ALTERAÇÃO NAS COTAS E DECLIVIDADES.
0	04/11/82	B	EMIÇÃO INICIAL.

TIPO DE EMISSÃO	(A) PRELIMINAR	(B) PARA APROVAÇÃO	(C) PARA COTAÇÃO	(D) PARA CONSTRUÇÃO	(E) CONFORME CONSTRUÍDO
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)

		Projeto Ferro Carajás	
TECNOSOLO S.A.		MINA-PÁTIO DE ESTOCAGEM E CARREGAMENTO	
DRENAGEM DAS PILHAS DE MINÉRIO			
PLANTA DE SITUAÇÃO - 1ª PARTE			
RESPONSÁVEL	DATA	ESCALA	Nº PROJ.
PROJ. <i>[assinatura]</i>	04/11/82	1510-19-200	
DES. <i>[assinatura]</i>	04/11/82		
VER. <i>[assinatura]</i>	04/11/82		
APROD. <i>[assinatura]</i>	04/11/82	INDICADA	206-695
			REV. 1

PLANTA DE SITUAÇÃO
ESC. 1:1000



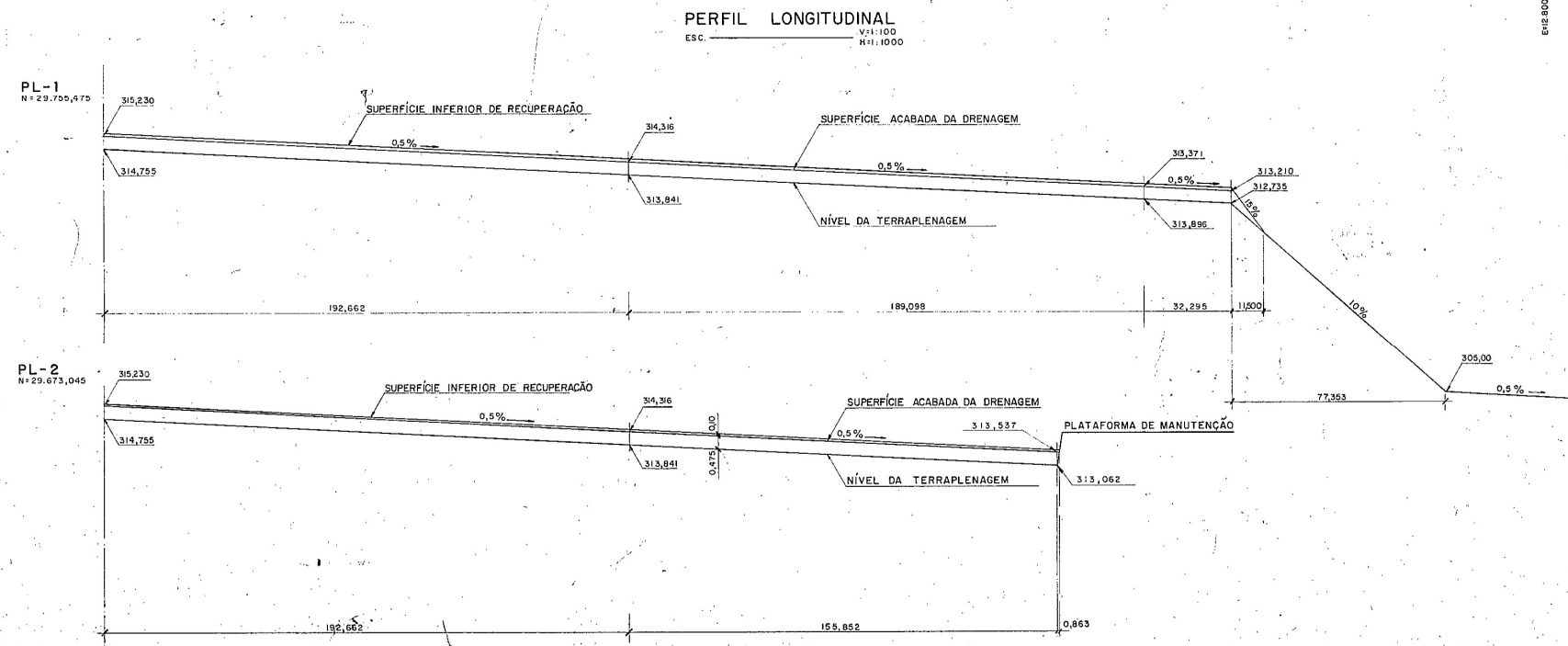
CONVENÇÕES

- COLETOR
- DECLIVIDADE DE TERRAPLENAGEM
- DECLIVIDADE LONGITUDINAL DAS CAMADAS DRENANTES E DO COLETOR
- CAIXA DE PASSAGEM - 150 x 1,50
- TUBO Ø 0,30
- NÍVEL DA TERRAPLENAGEM
- CAMADAS DRENANTES

NOTAS

- 1 - COTAS E NÍVEIS EM METROS.
- 2 - VER PLANTA DE SITUAÇÃO - 1ª PARTE NO DES. Nº 1510-19-200
- 3 - VER SEÇÕES TRANSVERSAIS NOS DES. Nº 1510-19-202 E 1510-19-203
- 4 - VER PERFILES LONGITUDINAIS NOS EIXOS DOS COLETORES, DETALHADO NOS DES. Nº 1510-19-204 E 1510-19-205
- 5 - A SAÍDA DAS CAIXAS DE PASSAGEM SERÁ ATRAVÉS DE TUBO Ø 0,30 CLASSE CA-1, O QUAL DEVERÁ SER LIGADO À DRENAGEM EXISTENTE.
- 6 - ACIMA DA SUPERFÍCIE ACABADA DA DRENAGEM DEVERÁ SER MANTIDA UMA CAMADA DE 10cm DE MINÉRIO SINTER-FEED, PARA PROTEÇÃO DA DRENAGEM PROJETADA
- 7 - VER DETALHE DAS CAMADAS DRENANTES E DO COLETOR (EM SOLO) NO DES. Nº 1510-19-206 (EM ROCHA) NO DES. Nº 1510-19-208
- 8 - VER FORMA DAS CAIXAS DE PASSAGEM NO DES. Nº 1510-19-210
- 9 - A AMARRAÇÃO DO PÁTIO FOI OBTIDA A PARTIR DOS DES. Nº CVRD 1000-17-01 (REV. 6 09/06/82) E 1000-17-02 (REV. 5 20/08/82)

PERFIL LONGITUDINAL
ESC. 1:1000



PLANTA CHAVE
ESC. 1:1000

DESENHOS DE REFERÊNCIA	
1000-17-011	1510-19-203
1000-17-012	1510-19-204
1000-19-005	1510-19-205
1000-19-006	1510-19-206
1510-19-200	1510-19-208
1510-19-202	1510-19-210

REV.	DATA	TIPO	POR	DESCRIÇÃO DAS REVISÕES
4	25/08/84	E	all	ALTERAÇÃO NA LOCALIZAÇÃO DA CAIXA DE PASSAGEM 4
3	16/07/84	E	all	ALTERAÇÃO NAS LOCALIZAÇÕES DAS CAIXAS DE PASSAGEM, COTAS E DECLIVIDADES
2	26/09/83	E	all	ALTERAÇÃO NO TÍTULO DO DESENHO
1	04/02/83	C	all	REVISÃO NAS COTAS E DECLIVIDADES
0	04/02/82	B	all	EMIÇÃO INICIAL

TIPO DE EMISSÃO			EMISSÕES		
(A) PRELIMINAR	(B) PARA COTAÇÃO	(C) CONFORME CONSTRUÍDO	(1) PARA APROVAÇÃO	(2) PARA CONSTRUÇÃO	(3) CANCELADO
(4) PARA CONHECIMENTO	(5) CONFORME COMPROVADO	(6)			

