



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

---

**TESE DE DOUTORADO**

**A UTILIZAÇÃO DE UMA CAMADA DE SOLO COMPACTADO COMO  
REVESTIMENTO IMPERMEABILIZANTE DE FUNDO DE BACIAS DE  
DISPOSIÇÃO DE LAMA VERMELHA PRODUZIDA EM BARCARENA-PA**

Tese apresentada por:

**RISETE MARIA QUEIROZ LEÃO BRAGA**

Orientador: Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa (UFPA)

Coorientador: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Maria Eugênia Gimenez Boscov (USP)

---

Belém  
2010

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação(CIP)  
Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão

---

B813u Braga, Risete Maria Queiroz Leão

A utilização de uma camada de solo compactado como revestimento impermeabilizante de fundo de bacias de disposição de lama vermelha produzida em Barcarena-PA / Risete Maria Queiroz Leão Braga; Orientador: Marcondes Lima da Costa; Coorientador: Maria Eugênia Gimenez Boscov – 2010

xviii, 153 f. : il.

Tese (Doutorado em Geoquímica e Petrologia) – Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

1. Barreira impermeabilizante. 2. Transporte de poluentes. 3. Lama vermelha. 4. Ensaios de compatibilidade. 5. Barcarena (PA). I. Universidade Federal do Pará II. Costa, Marcondes Lima da, *orient.* III. Boscov, Maria Eugênia Gimenez, *coorient.* IV. Título.

CDD 20° ed.: 363.7285098115

---



Universidade Federal do Pará

Instituto de Geociências

Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

**A UTILIZAÇÃO DE UMA CAMADA DE SOLO COMPACTADA  
COMO REVESTIMENTO IMPERMEABILIZANTE DE FUNDO  
DE BACIAS DE DISPOSIÇÃO DE LAMA VERMELHA  
PRODUZIDA EM BARCARENA-PA**

TESE APRESENTADA POR

**RISETE MARIA QUEIROZ LEÃO BRAGA**

Como requisito parcial à obtenção do Grau de Doutora em  
Ciências na Área de **GEOQUÍMICA E PETROLOGIA**

Data de Aprovação: **11 / 06 / 2010**

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. MARCONDES LIMA DA COSTA  
(Orientador-UFPA)

Prof. Dr. HENRIQUE KAHN  
(Membro-USP)

Prof. Dr. ORENCIO MONJE VILAR  
(Membro-USP)

Prof. Dr. OSCAR JESUS CHOQUE FERNANDEZ  
(Membro-IFPA)

Prof. Dr. ROBERTO DE FREITAS NEVES  
(Membro-UFPA)



Aos meus pais (José Emmanuel e Maria José)  
Rosângela e Emmanuel (irmãos)

## AGRADECIMENTOS

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, especialmente:

A Deus força suprema e divina que me proporcionou mais esta oportunidade de aprendizado e crescimento.

Ao Professor Dr. Marcondes Lima da Costa pela orientação do trabalho, mas principalmente pelo enriquecimento do meu currículo, convívio, amizade e conselhos.

À Professora Dra. Maria Eugênia pela coorientação da parte geotécnica, mas também pelo discernimento entre o lado profissional e a nossa grande amizade ao longo desses 20 anos.

A minha mãe pelo carinho, incentivo e compreensão por muitas ausências.

À FUNTEC/SECTAM pelo apoio financeiro através do Proc nº 00483/2004.

À FAPESPA/FADESP/UFGA/CNPq pelo apoio financeiro-Projeto PRONEX (convênio 2271).

À Eletronorte pelo apoio financeiro na confecção da célula de adensamento em aço inox - Projeto de P&D-Eletronorte: Sistema de segurança da UHE–Tucruí. Convênio Faculdade Ideal e UFGA (Prof. Dr. Luis Veloso) e análises químicas por ICP-MS realizadas pela química Darilena Porpino.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) pela bolsa de doutorado sanduíche a mim concedida.

Aos Laboratórios de Mecânica dos Solos da Universidade de São Paulo (Prof. Dr. Fernando Marinho pela cessão dos equipamentos e os laboratoristas Joaquim, em especial ao Antônio pela grande ajuda em todos os ensaios durante o meu doutorado sanduíche); da Universidade da Amazônia (Prof. MSc Wandemir Mata pela cessão do equipamento TriFlex-2 e os técnicos Ailton e Beto); da Universidade Federal do Pará (aos técnicos Natalino e Maneca) e da Faculdade Ideal (o técnico Liomar pela dedicação as inúmeras montagens de ensaios).

Aos Laboratórios de Materiais e Componentes (LABMAT) da EPUSP- pelas análises granulométricas por difração à laser e análises com o reômetro (Professores Dr. Wanderley John e Dr. Rafael Pillege e o doutorando Cesar Romano, a gentileza em pessoa).

Ao Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da EPUSP (Prof. Dr. Henrique Kahn e Mariane Brunatti pela atenção durante as análises de MEV-SED).

Ao Laboratório de Difração de Raios-x do Instituto de Geociência na pessoa do Prof. Dr. Rômulo Angélica e Cristiane Pereira pela atenção em todas as análises solicitadas.

Ao Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG) pelas análises químicas com o fotômetro de chama, em especial ao pesquisador Francisco Berredo e a química Ieda.

Aos Laboratórios de Análises Químicas, Laminação e Sedimentologia da Universidade Federal do Pará (Os técnicos Natalino Valente, Joelma e Lopes).

À Cleida, secretária do CPPG, pela sua eficiência em tudo o que lhe foi solicitado.

Aos amigos Francisco Berredo, Henrique Almeida, Ieda, Marlis Requelme e Socorro Progene nas discussões do texto, interpretação dos difratogramas de raios-x, sugestões nas confecções de gráficos, mas, sobretudo na doce companhia ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas do Grupo de Mineralogia e Geoquímica Aplicada Suyanne Flávia, Monia, Glaice (o trio ternura), Sergio Brazão, Ecilene Menezes, Thais Sanjard, Ana Cristina Resque, Jucilene, José Rego, Gilberto, Gisele e Cleise.

As alunas de iniciação científica Rafaela Facíola, Rafaela Silveira, Sergiana Nobre, Fernanda Lobão, Cássio Mendes e Aline Mota pela ajuda na coleta do solo, preparação e realização dos ensaios de permeabilidade, granulometria e colapso.

Às amigas de todas as horas Dayse Goveia, Labibe Menezes, Lenita Cabral, Marlis Requelme e Neyla Maneschy.

Aos colegas da CAE/UEPA e professores da FACI pelo incentivo e compreensão.

Ao André Luis, Aldenor de Jesus e meu amigo Alexandre Caleja pela confecção de mapas e figuras.

## RESUMO

As especificações técnicas e o estudo do transporte de massa em meios porosos para controle ambiental apontam à necessidade de uma barreira impermeabilizante de fundo, geralmente composta por uma geomembrana sobreposta a uma camada de solo compactado (“compacted clay liner”), para a disposição de resíduos sólidos em terreno natural. Em 1995, entrou em atividade no Pará a unidade industrial da Alumina do Norte do Brasil S/A, para produzir e comercializar alumina ( $Al_2O_3$ ) para a Albrás Alumínio Brasileiro S/A. Os rejeitos dessa indústria, conhecidos como “lama vermelha” (LV), são gerados pela digestão da bauxita por soluções de hidróxido de sódio (Processo Bayer) e dispostos em bacias impermeabilizadas por geomembranas. A fase sólida da LV é constituída por hematita, anatásio e goethita (resíduos da bauxita) e sodalita (formada durante o processo). A fase líquida encontra-se inicialmente em pH 12 e é rica em sódio solúvel. Neste trabalho estudou-se a viabilidade técnica da utilização de um solo local no revestimento das bacias de disposição, considerando capacidade de impermeabilização e compatibilidade com a LV. A investigação experimental consistiu na caracterização física, química e mineralógica, e na determinação das propriedades geotécnicas (compactação, permeabilidade e colapso) e ambientais (lixiviação e difusão) do solo. O estudo mostrou que o solo utilizado equivale aos Latossolos Amarelos da Amazônia: é silto-arenoso, amarelo, composto predominantemente de quartzo, caulinita e menores concentrações de goethita/hematita e anatásio, e rico em  $SiO_2$  e  $Al_2O_3$  além de  $Fe_2O_3$  e  $TiO_2$ . O solo compactado apresentou coeficiente de permeabilidade menor que  $10^{-9}$  m/s à água e a soluções de hidróxido de sódio nas concentrações de 1,23% e 5%. Análises por MEV/SED do solo compactado em contato com a LV por um ano identificaram a difusão de Na, aumentando em 1950% sua concentração no solo, ainda assim sem atingir valores que impliquem contaminação da água do solo. Os ensaios edométricos revelaram que o solo compactado na umidade ótima torna-se muito compressível quando percolado por soluções de NaOH, constatação confirmada por ensaios de potencial zeta, reometria, distribuição granulométrica e limites de consistência com diversas soluções, os quais evidenciaram a dispersão das partículas sólidas pelo hidróxido de sódio, acarretando alteração no comportamento mecânico do solo. Conclui-se que infiltrações de soluções cáusticas podem conduzir a uma diminuição do fator de segurança de barragens e “liners” em áreas de disposição de lama vermelha, quando as geomembranas apresentarem defeitos ou furos.

**Palavras-chave:** barreira impermeabilizante, transporte de poluentes, lama vermelha, sódio, compatibilidade, colapso



## ABSTRACT

International technical specifications and the study of mass transport through porous media for environmental control point out to the need of bottom liners, usually composed of a geomembrane associated to a compacted clay liner (CCL), for waste disposal in soil. In 1995, an industrial unit of Alumina of Brasil S/A started activities in the state of Para, Brazil, to produce alumina,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , for Albrás Alumínio do Brasil S/A. The wastes of this industry, known as "red mud", are generated by the digestion of bauxite by solutions of sodium hydroxide (Bayer process) and disposed in basins lined by geomembranes. The solid phase of red mud is constituted by hematite, anatase and goethite (residues of bauxite) and sodalite (formed during the industrial process); the liquid phase, initially at pH 12, is rich in soluble sodium. This research investigated the technical feasibility of the utilization of a local soil in the construction of a CCL for the disposal basins, considering its impermeabilization capacity and compatibility with the red mud. The experimental investigation consisted of the physical, chemical and mineralogical characterization and determination of geotechnical (compaction, permeability and collapse) and environmental properties (leaching and diffusion) of the soil. The study showed that the used soil is equivalent to Yellow Latosols of Amazonia: it is silt-sandy, yellow, composed predominantly of quartz, kaolinite and smaller concentrations of goethite/hematite and anatase, and therefore rich in  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  besides  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  and  $\text{TiO}_2$ . The compacted soil, submitted to seepage of water and solutions of sodium hydroxide at concentrations of 1.23% and 5%, presented permeability coefficient smaller than  $10^{-9}$  m/s. SEM/EDS analyses of the compacted soil in contact with red mud for over a year identified the diffusion of Na, which content in the soil increased 1950%, however without reaching limit contamination levels. Oedometric collapse tests revealed that the soil compacted in the optimum water content under Proctor standard effort becomes remarkably compressible when saturated with NaOH solutions, which was confirmed by zeta potential, rheometer, and characterization tests with NaOH solutions: solid particles are dispersed and consequently the geo-mechanical behavior of the soil alters by contact with NaOH solutions. The results lead to the conclusion that infiltration of caustic solutions can cause a decrease of the safety factor of dams and CCLs in red mud disposal areas, when geomembranes present defects or holes.

**Key-words:** compacted clay liners, contaminant transport, red mud, sodium, compatibility tests, collapse.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 -	Revestimentos de fundo de áreas de disposição de resíduos perigosos segundo algumas legislações internacionais (modificado de Manassero et al, 1997).....	7
Figura 2.2 -	Revestimentos de fundo de áreas de disposição de resíduos não perigosos segundo algumas legislações internacionais (modificado de Manassero ET AL, 1997) .....	8
Figura 2.3 -	Curva de compactação do solo (Massad, 2003).....	12
Figura 2.4 -	Variação do coeficiente de permeabilidade do solo em função do teor de umidade de compactação (Lambe, 1958).....	13
Figura 2.5 -	Permeabilidade em função do volume percolado para NaOH em pH=13 (adaptado de Leintz et al, 1985).....	19
Figura 2.6 -	Coefficiente de permeabilidade argila caulínica em função do tempo durante a percolação de diferentes líquidos (adaptado de Simons & Reuter, 1985).....	21
Figura 2.7 -	Taxas de lixiviação de alumínio e sílcio em argila caulínica durante percolação de diferentes líquidos (adaptado de Simons & Reuter, 1985)...	21
Figura 2.8 -	Expansão de amostras amolgadas e indeformadas pela percolação de soda cáustica (adaptado de Rao % Subba Rao, 1994).....	23
Figura 2.9 -	Ensaio edométrico para investigação de colapso: (a) simples e (b) duplo (Jennings & Knight, 1957).....	28
Figura 2.10 -	Colapso em ensaio edométrico duplo (Jennings & Knight, 1957).....	29
Figura 2.11 -	Colapso no ensaio edométrico simples (Lutenegger & Saber, 1988).....	30
Figura 2.12 -	Compressibilidade em função do pH do líquido de percolação (Cruz et al, 1994) .....	33
Figura 2.13 -	Colapsibilidade em função do pH do líquido de percolação (Cruz et al, 1994) .....	33
Figura 2.14 -	Influência do líquido no colapso (Ferreira, 1995).....	34
Figura 3.1 -	Diagrama do processo Bayer para produção de alumina a partir da bauxita (Alunorte, 2010).....	39
Figura 3.2 -	Localização da área de estudo .....	43
Figura 3.3 -	Localização das principais drenagens na região de Barcarena e sua sensibilidade às bacias de rejeitos (modificado de Pacheco Junior, 2003).....	44
Figura 3.4 -	Produção anual de bauxita, alumina e de lama vermelha (Fonte: (Abal, 2010).....	45
Figura 3.5 -	Expansão da área da bacia de disposição .....	47
Figura 3.6 -	Bacia preenchida com lama vermelha .....	47

Figura 3.7 -	Disposição da lama vermelha: A) no momento de lançamento; B) após certo tempo de exposição ao sol, sofrendo evaporação e formação de uma película de NaCl .....	47
Figura 3.8 -	Bacia de disposição de lama vermelha com acúmulo de água de precipitação pluviométrica .....	47
Figura 4.1 -	Localização dos perfis RI-1, RI-2 e RI-3 e indicação dos pontos de coleta de amostras para o estudo.....	52
Figura 4.2 -	Permeâmetro Tri-Flex 2 .....	56
Figura 4.3 -	Equipamento Tri-Flex 2 com adaptação para ensaio de coluna .....	58
Figura 4.4 -	Curva de saturação do poluente (modificado de Freez & Cherry, 1979).....	58
Figura 4.5 -	Preparação de amostras de solo com concentrações de 0,12%, 0,56%, 1,23%, 1,89%, 2,5% e 5% de NaOH para análise granulométrica por difração a laser .....	60
Figura 4.6 -	Curva de titulação isoelétrica (Teixeira, 2009).....	61
Figura 4.7 -	Célula em aço inox para ensaios edométricos .....	63
Figura 4.8 -	Célula de difusão .....	65
Figura 4.9 -	Preparação de ensaios de difusão .....	65
Figura 4.10 -	Concentrações no ensaio de difusão no instante inicial e em um instante t (Bosco, 1997).....	66
Figura 4.11 -	Conjunto LV e solo .....	69
Figura 4.12 -	Ensaio de difusão .....	69
Figura 4.13 -	Preparação de amostra para análise por MEV.....	70
Figura 4.14 -	Desenho esquemático da distribuição espacial dos pontos de análises químicas por MEV/SED da amostra DLV-3 .....	71
Figura 5.1 -	Localização e aspectos gerais dos perfis de solos e lateríticos derivados dos sedimentos Barreiras na região de Barcarena .....	74
Figura 5.2 -	Distribuição granulométrica nos perfis de solos .....	76
Figura 5.3 -	Classificação granulométrica dos solos dos perfis investigados segundo os diagramas de Shepard .....	77
Figura 5.4 -	Principais minerais identificados no Perfil RI-1 por DRX .....	79
Figura 5.5 -	Principais minerais identificados no Perfil RI-2 por DRX .....	80
Figura 5.6 -	Principais minerais identificados no Perfil RI-3 por DRX .....	81
Figura 5.7 -	Principais constituintes minerais identificados por difração de raios-X.....	82
Figura 5.8 -	Distribuição das concentrações dos elementos maiores e menores (peso em %) nos perfis RI-1, RI-2 e RI-3 .....	84
Figura 5.9 -	Comparação entre as concentrações dos elementos-traço nos perfis RI-1, RI-2 e RI-3, indicando a grande semelhança entre eles, com exceção dos elementos Cu, Zn, As, Mo e Hg com maior divergência, que são	84

elementos de maior mobilidade .....	
Figura 5.10 - Comparação entre as concentrações dos ETR nos perfis RI-1, RI-2 e RI-3, indicando a grande semelhança entre os perfis .....	85
Figura 5.11 - Normalização dos elementos-traço dos perfis RI-1, RI-2 e RI-3 em relação à CTS. Novamente Cu, Zn, As, Mo e Hg se destacam como os mais divergentes .....	85
Figura 5.12 - Normalização dos ETR dos perfis RI-1, RI-2 e RI-3 em relação à CTS ...	85
Figura 5.13 - Confrontação entre a composição química do solo local selecionado para construção de CCL, bauxita e LV com base nos teores de SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaO, Na <sub>2</sub> O e TiO <sub>2</sub> (em %) .....	87
Figura 5.14 - Normalização de SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaO, Na <sub>2</sub> O e TiO <sub>2</sub> da LV em relação a bauxita .....	88
Figura 5.15 - Concentração dos elementos-traço do solo para CCL, bauxita e LV .....	88
Figura 5.16 - Normalização do conteúdo dos elementos-traço da LV em relação a bauxita .....	88
Figura 5.17 - Concentração dos ETR do solo para CCL, bauxita e LV .....	89
Figura 5.18 - Normalização das concentrações dos ETR da LV relativa às bauxitas.....	89
Figura 5.19 - Curvas granulométricas das amostras de solo .....	91
Figura 5.20 - Curvas de compactação do solo para estudo de CCL .....	93
Figura 5.21 - Ensaios de permeabilidade: A) PM-1; B) PM-2; C) PM-3; D) PM-4 e E) PM-5 e F) PM-6 .....	96
Figura 5.22 - Curvas de permeabilidade em função do volume percolado para água e solução de NaOH com concentração de 5% (PM-4) .....	99
Figura 5.23 - Concentração efluente relativo em função do volume percolado: A) PM-4; B) PM-5 .....	100
Figura 5.24 - Curvas de permeabilidade em função do volume percolado para água e solução de NaOH com concentração de 1,23% (PM-5) .....	101
Figura 5.25 - Curvas granulométricas das amostras de solo com defloculante, sem defloculante e com uma solução de NaOH .....	102
Figura 5.26 - Curvas granulométricas das amostras de solo com água, defloculante e soluções com concentrações de 0,12%, 0,56%, 1,23%, 1,89%, 2,5% e 5% de NaOH .....	103
Figura 5.27 - Potencial zeta e condutividade do solo .....	104
Figura 5.28 - Deformação volumétrica ( $\epsilon_v$ ) em função da tensão vertical aplicada nos ensaios edométricos simples - solo inundado com água .....	107
Figura 5.29 - Deformação volumétrica ( $\epsilon_v$ ) em função da tensão vertical aplicada ( $\sigma_v$ ) nos ensaios edométricos simples - solo inundado com solução de NaOH à concentração de 0,12% .....	107
Figura 5.30 - Deformação volumétrica ( $\epsilon_v$ ) em função da tensão vertical aplicada nos ensaios edométricos simples - solo inundado com solução de NaOH à	108

concentração de 1,23% .....	
Figura 5.31 - Deformação volumétrica ( $\epsilon_v$ ) em função da tensão vertical aplicada nos ensaios edométricos simples – solo inundado com solução de NaOH à concentração de 5%.....	108
Figura 5.32 - Potencial de colapso em função da tensão vertical nos ensaios edométricos simples com inundação por água e soluções de NaOH .....	109
Figura 5.33 - Deformação volumétrica ( $\epsilon_v$ ) em função da tensão vertical aplicada ( $\sigma_v$ ) nos ensaios edométricos duplo: solo natural; inundado com água; inundado nas concentrações de 0,12%, 1,23% e 5% de NaOH .....	111
Figura 5.34 - Potencial de colapso em função da tensão vertical nos ensaios edométricos duplos com inundação por água e soluções de NaOH .....	111
Figura 5.35 - Difusão de Na: A) nos reservatórios DSS-1 a DSS-3 e DSS-8 ( $C_0 = 35$ g/L); B) nos reservatórios DSS-4 a DSS-6 ( $C_0 = 28$ g/L) e C) na água intersticial do solo do DSS-4 .....	115
Figura 5.36 - Normalização da concentração em um tempo $t$ ( $C$ ) em relação à concentração da solução de partida em um tempo $t=0$ ( $C_0$ ) .....	116
Figura 5.37 - Estimativa de $D$ e $K_d$ para o ensaio DSS-4 pelo programa POLLUTE: (A) reservatório; (B) solo .....	117
Figura 5.38 - Distribuição das concentrações de $Al_2O_3$ , $SiO_2$ , $Fe_2O_3$ , $TiO_2$ e $Na_2O$ (em %) no solo ao longo da profundidade em ensaios de difusão (DLV-1) .....	119
Figura 5.39 - Distribuição de $SiO_2$ , $Al_2O_3$ , $Fe_2O_3$ , $TiO_2$ e $Na_2O$ (em %) no solo ao longo da profundidade em ensaios de difusão (DLV-2) .....	119
Figura 5.40 - Análise por MEV: A) solo sem compactação; B) Ensaio Edométrico - natural (ED); C) Difusão: sódio solúvel no solo (DSS); D) ensaio edométrico – 5% NaOH (ES); E) Difusão: Lama vermelha no solo (DLV) .....	125
Figura 5.41 - Análise por MEV-SED para o corpo-de-prova DLV-3: Solo compactado: A) topo, B) meio e C) base; D) Interface e E) LV.....	126
Figura 5.42 - Ensaio de reometria .....	127

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 -	Vazões calculadas para CCLs, geomembranas e sistemas compostos .....	6
Tabela 2.2 -	Valores típicos de coeficiente de permeabilidade para alguns materiais.....	10
Tabela 2.3 -	Valores máximos de gradiente hidráulicos em ensaios de permeabilidade.	11
Tabela 2.4 -	Resultados dos ensaios de permeabilidade (adaptado de Leintz et al, 1985) .....	19
Tabela 2.5 -	Permeabilidade em função da concentração de NaOH (Pavilonsk, 1985) .....	20
Tabela 2.6 -	Propriedades físicas e químicas dos materiais analisados (adaptado de Rao & Subba Rao, 1984).....	23
Tabela 2.7 -	Métodos para identificação da colapsividade (Ferreira, 1985) .....	27
Tabela 2.8 -	Classificação da colapsividade nas obras de engenharia (Jennings & Knight, 1975).....	30
Tabela 2.9 -	Grau de gravidade do colapso (Lutenegger e Saber, 1988).....	31
Tabela 3.1 -	Composição química média da bauxita consumida pela Alunorte (Alunorte, 2005) .....	38
Tabela 3.2 -	Composição química (porcentagem em peso) de lamas vermelhas de diferentes procedências .....	42
Tabela 4.1 -	Ensaio e análises realizados na investigação experimental .....	51
Tabela 4.2 -	pH das soluções utilizadas nos ensaios de granulometria .....	60
Tabela 4.3 -	Programação dos ensaios edométricos para avaliação de colapso .....	62
Tabela 4.4 -	Corpos-de-prova submetidos aos ensaios de difusão .....	66
Tabela 4.5 -	Valores da moldagem dos corpos-de-prova .....	68
Tabela 5.1 -	Composição química do solo, bauxita e lama vermelha e razão lama vermelha (LV)/ bauxita (B).....	87
Tabela 5.2 -	Caracterização geotécnica da amostra de solo com maior concentração de concreções (LMS-FACI) e do solo para emprego em CCLs (LMS-EPUSP) .....	91
Tabela 5.3 -	Caracterização geotécnica do solo realizada pela empresa LPS .....	92
Tabela 5.4 -	Dados de moldagem dos corpos-de-prova dos ensaios de permeabilidade	94
Tabela 5.5 -	Limites de consistência do solo realizados com água e diferentes concentrações de hidróxido de sódio .....	105
Tabela 5.6 -	Condições iniciais e finais dos corpos de prova dos ensaios edométricos...	106
Tabela 5.7 -	Potencial de colapso em função da inundação com água e hidróxido de sódio (ensaio edométrico simples).....	109
Tabela 5.8 -	Colapso do solo quando submetido a inundação com água e	112

	concentrações de hidróxido de sódio (edométrico duplo) .....	
Tabela 5.9 -	Dados de moldagem dos corpos-de-prova dos ensaios de difusão .....	113
Tabela 5.10 -	Concentração de Na no reservatório de ensaios de difusão .....	114
Tabela 5.11 -	Distribuição de concentrações de Na no corpo-de-prova DSS-4 no final do ensaio de difusão .....	116
Tabela 5.12 -	Valores de coeficientes de difusão e adsorção apresentados por Rowe et al (1995) .....	117
Tabela 5.13 -	Composição química (em % de peso) da LV, solo compactado submetido à difusão e solo compactado sem cobertura de LV (DLV-0) .....	118
Tabela 5.14 -	Composição química dos elementos-traço (ppm) da LV, solo compactado submetido à difusão e solo compactado sem cobertura de LV (DLV-0) ....	120
Tabela 5.15 -	Composição química pontual (em %) obtida por MEV/SED da LV, solo compactado submetido à difusão e do solo compactado sem cobertura de LV (DLV-0) .....	124

## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA</b> .....	iv
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	v
<b>RESUMO</b> .....	vii
<b>ABSTRACT</b> .....	viii
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 OBJETIVOS .....	3
<b>2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b> .....	4
2.1 REVESTIMENTO DE FUNDO DE ÁREAS DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS ....	4
2.2 PERMEABILIDADE DE CAMADAS DE SOLO COMPACTADO .....	9
<b>2.2.1 Coeficiente de permeabilidade</b> .....	9
<b>2.2.2 Compactação</b> .....	11
2.3 TRANSPORTE DE POLUENTES PELO SOLO .....	14
2.4 COMPATIBILIDADE ENTRE SOLO E PERCOLADO .....	17
2.5 EFEITOS DA PERCOLAÇÃO DE LICORES CÁUSTICOS NO COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO .....	18
2.6 COLAPSIVIDADE DE SOLOS .....	25
<b>2.6.1 Identificação da colapsividade</b> .....	26
<b>2.6.2 Influência da solução de inundação no colapso</b> .....	32
<b>3 ESTUDO DE CASO</b> .....	37
3.1 APRESENTAÇÃO .....	37
3.2 A LAMA VERMELHA .....	37
<b>3.2.1 A produção de alumínio</b> .....	37
<b>3.2.2 Processo Bayer de produção de alumina</b> .....	39
<b>3.2.3 Disposição das lamaz vermelhas</b> .....	41
3.3 ÁREA DE ESTUDO .....	43
<b>3.3.1 Localização e acesso</b> .....	43



<b>3.3.2 Aspectos fisiográficos da região</b> .....	43
3.4 A DISPOSIÇÃO DE LAMA VERMELHA GERADA PELA ALUNORTE .....	45
<b>4 PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL</b> .....	49
4.1 SELEÇÃO DO SOLO PARA CCL DAS BACIAS DE DISPOSIÇÃO DE LV .....	52
4.2 ANÁLISES QUÍMICAS E MINERALÓGICAS .....	53
4.3 DETERMINAÇÃO DO PH, CAPACIDADE DE TROCA CATIONICA E MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO .....	53
4.4 CARACTERIZAÇÃO E PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS .....	54
4.5 ENSAIOS DE PERMEABILIDADE .....	55
4.6 ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE SÓDIO SOLÚVEL NA LV .....	56
4.7 ENSAIO DE COLUNA .....	57
4.8 ENSAIOS DE GRANULOMETRIA E LIMITES DE CONSISTÊNCIA COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE HIDRÓXIDO DE SÓDIO .....	59
4.9 ENSAIO PARA ANÁLISE DO POTENCIAL ZETA .....	61
4.10 ENSAIOS DE COLAPSO (EDOMÉTRICOS) .....	62
4.11 ENSAIOS DE DIFUSÃO .....	64
<b>4.11.1 Com soluções de NaOH</b> .....	64
<b>4.11.2 Com a lama vermelha</b> .....	68
4.12 ENSAIO DE REOMETRIA .....	70
<b>5 RESULTADOS</b> .....	72
5.1 ASPECTOS GEOLÓGICOS DA ÁREA.....	72
<b>5.1.1 Os perfis de solos da região</b> .....	73
<b>5.1.2 Características granulométricas</b> .....	75
5.2 COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA .....	78
<b>5.2.1 Dos perfis de solos</b> .....	78
<b>5.2.2 Do solo local selecionado para construção de CCL, bauxita e lama vermelha...</b>	78
5.3 COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	83
<b>5.3.1 Os perfis de solos</b> .....	83

<b>5.3.2 O solo local selecionado para construção de CCL, bauxita e lama vermelha ....</b>	<b>86</b>
5.4 PH, CAPACIDADE DE TROCA CATIÔNICA E MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO .....	89
5.5 CARACTERIZAÇÃO E PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS .....	90
5.6 PERMEABILIDADE DO SOLO .....	93
5.7 - ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE SÓDIO SOLÚVEL NA LAMA VERMELHA .....	98
5.8 ENSAIO DE COLUNA .....	99
5.9 ENSAIOS DE GRANULOMETRIA COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE HIDRÓXIDO DE SÓDIO .....	101
5.10 LIMITES DE CONSISTÊNCIA COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE HIDRÓXIDO DE SÓDIO .....	104
5.11 ENSAIOS DE COLAPSO .....	105
5.12 - ENSAIOS DE DIFUSÃO .....	113
<b>5.12.1 Sódio solúvel .....</b>	<b>113</b>
<b>5.12.2 Lama vermelha .....</b>	<b>118</b>
5.12.2.1 Características químicas .....	118
5.12.2.2 Controle químico micropontual com microscopia eletrônica de varredura (MEV/SED) .....	121
5.12.2.3 - Ensaio de reometria .....	125
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>127</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>131</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>142</b>
<b>ANEXO A</b> - Localização das investigações geotécnica realizada pela empresa LPS com sondagens a trado e poços, quando da implantação da área bacina de disposição da lama vermelha (área 54-A) .....	143
<b>ANEXO B</b> Seções geológicas – geotécnica obtidas por poços e sondagens a trado pela empresa LPS .....	144
<b>ANEXO C</b> Perfil Geológico - Geotécnico .....	145
<b>ANEXO D</b> Concentrações dos elementos maiores (em % de peso) nos perfis RI-1, RI-2 e RI-3 .....	146
<b>ANEXO E</b> Distribuição das concentrações dos elementos-traço nos perfis RI-1, RI-2 e RI-3 .....	147
<b>ANEXO F</b> Distribuição das concentrações dos ETR nos perfis RI-1, RI-2 e RI-3 .....	148

<b>ANEXO G</b> Composição química dos elementos-traço do solo para clay liners, bauxita e LV (em ppm) .....	149
<b>ANEXO H</b> Modelo de planilha de ensaio de permeabilidade e coluna .....	150

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento industrial crescente, causado pela demanda por bens de consumo associada ao crescimento populacional, tem gerado quantidades expressivas de resíduos, o que tem originado diversos problemas ambientais, relacionados diretamente ao tipo e porte da indústria, assim como à gestão de seus resíduos.

Os resíduos da mineração compreendem os estéreis, resultantes do desmonte das rochas até atingir o minério, e os rejeitos, gerados pelo processo de beneficiamento do minério. O impacto ambiental de estéreis e rejeitos está relacionado ao grande volume gerado, resultando na ocupação de extensas áreas para disposição. Por exemplo, as razões médias entre o produto final e a geração de rejeitos dos minérios de ferro, alumina, carvão, fosfato, cobre e ouro são, respectivamente, 2:1, 1:1-2,5, 1:3, 1:5, 1:30 e 1:10000 (Esposito, 2000; Santora et al., 2006; ABAL, 2002; Paramguru et al., 2005). Problemas adicionais ocorrem com rejeitos que contém componentes nocivos (íons de metais pesados, reagentes de flotação, ácidos e outros) que podem comprometer seriamente a qualidade das águas superficiais e subterrâneas (Salopek & Strazisar, 1993).

Dentre os diversos segmentos industriais de mineração, a indústria de alumina está enfrentando um problema em nível mundial de crescente disposição de resíduos sólidos (Oeberg & Steinlechner, 1996; Silva Filho et al., 2008). Os rejeitos dessa indústria, conhecidos comumente como “lama vermelha”, são gerados pela digestão da bauxita por soluções de hidróxido de sódio, na fabricação de alumina pelo processo Bayer (Chaves, 1962). São dispostos com elevado teor de umidade e contêm, além de grandes quantidades de partículas muito finas e óxido de ferro, uma quantidade significativa de sódio solúvel (Salopek & Strazisar, 1993; Silva Filho, 2007).

No Brasil, são geradas anualmente milhões de toneladas de lama vermelha, representando um elevado risco potencial ao meio ambiente. Resolver ou minimizar os problemas de disposição desse resíduo implica, sobretudo, na melhoria e na otimização da produção com o firme propósito de gerar a mínima quantidade possível de tal material (Fernández et al., 1996).

Na Europa, existe uma tendência de substituir a atual regulamentação fundamentada no controle rigoroso de aterros por uma nova estratégia de redução do volume de resíduos com a sua reciclagem. A proposta da nova regulamentação, que vem sendo adotada em alguns países, consiste na redução da implantação de aterros através de taxação excessiva, de forma a torná-los inviáveis economicamente. A Áustria, por exemplo, banuiu muitos aterros de vários

tipos de resíduos desde 2004. A Alemanha também proibiu a abertura de novos aterros de resíduos industriais orgânicos e domiciliares desde julho de 2004 (Lemarchand, 2004).

O objetivo de inviabilizar os aterros é provocar, de forma compulsória, o aparecimento de novas soluções que agreguem valor aos resíduos, diferentemente da simples deposição. De fato, entre reduzir o volume de resíduos e reutilizá-los, a segunda alternativa é a única capaz de proporcionar benefícios econômicos. Para as empresas geradoras de resíduos, a vantagem da reciclagem é a redução de custos de deposição e/ou a abertura de novas frentes de mercado. Quanto às empresas que irão processar os resíduos, a reciclagem pode acarretar decréscimos significativos no consumo de energia e de matérias-primas não renováveis e proporcionar melhores características técnicas aos novos produtos (John, 2000). A abordagem “from cradle to grave” (do berço à sepultura) consiste em definir, já durante a concepção de um produto, quais as opções de reciclagem quando do término de sua vida útil.

No caso da lama vermelha algumas alternativas interessantes da reutilização vêm sendo empregadas: produção de cerâmica (Fernández et al., 1996; Hildebrando, 1998); preparação de cimentos especiais contendo misturas de calcário, lama vermelha, bauxita e gesso e adição de titânia  $C_4A_3S$  (Singh et al., 1996 e 1997); como adsorvente da matéria orgânica presente no chorume de aterro sanitário (Sousa, 2000); corretivo de acidez de solos (Freitas, 2003); em pigmentos para concreto (Boumaza & Ambroise, 1997; Lima, 2007); como coagulante e adsorvente no tratamento de água e gás e catálise para alguns processos industriais (Wang et al., 2008) e na remoção de corantes presentes em efluentes têxteis (Silva Filho et al., 2008). Todavia, a disposição sobre terreno natural ainda é o principal destino da lama vermelha, em bacias formadas por diques ou barragens e impermeabilizadas por geomembranas.

Deve-se procurar projetar as bacias de disposição utilizando os conhecimentos técnicos atuais sobre áreas de disposição de resíduos de maneira geral, e sobre transporte de contaminantes em particular, para garantir segurança ambiental aliada a baixo custo. A importância de garantir a estanqueidade das bacias de disposição de lama vermelha é especialmente relevante no caso da mineração na Amazônia, região de drenagem fluvial importante em escala global, onde uma contaminação das águas pode repercutir em áreas ainda mais extensas dos que os milhares de quilômetros quadrados da área mineradora.

Os sistemas compostos de camada de solo compactado e geomembrana têm sido considerados os mais eficientes para revestimento de fundo de áreas de disposição de resíduos. A existência de furos nas geomembranas é reconhecidamente comum, mesmo nas instalações consideradas excelentes pela USEPA (United States Environmental Protection

Agency); mas o efeito das falhas das geomembranas pode ser minimizado por uma camada de base de solo compactado resistente, lisa, uniforme e de baixa permeabilidade (Folkes, 1982; Rowe et al., 1987; Daniel, 1993 e 1995).

Qualquer material natural com propriedades mecânicas adequadas e que apresente baixa condutividade hidráulica pode potencialmente ser utilizado em barreiras selantes ou como base para geomembrana, configurando uma alternativa técnica econômica, a exemplo dos locais de disposição de resíduos sólidos urbanos e resíduos industriais; contudo, devido a inúmeros fatores limitantes construtivos ou operacionais, é necessário selecionar materiais em função de suas características específicas (Peirce & Witter, 1986; Daniel & Benson, 1990; Elsbury et al.; 1990, Broderick & Daniel, 1990; Daniel, 1993; Leite, 2001). Na ausência de solos naturais pouco permeáveis, misturas compactadas de bentonita e areia (Kennay et al., 1992) e sílica reativa (Kalkan & Akbulut, 2004) têm sido utilizadas na construção de barreiras para fluidos poluentes.

Na disposição da lama vermelha é imprescindível estudar a compatibilidade da camada de solo compactado com o percolado formado nas bacias, para garantir a segurança ambiental e estrutural em longo prazo. Entende-se por compatibilidade a manutenção das propriedades mecânicas e hidráulicas da camada de solo após o contato com o percolado. Problemas relacionados ao comportamento do solo pela infiltração de licores cáusticos têm sido reportados por D'Appolonia (1980), Kumapley & Ishola (1985), Lentz et al. (1985), Simons & Reuter (1985), Ignatius & Souza Pinto (1991), Costa Junior (2001), Josefaciuk et al. (2002), Taubald et al. (2002), Claret et al. (2002), Savage et al. (2002), Moncada (2004), Moavenian & Yasrobi (2008) e Cuevas (2009). O impacto ambiental está associado a danos estruturais nas obras de contenção.

O estudo proposto procura oferecer uma alternativa segura para a disposição da lama vermelha e elevar o conhecimento relativo ao transporte e retenção de poluentes em solos tropicais, proporcionando uma ferramenta para melhorar a previsão de impactos ambientais.

## 1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é estudar a viabilidade técnica de utilizar um solo local compactado no revestimento de fundo das bacias de disposição de lama vermelha da Alunorte, de modo a garantir segurança ambiental em longo prazo, considerando o transporte de poluentes e as reações do percolado com o sistema impermeabilizante.

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 REVESTIMENTO DE FUNDO DE ÁREAS DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS

As barreiras de fundo de áreas de disposição de resíduos podem ser constituídas de materiais naturais compactados de baixa permeabilidade, tais como solos argilosos ou misturas solo-aditivo (“compacted clay liners” ou simplesmente “CCLs”); materiais artificiais (geossintéticos em geral); ou a combinação de ambos. São recursos tecnológicos utilizados para assegurar a minimização da migração de poluentes a partir da massa de resíduos, de forma que eles não atinjam as águas superficiais e subterrâneas em concentrações superiores aos limites aceitáveis.

Os princípios fundamentais do projeto da camada impermeabilizante de revestimentos de fundo, segundo Manassero et al. (2000), são:

- A camada impermeabilizante de fundo de solo compactado, também denominada barreira mineral, é geralmente o componente básico dos sistemas de impermeabilização tradicionais em relação ao desempenho de longo prazo, isto é, para períodos superiores a 200 anos.
- As exigências e características da barreira mineral, em ordem de importância, são: condutividade hidráulica baixa em escala de campo, compatibilidade em longo prazo com as espécies químicas a ser contida, alta capacidade de sorção e coeficiente de difusão baixo.
- A qualidade da construção tem um papel fundamental na eficiência final do sistema em termos da condutividade hidráulica global, em escala de campo.
- Sistemas compostos podem oferecer vantagens em curto e longo prazo: redução da condutividade hidráulica global como resultado da atenuação dos defeitos locais tanto da geomembrana como do solo compactado; minimização de problemas de trincas de secagem; aumento do fluxo captado pelas camadas de drenagem; a geomembrana sobre a camada de solo compactado pode retardar o contato direto entre o solo e o percolado, dando tempo para que ocorra o adensamento do solo sob o peso dos resíduos, assim reduzindo ou evitando problemas de compatibilidade.

As barreiras devem ser avaliadas de uma forma minuciosa abrangendo a caracterização dos solos empregados e os resíduos a serem estocados (Mello & Boscov, 1998), a fim de: minimizar a migração de poluentes por difusão ou advecção; apresentar alta capacidade de adsorção e de retardamento dos mesmos; ser compatíveis com o contaminante, apresentar características geotécnicas de resistência à erosão, elevada capacidade de suporte, baixa deformabilidade e baixa capacidade de expansão e contração; ser auto-selantes; evitar a

subsistência; permitir o desenvolvimento de um plano de controle de qualidade (Daniel & Benson, 1990; Brandl, 1992; Manassero et al., 1997; Cazaux & Didier, 2000).

A combinação de solo compactado com a geomembrana, formando um sistema misto, permite que eventuais vazamentos na manta, rápidos e pontuais, sejam minimizados pelo solo compactado abaixo, onde a percolação se dará de forma lenta. Os sistemas compostos têm sido amplamente utilizados nos Estados Unidos e em países europeus por combinarem as vantagens de um produto industrializado com a capacidade de cicatrização e adsorção de um solo compactado. Shackelford (1993) comenta que sistemas mistos podem apresentar permeabilidade até cem vezes menor do que geomembranas ou barreiras de solo compactado isoladamente.

A fragilidade do sistema composto se dá na interface membrana-solo. A resistência da interface é o elo fraco do sistema, em especial sob elevadas pressões hidrostáticas. Diversos autores (Ola, 1983; Shackelford, 1993; Simpson, 1995; Pasqualini et al., 2002) observam que o uso de sistemas compostos requer atenção especial em relação à estabilidade do conjunto devido à presença de interfaces, nas quais a resistência pode ser muito reduzida, criando um plano preferencial de ruptura. As principais fontes de aumento de umidade na interface são: migração de água devido ao gradiente térmico, adensamento da argila, vazamento da membrana e procedimento de compactação. O aumento da quantidade de água na interface pode gerar aumento de pressão neutra e reduzir a adesão entre os materiais, além de reduzir a resistência da argila. A degradação da membrana em função do ataque químico também pode reduzir a resistência do conjunto.

É relevante apontar que a geomembrana necessita uma boa base para assentamento, sendo que o solo compactado é que irá fornecer o suporte para a mesma. Pode-se afirmar que o bom desempenho de um sistema impermeabilizante de fundo depende tanto da qualidade da geomembrana e sua colocação, como da presença de uma camada adequada de solo compactado.

Geomembranas em perfeito estado são praticamente impermeáveis, sendo que o poluente atravessa a manta por difusão a uma velocidade extremamente baixa. No entanto, o emprego das geomembranas exige uma série de cuidados, em especial durante sua colocação, necessitando de mão de obra especializada, pois havendo falhas na manta, tais como rasgos, furos e dobras devidos à má instalação, o vazamento do poluente se dará de forma rápida.

É comum adotar em projeto a hipótese de 2,5 furos por hectare na geomembrana; porém, vazamentos detectados em campo sugerem que esse valor seja muito superior. Laine & Mosley (1993) obtiveram uma média de 14 furos/ha em 169 locais de disposição onde a



geomembrana era permanentemente coberta de água, e de 22 furos/ha em 17 aterros onde a geomembrana era coberta com até 75 cm de solo de proteção. Rowe & Jones (2000) comentam que, mesmo se adequadamente instaladas e inspecionadas, as geomembranas foram durante a construção do sistema de drenagem, e reportam casos de 15,3 e de 22,5 furos/ha. A existência de falhas nas geomembranas é reconhecida e aceita inclusive pela USEPA (United States Environmental Protection Agency). A Tabela 2.1 mostra as vazões calculadas para CCLs, geomembranas e sistemas compostos.

Tabela 2.1 - Vazões calculadas para CCLs, geomembranas e sistemas compostos (USEPA, 1991 apud Qian et al., 2002).

Tipo de revestimento impermeabilizante	Qualidade	Parâmetros adotados	Vazão (L/m <sup>2</sup> /dia)
Solo compactado	Má	$K=1 \times 10^{-8}$ m/s	1,12
Geomembrana		75 furos/ha, $a=0,1 \text{ cm}^2$	9,35
Sistema composto		$K=1 \times 10^{-8}$ m/s, 75 furos/ha, $a=0,1 \text{ cm}^2$	$9,35 \times 10^{-2}$
Solo compactado	Boa	$K=1 \times 10^{-9}$ m/s	0,112
Geomembrana		2,5 furos/ha, $a=1 \text{ cm}^2$	3,09
Sistema composto		$K=1 \times 10^{-9}$ m/s, 2,5 furos/ha, $a=1 \text{ cm}^2$	$7,48 \times 10^{-4}$
Solo compactado	Excelente	$K=1 \times 10^{-10}$ m/s	$1,12 \times 10^{-2}$
Geomembrana		2,5 furos/há, $a=0,1 \text{ cm}^2$	0,309
Sistema composto		$K=1 \times 10^{-10}$ m/s, 2,5 furos/ha, $a=0,1 \text{ cm}^2$	$9,35 \times 10^{-5}$

K = coeficiente de permeabilidade do solo; a = área do furo

Em uma bacia de disposição de dimensões 150m x 1200m, correspondendo a uma área em planta de 180.000 m<sup>2</sup>, a vazão através do revestimento seria de 134,64 L/dia para um sistema composto, de 556.200 L/dia só com geomembrana, e de 20.160 L/dia só com camada de solo compactado, com boa qualidade construtiva em todos os casos. Constata-se assim a necessidade de estudar os efeitos da percolação de soda cáustica no solo em bacias de disposição de lama vermelha, pois sem dúvida haverá algum aporte do percolado para o terreno subjacente.

Rowe & Bouazza (2000) desenvolveram um modelo matemático para calcular a vazão de percolado que atravessa furos de geomembranas associados a rugas em sistemas compostos. Uma das variáveis que influem no fluxo de percolado através do furo da geomembrana é a transmissividade hidráulica na interface entre geomembrana e solo subjacente, ou seja, a qualidade do contato. Comparação de vazamentos calculados com dados de campo indica a importância de considerar certa quantidade de rugas para a simulação correta do desempenho em escala real de sistemas compostos (Manassero et al., 1997). Rowe & Jones (2000) ressaltam que em muitos casos é o número e o tamanho de pregas associadas a furos, mais do que os próprios furos, que controlam o vazamento através de geomembranas.

As Figuras 2.1 e 2.2 apresentam os sistemas de revestimento de fundo para locais de disposição de resíduos sólidos perigosos e não perigosos, respectivamente, segundo as recomendações das agências de proteção ambiental de diversos países.

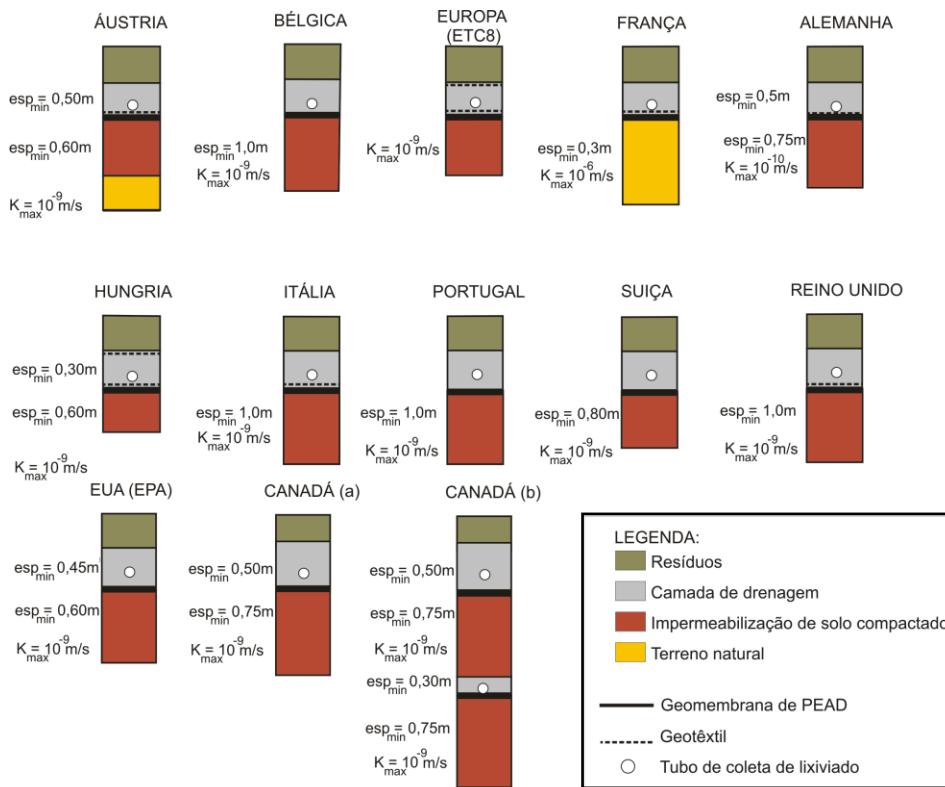


Figura 2.1 - Revestimentos de fundo de áreas de disposição de resíduos perigosos segundo algumas legislações internacionais (modificado de Manassero et al., 1997).

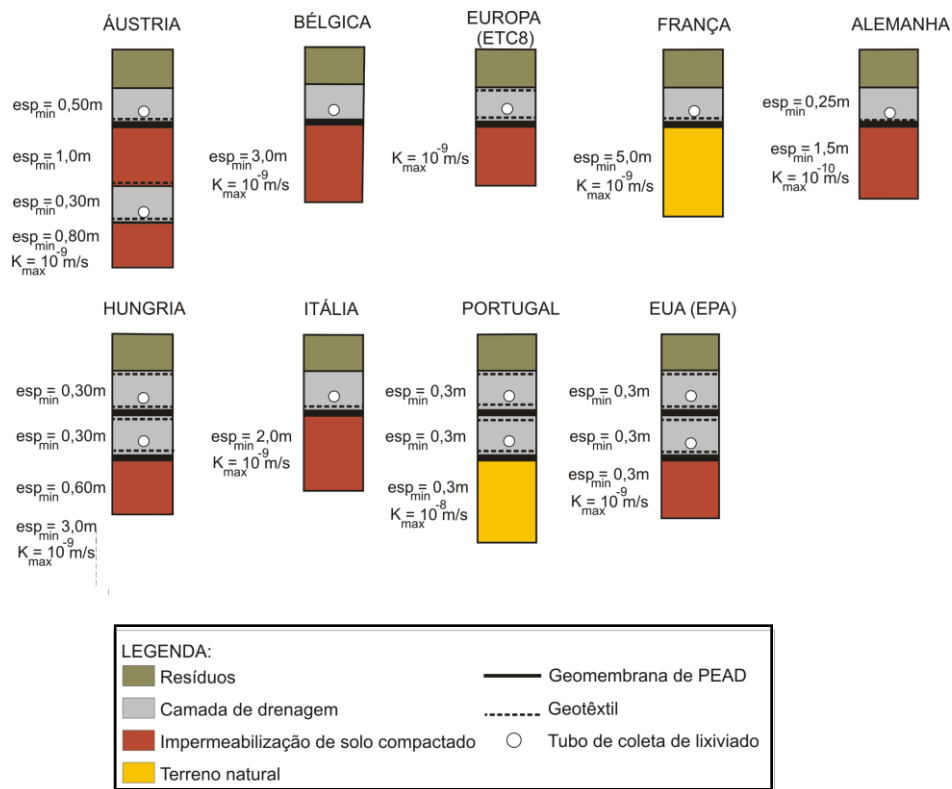


Figura 2.2 - Revestimentos de fundo de áreas de disposição de resíduos não perigosos segundo algumas legislações internacionais (modificado de Manassero et al., 1997).

É consenso na maioria das normas e regulamentações que a condutividade hidráulica de barreiras impermeabilizantes seja menor ou igual a  $10^{-9}$  m/s. Este valor da condutividade é oriundo da aplicação de uma carga hidráulica equivalente a 1 metro de coluna de percolado sobre uma camada de um metro de espessura de solo compactado, segundo a lei de Darcy, supondo que o percolado deixe de ser poluente quando atingir a base do revestimento, após 30 anos (Potter & Yong, 1993). O critério é bastante questionável, já que existem outros mecanismos no transporte de poluentes e que as características do percolado e do solo influenciam o tempo de chegada na base da camada (Bosco, 1997). No entanto, este valor de condutividade tem sido adotado pela maioria dos países como critério de projeto (Manassero et al., 1997).