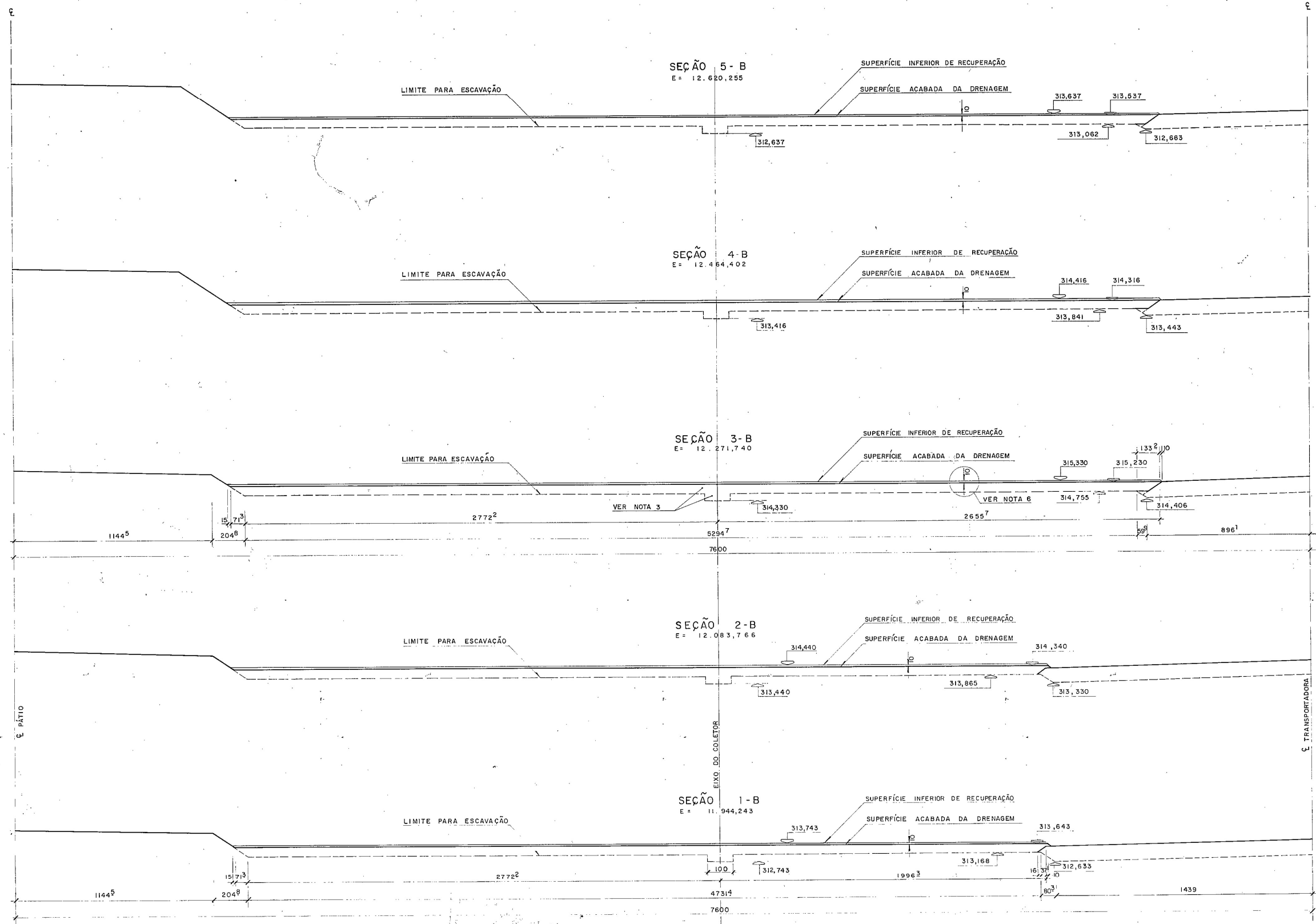
CVRD
Tecnosolo S.A.

Projeto Ferro Carajás
MINA-PÁTIO DE ESTOCAGEM E CARREGAMENTO
DRENAGEM DAS PILHAS DE MINÉRIO
PLANTA DE SITUAÇÃO - 2ª PARTE

RESPONSÁVEL	DATA	ESCALA	Nº CVRD	REV.
PROJ. SA	04/11/82	INDICADA	1510-19-201	4
DES. Lucas	04/11/82		Nº PROJ. 206.696	
VER. all	04/11/82			
APROV. [assinatura]	04/11/82			

NOTAS

- 1- COTAS EM CENTÍMETRO, NÍVEIS EM METRO.
- 2- VER LOCALIZAÇÃO DAS SEÇÕES NOS DES. Nº 1510-19-200 E Nº 1510-19-201
- 3- VER DETALHES DAS CAMADAS DRENANTES E DO COLETOR (EM SOLO) NOS DES Nº 1510-19-206 E (EM ROCHA) NO DES. Nº 1510-19-208.
- 4- AS SEÇÕES TRANSVERSAIS FORM DEFINIDAS COM BASE NO DES. Nº CVRD 1000-17-048 (REV.4)
- 5- CASO FOR ENCONTRADO ROCHA NO TERRENO DE FUNDAÇÃO DAS CAMADAS DRENANTES E DO COLETOR OS NÍVEIS DE ESCAVAÇÃO DEVERÃO SUBIR 0,025m.
- 6- ACIMA DA SUPERFÍCIE ACABADA DA DRENAGEM DEVERÁ SER MANTIDA UMA CAMADA DE 10cm DE MINÉRIO SINTER-FEED, PARA PROTEÇÃO DA DRENAGEM PROJETADA.



PLANTA CHAVE
ESC 1:10000

DESENHOS DE REFERÊNCIA

1000-17-048
1510-19-200
1510-19-201
1510-19-206
1510-19-208

REV	DATA	TIPO	POR	DESCRIÇÃO DAS REVISÕES
4	25/01/84	E	ALL	ALTERAÇÃO NAS SEÇÕES 1-B e 5-B.
3	31/07/83	E	ALL	REVISÃO GERAL
2	26/09/83	E	ALL	ALTERAÇÃO NO TÍTULO DO DESENHO
1	09/02/83	C	ALL	REVISÃO NAS COTAS
0	05/11/82	B	ALL	EMIÇÃO INICIAL

EMISSIONES

TIPO DE EMISSÃO	(A) PRELIMINAR	(B) PARA APROVAÇÃO	(C) PARA CONHECIMENTO	(D) PARA COTAÇÃO	(E) PARA CONSTRUÇÃO	(F) CONFORME CONSTRUIDO	(G) CANCELADO

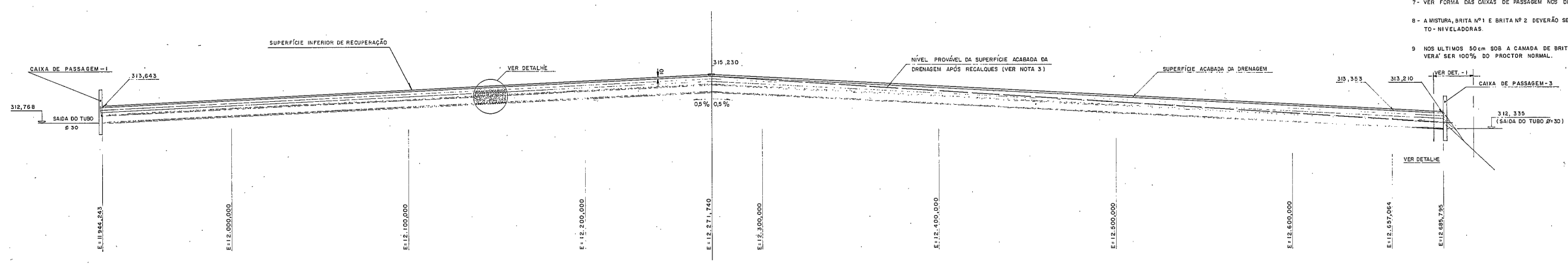
CVRD	Projeto Ferro Carajás
TECNOSOLO S.A.	MINA-PÁTIO DE ESTOCAGEM E CARREGAMENTO
RESPONSÁVEL	DATA
PROJ. <i>Est</i>	05/11/82
DES. <i>Est</i>	05/11/82
VER. <i>ALL</i>	05/11/82
APROV. <i>Benjamin</i>	05/11/82

ESCALA	Nº CVRD	REV
1:100	1510-19-202	4
	Nº PROJ.	
	206.697	

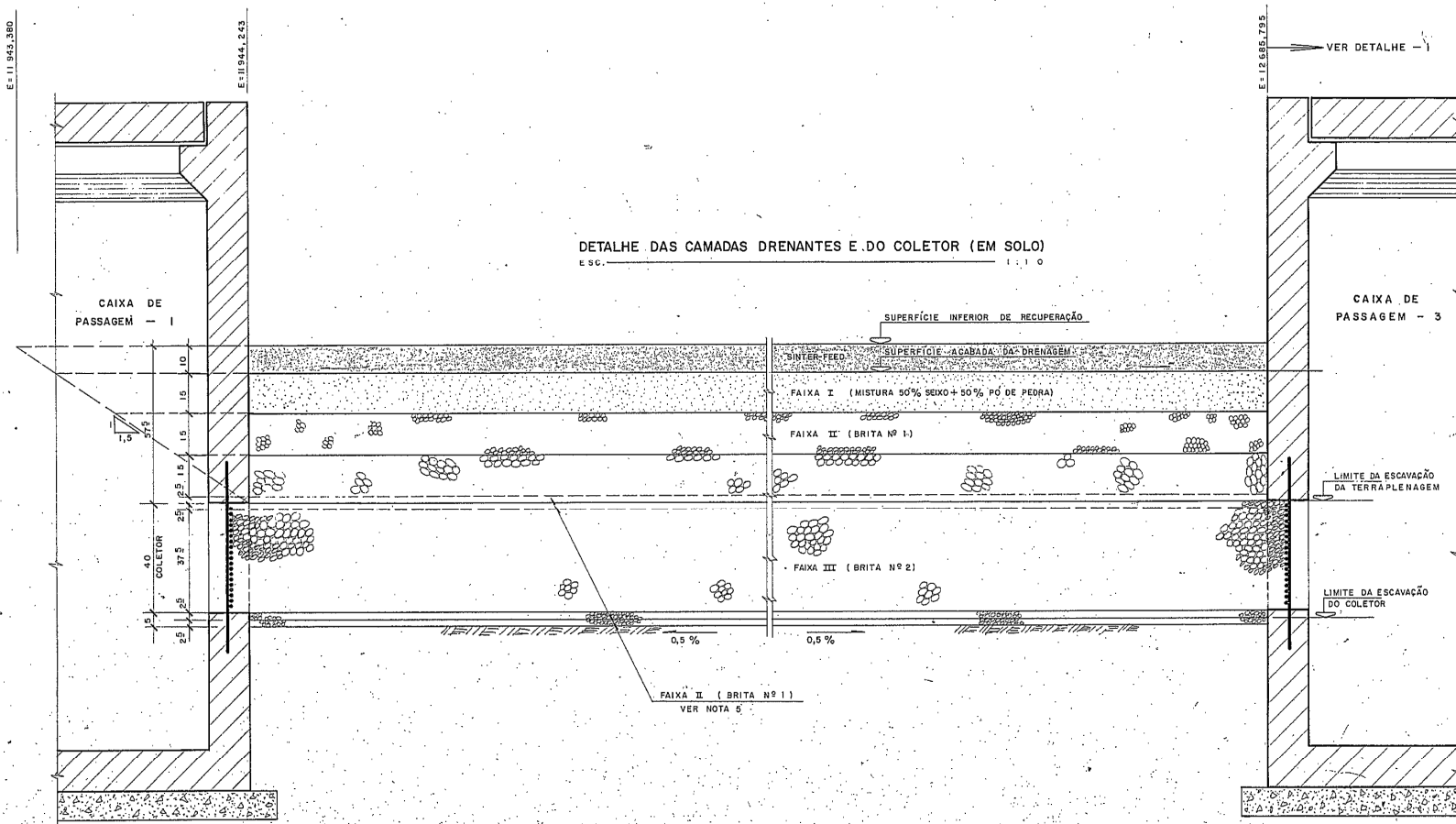
NOTAS

- 1- COTAS EM CENTÍMETRO E NÍVEIS EM METRO.
- 2- VER PLANTA DE SITUAÇÃO NOS DES. Nº 1510-19-200 e Nº 1510-19-201
- 3- O NÍVEL PROVÁVEL DA SUPERFÍCIE ACABADA DA DRENAGEM APÓS RECALQUES FOI DEFINIDO COM BASE NOS CÁLCULOS DOS RECALQUES ESTIMADOS.
- 4- VER DETALHE DAS CAMADAS DRENANTES E DO COLETOR (EM SOLO) NO DES. Nº 1510-19-206 E (EM ROCHA) NO DES. Nº 1510-19-208.
- 5- APÓS ACABADA A TERRAPLENAGEM SERÁ ESPALHADA UMA CAMADA DE 5cm DE BRITA Nº 1 (FAIXA II) E COMPACTADA COM ROLO VIBRADOR AFIM DE INTRODUIZIR APROXIMADAMENTE METADE DA CAMADA NO TERRENO. VER DES. Nº 1510-19-207.
- 6- ACIMA DA SUPERFÍCIE ACABADA DA DRENAGEM DEVERÁ SER MANTIDA UMA CAMADA DE 10cm DE MINÉRIO SINTER-FEED, PARA PROTEÇÃO DA DRENAGEM PROJETADA.
- 7- VER FORMA DAS CAIXAS DE PASSAGEM NOS DES. Nº 1510-19-209 E 1519-19-210.
- 8- A MISTURA, BRITA Nº 1 E BRITA Nº 2 DEVERÁ SER COLOCADAS E ESPALHADAS COM MOTO-NIVELADORAS.
- 9- NOS ÚLTIMOS 50cm SOB A CAMADA DE BRITA Nº 1, O GRAU DE COMPACTAÇÃO DEVERÁ SER 100% DO PROCTOR NORMAL.

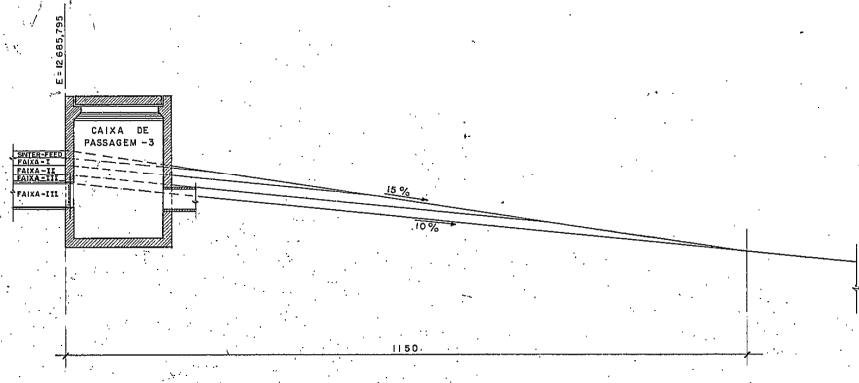
PERFIL LONGITUDINAL NO EIXO DO COLETOR
 ESC. 1:1000 (HORIZONTAL)
 ESC. 1:100 (VERTICAL)



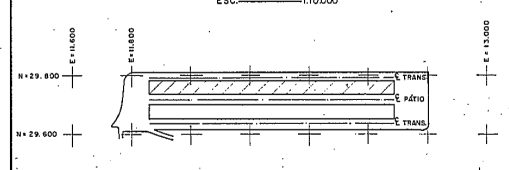
DETALHE DAS CAMADAS DRENANTES E DO COLETOR (EM SOLO)
 ESC. 1:10



DETALHE - I
 ESC. 1:150



PLANTA CHAVE
 ESC. 1:10000



DESENHOS DE REFERÊNCIA

1510-19-200	
1510-19-201	
1510-19-206	
1510-19-207	
1510-19-208	
1510-19-209	
1510-19-210	

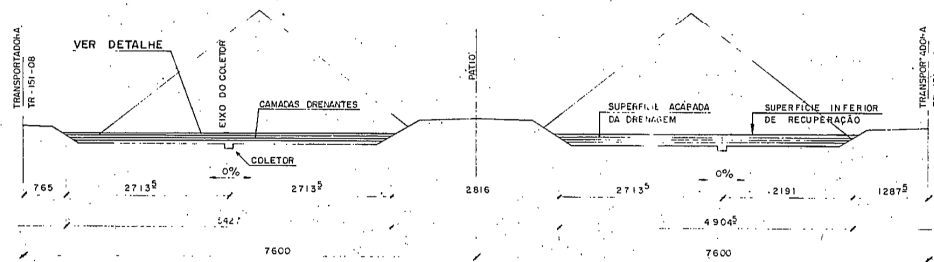
REV	DATA	TIPO	POR	DESCRIÇÃO DAS REVISÕES
4	25/07/84	E	ALL	ALTERAÇÃO NA LOCALIZAÇÃO E COTAS DA CAIXA DE PASSAGEM - 1
3	24/07/84	E	ALL	REVISÃO GERAL
2	26/09/83	E	ALL	ALTERAÇÃO NO TÍTULO DO DESENHO
1	09/02/83	C	ALL	REVISÃO NAS COTAS E INCLUSÃO DAS NOTAS 8 E 9
0	09/11/82	B	ALL	EMIÇÃO INICIAL

EMISSIONES	
TIPO DE EMISSÃO	(1) PRELIMINAR (2) PARA APROVAÇÃO (3) PARA CONSTRUÇÃO (4) PARA CONHECIMENTO (5) CONFORME COMPRADO (6) CANCELADO (7) CONFORME COMPRADO

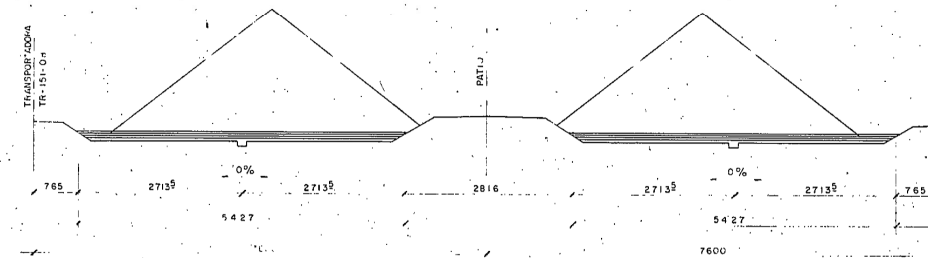
CVRD	Projeto Ferro Carajás
TECNOLOGIA S.A.	MINA-PÁTIO DE ESTOCAGEM E CARREGAMENTO
RESPONSÁVEL	DATA
PROJ. <i>[Signature]</i>	09/11/82
DES. <i>[Signature]</i>	09/11/82
VER. <i>[Signature]</i>	09/11/82
APROV. <i>[Signature]</i>	09/11/82
ESCALA	Nº PROJ. 1510-19-204
INDICADA	206.699
	REV. 4