Não existe consenso em relação à espessura ideal da camada compactada. Shackelford & Rowe (1998) concluem, por meio de simulação numérica, que o aumento da espessura da camada argilosa de 0,5 m para 4 m reduz a concentração máxima de poluente na base da mesma em uma ordem de magnitude e aumenta o tempo de chegada em uma ordem de magnitude.

## 2.2 PERMEABILIDADE DE CAMADAS DE SOLO COMPACTADO

### 2.2.1 Coeficiente de permeabilidade

O coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica é um parâmetro inversamente proporcional à resistência que um meio oferece ao escoamento de um fluido devido a um gradiente hidráulico. Depende das características tanto do fluido quanto do meio poroso. Segundo Lambe (1958), os principais fatores que influenciam a permeabilidade são a estrutura, a composição mineralógica, o grau de saturação e o índice de vazios do meio poroso e as características do fluido, sendo a estrutura do solo o fator preponderante.

O coeficiente de permeabilidade de um meio poroso a um dado fluido pode ser definido como o valor médio da velocidade de fluxo, quando a distância percorrida é igual à diferença de carga hidráulica dissipada durante o fluxo, ou seja, quando o gradiente hidráulico é unitário. Em solos saturados o estudo do fluxo baseia-se na Lei de Darcy (1856), expressa por:

$$Q = K i A \quad (2.1)$$

Onde: Q = vazão percolada;

K = coeficiente de permeabilidade;

i = gradiente hidráulico;

A = área da seção transversal à direção do fluxo.

O gradiente hidráulico é dado por:

$$i = \Delta H / L \quad (2.2)$$

Onde:  $\Delta H$  = carga hidráulica dissipada na percolação;

L = distância ao longo do qual a carga é dissipada.

O valor do coeficiente de permeabilidade varia conforme o fluido de percolação, segundo a equação (2.3). O coeficiente de permeabilidade de um solo normalmente é referido ao peso específico e a viscosidade dinâmica da água à temperatura de 20°C.

$$K = k \gamma / \mu \quad (2.3)$$

Onde:  $k$  = permeabilidade intrínseca

$\gamma$  = peso específico do fluido

$\mu$  = viscosidade dinâmica do fluido

A granulometria do solo também influi no coeficiente de permeabilidade do mesmo. A Tabela 2.2 apresenta valores típicos de coeficiente de permeabilidade para alguns solos e rochas (adaptado de Freeze & Cherry, 1979).

Tabela 2.2 - Valores típicos de coeficiente de permeabilidade para alguns materiais (Freeze & Cherry, 1979; Pinto, 2000).

Material	Faixa de variação do coeficiente de permeabilidade (m/s)
Pedregulho	$10^{-3} - 1$
Areia limpa	$10^{-6} - 10^{-2}$
Areia grossa	$10^{-3}$
Areia média	$10^{-4}$
Areia fina	$10^{-5}$
Areia siltosa	$10^{-7} - 10^{-3}$
Areia argilosa	$10^{-7}$
Silte	$10^{-9} - 10^{-5}$
Argila	$< 10^{-9}$
Argila marinha	$10^{-12} - 10^{-9}$
Folhelho	$10^{-13} - 10^{-9}$
Rochas ígneas e metamórficas não fraturadas	$10^{-14} - 10^{-10}$
Arenito	$10^{-10} - 10^{-6}$
Calcário e dolomito	$10^{-9} - 10^{-6}$
Rochas ígneas e metamórficas fraturadas	$10^{-8} - 10^{-4}$
Basalto permeável	$10^{-7} - 10^{-2}$
Calcário cárstico	$10^{-6} - 10^{-2}$

O coeficiente de permeabilidade de solos pode ser obtido por meio de ensaios de campo ou de laboratório. Existem várias modalidades de ensaios de permeabilidade em

laboratório, sendo as mais tradicionais os realizados em permeâmetros de parede rígida, com carga constante para solos granulares e com carga variável para solos finos.

Segundo Mitchell (1993), é importante considerar que o gradiente hidráulico, a composição química do fluido de percolação, o grau de saturação da amostra e a pressão confinante influenciam na permeabilidade da amostra de solo ensaiado em laboratório.

A ASTM (1990), tendo em vista a possibilidade de ocorrer carreamento de partículas finas durante o ensaio de permeabilidade, recomenda valores de gradientes hidráulicos em função da permeabilidade do material, conforme mostra a Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Valores máximos de gradiente hidráulicos em ensaios de permeabilidade (ASTM, 1990).

Condutividade hidráulica (m/s)	Gradiente hidráulico recomendado
$1 \times 10^{-5}$ até $10^{-6}$	2
$1 \times 10^{-6}$ até $1 \times 10^{-7}$	5
$1 \times 10^{-7}$ até $1 \times 10^{-8}$	10
$1 \times 10^{-8}$ até $1 \times 10^{-9}$	20
Menor que $1 \times 10^{-9}$	30

Boscov (2006), com base em pesquisas com solos tropicais compactados, aponta que a influência do gradiente e da tensão confinante pode ser pouco significativa para os mesmos. Por exemplo, a permeabilidade de um silte saprolítico de granito compactado na energia normal variou entre  $2,1 \times 10^{-8}$  m/s a  $7,5 \times 10^{-8}$  m/s para ensaios realizados com variação do gradiente hidráulico de 30 a 100, da tensão confinante de 40 a 150 kPa e do desvio de umidade entre -3% a +3%.

### 2.2.2 Compactação

A compactação de um solo corresponde a uma densificação do mesmo através de equipamento mecânico, com a redução rápida do índice de vazios (Massad, 2003). A densificação geralmente é referida ao aumento do peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ), o qual é expresso por:

$$\gamma_d = \gamma / (1 + w) \quad (2.4)$$

Onde:  $\gamma$  = peso específico aparente

$\gamma_d$  = peso específico aparente seco

w = teor de umidade

O peso específico aparente seco está relacionado à porosidade pela expressão (2.5).

$$n = (\gamma_s - \gamma_d) / \gamma_s \quad (2.5)$$

Onde: n = porosidade

$\gamma_s$  = peso específico dos grãos (geralmente, valor próximo a 27 kN/m<sup>3</sup>)

Para uma dada energia de compactação, o peso específico aparente seco varia com a umidade do solo, aumentando com a mesma até um determinado valor, a partir do qual o peso específico aparente seco diminui com o aumento da umidade. Portanto, o peso específico aparente seco máximo sob uma dada energia de compactação, correspondente à mínima porosidade, é obtido para um teor de umidade específico, denominado teor de umidade ótimo. A Figura 2.3 ilustra a variação da densidade seca em função do teor de umidade. A curva de compactação de um solo é obtida segundo o procedimento da norma brasileira ABNT NBR 7182.

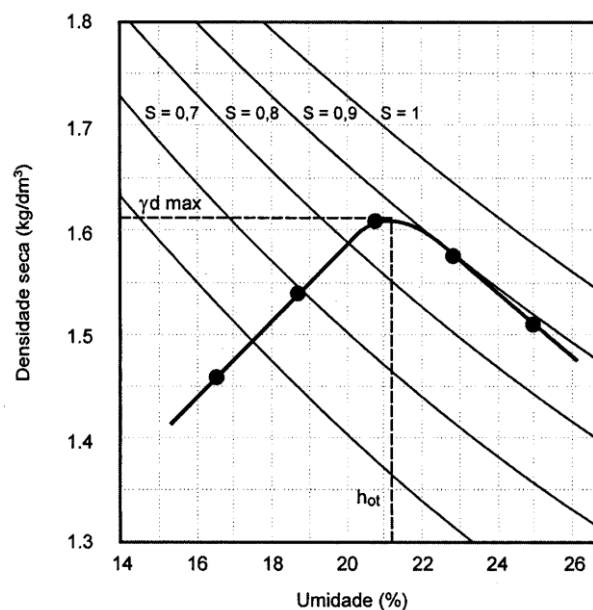


Figura 2.3 - Curva de compactação do solo (Massad, 2003).

A compactação do solo tem como objetivo o aumento da resistência mecânica, a diminuição da deformabilidade, a diminuição da permeabilidade ou a homogeneização do material. No caso de barreiras selantes, a diminuição da permeabilidade é a principal função. Através da remoldagem dos agregados de argila, ocorre a diminuição dos macroporos, principais responsáveis pelo fluxo de fluidos no solo (Leite, 2001). Solos porosos podem ter sua permeabilidade significativamente reduzida pela compactação. Por exemplo, um solo lateritizado da Bahia teve seu coeficiente de permeabilidade de campo de  $10^{-5}$  m/s reduzido para  $10^{-9}$  m/s no ponto ótimo da energia normal de compactação (Bosco et al., 2000).

Para solos compactados, a condutividade hidráulica do solo é função do teor de umidade na compactação e da energia aplicada no processo. Amostras compactadas no ramo úmido da curva de compactação (teores de umidade maiores que o teor de umidade ótima) apresentam menores valores de condutividade hidráulica, de onde vem a recomendação de construir CCLs com teores entre 2 a 4% acima do ótimo (Benson & Daniel, 1990). Esse efeito é atribuído por Lambe (1958) à estrutura do solo, que se encontra floclada no ramo seco, com tamanho médio de vazios maior do que o da estrutura dispersa do ramo úmido. Também Lambe & Whitman (1969) verificaram por meio de ensaios que amostras em estado floclado apresentam maior permeabilidade do que amostras com estrutura dispersa. Quanto mais dispersa a estrutura, mais tortuoso o caminho da percolação. A Figura 2.4 ilustra a variação do coeficiente de permeabilidade do solo em função do teor de umidade de compactação.

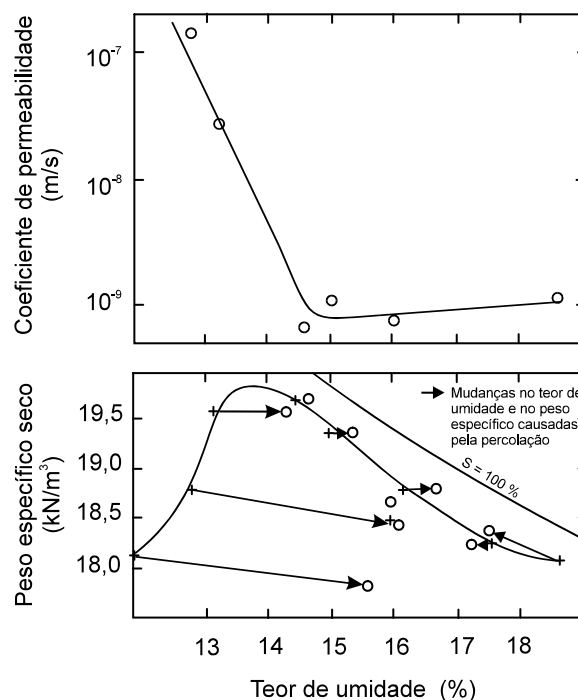


Figura 2.4 - Variação do coeficiente de permeabilidade do solo em função do teor de umidade de compactação (Lambe, 1958).



### 2.3 TRANSPORTE DE POLUENTES PELO SOLO

O transporte de solutos na água do subsolo é estudado como transporte de massa em meios porosos, onde a massa considerada é a de um soluto (poluente) que se move com o solvente (água) nos vazios de um meio poroso (solo). Os principais mecanismos envolvidos no transporte de um soluto em um meio poroso são: a advecção, a dispersão mecânica, a difusão e as reações químicas entre o soluto e os sólidos ou do próprio soluto na solução.

O transporte de poluentes em camadas de impermeabilização de aterros segue as mesmas leis de transporte de solutos em meios porosos (solos e aquíferos) (Rowe et al., 1987; Shackelford & Rowe, 1998; LaGrega et al., 1994). Os mecanismos de transporte de solutos em meios porosos resultam de processos físicos, químicos e biológicos que atuam concomitantemente, sendo, portanto, muitas vezes difícil a identificação da parcela de cada um desses processos.

Os processos físicos são regidos pelo regime de fluxo da água no solo, o qual pode ser avaliado pelas propriedades físicas do fluido (densidade, viscosidade e compressibilidade) e do meio (porosidade, permeabilidade e compressibilidade) (Freeze & Cherry, 1979). A advecção e a dispersão mecânica ou hidráulica são mecanismos de transporte decorrentes dos processos físicos.

Os processos químicos são determinados pelas propriedades químicas da solução do solo e das partículas do solo. Como propriedades importantes da solução podem ser destacadas: o potencial hidrogeniônico, pH, as espécies iônicas presentes, cátions e/ou ânions, as valências desses íons e a força iônica da solução. Para as partículas do solo são preponderantes seus tamanhos, as cargas elétricas e os grupos funcionais de superfície (Sposito, 1989; McBride, 1994). A difusão de solutos é um exemplo de processo químico importante que influencia o transporte de poluentes em regimes hidráulicos de velocidades muito baixas (Freeze & Cherry, 1979; Rowe et al., 1988; Shackelford, 1989).

Atividades biológicas podem ser intensas no meio poroso e/ou solução. Alguns organismos são capazes de influenciar os processos químicos, muitas vezes atuando como catalisadores ou inibidores de reações químicas do solo (Sposito, 1989). Dentre aqueles de maior atividade em processos naturais e também os mais estudados, destacam-se os pseudomonas, os desulfobíbrios e os actinomicetos (Ferreira, 2000). Alguns estudos têm verificado a grande importância desses organismos na retenção de poluentes (Ferreira, 2000; Carrara, 2003), entretanto sua participação não será abordada neste estudo.

**Advecção** é o processo pelo qual o soluto é carregado pela água em movimento, a uma velocidade média igual à velocidade específica da água.

$$u = v/n \quad (2.6)$$

Onde:  $u$  = velocidade específica da água

$v$  = velocidade de Darcy ( $v = K i$ , segundo a expressão 2.1)

$n$  = porosidade do solo.

**Dispersão mecânica ou hidráulica** é a mistura mecânica que ocorre durante a advecção, causada pela variação de velocidade em magnitude e direção nos poros do solo. Resulta em um espalhamento do soluto em relação à direção do fluxo médio. Partículas de soluto inicialmente próximas vão ocupando volumes cada vez maiores, resultando em uma diminuição da concentração média de soluto, ou seja, na diluição do soluto.

**Difusão** é o processo pelo qual os constituintes iônicos ou moleculares se movem devido a sua energia térmica-cinética na direção do gradiente de concentração, das regiões de maior para as de menor concentração; sua ocorrência independe do movimento hidráulico da solução, podendo se somar ou se opor ao fluxo advectivo, ou ocorrer na ausência deste.

**Dispersão hidrodinâmica** é a somatória dos processos de dispersão mecânica e da difusão. Como a difusão é muito lenta, seu efeito relativo na dispersão hidrodinâmica é mais significativo para baixas velocidades de fluxo.

**Reações químicas** e bioquímicas ocorrem naturalmente no solo, sendo responsáveis pela sua formação, a partir da rocha original, bem como pela sua evolução, de acordo com suas características geográficas e biológicas e com o tempo. Tais reações são determinadas pelos tipos e intensidades das interações químicas entre seus componentes, principalmente, as partículas sólidas e a solução do solo. Embora as variáveis envolvidas nessas reações sejam inúmeras e complexas, pode-se considerar que tais reações dependem basicamente dos seguintes componentes do solo: partículas sólidas minerais (com carga permanente e/ou variável), matéria orgânica e solução aquosa.

As principais reações químicas na migração de poluentes em solos são: adsorção-desadsorção, ácido-base, dissolução-precipitação, oxi-redução, complexação, síntese microbiana e decaimento radioativo (Sposito, 1989). As mais estudadas na aplicação geotécnica de disposição de resíduos são as de adsorção e desadsorção de íons e moléculas na superfície das partículas de solo (Boscov, 1997).

Troca iônica, adsorção específica e precipitação são as reações químicas responsáveis pela retenção e/ou mobilização de cátions e ânions do solo. O entendimento destes mecanismos no solo não é simples devido à variedade de minerais presentes (com diferentes cargas elétricas), de solutos na solução aquosa (com diferentes raios e potenciais iônicos) e dos inúmeros compostos orgânicos decorrentes da decomposição da matéria orgânica, intensa nos trópicos (Sposito, 1989)

*Adsorção* é um processo físico-químico pelo qual uma substância é acumulada numa interface entre fases. A adsorção em um sistema sólido-líquido é a remoção de solutos da solução e sua concentração na superfície do sólido. A adsorção ocorre porque forças físicas ou químicas atraem o adsorvato da solução para a superfície do adsorvente. A adsorção física é devida principalmente a forças eletrostáticas: atração e repulsão eletrostática segundo a Lei de Coulomb, interações dipolo-dipolo, forças de van der Waals e pontes de hidrogênio. A adsorção química também se baseia em forças eletrostáticas; pode ser considerada como uma ligação química real, geralmente covalente, entre uma molécula e átomos superficiais, na qual a molécula pode perder sua identidade quando os átomos são rearranjados, formando novos compostos (EPA, 1992). A *desadsorção* é a liberação de substâncias previamente adsorvidas.

Nos solos, a adsorção de íons ou moléculas ocorre principalmente na superfície dos argilo-minerais. As superfícies dos argilo-minerais são carregadas eletricamente, com carga negativa, devido à substituição isomórfica no esqueleto mineral. Em função da carga negativa forma-se uma camada difusa em torno da superfície das partículas dos argilo-minerais, constituída de íons carregados positivamente e de moléculas de água. A adsorção de íons na superfície dos argilo-minerais depende da valência e raio do íon hidratado, da concentração da solução e do argilo-mineral, entre outros.

Segundo Yong (2001), a troca de cátions acontece quando íons carregados positivamente na água dos poros são atraídos para a superfície dos argilo-minerais. A ocorrência deste processo se deve à necessidade de satisfazer a eletroneutralidade e a estequiometria. Os quesitos de eletroneutralidade requerem que os íons trocáveis satisfaçam a carga negativa não equilibrada que apresentam naturalmente as superfícies de materiais argilosos. Estes íons trocáveis são denominados “cátions intercambiáveis ou cátions trocáveis”. A capacidade de troca catiônica (CTC) indica a quantidade de cátions trocáveis que um solo possui.

A retenção de íons e moléculas nos solos pode ocorrer também devido à precipitação e ao efeito de filtro resultante da diminuição do tamanho dos vazios pelos produtos de precipitação. Outro mecanismo de retenção de metais no solo é a complexação de íons. Um

íon complexo compreende um íon metálico central, usualmente derivado de um metal de transição, ligado a moléculas ou ânions denominados ligantes, tais como  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{SCN}^-$ ,  $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{Cl}^-$ . O grande tamanho dos íons complexos representa uma dificuldade à sua mobilidade nos vazios mais finos do solo.

O transporte de poluentes dissolvidos na água através de um solo homogêneo, isotrópico e saturado, sob regime de fluxo de água unidimensional permanente, sujeito apenas à reação química de adsorção representada por isoterma linear, supondo-se constância das propriedades geotécnicas, pode ser descrito por (Bosco, 1997):

$$\left(1 + \frac{\rho K_d}{n}\right) \frac{\partial c}{\partial t} = D_{dh} \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - u \frac{\partial c}{\partial z} \quad (2.7)$$

Onde:  $\rho$  densidade seca do solo na profundidade  $z$

$K_d$  coeficiente de distribuição (adsorção) na profundidade  $z$

$n$  porosidade do solo à profundidade  $z$

$c$  concentração do contaminante à profundidade  $z$  no tempo  $t$

$D_{dh}$  coeficiente de dispersão hidrodinâmica na profundidade  $z$

$v$  velocidade específica da água na profundidade  $z$

A parcela  $[u \partial c / \partial z]$  corresponde ao transporte de poluentes por fluxo advectivo. A parcela  $[D_{dh} \partial^2 c / \partial z^2]$  expressa o fluxo por dispersão hidrodinâmica, ou seja, devido à difusão molecular e à dispersão mecânica em conjunto. A parcela  $[1 + (\rho K_d / n)]$  refere-se à adsorção.

#### 2.4 COMPATIBILIDADE ENTRE SOLO E PERCOLADO

Um requisito do projeto de aterros de resíduos é a constância das propriedades dos materiais empregados no revestimento de fundo; particularmente, o contato com o percolado não deve acarretar aumento da permeabilidade da camada de solo compactado. O termo compatibilidade entre solo e percolado se refere às reações químicas cujos efeitos podem modificar as propriedades geotécnicas.

Ensaio de permeabilidade, resistência e deformabilidade devem ser realizados para avaliar se as camadas compactadas podem ser alteradas devido a reações químicas decorrentes da percolação de substâncias químicas. Ensaio químicos, biológicos e

mineralógicos podem ser utilizados complementarmente na interpretação dos resultados geotécnicos.

Avaliando vários estudos sobre a compatibilidade entre solo e solução verifica-se que substâncias e produtos químicos podem modificar a estrutura do solo e/ou atacar os minerais do solo (Mitchell et al., 1965; Anderson & Brown, 1981; Folkes, 1982; Boynton & Daniel, 1984; Peirce et al., 1986; Finno & Schubert, 1986; Madson & Mitchell, 1989; Sridharan et al., 1990; Brandl, 1992; Van Ree et al., 1992; Shackelford, 1994; Yong et al., 1994; Rowe, 1995; Chen et al., 2000; Li & Li, 2001; Benson, 2002; Claret et al., 2002; Savage et al., 2002).

Os minerais geralmente não são dissolvidos por líquidos ácidos e básicos, salvo sob acentuadas variações de pH (abaixo de 3 e acima de 11). Alterações na estrutura do solo, e conseqüentemente na permeabilidade, são causadas pelo efeito da percolação das soluções na camada dupla dos argilo-minerais. A estrutura do solo é fortemente influenciada pelas forças de repulsão entre partículas de argila, que controlam a flocculação, a dispersão, a contração e a expansão, devido à troca de cátions ou a substituição da água adsorvida por fluidos orgânicos. A espessura da camada dupla e a conseqüente magnitude das forças entre partículas dependem da temperatura, da constante dielétrica e da concentração eletrolítica da solução, e da valência do cátion. Vários fenômenos têm sido observados quando da interação do solo com poluentes: trocas catiônicas que tornam a estrutura mais flocculada ou mais dispersa, modificando a porosidade do material; carreamento das partículas de argila através dos poros maiores; dissolução de minerais do solo por ácidos ou bases; mudança na viscosidade da água intersticial; precipitação de compostos neoformados; entre outros. Diferentes mecanismos podem ocorrer simultaneamente, dificultando a previsão do comportamento final. Até que se acumule um volume maior de informações acerca dos efeitos de diferentes poluentes em classes específicas de solos, é necessário estudar a compatibilidade entre solo e poluente para cada nova situação (Bosco, 1997).

## 2.5 EFEITOS DA PERCOLAÇÃO DE LICORES CÁUSTICOS NO COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO

D'Appolonia (1980) observou um aumento da permeabilidade de 2 a 10 vezes em "cut-offs" e aterros de solo-bentonita quando percolados por soluções de 5% de hidróxido de sódio.

Lentz et al. (1985) analisaram também as variações no coeficiente de permeabilidade de diferentes solos (argila caulínica, argila montmorillonítica magnesiana e misturas

caulinita-bentonita) submetidos à percolação de hidróxido de sódio em diferentes concentrações (pH de 9, 11, e 13). Os ensaios foram realizados num permeâmetro de parede flexível, com carga variável. Os resultados estão apresentados na Figura 2.5 e na Tabela 2.4. Observa-se diminuição da permeabilidade com a passagem do licor cáustico, tanto mais significativa quanto maior o pH. A argila montmorillonítica magnesiana sofreu maior influência da percolação da soda cáustica, com a permeabilidade decrescendo de 1,14, 1,54 e 12,78 vezes para pH igual a 9, 11 e 13, respectivamente.

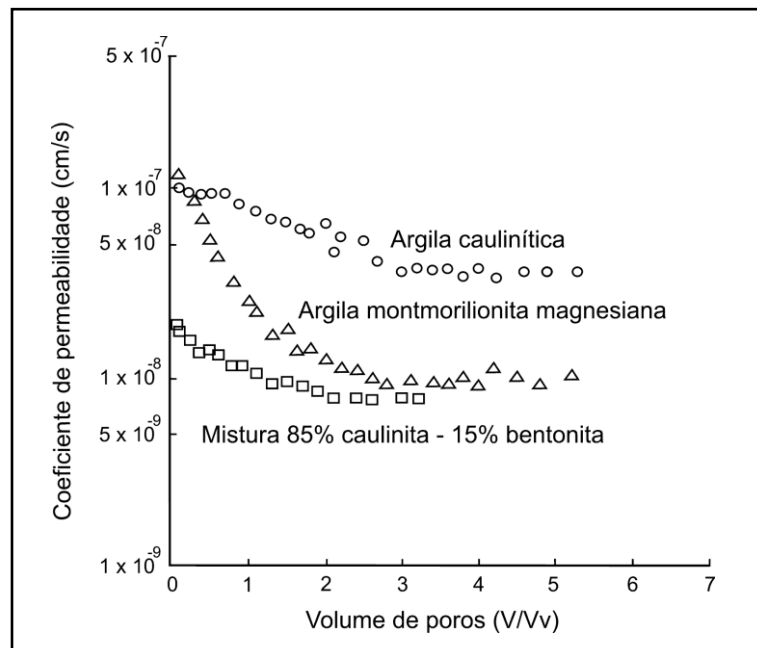


Figura 2.5 - Permeabilidade em função do volume percolado para NaOH em pH=13 (adaptado de Lentz et al., 1985).

Tabela 2.4 - Resultados dos ensaios de permeabilidade (adaptado de Lentz et al., 1985).

pH	Caulinita 100 %			Caulinita 85% + Bentonita 15%			Mg-Montmorillonita		
	$K_i^a \times 10^{-9}$	$K_j^b \times 10^{-9}$	$K_i/K_f$	$K_i^a \times 10^{-10}$	$K_j^b \times 10^{-10}$	$K_i/K_f$	$K_i^a \times 10^{-10}$	$K_j^b \times 10^{-10}$	$K_i/K_f$
9	1,15	1,05	1,10	2,60	2,30	1,13	0,50	4,40	1,14
11	1,20	1,10	1,09	2,65	2,20	1,20	1,20	7,80	1,54
13	1,00	0,340	2,94	1,92	7,80	2,46	1,15	0,90	12,78

$K_i^a$  = permeabilidade inicial, m/s.

$K_j^b$  = permeabilidade final após a passagem de seis volumes de vazios de efluente, m/s.

Pavilonski (1985) investigou as variações do coeficiente de permeabilidade de diferentes solos submetidos à percolação de diferentes solutos, entre eles hidróxido de sódio a diferentes concentrações. A Tabela 2.5 apresenta os resultados obtidos para as soluções alcalinas.  $K_{máx}$ ,  $K_f$  e  $K_w$  correspondem, respectivamente, às permeabilidades máxima ao licor, final ao licor, e à água. Para uma argila caulinítica, observou-se uma diminuição da permeabilidade para uma concentração de 4%, e um aumento na permeabilidade para uma concentração de 0,4%.

Tabela 2.5 - Permeabilidade em função da concentração de NaOH (Pavilonski, 1985).

Líquido	Solo	$K_{máx}/K_w$	$K_f/K_w$
4 % NaOH	Bentonita	0,5	0,3
4 % NaOH	Caulinita	0,9	0,8
4 % NaOH	“Loam” (*)	302	15,6
0,4 % NaOH	Bentonita	1,4	0,2
0,4 % NaOH	Caulinita	1,4	1,1
0,4 % NaOH	“Loam” (*)	1,3	0,4

(\*) solo consistindo de uma mistura de proporções variadas de argila, silte, areia e matéria orgânica.

Simons & Reuter (1985) determinaram também as variações no coeficiente de permeabilidade com a percolação de diferentes líquidos, entre eles soda cáustica, para diferentes solos argilosos (caulinita, illita, montmorillonita e misturas de bentonita com areia quartzosa. Fizeram também análises mineralógicas das amostras de solo, antes e após a percolação dos diferentes líquidos, para obter a taxa de lixiviação de sílicio e alumínio, ou seja, de perda de massa. Obtiveram as maiores taxas de lixiviação de sílicio e alumínio nos ensaios com os líquidos alcalinos. Alguns resultados são apresentados nas Figuras 2.6 e 2.7.

Jozefaciuk et al. (2002) também observaram a lixiviação de alumínio nos tratamentos alcalinos, além da remoção de material orgânico e do decréscimo da fração argila, em pesquisa sobre os efeitos de tratamentos fortemente ácidos e alcalinos nas curvas de titulação, nas mudanças na composição química e no conteúdo de matéria orgânica de diversos solos. As concentrações de hidróxido de sódio variaram de 0,001 a 1 mol/L.

Taubald et al. (2000) estudaram a alteração de dois solos argilosos em ensaios de coluna com uma solução alcalina composta por NaOH, KOH, e  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Por um período de 18 meses, observaram a evolução da permeabilidade do solo, do pH da solução e da

concentração da solução. Finalizados os ensaios, as colunas foram cortadas em fatias para estudar a mudança química e mineralógica das argilas. Não foram detectadas mudanças na mineralogia, sendo que  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  foram lixiviados nos primeiros 20 mm das colunas. A evolução do pH e da permeabilidade foi diferente para os dois solos.

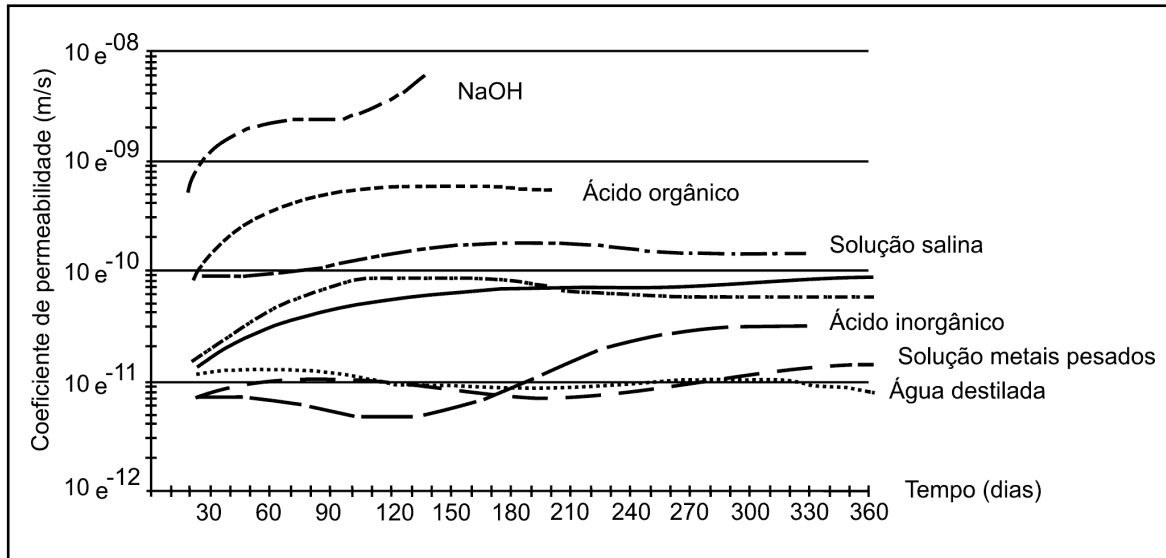


Figura 2.6 - Coeficiente de permeabilidade argila caulínica em função do tempo durante a percolação de diferentes líquidos (adaptado de Simons & Reuter, 1985).

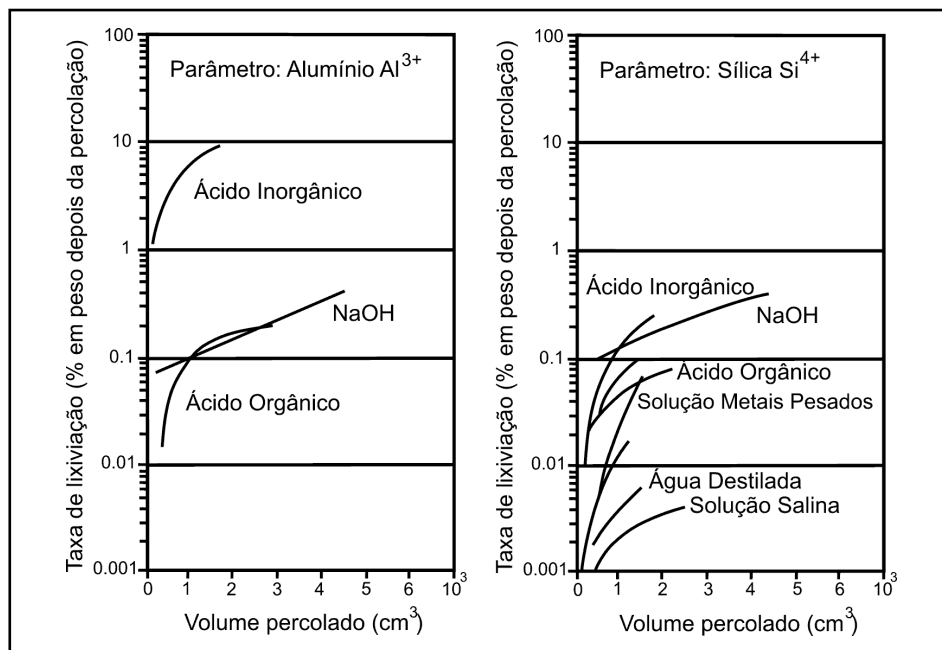


Figura 2.7 - Taxas de lixiviação de alumínio e sílica em argila caulínica durante a percolação de diferentes líquidos (adaptado de Simons & Reuter, 1985).



Ignatius & Pinto (1991) determinaram o efeito da contaminação por um efluente à base de soda cáustica (pH=13,7) numa argila magra arenosa, com fração argila predominante caulínica, estudando três aspectos: granulometria e limites; adensamento e colapsividade; e resistência à compressão simples. Fizeram ensaios de sedimentação e de limites de Atterberg com diferentes concentrações de efluente; ensaios de adensamento na umidade natural, inundados com água e inundados com efluente; e ensaios de compressão simples por carregamento progressivo e por umedecimento progressivo. Concluíram que o efluente se comporta como defloculante para certa faixa de concentrações; para concentrações maiores, o efeito defloculante diminui. O solo é colapsível em presença de água e sua colapsividade aumenta em presença do efluente. A resistência diminui com o efluente.

Kumapley & Ishola (1985) estudaram os efeitos da contaminação na resistência não drenada e nos limites de consistência de uma argila caulínica. As amostras foram amolgadas, preparadas mediante a mistura de solo e soda cáustica. Os resultados mostram que para concentrações crescentes de soda cáustica, apresentadas em termos de pH, o limite de liquidez decresce, assim como a resistência não drenada do solo.

Costa Junior (2001) apresenta um estudo do comportamento mecânico, em especial da resistência, de um solo laterítico submetido à percolação de licores cáusticos a diferentes concentrações. A resistência foi determinada por ensaios triaxiais CID. Interações físico-químicas foram avaliadas por ensaios de pH, capacidade de troca catiônica e ataque sulfúrico. Os resultados demonstraram uma acentuada variação de volume do solo, porém os parâmetros de resistência ao cisalhamento foram pouco afetados. O autor atribuiu os resultados à pouca quantidade de argila no solo (8%).

Rao & Subba Rao (1994) estudaram o efeito da infiltração de soda cáustica na compressibilidade de uma argila caulínica, trabalhando com uma solução de 40% em peso de soda cáustica, com um pH de aproximadamente 14. Observaram em ensaios edométricos com amostras amolgadas que o solo inundado com a solução apresentava uma tendência à expansão. Sugeriram que as causas seriam a ruptura das ligações químicas dos óxidos de ferro e a carga negativa ( $\text{OH}^-$ ) que adquirem as partículas de argila pela passagem da solução, acarretando o afastamento das partículas e resultando em um arranjo mais aberto. O solo estudado provinha da fundação de uma fábrica de soda cáustica, que apresentava vazamentos há 23 anos, ou seja, o material já estava contaminado; determinou-se assim a expansão potencial que o solo ainda apresentava. Na Tabela 2.6 estão resumidas algumas das características do solo. A Figura 2.8 apresenta os resultados relativos à expansão potencial.

Tabela 2.6 - Propriedades físicas e químicas dos materiais analisados (adaptado de Rao & Subba Rao, 1994).

Propriedades	Poço 1	Poço 2	Poço 4	Poço 5
Profundidade (m)	1,5	0,3	1,5	1,5
Teor de umidade (%)	21,0	23,0	21,7	13,5
Índice de vazios	0,67	0,65	0,84	0,76
Peso específico aparente seco ( $\text{kN/m}^3$ )	19,6	20,2	18,0	17,4
Grau de saturação (%)	85	96	70	48
pH em água	10,2	10,7	9,0	8,2
Limite de liquidez (%)	31	31	36	42
Índice de plasticidade (%)	9	12	13	17
% que passa na #4	100	100	100	100
% que passa na #200	39,2	36,7	68,2	34,0
Coefficiente de permeabilidade (m/s)	$8,2 \times 10^{-8}$	$2,2 \times 10^{-8}$	-	-

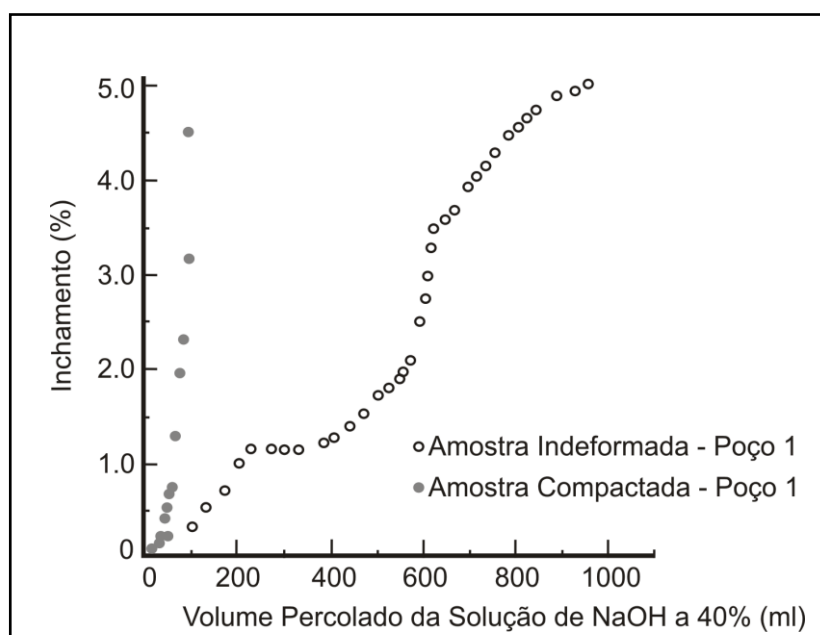


Figura 2.8 - Expansão de amostras amolgadas e indeformadas pela percolação de soda cáustica (adaptado de Rao & Subba Rao, 1994).

Moncada (2004) avaliou a interação entre um solo laterítico e um licor cáustico, a diferentes concentrações e sob diferentes gradientes hidráulicos, em termos do comportamento compressível e colapsível em condições saturadas. Adicionalmente foram avaliados os parâmetros de transporte do contaminante e as mudanças na curva de retenção de

água do solo. Foram executados ensaios de caracterização físico-química do solo e dos licores influente e efluente, análises mineralógicas e micro-estruturais do solo (MEV/SED e difração de raios X), ensaios de adensamento e transporte de solutos, e ensaios para determinar as curvas de retenção de água dos solos antes e depois da contaminação com os licores cáusticos. O solo analisado era arenoso quartzoso com uma pequena quantidade de finos caulíníficos, colapsível em presença de água, e o licor era uma mistura de hidróxido de sódio, hidróxidos de ferro e alumínio. Os estudos indicaram que a interação entre o solo e o contaminante é dominada pela concentração cáustica do licor: as mudanças observadas no colapso, transporte e sucção dependem da concentração. O licor cáustico provoca uma aglomeração ou dispersão das argilas, dependendo da concentração, mudando a distribuição de tamanhos dos poros mais do que o volume total de vazios. Os ensaios também mostraram que o recalque produzido pelo licor acontece em um período curto de tempo, com velocidade dominada pela concentração do licor, aumentando em função da elevação da concentração. As análises mineralógicas e químicas dos solos e dos licores efluentes dos ensaios edométricos parecem indicar que exista uma mudança na macro-estrutura do solo, com a aglomeração de partículas menores pela precipitação de hidróxidos metálicos. Este fenômeno é concomitante com o deslocamento das partículas finas. Não foi observada alteração na caulinita nos ensaios mineralógicos; o que parece mudar com a passagem do licor é o arranjo estrutural das partículas finas. Nas características de colapso do solo, a maior influência é exercida pela concentração cáustica do licor, e em grau menor, pelo gradiente hidráulico, ocorrendo as maiores variações para os gradientes menores. Com respeito ao transporte de solutos, o contaminante apresenta-se pouco reativo com o solo, tendo valores de retardamento baixos. Mesmo assim, existem reações de adsorção-dessorção e de precipitação, constatadas pelos ensaios químicos e mineralógicos.

Conclui-se que a percolação de licores cáusticos realmente altera o comportamento geomecânico dos solos, tanto a permeabilidade como a resistência e a compressibilidade, mas as alterações diferem em função do tipo de solo e da composição da solução cáustica; a permeabilidade pode aumentar ou diminuir, enquanto a compressibilidade tende a aumentar e a resistência tende a diminuir após o contato com a solução. Pode ocorrer também lixiviação de elementos componentes dos sólidos do solo ou precipitação de substâncias neoformadas. Os efeitos são complexos e de difícil previsão, sendo recomendável realizar em cada caso ensaios geotécnicos para determiná-los e quantificá-los. Uma das alternativas para a avaliação da compatibilidade é a investigação da alteração na colapsividade do solo.

## 2.6 COLAPSIVIDADE DOS SOLOS

Um solo colapsível pode ser definido como aquele que apresenta uma diminuição apreciável do índice de vazios provocada pela infiltração de um fluido com ou sem a ação de sobrecarga; o fluido, ao inundar o solo, amolece ou destrói os vínculos entre as partículas (Barden, 1971; Mitchell, 1976; Pinto, 2000).

O estudo de colapso dos solos torna-se importante à medida que vem sendo constatadas interferências nas soluções de projeto ou problemas nas obras de engenharia. Cintra (1998), Guimarães Neto (1997) e Souza Neto (2004) reportam casos de aparecimento de trincas, fissuras ou mesmo rupturas de edificações, reservatórios e canais, depressões em pavimentos rodoviários, túneis e aterros, e escorregamento de taludes ocasionados pelo fenômeno de colapso em obras nacionais e internacionais.

Segundo Barden et al. (1969) e Barden (1971), as condições para a ocorrência de colapso em um solo são:

- um tipo de estrutura razoavelmente aberta e preferencialmente metaestável;
- um componente efetivo da tensão aplicada suficientemente elevado para desenvolver a instabilidade potencial;
- uma alta sucção para promover uma estrutura com rigidez ou resistência temporárias;
- e que a remoção desta sucção no umedimento conduza ao colapso.

Essas condições seriam aplicáveis a todo o tipo de solo colapsível, sendo que em alguns casos à sucção soma-se o efeito da cimentação nos contatos entre partículas.

A estrutura metaestável é composta por macroporos e se mantém devido ao aumento temporário da resistência do solo decorrente de forças eletromagnéticas de superfície, sucção ou cimentações (material argiloso, óxidos de ferro e alumínio e carbonatos), que estabilizam os contatos intergranulares. Uma modificação nesses fatores desestabiliza o conjunto e conseqüentemente causa o colapso. Segundo Barden (1971), a estrutura metaestável de um solo como “loess” seria conseqüência do transporte eólico; em areias fofas, do elevado índice de vazios; em argilas compactadas no ramo seco, do arranjo floculado.

Existe uma variedade de formações, tanto em textura quanto em estrutura, que podem apresentar comportamento colapsível: depósitos eólicos, aluviais, coluvionais, “debris flows”, solos compactados no ramo seco, aterros compactados e solos residuais, sendo a maior incidência os depósitos eólicos, em especial os “loess” (Barden et al., 1969; Dudley, 1970; Mitchel, 1976; Cruz, 1994; Vilar & Gaioto, 1994).

Solos colapsíveis geralmente ocorrem em locais com baixos níveis de precipitação pluviométrica e/ou onde a evapotranspiração excede a precipitação, embora tenham também sido constatados em regiões de maior pluviosidade, como os ambientes tropicais. Segundo Vilar et al. (1981), as regiões tropicais apresentam condições propícias para o desenvolvimento de solos colapsíveis, seja pela lixiviação de finos dos horizontes superficiais nas regiões onde se alternam estações de relativa seca e de precipitações intensas, seja pela deficiência de umidade em regiões áridas e semi-áridas. Diversos casos de solos colapsíveis têm sido relatados no Brasil, geralmente associados a rochas vulcânicas nas regiões central e sudoeste do país, na bacia sedimentar do Estado do Paraná; embora esses solos argilosos resultem de intensa alteração geoquímica e pedogenética *in situ* de basaltos, podem também em alguns casos estar associados a materiais transportados (Gutierrez et al., 2009).

Barden et al. (1969) avaliaram os parâmetros que afetam o potencial de colapso de argilas compactadas, utilizando três solos com diferentes teores de argila. Os corpos-de-prova compactados, moldados em condições distintas de umidade e densidade, foram submetidos a ensaios edométricos com sucção controlada e diferentes trajetórias de tensão. Os resultados apontaram como parâmetro mais significativo o teor de umidade de compactação, responsável pela estrutura do solo compactado. A sucção aumenta a rigidez de um solo compactado no ramo seco (estrutura floculada), mas tem pouca influência no caso da estrutura dispersa (ramo úmido); já o aumento da tensão aplicada aumenta a rigidez independentemente da estrutura. Com o aumento da umidade de compactação, a influência da sucção na rigidez diminui e, portanto, o potencial de colapso decresce. Para uma dada estrutura de solo e uma dada tensão aplicada, o colapso aumenta não linearmente com a sucção que é destruída pela saturação.

Embora o colapso esteja geralmente relacionado à inundação de um solo não saturado com estrutura metaestável, também tem sido observado em casos de contaminação do solo por produtos orgânicos e inorgânicos decorrente de vazamentos de reservatórios e tubulações e da disposição de resíduos (esgoto bruto, águas servidas, chorume, resíduos industriais) em bacias e aterros. O contato com determinadas substâncias altera o comportamento tensão-deformação do solo, em especial quando este apresenta estrutura metaestável (Motta, 2006).

### **2.6.1 Identificação da colapsividade**

Já se encontram disponíveis diversos métodos para identificar e quantificar a colapsividade de um solo, a partir de resultados de laboratório e campo (Tabela 2.7).

Tabela 2.7 – Métodos para identificação da colapsividade (Ferreira, 1995).

Método	Sub-divisões	Definição de critério	Referências bibliográficas
Indireto	Identificativos	Microscopia eletrônica de varredura	Collins & McGow (1974); Wolle et al. (1978); Derbyshire & Mellors (1988)
	Orientativos	Pedologia Ensaio expedito	Ferreira (1990); Ferreira (1993) Arman & Thornton (1972); Jenning & Knight (1975)
	Qualitativos	Índices físicos  Ensaio de Cone Ensaio SPT-T	Denisov (1951) <sup>1</sup> ; Priklonskij (1952) <sup>1</sup> ; Gibs & Bara (1962 e 1967); Feda (1966); Kassif & Henkin (1967); Design of Small Dams (1960 e 1974) <sup>2</sup> ; Código de Obras da URSS (1977) <sup>3</sup> . Código de Obras da URSS (1977) <sup>3</sup> . Decourt & Quaresma Filho (1994)
Direto	Avaliativos	Ensaio edométrico duplo	Reginatto & Ferrero (1973)
	Quantitativos	Ensaio edométrico simples Ensaio de campo	Bally et al. (1973); Vargas (1978); Lutenneger & Saber (1988) Ferreira & Lacerda (1993)

<sup>1</sup> citado por FEDA (1966) – <sup>2</sup> Bureau of Reclamation – <sup>3</sup> citado por Resnik (1989).

Os métodos diretos baseiam-se na quantificação da magnitude do colapso. Os métodos indiretos são aqueles que permitem identificar a potencialidade de colapso estrutural por meio de outros parâmetros, como os índices físicos, limites de consistência ou parâmetros obtidos de ensaios de campo e laboratório.

Dentre os métodos indiretos, a microscopia eletrônica de varredura (MEV), análise química e difração de raios-X são ferramentas que possibilitam inferir a colapsividade do solo: arranjo dos grãos (estrutura floclada ou dispersa), formato e a textura da superfície dos grãos, orientação das partículas, constituintes mineralógicos, características químicas do solo e do líquido de inundação e interações entre os mesmos. Os ensaios químicos determinam a quantidade de cátions solúveis, pH, a capacidade de troca catiônica, a taxa de absorção de sódio e os íons dissolvidos no fluido (Wolle, 1974; Mendonça, 1990; Dudley, 1970; Paixão & Carvalho, 1994; Carvalho, 1994; Reginatto & Ferrero, 1973; Menescal, 1992).

Já em relação aos métodos diretos, os ensaios de laboratório mais empregados são os edométricos, porque fornecem informações quantitativas, isto é, valores de colapso, associados a carregamentos verticais. Como as deformações de colapso dependem do estado de tensões a que o solo está submetido, os ensaios edométricos tem a vantagem de poder simular situações reais de campo.

São duas as formas de realização desses ensaios, ilustradas na Figura 2.9: ensaio edométrico simples, executado com uma amostra inundada numa determinada tensão de interesse; e ensaio edométrico duplo, executado com duas amostras, uma na umidade natural ou compactada e outra inundada no início do ensaio.

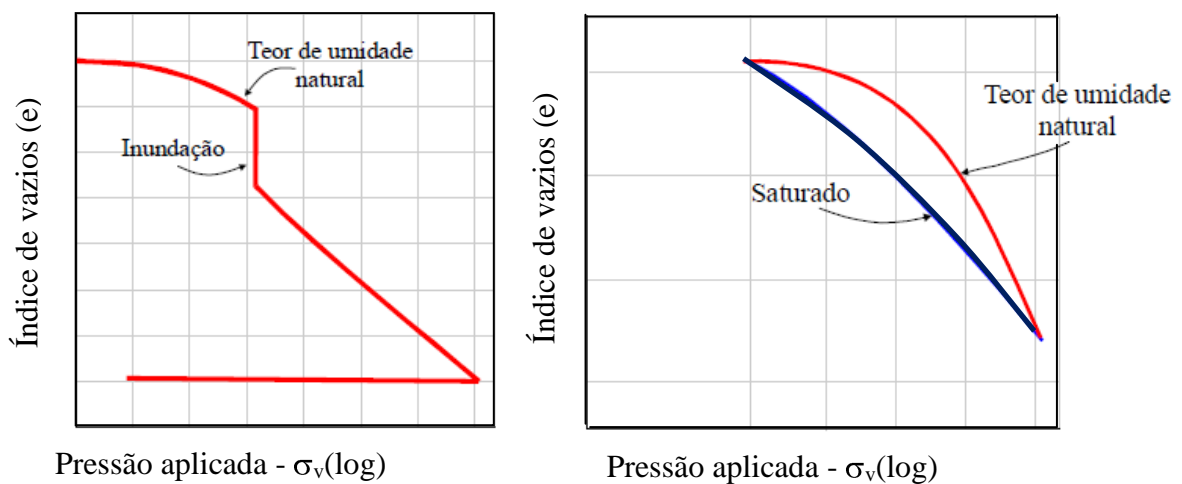


Figura 2.9 - Ensaios edométricos para investigação de colapso: (a) simples e (b) duplo (Jennings & Knight, 1957).

O ensaio edométrico simples é realizado como um ensaio edométrico convencional até atingir a tensão de interesse; estabilizada a tensão, inunda-se o corpo-de-prova e medem-se as deformações de colapso. Em seguida o corpo-de-prova é submetido a um descarregamento progressivo até o final do ensaio. Romero (1995) e Futai (2000) atribuem a este uma vantagem em relação aos ensaios duplos, devido à eliminação de problemas associados ao uso de duas amostras diferentes, no que se refere à preparação, ao grau de perturbação e à homogeneidade da amostra.

O ensaio edométrico duplo consiste em ensaiar duas amostras, consideradas “idênticas”, sendo uma na umidade natural e a outra inundada. Ambas são submetidas a um carregamento inicial de baixa tensão (1 a 10 kPa) durante 24 horas; então se inunda uma delas por 24 horas e a outra é mantida na umidade natural. A seguir são carregadas normalmente, com a aplicação de incrementos de carga dobrados a cada 24 horas.

Jennings e Knight (1957) propuseram um método para a previsão do potencial de colapso de um solo por ensaios edométricos duplos. A partir da diferença entre as curvas de compressão quantifica-se a deformação por colapso que ocorrerá para qualquer nível de tensão, caso o solo se torne saturado (Figura 2.10).

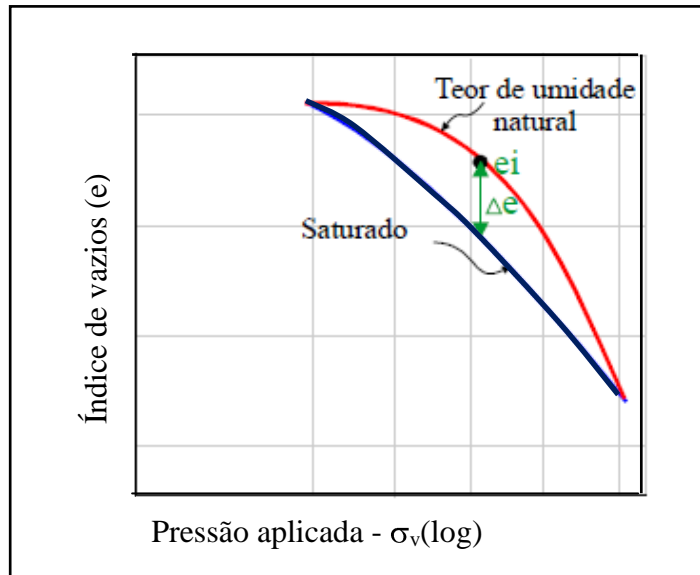


Figura 2.10 – Colapso em ensaio edométrico duplo (Jennings & Knight, 1957).

O potencial de colapso  $I$  é definido conforme a equação (2.8), sendo referido à Tabela 2.8. Os autores ressaltam que  $I$  não é valor de projeto, apenas um índice para guiar o engenheiro em relação à possibilidade de colapso.

$$I = \frac{\Delta e}{1 + e_i} \quad (2.8)$$

Onde:  $I$  – potencial de colapso;

$\Delta e$  – diferença entre os índices de vazios na umidade natural e inundado em determinado nível de tensão;

$e_i$  – índice de vazios na umidade natural no mesmo nível de tensão.

Vargas (1977) considera como colapsíveis os solos que resultarem um coeficiente de colapso estrutural superior a 2%, independente da tensão de inundação.



Tabela 2.8 - Classificação da colapsividade nas obras de engenharia (Jennings & Knight, 1975)

I (%)	Gravidade do Problema
0 – 1	Nenhum
1 – 5	Moderado
5 – 10	Problemático
10 – 20	Grave
> 20	Muito Grave

Knight (1975) recomenda o emprego do ensaio edométrico simples, utilizando uma tensão de inundação de 200 kPa (Figura 2.11) para a obtenção do potencial de colapso. O potencial de colapso neste caso é definido pela equação (2.9).

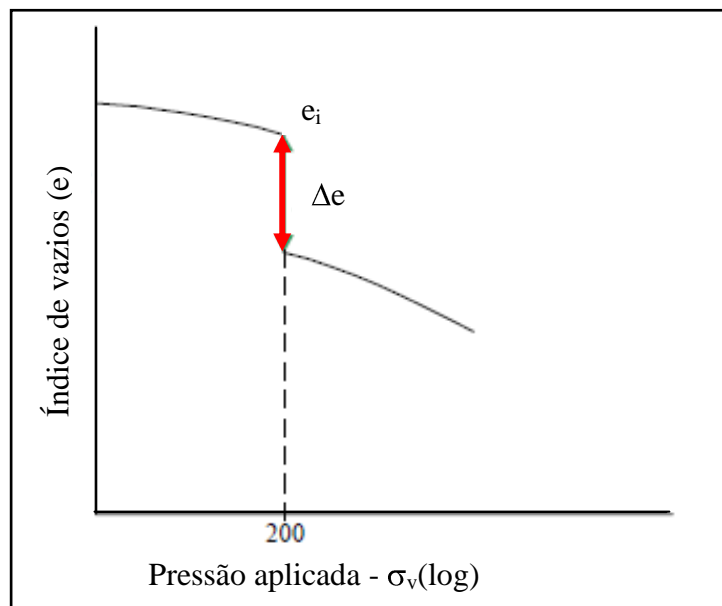


Figura 2.11 – Colapso no ensaio edométrico simples (Lutenegger & Saber, 1988).

$$I = \frac{\Delta e}{1 + e_i} \quad (2.9)$$

Onde:  $I$  – potencial de colapso;

$\Delta e$  – variação do índice de vazios devido à inundação sob 200 kPa;

$e_i$  – índice de vazios do solo sob 200 kPa antes da inundação.

Lutenegger & Saber (1988) sugerem a obtenção do potencial de colapso utilizando ensaio edométrico simples, com amostra inundada à uma tensão 300 kPa com água destilada, podendo ser utilizados outros tipos de fluidos e outros níveis de tensão, de acordo com a situação a ser empregada, onde o potencial de colapso pode ser definido pela equação (2.10).

$$I = \frac{\Delta e}{1 + e_i} \quad (2.10)$$

Onde:  $I$  – potencial de colapso;

$\Delta e$  – variação do índice de vazios devido à inundação sob 300 kPa;

$e_i$  – índice de vazios do solo sob 300 kPa antes da inundação.

O grau aproximado da gravidade do potencial de colapso pode ser avaliado comparando os resultados da equação (2.10) com a Tabela 2.9.

Tabela 2.9 - Grau de gravidade do colapso (Lutenegger & Saber, 1988).

$I$ (%)	Grau de suscetibilidade ao colapso
2	Leve
6	Moderado
10	Elevado

Alguns ensaios *in situ* podem ser utilizados para identificar a colapsividade do solo, visando evitar amolgamento e variação de umidade do solo durante a amostragem. Citam-se a exemplo os ensaios de expansocolapsômetro e prova de carga inundada. O expansocolapsômetro mede as variações de volume dos solos em diferentes profundidades do perfil com possibilidade de controle da vazão de inundação. Diferenças de resultados em relação aos ensaios de laboratório podem ser atribuídas a não uniformidade da pressão transmitida no campo e ao fato de que a infiltração é unidirecional no laboratório e tridimensional no campo (Ferreira, 1993; Ferreira & Lacerda, 1993; El-Ehwany & Houston, 1990). Já os ensaios de prova de carga inundado são geralmente utilizados na avaliação de recalques a que estarão sujeitas as obras projetadas, embora apresentem como desvantagem o elevado custo e a longa duração (Wolle et al., 1981).

## 2.6.2 Influência da solução de inundação no colapso

Ignatius e Pinto (1991) estudaram o comportamento de colapso de uma argila arenosa da região de Sorocaba, de pH 5,5, na presença de um efluente industrial à base de soda caústica, de pH 13,7. As concentrações de sódio e alumínio, elementos de maior importância, eram respectivamente, 68 g/L e 36 g/L, constando ainda a presença de silício, ferro, potássio, cloro, zircônio, fosforo, calcio, cobre, níquel, zinco e titânio. Foram realizados ensaios de adensamento duplos em corpos-de-prova sem inundação e inundados no início com água e efluente; e ensaios simples, inundados sob uma determinada carga inicialmente com água e após a estabilização das deformações com o efluente. O solo apresentou uma deformação axial de 2% para a tensão de 53 kPa, quando inundado com água, e de mais de 15% quando inundado com efluente industrial. É interessante observar que o colapso devido ao efluente industrial ocorreu após o solo já estar saturado com água.

Reginatto & Ferrero (1973) realizaram uma série de ensaios edométricos em um solo da região de Córdoba, Argentina, onde foram constatados danos a construções atribuídos ao fenômeno do colapso. As amostras do solo variaram de silte argiloso a argila, classificadas como ML e CL pelo sistema unificado de classificação de solos. Os estudos mineralógicos indicaram que o argilo-mineral predominante era a illita, com pequenas proporções de montmorilonita e caulinita. Três ensaios edométricos foram realizados inundando o solo com diferentes líquidos: água do sistema de abastecimento da cidade (pH=6,5 a 6,8), efluente de tratamento de esgoto doméstico (pH=8,5 a 9,0) e água ácida (pH aproximadamente 5,5); um quarto ensaio foi realizado na umidade natural. Os resultados indicaram forte influência do líquido percolante nos recalques registrados: algumas amostras apresentaram colapso quando percoladas com o efluente de esgoto ( $I=0,487$  a  $0,063$ ) ou a água ácida ( $I=0,21$ ), enquanto não foi observado colapso com água potável. Os autores concluíram que a interação química com o líquido percolante desencadeou o colapso do solo, em função da dispersão da fração argila.

Cruz et al. (1994) analisaram a influência do líquido permeante (óleo mineral, ácido clorídrico com pH variando de 1 a 5 e hidróxido de sódio com pH variando de 8 a 13) na colapsividade de um solo poroso coluvionar das regiões central e oeste do Estado de São Paulo por meio de ensaios edométricos duplos. Constataram que as variações de índice de vazios do solo, sob tensão de 10 kPa, foram similares para todos os líquidos permeantes, salvo aquelas com soluções de hidróxido de sódio de pH igual a 12 e 13, que apresentaram respectivamente valores de 0,04 a 0,1 acima dos demais. Verificaram também que o solo ao ser inundado com óleo apresentou pequena deformação a partir da tensão de 60 kPa, somente

de expansão; e que o solo expandia sob tensão nula quando inundado com soluções até o pH de 11, enquanto para pH igual a 13 o solo apresentava colapso da ordem de 2,5%. Para a tensão de 160 kPa, os valores de colapso foram de cerca de 9% até o pH de aproximadamente 10,5 e alteraram-se para 14% no pH 13 (Figuras 2.12 e 2.13).

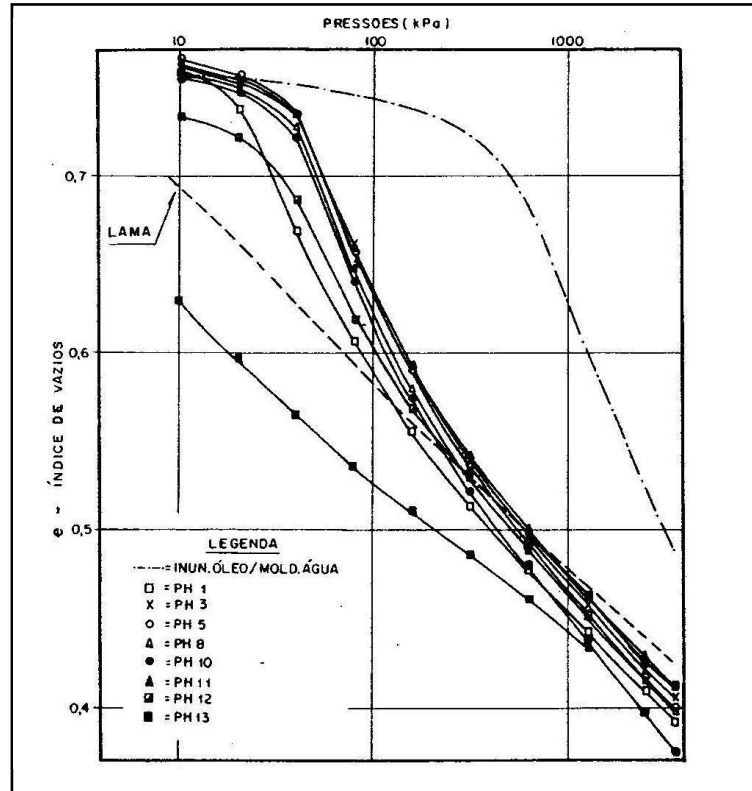


Figura 2.12 - Compressibilidade em função do pH do líquido de percolação (Cruz et al., 1994).

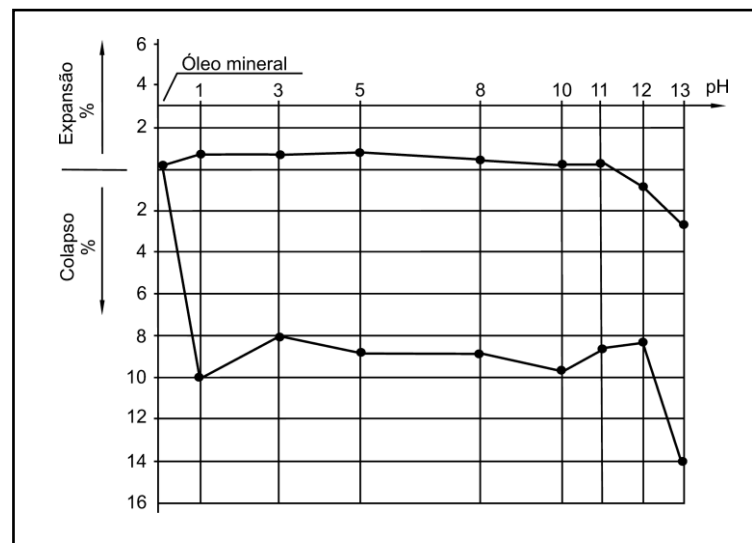


Figura 2.13 – Colapsividade em função do pH do líquido de percolação para a tensão de 160 kPa (Cruz et al., 1994).

Ferreira (1995) realizou ensaios edométricos em amostras indeformadas da areia amarelo-avermelhada de Petrolândia-PE, utilizando para inundação os líquidos não orgânicos: água destilada-AD (pH 6,1), água do rio São Francisco-ARSF (pH 7,5), água do São Francisco que percolou através da Areia Amarelo-Avermelhada-ARSF/AAA (pH 6,6), e água da rede de abastecimento de Pernambuco-ARA (pH 7,9), e os líquidos orgânicos: acetona ( $\text{CH}_3)_2\text{CO}$ , ciclohexano ( $\text{C}_6\text{H}_{12}$ ) e dimetilsulfóxido-DMSO ( $\text{C}_2\text{H}_6\text{SO}$ ). Os corpos-de-prova foram inundados inicialmente e então carregados. Com a AD, o potencial de colapso máximo (6,3%) ocorreu para a tensão de 320 kPa; para as águas ARSF/AAA, ARSF e ARA os valores máximos foram 7,35%, 7,59% e 8,18%, respectivamente, para a tensão vertical de 640 kPa. Quanto aos líquidos orgânicos, o solo apresentou expansão (Figura 2.14) quando inundado e ainda após a aplicação da tensão de 2,5 kPa para o DMSO (1,5%) e o ciclohexano (0,2%). Sob maiores tensões, os corpos-de-prova inundados por DMSO e acetona apresentaram colapso; aqueles inundados por ciclohexano não apresentaram colapso em nenhum dos níveis de tensão aplicada, embora a compressibilidade tenha sido maior que a do solo na umidade natural. Uma das principais conclusões do autor é que o colapso depende das características físico-químicas dos líquidos que interagem com o solo; e que os maiores valores do potencial de colapso ocorreram para líquidos com maiores valores totais de cátions solúveis ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ), principalmente Na, por atuarem como defloculante no solo.

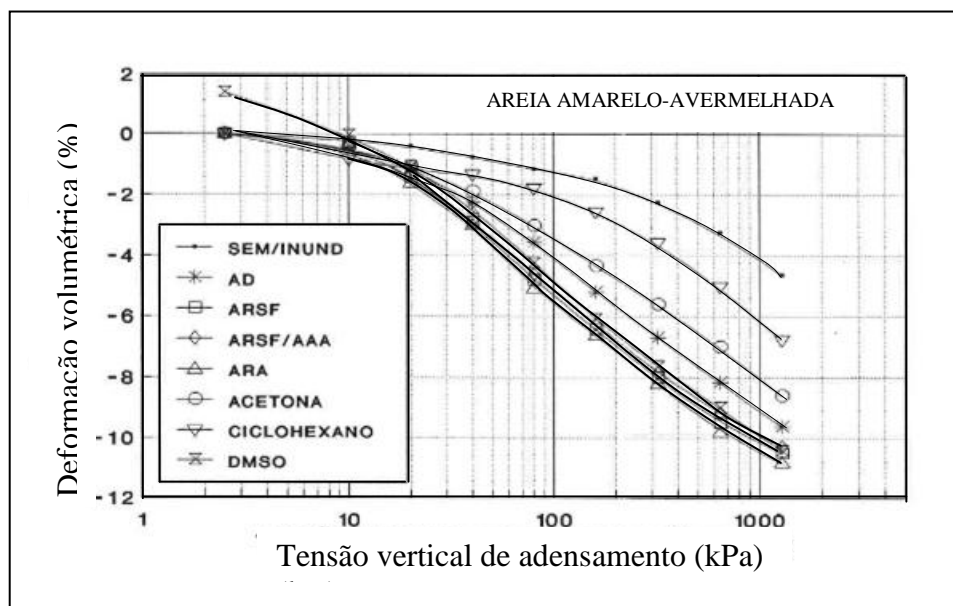


Figura 2.14 - Influência do líquido no colapso (Ferreira, 1995).

Collares & Vilar (1998) investigaram por meio de ensaios edométricos o colapso de dois solos tropicais do Estado de São Paulo, em amostras compactadas e indeformadas, submetidas a inundações com diferentes soluções químicas: uma mistura de hidróxido de sódio (NaOH) com hexametáfosfato de sódio ( $\text{NaPO}_3$ )<sub>6</sub> com pH 11 e uma solução de hexametáfosfato de sódio com adição de ácido fosfórico  $\text{H}_3\text{PO}_4$  com pH 3. Também foram realizados ensaios com água destilada com pH 6,8 para simular água de chuva, vazamento de redes de abastecimento ou água para irrigação. Os autores concluíram que a presença de substâncias misturadas à água tende a alterar o potencial de colapso dos solos, porém o pH das soluções não influenciou no potencial de colapso, talvez devido ao fato de elas terem sido preparadas tendo como base o hexametáfosfato de sódio, que é um defloculante das argilas.

Collares (2002) realizou ensaios edométricos e de dispersão (“pin-hole test”) com dois solos do Estado de São Paulo, sendo um arenoso (A) e outro argiloso (B). Utilizou diversos fluidos, entre substâncias orgânicas e inorgânicas: misturas de hexametáfosfato de sódio com hidróxido de sódio (pH 11), solução ácida (pH 6) e ácido fosfórico (pH 3); misturas de hidróxido com ácido fosfórico (pH 3 e 7); hidróxido de sódio (pH 13,5); mistura de hidróxido de amônia e fluoreto de potássio; água destilada; álcool; benzeno; metanol e formamida. Inicialmente foram realizados ensaios edométricos com as amostras indeformadas inundadas com água nas tensões de 50, 100, 200, 400 e 800 kPa, e na umidade natural. O colapso foi verificado por meio de inundação em ensaio edométrico a 100 kPa. Os dois solos se mostraram colapsíveis quando inundados com água, sendo o potencial de colapso do solo A maior do que o do B. As amostras de solo preparadas com hidróxido de sódio e hexametáfosfato de sódio foram as que apresentaram maior colapso. As soluções preparadas com hidróxido de sódio apresentaram colapso crescente com o pH e com a concentração. Para as misturas de hexametáfosfato de sódio a relação entre colapso e pH não é tão evidente; o maior colapso ocorreu para a concentração de 45,7 g/L, que é a recomendada pela ABNT para a realização do ensaio de sedimentação (NBR 7181, 1984). A constante dielétrica contribui para o aumento do colapso.

Rodrigues & Lollo (2004) estudaram o comportamento de dois solos colapsíveis do Município de Ilha Solteira-SP através de ensaios edométricos simples e duplos e microscopia eletrônica de varredura. O colapso foi avaliado pela inundação das amostras com água destilada, esgoto doméstico e soluções a base de substâncias que compõem os esgotos, como água sanitária, detergente líquido, sabão em pó e óleo de soja. Notaram que o colapso foi maior quando o solo foi inundado com os líquidos de pH alcalino (I= 12,12% com pH=10,31 e I=12,01% com pH= 9,56 para esgoto doméstico e água sanitária, respectivamente), embora

não tenha conseguido afirmar que o aumento de colapso esteja relacionado à alcalinidade da solução, pois as soluções testadas possuíam características distintas como composição química, tensão superficial e viscosidade, constataram que o colapso era maior quando a composição química do fluido de inundação apresentava sódio.

Garcia et al. (2004) analisaram um solo no intervalo de 0,6 a 1,0 m de profundidade, uma areia argilosa laterítica com baixa compactação, do Município de Ilha Solteira – SP, com o objetivo de estudar o efeito de algumas substâncias isoladas no colapso dos solos, utilizando água destilada, esgoto doméstico, soluções a base de substâncias que compõem o esgoto: água sanitária, detergente líquido, sabão em pó e óleo de soja para inundação dos corpos de prova em ensaios edométricos simples e duplos, e conferiram o efeito da inundação do solo em provas de carga em placa, e no carregamento de um protótipo de sapata corrida. Analisaram as características da estrutura do solo antes e após a realização de ensaios edométricos, realizando ensaios de caracterização física e química do solo e microscopia eletrônica de varredura. Perceberam que o colapso depende da composição química do fluido de inundação, e a intensidade parece estar relacionada à capacidade de tais fluidos em atacar os compostos cimentantes do solo, principalmente quando estes fluidos são compostos de sódio.

Monteiro (2005) analisou o colapso de um arenito pleistocênico da cidade do Recife-PE por meio de ensaios de caracterização química, petrográfica e microestrutural do solo antes e depois da inundação com diferentes fluidos: água destilada, gasolina comum, hidróxido de sódio e solução aquosa de cloreto de sódio. Verificou que o solo ao ser inundado com água destilada e hidróxido de sódio apresenta um colapso crescente até certo nível tensão (160 kPa com água destilada e 40 kPa com hidróxido de sódio) e decrescente para tensões mais elevadas. A gasolina comum e a solução aquosa de cloreto de sódio não causaram colapso ao solo, enquanto a solução de cloreto de sódio apresentou maior deformação que os demais, 8%, na tensão de 1280 kPa. Concluiu que a compressibilidade e o comportamento de colapso do arenito devido à inundação com diferentes fluidos estão associados à tensão vertical e à interação solo-líquido.

Parece ser consenso entre os autores que soluções com pH elevado dispersam o solo, diminuindo os contatos borda-face entre as partículas dos argilo-minerais; conseqüentemente, aumentam a colapsividade do solo. Conclui-se, com base na revisão bibliográfica sobre influência da solução de inundação no colapso, que este ocorre não só devido à inundação propriamente dita, ou seja, à eliminação da sucção e amolecimento de agentes cimentantes, mas também pelo fator químico, isto é, as interações das soluções que percolam nos interstícios com as partículas sólidas.

### 3 ESTUDO DE CASO

#### 3.1 APRESENTAÇÃO

O estudo de caso focaliza as bacias de disposição de lama vermelha gerada pela Alunorte S/A no Estado do Pará.

A lama vermelha é o rejeito gerado durante o processo de transformação de bauxita em alumina. A disposição da lama vermelha é feita por empilhamento do material pré-secado, porém ainda bastante úmido e contendo sódio solúvel no fluido intersticial, em bacias formadas por diques ou barragens impermeabilizadas por geomembranas.

Considerando que soluções de bases fortes podem modificar as propriedades geotécnicas dos solos, e que mesmo geomembranas bem colocadas apresentam furos, conclui-se que o eventual vazamento de percolado pode gerar problemas estruturais nas estruturas de contenção e/ou poluição do subsolo e águas subterrâneas sob as bacias de disposição de rejeitos.

#### 3.2 A LAMA VERMELHA

##### 3.2.1 A produção de alumínio

A bauxita é o minério utilizado para obtenção do alumínio metálico e de muitos compostos de alumínio. É formada pelo intemperismo de rochas aluminossilicatas em regiões tropicais e subtropicais principalmente no passado geológico. É composta de um ou mais hidróxidos de alumínio, como gibbsita  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , boehmita  $\text{AlO}(\text{OH})$  e diásporo  $\text{AlO}(\text{OH})_3$ , podendo conter ainda caulinita  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ , goethita  $\text{FeO}(\text{OH})$  e/ou hematita  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , quartzo  $\text{SiO}_2$  e anatásio  $\text{TiO}_2$ , minerais estes que normalmente se encontram em granulometria muito fina (O'Connor, 1988).

Os seus constituintes variam dependendo do contexto geológico do minério e idade. As bauxitas mais ricas em boehmita são encontradas em depósitos na França e Grécia, e as ricas em diásporo, na China, Hungria e Romênia, mais antigas. As bauxitas geologicamente mais novas apresentam alto conteúdo de gibbsita e formam grandes depósitos na Jamaica, Brasil, Austrália, Guiné, Guiana, Suriname e Índia, e são, portanto, as que apresentam maior interesse comercial, em função do maior volume de minério.

O Brasil é o terceiro maior produtor de minério de bauxita, com produção, em 2008, de 26,6 milhões de toneladas, 13% da produção mundial, que foi de 205 milhões de toneladas.



A Austrália é a líder em produção, com 63 milhões de toneladas (31% da produção global), seguida da China com 16% (Ibram, 2008).

Entre 85 a 90% da produção mundial de alumínio e derivados é obtida pelo processo Bayer, que converte a bauxita em alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Os 10 a 15% restantes são convertidos em  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , destinado à aplicação industrial para a manufatura de materiais refratários, abrasivos, produtos químicos, cimento com alto teor de alumina, pigmentos e catalisadores a base de titânio e outros (Constantino et al., 2002).

A composição típica da bauxita de uso industrial é: 40-60% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 12-30% de  $\text{H}_2\text{O}$  combinada; 1-15% de  $\text{SiO}_2$  livre e combinada; 1-30% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; 3-4% de  $\text{TiO}_2$ ; 0,05-0,2% de outros elementos. Na Tabela 3.1 está apresentada a composição química média da bauxita produzida em Porto Trombetas no Pará e beneficiada pela Alunorte em Barcarena.

Tabela 3.1 – Composição química média da bauxita consumida pela Alunorte (Alunorte, 2005<sup>1</sup>).

Constituintes	Porcentagem em peso (%)
$\text{Al}_2\text{O}_3$	49,54
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	11,51
$\text{TiO}_2$	1,47
$\text{SiO}_2$	4,97
Perda ao Fogo	28,14

(\*) valores médios obtidos no ano de 2004

A transformação da alumina em alumínio metálico ocorre por um processo que recebe o nome de redução, processo que implica no uso de insumos como a energia elétrica, criolita, fluoreto de alumínio, coque de petróleo e piche (ABAL, 2002), e se realiza em cubas eletrolíticas sob altas temperaturas, processo patenteado em 1886 por Hall-Hérout. Neste processo, as principais etapas são: a) adição de criolita ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) e/ou fluoreto de alumínio à alumina; b) eletrólise, em fornos de redução revestidos de carbono, com objetivo de dissolver a alumina em banho de fluoretos; c) passagem de corrente elétrica que decompõe a alumina em alumínio e oxigênio; d) retirada do alumínio produzido dos fornos e seu transporte em cadinhos para os fornos de espera; e) lingoteamento do alumínio (Benvenuti, 1995).

<sup>1</sup> Alunorte, 2005 – Relatório químico da bauxita e lama vermelha, concedido pela Alunorte.

### 3.2.2 Processo Bayer de produção de alumina

O processo Bayer de produção de alumina a partir da bauxita foi desenvolvido pelo alemão Karl J. Bayer em 1888, baseado no fato de que os hidróxidos de alumínio são muito solúveis em soda cáustica, não o sendo, porém, os outros minerais constituintes do minério (Padula, 2004).

Nesse processo é explorada uma propriedade química comum à gibbsita, à boehmita e ao diásporo: esses compostos se dissolvem em solução de soda cáustica, NaOH, sob condições moderadas de pressão e temperatura, diferentemente da maioria dos demais constituintes da bauxita. As condições de digestão podem variar muito e um dos aspectos a ser considerado é a natureza do hidróxido de alumínio; a gibbsita apresenta maior solubilidade em solução de soda do que as formas  $\text{AlO}(\text{OH})$ .

Na Figura 3.1 estão apresentadas as etapas do processamento da bauxita para obtenção da alumina, óxido de alumínio de alta pureza, por meio do processo Bayer.

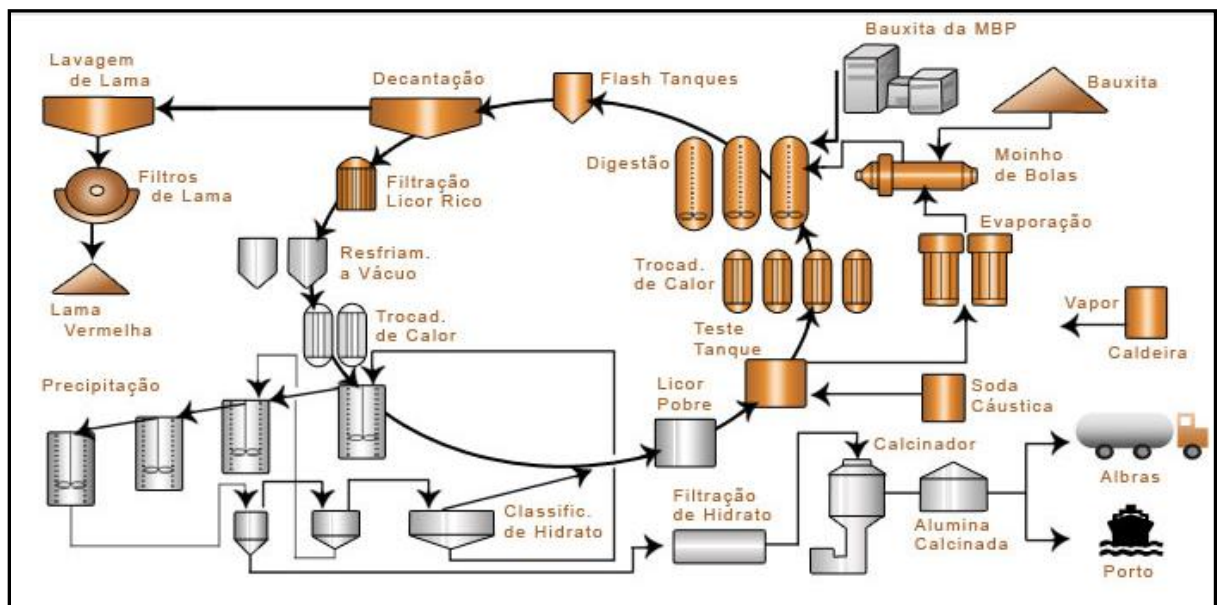


Figura 3.1 - Diagrama do processo Bayer para produção de alumina a partir da bauxita (Alunorte, 2010).

A bauxita britada é moída em moinho de bolas até diâmetros entre 0,80 mm e 0,06 mm e misturada com soda cáustica (solução aquosa de hidróxido de sódio obtida por meio de eletrólise de salmoura). A mistura de bauxita moída e soda cáustica é autoclavada a 160°C–170°C para dissolver o hidróxido de alumínio formando o aluminato de sódio, segundo a reação reversível:



Se a bauxita contiver caulinita, esta também é dissolvida pelo hidróxido de sódio, disponibilizando SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, que em presença de sódio provoca a formação de sodalita e cancrinita. A sodalita é a primeira fase a precipitar, dentro da faixa de temperatura de 90°C a 160°C; horas depois (mais do que 350 horas a 160°C), parte dela se transforma em cancrinita. Os outros componentes da bauxita, tais como hematita, goethita e anatásio/rutilo, permanecem insolúveis.

A adição de CaO facilita a precipitação completa da sílica dissolvida, por meio da formação do silicato de cálcio, que é insolúvel. A etapa seguinte, denominada clarificação (separação sólido/líquido), consiste na separação da solução de aluminato de sódio, Na[Al(OH)<sub>4</sub>], dos óxidos e hidróxidos de ferro, titânio, quartzo, aluminossilicatos de sódio, carbonatos e aluminatos de cálcio insolúveis, em grande quantidade, conhecido como "lama vermelha" (Silva Filho et al., 2007). A solução de aluminato de sódio é posteriormente submetida à hidrólise para recuperar a alumina hidratada original da rocha. A alumina é secada e calcinada para eliminação da água de cristalização.

Normalmente, são utilizadas duas técnicas de separação sólido/líquido combinadas, espessamento seguido de filtração. O espessamento do resíduo proveniente da etapa de digestão é realizado em tanques denominados espessadores/lavadores, que utilizam um circuito de decantação contra-corrente, cujo objetivo é espessar o resíduo de bauxita recuperando o máximo de soda cáustica possível e fornecer um "overflow" para a etapa de filtração contendo uma concentração baixa de resíduos. Polímeros solúveis em água são utilizados para induzir a floculação de partículas e possibilitar o processo de separação lama/licor utilizando-se a técnica de espessamento. Apesar do grande número de polímeros disponíveis, apenas um pequeno número deles são efetivos o suficiente para serem utilizados em escala comercial. Os flocculantes utilizados são o amido, os poliacrilatos e copolímeros de poliacrilatos e poliacrilamidas e copolímeros polihidroxamatados (Góis et al., 2003).



O filtrado é então resfriado e o Al(OH)<sub>3</sub> é precipitado pela adição de partículas (germes de cristalização) de hidróxido de alumínio. Após a remoção do Al(OH)<sub>3</sub>, o filtrado alcalino é concentrado por evaporação e retornado à etapa de digestão. A maior parte do

hidróxido de alumínio é calcinada a 1200°C para produzir óxido de alumínio, ou seja, a alumina,  $Al_2O_3$ , enquanto que uma pequena fração é submetida à secagem e usada novamente no processo.



### 3.2.3 Disposição das lamas vermelhas

As atividades de mineração geram dois tipos principais de resíduos: os estéreis, resultantes do desmonte das rochas até atingir o minério, e os rejeitos, gerados pelo processo de beneficiamento do minério.

Em função do tipo de minério processado e dos tratamentos adotados são gerados rejeitos com variadas características geotécnicas, físico-químicas e mineralógicas. Os rejeitos, quando finos e em água, são denominados lama, e quando predominantemente granulares (diâmetro dos grãos maior do que 0,074 mm), são denominados rejeitos granulares ou de polpa, quando são transportados por meio fluido (Espósito, 2000). No processo Bayer de conversão da bauxita em alumina, os rejeitos gerados, denominados lama vermelha, são finos.

Os rejeitos são geralmente dispostos em bacias formadas por barragens ou diques, para evitar que percolados atinjam águas superficiais e subterrâneas e que o material particulado cause assoreamento de cursos de água. As barragens podem ser convencionais, geralmente de terra, ou construídas com os próprios rejeitos, quando esses forem granulares; nesse caso, utiliza-se a técnica de construção de aterro hidráulico (Espósito, 2000). No caso da lama vermelha, que é um material de granulometria fina, utilizam-se barragens e diques convencionais, geralmente de solo compactado.

Nas minerações, devido às atividades serem permanentes e por longos períodos, a construção das barragens de contenção de rejeitos é realizada por alteamentos sucessivos. Executa-se inicialmente uma barragem piloto, constituída por um dique de pequena altura de terra compactada. Os alteamentos subsequentes acompanham o nível de rejeitos depositados no reservatório, bem como apresentam uma borda livre, que possibilita o armazenamento de água para reaproveitamento no processo de beneficiamento e contenção de cheias.

No mundo inteiro milhões de toneladas de lama vermelha vêm sendo depositadas anualmente. Na Tabela 3.2 estão apontados os principais componentes das lamas vermelhas de algumas partes do mundo.

Tabela 3.2 - Composição química (porcentagem em peso) de lamas vermelhas de diferentes procedências.

Constituintes	Alunorte (*)	Alunorte (**)	Alcoa-MG (***)	Nalco (**)	Mitsui (**)	Gramercy (**)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,4	19,0	14,36	15,5	20,6	16,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	39,3	38,0	46,6	56,45	45,5	53,0
TiO <sub>2</sub>	5,5	3,83	4,34	4,07	8,4	10,0
SiO <sub>2</sub>	16,2	19,9	16,57	3,32	7,0	3,0
Na <sub>2</sub> O	5,7	8,58	2,43	4,87	3,2	2,0
MgO	-	0,04	0,08	0,282	-	1,0
CaO	1,3	0,87	2,62	0,525	4,0	8,0
P.F.	8,6	10,1	13,29	9,85	8,5	-

(\*) valores médios obtidos no ano de 2003 - Fonte: Alunorte, 2005<sup>2</sup>

(\*\*) Fonte: Hildebrando, 1998.

(\*\*\*) Fonte: Freitas, 2003.

A indústria de alumina tem buscado ativamente modos de minimizar o impacto causado pela disposição de lama vermelha, que é feita em áreas especiais como lagoas ou barragens de rejeito, onde são mantidos todos os cuidados para se evitar a poluição do solo e vias fluviais circunvizinhas (O'Connor, 1988). Os locais de disposição são devidamente preparados para receber os rejeitos com vistas a minimizar o impacto ambiental. Dados o grande volume produzido de rejeitos e o elevado custo de construção desses locais de disposição, é necessário procurar técnicas que visem a minimizar esses custos sem comprometer o meio ambiente.

Numerosos esforços têm sido feitos no sentido de se encontrar aplicações para a lama vermelha. Uma das grandes possibilidades de utilização desta é na mistura para fabricação de produtos da indústria de cerâmica estrutural, tais como telha, tijolos, ladrilhos de piso, etc; pigmento para concreto; preparação de cimentos especiais e como adsorvente de matéria orgânica de chorume de aterros sanitários, como apontado no Capítulo 1. Entretanto, a cada ano são produzidas adicionalmente milhões de toneladas de lama vermelha a serem dispostas.

<sup>2</sup> Alunorte, 2005 – Relatório químico da bauxita e lama vermelha, fornecido pela Alunorte

### 3.3 ÁREA DE ESTUDO

#### 3.3.1 Localização e acesso

O complexo industrial Alunorte/Albrás situa-se no Município de Barcarena, a nordeste do Estado do Pará (Figura 3.2) (coordenadas geográficas: 1°30'S a 1°40'S e 48°30'W a 48°50'W).

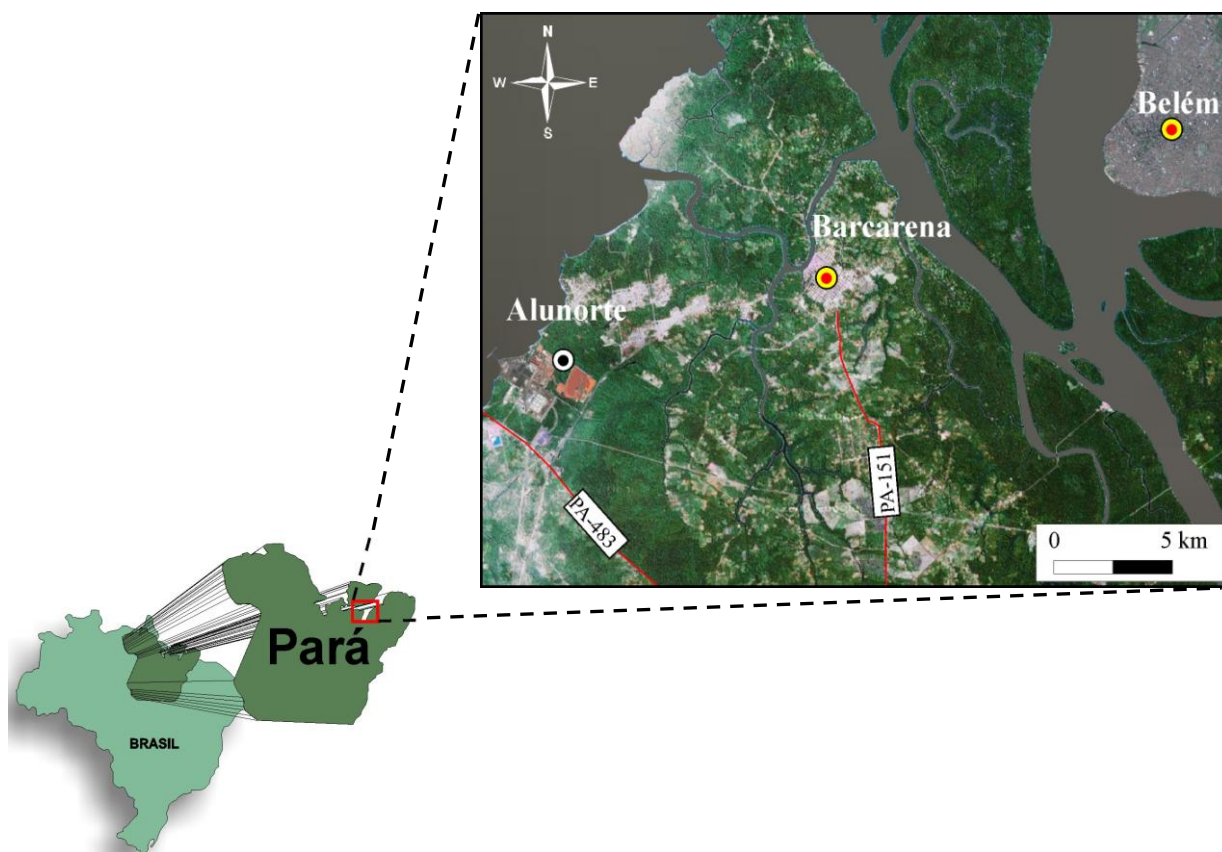


Figura 3.2 – Localização da área de estudo.

#### 3.3.2 Aspectos fisiográficos da região

Na região de Barcarena dominam Latossolo Amarelo Distrófico, Podzol Hidromórfico e o Concrecionário Laterítico (RADAM, 1974). O Latossolo Amarelo Distrófico é muito espesso, desenvolvido sobre os sedimentos lateritizados do Grupo Barreiras, sobre relevo quase plano e coberto por vegetação secundária tipo capoeira. O Concrecionário Laterítico consiste de concreções ferruginosas em matriz silto-argilosa e constitui a base dos solos anteriores, provavelmente expostos pela erosão. Manifesta-se em relevo mais elevado, plano e suavemente ondulado e com cobertura de floresta tropical em áreas ainda não degradadas. O Podzol Hidromórfico ocupa áreas menores e recobre parcialmente os Latossolos Amarelos.

Os solos sob e nos arredores das bacias de disposição de lama vermelha da fábrica da Alunorte são predominantemente do tipo Latossolo Amarelo Distrófico desenvolvidos a partir dos sedimentos do Grupo Barreiras, intensamente lateritizados. Perfis destes solos, obtido através de sondagens a percussão com circulação de água, são apresentados no Anexo B.

O clima é do tipo quente úmido, com temperatura média anual de 27°C e ocorrência de chuvas durante todo o ano, sendo 60 mm a menor precipitação pluviométrica mensal.

A hidrografia é composta pelos rios Arapiranga, Arienga, Barcarena, Murucupi, Itaporanga e Dendê; pelos igarapés Cujari, Tauá, Japiinzinho, Água Verde, Pau Amarelo e Mucuripe, bem como pelo Furo do Arrozal. A maior parte destes deságua na baía do Marajó (Figura 3.3).

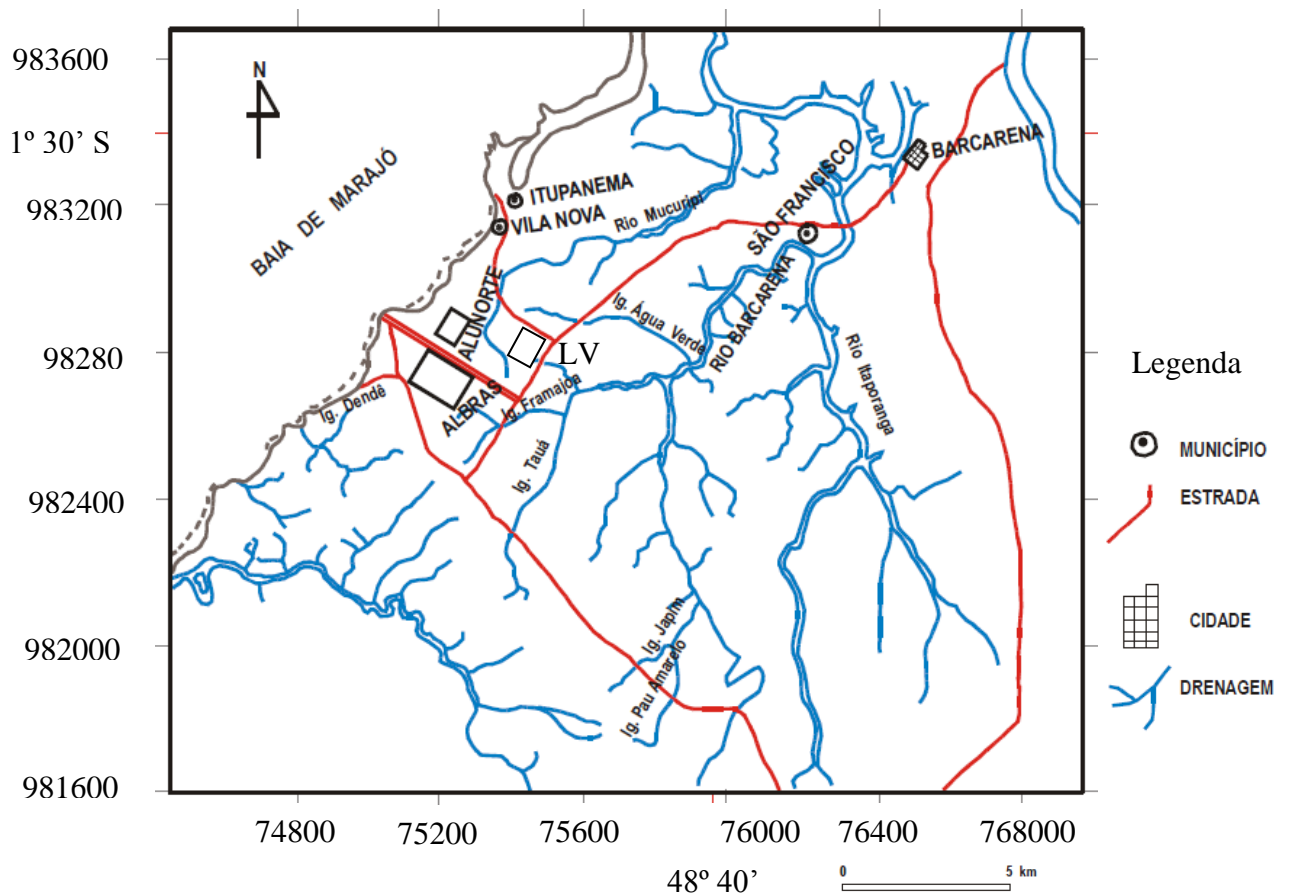


Figura 3.3 – Localização das principais drenagens na Região de Barcarena e sua sensibilidade às bacias de rejeitos (modificado de Pacheco Junior, 2003).

### 3.4 A DISPOSIÇÃO DE LAMA VERMELHA GERADA PELA ALUNORTE

No Pará, no segundo semestre de 1995, entrou em atividade a unidade industrial da Alumina do Norte do Brasil S/A (Alunorte), criada para produzir e comercializar alumina,  $Al_2O_3$ . Ela completa com a Alumínio Brasileiro S/A (Albrás), a Mineração Rio do Norte S/A (MRN) e a VALE em Paragominas, o ciclo de produção de alumínio no Estado. A refinaria da Alunorte localiza-se na margem direita (sul) do rio Pará, ao lado da fábrica da Albrás (Figura 3.3). A área industrial ocupa 100 hectares e há mais de 1000 hectares de reserva para estocagem de resíduos e futura expansão, sendo a maior refinaria de alumina do mundo.

A bauxita produzida pela Mineração Rio do Norte é transportada por 1.000 km ao longo dos rios Trombetas e Amazonas e desembarcada no porto de Vila do Conde; a de Paragominas, por mineroduto por cerca de 244 km. Essa bauxita é conduzida à Alunorte para a produção de alumina. A alumina abastece a Albrás (900 mil toneladas/ano) e é também exportada para outras indústrias de alumínio, no Brasil e no exterior.

De acordo com a Abal (2010), o aumento na produção de bauxita (VALE e MRN), de respectivamente 26,57% e 27,63% entre 2006 e 2008, foi superior ao verificado na produção de alumina (Alunorte), 3,7 % entre 2003 e 2005. A diferença é atribuída ao fornecimento de bauxita pela VALE-Paragominas para a Alunorte a partir de 2007. Considerando que cada tonelada de alumina produzida pelo processo Bayer gera em média 2,0 toneladas de lama vermelha, então no período acima foram geradas 26.439.600 toneladas de lama vermelha e 13.219.800 toneladas de alumina (Figura 3.4).

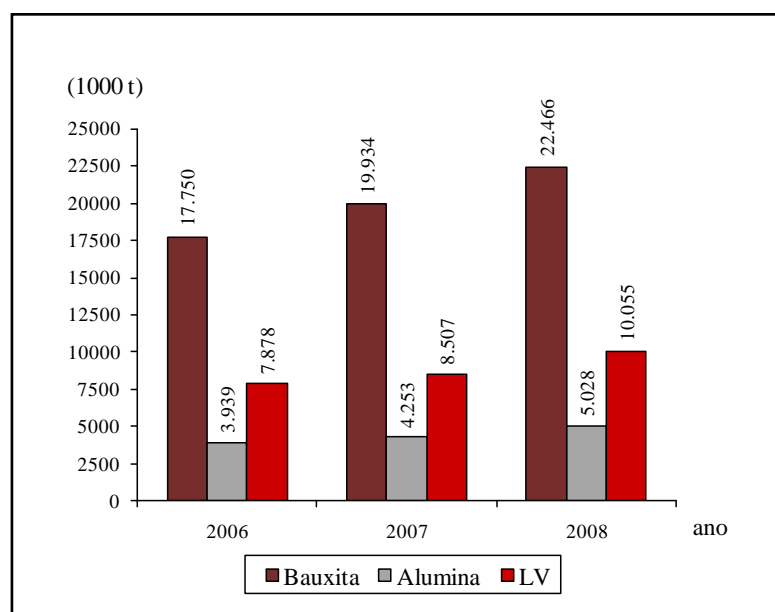


Figura 3.4 - Produção anual de bauxita, alumina e de lama vermelha (Fonte: Abal, 2010).



A lama vermelha, logo após a geração, é transportada em caminhões basculantes para as bacias de disposição ou decantação pelo método "dry-stacking". Este método consiste na disposição progressiva da LV em leitos de secagem até atingir uma determinada altura. Quando todos os leitos de secagem estão ocupados repete-se o ciclo, depositando uma nova camada de lama vermelha no leito de secagem inicial (Silva Filho et al., 2007). Também é praxe lançar a LV em reservatórios ou tanques para adensar sob peso próprio durante algum tempo e aumentar a concentração de partículas sólidas antes da exposição à secagem. Uma demonstração da eficiência desta técnica é encontrada em Ávila et al. (1995), que relatam uma variação de teor de sólidos de 12% para um valor acima de 50% em lamas de lavagem de bauxita. O mesmo efeito também pode ser conseguido com o lançamento do rejeito em camadas de no máximo 20 cm em áreas inclinadas, que podem facilitar o escoamento do excesso de líquido enquanto a LV vai sendo exposta ao ressecamento (Villar, 2002).

A área das bacias de decantação é normalmente de 1.200m x 150m (180.000 m<sup>2</sup>). O fundo das bacias é impermeabilizado com geomembranas (1" de espessura) de polietileno de alta densidade (PEAD), para proteger o subsolo e o lençol freático da contaminação pelos poluentes presentes na LV, principalmente na fase líquida. As bacias são formadas por diques de contenção, construídos com solo compactado de uma área de empréstimo e revestidos por geomembrana (0,75" de espessura). Os diques são alteados em etapas, à medida que a capacidade da bacia vai-se esgotando, até atingir a altura máxima de 10 m. A área das bacias se expande de acordo com a topografia e as condições hidrológicas locais, uma vez que há cursos d'água que cortam a região (Figura 3.3). Na expansão, novos diques são construídos, e os diques antigos são cobertos por lançamento de lama vermelha (Figura 3.5).

O percolado, que corresponde ao fluido presente no resíduo, formado pelo fluido advindo do processo e das águas pluviais que se precipitaram sobre os resíduos depositados nas bacias, é coletado e drenado em canaletas localizadas na base dos diques e em todo o perímetro da bacia (Figura 3.6), e a seguir lançado em uma bacia de captação para tratamento químico, clareamento e correção de pH.

A lama vermelha recém-disposta, e, portanto ainda muita úmida (Figura 3.7 A) permanece nestas bacias até que se apresente um período de estiagem, quando se observa uma camada superficial ressecada e com manchas brancas, provavelmente cloreto de sódio precipitado (Figura 3.7 B). Entretanto, após um período de chuvas o resíduo fica coberto por uma lâmina de água nas áreas mais baixas, até que esta seja eliminada pelo sistema de drenagem, localizado na base dos diques em toda a sua extensão (Figura 3.8).



Figura 3.5 - Expansão da área da bacia de disposição.



Figura 3.6 - Bacia preenchida com lama vermelha.



Figura 3.7 – Disposição da lama vermelha: A) no momento de lançamento; B) após certo tempo de exposição ao sol, sofrendo evaporação e formação de uma película de NaCl.



Figura 3.8 - Bacia de disposição de lama vermelha com acúmulo de água de precipitação pluviométrica.

Caso estas geomembranas apresentem furos ou falhas é necessário que o fundo destas bacias seja revestido por uma camada de solo compactado (“compacted clay liner” - CCL), a fim de evitar o aporte dos efluentes da LV ao subsolo, pois o solo natural geralmente não apresenta coeficiente de permeabilidade adequado para conter a percolação dos efluentes. A permeabilidade máxima recomendada pela legislação para o CCL é  $10^{-9}$  m/s.