SEÇÕES TRANSVERSAIS - TIPO
ESCALA 1:500

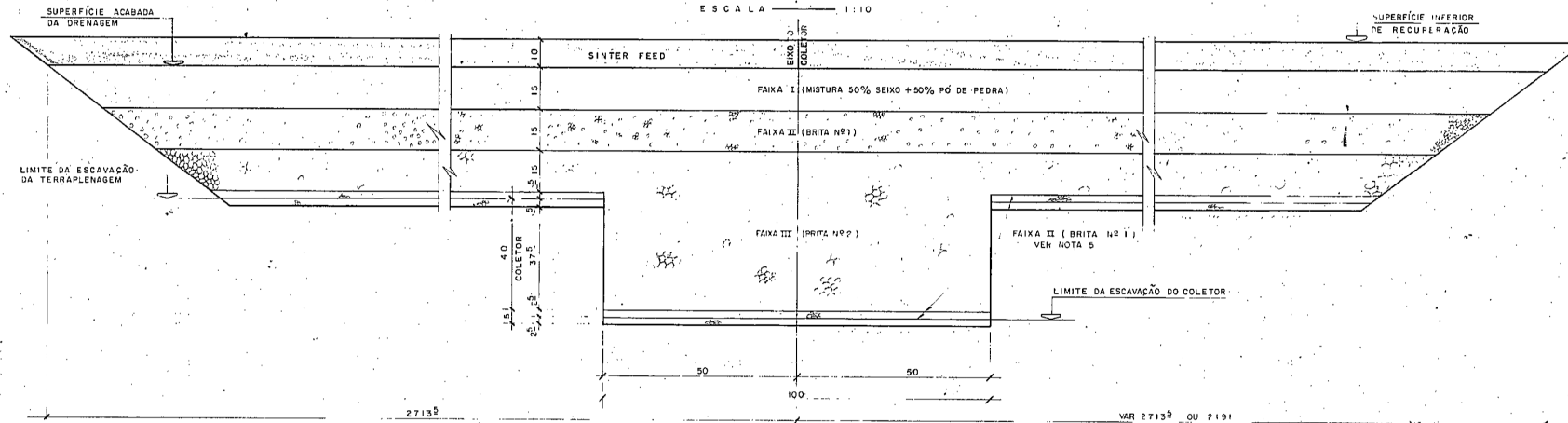
TIPO - I
(E=11.862,580 e
E=12.197,000)



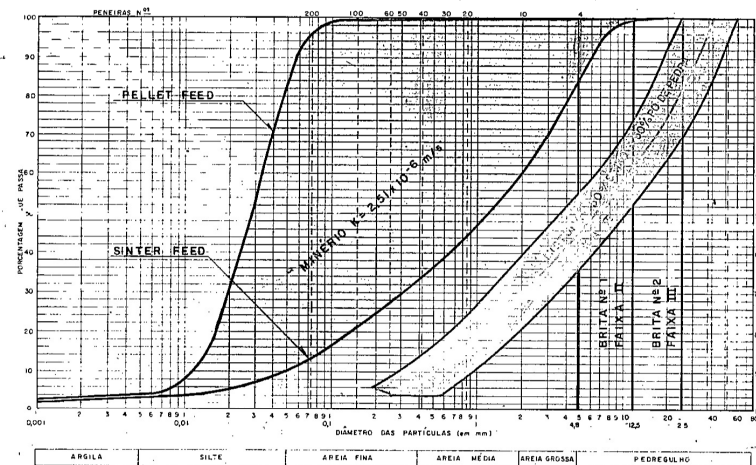
TIPO - II
(E=12.197,000 e
E=12.690,274)



DETALHE DAS CAMADAS DRENANTES E DO COLETOR (EM SOLO)
ESCALA 1:10



CURVA GRANULOMÉTRICA
FAIXA DOS MATERIAIS DAS CAMADAS DRENANTES

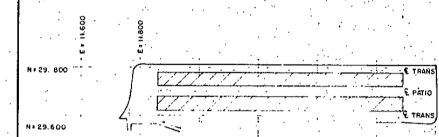


VOLUMES GEOMÉTRICOS	
MISTURA (50% SEIXO + 50% PÓ DE PEDRA)	13.200
BRITA Nº 1	17.500
BRITA Nº 2	13.700

NOTAS

- 1- COTAS EM CENTÍMETRO.
- 2- VER PLANOS LONGITUDINAIS NOS EIXOS DOS COLETORES NOS DES. NºS 1510-19-204 E 1510-19-205.
- 3- VER SEÇÕES TRANSVERSAIS NOS DES. NºS 1510-19-202 E 1510-19-203.
- 4- VER PLANTA DE SITUAÇÃO NOS DES. NºS 1510-19-200 E Nº 1510-19-201.
- 5- APÓS ACABADA A TERRAPLENAGEM SERÁ ESPALHADA UMA CAMADA DE 5cm DE FAIXA II (BRITA Nº1) E CARACTERIZADA COM A VIBRAÇÃO Nº 1 DE INTRODUZIR APROXIMADAMENTE METADE DA CAMADA NO TERRENO VER DES Nº 1510-19-207.
- 6- ACIMA DA SUPERFÍCIE ACABADA DA PREENSAGEM DEVERÁ SER MANTIDA UMA CAMADA DE 5cm DE FAIXA II (BRITA Nº1) PARA PROTEÇÃO DA DRENAGEM PROJETADA.
- 7- O DETALHE APRESENTADO É VÁLIDO QUANDO O TERRENO DE FUNDAÇÃO FOR SOLO. CASO SEJA ROCHA VER DES. Nº 1510-19-208.
- 8- A MISTURA INDICADA CORRESPONDE A 50% DE SEIXO, APRESENTADO NO CERTIFICADO Nº EXT 004 DA CONCREMAT, COM 50% DE PÓ DE PEDRA, APRESENTADO NO CERTIFICADO Nº EXT 003 DA CONCREMAT.

PLANTA CHAVE
ESC. 1:1000



DESENHOS DE REFERÊNCIA

- 1510-19-200
- 1510-19-201
- 1510-19-202
- 1510-19-203
- 1510-19-204
- 1510-19-205
- 1510-19-207

REV	DATA	TIPO	POR	DESCRIÇÃO DAS REVISÕES
2	26/09/83	E		ALTERAÇÃO NO TÍTULO DO DESENHO
1	09/02/83	C		REVISÃO NAS FAIXAS GRANULOMÉTRICAS E COTAS
0	05/11/82	B		EMIÇÃO INICIAL

EMISSIONES	
TIPO DE EMISSÃO	(1) PRELIMINAR (2) PARA COTAÇÃO (3) CONFORME CONSTRUÍDO (4) PARA APROVAÇÃO (5) PARA CONSTRUÇÃO (6) CANCELADO (7) PARA CONHECIMENTO (8) CONFORME COMPROVADO (9)

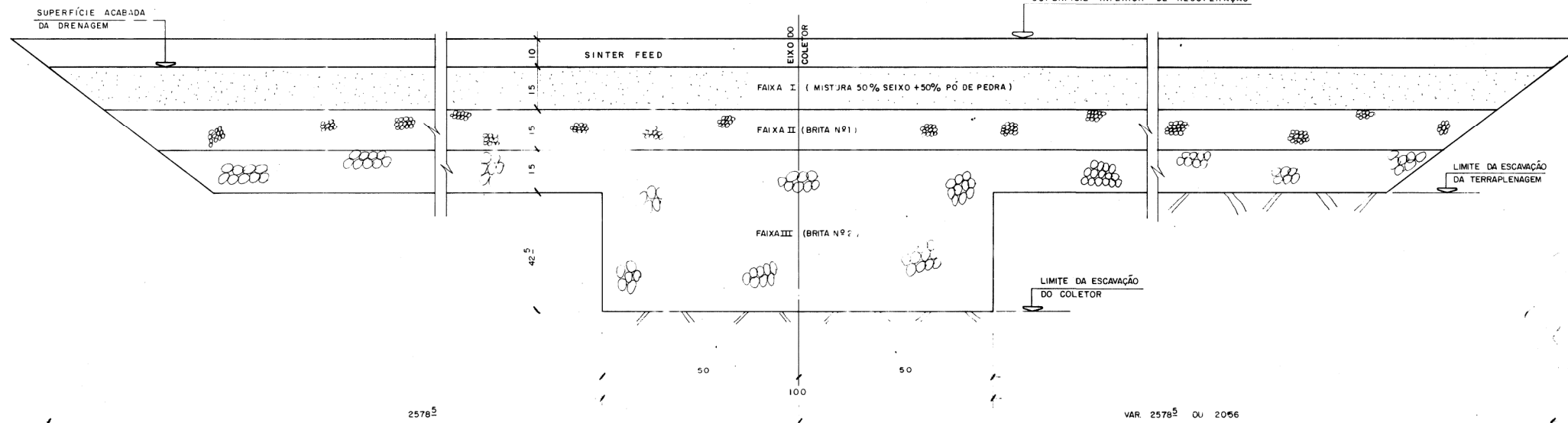
		CVRD Projeto Ferro Carajás	
RESPONSÁVEL: <i>[Signature]</i> DATA: 05/11/82		MINA-PÁTIO DE ESTOCAGEM E CARREGAMENTO	
PROJ: <i>[Signature]</i> DATA: 05/11/82		DRENAGEM DAS PILHAS DE MINÉRIO DE TALHE DAS CAMADAS DRENANTES E DO COLETOR (EM SOLO)	
VER: <i>[Signature]</i>	05/11/82	ESCALA: INDICADA	Nº PROJ: 1510-19-206
APROV: <i>[Signature]</i>	05/11/82	INDICADA	Nº PROJ: 206.701
			REV: 2

DETALHE DAS CAMADAS DRENANTES E DO COLETOR (EM ROCHA)