Uma avaliação do coeficiente de permeabilidade na área de bacia de disposição de LV da Alunorte foi realizada pela empresa LPS em dois poços, com 3,0 m de profundidade. Em um dos poços o valor de permeabilidade encontrado foi de  $8,0 \times 10^{-7}$  m/s, para um ensaio de campo a carga constante, no fundo de uma pequena cava, enquanto ensaios de laboratório em amostra indeformada, coletada da parede do poço, forneceram uma permeabilidade de  $1,0 \times 10^{-6}$  m/s. Para o outro poço, a permeabilidade medida no fundo do poço para ensaios de carga constante e variável, foi de  $1,0 \times 10^{-6}$  m/s e  $1,6 \times 10^{-6}$  m/s, respectivamente (Relatório PA-105-001-RT, 1994).

Pacheco Junior (2003) chegou a um valor de coeficiente de permeabilidade da ordem de  $10^{-6}$  m/s para a zona não saturada da área da Albrás comparando resultados de ensaios de testes de infiltração (valores médios  $1,8 \times 10^{-6}$  m/s) realizados por Rodrigues (1999) e Melo Júnior (2002) com os obtidos através de método empírico por análises granulométricas (valores médios  $1,0 \times 10^{-5}$  m/s).

Esses valores de permeabilidade não são portanto aceitáveis sob o ponto de vista das legislações internacionais e brasileiras para a disposição de resíduos sólidos, mesmo com o emprego de geomembranas. A recomendação neste caso é utilizar uma camada de solo compactado com permeabilidade menor ou igual a  $10^{-9}$  m/s sob a geomembrana e sobre o terreno natural, fornecendo uma segunda camada de proteção no caso da geomembrana apresentar problemas, além de constituir uma fundação de melhor qualidade para a geomembrana.

#### 4 PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL

A investigação experimental consistiu na determinação das propriedades geotécnicas, mineralógicas e químicas do solo local da área das bacias de disposição de LV da Alunorte, assim como o comportamento deste em relação à percolação de soluções de sódio solúvel na lama vermelha, com a finalidade de utilizar na construção do revestimento impermeabilizante de fundo das bacias de disposição.

A viabilidade técnica de utilização do solo local compactado como CCL (“compacted clay liner”) para disposição de lama vermelha em termos de segurança ambiental a longo prazo foi avaliada por meio:

- da permeabilidade do solo compactado,
- da compatibilidade do mesmo com o sódio solúvel presente na lama vermelha,
- e das reações entre solo e lama vermelha que influam na migração de poluentes para o meio ambiente.

A permeabilidade do solo compactado menor ou igual a  $10^{-9}$  m/s (item 3.2) é exigência de normas ambientais para que o material possa ser utilizado como CCL. Portanto, após a caracterização geotécnica convencional, foram realizados ensaios de compactação e de permeabilidade no ponto ótimo de compactação.

O contato com o percolato derivado da lama vermelha pode, contudo, alterar as propriedades geotécnicas do material do “liner” (camada impermeabilizante), tornando-o mais permeável, menos resistente ou mais compressível. Para verificar a compatibilidade do solo com a lama vermelha foram realizados os seguintes ensaios:

- ensaio de permeabilidade com o solo compactado no ponto ótimo com a percolação de soluções de hidróxido de sódio (colunas de lixiviação),
- ensaios de granulometria com diferentes concentrações de hidróxido de sódio a fim de investigar sua influência na dispersividade do solo;
- ensaios de limites de consistência com diferentes concentrações de hidróxido de sódio a fim de investigar sua influência na plasticidade do solo;
- e ensaios de colapso com soluções de hidróxido de sódio em diferentes concentrações para investigar alterações na compressibilidade e na dispersividade do solo;

Para este grupo de ensaios foi necessário estimar a concentração de sódio solúvel presente na lama vermelha.

As reações entre solo e lama vermelha que podem influir na migração de poluentes para o meio ambiente foram investigadas por meio de:

- ensaios de difusão,
- ensaios de coluna de lixiviação e
- ensaios químicos e mineralógicos comparativos entre solo natural e solo submetido ao contato com a lama vermelha ou com sódio solúvel em concentrações compatíveis com as encontradas na lama vermelha, para desta forma contar com subsídios químicos e mineralógicos para avaliação de impactos ambientais de fato.

Um quantitativo de todos os ensaios realizados na investigação experimental está apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Ensaios e análises realizadas na investigação experimental

	Ensaios	Amostras	Observações	Quantidades de ensaios e análises	
Caracterização física	Limites de consistência	SL	Com água destilada	3	
			Com soluções de sódio	5	
	Granulometria	SL	Com defloculante	2	
			Sem defloculante (água)	2	
Com soluções de sódio			5		
Propriedades geotécnicas	Compactação	PN-1 e PN-2	Energia Normal com reuso	2	
		PN-3	DNER "in situ"	1	
	Permeabilidade	PM-1 a PM-5	Compactado na Energia Normal		
			Confinante 50 kPa	5	
	Colapso-(edométricos simples e duplo)	ES ED	Vide programação na Tabela 4.3		
			ES	16	
Caracterização geoquímica	pH	SL	H <sub>2</sub> O	2	
			KCl	2	
			Soluções de NaOH	6	
	Teor de matéria orgânica	SL	-	2	
	CTC	SL	-	1	
	Análises químicas  (incluem-se todos os elementos maiores, traço e ETR em cada amostragem)	SL-1, SL-2 SL-3	Solo	3	
			Bauxita	1	
			LV-1e LV-2	Lama vermelha	2
			RI-1, RI-2 e RI-3	Perfis de solo	15
		DLV-0  DLV-1 e DLV-2	Ensaio de difusão		
			Solo compactado sem LV	3	
			Solo compactado submetido à difusão	6	
		Lama vermelha	2		
		Difração de raios-x	SL-1 a SL-3	Solo	3
			Bauxita	Bauxita	1
	LV-1 e LV-2		Lama vermelha	2	
	RI-1 a RI-3		Perfis de solo	15	
	DLV		Ensaio de difusão		
			Solo	3	
Lama vermelha		1			
Transporte de poluentes	Coluna de lixiviação	PM-4 e PM-5	Confinante de 50 kPa (sequência do ensaio de permeabilidade)	2	
	Difusão: Sódio solúvel/solo	DSS-1, DSS-2, DSS-3 e DSS-8	C <sub>0</sub> = 35,8 g/L	4	
		DSS-4 a DSS-6	C <sub>0</sub> = 28,7 g/L	3	
	Difusão: LV/solo	DLV-0 DLV-1 e DLV-2	Análises químicas	11	
Difusão: LV/solo	DLV-3	Imagens e análises químicas por MEV/SED	5		

ETR: Elementos terras raras; C<sub>0</sub> = Concentração inicial; MEV = microscopia eletrônica de varredura; SED = Espectrômetro de dispersão de energia.

#### 4.1 SELEÇÃO DO SOLO PARA CCL DAS BACIAS DE DISPOSIÇÃO DE LV

O solo selecionado para esta pesquisa encontra-se na área leste da região das bacias de disposição de LV, denominada área 54, subjacente a uma camada superficial rica em matéria orgânica. A escolha deste solo teve como objetivo avaliar o emprego do material local compactado como “liner”, com a perspectiva da diminuição de custo quando da implantação de outra bacia de disposição de LV.

Foram coletados aproximadamente 100 kg de solo na área 54 (pontos 1 e 3 - Figura 4.1), próximo aos dois poços de inspeção da empresa LPS (pontos 2a e 2b – Figura 4.1) a uma profundidade variando de 0,5 a 1,5 m em relação à superfície natural do terreno, após a retirada de um horizonte antrópico (aterro) e húmus. As amostras foram embaladas em sacos plásticos e transportadas para o Laboratório de Mecânica dos Solos da Faculdade Ideal – FACI, onde foram dispostas em lonas para secar ao ar, homogeneizadas e armazenadas em recipientes plásticos tampados. Ainda na área foi coletada uma amostra de solo (15 kg) de um ponto adicional (ponto 3), com concentração mais elevada de concreções ferruginosas do que a observada na área do ponto 1. As amostras de bauxita foram coletadas na área de estocagem da planta da fábrica, e as de LV na bacia de disposição, logo após o seu lançamento.

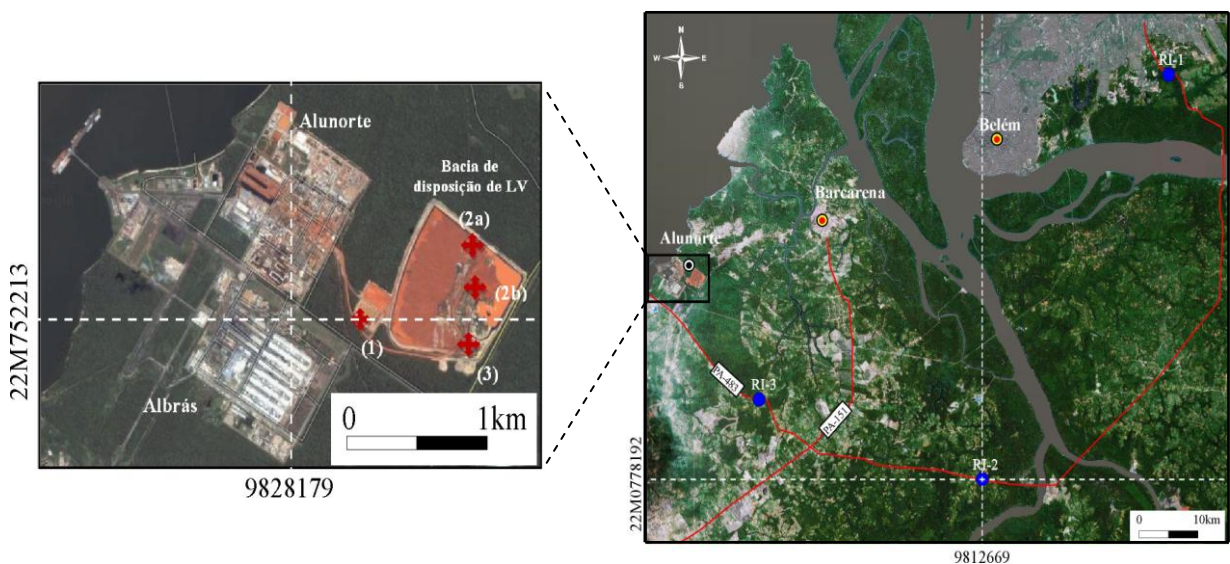


Figura 4.1 - Localização dos perfis RI-1, RI-2 e RI-3 e indicação dos pontos de coleta de amostras para o estudo. Os pontos (1) e (3) indicam o local de coleta de amostras para essa pesquisa e os pontos (2a) e (2b) correspondem ao local da coleta de amostra realizada pela empresa LPS.

A representatividade deste solo na região de influência de Barcarena foi investigada através da seleção de três perfis de solos distintos: RI-1 e RI-2 próximos aos quilômetros 7 e 54, respectivamente, da Alça Rodoviária e RI-3, a 12 km de distância da planta da Alunorte (Figura 4.1).

## 4.2 ANÁLISES QUÍMICAS E MINERALÓGICAS

As análises químicas e mineralógicas foram realizadas em amostras de solo selecionado para construção do CCL, dos solos componentes dos perfis RI-1 a RI-3, lama vermelha e bauxita. Foram analisadas triplicatas do solo local (SL-1 a SL-3) coletadas no ponto 1 (Figura 4.1), duplicatas da lama vermelha (LV-1 e LV-2) e uma amostra de bauxita .

As identificações mineralógicas foram feitas por difração de raios-X no Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará. O aparelho utilizado foi um difratômetro da marca PHILIPS, modelo PW 3710 BASED, equipado com anodo de cobre ( $\lambda_{CuK\alpha 1}=1,54060\text{\AA}$ ), com monocromador e gerador de tensão e corrente ajustados para 45kV e 40 mA, respectivamente. Os registros foram realizados no intervalo de exposição de  $5^\circ$  a  $65^\circ 2\theta$  para amostra total. A identificação dos minerais foi feita com auxílio do software APD (PHILIPS), nos registros digitais obtidos, e o software MINERVA, como banco de dados dos minerais encontrados (baseados no ICDD-International Center for Diffraction Data).

As análises químicas consistiram na determinação dos teores totais dos elementos maiores apresentados na forma de seus respectivos óxidos ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  e perda ao fogo) e dos elementos-traço (Sc, Be, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, In, Sn, Sb, Pb, La, Cs, Ba, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Tm, Er, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Tl, Bi, Th, U) por ICP-MS (“induced coupled plasma mass spectrometry”) nos laboratórios Actlabs (Activation Laboratories LTD) e Acme Laboratories do Canadá.

## 4.3 DETERMINAÇÃO DO PH, CAPACIDADE DE TROCA CATIÔNICA E MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

Para auxiliar o entendimento da interação solo e LV foram determinados o pH, CTC e MO. O pH do solo foi determinado em  $\text{H}_2\text{O}$  e em KCl, seguindo o método proposto por Tomé Júnior (1997) nos Laboratórios de Hidroquímica do Instituto de Geociências da UFPA e de



Análise de Solos da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ). As amostras de solo foram homogeneizadas e passadas na peneira de abertura de 2 mm. Uma massa de 10 g foi misturada com 20 mL de água deionizada, deixada em descanso por 30 minutos, visando umedecimento completo da amostra, em seguida agitada manualmente, e depois de 1 hora de repouso submetida a leituras com medidor de pH. Após a última leitura de pH em água foi adicionado 1,86 g de KCl e determinado o pH. O teor de matéria orgânica foi obtido através da determinação de carbono orgânico total no solo, pelo método Walkley-Black. A capacidade de troca catiônica foi determinada por método da troca compulsiva preconizado por Gillman (1979) em  $\text{BaCl}_2$  (Camargo et al., 1986) no Laboratório da ESALQ.

#### 4.4 CARACTERIZAÇÃO E PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS

As amostras de solo para ensaios de caracterização e propriedades geotécnicas foram preparadas segundo o procedimento recomendado pela ABNT NBR 6457/1986, com secagem prévia.

Os ensaios de análise granulométrica com defloculante, limites de consistência, peso específico dos grãos e compactação com reuso, foram realizados segundo os métodos indicados nas normas, respectivamente, ABNT NBR 7181/1984, ABNT NBR 6459/1984, ABNT NBR 7180/1984, ABNT NBR 6508/1984 e ABNT NBR 7182/1984.

Para análise granulométrica de solos dos perfis geológicos RI-1, RI-2 e RI-3 suas amostras foram inicialmente secas em temperatura ambiente, desagregadas manualmente e homogeneizadas. Posteriormente foram pesadas aproximadamente 100 gramas de cada amostra, colocadas em béqueres e umedecidas com água para desagregação com auxílio de ultra-som. As frações silte e argila em suspensão foram levadas para separação por processo de centrifugação a 1.000 rotações por minuto (rpm) durante 2 minutos, utilizando uma centrífuga de marca Heraeus Christy modelo 4121. Após o processo de centrifugação, a fração silte que se depositou no fundo do recipiente foi seca em estufa a temperatura de 50 °C. A fração argila que permaneceu em suspensão foi novamente a centrífuga a 1500 rpm durante 5 minutos para concentração e depois seca em estufa à temperatura de 50 °C. As frações de areia grossa, média e fina, após a retirada do material em suspensão, foram secas em estufa a 50°C e peneiradas em agitador mecânico por dez minutos, utilizando-se um conjunto de peneiras com abertura de 2,00; 1,41; 1,00; 0,710; 0,500; 0,350; 0,250; 0,171; 0,088; 0,062 mm. Após o peneiramento, as subfrações retidas em cada uma das peneiras foram pesadas separadamente, para a determinação do percentual relativo entre as mesmas.

Os ensaios foram realizados nos Laboratórios de Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Pará, Faculdade Ideal (PA), Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará e Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (SP).

#### 4.5 ENSAIOS DE PERMEABILIDADE

Os ensaios de permeabilidade tiveram o propósito de verificar se o solo local atende à exigência para CCL de coeficiente de permeabilidade menor ou igual a  $10^{-9}$  m/s. Foram realizados ensaios do tipo carga constante e parede flexível no permeâmetro Tri-Flex 2 (Figura 4.2) produzido pela ELE International Inc./Soiltest Products Division, do Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade da Amazônia (UNAMA/PA).

O solo foi inicialmente compactado na Energia Normal, no teor de umidade ótimo. Após a extrusão do solo compactado do cilindro de Proctor, foram moldados por desbaste corpos-de-prova cilíndricos nas dimensões aproximadas de 5,0 cm de diâmetro e 5,0 cm de altura. Para cada corpo-de-prova foram determinados o peso e a umidade, a fim de avaliar se o mesmo se encontrava no teor de umidade e peso específico aparente seco, pré-estabelecidos.

O corpo-de-prova é revestido por uma membrana de borracha impermeável e flexível (Figura 4.2 B), tendo sob a base e sobre o topo um papel filtro e uma pedra porosa. Inicialmente circula-se água pelas tubulações e conexões ligadas à base e ao topo do corpo-de-prova para retirada do ar ocluso. A câmara é preenchida com água e uma tensão confinante é aplicada à água, fazendo a membrana aderir ao corpo-de-prova. O corpo-de-prova é adensado sob a tensão confinante, com drenagem pelo topo e pela base. Após o adensamento, aplica-se uma pressão de água na base e/ou topo do corpo-de-prova para gerar o gradiente hidráulico. A membrana fortemente aderida obriga a percolação da água a ocorrer exclusivamente através do corpo-de-prova, evitando um dos principais problemas dos ensaios de parede rígida: o fluxo entre o corpo-de-prova e a parede do molde. Nesta pesquisa aplicou-se pressão de percolação na base do corpo-de-prova, mantendo o topo à pressão atmosférica, pois o fluxo ascendente facilita a expulsão do ar contido nos vazios do corpo-de-prova. O topo do corpo-de-prova é conectado a uma bureta graduada sob pressão atmosférica, onde se determina o volume de água que percola pelo corpo-de-prova. Mede-se também o volume de água injetado pela base do corpo-de-prova, para comparação com a leitura do volume de água efluente pelo topo, de forma a acompanhar qualquer variação no balanço de massa do sistema.

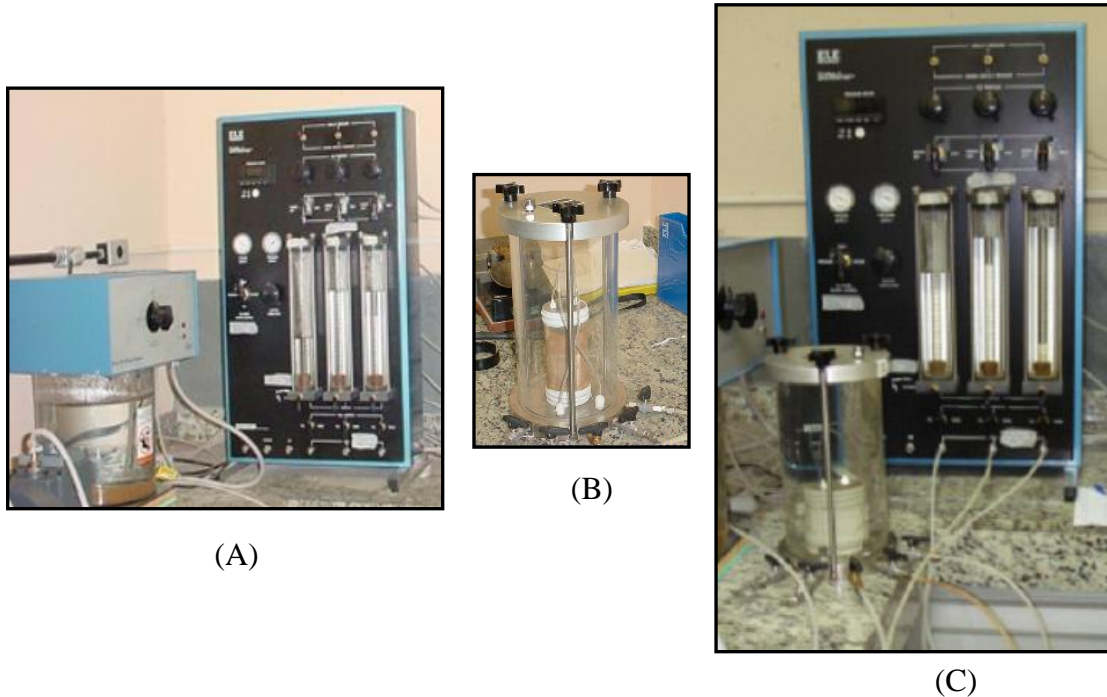


Figura 4.2 - Permeômetro Tri-Flex 2: A) painel e reservatório de água; B) célula com corpo-de-prova; C) célula acoplada ao equipamento.

Foram realizados ensaios com pressão confinante de 50 kPa e gradiente hidráulico de 30, valor recomendado pela ASTM D5084 (vide item 2.2.1).

O término do ensaio de permeabilidade ocorre quando se atinge a constância do coeficiente de condutividade hidráulica (Peirce & Witter, 1986). Nos ensaios deste trabalho, seguiu-se a recomendação de Stuermer (2006) de percolar um volume de água mínimo equivalente a dois volumes de vazios do corpo-de-prova, até a constância do coeficiente de permeabilidade.

#### 4.6 ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE SÓDIO SOLÚVEL NA LV

Para os ensaios de permeabilidade, granulometria e colapso, com o propósito de investigar a compatibilidade entre o solo e o percolado presente na LV foi necessário estimar a concentração de sódio solúvel na LV, considerando-se que nem todo o sódio presente na LV é solúvel.

A concentração de sódio total na LV foi determinada a partir das análises químicas de elementos principais e pela NBR 10.006 (ABNT, 2004), que trata da solubilização de elementos e substâncias químicas presentes em resíduos sob condições ambientais de campo. O procedimento de norma consiste em adicionar 250 g do resíduo em base seca em 1500 ml

de água deionizada, reservar o conjunto por 7 dias, e a seguir determinar a concentração de sódio do material sobrenadante.

Lima (2006) determinou a concentração de sódio solúvel na LV da Alunorte misturando 0,50 g do resíduo e 250 mL de água deionizada em recipiente de polietileno. O tempo de armazenamento da suspensão foi de 144 horas. A concentração de sódio do material sobrenadante foi determinada por espectrometria de absorção atômica.

#### 4.7 ENSAIO DE COLUNA

No ensaio de coluna, além de medir a permeabilidade do solo à solução contaminante para confirmar se há compatibilidade, pode-se estimar também parâmetros de transporte de poluentes em solos: o coeficiente de dispersão hidrodinâmica e o fator de retardamento.

O procedimento do ensaio de coluna iniciou-se com o adensamento do corpo-de-prova e percolação da água, similar ao ensaio de permeabilidade. Uma vez atingida a constância do coeficiente de permeabilidade, trocou-se a alimentação de água por uma solução de partida de composição e concentração conhecidas (Figura 4.3 A).

Nesta pesquisa, a alimentação da solução foi realizada por um reservatório de acrílico de 5L similar a um frasco de Mariotte (Figura 4.3 B), especialmente confeccionado a fim de garantir que não ocorra nenhuma reação entre o material do recipiente e a solução de hidróxido de sódio, que reage com o vidro. O volume desse reservatório é maior do que o dispositivo que acompanha o equipamento Tri-Flex 2 (reservatório com interfaces para solução água-solução), evitando a necessidade de preenchimento frequente. O reservatório é conectado por mangueiras de silicone até o topo da célula. A tubulação que sai da base da célula libera o efluente para um recipiente à pressão atmosférica, para que seja obtida a massa e a concentração do efluente (Figura 4.3 C) em intervalos de tempo. A percolação, portanto, ocorre do topo para a base do corpo-de-prova. A perda de carga total no ensaio é função da altura em que é alojado o reservatório de acrílico em relação à base do corpo-de-prova. O gradiente hidráulico é igual a perda de carga total dividida pela altura do corpo-de-prova.

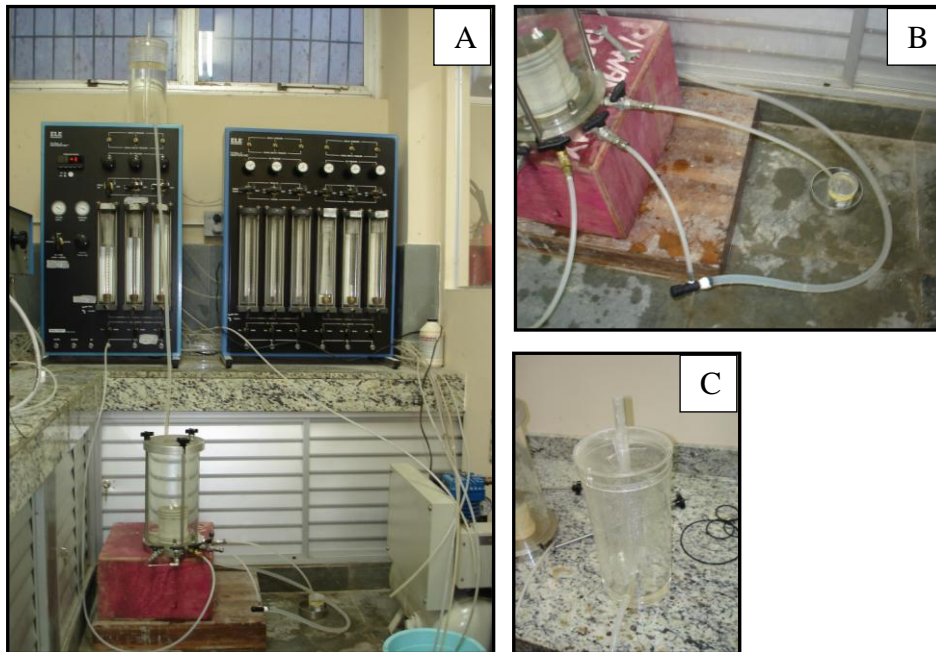


Figura 4.3 - Equipamento Tri-Flex 2 com adaptação para ensaio de coluna: A) vista geral do ensaio; B) detalhe do sistema de coleta da solução percolada; C) detalhe do reservatório de acrílico.

As soluções utilizadas tiveram como objetivo simular o percolado nas bacias de disposição de LV. As concentrações das amostras de efluente foram obtidas por meio do ensaio de fotometria de chama.

Para a estimativa dos parâmetros de transporte de poluentes, utiliza-se a representação gráfica da concentração de saída  $c$  ou da relação  $c/c_0$  ( $c_0$  é a concentração da solução de partida) em função do tempo  $t$  ou do volume de efluente, chamada de curva de saturação do soluto ou curva de eluição ("breakthrough curve"). Um modo de representar a curva de saturação está apresentado na Figura 4.4.

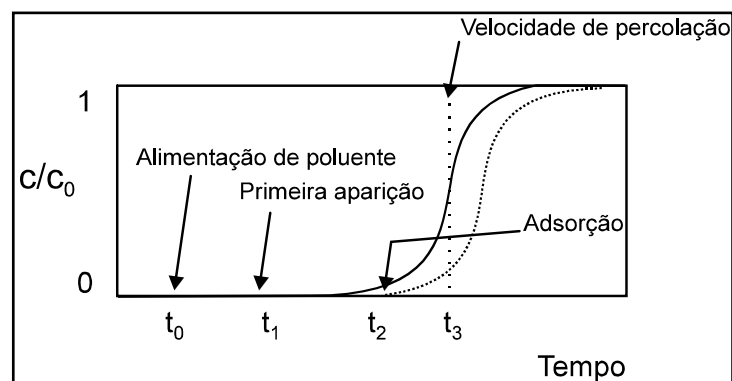


Figura 4.4 - Curva de saturação do poluente (modificado de Freeze & Cherry, 1979).

Se o transporte fosse apenas advectivo, a frente de soluto passaria pelo corpo-de-prova no tempo  $t_3$  relativo à velocidade  $u$  ( $u=v/n$ , sendo  $v$  a velocidade de Darcy e  $n$  a porosidade), e a curva de saturação seria uma função degrau. A dispersão hidrodinâmica faz com que soluto apareça na saída em um tempo  $t_1$  menor que  $t_3$ , e só atinja a concentração da solução aplicada em um tempo maior do que  $t_3$ . Por outro lado, havendo adsorção do soluto pelo solo, a curva será retardada e o soluto atingirá a saída do corpo-de-prova no tempo  $t_2$  (Bosco, 1997).

A curva de saturação de soluto permite determinar o coeficiente de dispersão hidrodinâmica e o fator de retardamento, por meio de expressões matemáticas ou da utilização do programa computacional. Para este estudo foi adquirido o programa POLLUTE através do projeto de pesquisa FUNTEC/SECTAM (Nº 00483/2004).

#### 4.8 ENSAIOS DE GRANULOMETRIA E LIMITES DE CONSISTÊNCIA COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE HIDRÓXIDO DE SÓDIO

Os ensaios de granulometria e limites de consistência com diferentes concentrações de hidróxido de sódio tiveram como finalidade investigar as alterações na dispersividade, compressibilidade e plasticidade do solo;

Foram realizadas duas séries de ensaios:

- a) sedimentação conforme a NBR-7181 (ABNT, 1988), imergindo 70 g de solo em 250 g de solução de hexametáfosfato de sódio (defloculante) com concentração de 45,7 g/L por 12 horas no mínimo; substituindo a solução de hexametáfosfato de sódio por uma solução com concentração a 5% de NaOH (28,75 g/L de sódio); e sem a imersão em defloculante. Esses ensaios foram realizados no LMS-FACI.
- b) granulometria por difração a laser com amostras de solos de 5 g imersas em 100 mL de água, de solução de hexametáfosfato segundo NBR-7181/1988 e de soluções de hidróxido de sódio nas concentrações de 0,12%, 0,56%, 1,23%, 1,89%, 2,5% e 5% (0,67 g/L, 3,22 g/L, 7,07 g/L, 10,87 g/L, 14,38 g/L e 28,75 g/L de sódio). Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais e Componentes (LABMAT) da EPUSP (Figura 4.5).

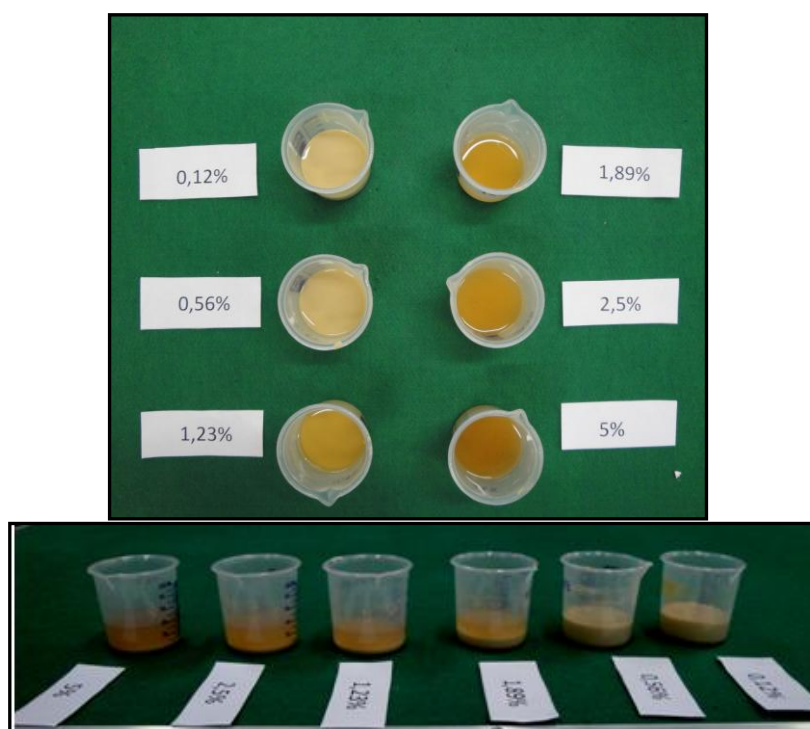


Figura 4.5 - Preparação de amostras de solo com concentrações de 0,12%, 0,56%, 1,23%, 1,89%, 2,5% e 5% de NaOH para análise granulométrica por difração a laser.

O pH das soluções de NaOH foi determinado antes e após o contato com o solo por 2 semanas (Tabela 4.2), a fim de avaliar se mudanças de pH incorreriam em dispersão de partículas. Para essa avaliação também foi realizada uma análise de potencial zeta (item 4.9).

Tabela 4.2 - pH das soluções utilizadas nos ensaios de granulometria

Líquido	pH inicial	pH após contato com o solo
Água	5	5
Hexametáfosfato de sódio	8	9
NaOH 0,12%	11	10
NaOH 0,56%	12,5	10
NaOH 1,23%	13	11
NaOH 1,89%	14	11
NaOH 2,5%	14	11
NaOH 5,0%	14	13

Os ensaios de consistência iniciam com a adição de água destilada à amostra de solo para homogeneização e para atingir um teor de umidade desejado, segundo as NBRs 6459/84

7180/84 para limites de liquidez e plasticidade, respectivamente. Realizaram-se também esses ensaios substituindo a água por diferentes soluções de hidróxido de sódio.

#### 4.9 ENSAIO PARA ANÁLISE DO POTENCIAL ZETA

Esse ensaio tem a finalidade de verificar se, em sistema formado por solo e solução, o pH da suspensão influencia a dispersão das partículas de solo. Foi realizado com o equipamento ESA-9800 da Matec Applied Sciences no Laboratório de Processos Cerâmicos da EPUSP. O sistema ESA-9800 mede as propriedades eletrocinéticas de uma partícula por meio de um método eletroacústico. Um campo elétrico de alta frequência é aplicado a uma dispersão e as partículas se movem por eletroforese no campo aplicado. Se há uma diferença de densidade entre a partícula e o líquido, este movimento gerará uma onda acústica alternada. A aplicação do campo elétrico e a onda acústica resultante fornecem uma medida não intrusiva e não alteram as propriedades da amostra. O Sistema ESA-9800 mede simultaneamente mobilidade das partículas, potencial zeta, pH, condutividade elétrica e temperatura. As amostras podem ser tituladas durante a medida. Ao contrário dos métodos de microeletroforese e espalhamento eletroforético de luz, que exigem amostras bastante diluídas, pelo Sistema ESA-9800, é possível medir dispersões em meio aquoso e não aquoso na faixa de concentrações de 0,5% até 50% pelo volume da fase dispersa, com partículas até 50 micra.

Na análise pode-se verificar a estabilidade de suspensões coloidais. Uma curva típica de titulação isoeletrica resultante deste tipo de análise está apresentada na Figura 4.6.

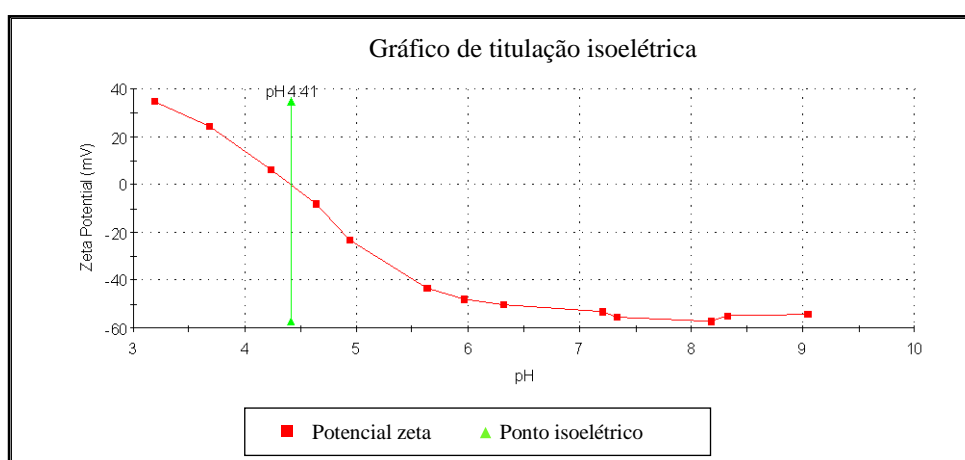


Figura 4.6 - Curva de titulação isoeletrica (Teixeira, 2009)



#### 4.10 ENSAIOS DE COLAPSO (EDOMÉTRICOS)

Os ensaios edométricos nesta pesquisa foram realizados com o objetivo de avaliar o possível colapso do CCL devido ao contato com o sódio solúvel proveniente da LV.

Foram realizados ensaios simples e duplos com corpos-de-prova compactados na umidade ótima da Energia Normal. Os líquidos de inundação foram água destilada e soluções de hidróxido de sódio a diversas concentrações.

Nos ensaios simples, corpos-de-prova compactados na umidade ótima foram submetidos a uma tensão pré-estabelecida e a seguir inundados com água ou com uma solução de hidróxido de sódio; as tensões utilizadas foram 40 kPa, 80 kPa, 160 kPa e 320 kPa (considerando-se que a LV é lançada gradualmente até uma altura de 16 m e apresenta peso específico igual 20 kN/m<sup>3</sup> ou 2tf/m<sup>3</sup>). Os ensaios duplos foram realizados com quatro corpos-de-prova: em um se manteve a umidade inicial (umidade ótima); os demais foram inundados, desde o início do ensaio, com água ou com soluções de hidróxido de sódio. Um quantitativo dos ensaios edométricos simples e duplos realizados está apresentado na Tabela 4.3. Foram utilizadas soluções de NaOH nas concentrações de 0,12%, 1,23% e 5%, equivalentes a 0,67 g/L, 7,07 g/L e 28,75 g/L de Na (Tabela 4.2).

Tabela 4.3 – Programação dos ensaios edométricos para avaliação de colapso.

Ensaio (*)	Tensão de inundação (kPa)	Natural	Solução de NaOH (0,12 %)	Solução de NaOH (1,23 %)	Solução de NaOH (5 %)	H <sub>2</sub> O
ED	-	1	1	1	1	1
ES	40	-	1	1	1	1
ES	80	-	1	1	1	1
ES	160	-	1	1	1	1
ES	320	-	1	1	1	1

\* ES = Edométrico Simples, ED = Edométrico Duplo

Os ensaios foram realizados nos Laboratórios de Mecânica dos Solos da Faculdade Ideal (FACI-PA) e da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). Empregaram-se prensas tipo Bishop, convencionais, com sistema de carregamento através de pesos em pendural, com relação de braço 1:10, e células edométricas do tipo anel fixo, para os corpos de prova inundados com água ou no estado natural. Para os ensaios submetidos à

inundação com soluções de hidróxido de sódio, foi especialmente confeccionada uma célula em aço inox com diâmetro e altura do anel igual a 7,1 cm e 2 cm, respectivamente. As leituras das deformações foram acompanhadas por meio de extensômetros com sensibilidade de 0,01 mm (Figura 4.7).



Figura 4.7 - Célula em aço inox para ensaios edométricos.

O procedimento adotado nos ensaios de colapso foi: primeiramente, o solo foi compactado, extraído do cilindro de compactação e dividido em duas partes para moldagem do corpo-de-prova, ou seja, para cada corpo-de-prova compactado moldaram-se dois corpos-de-prova para ensaios de colapso. A moldagem foi realizada por meio de cravação do anel de adensamento no solo compactado e desbaste do solo ao redor do anel com ferramenta cortante. Em seguida, o anel preenchido com solo foi colocado em uma célula de adensamento e revestido com papel filtro e pedra porosa no topo e na base. Para os ensaios no estado natural a célula foi envolvida por um filme de PVC, a fim de evitar perda de umidade. Aplicou-se então uma tensão vertical mínima de 5 kPa para ajuste do sistema, logo as deformações em função dessa carga não foram consideradas nos cálculos das deformações.

Nos ensaios edométricos simples as tensões verticais de inundação foram aplicadas de forma incremental, iniciando-se com 10 kPa até as tensões verticais de inundação de 40 kPa, 80 kPa, 160 kPa ou 320 kPa. A inundação foi realizada do topo para a base da célula. As deformações devido à inundação foram acompanhadas até a estabilização e as leituras feitas durante 24 horas, nos tempos de 0; 0,10; 0,25; 0,50; 1; 2; 4; 8; 15; 30; 60; 120; 480 e 1440 minutos, de acordo com a ABNT NBR 12007/90. No final do ensaio, após 24 horas do início da inundação sob a tensão pré-estabelecida, as células foram desmontadas e determinado o teor de umidade do solo.

Nos ensaios edométricos duplos os corpos-de-prova foram submetidos a duas condições de carregamento: condição natural e inundação prévia com água ou hidróxido de sódio, sendo os incrementos e duração para cada estágio de tensão similar aos dos ensaios edométricos simples, com acréscimo de tensões até 320 kPa.

Para avaliar as mudanças da estrutura do solo devido ao colapso, duas amostras foram selecionadas e encaminhadas para ensaios de microscopia eletrônica de varredura, retiradas dos corpos-de-prova dos ensaios edométricos duplos: uma do ensaio no estado natural e a outra do ensaio inundado com solução de hidróxido de sódio a 5% (28,75 g/L de sódio).

#### 4.11 ENSAIOS DE DIFUSÃO

Os ensaios de difusão visaram a investigar a difusão do sódio solúvel através do solo em duas condições: o sódio dissolvido em água em soluções sintéticas difundindo pelos poros do solo saturado e o sódio presente na lama vermelha difundindo-se pelos poros do solo na umidade ótima de compactação da Energia Normal (saturação de aproximadamente 90%). A primeira condição foi baseada no procedimento dos ensaios de difusão geralmente realizados no meio técnico, e na segunda tentou-se apresentar um protótipo da eventual disposição da lama vermelha nas bacias sobre o CCL.

Após a difusão, os corpos-de-prova foram submetidos a análises químicas (determinação dos elementos maiores e traços) e mineralógicas. As análises químicas realizadas por fotômetro de chama e ICP/MS, e as fases mineralógicas por difração de raios-X e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

##### 4.11.1 Com soluções de NaOH

O ensaio de difusão empregado foi o apresentado por Barone et al. (1989) e modificado por Boscov (1997). A aparelhagem consiste de uma célula de acrílico com base impermeável removível e tampa com orifício para coleta de amostra. A Figura 4.8 apresenta uma célula de difusão padrão e os dispositivos para compactação do solo nas células. Os corpos-de-prova dos ensaios de difusão foram moldados por compactação estática no ponto ótimo da Energia Normal em cinco camadas na célula de acrílico, reforçada por um anel de PVC (cor marrom) e braçadeiras (Figura 4.8 A) e apoiada em uma placa de metal (Figura 4.8 B). Cada camada compactada, com altura de 1 cm de espessura, foi delimitada por meio de um gabarito de madeira, com altura total de 5 cm (Figura 4.9 A).

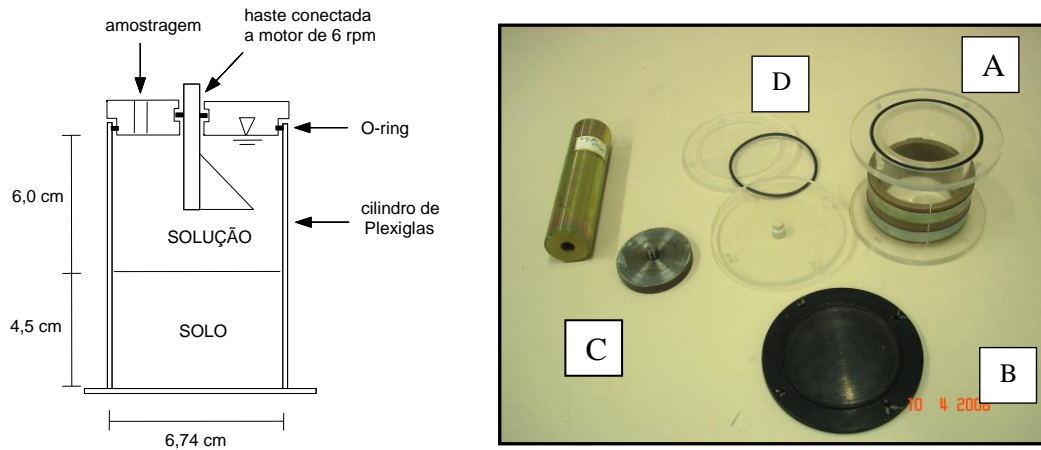


Figura 4.8 - Célula de Difusão: A) célula em acrílico; B) placa em metal para compactação; C) peça adaptada para encaixe de pistão da prensa de compressão simples; D) tampa e base removíveis e anel de vedação (o-ring).

Após a compactação, os corpos de prova foram saturados por capilaridade com água destilada pela base por um período mínimo de três dias (Figura 4.9 C). A seguir a tampa e a base (Figura 4.9 B) foram parafusadas no corpo da célula. O conjunto foi disposto em uma bancada, para que a solução de hidróxido sódico fosse vertida para o interior de célula, tomando-se o cuidado de não lançá-la diretamente sobre o solo (Figura 4.9 D). A parte superior da célula com a solução de partida de concentração conhecida é denominada reservatório.

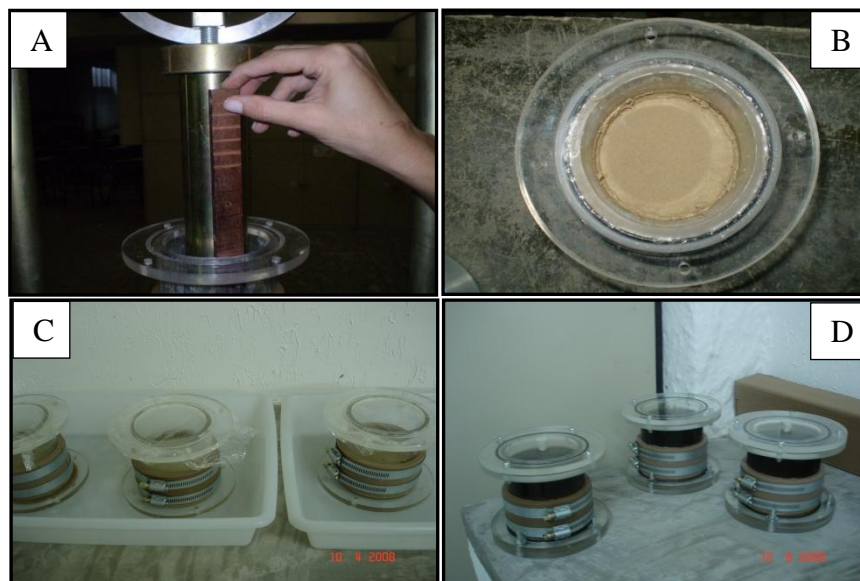


Figura 4.9 - Preparação de ensaios de difusão: A) Moldagem dos corpos-de-prova nas células, com auxílio de gabarito de madeira; B) Vista de uma camada compactada na célula; C) Saturação dos corpos-de-prova por capilaridade e D) células com a solução de hidróxido de sódio.

O soluto na solução de partida tenderá a penetrar no corpo-de-prova de solo por difusão, uma vez que a concentração é maior na solução do reservatório do que no fluido intersticial do solo. A concentração de soluto no reservatório tende a diminuir com o tempo, enquanto a concentração de soluto na água do solo tende a aumentar com o tempo (Figura 4.10).

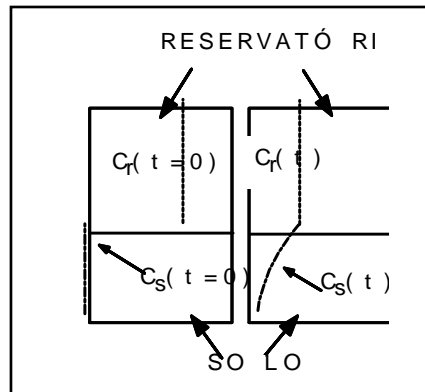


Figura 4.10 - Concentrações no ensaio de difusão no instante inicial e em um instante  $t$  (Boscov, 1997).

O monitoramento da solução no reservatório foi realizado por meio de coleta de amostras de 5 mL a 15 mL por uma micropipeta, inserida no orifício da tampa, em intervalos de tempo pré-determinados. As amostras coletadas foram posteriormente analisadas quanto à sua concentração de sódio em equipamentos de fotômetro de chama.

Foram montados 7 corpos-de-prova para difusão, contaminados com uma solução de hidróxido de sódio a 5%. Esses corpos de prova foram colocados em ambiente livre de circulação de pessoas, com temperatura variando entre 27°C e 28°C, permanecendo em difusão pelo período de tempo indicado na Tabela 4.1.

Tabela 4.4– Corpos-de-prova submetidos aos ensaios de difusão.

Corpos-de-prova	Concentração de NaOH (%)	Concentração nominal de Na (g/L)	Concentração medida de Na (g/L)	Tempo de difusão (dias)
DSS-1, DSS-2, DSS-3, DSS-8	5	35,80	35,80	241
DSS-4	5	28,75	28,70	346
DSS-5	5	28,75	28,70	380
DSS-6	5	28,75	28,70	397

Ao final do ensaio, a solução do reservatório foi retirada e determinada a sua concentração de sódio. O corpo-de-prova foi facilmente extraído da célula, dada a consistência muito mole do material: exerceu-se uma força manual na direção da base para o topo do CP, com auxílio de um disco de metal, sendo colocado um papel filtro no contato com o solo. O solo foi cortado em seis camadas de igual espessura. Não foi possível a extração do líquido intersticial de cada fatia por meio da aplicação de pressão, haja vista que o solo se apresentava muito plástico. A extração do líquido foi realizada com o auxílio de uma centrífuga, de marca Heraeus Christy modelo 4121, com capacidade para 8 tubos de polietileno. Para cada camada, primeiramente, determinou-se a umidade; pesou-se uma parte da mesma e diluiu-se essa alíquota em água deionizada, até o equilíbrio de pesos entre os tubos, mantendo-se controle sobre o volume de água colocado. A velocidade aplicada foi de 5000 rpm em 20 minutos. O líquido extraído foi coletado em frasco de polietileno (aproximadamente 5 mL) e analisado à concentração de sódio. As concentrações de sódio nas amostras extraídas de cada fatia de solo foram determinadas por espectrômetro de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES) no Laboratório Químico da Eletronorte, uma vez que as concentrações não foram detectadas pelo fotômetro de chama. O pH das amostras extraídas de todas as camadas, determinado por meio de papel tornassol, variou entre 9 e 10.

Os dados obtidos nos ensaios de difusão foram analisados com o programa POLLUTE v.7 (Rowe et al., 1994) para a obtenção do coeficiente de difusão e do coeficiente de adsorção. Foram adotadas como condições de contorno: massa finita para o topo e fluxo nulo para a base. A condição de contorno do topo se refere à superfície superior do corpo-de-prova, sobre a qual há um volume constante de solução no reservatório com concentração inicial  $C_0$ , a qual diminui com o tempo, à medida que o sódio é transportado através do solo; não existe alimentação do reservatório durante o ensaio e a massa de sódio disponível para difusão é a inicial. A condição de contorno da base se refere à superfície inferior do corpo-de-prova, em contato com a base estanque da célula de difusão; portanto, por ela não ocorre percolação nem fluxo do contaminante. Os dados de entrada do programa: peso específico aparente seco, porosidade, altura da camada de solo e espessura de solução sobre o solo foram os obtidos nos corpos-de-prova correspondentes. Diversos valores dos parâmetros  $D$  e  $K_d$  foram testados, para se obter curvas ajustadas aos dados experimentais. O critério de ajuste foi visual. O coeficiente de difusão em solução livre a 25°C em diluição infinita foi adotado como limite superior para a variação de  $D$ ; para o sódio este valor é igual a  $13,3 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  (Rowe et al., 1995).

#### 4.11.2 Com a lama vermelha

Foram compactados dois corpos-de-prova no ponto ótimo da Energia Normal, extrudados do cilindro de compactação e depois divididos em duas partes, resultando em quatro corpos-de-prova. Anotou-se para cada parte sua posição, topo ou base, no corpo-de-prova de origem (sequencias topo-meio e meio-base), preocupação devida ao número de golpes recebidos durante a compactação; geralmente o solo é mais poroso na parte superior do que na base do corpo-de-prova (Tabela 4.5). Sobre cada corpo-de-prova foi posicionado um tubo de PVC de igual diâmetro para receber a lama vermelha (Figura 4.11). A LV, homogeneizada com água até aproximadamente a umidade de campo, foi colocada sobre o topo de cada amostra dentro do tubo de PVC, para garantir que o resíduo cobrisse a face superior do solo durante toda a duração do ensaio. O conjunto foi acondicionado em um recipiente plástico e armazenado em câmara úmida, por cerca de 1 ano e 5 meses. Um corpo-de-prova adicional foi compactado, moldado e armazenado em câmara úmida, em iguais condições aos demais, sem cobertura de lama vermelha, para servir de base de comparação para a investigação da difusão de elementos químicos da LV para o solo.

Tabela 4.5 – Valores da moldagem dos corpos-de-prova

Corpos-de-Prova	w (%)	Ø (cm)	H (cm)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\delta$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	n	S (%)
DLV-0 (sem LV)	17,73	10,00	5,33	19,6	16,7	26,3	0,57	0,36	82
DLV-1 (topo-meio)	18,29	10,00	5,60	20,7	17,5	26,3	0,50	0,33	96
DLV-2 (meio-base)	17,77	10,00	5,53	20,3	17,2	26,3	0,53	0,35	88
DLV-3 (topo-meio)	19,00	10,01	6,50	20,0	16,8	26,3	0,57	0,36	88
*DLV-4 (meio-base)	19,00	9,25	6,51	19,9	16,7	26,3	0,58	0,37	87

\*Descartado; W = teor de umidade do solo compactado;  $W_{LV} = 52,53$  %; Ø = diâmetro do corpo-de-prova;  $\varnothing_{PVC} = 10,00$  cm; H = altura de do corpo-de-prova;  $H_{PVC} = 5,00$  cm;  $\gamma$  = peso específico natural;  $\gamma_s$  = peso específico aparente seco;  $\delta$  = peso específico dos grãos; e = índice de vazios; n = porosidade e S = grau de Saturação.



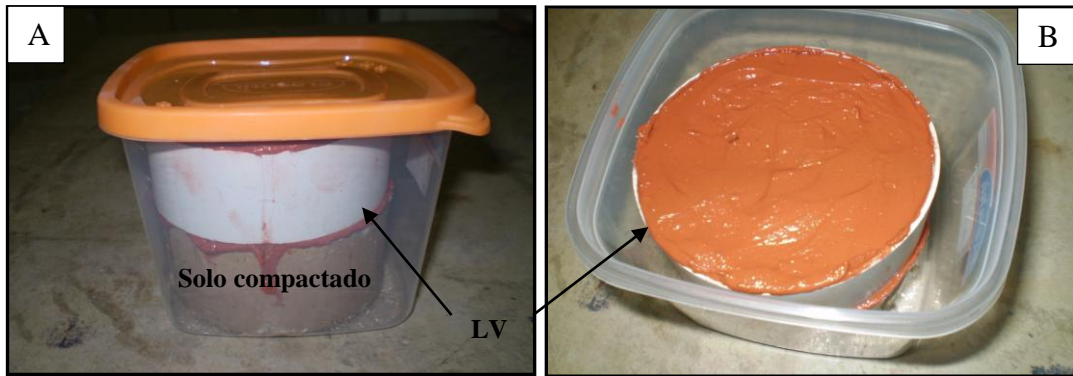


Figura 4.11 – Conjunto LV e solo: A) conjunto acondicionado em recipiente plástico para armazenamento em câmara úmida e B) vista superior do conjunto.

Após o tempo de difusão, a LV foi extraída do conjunto, com auxílio de uma espátula, e determinada a sua umidade (Figura 4.12 A). O solo foi retirado do recipiente plástico (Figura 4.12 B) e dividido em fatias (Figura 4.12 C); procedeu-se a coleta de solo em três pontos a 1,5 cm, 3 cm e 4,5 cm da parte superior do corpo-de-prova (Figura 4.12 D). Para o corpo-de-prova DLV-0 (solo sem cobertura de lama vermelha) a coleta do solo foi realizada em um ponto central, após a divisão do mesmo em duas partes. As amostras foram submetidas à análise química no ACME Analytical Laboratories LTD no Canadá.



Figura 4.12 – Ensaio de difusão: A) extração da lama vermelha; B) corpo-de-prova após a retirada do molde de PVC; C) fatiamento do solo e D) coleta de amostras.



O corpo-de-prova DLV-3 foi utilizado para ensaios de MEV. O conjunto foi resinado, empregando-se araldite GY 257 da Maxepoxi Indústria e Comércio LTDA (Figura 4.13 A e B), dividido ao meio (Figura 4.13 C) e depois cortado em pedaços menores, lixados e resinados para as leituras das fases por MEV (Figura 4.13 D). No desenho esquemático da Figura 4.14 estão indicados os pontos das análises semi-quantitativas para a amostra em cinco perfis da lâmina LV/Solo.

As análises foram realizadas no Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da EPUSP.

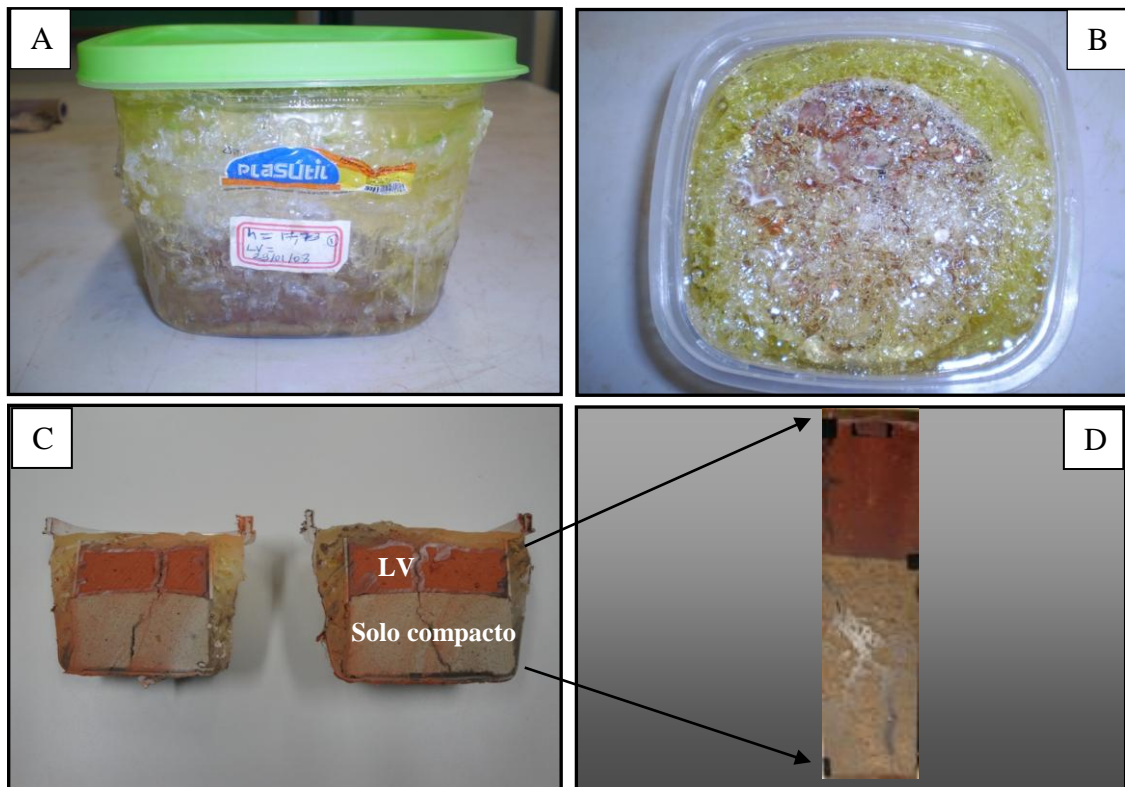


Figura 4.13 – Preparação de amostra para análise por MEV: A) e B) vistas frontal e em planta do conjunto LV e solo após a utilização de resina; C) e D) divisão do conjunto ao meio e em partes menores para análise em MEV.

#### 4.12 ENSAIO DE REOMETRIA

Com a perspectiva de avaliar a viscosidade e a resistência do solo após o tempo de difusão das amostras DLV foi realizado o ensaio de reometria de fluxo com um reômetro AR550, TA Instruments, do Laboratório de Materiais e Componentes (LABMAT) da EPUSP.

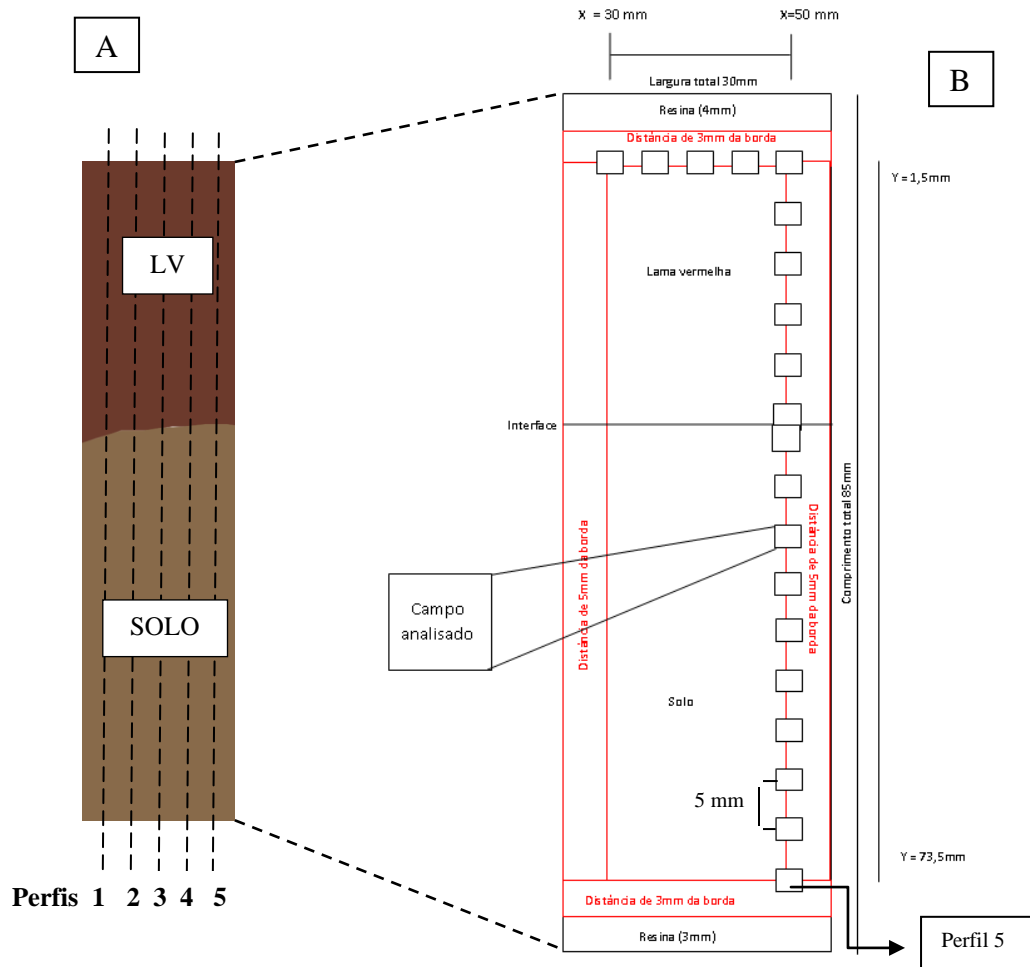


Figura 4.14 - Desenho esquemático da distribuição espacial dos pontos de análises químicas por MEV/SED da amostra DLV-3: A) Lâmina LV/SL com os campos de análise e B) Indicação dos perfis analisados.

O ensaio de fluxo mede a tensão de cisalhamento a uma dada taxa de cisalhamento (ou vice-versa). Com a variação da taxa ou da tensão de cisalhamento, uma curva de escoamento pode ser traçada e, através desta, determina-se às propriedades reológicas do material: viscosidade (resistência ao escoamento) e tensão de escoamento (tensão mínima necessária para iniciar o escoamento do material) (Betioli et AL., 2009; Castro, 2009). Para esse estudo foram utilizadas duas amostras de solo, sendo uma no estado natural e outra de um corpo-de-prova submetido ao ensaio de difusão com lama vermelha (DLV-3). Para cada amostra foi preparada uma pasta com 15 g de solo e 10 g de água, variando-se a taxa de cisalhamento de 0 a 400 s<sup>-1</sup>, com retorno a 0.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 ASPECTOS GEOLÓGICOS DA ÁREA

A geologia da área de domínio de Barcarena está representada pelos sedimentos Plio-Miocênicos da Formação Barreiras. Dominam siltitos e argilitos na base aflorante, com lentes conglomeráticas na zona intermediária, inseridas em arenitos a arenitos conglomeráticos, com estruturas sedimentares indicativas de sedimentação flúvio-lacustre (Benvenuti, 1995). Estes sedimentos encontram-se indistintamente alterados pela lateritização imatura, com a formação de horizontes mosqueado, crosta ferruginosa e latossolos amarelos (Costa, 1991). Nas depressões, vales e na zona costeira os sedimentos lateritizados da Formação Barreiras são recobertos por depósitos de argilas e areias recentes, que correspondem aos domínios das várzeas periodicamente inundados pelos rios, igarapés e furos.

Os afloramentos mais expressivos do Grupo Barreiras na área estão representados na falésia de Vila do Conde, em que se pode observar siltitos e argilitos na base, já mosqueados, localmente com transição para a rocha-sã, formada por argilitos cinzas; na parte intermediária o material se torna mais arenoso, por vezes conglomerático, sobreposto por crostas ferruginosas colunares a concrecionárias; no topo, nos últimos 2 a 4 metros domina material arenoargiloso, amarelo, localmente concrecionário, correspondendo ao que se denomina regionalmente de Latossolos Amarelos, capeados no topo por 10 a 20 cm de solos cinza escuros.

Nas proximidades da área das bacias de disposição da LV, em cavas para extração de material de construção (rodovia e residências), este material encontra-se exposto e está representado pelas crostas ferruginosas e pelos Latossolos Amarelos, que também podem estar recobertos por areias brancas, representativas de podzóis, frequentes na região. A espessura total observada não ultrapassa 10 m.

As bacias de disposição da lama vermelha são escavadas ao longo deste pacote de solos e de sedimentos, os quais são empregados também para construção das barreiras de contenção. São por este motivo o objeto principal do presente estudo no que concerne à construção de CCLs. Portanto, em princípio o material dos taludes laterais e da base das bacias apresenta grande variação granulométrica e mineralógica.

De acordo com a empresa LPS (Relatório PA-105-001-RT, 1994), as seções geológicas - geotécnicas obtidas por poços e sondagens a trado, quando da implantação das bacias de disposição de LV na Alunorte, mostram que as camadas mais superficiais do solo da região são relativamente homogêneas, consistindo de uma camada de aproximadamente 1 m

de espessura de areia argilosa sobreposta a uma camada de areia fina variando de 3 a 4 m de espessura, que se sobrepõem a areias finas com concreções ferruginosas (Anexo A). No anexo B está apresentada a localização das investigações geotécnicas realizada pela empresa LPS.

As seções geológicas obtidas por sondagens a percussão com circulação de água (SPT) pela empresa Solotécnica Engenharia Ltda (Solotécnica, 2002) para expansão da bacia, apresentadas no Anexo C, mostram camadas superficiais de 1,9 m de profundidade com silte argiloso que se sobrepõe a um silte argiloso com concreções ferruginosas; sob essas camadas encontra-se areia fina a média siltosa ou argilosa com concreções ferruginosas de tamanho centimétrico a decimétrico. Essas descrições se equivalem às descrições geológicas da Formação Barreiras lateritizada.

A distribuição lateral das diferentes litologias não é contínua, como é natural em uma sedimentação flúvio-lacustre, e desta forma os perfis geológicos observados mostram lateralmente características geotécnicas distintas, como foi detectado pelas empresas LPS e Solotécnica em seus ensaios geotécnicos.

### **5.1.1 Os perfis de solos da região**

Para avaliar com mais detalhes as características geológicas dos solos que servem de substrato e anteparo para as bacias de disposição de lama vermelha, e assim subsidiar a análise geotécnica e ambiental dos mesmos ao receberem e suportarem a lama vermelha, selecionaram-se três perfis de solos, ou seja, de materiais procedentes da porção superior da Formação Barreiras lateritizada, aflorantes junto à área das bacias. Estes perfis são apresentados na Figura 5.1. O perfil RI-1 alcança 610 cm de profundidade (Figura 5.1 A), apresentando uma argila friável marrom avermelhado no intervalo final; entre 60-550 cm de profundidade o material apresenta textura silto-arenosa, com mosqueamento de cor lilás em matriz esbranquiçada; à profundidade de 60 cm foram expostas as concreções ferruginosas, com cores variáveis entre marrom e amarelo no topo do perfil. O perfil RI-2, com 360 cm de profundidade (Figura 5.1 B), é composto por um material areno-conglomerático ferruginizado marrom desde a base da sondagem até a profundidade de 45 cm, sendo que abaixo da profundidade de 290 cm este é ligeiramente argiloso; apresenta uma linha de pedra (fragmentos de crosta ferruginosa) entre 40 e 45 cm de profundidade, o material superficial tem textura silto-arenosa de cor amarelo escuro. Já o perfil RI-3, exposto em um talude de corte de rodovia, atingiu até 380 cm (Figura 5.1 C); o perfil é constituído por material silto-argiloso até a profundidade de 50 cm, mosqueado, cujas manchas se dispõem de forma vertical, descrevendo aspecto colunar; o material de cobertura (de 50 cm de profundidade até

o topo de perfil) apresenta textura areno-argilosa de cor marrom escuro com concreções ferruginosas.

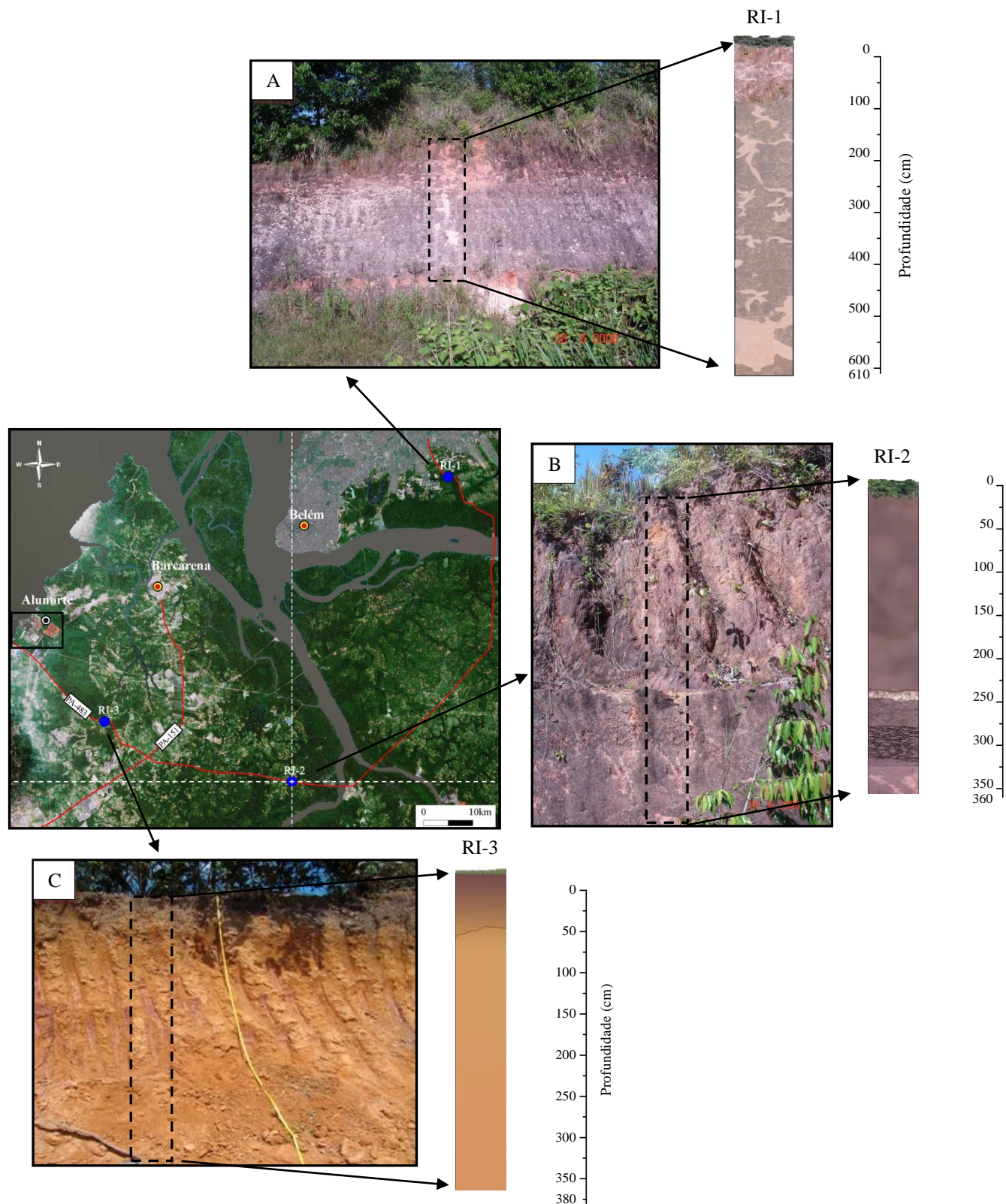


Figura 5.1 - Localização e aspectos gerais dos perfis de solos e lateríticos derivados dos sedimentos Barreiras na região de Barcarena. a) Perfil RI-1; b) Perfil RI-2 e c) Perfil RI-3.

### 5.1.2 Características granulométricas

As análises granulométricas revelaram que os três perfis de solos tendem a ser mais siltico-arenosos do que argilosos (Figura 5.2). Os valores da fração areia variam entre 12,07 e 82,33%, enquanto os de silte variam entre 11,17 e 55,27% e de argila entre 5,22 e 35,87%. Os valores médios são respectivamente 45,68%, 32,49% e 21,82%. A fração argila é mais abundante entre 50 e 250 cm de profundidade. No intervalo de 230-610 cm de profundidade do perfil RI-1, verifica-se, no entanto, a predominância de textura argila a siltica-arenosa. O perfil RI-2 apresenta uma textura de areia no intervalo de 315-360 cm de profundidade. No perfil RI-3 a textura varia de siltico-argilosa a arenosa até a profundidade de 360 cm. Observa-se, de maneira geral, que os perfis RI-2 e RI-3 são essencialmente constituídos de silte arenoso com frações argilosas restritas (Figura 5.3).

Em relação aos três perfis nota-se que as camadas superficiais são constituídas de solos arenosos, portanto permeáveis, o que permite concluir que não restringiriam a percolação dos efluentes da LV em direção às camadas mais profundas do subsolo.



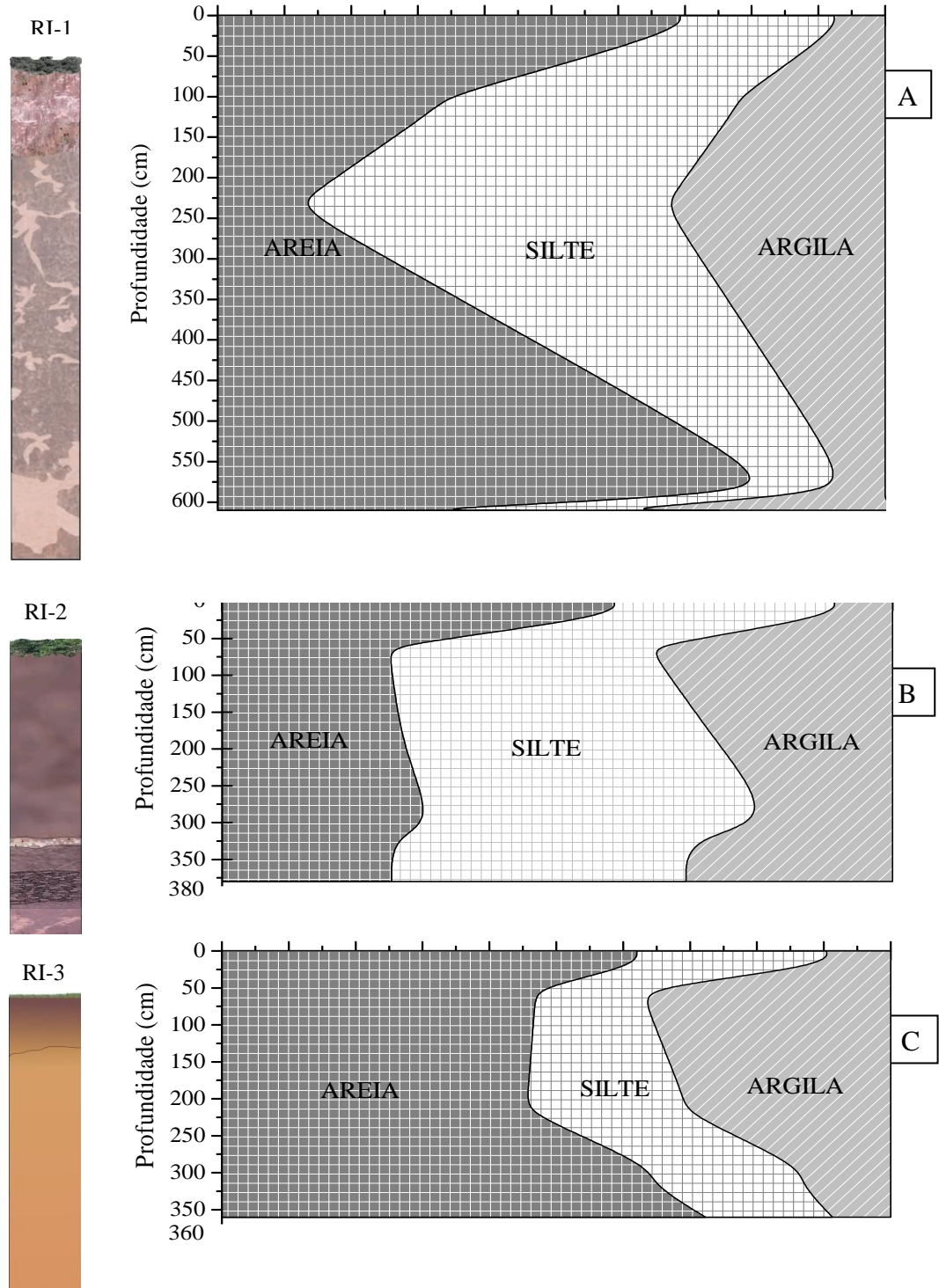


Figura 5.2 – Distribuição granulométrica nos perfis de solos: A) RI-1; B) RI-2 e C) RI-3.

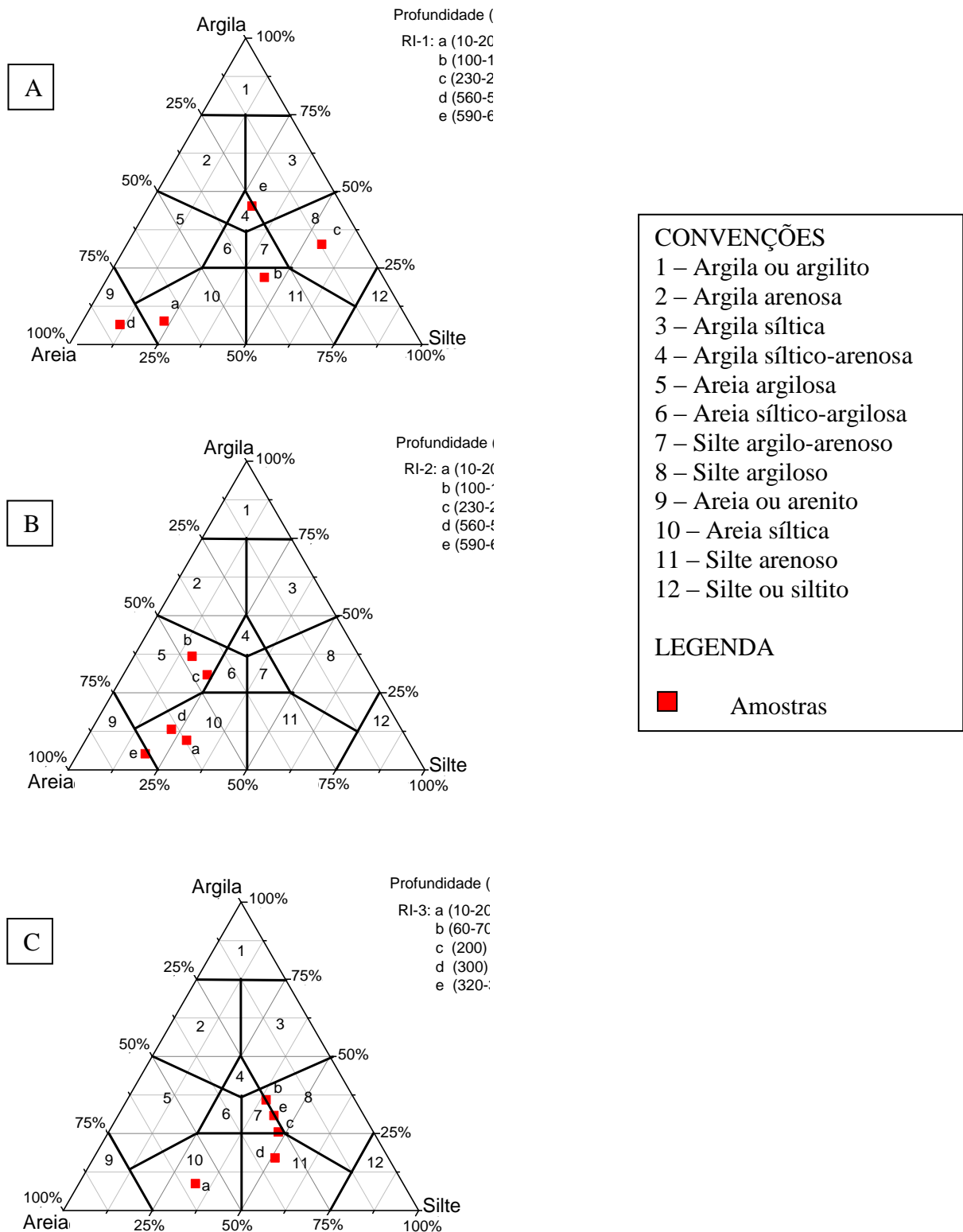


Figura 5.3 - Classificação granulométrica dos solos dos perfis investigados segundo os diagramas de Shepard: A) RI-1; B) RI-2 e C) RI-3.



## 5.2 COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA

### 5.2.1 Dos perfis de solos

Os perfis de solo investigados, que constituem o substrato e o confinamento lateral das bacias de disposição da lama vermelha, são compostos essencialmente por quartzo e caulinita, além de hematita e anatásio em concentrações acessórias e condicionadas a camadas marrons e marrons avermelhadas, bem como mosqueadas, e às concreções e crostas. Halloisita foi observada no perfil RI-3, a profundidade de 380-400 cm (Figura 5.4 a 5.6). Essa composição mineralógica demonstra que estes perfis de solos derivaram da lateritização dos sedimentos da Formação Barreiras, como já indicada anteriormente pela geologia.

### 5.2.2 Do solo local selecionado para construção de CCL, bauxita e lama vermelha

Os solos do entorno das bacias de rejeito são constituídos de quartzo e caulinita (Figura 5.7), com goethita, hematita e anatásio em quantidade acessória, o que indica sua equivalência ao topo dos perfis da região do entorno (item 5.2.1).

A bauxita, fonte primária da lama vermelha, é constituída de gibbsita, hematita, goethita, caulinita e quartzo. Portanto a principal distinção entre o solo local a ser empregado na construção de CCLs e a bauxita está na gibbsita. Já a LV é predominantemente constituída de hematita, anatásio, goethita e sodalita (Figura 5.7). Isto demonstra que a bauxita e a lama vermelha têm composição mineralógica parcialmente semelhante, divergindo nas proporções dos minerais e pela presença de sodalita na lama vermelha, um mineral formado durante o processo de transformação de bauxita em alumina.

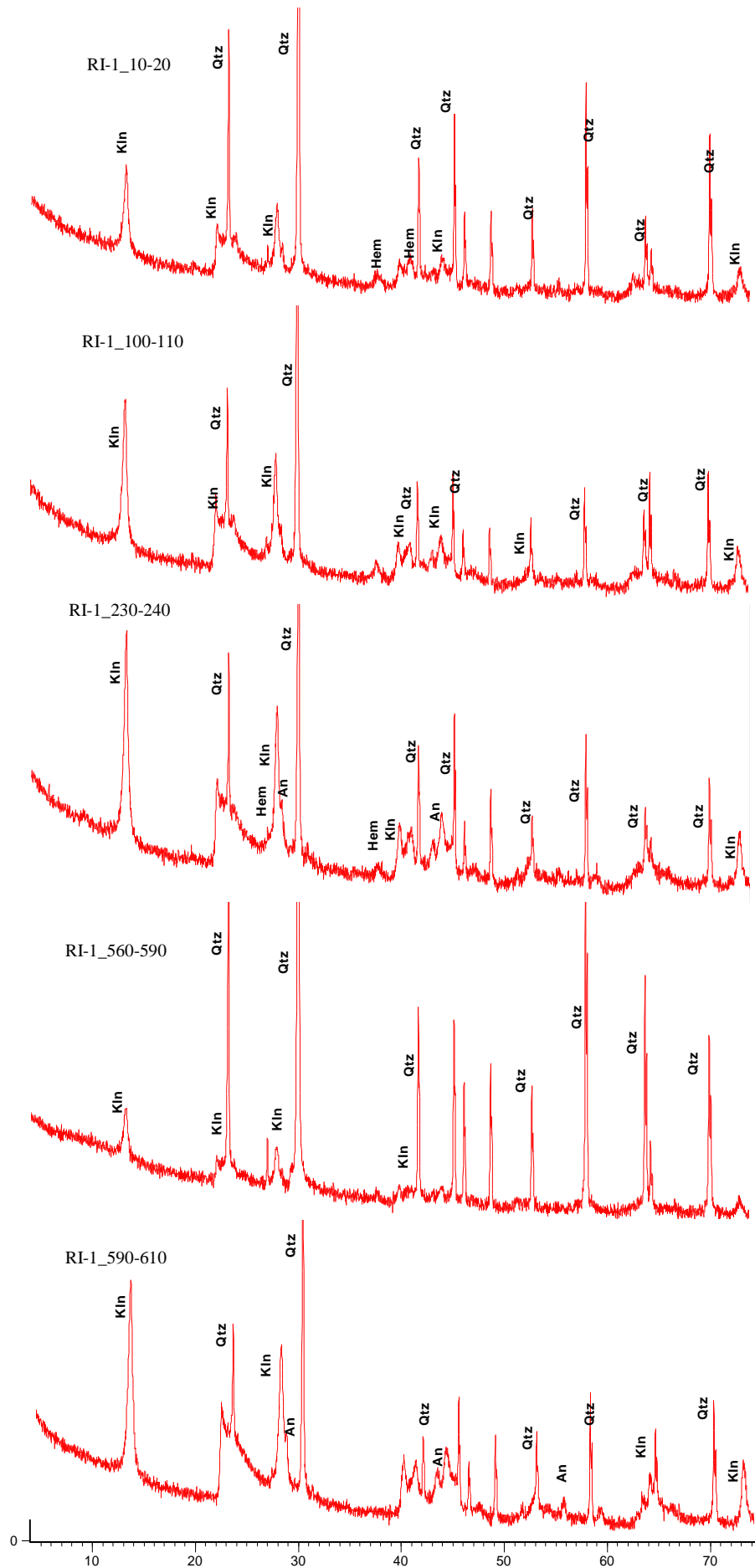


Figura 5.4 – Principais minerais identificados no Perfil RI-1 por DRX: Qtz-quartzo, Kln-caulinita, Hem-hematita e An-anatásio.

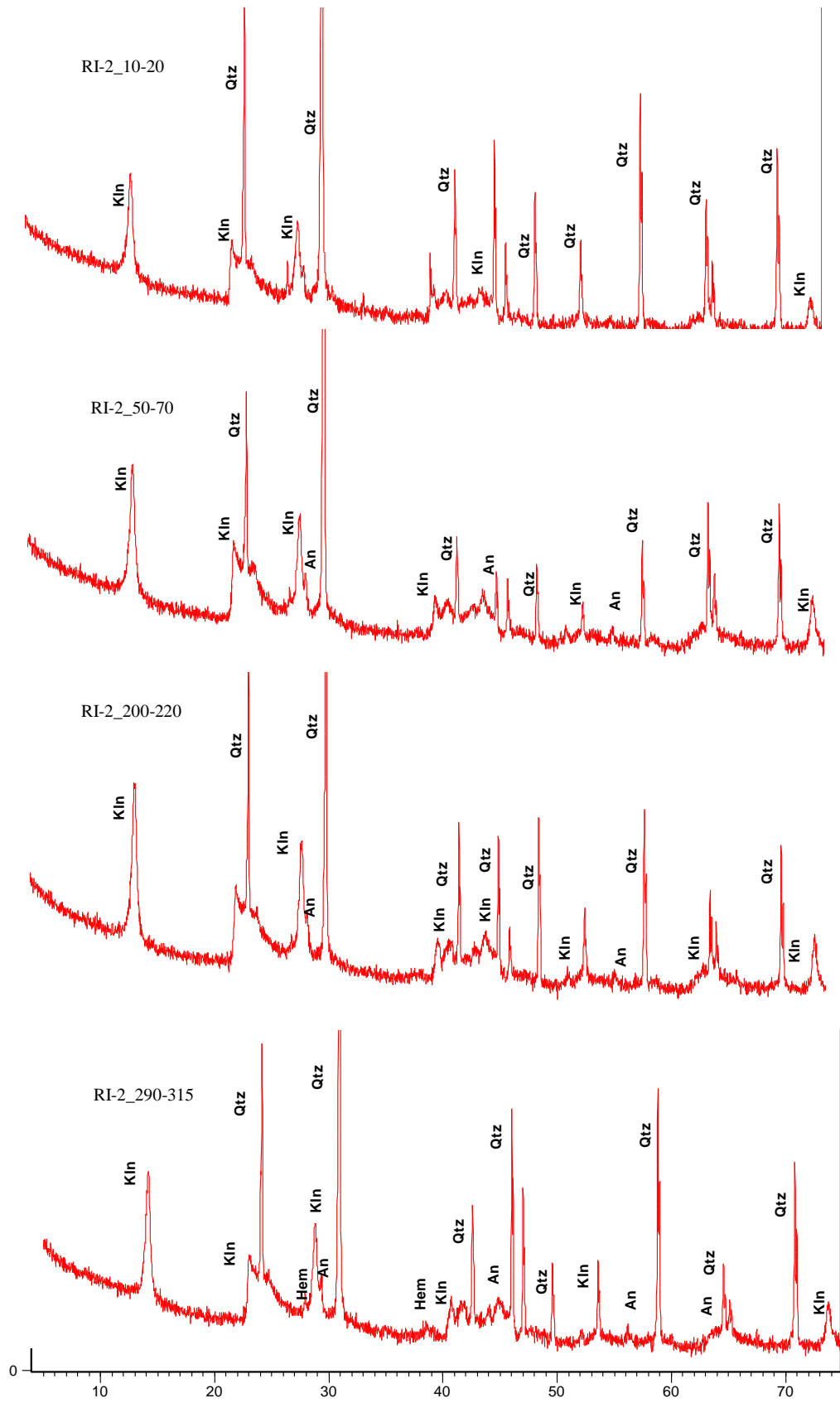


Figura 5.5 – Principais minerais identificados no Perfil RI-2 por DRX: Qtz-quartzo, Kln-caulinita, Hem-hematita e An-anatásio.

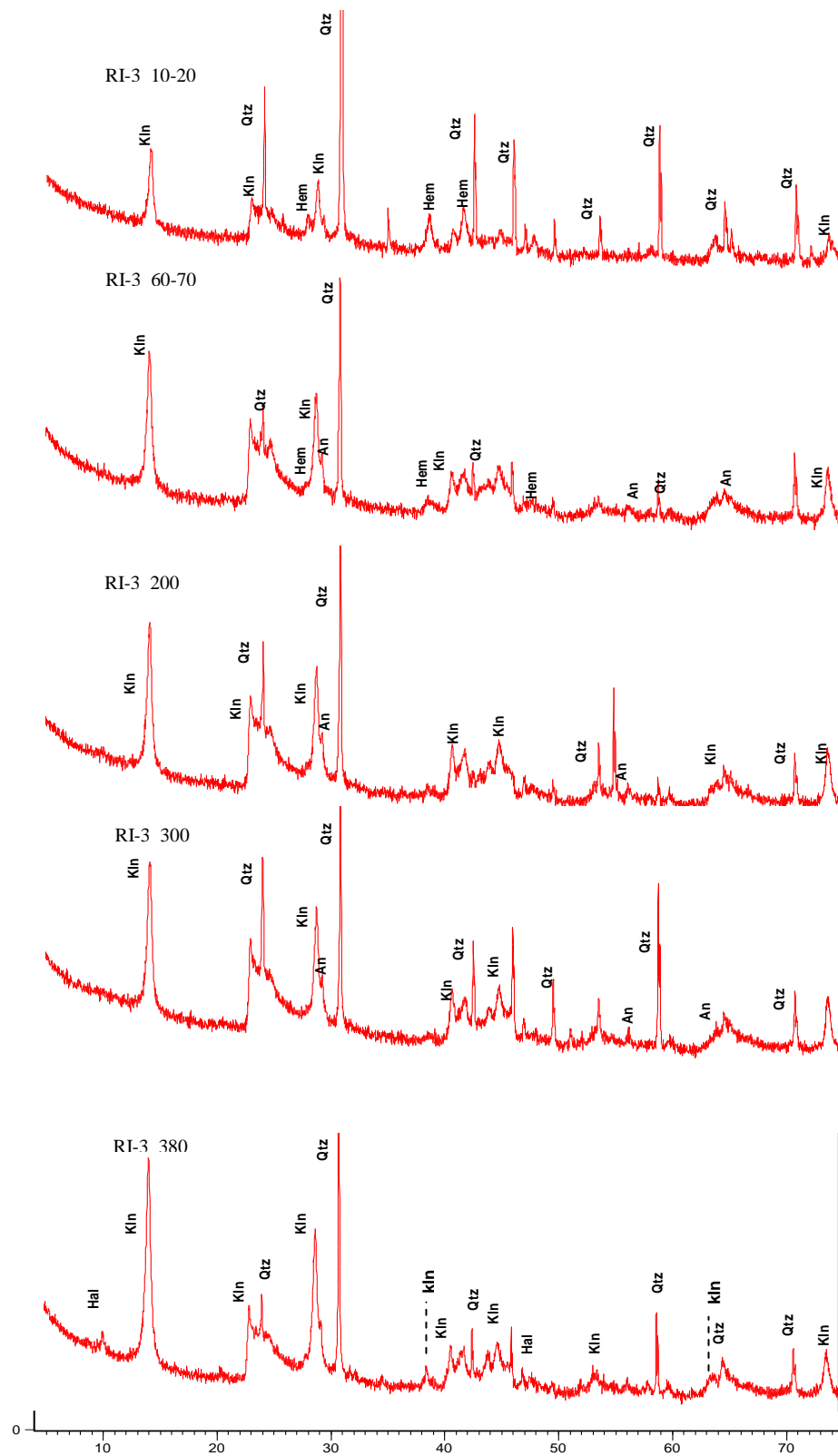


Figura 5.6 – Principais minerais identificados no Perfil RI-3 por DRX: Qtz-quartzo, Kln-caulinita, Hem-hematita, An-anatásio e Hal-Halloisita.

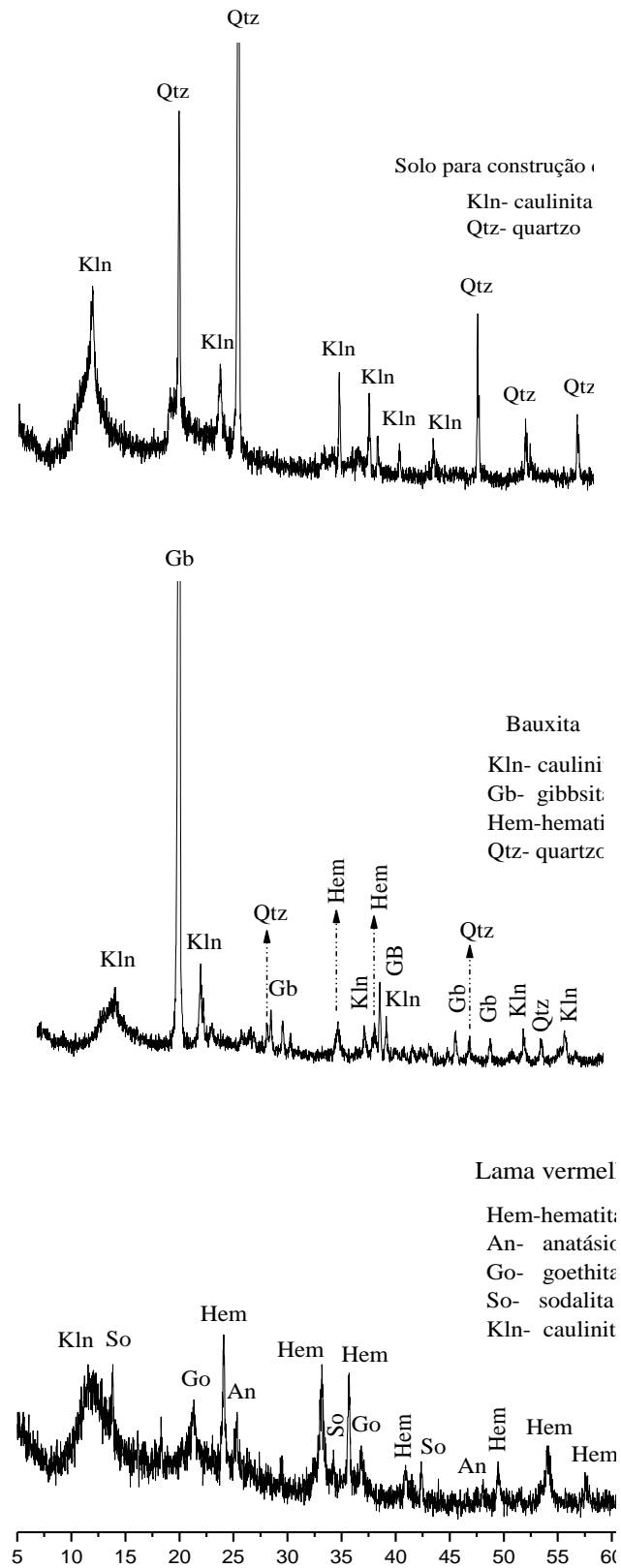


Figura 5.7 - Principais constituintes minerais identificados por difração de raios-X: solo local selecionado para construção de CCL, bauxita a ser processada e lama vermelha.

## 5.3 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

### 5.3.1 Os perfis de solos

Os solos dos perfis RI-1, RI-2 e RI-3 (Figura 5.8) são constituídos essencialmente de  $\text{SiO}_2$  (53,25 a 90,46%), com teores ainda elevados de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (4,41 a 25,16%) e relativamente baixos de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (1,70 a 6,76%) e  $\text{TiO}_2$  (0,42 a 1,93%). Os teores de  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{Na}_2\text{O}$  são muito inferiores a 1% (<0,01 a 0,11) (Anexo D). Esses valores são normais em solos amazônicos. O padrão de distribuição dos teores ao longo dos perfis e os próprios teores absolutos destes elementos (Figura 5.8) muito variáveis mostram claramente uma evolução laterítica imatura a partir de sucessão litológica com grande variação, incluindo argilitos, siltitos e arenitos (Costa, 1991).

Os baixos conteúdos de metais alcalinos (Na e K) e alcalinos terrosos (Mg e Ca) mostram a natureza lixiviada, exaurida nos perfis (Figura 5.8). O sódio, elemento importante para o presente trabalho, encontra-se em concentrações muito baixas, menor que 0,03 % em peso no solo. Qualquer contato da LV com o solo, que é de natureza areno-siltosa e portanto permeável, será potencialmente detectável, já que o sódio solúvel abundante na LV poderá migrar por fluxo advectivo através do solo.

Em termo de concentrações dos elementos-traço e ETR os três perfis de solos são semelhantes entre si (Figuras 5.9 e 5.10) e ainda com as amostras do solo local selecionado para construção de CCL. As maiores concentrações são para os elementos V e Zr (Figura 5.9). A normalização destes elementos em relação à Crosta Terrestre Superior (CTS) no geral mostra enriquecimento em Sc, V, Ni, Ga, As, Se, Zr, Sn, Ta, Hg e Th, empobrecimento em Co, Cu, Zn, Rb, Sr, Mo, Cs, Ba, Pb e ETR (Figuras 5.11 e 5.12 e Anexos E e F) e invariabilidade para os demais elementos. O primeiro grupo representa os elementos que se concentram residualmente em perfis lateríticos, ao estarem presentes em minerais resistatos (zircão, rutilo, cassiterita, etc.) ou como minerais neoformados (hematita, goethita e anatásio). Entre eles se destaca Zr, imóvel quando submetido aos processos do intemperismo, pois que constitui o mineral resistato zircão (Yang et al., 2003). Pelo exposto é possível concluir que os solos da região do entorno das bacias de disposição da lama vermelha em Barcarena tem composição química equivalente à da CTS, com os elementos-traço em teores inferiores e aqueles superiores representados por elementos que se encontram na estrutura de minerais ultra-estáveis e desta forma não representam qualquer problema ambiental, mesmo os pesados, pois não estão potencialmente disponíveis.

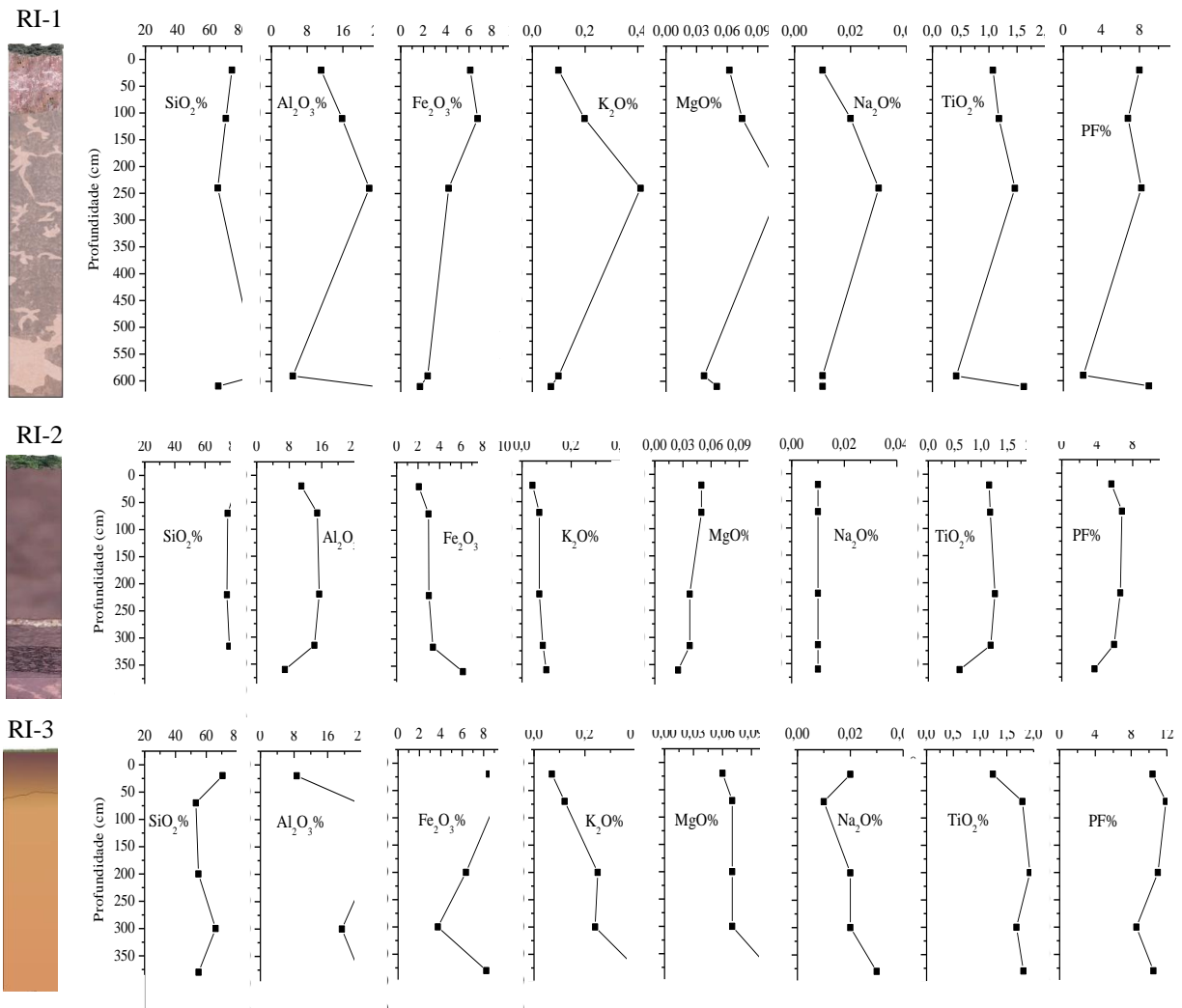


Figura 5.8 – Distribuição das concentrações dos elementos maiores e menores (peso em %) nos perfis RI-1, RI-2 e RI-3.

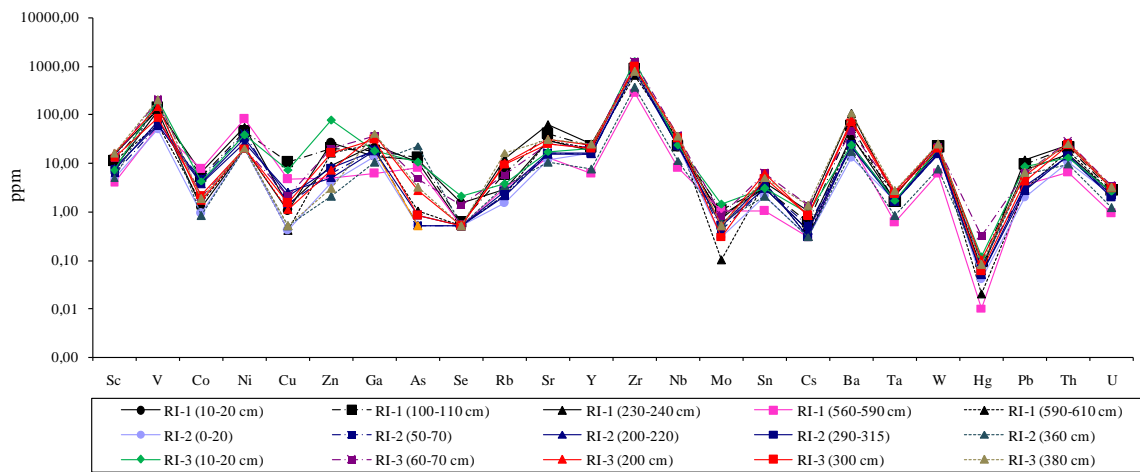


Figura 5.9 – Comparação entre as concentrações dos elementos-traço nos perfis RI-1, RI-2 e RI-3, indicando a grande semelhança entre eles, com exceção dos elementos Cu, Zn, As, Mo e Hg com maior divergência, que são elementos de maior mobilidade.