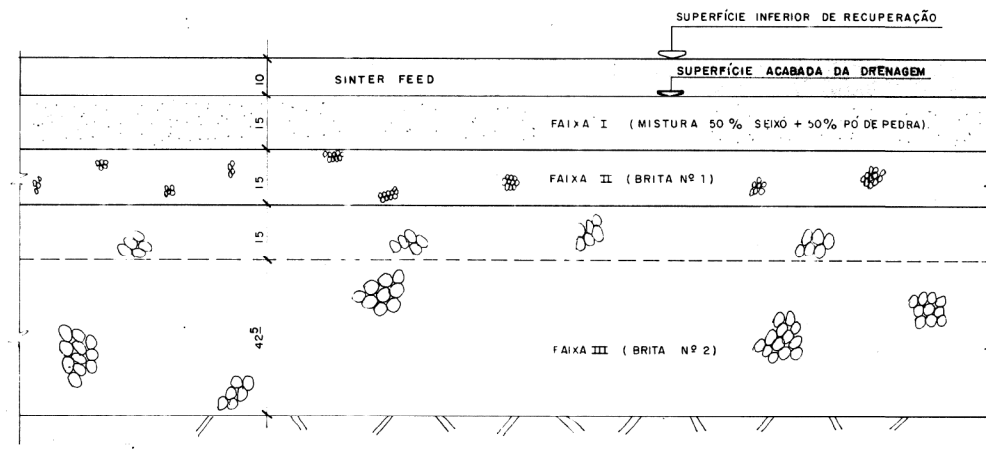
NOTAS

- 1- COTAS EM CENTIMETRO.
- 2- VER PLANTA DE SITUAÇÃO NOS DES. Nº 1510-19-200 E Nº 1510-19-201.
- 3- VER PERFIS LONGITUDINAIS NOS EIXOS DOS COLETORES NOS DES. Nº 1510-19-204 E 1510-19-205
- 4- VER SEÇÕES TRANSVERSAIS NOS DES. Nº 1510-19-202 E 1510-19-203
- 5- VER FAIXA DOS MATERIAIS DAS CAMADAS DRENANTES NO DES. Nº 1510-19-206
- 6- OS DETALHES APRESENTADOS SÃO VÁLIDOS CASO FOR ENCONTRADO ROCHA NO TERRENO DE FUNDAÇÃO DAS CAMADAS DRENANTES E DO COLETOR.

SEÇÃO TRANSVERSAL
ESC. 1:10



PERFIL LONGITUDINAL
ESC. 1:100



PLANTA CHAVE
ESC. 1:10000

DESENHOS DE REFERÊNCIA			
1510-19-200			
1510-19-201			
1510-19-202			
1510-19-203			
1510-19-204			
1510-19-205			
1510-19-206			

REV	DATA	TIPO	POR	DESCRIÇÃO DAS REVISÕES
2	26/09/83	E		ALTERAÇÃO NO TÍTULO DO DESENHO
1	08/02/83	C		INCLUSÃO DO SINTER FEED
0	18/11/82	B		EMIÇÃO INICIAL

EMIÇÕES			
TIPO DE EMISSÃO	(A) PRELIMINAR (B) PARA APROVAÇÃO (C) PARA CONHECIMENTO	(D) PARA COTAÇÃO (E) PARA CONSTRUÇÃO (F) CONFORME COMPRADO	(G) CONFORME CONSTRUÍDO (H) CANCELADO (I)

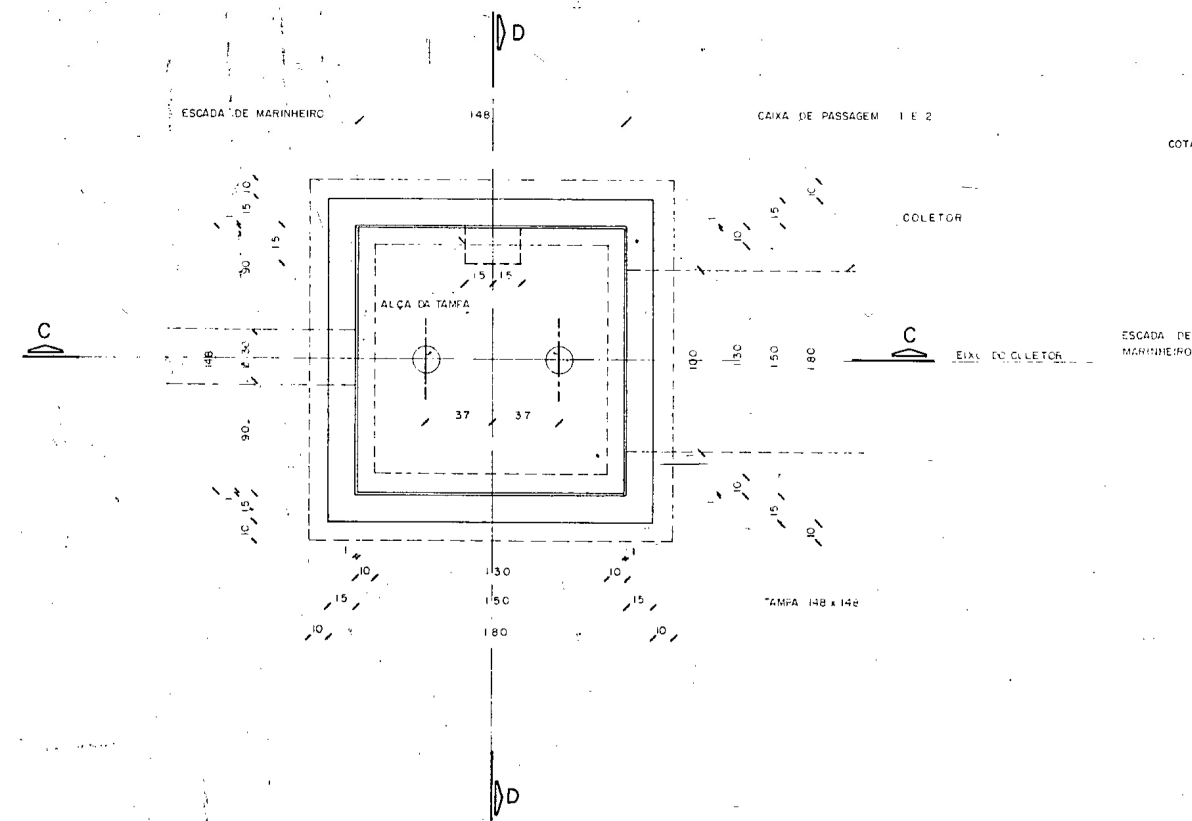
CVRD	Projeto Ferro Carajás
TECNOSOLO S.A.	MINA-PÁTIO DE ESTOCAGEM E CARREGAMENTO
RESPONSÁVEL	DATA
PROJ. <i>[Signature]</i>	18/11/82
DES. <i>[Signature]</i>	18/11/82
VER. <i>[Signature]</i>	18/11/82
APROV. <i>[Signature]</i>	18/11/82