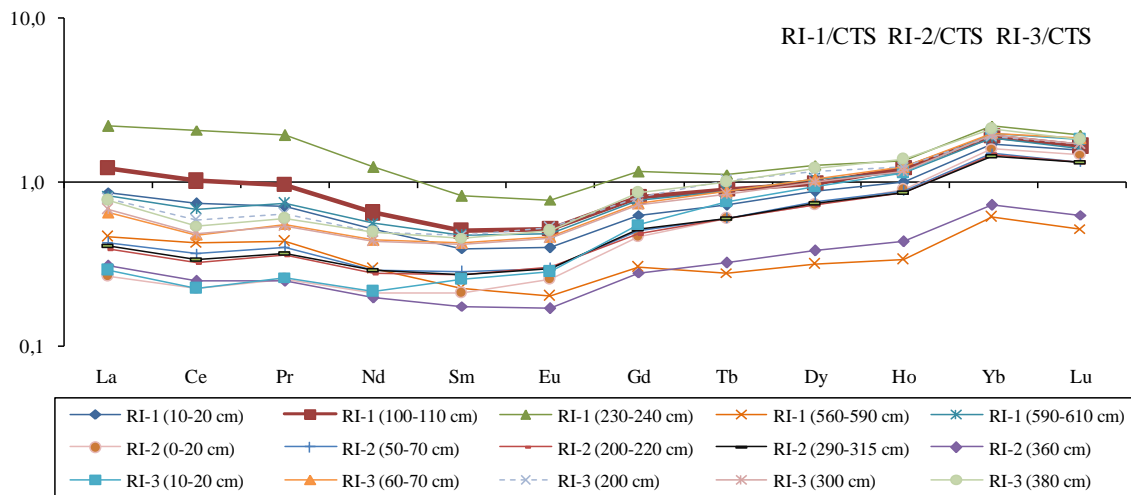


Figura 5.10 - Comparação entre as concentrações dos ETR nos perfis RI-1, RI-2 e RI-3, indicando a grande semelhança entre os perfis.

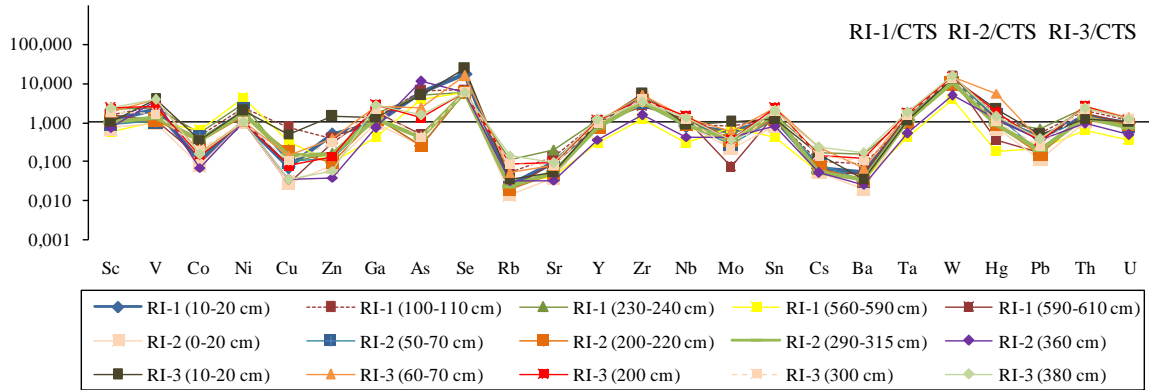


Figura 5.11 – Normalização dos elementos-traço dos perfis RI-1, RI-2 e RI-3 em relação à CTS. Novamente Cu, Zn, As, Mo e Hg se destacam como os mais divergentes.

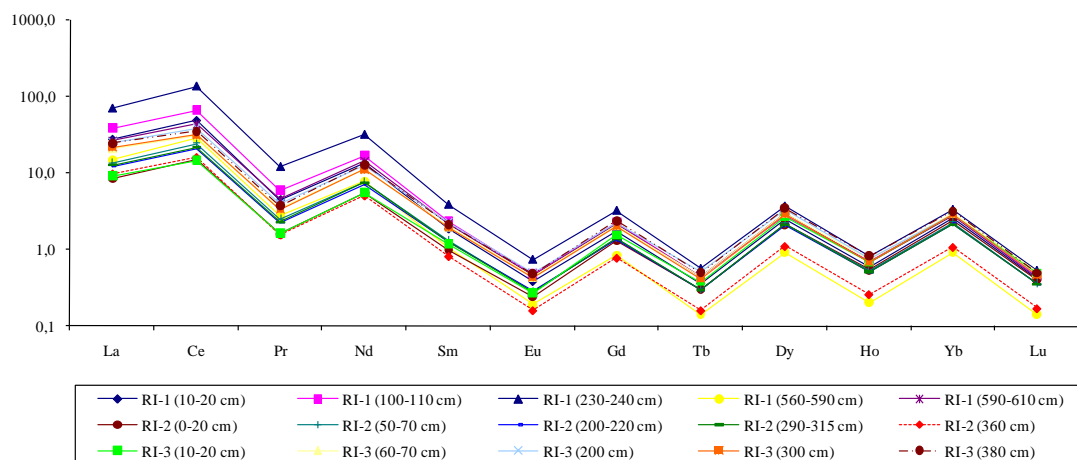


Figura 5.12 – Normalização dos ETR dos perfis RI-1, RI-2 e RI-3 em relação à CTS.



### 5.3.2 O solo local selecionado para construção de CCL, bauxita e lama vermelha

O solo local da área das bacias de disposição da LV é constituído principalmente de  $\text{SiO}_2$  (71-85%) e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (5-16%), além de  $\text{F}_2\text{O}_3$  (1,5–2,0%) e  $\text{TiO}_2$  (1,0-1,5%), e desprovido de álcali e fósforo, quimicamente equivalente aos materiais dos perfis estudados bem como aos latossolos e argissolos regionais, quando comparados com os dados de Vieira & Santos (1987) (Tabela 5.1).

Esse solo, objeto deste estudo de viabilidade técnica e ambiental para emprego na construção de CCL, distingue-se das bauxitas, o minério de alumínio e principal fonte de LV, por ser pobre em  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e rico em  $\text{SiO}_2$  (Figura 5.13). É por sua vez equivalente em termos de elementos alcalinos, alcalinos terrosos, fósforo e  $\text{TiO}_2$ .

A LV se destaca pelo teor elevado de  $\text{Na}_2\text{O}$  e de  $\text{CaO}$ , introduzidos no processo de transformação da bauxita em alumina e acumulado na LV. O processo extrai 60% do  $\text{Al}_2\text{O}_3$  total, praticamente quase todo o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  livre, ou seja, presente na estrutura da gibbsita, enquanto o restante é parcialmente seqüestrado através da formação de sodalita e cancrinita, esporadicamente. Em termos de balanço de massa são necessárias 2,5 t de bauxita para produzir 1 tonelada de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , portanto um fator 2,5. Esse mesmo fator 2,5 se aplica aos outros componentes como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ , em parte  $\text{TiO}_2$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$ . As análises químicas mostram que o processo industrial de extração do alumínio das bauxitas é relativamente efetivo, pois que no resíduo, a LV, foi reduzida pelo fator 0,4. É um fator típico do processo e do minério efetivo para alumínio livre (gibbsita). Os teores de  $\text{CaO}$  e  $\text{Na}_2\text{O}$  na LV não obedecem a este fator e demonstram sua natureza aditiva ao processo na forma de cal e soda, respectivamente, para correção de pH a 10-12 e dissolução cáustica da bauxita (gibbsita) (Figura 5.14 e Tabela 5.1).

A lama vermelha concentrou a grande maioria dos elementos químicos, onde a maior exceção é obviamente o alumínio, já que é o principal objetivo do processo Bayer. Outros elementos que não se concentraram na LV são Cu, Pb e Bi (Figura 5.16). Esta capacidade de concentração, com fator entre 2,4 a 3,2 (Anexo G), poderia em primeira mão conduzir ao pensamento de que haveria impacto ambiental potencial decorrente dos outros metais além do sódio. No entanto, ao contrário do sódio, que se encontra solúvel e/ou como sodalita na lama (o que significa que a bauxita de fato continha caulinita e/ou quartzo), a maioria dos elementos-traço está alojada na estrutura dos oxi-hidróxidos de ferro e em outros resistatos, como zircão, anatásio, entre outros; são, portanto estáveis e não disponíveis à biota.

O solo local selecionado para construção de CCL, quando comparado à bauxita, aparentemente apresenta teores mais elevados de Sr, Ba, Cs, Ag e ETR e mais baixos de V,

Cr, Cu, Ga, Pb, Th e U, mas equivalentes de Be, Co, Ni, Zn, Ge, Rb, Ta, Mo, In, Sb, Hf, Tl e W (Figuras 5.15 e 5.17 e Anexo G). As concentrações nesse solo são comparáveis aos valores encontrados nos solos da região de Barcarena e da maioria dos depósitos da região amazônica segundo os dados de Costa (1991) e Horbe & Costa (2006). As bauxitas de fato concentram elementos como V, Cr, Cu, Ga, Pb, Th e U; a concentração preferencial dos metais alcalinos e ETR pelo solo é uma decorrência, possivelmente, do domínio relativo de minerais de argila.

A LV é nitidamente concentradora dos elementos-traço (Figura 5.16). Ao comparar os elementos maiores e traços entre LV e bauxita verifica-se que o mesmo fator de concentração de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$  (Figura 5.14 e Tabela 5.1) se aplica para Sc, Be, V, Cr, Sr, Y, Zr, Ta, Mo, Ag, Sn, Sb, Hf, ETR (exceto Tb), W, Th e U (Figura 5.16 e 5.18), isto é, também são transferidos para a LV. Por outro lado Cu, Ga, Ge, As, Pb e Bi são apenas parcialmente transferidos para a LV: 100% de Cu, 83% de Pb, 94% de Bi, 50% de Ga, 50% de Ge e 50% de As se transferiram para o licor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; portanto, esses elementos podem ser recuperados durante a transformação de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  em Al metálico (Lucena Neto, 2005). In e Ba, com fatores muito elevados, podem ter sido introduzidos talvez através da cal e soda caustica, portanto uma contaminação.

Tabela 5.1 – Composição química do solo, bauxita e lama vermelha e razão lama vermelha (LV)/bauxita (B).

Identificação da amostra	$\text{SiO}_2$ %	$\text{Al}_2\text{O}_3$ %	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ %	$\text{MgO}$ %	$\text{CaO}$ %	$\text{Na}_2\text{O}$ %	$\text{TiO}_2$ %	$\text{P}_2\text{O}_5$ %	PF %
Solo (SL-1)	71,16	15,80	2,01	0,04	0,02	0,03	1,55	0,03	7,45
Solo (SL-2)	71,10	16,28	2,04	0,04	0,02	0,02	1,53	0,03	7,99
Solo (SL-3)	85,37	5,84	1,53	0,02	<0,01	<0,01	1,05	0,04	3,86
Bauxita (B)	6,53	51,34	13,94	<0,01	0,05	0,05	1,45	0,02	27,46
Lama Vermelha (LV-1)	16,12	19,73	37,04	0,02	0,83	9,54	4,47	0,05	10,86
Lama Vermelha (LV-2)	17,02	21,65	32,50	0,04	1,39	9,78	4,62	0,05	12,09
Fator de concentração (LV/B)	2,5	0,4	2,5	-	22,2	193,2	3,1	2,5	-

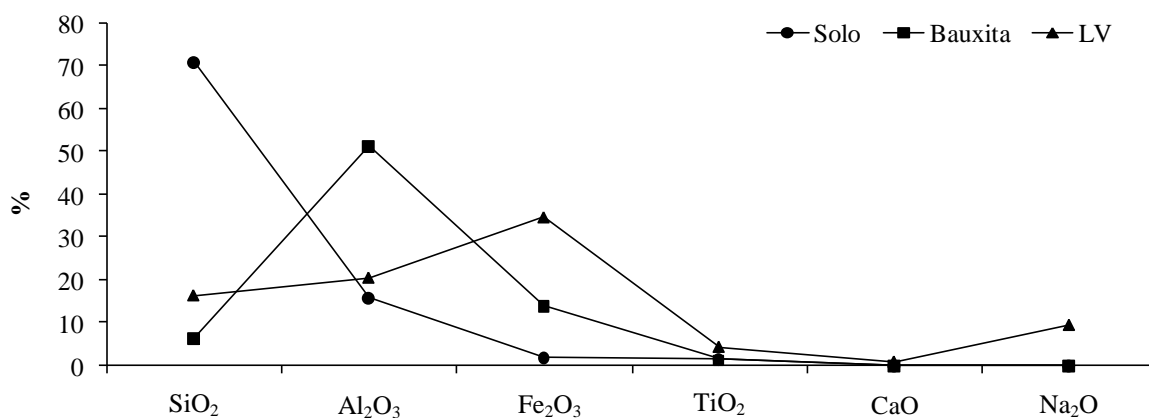


Figura 5.13 – Confrontação entre a composição química do solo local selecionado para construção de CCL, bauxita e LV com base nos teores de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{TiO}_2$  (em %).

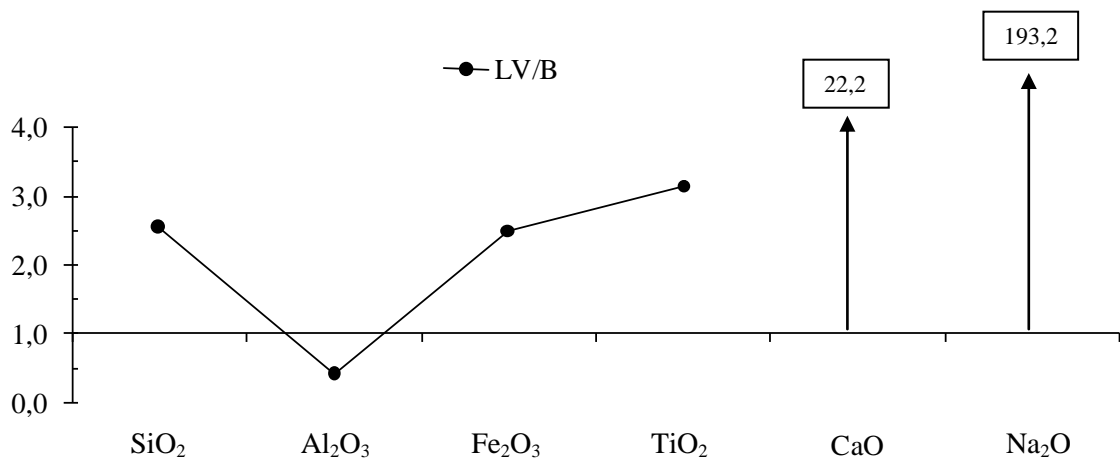


Figura 5.14 - Normalização de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, Na<sub>2</sub>O e TiO<sub>2</sub> da LV em relação a bauxita.

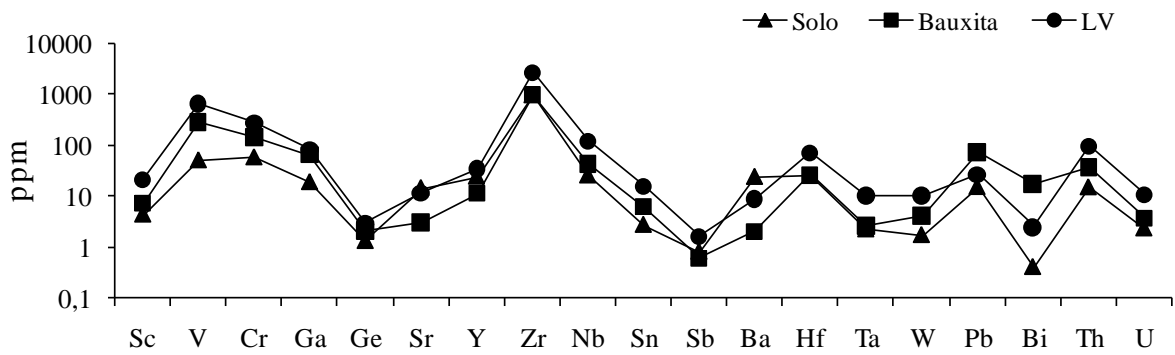


Figura 5.15 – Concentração dos elementos-traço do solo para CCL, bauxita e LV.

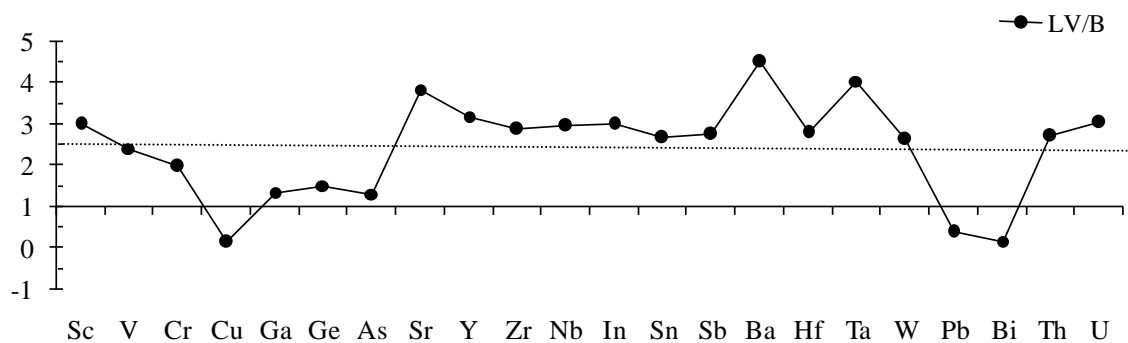


Figura 5.16 – Normalização do conteúdo dos elementos-traço da LV em relação a bauxita.

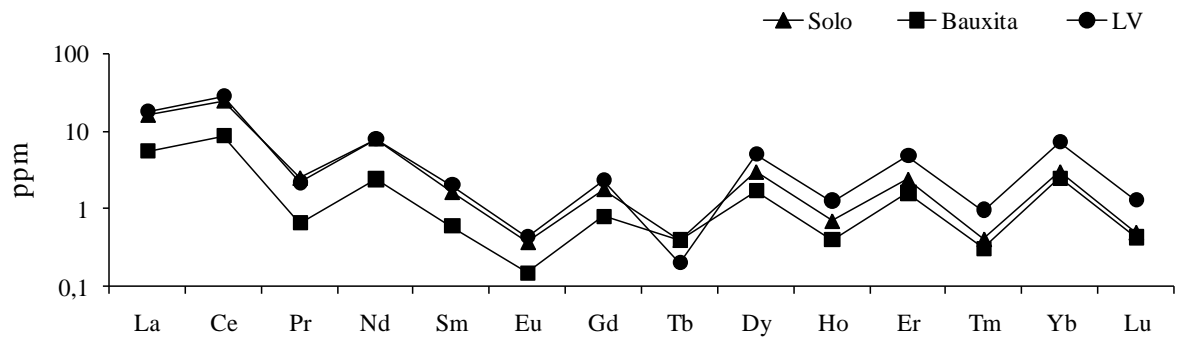


Figura 5.17 - Concentração dos ETR do solo para CCL, bauxita e LV

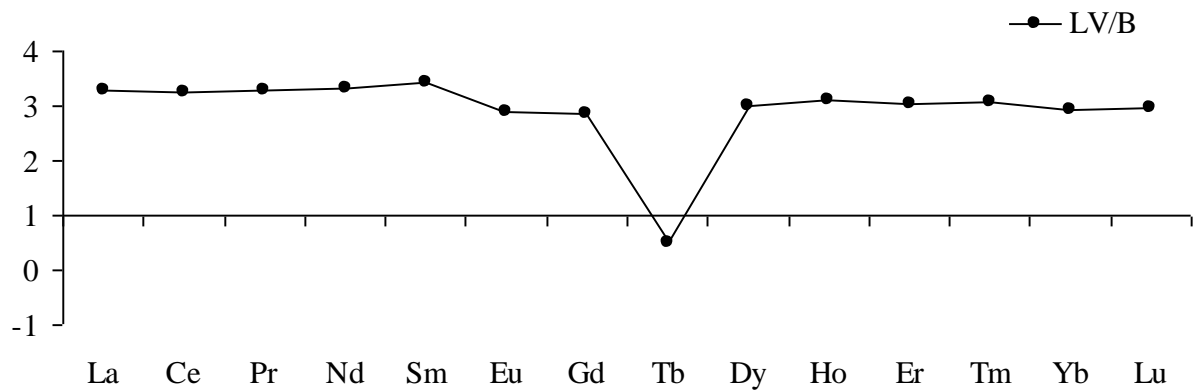


Figura 5.18 - Normalização das concentrações dos ETR da LV relativa às bauxitas.

#### 5.4 PH, CAPACIDADE DE TROCA CATIÔNICA E MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

Os solos do entorno das bacias são bastante ácidos, com  $pH_{H_2O}$  de 4,79 a 4,59, e  $pH_{KCl}$  de 4,05 a 3,98, em forte contraste com a lama vermelha, que é fortemente alcalina ( $pH$  12). A partir da equação (5.1) é possível fazer uma estimativa da magnitude e sinal de carga existente nas superfícies das partículas. O valor de  $\Delta pH$ , entre -0,6 e -0,8, indica predominância de cargas negativas.

$$\Delta pH = pH_{KCl} - pH_{H_2O} \quad (5.1)$$

O ponto de carga zero (PCZ) estimado pela equação (5.2), da ordem de 5,4, é superior ao valor do  $pH$  do solo, isto é, o solo no estado natural tem maior capacidade de atrair cargas negativas do que positivas.

$$PCZ = \left[ pH_{KCl} - pH_{H_2O} \right] \quad (5.2)$$

O teor de matéria orgânica presente nesses solos, 0,40% a 0,65%, é relativamente baixo e compatível com a maioria dos solos de regiões tropicais.

A capacidade de troca catiônica (CTC) do solo é muito baixa, da ordem de 32,7 mmol/kg, compatível com sua composição mineralógica: a caulinita é o argilo-mineral predominante e sua CTC varia entre 3 e 15 mmol/kg (Mitchell, 1976). Valores de CTC abaixo de 270 mmol/kg são considerados baixos pela EMBRAPA (1999). Fadigas et al. (2002), analisando 162 amostras de solo da soloteca da Embrapa Solos (RJ), correspondendo aos horizontes A e B de 81 perfis das principais classes de solos brasileiros, especialmente os Argissolos (27%) e Latossolos (42%), constataram que 79% dos solos apresentam valores de CTC inferiores a 100 mmol/Kg, 90% inferiores a 200 mmol/Kg e 100% inferiores a 300 mmol/Kg, concluindo que os solos brasileiros em geral apresentam baixa CTC pelo critério EMBRAPA. Na mesma pesquisa, 42% dos solos apresentaram valores de CTC inferiores a 50 mmol/kg, que é o caso do solo investigado nesta pesquisa.

Os solos da região de Barcarena aqui estudados são, portanto comparáveis aos latossolos e argissolos da Amazônia, com baixa CTC, em decorrência do domínio de minerais de baixa capacidade catiônica. Isto faz com que metais solúveis na solução de solo possam facilmente atingir o lençol freático e a biota. Felizmente os teores dos metais nas bauxitas, na LV e nos solos são baixos e estão ligados a minerais estáveis, típicos dos solos tropicais. O processo químico da LV não consegue quebrar a estrutura destes minerais, exceto a gibbsita, mineral que não concentra metais em sua estrutura cristalina (Faure, 1998). O outro fator que minimiza o transporte de metais solúveis por esses solos é a significativa retenção devida à adsorção específica nos óxidos e hidróxidos de metais e bordas da caulinita devido à carga variável (Hemsi, 2002; Gabas, 2005).

## 5.5 CARACTERIZAÇÃO E PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS

Os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica do solo na área estão apresentados na Tabela 5.2 e Figura 5.19. Foram incluídos também os ensaios realizados pela empresa LPS nas amostras coletadas nos poços de inspeção e nas sondagens a trado, quando da implantação da fábrica em 1994 (Tabela 5.3), assim como os relativos a uma área com concentração de concreções superior ao observado na área da bacia (Figura 4.1). A amostra ensaiada pelo LMS-FACI atingiu o domínio de concreções de oxi-hidróxidos de Fe significativamente maior do que observado em torno da área da bacia (ponto 3 – Figura 4.1).

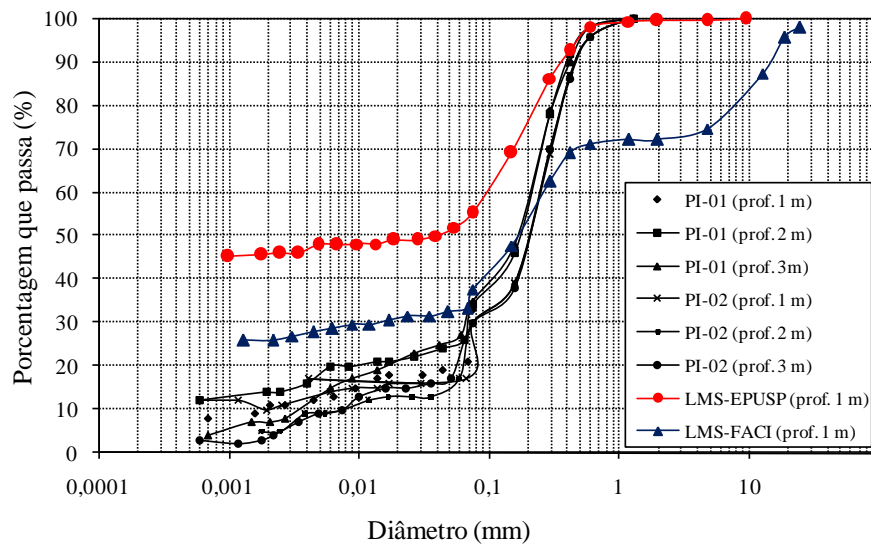


Figura 5.19 - Curvas granulométricas das amostras de solo.

Os poços de inspeção PI-01 e PI-02 localizavam-se em cota mais elevada do que o ponto de coleta da amostra ensaiada pelo LMS-EPUSP e atravessaram formações mais arenosas, o que justifica o menor percentual de finos. A amostra ensaiada pelo LMS-FACI atingiu o domínio de concreções de oxi-hidróxidos de Fe significativamente maior do que observado em torno da área da bacia (ponto 3 – Figura 4.1), portanto correspondente ao topo dos perfis lateríticos. Nota-se que os limites de consistência para as duas amostragens não difere muito, e existe uma predominância da fração areia e finos argilosos para todas as caracterizações geotécnicas apontadas neste trabalho, embora as análises realizadas pela empresa LPS mostrem menor percentual de argila. Essa textura é compatível com as observadas na granulometria do perfil RI-2 da Figura 5.2.

Tabela 5.2 - Caracterização geotécnica da amostra de solo com maior concentração de concreções (LMS-FACI) e do solo para emprego em CCLs (LMS-EPUSP).

	Distribuição Granulométrica (%)						Limites			$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )
	Pedregulho	Areia			Silte	Argila	LL (%)	LP (%)	IP (%)	
		Grossa	Media	Fina						
LMS-FACI	26	3	6	26	10	29	35	21	14	25,50
LMS-EPUSP	0	0	5	42	8	45	33	21	12	26,40
	Teor de umidade higroscópica (%)									1,99
	Classificação USCS									CL
	Classificação MCT									LA'LG'

LL: Limite de liquidez; LP: Limite de plasticidade; IP: Índice de plasticidade;  $\gamma_s$ : peso específico dos grãos

Tabela 5.3 – Caracterização geotécnica do solo realizada pela empresa LPS

Amostras	Distribuição Granulométrica (%)						Limites			Compactação PN		$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )
	Pedregulho	Areia			Silte	Argila	LL (%)	LP (%)	IP (%)	$\gamma_{d\text{máx}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	W <sub>ot</sub> (%)	
		Grossa	Media	Fina								
PI-01-1	0	0	9	66	8	17	21	13	8	19,80	13,20	-
PI-01-2	0	0	8	67	8	17	24	16	8	20,30	11,00	-
PI-01-3	0	0	8	72	8	12	30	15	15	19,65	12,50	-
PI-02-1	0	0	10	69	8	13	20	10	10	20,10	11,60	18,43
PI-02-2	0	0	10	73	7	10	23	12	11	20,65	11,20	17,93
PI-02-3	0	0	11	72	7	10	28	14	14	20,65	10,80	19,07
ST-05-3	0	0	12	68	10	10	31	17	14	-	-	-
ST-08-5	0	0	12	68	10	10	31	17	14	-	-	-
ST-12-4	0	0	14	66	10	10	33	16	17	-	-	-
ST-12-5	0	0	14	66	10	10	31	19	12	-	-	-
ST-17-5	0	0	12	70	10	8	30	19	11	-	-	-
ST-18-8	0	0	16	66	10	8	-	NP	-	-	-	-
ST-20-3	0	0	46	42	8	4	24	16	8	-	-	-

PI-0X-X: poço de inspeção – 0X(número do poço) – X (profundidade); ST-0X-X: sondagem à trado – 0X (número da sondagem) – X (profundidade);  
 LL – Limite de Liquidez; LP – Limite de Plasticidade; IP – Índice de Plasticidade; PN – Compactação Proctor Energia Normal;  
 $\gamma_d$  máx– Peso específico seco máximo; W<sub>ot</sub> – teor de umidade ótima;  $\gamma$  - Peso específico natural.

O solo ensaiado no LMS-EPUSP se classifica pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos como CL (argila de baixa compressibilidade) e pela classificação MCT como LA'/LG' (solo laterítico argiloso-arenoso), e foi o solo empregado para o estudo da viabilidade para construção de CCL.

Observa-se que os resultados de dois ensaios de compactação na Energia Normal com reuso deste solo (PN-1 e PN-2) forneceram como valores médios 17,5% e 17,5 kN/m<sup>3</sup>, respectivamente, para o teor de umidade ótimo e o peso específico aparente seco máximo. O ensaio PN-3, realizado sem reuso (DNER-ME 129/94), resultou em parâmetros mais baixos ( $w_{ot}=15,6\%$  e  $\gamma_{dmáx}=17,2$  kN/m<sup>3</sup>) do que o ensaio com reuso, conforme esperado (Figura 5.20).

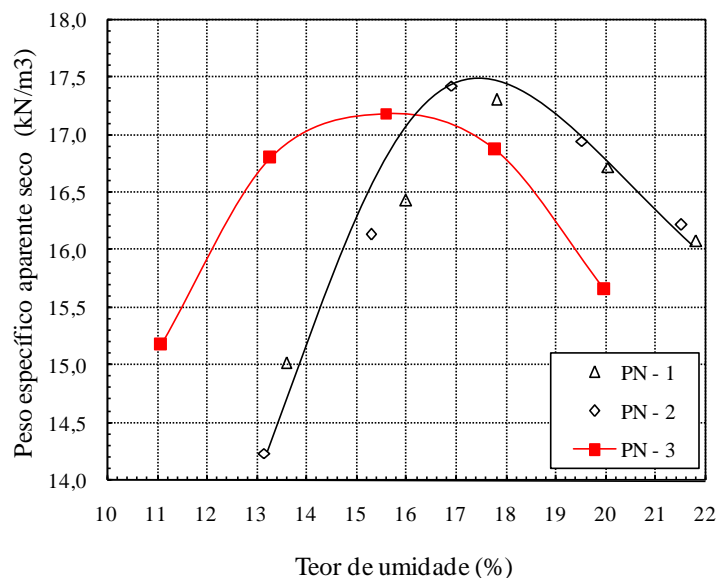


Figura 5.20 - Curvas de compactação do solo para estudo de CCL.

## 5.6 PERMEABILIDADE DO SOLO

Para a determinação da permeabilidade (condutividade hidráulica) o solo foi moldado no ponto ótimo da energia normal, isto é, teor de umidade de 17,5% e peso específico aparente seco de 17,5 kN/m<sup>3</sup>. Os dados de moldagem dos corpos-de-prova estão apresentados na Tabela 5.4. Os resultados dos ensaios estão apresentados na Figura 5.21. Um exemplo de planilha de ensaio de permeabilidade se encontra no Anexo H.



Tabela 5.4 - Dados de moldagem dos corpos-de-prova dos ensaios de permeabilidade.

Ensaio	Corpo-de-prova	PM-1 (*)	PM-2	PM-3 (**)	PM-4	PM-5	PM-6
$w_{nat}$ (%)	Amostra natural	2,21	4,38	4,38	-	-	-
Altura	Compactado	12,87	12,90	12,90	12,79	12,27	-
	Moldado	6,40	5,14	5,75	6,35	6,22	1,98
Diâmetro	Compactado	9,98	10,00	10,00	10,06	10,25	-
	Moldado	6,78	6,73	6,88	6,56	6,26	7,06
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	Compactado	16,96	17,30	17,10	17,46	16,57	-
	Moldado	17,10	17,40	18,10	17,42	17,62	-
w (%)	Compactado	19,22	18,03	18,03	17,66	19,39	-
	Moldado	18,10	17,30	18,00	17,42	18,13	17,34
e	Compactado	0,55	0,52	0,54	0,51	0,59	-
	Moldado	0,54	0,51	0,46	0,51	0,49	-
S	Compactado	92	90	89	92	98	-
	Moldado	88	90	100	90	92	-
GC (%)	Compactado	96,9	98,6	97,9	99,8	94,7	-
	Moldado	94,8	94,8	94,8	99,6	94,8	-
$\Delta w$ (%)	Compactado	1,7	0,5	0,5	0,2	1,9	-
	Moldado	0,6	-0,2	0,5	-0,1	0,6	-0,2

(\*) desligamento de energia, (\*\*) vazamento.

Na Figura 5.21 observa-se que no início do ensaio a permeabilidade tende a aumentar com o tempo, devido ao aumento do grau de saturação do solo, e que os coeficientes de permeabilidade determinados no topo e na base diferem inicialmente, até ser atingida a saturação de equilíbrio; a partir daí as vazões pelo topo e pela base tendem a se igualar.

Após o aumento inicial, observa-se uma redução significativa do coeficiente de permeabilidade com o tempo. Isso motivou, no final dos ensaios de permeabilidade, a verificação da calibração do aparelho Tri-Flex2 por meio de um manômetro. Constatou-se uma variação inesperada da pressão aplicada na base do corpo-de-prova; o gradiente hidráulico, que supostamente era 30, variou, na realidade, entre 46 e 77 (PM-1=62, PM-2=77, PM-3=69, PM-4=46, PM-5=63 e PM-6=50) para os ensaios realizados. As elevadas forças de percolação aplicadas ao solo podem ter causado o adensamento por fluxo de água. Outra provável causa da redução da permeabilidade ao longo de ensaio é a dispersão dos argilo-minerais causada pelas trocas de cátions com a água de percolação.

As permeabilidades finais obtidas nos ensaios foram de  $2 \times 10^{-10}$  m/s,  $3 \times 10^{-10}$  m/s,  $3 \times 10^{-10}$  m/s,  $7 \times 10^{-10}$  m/s,  $7 \times 10^{-11}$  m/s e  $7 \times 10^{-11}$  m/s para os corpos-de-prova PM-1, PM-2, PM-3,

PM-4, PM-5 e PM-6, respectivamente. As permeabilidades máximas correspondentes foram  $9 \times 10^{-9}$  m/s,  $2 \times 10^{-8}$  m/s,  $2 \times 10^{-9}$  m/s,  $1 \times 10^{-8}$  m/s,  $7 \times 10^{-8}$  m/s e  $1 \times 10^{-10}$  m/s, medidas no início dos ensaios. O ensaio com o PM-3 foi interrompido após a passagem de um volume de água equivalente a 1,2 volumes de vazios do corpo-de-prova, devido a uma interrupção do fornecimento de energia elétrica.

Nota-se que o coeficiente de permeabilidade dos corpos-de-prova diminuiu ligeiramente com o teor de umidade de compactação, mesmo que todos tenham sido compactados no ramo úmido, comportamento explicado por Lambe (1958) e Mitchell et al. (1965). Os corpos-de-prova PM-1 e o PM-5, moldados praticamente com os mesmos e maiores teores de umidades, apresentaram os menores valores de permeabilidade em relação aos demais, enquanto o PM-4 com o menor teor de umidade teve o maior valor de permeabilidade; os corpos-de-prova PM-2 e PM-3, moldados com igual teor de umidade intermediário entre PM-4 (menor) e PM-1 e PM-5 (mais elevados), apresentaram igual permeabilidade também intermediária em relação às demais. O PM-6 foi moldado com uma altura de 2 cm e submetido a um gradiente hidráulico igual a 150; embora o teor de umidade de compactação fosse baixo em relação aos demais, o efeito do elevado gradiente pode explicar o baixo coeficiente de permeabilidade medido.

Com o PM-4 e o PM-5, após a determinação do coeficiente de permeabilidade, foram realizados ensaios de coluna. Para observar se ocorre variação da permeabilidade em função do fluxo (que passa a ser descendente) e do gradiente hidráulico, antes de iniciar a percolação de um diferente fluido trocou-se a alimentação de água do aparelho Tri-Flex2 para o recipiente acrílico com gradiente 24 (vide item 4.7) no ensaio PM-5. Quando o gradiente hidráulico foi reduzido de 63 para 24 (com o recipiente acrílico), a permeabilidade subiu de  $7 \times 10^{-11}$  m/s para  $5 \times 10^{-10}$  m/s; este valor foi obtido com a passagem de 2,69 Vv, ocorrida ao fim de 72 dias de percolação. No ensaio com o PM-6, quando o gradiente hidráulico foi reduzido de 150 para 30, a permeabilidade também subiu de  $7 \times 10^{-11}$  m/s para  $1 \times 10^{-10}$  m/s.

Nota-se em todos os ensaios moldados com o teor de umidade acima do ótimo (ramo úmido) que os coeficientes de permeabilidade foram baixos, da ordem de  $10^{-10}$  m/s, após a percolação de um volume de água igual ao dobro do volume de vazios do corpo-de-prova. Segundo as exigências das normas ambientais, em termos de permeabilidade, este solo poderá ser utilizado como “compacted clay liner” para bacias de disposição de rejeito.

Embora o solo estudado apresente valores de permeabilidade suficientemente baixos, sua compatibilidade com elementos químicos solúveis possivelmente presentes na LV, como

por exemplo o sódio, deve ser avaliada a fim de que haja garantia da integridade da camada compactada no caso de contato com o efluente da LV.

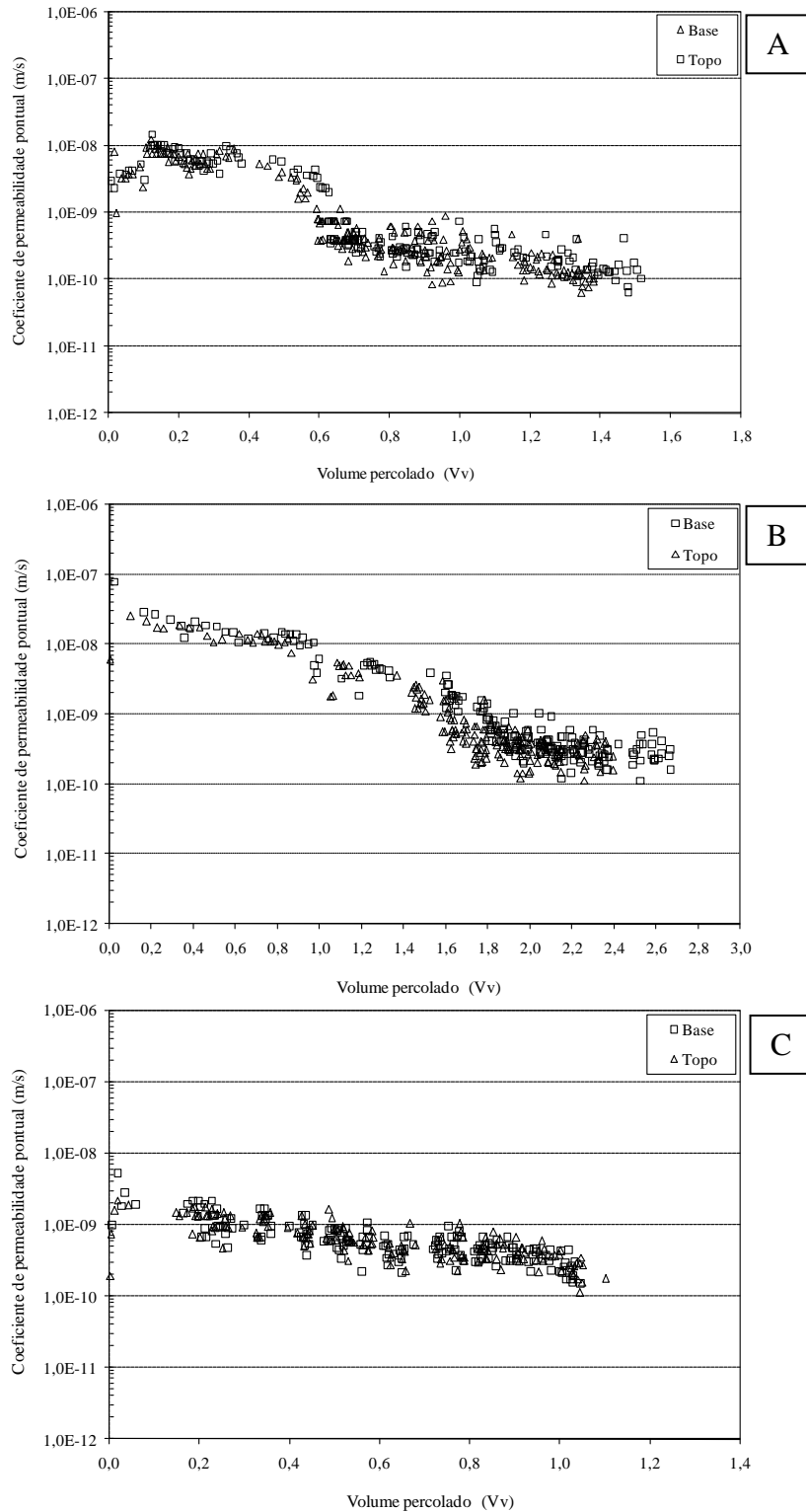


Figura 5.21 - Ensaio de permeabilidade: A) PM-1; B) PM-2; C) PM-3; D) PM-4 e E) PM-5 e F) PM-6.

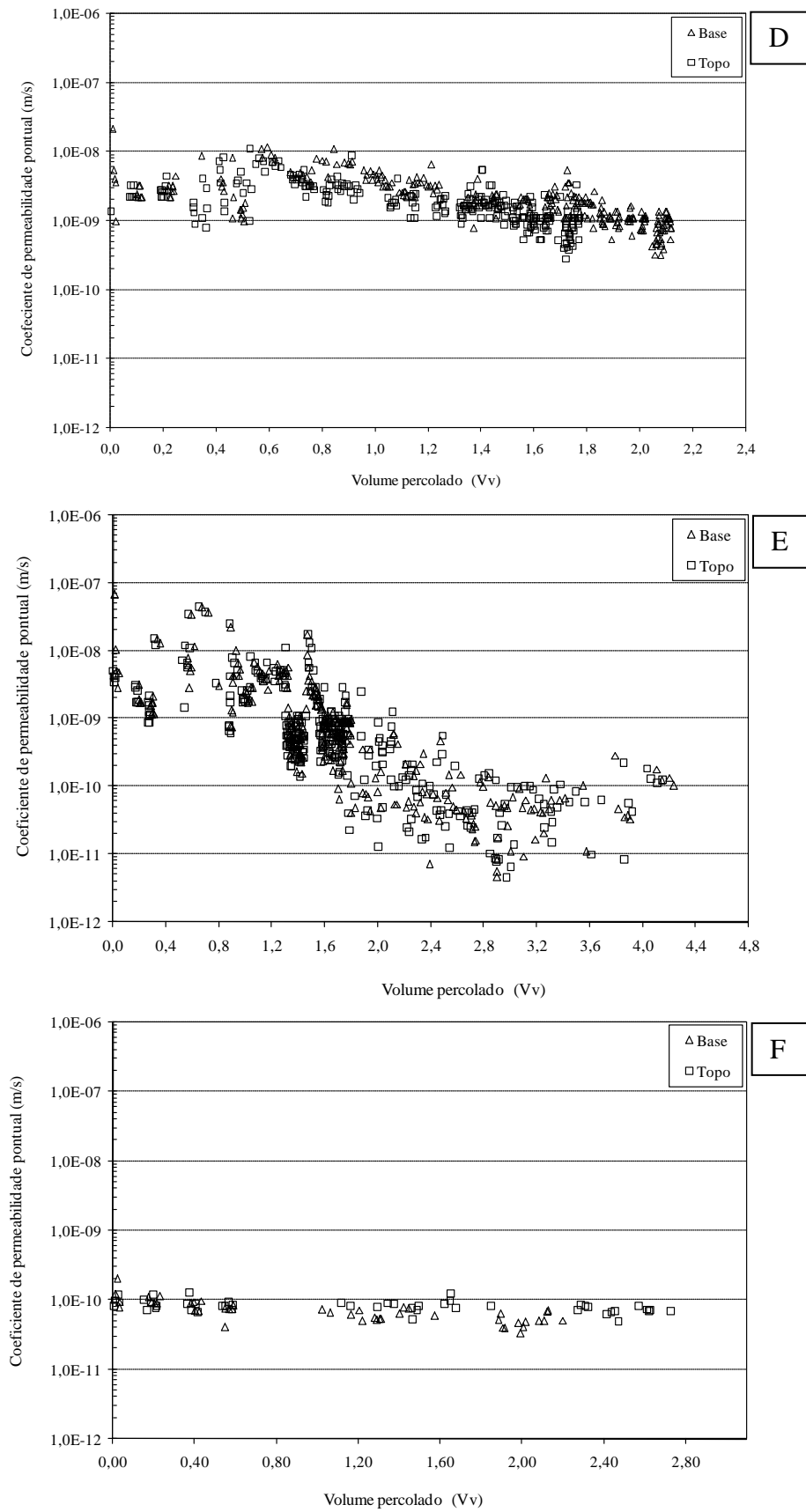


Figura 5.21 - Ensaio de permeabilidade: A) PM-1; B) PM-2; C) PM-3; D) PM-4 e E) PM-5 e F) PM-6.

## 5.7 ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE SÓDIO SOLÚVEL NA LAMA VERMELHA

A concentração total de sódio (representada por  $\text{Na}_2\text{O}$ ) na lama vermelha segundo as análises químicas de elementos principais é de aproximadamente 9,7% (Tabela 5.1).

O teor de sódio solúvel na lama vermelha gerada pela Alunorte determinado pela NBR 10.006 (ABNT, 2004) foi de 0,7 e 0,8 g/L (que equivalem a 4,12% e 4,78% do sódio total), sendo o pH do extrato solubilizado igual a 10. Por outro lado, Lima (2006) obteve 12,3 g/L de sódio solúvel no mesmo material. A principal diferença entre os dois métodos é a razão solo:água, que pela norma brasileira é de 1:6 e no método de Lima (2006) foi de 1:500. A concentração solubilizada depende da razão solo:solução (Tsugawa, 2004; EPA, 1992).

Na LV da Alumar em São Luiz-MA, o teor de sódio solúvel varia de 10 g/L (Costa Junior, 2001) a 120 g/L (Moncada). Segundo Nunn (1998) a concentração de sódio solúvel é de 2,2 a 8,7 g/L, nos sólidos secos de lama.

Observa-se que a concentração de sódio solúvel efetivamente solubilizado pode variar tanto com a concentração total de sódio na lama vermelha, que depende da matéria-prima e do processamento, como com a quantidade de água disponível, que por sua vez é função do processamento, ocorrência de espessamento, precipitação de águas pluviais sobre a bacia, evaporação, drenagem, entre outros. Por isso, para os ensaios que utilizaram concentrações de sódio solúvel neste trabalho, foram escolhidas concentrações variando entre 0,7 g/L, valor determinado em ensaio de solubilização segundo a NBR 10.006 (ABNT, 2004), e 28,75 g/L, estabelecido como valor máximo nesta pesquisa devido ao fato de que ensaios preliminares mostraram que essa concentração já causa desestruturação do solo.

Cabe citar também que as normas NBR 10.006 e 10.007 (ABNT, 1004) apresentam procedimentos para obter, respectivamente, extratos de solubilização e de lixiviação, através dos quais um resíduo sólido ou semi-sólido pode ser classificado em termos de periculosidade pela NBR 10.004 (ABNT, 2004). Para o sódio não há limite máximo de concentração imposto para o extrato de lixiviação; no extrato de solubilização, a concentração limite é de 200 mg/L. Os resultados obtidos nesta investigação (0,7-0,8 g/L) indicam que a lama vermelha é um resíduo não inerte, mas que não seria classificada como um resíduo perigoso devido ao sódio, já que para o mesmo não há limite de lixiviação. A análise de periculosidade pela NBR 10.004 (ABNT, 2004) ainda prosseguiria, porém, verificando-se a provável causticidade da lama vermelha (resíduos com pH igual ou superior a 12,5 são considerados perigosos).

## 5.8 ENSAIO DE COLUNA

Foram realizados ensaios de coluna com soluções de hidróxido de sódio (NaOH) em água deionizada nas concentrações de 1,23% e 5% (12,3 e 50,0 g/L de NaOH), equivalentes a respectivamente, 7,07 g/L e 28,75 g/L de sódio. O pH das soluções era da ordem de 11-12.

Os ensaios de coluna foram realizados como sequência dos ensaios de permeabilidade à água, utilizando os mesmos corpos-de-prova. Os resultados dos ensaios de coluna apontaram uma variação inicial nos coeficientes de permeabilidade, que pode estar associada à incorporação de bolhas de ar no sistema quando da troca de afluente ou da mudança na aplicação do gradiente hidráulico. Observa-se que após a percolação de um volume de cerca de 1 Vv (volume de vazios do corpo-de-prova), a permeabilidade tende a um valor constante.

O ensaio de coluna foi controlado através de leituras periódicas da concentração efluente, até a obtenção de concentração de saída igual à concentração da solução de partida. A permeabilidade final do corpo-de-prova PM-4 (Figura 5.22) após a passagem da solução de NaOH com concentração de 5% foi de  $9 \times 10^{-11}$  m/s. A percolação de solução de NaOH diminuiu a permeabilidade do solo, medida como  $7 \times 10^{-10}$  m/s no ensaio de permeabilidade a água (porém com gradiente hidráulico 46, enquanto neste ensaio de coluna foi de 30). A diminuição de permeabilidade para solos submetidos à percolação com licor cáustico também foi observada nos estudos de Leinz (1985) e Pavilonski (1985).

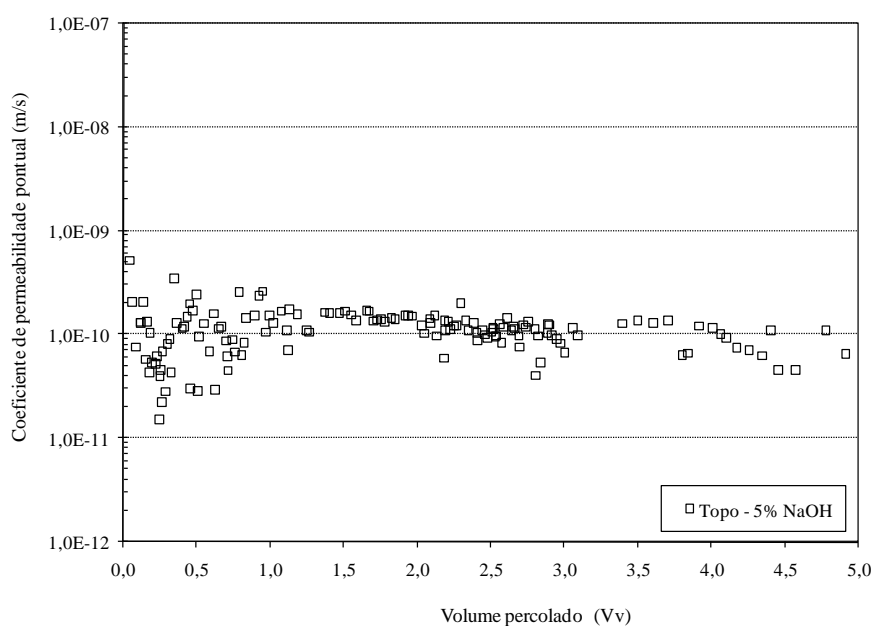


Figura 5.22 – Curvas de permeabilidade em função do volume percolado para água e solução de NaOH com concentração de 5% (PM-4).