ESCALA	Nº CVRD	REV.
1:10	1510-19-208	2
Nº PROJ.		206.703

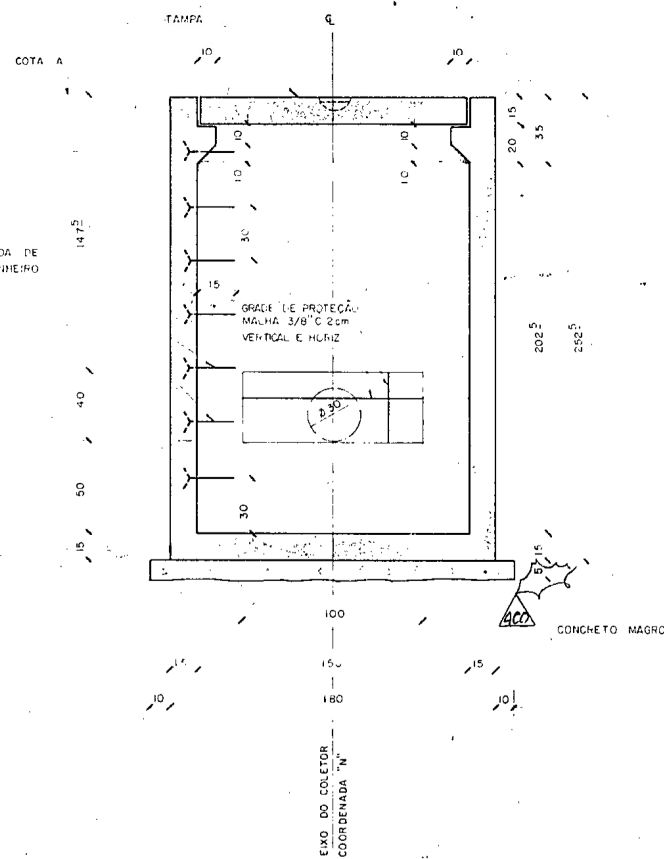
CVRD - SUC P/RJ
ARQUIVO TÉCNICO

CVRD-GE-OK

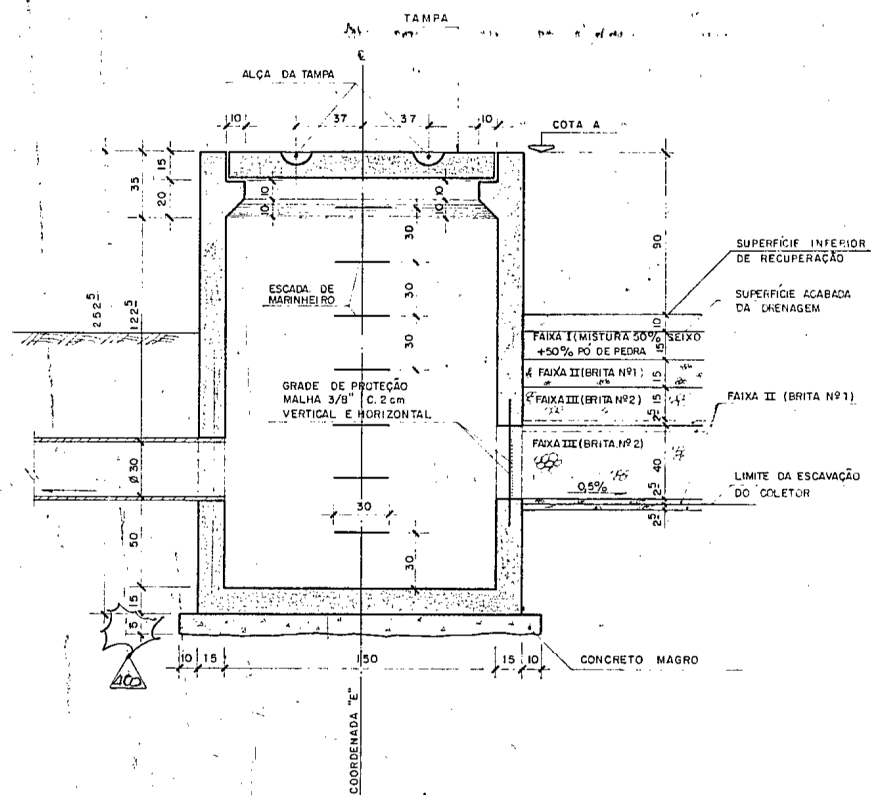
CAIXA 1 E CAIXA 2
PLANTA



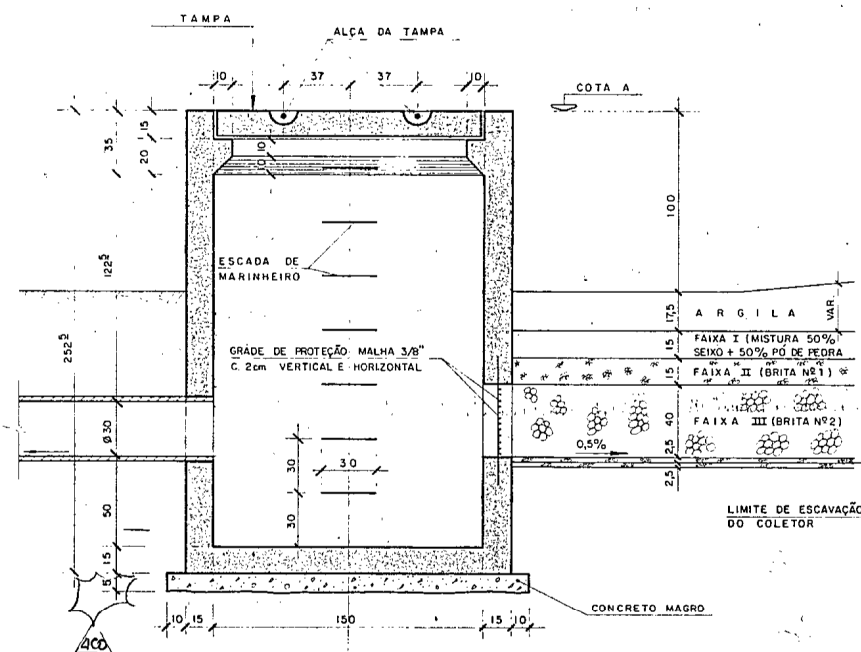
CAIXA 1 E CAIXA 2
CORTE - DD



CAIXA 1
CORTE - CC



CAIXA 2
CORTE - CC



NOTAS

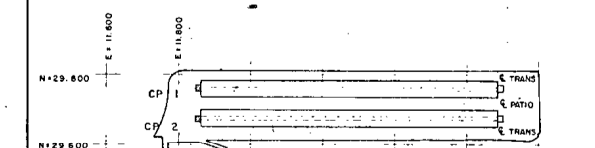
- 1- COTAS EM CENTÍMETRO, NÍVEIS EM METRO.
- 2- VER PLANTA DE SITUAÇÃO E SEÇÃO TIPO NOS DES N.º 1510-19-200 E 1510-19-201
- 3- VER PERFIL LONGITUDINAIS NOS EIXOS DOS COLETORES NOS DES N.º 1510-19-204 E 1510-19-205
- 4- A VAZÃO DE CONTRIBUIÇÃO PARA CADA UMA DAS CAIXAS É DE 1,56 l/s

MATERIAIS

- CONCRETO fcc > 150 kg/cm²
- AO CA-50
- CONCRETO MAGRO fcc > 110 kg/cm²
- TUBO CLASSE C-1

CAIXA Nº	COTA A	COORDENADAS NO EIXO	
		N	E
1	314,643	29755,475	11.943,343
2	312,244	29673,045	11.849,600

PLANTA CHAVE
ESC 1:10000



DESENHOS DE REFERÊNCIA

- 1510-19-200
- 1510-19-201
- 1510-19-204
- 1510-19-205

REV	DATA	TIPO	POR	DESCRIÇÃO DAS REVISÕES
401	16/11/82	G	ALL	Alterado tipo de emissão
400	16/11/82	E	ALL	onde indicado
4	29/10/84	E	ALL	ALTERAÇÃO NAS COTAS E COORDENADAS DAS CAIXAS DE PASSAGEM 1 E 2
3	25/07/84	E	ALL	REVISÃO GERAL
2	26/09/83	E	ALL	ALTERAÇÃO NO TÍTULO DO DESENHO
1	08/02/83	C	ALL	REVISÃO NAS COTAS
0	16/11/82	B	ALL	EMIÇÃO INICIAL

EMIÇÕES

TIPO DE EMISSÃO	(A) PRELIMINAR	(B) PARA APROVAÇÃO	(C) PARA CONSTRUÇÃO	(D) PARA CONHECIMENTO	(E) PARA COTAÇÃO	(F) PARA CONSTRUÇÃO	(G) CONFORME CONSTRUÍDO	(H) CANCELADO	(I) EM CONSTRUÇÃO
-----------------	----------------	--------------------	---------------------	-----------------------	------------------	---------------------	-------------------------	---------------	-------------------

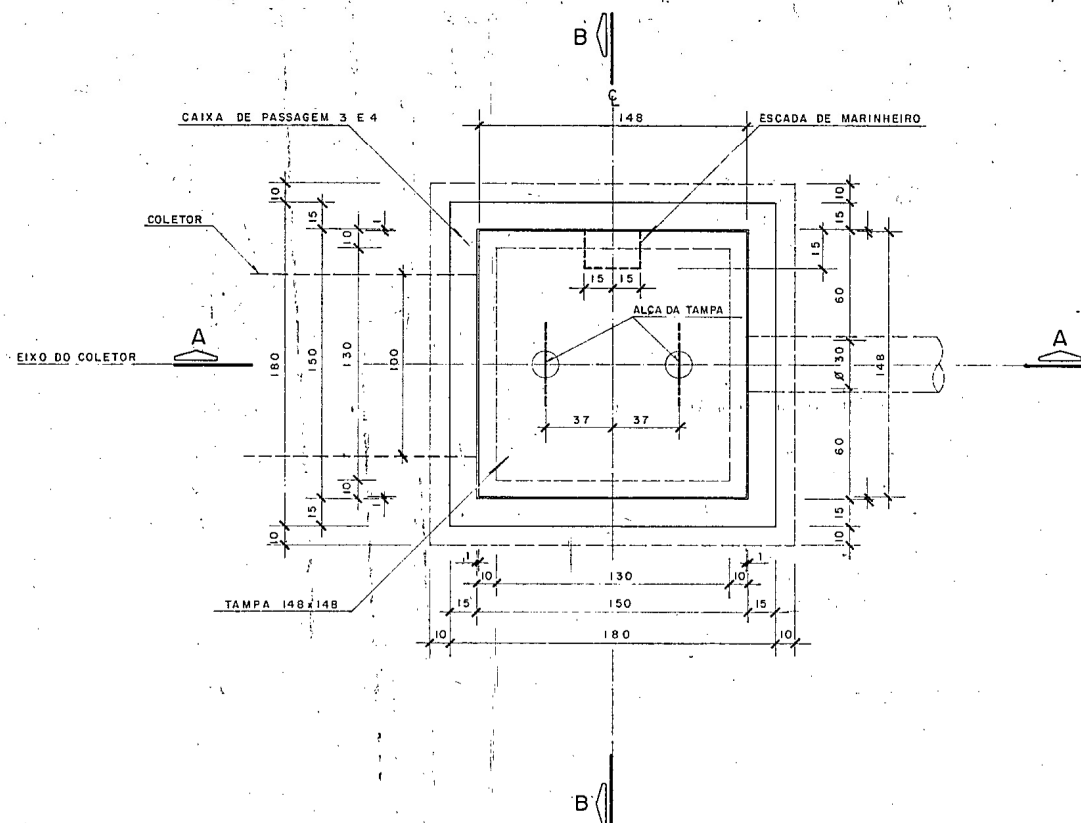
CVRD		Projeto Ferro Carajás	
TECNOLOGIA S.A.		MINA-PÁTIO DE ESTOCAGEM E CARREGAMENTO	
DRENAGEM DAS PILHAS DE MINÉRIO		CAIXAS DE PASSAGEM 1 e 2	
RESPONSÁVEL	DATA	ESCALA	N.º CVRD
PROJ. ALL	16/11/82	1:20	1510-19-209
DES. ALL	16/11/82		N.º PROJ. 206.704
VER. ALL	16/11/82		REV. 401
APROV. ALL	16/11/82		

ARQUIVO TÉCNICO
CVRD / SUCAR

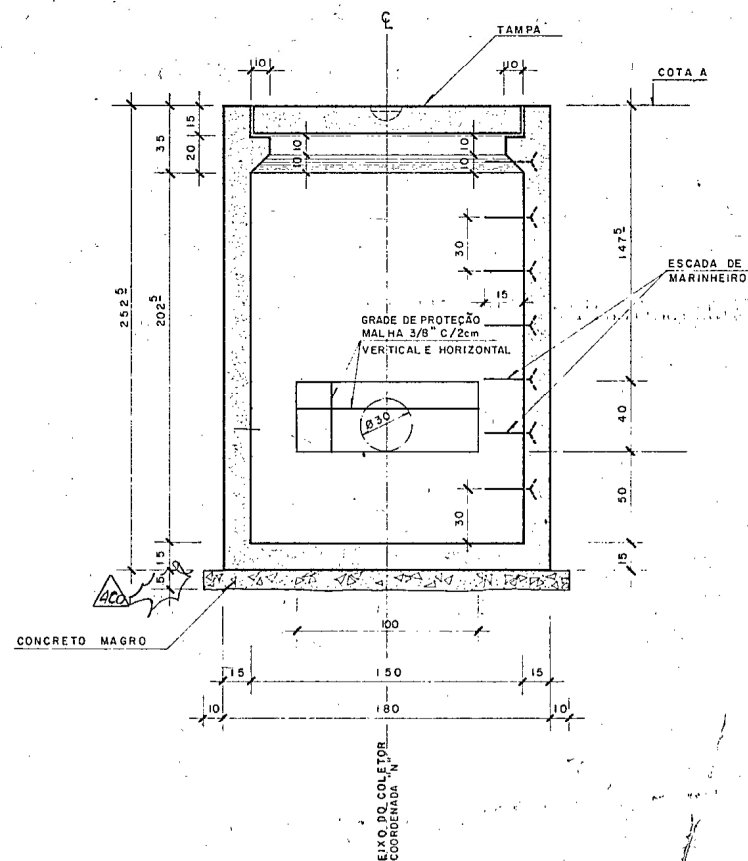
NOTAS

- 1- COTAS EM CENTÍMETRO, NÍVEIS EM METRO.
- 2- VER PLANTA DE SITUAÇÃO E SEÇÃO TIPOS NO DES. Nº 1510-19-200 E 1510-19-201.
- 3- VER PERFIS LONGITUDINAIS NOS EIXOS DOS COLETORES NOS DES Nº 1510-19-204 E 1510-19-205
- 4- A VAZÃO DE CONTRIBUIÇÃO PARA CADA UMA DAS CAIXAS É DE 1,56 l/s.

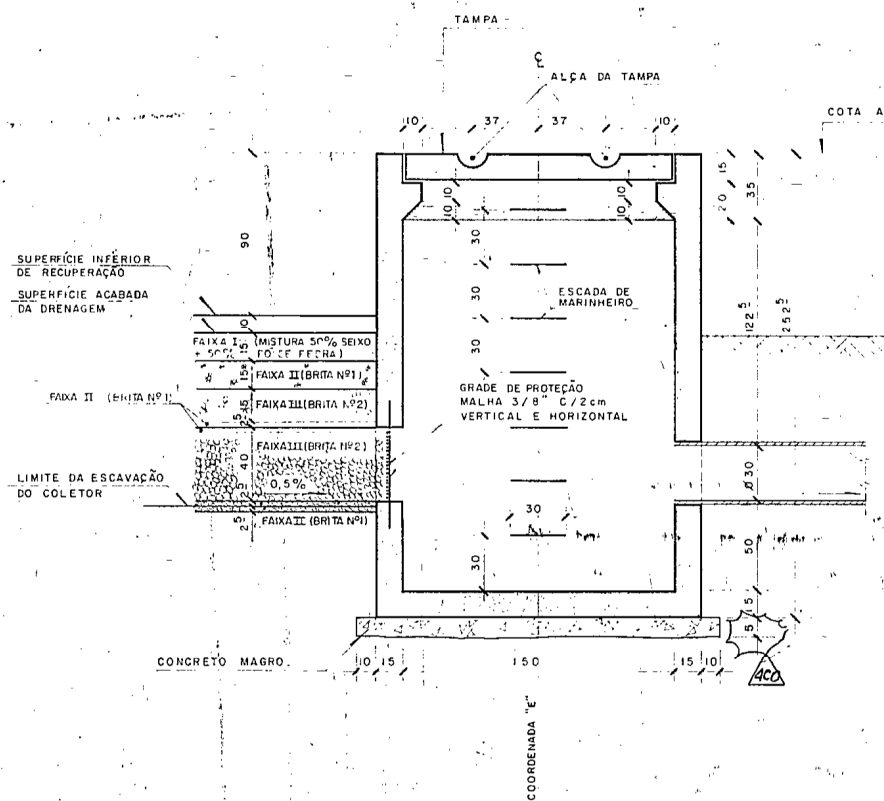
PLANTA



CORTE B-B



CORTE A-A

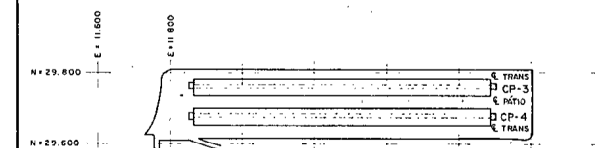


MATERIAIS

- CONCRETO : fck ≥ 150kg/cm²
- AÇO : CA-50
- CONCRETO MAGRO : fck ≥ 110kg/cm²
- TUBO : CLASSE C-1

CAIXA Nº	COTA A	COORDENADAS NO EIXO	
		N	E
3	314,210	29.755,475	12.686,695
4	314,537	29.673,045	12.621,154

PLANTA CHAVE
ESC. 1:10.000



DESENHOS DE REFERÊNCIA

- 1510-19-200
- 1510-19-201
- 1510-19-204
- 1510-19-205

REV.	DATA	TIPO	POR	DESCRIÇÃO DAS REVISÕES
401	14/08/84	S	Bi	Alterado tipo de emissão.
400	27/09/83	E	Bi	onde indicado.
4	25/10/84	E	Bi	ALTERAÇÃO NA LOCALIZAÇÃO E CÔTAS DA CAIXA DE PASSAGEM 4
3	25/07/84	E	Bi	REVISÃO NAS COORDENADAS E CÔTAS
2	26/09/83	E	Bi	ALTERAÇÃO NO TÍTULO DO DESENHO
1	9/2/83	C	Bi	REVISÃO NAS CÔTAS
0	18/11/82	B		EMIÇÃO INICIAL

TIPO DE EMISSÃO	EMISSÕES		
	(1) PRELIMINAR	(2) PARA COTAÇÃO	(3) CONFORME CONSTRUÍDO
	(4) PARA APROVAÇÃO	(5) PARA CONSTRUÇÃO	(6) CANCELADO
	(7) PARA CONHECIMENTO	(8) CONFORME COMPRADO	(9)

CVRD Projeto Ferro Carajás

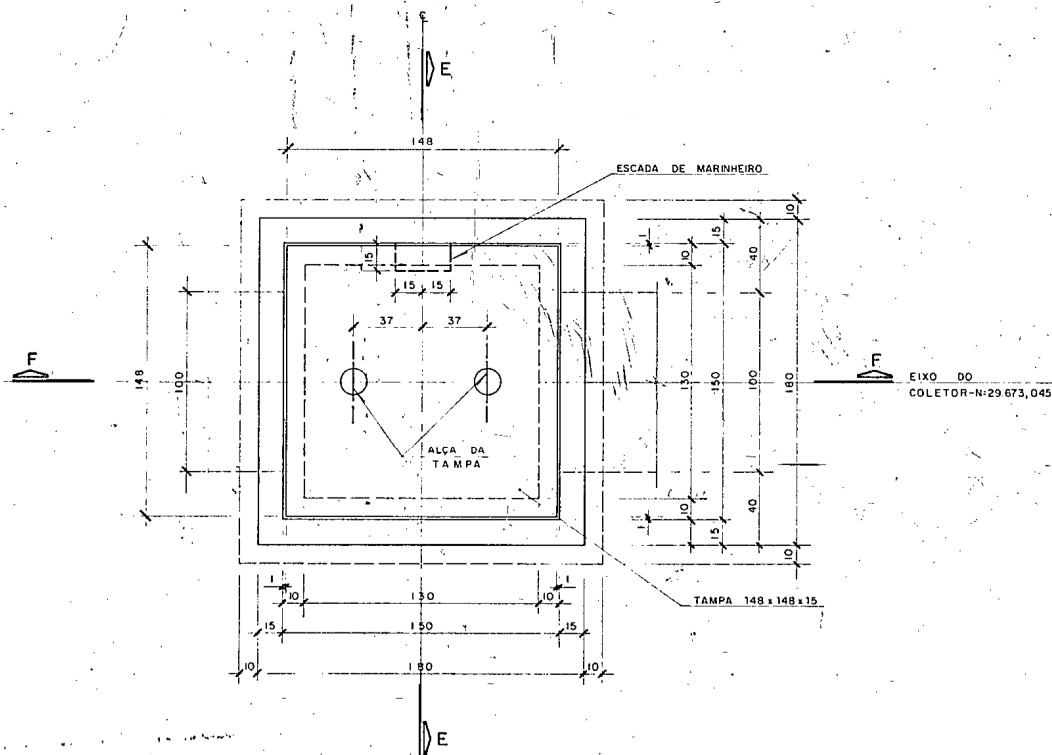
TECNOSOLO S.A. MINA-PÁTIO DE ESTOCAGEM E CARREGAMENTO DRENAGEM DAS PILHAS DE MINÉRIO CAIXAS DE PASSAGEM 3 e 4