O ensaio foi interrompido antes que fosse atingido o valor da concentração da solução de partida no efluente, em função da diminuição na concentração de sódio no efluente após a percolação de um volume de solução de NaOH superior a um volume de vazios do corpo-de-prova (Figura 5.23 A) e da mudança na cor do efluente na tubulação de saída (mangueira), indicando lixiviação de solo. Quando desmontado o ensaio, a consistência do corpo-de-prova estava similar à de uma “goma de mascar”. As mesmas observações podem ser feitas para o ensaio com o PM-5 (Figura 5.23 B). Os resultados parecem indicar que para concentrações elevadas de sódio, as partículas do solo tendem a dispersar, como será discutido no item 5.8.

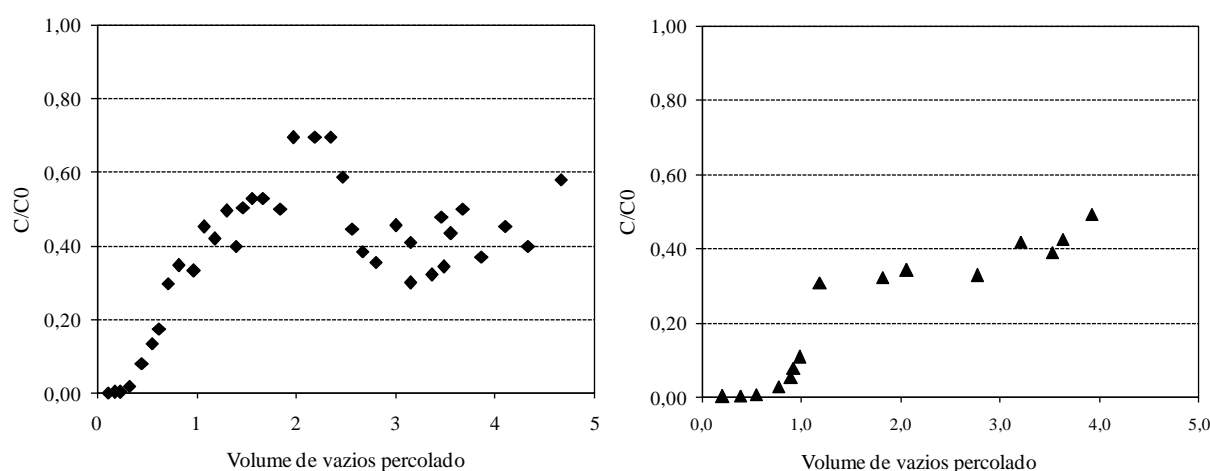


Figura 5.23 – Concentração efluente relativa em função do volume percolado: A) PM-4; B) PM-5.

A permeabilidade final para o corpo-de-prova (PM-5) após a passagem da solução com concentração de 1,23% foi de  $2 \times 10^{-10}$  m/s (Figura 5.24). A percolação de NaOH diminuiu ligeiramente a permeabilidade do solo à água, que era de  $5 \times 10^{-10}$  m/s sob o mesmo gradiente, confirmando os resultados de Leinz (1985), Pavilonski (1985) e do ensaio PM-4.

Os ensaios de coluna permitiram concluir que a percolação de soluções com sódio solúvel em elevadas concentrações pelo solo causam uma diminuição do coeficiente de permeabilidade, porém que não atinge uma ordem de grandeza. Essa diminuição parece estar relacionada à dispersão das partículas de argila, embora não seja possível confirmar esta suposição apenas com os resultados desses ensaios. O pH das amostras dos efluentes dos dois ensaios, com valores entre 11 e 12, contudo, reforçam a suposição de alteração na estrutura do solo por dispersão das partículas sólidas (Madsen & Mitchell, 1986).

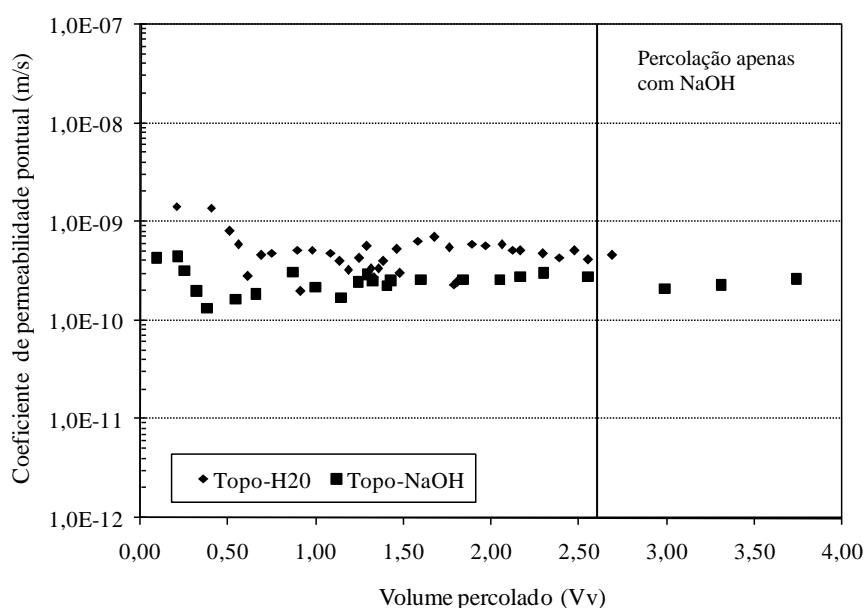


Figura 5.24 – Curvas de permeabilidade em função do volume percolado para água e solução de NaOH com concentração de 1,23% (PM-5).

Não foi possível determinar o coeficiente de dispersão hidrodinâmica e o coeficiente de retardamento do sódio no solo por meio desses ensaios, os quais foram interrompidos antes de completar a “breakthrough curve”: o solo se desestruturou (evidente mudança de consistência) com a percolação das soluções concentradas de NaOH, portanto deixaram de ser válidas as condições para as quais estes parâmetros foram definidos na equação de transporte de poluentes pelo solo (equação 2.7).

## 5.9 ENSAIOS DE GRANULOMETRIA COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE HIDRÓXIDO DE SÓDIO

As curvas granulométricas determinadas pelos dois métodos diferiram muito, como esperado. Na primeira série o defloculante e a solução de NaOH foram aplicados à fração que passa na peneira de malha 10 (abertura de 2 mm), enquanto na segunda série utilizou-se a fração do solo passada na peneira de abertura de 0,3 mm. Ademais, na primeira série, as porcentagens relativas aos diâmetros superiores a 0,075 mm foram obtidas por peneiramento, enquanto na granulometria a laser a amostra é ensaiada integralmente.

As curvas granulométricas obtidas pelo primeiro método indicaram que o solo é naturalmente floculado e que o defloculante atua nas frações mais finas do solo (Figura 5.25). A fração argila (neste trabalho considerado o valor da ABNT, diâmetro menor que 0,005 mm), igual a 18% sem defloculante, passa a 42% com defloculante, enquanto a fração silte



(diâmetro de 0,005 a 0,05 mm), de 13% sem defloculante, passa a 4% com defloculante. Na comparação entre as curvas granulométricas com defloculante e com solução a 5% de NaOH, percebe-se que a fração silte é de aproximadamente 4% em ensaio realizado com defloculante, passando para 30% quando se realiza um ensaio com uma solução a 5% de NaOH; já a fração argila é de 42% no ensaio com defloculante, enquanto que com uma solução a 5% de NaOH foi de apenas 24%. Os resultados obtidos nestes ensaios indicaram que o defloculante foi mais efetivo do que o NaOH na dispersão da fração argila dos solos.

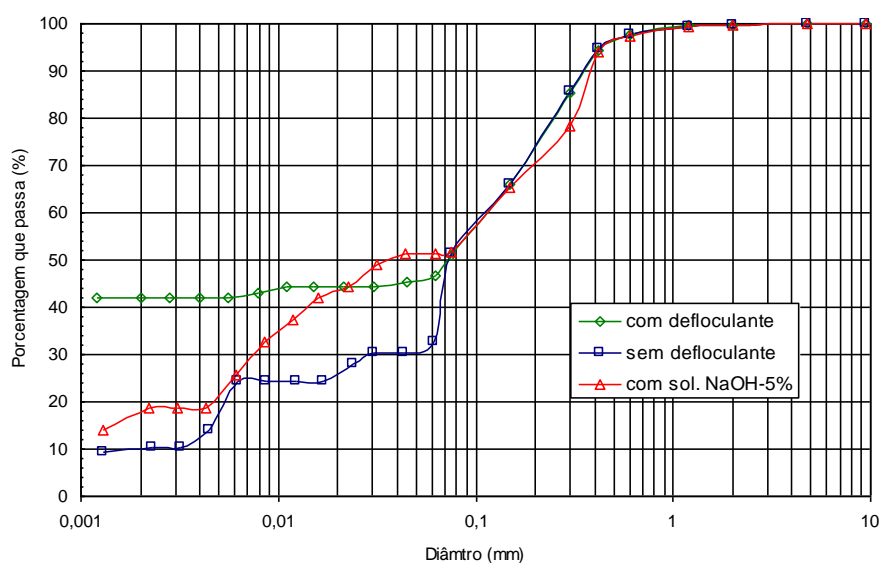


Figura 5.25 – Curvas granulométricas das amostras de solo com defloculante, sem defloculante e com uma solução de NaOH

Na granulometria a laser (Figura 5.26) as frações argila e silte com água foram iguais a, respectivamente, 12% e 43%. Ao contrário da primeira série, as curvas granulométricas obtidas com as soluções de hexametáfosfato de sódio e NaOH a 5% foram muito semelhantes, a ponto de não poder se afirmar qual é mais eficiente na dispersão do solo; a fração argila foi igual a 28% para as duas soluções e a fração silte variou ligeiramente (diferença de 10% entre as duas soluções). Visualmente foi possível perceber que a solução de hexametáfosfato de sódio claramente dispersou o solo, ao passo que com a solução de NaOH a 5% parte do solo ficou depositada no fundo do recipiente e a solução apresentou-se avermelhada, provavelmente devido à desagregação das nano partículas de oxi-hidróxidos de ferro das demais partículas de solo (Figura 4.5).

A fração argila para concentrações de NaOH de 0,12% e 0,56% foi de 44%, enquanto a fração silte foi de 34% e 24%, respectivamente. As concentrações mais baixas de NaOH

tenderam a dispersar mais o solo do que as maiores concentrações e até do que o próprio defloculante de norma (hexametáfosfato de sódio). Na Figura 4.5 constata-se maior dispersão para as menores concentrações de NaOH, visto que não se observa deposição de partículas no fundo do recipiente mesmo após 2 semanas da adição das soluções, permanecendo a suspensão com a mesma coloração do solo natural; por outro lado, para as concentrações mais elevadas, parte das partículas sólidas sedimenta e a cor da solução se altera.

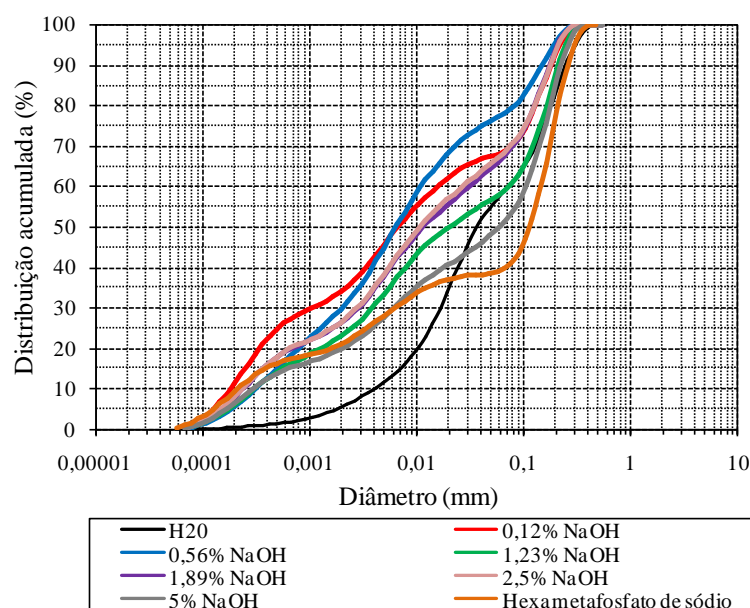


Figura 5.26 - Curvas granulométricas das amostras de solo com água, defloculante e soluções com concentrações de 0,12%, 0,56%, 1,23%, 1,89%, 2,5% e 5% de NaOH.

A investigação da dispersão deste solo pelo equipamento ESA-9800 indicou uma ascensão do potencial zeta a partir do pH 12, o que pode ser entendido como dispersão de partículas (Figura 5.27). A suspensão coloidal estaria estável entre pH 8 e 13, ou seja, dispersa; para pH menor do que 8 ou superior a 13, a tendência é a instabilidade da suspensão, ou seja, floculação, coagulação e sedimentação.

Ao avaliar as suspensões das análises de granulometria a laser (Figura 4.5), percebe-se que para as concentrações de NaOH de 0,12% e 0,56%, com respectivos pH de 11 e 12,5 (Tabela 4.2), as partículas do solo apresentam-se dispersas, enquanto para as soluções com concentração igual ou superior a 1,23%, correspondendo a pH igual ou superior a 13, parte das partículas sólidas deposita no fundo do recipiente. Esta percepção é confirmada pelas análises granulométricas, nas quais concentrações menores de NaOH tiveram efeito maior na dispersão da fração argila. Essas observações estão coerentes com os resultados do ensaio de potencial zeta.

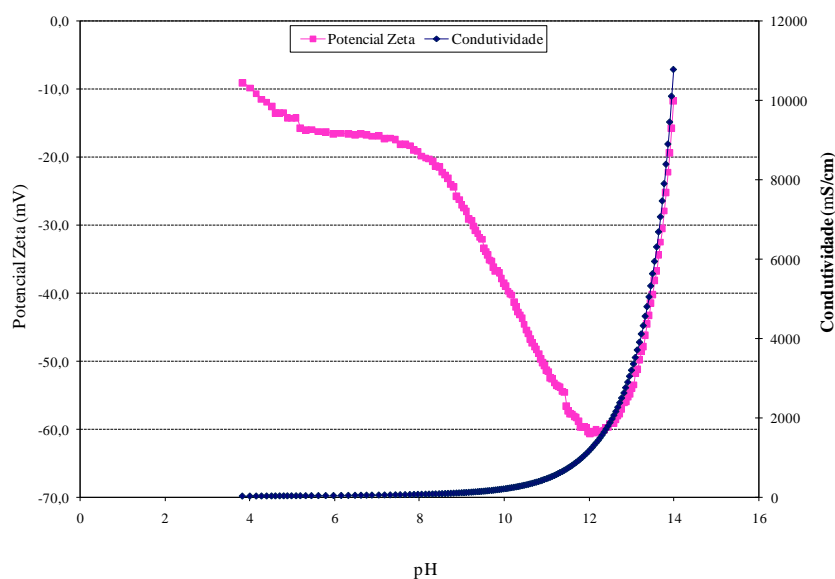


Figura 5.27 – Potencial zeta e condutividade do solo.

Carvalho (2006) considera que o NaOH apresenta geralmente propriedade dispersiva devido ao efeito combinado do Na e do pH. A adição de Na faz com que as forças de repulsão geradas entre as partículas de argila superem as forças de atração, causando a dispersão da fração argila. Já o alto pH favorece a dispersão das argilas devido à geração de cargas negativas ( $\text{OH}^-$ ), o que explicaria o aumento da condutividade elétrica. Em pH superior a 9 a hematita, que é um dos componentes menores do solo, se solubiliza preferencialmente na forma de  $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$  (Faure, 1991), o que também poderia explicar o aumento da condutividade elétrica, embora tal fato não tenha sido investigado neste trabalho.

A mudança na cor das suspensões com o aumento da concentração de Na e do pH também aventa a hipótese de que esteja ocorrendo a dispersão de partículas de oxi-hidróxido de Fe e a solubilização da hematita.

#### 5.10 LIMITES DE CONSISTÊNCIA COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE HIDRÓXIDO DE SÓDIO

Os ensaios de consistência foram realizados com soluções de hidróxido de sódio nas concentrações de 0,12%, 0,56%, 1,23%, 1,89%, 2,5% e 5% (0,67 g/L, 3,22 g/L, 7,07 g/L, 10,87 g/L, 14,38 g/L e 28,75 g/L de sódio).

O limite de liquidez do solo diminuiu com a adição de NaOH ao solo, de 33% para 29% com a concentração de 0,12%, e 17 a 19% para as demais concentrações. O índice de plasticidade diminuiu de 12% para 9% com a concentração de 0,12%, 4% para as

concentrações entre 0,56% e 1,89%, e tornou-se não plástico para a concentração de 5% (Tabela 5.5). Esses resultados são compatíveis com a análise tátil-visual das amostras, que se tornaram menos plásticas à medida que se adicionou NaOH ao solo. Kumapley & Ishola (1985) também observaram a diminuição de plasticidade para uma argila caulínica, quando contaminada por concentrações crescentes de NaOH. Todos os corpos-de-prova submetidos ao contato com NaOH, inclusive nos ensaios de difusão e colapso, apresentaram uma consistência de goma de mascar, com baixa resistência, baixa plasticidade e alta viscosidade, e que poderão comprometer a estabilidade para uso em CCLs.

Tabela 5.5 – Limites de consistência do solo realizados com água e diferentes concentrações de hidróxido de sódio.

Concentrações NaOH (%)	LL (%)	IP (%)
Água	33	12
0,12	29	9
0,56	19	4
1,23	17	4
1,89	17	4
5	19	NP

LL – Limite de Liquidez; IP – Índice de Plasticidade do solo e NP – Não plástico.

Os resultados encontrados estão de acordo com os observados por Carvalho (2006) para análise de limites de Atterberg de dois materiais (solos): saprolítico (com alto teor de caulinita) e um coluvionar (com alto teor de gibbsita) provenientes de Poços de Caldas-MG, utilizando um licor cáustico a base de sódio para as análises, que também apresentaram uma tendência a diminuição dos limites.

### 5.11 ENSAIOS DE COLAPSO

As características dos corpos de prova das amostras utilizadas nos ensaios edométricos simples e duplos estão apresentados na Tabela 5.6. Na umidade ótima a estrutura do solo não é metaestável, pois corresponde à menor porosidade possível para a energia de compactação aplicada. O grau de saturação inicial, por sua vez, varia entre 69 e 100%. Os índices de vazios diminuem após o carregamento final, como era de se esperar; e são ainda menores para os ensaios edométricos duplos à medida que se aumentam as concentrações de NaOH.

Tabela 5.6 - Condições iniciais e finais dos corpos de prova dos ensaios edométricos

Ensaio Edométrico Simples						
Soluções	Tensão de Inundação (kPa)	Características do corpo-de-prova				
		w <sub>0</sub> (%)	γ <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	e <sub>0</sub>	S (%)	e <sub>f</sub>
H <sub>2</sub> O	40	18,77	16,53	0,59	84	0,57
	80	20,16	16,70	0,58	92	0,53
	160	18,95	14,92	0,60	92	0,51
	320	18,33	16,78	0,57	85	0,41
NaOH 0,12 %	40	17,52	17,60	0,49	93	0,46
	80	16,93	17,77	0,48	93	0,42
	160	17,58	17,29	0,52	89	0,44
	320	17,83	16,88	0,56	84	0,44
NaOH 1,23%	40	17,19	17,68	0,49	92	0,44
	80	17,87	17,30	0,52	90	0,41
	160	18,08	17,29	0,52	91	0,38
	320	17,39	17,52	0,50	91	0,37
NaOH 5%	40	17,53	17,58	0,50	93	0,45
	80	17,22	17,68	0,49	93	0,41
	160	17,33	17,57	0,50	92	0,42
	320	17,21	17,82	0,48	95	0,38

## Ensaio Edométrico Duplo – Tensão de inundação de 320 kPa

Soluções	Tensão de Inundação (kPa)	Características do corpo-de-prova				
		w <sub>0</sub> (%)	γ <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	e <sub>0</sub>	S (%)	e <sub>f</sub>
Sem inundação	-	17,91	16,91	0,56	84	0,41
H <sub>2</sub> O	5	17,91	16,90	0,56	85	0,40
NaOH 0,12%	5	17,22	17,77	0,48	94	0,28
NaOH 1,23%	5	16,90	16,30	0,62	72	0,32
NaOH 5%	5	18,05	16,60	0,59	81	0,18

W<sub>0</sub> = teor de umidade; γ<sub>d</sub> = Peso específico do solo seco; e<sub>0</sub> = índice de vazios inicial; S = grau de saturação; e<sub>f</sub> = índice de vazios final após a aplicação do carregamento.

Os resultados dos ensaios edométricos simples realizados com água e com concentrações de 0,12%, 1,23% e 5% de NaOH, com pressões pré-estabelecidas de 40 kPa, 80

kPa, 160 kPa e 320 kPa estão apresentados sob a forma de curvas de deformação volumétrica específica ( $\epsilon_v$ ) definida na equação (5.1), em escala linear, em função da tensão vertical de adensamento ( $\sigma_v$ ), em escala logarítmica (Figura 5.28 a 5.31).

$$\epsilon_v = (H_0 - H) / H_0 \quad (5.1)$$

Onde:  $H_0$  = Altura inicial do corpo-de-prova

$H$  = Altura final do corpo-de-prova

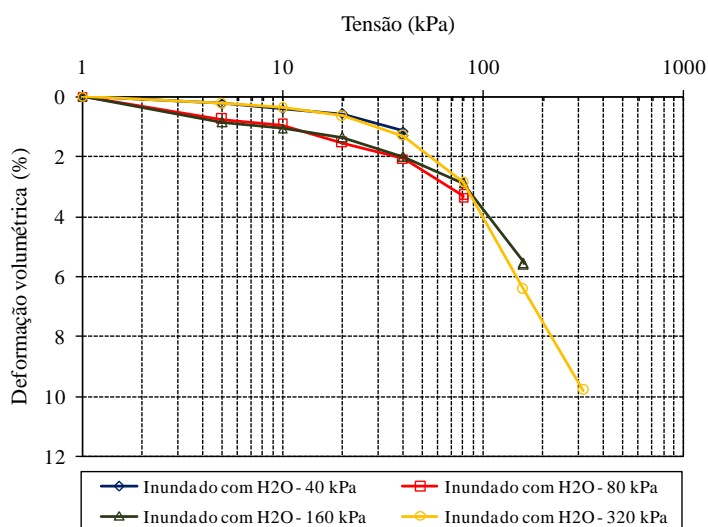


Figura 5.28 – Deformação volumétrica ( $\epsilon_v$ ) em função da tensão vertical aplicada nos ensaios edométricos simples – solo inundado com água.

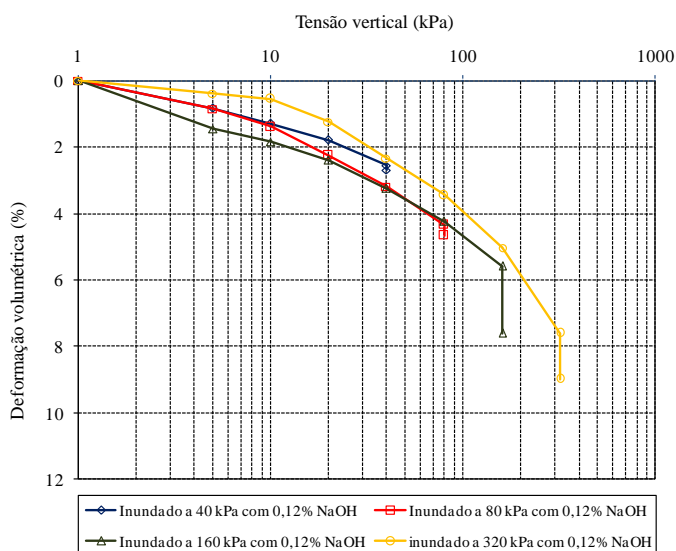


Figura 5.29 – Deformação volumétrica ( $\epsilon_v$ ) em função da tensão vertical aplicada nos ensaios edométricos simples – solo inundado com solução de NaOH à concentração de 0,12%.

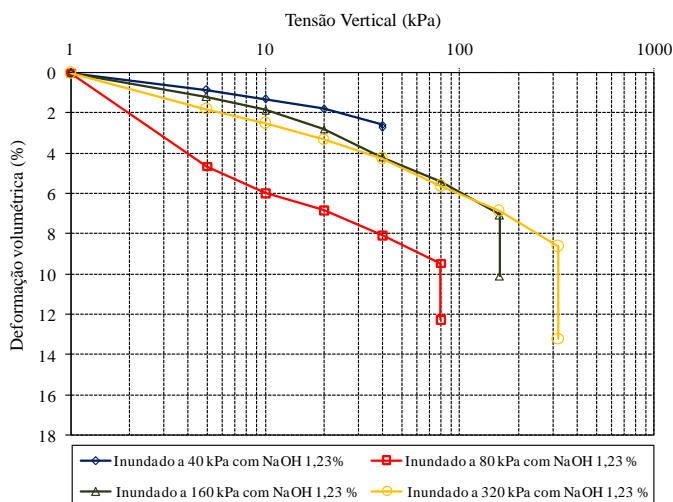


Figura 5.30 – Deformação volumétrica ( $\epsilon_v$ ) em função da tensão vertical aplicada nos ensaios edométricos simples – solo inundado com solução de NaOH à concentração de 1,23%.

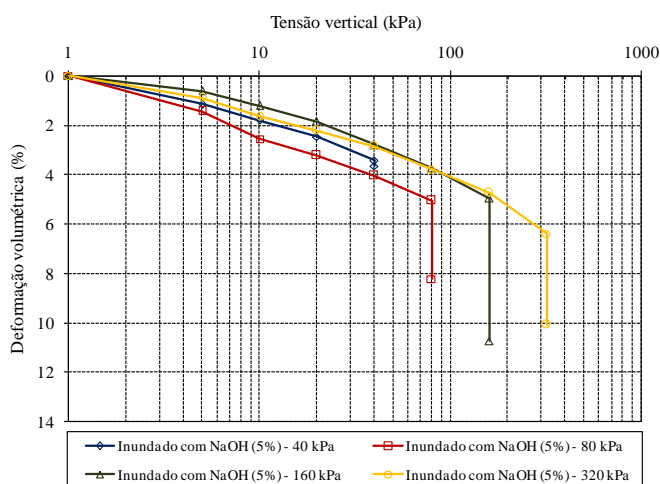


Figura 5.31 – Deformação volumétrica ( $\epsilon_v$ ) em função da tensão vertical aplicada nos ensaios edométricos simples – solo inundado com solução de NaOH à concentração de 5%

Os coeficientes de colapso estruturais para os ensaios edométricos simples, com amostras inundadas sob tensões conhecidas, foram calculados pela equação (5.2):

$$I = \Delta e / (1 + e_i) \quad (5.2)$$

Onde:  $\Delta e$  = variação do índice de vazios devido à inundação;

$e_i$  = índice de vazios do solo antes da inundação

Para obras de engenharia civil, segundo Lutenege & Saber (1988), o colapso pode ser classificado como leve, moderado e elevado em função de valores de  $I$  (em %), respectivamente,  $I \leq 2$ ,  $2 < I \leq 6$  e  $I \geq 10$ .

A variação do potencial de colapso em função da concentração de NaOH e da tensão aplicada está apresentada na Figura 5.32 e na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Potencial de colapso em função da inundação com água e hidróxido de sódio (ensaios edométricos simples).

Soluções	Tensão (kPa)	$e_i$	$\Delta e$	$\varepsilon_{vi}(\%)$	$\Delta \varepsilon_v(\%)$	I (%)
Água	40	0,57	0,00	1,16	0,15	0
	80	0,52	0,00	3,32	0,06	0
	160	0,51	0,00	5,56	0,04	0
	320	0,42	0,00	9,80	0,04	0
NaOH 0,12%	40	0,46	0,01	2,56	0,14	0
	80	0,42	0,01	4,68	0,33	0
	160	0,44	0,03	7,61	2,02	2
	320	0,44	0,02	9,00	1,40	2
NaOH 1,23%	40	0,44	0,00	2,56	0,14	0
	80	0,38	0,04	9,45	2,82	3
	160	0,41	0,04	7,05	3,04	3
	320	0,37	0,07	8,10	4,61	6
NaOH 5%	40	0,45	0,01	3,44	0,21	0
	80	0,41	0,04	5,05	3,20	3
	160	0,42	0,08	4,98	5,77	6
	320	0,38	0,05	6,41	3,68	4

$e_i$  = índice de vazios do solo antes da inundação;  $\Delta e$  = variação do índice de vazios devido a inundação;  $\varepsilon_{vi}$  = deformação volumétrica do solo antes da inundação;  $\Delta \varepsilon_v$  = variação da deformação volumétrica devido a inundação; I = potencial de colapso ou coeficiente de subsidência devido à inundação.

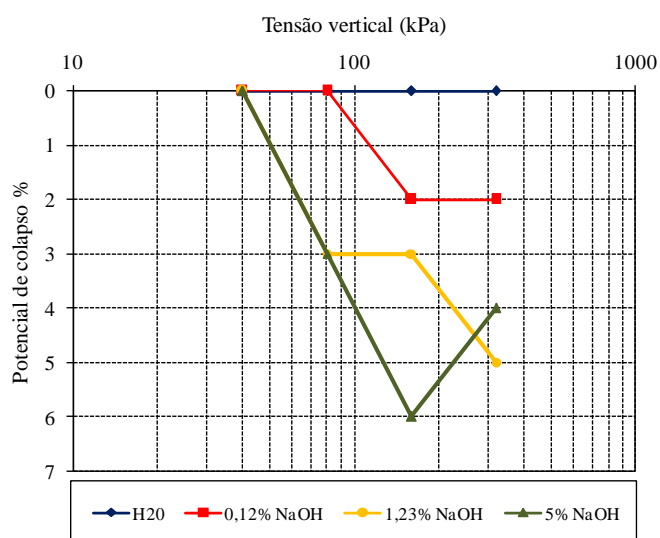


Figura 5.32 – Potencial de colapso em função da tensão vertical nos ensaios edométricos simples com inundação por água e soluções de NaOH.



Observa-se que, a despeito de pequenas variações no índice de vazios inicial das amostras, as curvas de compressão edométrica no intervalo de tensões que antecede a inundação são muito próximas em todos os ensaios realizados, possibilitando a identificação clara das situações de colapso. Os resultados mostram que não ocorre colapso no solo inundado com água (Figura 5.28). Para o solo inundado com solução de NaOH à concentração de 0,12% (Figura 5.29) ocorreu colapso para as tensões de 160 e 320 kPa, com potencial de colapso igual a 2% (Tabela 5.7), configurando um colapso de leve a moderado. Para inundação com solução de NaOH nas concentrações de 1,23% e 5% ocorre colapso moderado nas tensões acima de 40 kPa (Figura 5.30 e 5.31). Nota-se que o potencial de colapso para amostras inundadas com 0,12% e 5% de NaOH aumenta até a tensão de 160 kPa, diminuindo a partir desta para a tensão mais elevada. Para a amostra inundada com solução de NaOH a 1,23%, o potencial de colapso foi constante entre as tensões 80 e 160 kPa, aumentando a partir desta (Tabela 5.11 e Figura 5.32). Em todas as amostras ensaiadas com NaOH o potencial de colapso indicou colapso moderado para tensões acima de 160 kPa.

Nos ensaios duplos, o coeficiente de colapso foi definido pela equação (5.3):

$$I = \Delta \varepsilon_v / (1 - \varepsilon_{v(\text{nat})}) \quad (5.3)$$

Onde:  $\Delta \varepsilon_v = \varepsilon_{v(\text{nat})} - \varepsilon_{vi}$

$\varepsilon_{v(\text{nat})}$  é a deformação volumétrica específica do solo carregado na umidade natural;

$\varepsilon_{vi}$  é a deformação volumétrica específica do solo carregado previamente inundado.

Os resultados de colapso dos ensaios edométricos duplos realizados sem inundação e com inundação por água e soluções de NaOH estão apresentados na Figura 5.33 e Tabela 5.8.

O solo inundado com água apresentou ligeira expansão em relação ao solo na umidade natural. Já para as soluções de NaOH, observou-se o colapso em diversas situações. Sob a tensão de 320 kPa, por exemplo, a diferença entre as deformações volumétricas do solo inundado com soluções de NaOH e a do solo na umidade natural foi de 7%, 12% e 20%, para as concentrações de 0,12%, 1,23% e 5% de NaOH, respectivamente. Para a solução de NaOH a 0,12%, a diferença de deformação volumétrica em relação ao solo na umidade natural foi nula para as tensões de 10 e 20 kPa, aumentando de 0,5% a 6,2% para tensões entre 40 e 320 kPa. Para as concentrações de 1,23% e 5% de NaOH, entre as tensões de 40 e

320 kPa, as diferenças de deformação volumétrica em relação ao solo no estado natural foram de, respectivamente, 5,4 a 11,1% e 5,2 a 19,3%.

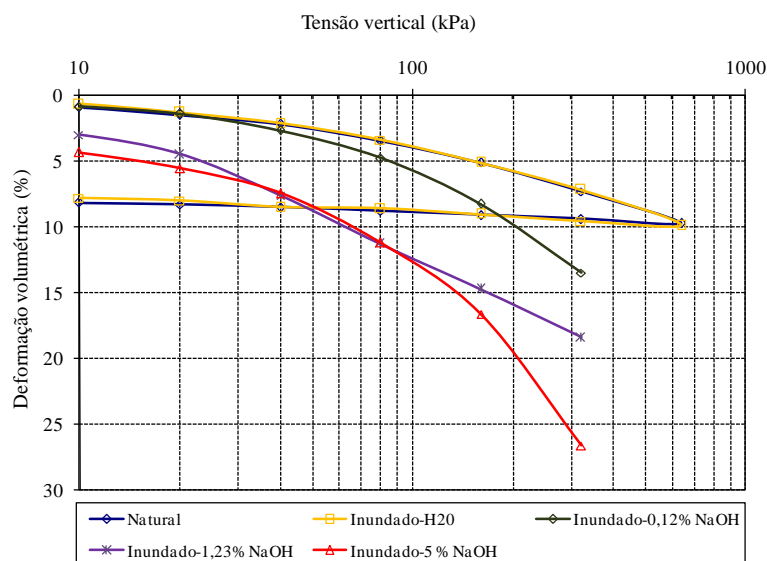


Figura 5.33 – Deformação volumétrica ( $\epsilon_v$ ) em função da tensão vertical aplicada nos ensaios edométricos duplo: solo natural; inundado com água; inundado nas concentrações de 0,12%, 1,23% e 5% de NaOH.

Para amostras inundadas com soluções de NaOH o índice de colapso foi crescente em função do aumento das concentrações, variando de 0,38 a 0,97 para concentração de 0,12%; 1,75 a 4,32 para concentração de 1,23% e 2,75 a 4,19 para 5% (Figura 5.34 e Tabela 5.8). Embora estes valores indiquem moderado risco de acordo com Jennings e Knight (1975) e Lutenegger e Saber (1988), mudanças estruturais devido ao contato com a lama vermelha podem alterar a compressibilidade do solo a ser utilizado no CCL.

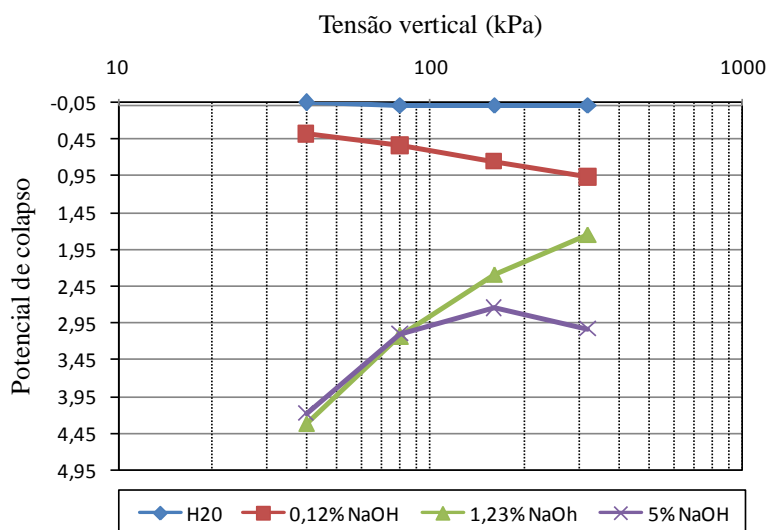


Figura 5.34 – Potencial de colapso em função da tensão vertical nos ensaios edométricos duplos com inundações por água e soluções de NaOH.

Tabela 5.8 – Colapso do solo quando submetido a inundação com água e concentrações de hidróxido de sódio (ensaios edométricos duplos).

Fluido	Tensão (kPa)	$\epsilon_{vnat}$ (%)	$\epsilon_{vi}$ (%)	I
H <sub>2</sub> O	40	2,25	2,20	-0,05
	80	3,50	3,44	-0,02
	160	5,18	5,15	-0,01
	320	7,35	7,24	-0,02
NaOH 0,12%	40	2,25	2,73	0,38
	80	3,50	4,84	0,54
	160	5,18	8,30	0,75
	320	7,35	13,53	0,97
NaOH 1,23%	40	2,25	7,65	4,32
	80	3,50	11,36	3,14
	160	5,18	14,74	2,29
	320	7,35	18,45	1,75
NaOH 5%	40	2,25	7,49	4,19
	80	3,50	11,25	3,10
	160	5,18	16,65	2,75
	320	7,35	26,65	3,04

$\epsilon_{vnat}$  = deformação volumétrica específica do solo carregado na umidade natural;  $\epsilon_{vi}$  = deformação volumétrica específica do solo carregado previamente inundado;  $\Delta\epsilon_v = \epsilon_{vi} - \epsilon_{v(nat)}$ ; I potencial de colapso ou coeficiente de subsidência devido à inundação.

Os dois tipos de ensaios edométricos permitem avaliar, claramente, que o solo não apresenta colapso na presença de água e apresenta colapso leve ou moderado em contato com soluções de NaOH de 0,12 a 5% de concentração.

Quando se comparam os dois métodos, a diferença entre as deformações volumétricas das amostras inundadas com água e das amostras na umidade natural nunca excederam 0,1% nos ensaios simples e indicaram ligeira expansão nos ensaios duplos. Para as soluções de NaOH, as deformações volumétricas devidas à inundação na faixa de tensões aplicadas foram significativamente maiores nos ensaios duplos.

Pela Tabela 5.6 observa-se que os índices de vazios dos corpos-de-prova dos ensaios simples variaram entre 0,48 e 0,60, e os dois ensaios duplos, entre 0,48 e 0,62. Essa variação indesejada do ponto de vista de homogeneidade e representatividade é, contudo, difícil de ser evitada, visto que na compactação o índice de vazios varia em um mesmo corpo-de-prova em função da posição vertical, devido ao recebimento de um número diferente de golpes. A variação observada é, contudo, comparável com a de outras pesquisas semelhantes.

Para avaliar o colapso para uma dada tensão, os ensaios simples são mais adequados, pois não dependem da comparação entre curvas provenientes de diferentes corpos-de-prova. No entanto, para estudar a variação do colapso em função do aumento de tensão, o ensaio duplo é mais recomendável. O efeito no CCL do enchimento de uma bacia com lama vermelha talvez seja melhor representado por um ensaio duplo, ou seja, o aumento de carga ocorre com contato entre solução e solo desde o princípio do alteamento.

Este conjunto de ensaios mostrou interações químicas fortes entre o sódio solúvel e solo, com conseqüente aumento significativo de compressibilidade, provavelmente devido à mudança na estrutura, que se tornou dispersa, o qual pode comprometer o desempenho do CCL à medida que ocorre contato com efluente da lama vermelha.

## 5.12 - ENSAIOS DE DIFUSÃO

### 5.12.1 - Sódio solúvel

Os dados de moldagem dos corpos-de-prova ensaiados a difusão estão apresentados na Tabela 5.9. Os resultados de concentração de sódio no reservatório em função do tempo de ensaio e no líquido intersticial do solo em função da profundidade do corpo-de-prova estão apresentados na Figura 5.35 e Tabelas 5.10 e 5.11.

Tabela 5.9 - Dados de moldagem dos corpos-de-prova dos ensaios de difusão.

Corpos-de-prova	$C_0$ (mg/L)	pH	H (cm)	D (cm)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$W_0$ (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	n	GC (%)	$\Delta w$ (%)
DSS-1	35,8	14	4,99	8,50	21,51	15,56	18,61	0,41	0,29	100	0,62
DSS-2	35,8	14	6,01	8,50	21,32	15,56	18,61	0,41	0,29	100	0,57
DSS-3	35,8	14	5,93	8,50	21,32	15,56	18,61	0,43	0,29	100	0,57
DSS-4	28,7	14	5,10	8,50	21,53	18,14	18,22	0,44	0,31	100	0,64
DSS-5	28,7	14	5,17	8,46	21,23	18,14	18,22	0,42	0,31	100	0,24
DSS-6	28,7	14	5,03	8,53	21,53	18,14	18,22	0,43	0,31	100	-0,37
DSS-8	35,8	14	5,04	8,50	21,32	15,56	18,61	0,41	0,29	100	0,62

$C_0$  = concentração da solução de partida; H = altura; D = diâmetro;  $\gamma$  = peso específico aparente, w = teor de umidade,  $\gamma_d$  = peso específico aparente seco; e = índice de vazios; n = porosidade; S = grau de saturação; GC = grau de compactação;  $\Delta w$  = desvio de umidade.

A concentração de sódio na solução do solo só foi determinada para o corpo-de-prova DSS-4. As concentrações na água intersticial são muito baixas para serem determinadas por fotômetros; o ICP-OES é a técnica adequada, entretanto esta não estava facilmente disponível

nos laboratórios que apoiaram esta pesquisa, o que impossibilitou investigar mais amplamente a distribuição da concentração de sódio no solo, conforme programado (vide 4.11.1).

Tabela 5.10 - Concentração de Na no reservatório de ensaios de difusão.

Células														
1		2		3		4		5		6		8		
T (dias)	C g/L	T (dias)	C g/L	T (dias)	C g/L	T (dias)	C g/L	T (dias)	C g/L	T (dias)	C g/L	T (dias)	C g/L	
0	35,80	0	35,80	0	35,80	0	28,70	0	28,70	0	28,70	0	35,80	
18	30,70	25	32,40	25	32,40	18	21,70	17	25,80	33	18,60	18	32,40	
81	12,00	88	12,00	88	12,40	21	23,80	20	18,70	36	19,70	81	12,80	
135	10,00	142	10,00	142	10,00	158	8,80	157	8,30	173	8,10	135	10,40	
206	6,39	213	7,05	213	7,50	221	8,90	220	7,70	236	7,70	206	6,61	
241	6,82	241	7,96	241	6,83	275	7,60	274	8,00	290	7,40	241	6,17	
							346	5,31	345	5,31	361	5,11		
									380	5,74	397	5,31		

T: tempo de difusão; C: concentração de Na em função de T.

A concentração de sódio no reservatório diminui com o tempo tendendo assintoticamente a um valor final, que seria o valor de concentração de equilíbrio no sistema solo-reservatório. O decréscimo de concentração em função do tempo é nitidamente mais acentuado nos primeiros 50 dias. Inicialmente o gradiente de concentrações entre reservatório e solo é máximo; à medida que a frente de difusão avança pelo solo, a concentração no reservatório diminui, a concentração da solução do solo aumenta e, conseqüentemente, o gradiente de concentração diminui; pela lei de Fick, o fluxo de massa, ou seja, a velocidade com que a massa de soluto atravessa a seção transversal do solo, diminui também.

As curvas de concentração da solução no reservatório em função do tempo em todas as células com a mesma solução de partida são semelhantes, mostrando reprodutibilidade do ensaio (Figura 5.35). No caso de  $C_0=28$  g/L, não houve diferença significativa mesmo para o DSS-8, de teor de umidade mais baixo que os demais (DSS-1, 2 e 3). A pouca sensibilidade do coeficiente de difusão às características de compactação (peso específico aparente seco e teor de umidade de moldagem) tem sido observada por outros pesquisadores (Bosco, 1997).

Para verificar a influência da concentração inicial na difusão, os resultados de todos os ensaios estão apresentados conjuntamente com a concentração normalizada ( $C/C_0$ ) em relação à concentração da solução de partida (concentração inicial no tempo  $t=0$ ). Aparentemente, a difusão foi um pouco mais rápida para a maior concentração, como esperado pela lei de Fick (Figura 5.36).

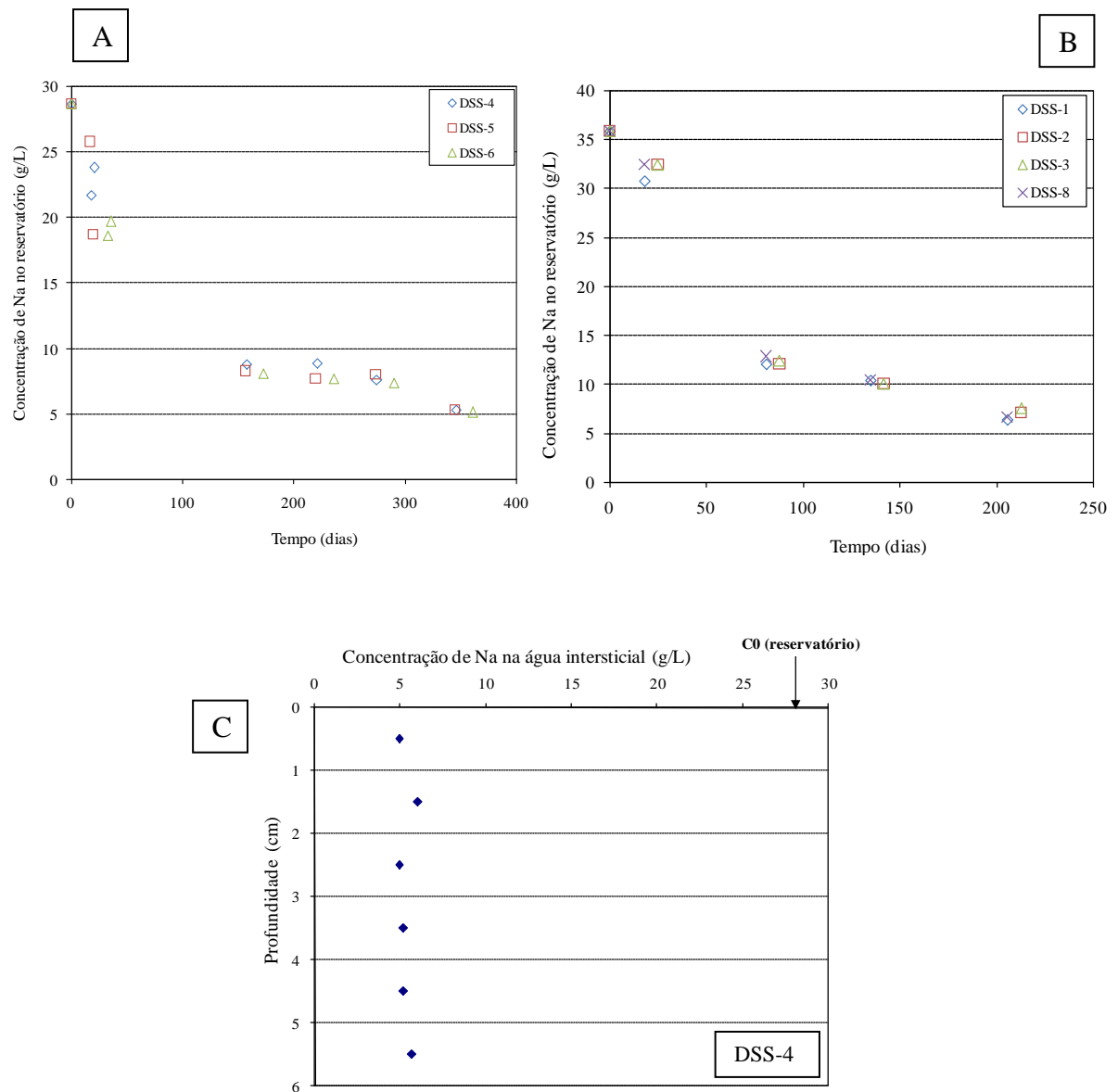


Figura 5.35 - Difusão de Na: A) nos reservatórios DSS-1 a DSS-3 e DSS-8 ( $C_0 = 35$  g/L); B) nos reservatórios DSS-4 a DSS-6 ( $C_0 = 28$  g/L) e C) na água intersticial do solo do DSS-4.

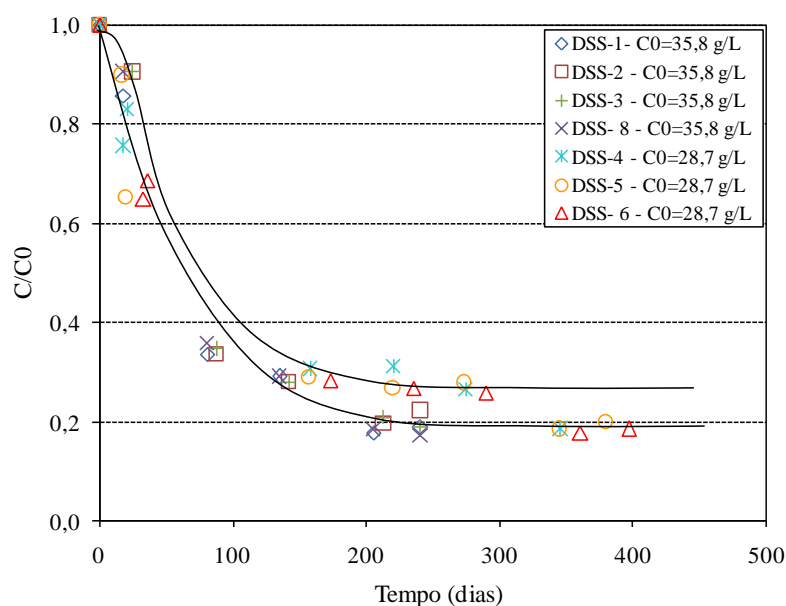


Figura 5.36 – Normalização da concentração em um tempo  $t$  ( $C$ ) em relação à concentração da solução de partida em um tempo  $t=0$  ( $C_0$ ).

Tabela 5.11 – Distribuição de concentrações de Na no corpo-de-prova DSS-4 no final do ensaio de difusão.

Camada	Profundidade (cm)	Massa (g)	Volume de diluição (mL)	Teor de umidade (%)	Fator de diluição	Concentração de Na (g/L)
Topo	0-0,5	20,87	85,0	46,73	13,79	4,93
4-1	0,5-1,0	20,02	94,5	45,61	16,07	5,98
4-2	1,0-2,0	20,23	79,5	55,74	11,98	4,91
4-3	2,0-3,0	20,15	79,5	48,43	13,09	5,19
4-4	3,0-4,0	20,10	85,0	55,37	12,87	5,15
4-5	4,0-5,0	20,23	84,5	51,46	13,29	5,64

Observou-se uma distribuição praticamente uniforme das concentrações de sódio na água intersticial do solo em função da profundidade após 346 dias de difusão (Figura 5.35 C), com valor médio de  $(5,3 \pm 0,4)$  g/L, totalmente compatível com o valor de concentração no reservatório no término do ensaio, de 5,31 g/L (Tabela 5.10). Isto indica que o tempo de difusão foi suficiente para igualar as concentrações de sódio do sistema, ou seja, foi atingido o equilíbrio de concentrações no reservatório e na solução do solo. Em todas as camadas, o pH da água intersticial do solo estava entre 9 e 10 no final do ensaio.

Os resultados das simulações com o programa POLLUTE v.6 para a obtenção do coeficiente de difusão e do coeficiente de adsorção estão apresentados na Figura 5.37. Deve-se lembrar que o ensaio deve ser finalizado antes do equilíbrio de concentrações no sistema

para que a condição de contorno adotada para a base do corpo-de-prova nas simulações seja totalmente correta, enquanto no ensaio DSS-4 o equilíbrio de concentrações foi atingido antes do término do ensaio; mesmo assim, os ajustes obtidos foram razoáveis.

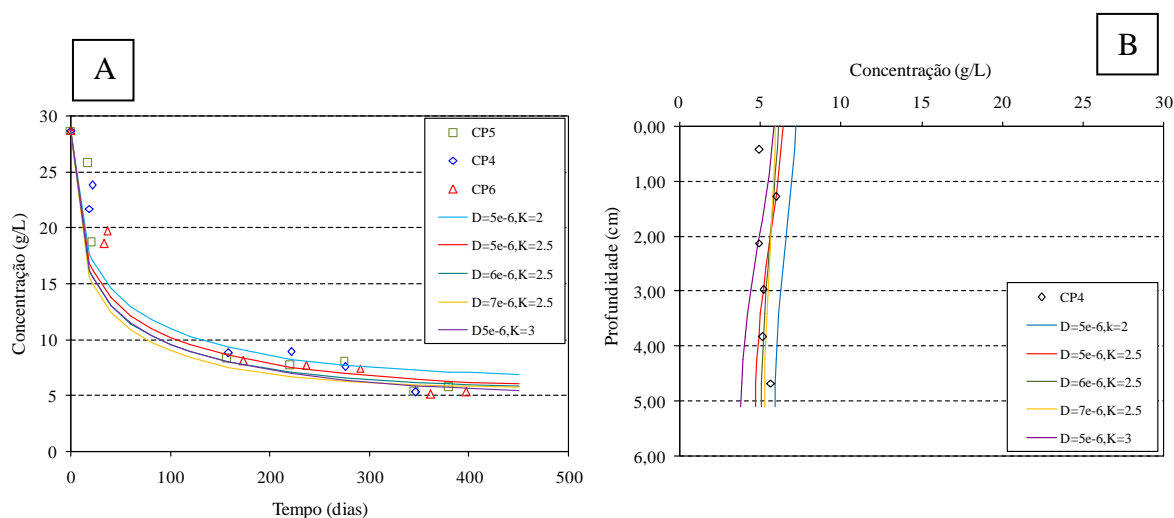


Figura 5.37 - Estimativa de D e Kd para o ensaio DSS-4 pelo programa POLLUTE: (A) reservatório; (B) solo.