RESPONSÁVEL	DATA	ESCALA	Nº CVRD	REV
PROJ.	18/11/82	1:20	1510-19-210	401
DES.	18/11/82		Nº PROJ.	
VER.	18/11/82		206.705	
APROV.	18/11/82			

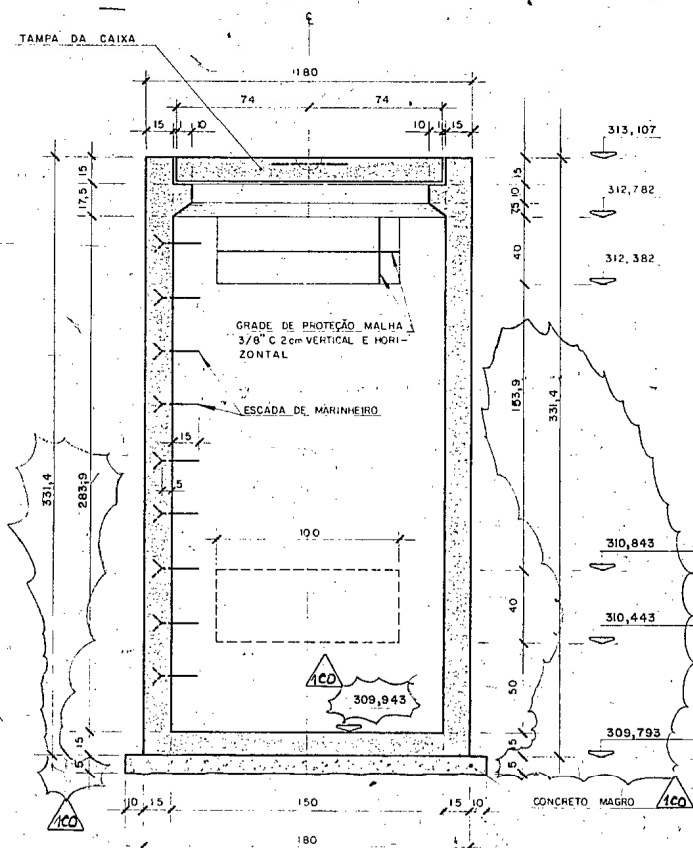
ARQUIVO TÉCNICO
CVRD / SUCAR

CIVIL ENGENHEIRO

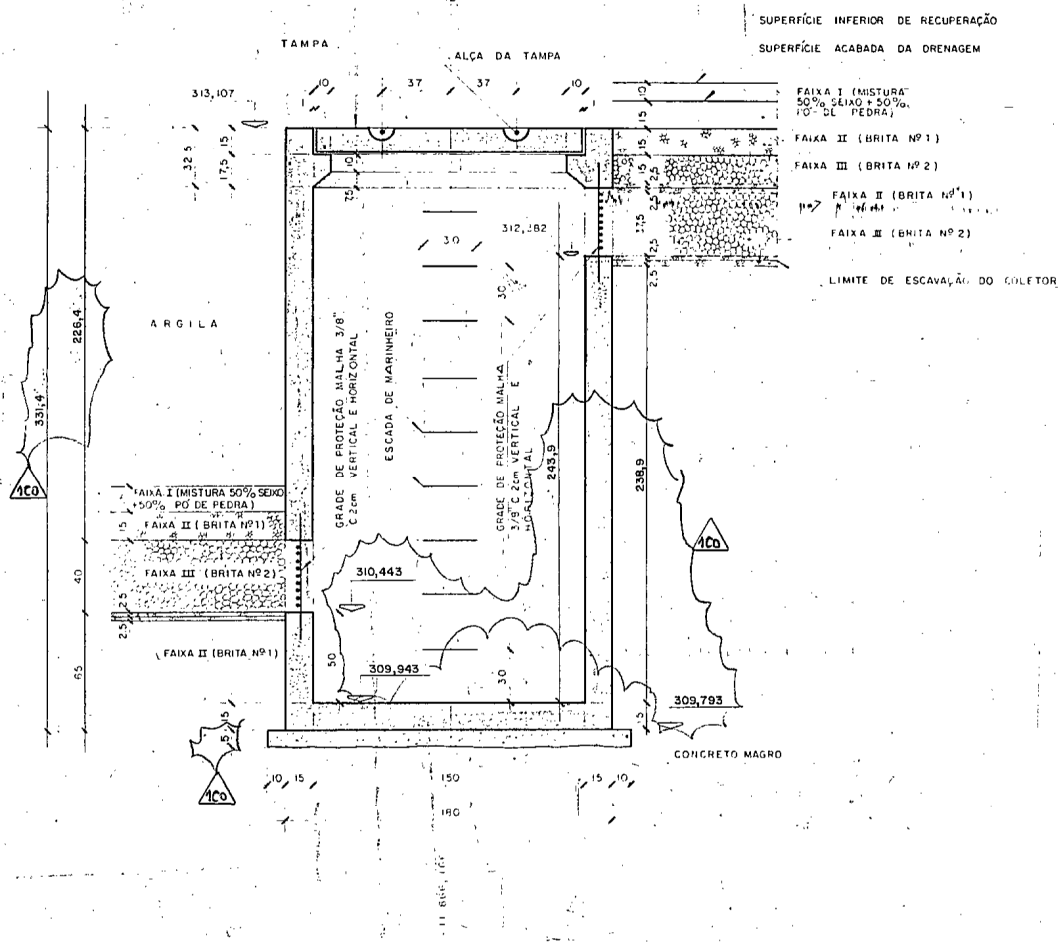
PLANTA



CORTE-EE



CORTE-FF



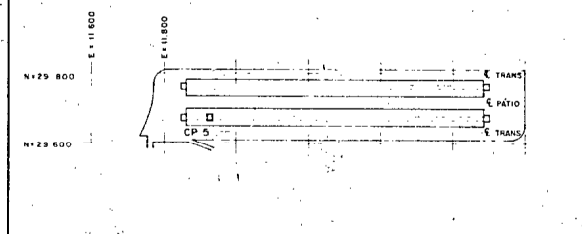
MATERIAIS

- CONCRETO fck ≥ 150 kg/cm²
- ACO CA-50
- CONCRETO MAGRO fck ≥ 110 kg/cm²

NOTAS

- 1- COTAS EM CENTÍMETRO, NÍVEIS EM METRO.
- 2- VER PLANTA DE SITUAÇÃO E SEÇÃO TIPO NOS DESº Nº 1510-19-200
- 3- VER PERFIL LONGITUDINAL NO EIXO DO COLETOR NO DESº Nº 1510-19-204
- 4- A VAZÃO DE CONTRIBUIÇÃO PARA A CAIXA É DE 1,56 l/s.

PLANTA CHAVE



DESENHOS DE REFERÊNCIA

1510-19-200
1510-19-205

REV.	DATA	TIPO	POR	DESCRIÇÃO DAS REVISÕES
1	29/10/84	E	ALB	ALTERAÇÃO NAS COTAS
0	26/7/84	E	ALB	EMIÇÃO INICIAL

TIPO DE EMISSÃO	(A) PRELIMINAR	(B) PARA APROVAÇÃO	(C) PARA CONHECIMENTO	(D) PARA COTAÇÃO	(E) PARA CONSTRUÇÃO	(F) CONFORME COMPRADO	(G) CONFORME CONSTRUÍDO	(H) CANCELADO	(I)

CVRD		Projeto Ferro Carajás	
TECNOLOGIA S.A.		MINA-PÁTIO DE ESTOCAGEM E CARREGAMENTO	
DRENAGEM DAS PILHAS DE MINÉRIO CAIXA DE PASSAGEM 5		ESCALA 1:20	
RESPONSÁVEL	DATA	Nº CVRD	REV
PROJ. <i>ALB</i>	26/07/84	1510-19-211	101
DES. <i>Carajás</i>	26/07/84	Nº PROJ.	
VER. <i>dom</i>	26/07/84	211240	
APROV. <i>Carajás</i>	26/07/84		