Os ajustes simultâneos das duas curvas obtidas no ensaio forneceram os valores de coeficiente de difusão entre  $5$  e  $7 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  e coeficiente de adsorção (distribuição) de  $2$  a  $3 \text{ mL/g}$  para o sódio no solo de estudo. Esses valores são comparados com os compilados por Rowe et al. (1995) (Tabela 5.12); observa-se que a argila laterizada apresenta coeficiente de difusão ligeiramente superior e coeficiente de adsorção cerca de  $10$  vezes maior, mesmo com concentração de partida mais elevada, do que os solos de clima temperado (Canadá) com granulometria e índices de consistência semelhantes. Os solos do Canadá têm pH e fração silte mais elevados do que o solo investigado.

Tabela 5.12 – Valores de coeficientes de difusão e adsorção apresentados por Rowe et al (1995).

n	S	C	IP	CTC	pH	$D \times 10^{-10}$	Kd	$C_0$	pH
(%)	(%)	(%)	(%)	(meq/100g)	solo	( $\text{m}^2/\text{s}$ )	(mL/g)	(g/L)	solução
32	42	40	11	-	-	2,0	0,03	0,565	-
39	43	45	~27	~10	~8,1	4,6	0,15	0,955	7
36	-	40	-	14,8	8,7	3,7	0,3	5,100	9
~39	~43	~45	~27	~10	~8,1	4,8	0,11	0,975	-
32	42	23	11	-	-	2,0	0,03	0,565	-

n = porosidade; S = teor de silte; C = teor de argila; IP = índice de plasticidade; D = coeficiente de difusão; Kd ;  $C_0$  = concentração da solução de partida



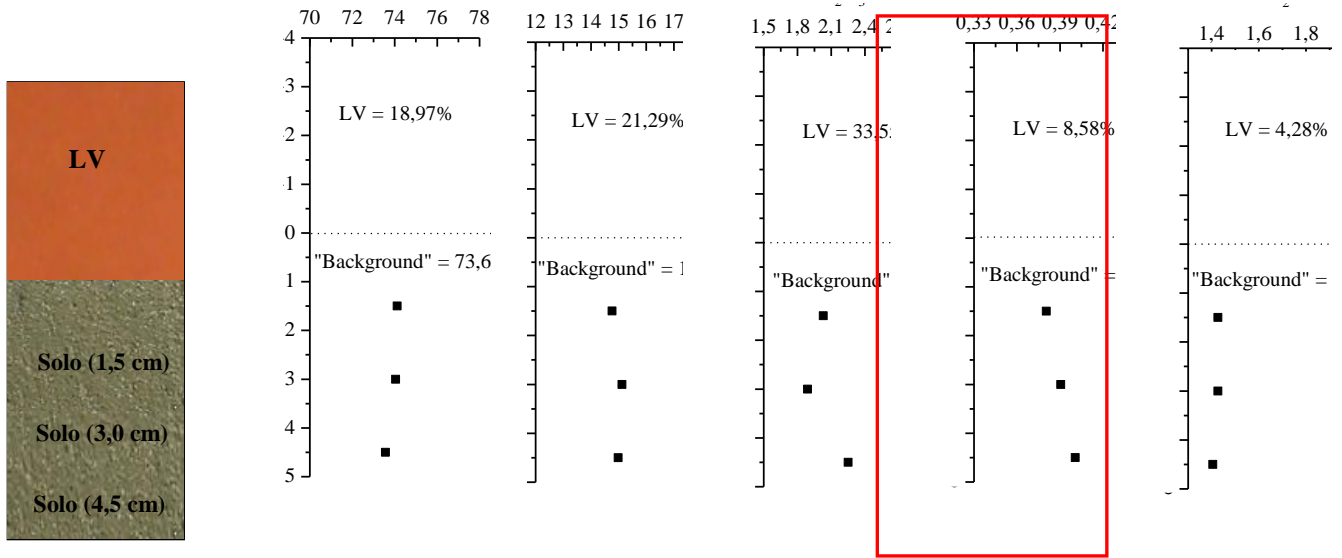
## 5.12.2 - Lama vermelha

### 5.12.2.1 – Características químicas

As análises químicas realizadas em amostras totais dos corpos-de-prova submetidos a ensaios de difusão com lama vermelha indicaram que estes não foram palco de difusão ou contaminação com os componentes químicos da LV, exceto pelo sódio, admitindo uma variação de 10%. Os valores de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, CaO, K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> não variaram entre as amostras de solo compactado sem (DLV-0) e com cobertura de LV (DLV-1 e DLV-2). Por outro lado os corpos-de-prova cobertos por LV foram contaminados com Na<sub>2</sub>O, cujo teor mudou de 0,02 % para 0,37%-0,41% (aumentando de 1950%), demonstrando claramente a ocorrência de difusão do sódio solúvel (Figuras 5.38 e 5.39 e Tabela 5.13). Os elementos-traço também não difundiram, nem mesmo V (variação de 17%-42%), pois as variações são muito oscilantes, o que pode estar relacionado à amostragem (Tabela 5.14).

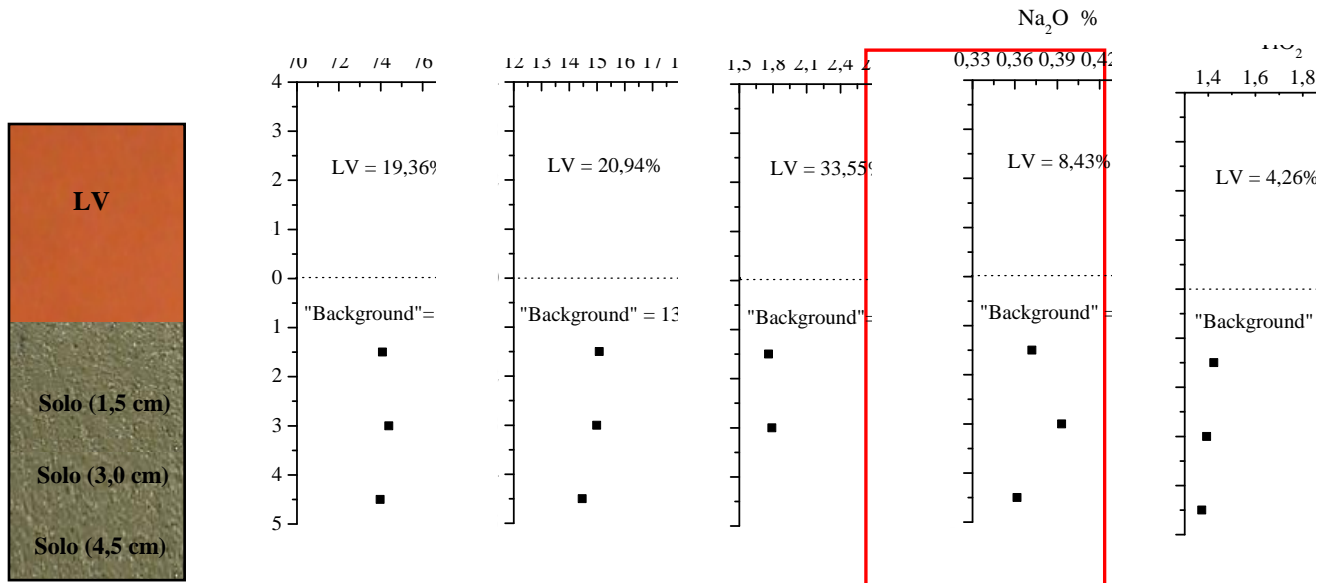
Tabela 5.13 - Composição química (em % de peso) da LV, solo compactado submetido à difusão e solo compactado sem cobertura de LV (DLV-0).

Ensaio	Material	Prof (cm)	Concentração (%)											
			SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PF
DLV-1	DLV-0		76,63	13,29	1,66	0,04	<0,01	0,01	0,01	0,05	0,02	1,27	0,03	6,0
	LV		19,36	21,29	33,55	0,03	0,01	0,04	1,33	0,03	8,58	4,26	0,05	11,2
	Solo	1,5	74,08	14,77	2,03	0,05	<0,01	0,01	0,01	0,04	0,38	1,42	0,04	7,0
		3,0	74,01	15,12	1,89	0,04	<0,01	0,01	0,01	0,04	0,39	1,42	0,04	6,8
		4,5	73,53	14,99	2,25	0,04	<0,01	0,01	0,01	0,04	0,40	1,40	0,04	7,1
Média		73,87	14,36	2,06	0,4	-	0,01	0,01	0,04	0,39	1,41	0,04	6,97	
DLV-2	LV		8,97	20,94	33,58	0,03	<0,01	0,04	1,33	0,04	8,43	4,28	0,05	11,4
	Solo	1,5	74,09	14,93	1,76	0,05	<0,01	0,01	<0,01	0,04	0,37	1,42	0,03	7,1
		3,0	74,39	14,84	1,79	0,04	0,01	0,01	0,01	0,04	0,39	1,39	0,03	6,8
		4,5	73,97	14,35	2,77	0,05	<0,01	0,01	0,02	0,05	0,36	1,37	0,03	6,8
	Média		74,15	14,71	2,11	0,05	-	0,01	-	0,04	0,37	1,39	0,03	6,9



DLV-1: Corpo-de-prova com sequência topo-meio; LV: Lama vermelha; Solo: solo compactado com cobertura de LV; "background": solo natural sem cobertura de LV (DLV-0).

Figura 5.38 – Distribuição das concentrações de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> e Na<sub>2</sub>O (em %) no solo ao longo da profundidade em ensaios de difusão (DLV-1).



DLV-2: Corpo-de-prova com sequencia meio-base; LV: Lama vermelha; Solo: solo compactado com cobertura de LV; "background": solo natural sem cobertura de LV (DLV-0).

Figura 5.39 – Distribuição de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> e Na<sub>2</sub>O (em %) no solo ao longo da profundidade em ensaios de difusão (DLV-2).

Tabela 5.14 - Composição química dos elementos-traço (ppm) da LV, solo compactado submetido à difusão e solo compactado sem cobertura de LV (DLV-0).

Ensaio	Material	Prof (cm)	Be	Sc	V	Ni	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ag	Cd	Sn
DLV-1	DLV-0		<1	6,0	48,0	3,4	1,1	<20	1,1	20	17,7	<0,5	<0,5	2,3	14,3	17,6	1174,8	27,5	0,2	<0,1	<0,1	3,0
	LV		<1	24,0	647,0	22,5	3,5	27,0	4,4	4,0	88,2	4,9	<0,5	0,3	12,2	32,6	2715,8	121,5	1,7	0,2	<0,1	18,0
	Solo	1,5	<1	7,0	67,0	1,0	1,2	<20	0,9	22	22,1	<0,5	<0,5	2,3	16,1	18,3	1158,2	31,2	0,1	<0,1	<0,1	3,0
		3,0	<1	7,0	54,0	1,2	1,2	<20	0,7	21	21,4	<0,5	<0,5	2,3	16,4	19,4	1265,8	30,8	0,1	<0,1	<0,1	4,0
		4,5	<1	7,0	83,0	1,0	1,1	<20	0,9	23	21,8	<0,5	<0,5	2,3	16,0	18,1	1187,9	29,3	0,3	<0,1	<0,1	4,0
Média		-	7,0	68,0	1,1	1,1	<20	0,8	22	21,8	<0,5	<0,5	2,3	16,2	18,6	1204,0	30,4	0,2	<0,1	<0,1	3,5	
DLV-2	LV		<1	24,0	654,0	15,6	1,9	<20	4,2	3	92,3	5,4	<0,5	0,7	12,9	34,9	2760,0	123,7	2,1	0,3	<0,1	17,0
	Solo	1,5	<1	7,0	53,0	1,0	1,2	31,0	1,0	20	21,3	<0,5	<0,5	2,3	16,7	19,1	1284,5	31,3	0,2	<0,1	<0,1	4,0
		3,0	<1	7,0	53,0	0,9	1,1	<20	0,8	21	21,2	<0,5	<0,5	2,2	16,1	18,0	1195,4	29,5	0,1	<0,1	<0,1	4,0
		4,5	<1	7,0	62,0	22,5	3,8	<20	4,8	23	19,4	<0,5	<0,5	2,3	16,4	18,6	1225,6	29,4	0,4	<0,1	<0,1	4,0
	Média		<1	7,0	57,5	8,13	2,0	-	2,2	21,3	20,6	-	-	2,2	16,4	18,6	1235,2	30,1	0,2	-	-	4,0

Ensaio	Material	Prof (cm)	Sn	Sb	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Au
DLV-1	DLV-0		3,0	<0,1	0,6	20,0	11,8	18,6	2,0	6,9	1,2	0,3	1,4	0,3	2,6	0,6	2,1	0,4	2,7	0,4	31,3	2,0	2,2	<0,5
	LV		18,0	0,2	0,1	9,0	15,0	24,1	2,0	7,0	1,7	0,4	2,1	0,6	4,3	1,2	4,2	0,8	6,6	1,1	74,0	8,7	12,2	2,6
	Solo	1,5	3,0	<0,1	0,6	27,0	13,5	20,7	2,2	7,1	1,3	0,3	1,6	0,4	2,6	0,6	2,1	0,4	2,7	0,4	31,9	2,1	2,5	0,09
		3,0	4,0	<0,1	0,6	23,0	13,9	21,3	2,3	7,7	1,4	0,3	1,7	0,4	2,8	0,7	2,2	0,4	2,9	0,5	34,0	2,2	2,6	<0,5
		4,5	4,0	<0,1	0,5	22,0	14,0	22,0	2,4	8,2	1,4	0,3	1,7	0,4	2,7	0,6	2,1	0,4	2,9	0,4	33,0	8,8	2,6	<0,5
Média		3,5	<0,1	0,6	24,0	13,8	21,3	2,3	7,7	1,4	0,3	1,7	0,4	2,7	0,7	2,2	0,4	2,8	0,5	33,0	4,4	2,6	-	
DLV-2	LV		17,0	<0,1	<0,1	12,0	16,1	25,0	2,2	7,6	1,8	0,4	2,2	0,6	4,4	1,2	4,4	0,9	6,6	1,2	75,4	2,2	11,7	3,1
	Solo	1,5	4,0	<0,1	0,6	23,0	13,8	21,3	2,3	7,8	1,5	0,3	1,6	0,4	2,7	0,7	2,2	0,4	2,8	0,5	34,1	2,0	2,5	<0,5
		3,0	4,0	<0,1	0,6	23,0	13,6	20,9	2,3	8,1	1,4	0,3	1,6	0,4	2,6	0,6	2,0	0,4	2,8	0,5	33,2	2,0	2,4	0,6
		4,5	4,0	<0,1	0,6	23,0	13,0	20,4	2,2	7,5	1,4	0,3	1,6	0,4	2,6	0,6	2,1	0,4	2,7	0,5	33,5	2,0	2,6	<0,5
	Média		4,0	<0,1	0,6	23,0	13,5	20,9	2,3	7,8	1,5	0,3	1,6	0,4	2,7	0,7	2,1	0,4	2,8	0,5	33,6	2,0	2,5	-

### 5.12.2.2 Controle químico micropontual com microscopia eletrônica de varredura (MEV/SED)

Como as análises químicas de amostras totais apenas demonstraram a difusão do sódio da LV para o solo subjacente, realizaram-se a seguir análises químicas pontuais, com o objetivo de detectar variações nas concentrações em escala micro, atingindo basicamente a matriz dos solos, dominada pelos argilominerais e os oxi-hidróxidos de ferro. Empregou-se este método também para analisar o arranjo estrutural de amostras de solo no estado natural, após ser submetido a ensaio edométrico sem inundação e com inundação por solução de NaOH à concentração de 5%, e após ser submetido a ensaios de difusão com soluções de NaOH (DSS) e com cobertura de lama vermelha (DLV-3) (Figura 5.40).

As análises do solo compactado sem LV (DLV-0) não foram coerentes e tiveram que ser descartadas. Os resultados foram estimados com base nos valores da análise química total do solo natural, admitindo-se que todo  $\text{Al}_2\text{O}_3$  encontra-se como caulinita, o que leva a uma relação de 57% entre os valores obtidos na análise química total e os obtidos com MEV/SED.

Os resultados obtidos por MEV/SED com o solo submetido a difusão (DLV-3) confirmam as análises totais da Tabela 5.13, ou seja, apenas o sódio se difunde da LV para o solo subjacente, e se estabelece principalmente na matriz, que foi o material analisado por MEV/SED. A concentração de  $\text{Na}_2\text{O}$  nos cinco perfis atingiu valores quase constantes, entre 0,5 a 0,6 %, equivalente a 10% do sódio solúvel na LV, indicando difusão por toda a altura do corpo-de-prova (5 cm) (Tabela 5.15). Este valor é praticamente equivalente àquele obtido por análise química total (0,37 % de  $\text{Na}_2\text{O}$ ), quando recalculado para matriz (que corresponde a 57% da amostra), ou seja, 0,64 %.

Análises pontuais isoladas sugerem possível difusão de ferro, que, no entanto não apresenta uma tendência específica, podendo ser efeito do domínio de micro partículas de óxi-hidróxido de Fe.

As imagens por MEV mostraram que o solo compactado (Figura 5.40 A) apresenta uma estrutura com diversos flocos; ao ser compactado e carregado, sem e com inundação de NaOH, tende a ficar menos poroso (Figura 5.40 B e D). Para os ensaios de difusão DSS e DLV as lâminas indicaram uma aglomeração maior das partículas com uma orientação paralela (Figura 5.40 C e E).

As imagens de MEV e as análises SED mostram grande distinção textural entre a LV e solo compactado (Figura 5.41 D). A LV apresenta uma matriz fina formada por relictos de caulinita ( $\text{AlSiO}$ ), gibbsita ( $\text{AlO}$ ), hematita ( $\text{FeO}$ ), goethita e anatásio ( $\text{TiO}$ ) (Figura 5.41 E). Essa matriz envolve fragmentos de quartzo, hematita/goethita e sodalita. A zona de contato

LV-solo é delgada (submilimétrica) e bem nítida. O solo é formado por grãos de quartzo (SiO) subarredondados com diâmetro superior a 200  $\mu\text{m}$  envolvidos por uma matriz rica em caulinita (AlSiO), já indicada por difração de raios-X (Figura 5.7) e muitas pontuações (grânulos  $<20 \mu\text{m}$ ) de hematita, ilmenita goethita (FeTiO), anatásio (TiO) e zircão (ZrSiO). Observa-se ainda neste solo a presença de algumas fissuras, que podem ser oriundas do processo de compactação e/ou ressecamento (Figura 5.41 A a C).

Tabela 5.15 – Composição química pontual (em %) obtida por MEV/SED da LV, solo compactado submetido à difusão e do solo compactado sem cobertura de LV (DLV-0).

Ensaio	Material	Eixos		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	SiO <sub>2</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	CaO %	Na <sub>2</sub> O %	TiO <sub>2</sub> %	Ensaio	Material	Eixos		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	SiO <sub>2</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	CaO %	Na <sub>2</sub> O %	TiO <sub>2</sub> %		
		(mm)										(mm)									
		y	x									y	x								
	DLV-0	-	-	26,25	66,5	3,50	0,017	0,035	2,20		DLV-0	-	-	26,25	66,5	3,5	0,017	0,035	2,2		
DLV-3 - Perfil 1	LV	73,5	50	23,31	24,54	33,86	1,05	12,48	4,77	DLV-3 - Perfil 2	LV	73,5	45	24,72	17,81	39,51	1,43	11,55	4,55		
		68,5	50	27,26	21,26	31,85	1,40	12,35	5,59			68,5	45	26,57	20,9	33,69	1,14	12,23	5,06		
		63,5	50	30,7	21,01	30,49	1,32	11,17	5,01			63,5	45	26,35	21,88	33,1	1,09	11,78	5,8		
		58,5	50	22,52	17,2	44,52	1,31	10,4	4,05			58,5	45	26,09	20,23	34,61	1,70	11,76	5,18		
		53,5	50	26,16	20,31	34,32	1,59	12,36	5,25			53,5	45	27,33	21,74	31,72	1,38	12,48	5,35		
		48,5	50	26,06	20,39	34,65	1,58	11,83	5,08			48,5	45	27,0	22,14	32,1	1,26	12,33	5,18		
			<b>Média</b>		<b>26,0</b>	<b>20,8</b>	<b>35,0</b>	<b>1,38</b>	<b>11,8</b>		<b>4,96</b>		<b>Média</b>		<b>26,3</b>	<b>20,8</b>	<b>34,2</b>	<b>1,33</b>	<b>12,0</b>	<b>5,19</b>	
			<b>D. Padrão</b>		<b>2,93</b>	<b>2,35</b>	<b>4,96</b>	<b>0,20</b>	<b>0,83</b>		<b>0,52</b>		<b>D. Padrão</b>		<b>0,91</b>	<b>1,62</b>	<b>2,84</b>	<b>0,22</b>	<b>0,38</b>	<b>0,41</b>	
	Solo	Solo	46,5	50	26,19	66,71	4,06	-	0,75		2,29	Solo	Solo	46,5	45	19,29	75,56	2,77	-	0,57	1,8
			41,5	50	24,64	68,57	3,78	-	0,53		2,48			41,5	45	27,05	65,0	4,49	-	0,75	2,67
			36,5	50	25,0	67,62	4,37	-	0,54		2,47			36,5	45	30,69	61,76	4,27	-	0,61	2,68
			31,5	50	28,0	65,78	3,22	-	0,62		2,41			31,5	45	27,25	65,0	4,61	-	0,65	2,53
			26,5	50	27,62	66,17	3,47	-	0,53		2,21			26,5	45	29,34	62,94	4,4	-	0,62	2,71
			21,5	50	28,52	64,73	3,57	-	0,72		2,47			21,5	45	24,7	69,12	3,48	-	0,53	2,17
			16,5	50	25,11	68,84	3,08	-	0,58		2,38			16,5	45	23,49	71,16	2,98	-	0,48	1,89
			11,5	50	29,0	64,21	3,79	-	0,66		2,31			11,5	45	26,4	66,8	3,56	-	0,55	2,69
			6,5	50	23,18	71,55	2,91	-	0,43		1,93			6,5	45	29,16	64,38	3,37	-	0,64	2,44
			1,5	50	27,25	67,01	3,12	-	0,66		1,97			1,5	45	23,61	71,25	2,79	-	0,52	1,83
		<b>Média</b>		<b>26,5</b>	<b>67,1</b>	<b>3,54</b>	-	<b>0,60</b>	<b>2,29</b>		<b>Média</b>		<b>26,1</b>	<b>67,3</b>	<b>3,67</b>	-	<b>0,59</b>	<b>2,34</b>			
		<b>D. Padrão</b>		<b>1,92</b>	<b>2,16</b>	<b>0,47</b>	-	<b>0,10</b>	<b>0,20</b>		<b>D. Padrão</b>		<b>2,64</b>	<b>3,49</b>	<b>0,56</b>	-	<b>0,06</b>	<b>0,39</b>			

Ensaio	Material	Eixos		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	SiO <sub>2</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	CaO %	Na <sub>2</sub> O %	TiO <sub>2</sub> %	Ensaio	Material	Eixos		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	SiO <sub>2</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	CaO %	Na <sub>2</sub> O %	TiO <sub>2</sub> %		
		(mm)										(mm)									
		y	x									y	x								
DLV-3 - Perfil 3	LV	73,5	40	25,79	20,09	33,83	1,70	13,1	5,48	DLV-3 - Perfil 4	LV	73,5	35	26,63	20,85	32,69	1,31	13,43	5,10		
		68,5	40	26,21	21,57	34,53	0,96	11,2	5,50			68,5	35	26,37	20,41	34,09	1,47	12,08	5,59		
		63,5	40	28,34	21,23	31,54	1,16	12,4	5,36			63,5	35	26,82	20,0	33,47	1,88	11,9	5,91		
		58,5	40	25,91	21,0	34,44	1,31	11,7	5,68			58,5	35	25,0	21,0	33,08	1,16	11,77	7,65		
		53,5	40	26,0	21,71	33,41	1,07	11,8	6,04			53,5	35	26,0	20,53	34,61	1,13	12,08	5,17		
		48,5	40	26,16	20,12	34,25	1,22	12,1	6,15			48,5	35	27,29	20,34	32,99	1,22	12,72	5,44		
			<b>Média</b>		<b>26,4</b>	<b>21</b>	<b>33,7</b>	<b>1,24</b>	<b>12,1</b>		<b>5,70</b>		<b>Média</b>		<b>26,4</b>	<b>20,5</b>	<b>33,5</b>	<b>1,36</b>	<b>12,3</b>	<b>5,81</b>	
			<b>D. Padrão</b>		<b>0,97</b>	<b>0,7</b>	<b>1,12</b>	<b>0,26</b>	<b>0,64</b>		<b>0,32</b>		<b>D. Padrão</b>		<b>0,8</b>	<b>0,36</b>	<b>0,73</b>	<b>0,28</b>	<b>0,63</b>	<b>0,95</b>	
	Solo	Solo	46,5	40	30,33	61,5	4,85	-	0,63		2,69	Solo	Solo	46,5	35	27,09	66,0	3,93	-	0,68	2,34
			41,5	40	22,82	71,13	3,16	-	0,50		2,40			41,5	35	25,92	67,91	3,48	-	0,50	2,19
			36,5	40	31,27	60,53	4,61	-	0,67		2,92			36,5	35	26,75	67,55	3,39	-	0,44	1,88
			31,5	40	31,01	60,2	5,65	-	0,54		2,60			31,5	35	26,88	66,48	3,81	-	0,43	2,40
			26,5	40	26,57	66,37	3,92	-	0,56		2,58			26,5	35	24,59	68,88	3,6	-	0,58	2,35
			21,5	40	22,16	72,68	2,86	-	0,45		1,85			21,5	35	18,57	76,88	2,51	-	0,45	1,60
			16,5	40	25,71	67,39	4,03	-	0,48		2,39			16,5	35	25,16	68,2	3,87	-	0,5	2,28
			11,5	40	24,95	69,06	3,18	-	0,54		2,27			11,5	35	16,54	79,24	2,41	-	0,46	1,35
			6,5	40	18,1	77,58	2,28	-	0,45		1,60			6,5	35	24,0	70,0	2,98	-	0,64	2,40
			1,5	40	19,74	75,73	2,50	-	0,52		1,51			1,5	35	17,12	79,28	1,82	-	0,33	1,46
		<b>Média</b>		<b>25,3</b>	<b>68,2</b>	<b>3,70</b>	-	<b>0,53</b>	<b>2,28</b>		<b>Média</b>		<b>23,3</b>	<b>71,0</b>	<b>3,18</b>	-	<b>0,50</b>	<b>2,03</b>			
		<b>D. Padrão</b>		<b>4,64</b>	<b>6,20</b>	<b>1,10</b>	-	<b>0,07</b>	<b>0,48</b>		<b>D. Padrão</b>		<b>4,19</b>	<b>5,29</b>	<b>0,72</b>	-	<b>0,11</b>	<b>0,42</b>			

Ensaio	Material	Eixos		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	SiO <sub>2</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	CaO %	Na <sub>2</sub> O %	TiO <sub>2</sub> %	
		(mm)								
		y	x							
DLV-3 - Perfil 5	LV	73,5	30	26,18	20,28	34,11	1,42	12,9	4,90	
		68,5	30	25,77	20,63	35,61	1,36	11,7	4,89	
		63,5	30	26,7	21,6	31,51	2,49	12,5	5,18	
		58,5	30	25,7	20,2	34,71	1,45	12,2	5,79	
		53,5	30	26,9	20,9	33,68	1,36	12,3	4,85	
		48,5	30	27,2	20,94	32,35	1,30	13,0	5,20	
			<b>Média</b>		<b>26,4</b>	<b>20,8</b>	<b>33,7</b>	<b>1,56</b>	<b>12,4</b>	<b>5,14</b>
			<b>D. Padrão</b>		<b>0,6</b>	<b>0,48</b>	<b>1,38</b>	<b>0,42</b>	<b>0,44</b>	<b>0,32</b>
	Solo	Solo	46,5	30	25,4	66,81	4,48	-	0,88	2,40
			41,5	30	22,2	71,4	3,81	-	0,56	2,01
			36,5	30	21,0	73,28	3,25	-	0,44	2,03
			31,5	30	24,56	68,11	4,48	-	0,66	2,19
26,5			30	24,81	68,96	3,16	-	0,45	2,62	
21,5			30	15,53	80,78	1,94	-	0,37	1,38	
		<b>Média</b>		<b>22,4</b>	<b>71,6</b>	<b>3,42</b>	-	<b>0,55</b>	<b>2,06</b>	
		<b>D. Padrão</b>		<b>3,41</b>	<b>4,64</b>	<b>0,31</b>	-	<b>0,17</b>	<b>0,40</b>	

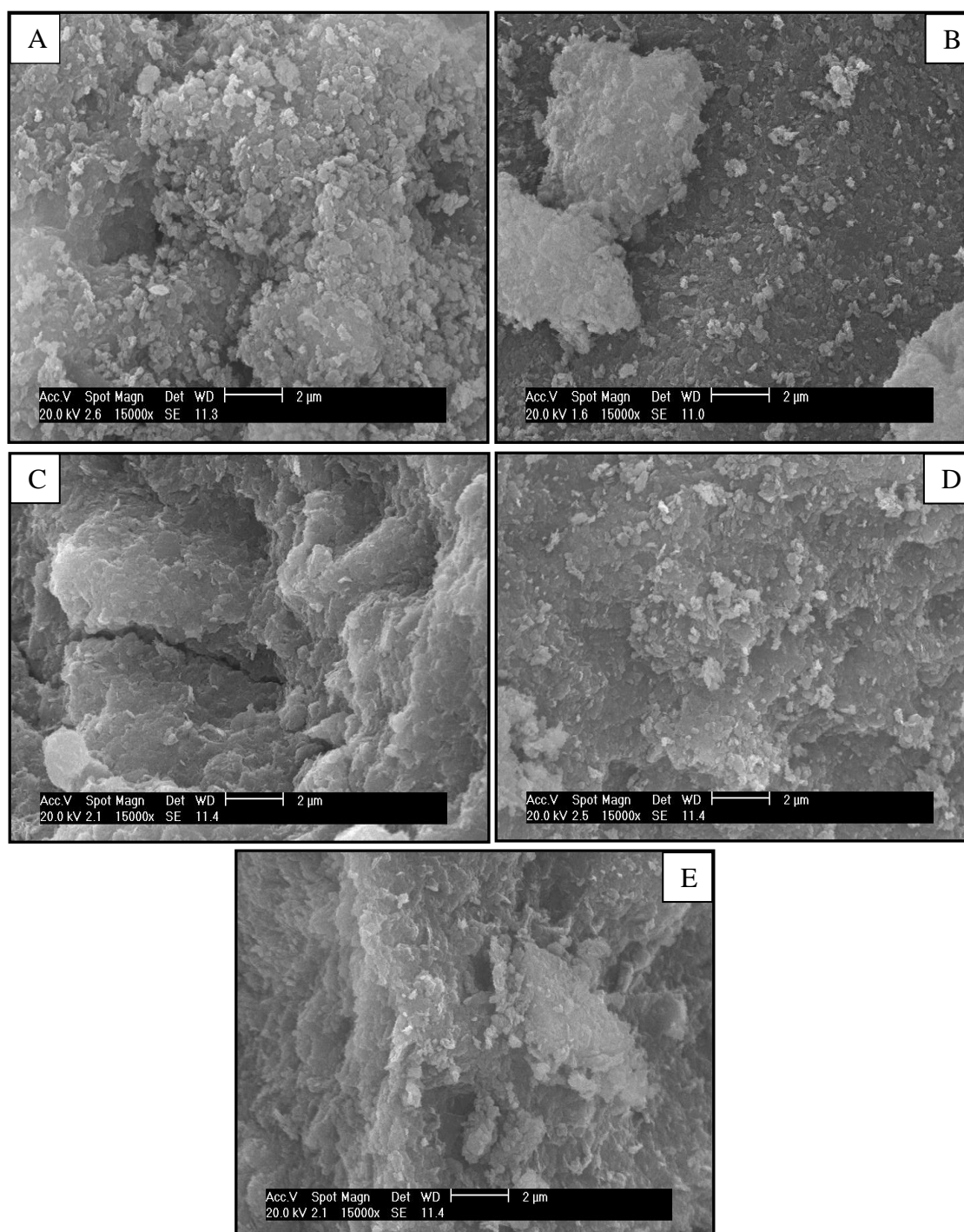


Figura 5.40 – Análise por MEV: A) solo sem compactação; B) Ensaio Edométrico – natural (ED); C) Difusão: sódio solúvel no solo (DSS); D) ensaio edométrico – 5% NaOH (ES); E) Difusão: Lama vermelha no solo (DLV).



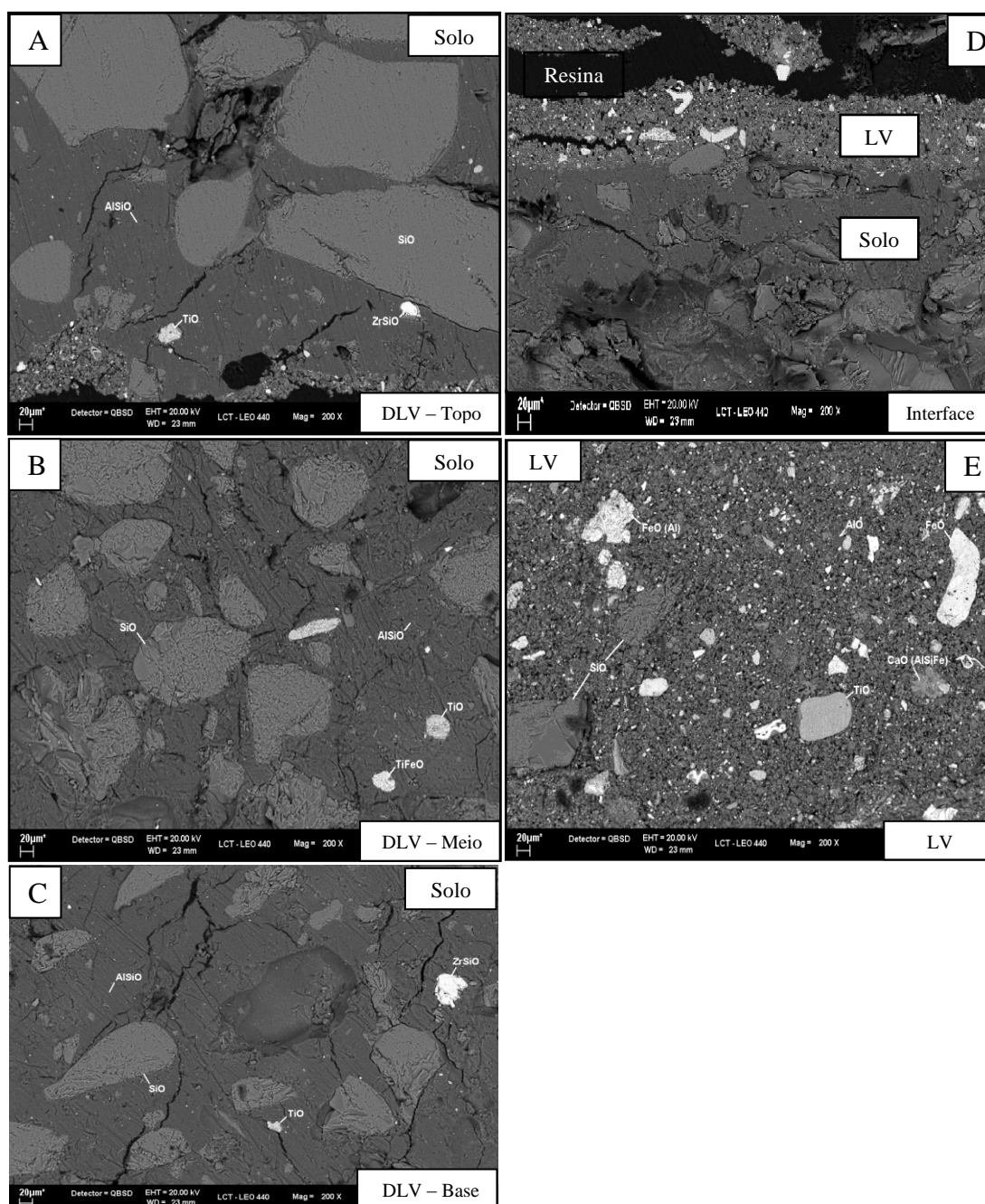


Figura 5.41 – Análise por MEV-SED para o corpo-de-prova DLV-3: Solo compactado: A) topo, B) meio e C) base; D) Interface e E) LV.

### 5.12.2.3 – Ensaio de reometria

A difusão de sódio solúvel pelo solo compactado efetivamente modifica seu comportamento reológico (Figura 5.42). A tensão de escoamento da suspensão de solo, de 68 Pa, decresce para 39 Pa com a contaminação por LV, enquanto a viscosidade diminui em 29% (de 0,22 a 0,16 Pa.s).



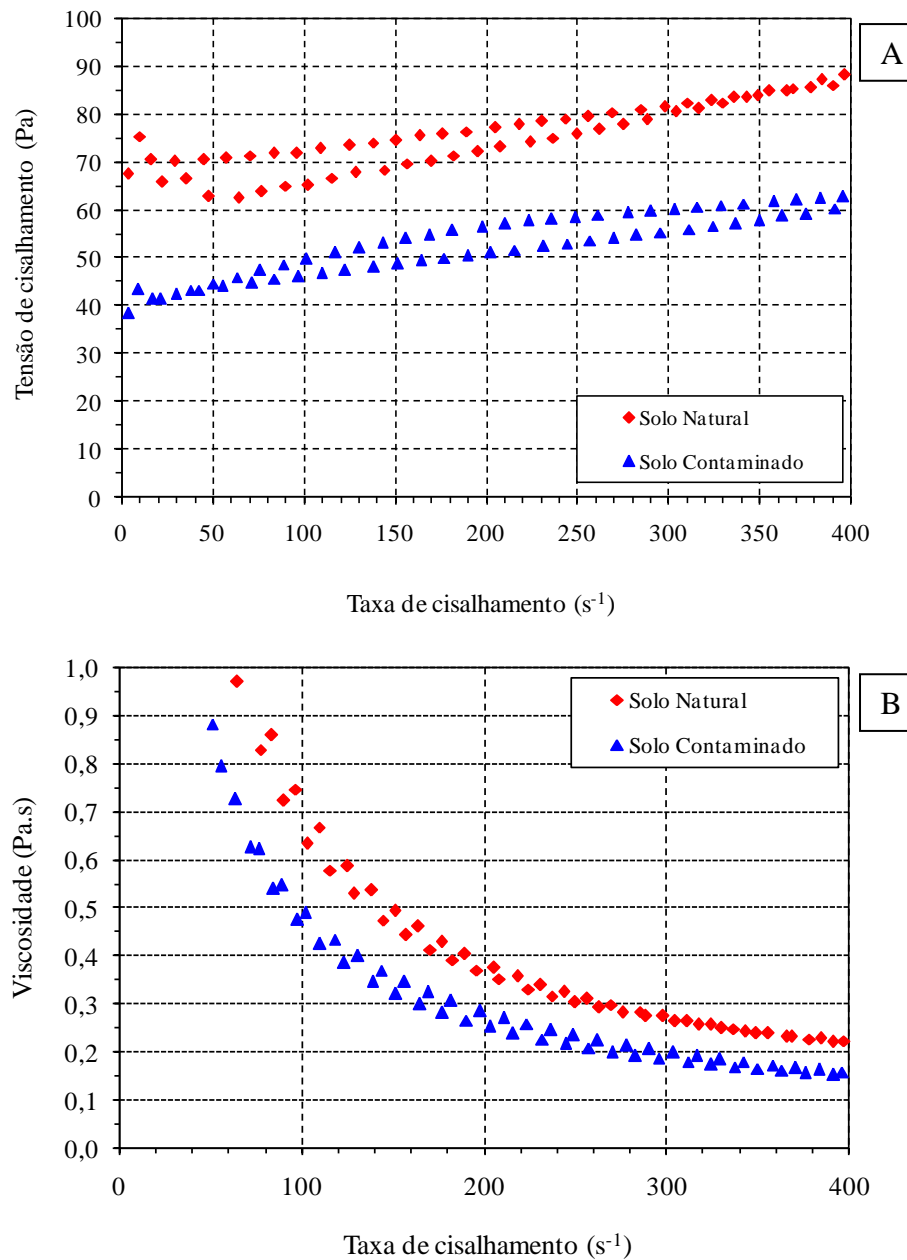


Figura 5.42 - Ensaio de reometria: (A) Tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento; (B) viscosidade aparente em função da taxa de cisalhamento.

Esses resultados vem a explicar a notável modificação na consistência do solo observada nos corpos-de-prova dos ensaios de coluna, difusão e colapso após o contato com as soluções de NaOH ou com a lama vermelha.

## 6 CONCLUSÕES

O solo pesquisado, que constitui os terrenos da área das bacias de disposição, é do tipo Latossolo Amarelo, equivale àqueles predominantes na Amazônia, como mostraram os dados granulométricos, mineralógicos e químicos das amostras analisadas de 3 perfis (RI-1 a RI-3 – Figura 5.1) investigados neste estudo. Os minerais predominantes são o quartzo e a caulinita, com goethita, hematita e anatásio em quantidade acessória. A composição química é dominada por  $\text{SiO}_2$ , seguida por  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; metais alcalinos e alcalinos terrosos estão lixiviados em todo o perfil. A concentração dos elementos-traços encontra-se em nível de Crosta Terrestre, ligeiramente acima para elementos imóveis ou fixados nos óxidos e hidróxidos de ferro como Sc, V, Ni, Ga, As, Se, Zr, Sn, Ta, Hg e Th. A distribuição desses elementos e suas concentrações indicam clara evolução laterítica imatura. Os dados mineralógicos e químicos mostram também que o solo de estudo é um material muito estável, pobre em elementos químicos biodisponíveis. O teor de matéria orgânica, entre 0,40% e 0,65%, é baixo e compatível com a maioria dos solos das regiões tropicais. A capacidade de troca catiônica é muito baixa, da ordem de 32,7 mmol<sub>c</sub>/kg, compatível com sua composição mineralógica. O solo é classificado como CL (argila de baixa compressibilidade) pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos e LA´/LG´ (areia argilosa laterítica / argila arenosa laterítica) pelo sistema MCT de classificação de solos tropicais (Nogami & Villibor, 1995).

A lama vermelha é composta principalmente por hematita, goethita, caulinita, anatásio, além de sodalita. Hematita, caulinita, goethita e anatásio são minerais típicos da bauxita, o minério do qual resultou a lama vermelha, enquanto a sodalita é um produto do processo Bayer. A lama vermelha é rica em  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ , e  $\text{Na}_2\text{O}$ , além de conter concentrações de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . A cor da lama é dada pela  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  na forma de hematita finamente granulada. Por outro lado os teores de  $\text{Na}_2\text{O}$  provieram do processo Bayer. O processo de extração do alumínio faz com que os elementos-traço da bauxita se fracionem em direção a lama vermelha, concentrando a maioria deles, com destaque para V, Cr, Ga, Sc, Sr, Ba, ETR, Th, U, Sn, Y, Zr, Hf, Nb, Ta, W, Sb, Mo Ag, pois os mesmos encontram-se na estrutura cristalina dos minerais, principalmente hematita e anatásio, minerais estes estáveis nas condições de clima tropical, como o reinante na região. O sódio é o principal elemento químico de impacto ambiental quando dissolvido na fase líquida da lama vermelha, perdendo em parte esta característica quando constituindo a sodalita. O percolado formado na lama vermelha, no caso de rompimento da geomembrana que reveste as bacias de disposição, poderá atingir o lençol freático e espalhar-se por grande extensão, facilitado pela ampla rede

de drenagem da região. Quantidades significativas de sódio no solo podem ter efeitos adversos sobre a produtividade das culturas, seja diretamente, dificultando a absorção de água e cátions nutrientes pelas plantas, ou indiretamente, pelo seu efeito dispersante sobre as argilas, causando desestruturação do solo e prejudicando a infiltração de água, oxigênio e crescimento das raízes.

Resultados de dois ensaios de coluna (PM-4 e PM-5) mostraram que a percolação de soluções de NaOH a concentrações de 5% e 1,23% pelo solo compactado diminuiu a sua permeabilidade, de  $7 \times 10^{-10}$  para  $9 \times 10^{-11}$  m/s e  $5 \times 10^{-10}$  para  $2 \times 10^{-10}$  m/s respectivamente. A redução de permeabilidade, que não atingiu uma ordem de grandeza, está relacionada à dispersão das partículas de argila.

Análises granulométricas do solo com diferentes concentrações de NaOH mostraram que concentrações menores de NaOH (0,12% e 0,56%) causaram uma dispersão no solo superior a concentrações entre 1,23% e 5% de NaOH.

O limite de liquidez do solo diminuiu com a adição de NaOH ao solo, de 33% para 29% com a concentração de 0,12%, e 17 a 19% para as demais concentrações. O índice de plasticidade diminuiu de 12% para 9% com a concentração de 0,12%, 4% para as concentrações entre 0,56% e 1,89%, e tornou-se não plástico para a concentração de 5%.

Os resultados dos ensaios edométricos simples realizados com água e com concentrações de 0,12%, 1,23% e 5% de NaOH, com pressões pré-estabelecidas de 40 kPa, 80 kPa, 160 kPa e 320 kPa mostraram que não ocorre colapso do solo compactado no caso de inundação com água. Quando inundado com soluções de NaOH a concentrações de 0,12%, 1,23 e 5%, no entanto, o solo compactado apresentou potencial de colapso de 2 a 6% sob as tensões de 160 a 320 kPa, o que corresponde a um colapso moderado. Para os ensaios duplos realizados sem inundação e com inundação por água e soluções de NaOH com concentrações de 0,12%, 1,23% e 5%, ocorreu ligeira expansão na inundação com água, enquanto no caso de inundação com soluções de NaOH o índice de colapso foi crescente em função do aumento das concentrações, variando de 0,38 a 0,97 para concentração de 0,12%; 1,75 a 4,32 para concentração de 1,23% e 2,75 a 4,19 para concentração de 5%.

A ocorrência do colapso do solo compactado sujeito ao contato com soluções de NaOH, assim como a diminuição da permeabilidade, sugerem a alteração da estrutura do solo, com dispersão das partículas sólidas. A investigação para avaliar a causa da dispersão deste solo na presença de NaOH foi realizada em função do potencial zeta e por ensaios de reometria. No primeiro, os resultados indicaram as partículas sólidas apresentam-se dispersas quando o solo está embebido por NaOH com pH entre 8 e 13; para pH menor do que 8 ou

superior a 13, há uma tendência das partículas sólidas flocularem, coagularem e sedimentarem. O ensaio de reometria mostrou que a tensão de escoamento de uma suspensão de solo em água, de 68 Pa, decresce para 39 Pa na presença de NaOH, enquanto a viscosidade diminui em 29% (de 0,22 a 0,16 Pa.s). Esses resultados tornaram possível explicar a notável modificação na consistência do solo observada nos corpos-de-prova dos ensaios de coluna, difusão e colapso após o contato com as soluções de NaOH ou com a lama vermelha.

Os ensaios de coluna indicaram que o solo se desestrutura, com significativa alteração da consistência, após a percolação de um volume de solução de NaOH da ordem de 1 volume de vazios. A dispersão das partículas sólidas acarreta a já mencionada diminuição da permeabilidade e impossibilita a conclusão do ensaio de coluna, isto é, mesmo para a percolação de 4 a 5 volume de vazios, a solução efluente não apresenta tendência a um aumento de concentração além de cerca de 50% do valor da concentração da solução afluente.

Os ensaios de difusão com soluções de NaOH resultaram em coeficiente de difusão entre  $5$  e  $7 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s e coeficiente de adsorção (distribuição) de 2 a 3 mL/g para o sódio no solo de estudo. Comparando-se esses valores com os compilados por Rowe et al. (1995), observa-se que o coeficiente de difusão da argila laterizada é ligeiramente superior e o coeficiente de adsorção é cerca de 10 vezes maior, mesmo com concentração de partida mais elevada, do que os dos solos de clima temperado (Canadá) com granulometria e índices de consistência semelhantes (Tabela 5.16).

As análises químicas realizadas em amostras totais de solo dos corpos-de-prova submetidos a ensaios de difusão com LV indicaram que estes não foram palco de difusão ou contaminação com os componentes químicos da LV, exceto pelo sódio. Os valores de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, CaO, K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> não variaram entre as amostras de solo compactado sem (DLV-0) e com cobertura de LV (DLV-1 e DLV-2), enquanto os corpos-de-prova cobertos por LV foram contaminados com Na<sub>2</sub>O, cujo teor mudou de 0,02 % para 0,37%-0,41% (aumentando de 1950%). Os elementos-traço também não difundiram. Análises químicas pontuais obtidas por MEV/SED, com o objetivo de detectar variações nas concentrações em escala micro, matriz dos solos, dominada pelos argilominerais e os oxi-hidróxidos de ferro constataram apenas a difusão do sódio (0,5 a 0,6 %) na LV para o solo subjacente, equivalentes àquele obtido por análise química total, 0,64 %.

Digna de menção é a modificação da estrutura do solo após o ensaio de difusão (tanto com soluções de NaOH como com cobertura de LV): o solo fica com consistência de goma de mascar, compressível e disperso.

A quantidade de sódio que se difunde pelo solo não é elevada, em parte porque apenas 5% do sódio presente na lama vermelha são solúveis, em parte porque o solo apresenta certa capacidade de adsorção. Mesmo sob gradiente hidráulico, o sódio não é facilmente transportado pelo solo, devido à baixa permeabilidade do solo compactado, a qual ainda diminui sob efeito da percolação de solução de sódio e à capacidade de adsorção. Do ponto de vista de transporte de poluentes, o CCL construído com o solo da região das bacias de disposição de LV poderia ter bom desempenho ambiental.

Porém, o sódio causa a defloculação do solo e aumenta a compressibilidade da camada de solo compactada, levando ao colapso. A dispersão do solo foi comprovada pela consistência do solo após os ensaios de coluna e difusão, pelos ensaios de limites de consistência com soluções de NaOH, pela constatação de colapso do solo compactado, pelos resultados dos ensaios de reometria e potencial zeta.

A dispersão das partículas de solo também pode ser causada pelo elevado pH associado à lama vermelha. Realmente, os ensaios de difusão e coluna mostraram que, embora o solo retenha parcialmente o sódio que migra no solo por difusão e/ou advecção, não impede o transporte das hidroxilas ( $\text{OH}^-$ ), o que se constatou pelo elevado valor de pH dos efluentes dos ensaios de coluna e da água intersticial do solo após o ensaio de difusão. O contato com a lama vermelha pode acarretar, portanto, a contaminação das águas subterrâneas mesmo com a proteção de uma camada de solo compactado de baixa permeabilidade sobre o terreno natural. O transporte dos ânions, contudo, não foi estudado neste trabalho.

A perda de consistência, e, portanto a alteração na resistência e na deformabilidade devido ao contato com o sódio solúvel, é o grande problema do CCL nas bacias de disposição de LV. Em caso de ruptura da geomembrana, o contato com a lama vermelha pode levar o CCL à ruptura também. Essa constatação é particularmente alarmante quando se pensa na utilização desse solo na construção dos diques que circundam e conformam as bacias de disposição.

Os resultados desta pesquisa apontam para a necessidade da instalação correta das geomembranas, assim como da investigação de possíveis aditivos que anulem ou minimizem o efeito do sódio e do pH elevado na estrutura do solo compactado.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, ASTM D 5084. 1990. *Annual book of ASTM standards*, 4.08, p.: 1161-1168.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 4319**. Adsorption batch test, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO (ABAL). 2010. *Alumínio para futuras gerações*. São Paulo, Folheto. Disponível em: <[http://www.abal.org.br/servicos/biblioteca/futuras\\_geracoes\\_2010.asp](http://www.abal.org.br/servicos/biblioteca/futuras_geracoes_2010.asp)>. Acesso em: mar. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO (ABAL). 2005. *Relatório de sustentabilidade da indústria do alumínio*. São Paulo, Relatório. Disponível em: <<http://www.abal.org.br/servicos/publicacoes.asp?canal=6>>. Acesso em: jun. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO (ABAL). 2002. *Alumínio para futuras gerações*. São Paulo, Folheto. Disponível em: <[http://www.abal.org.br/servicos/biblioteca/futuras\\_geracoes\\_2002.asp](http://www.abal.org.br/servicos/biblioteca/futuras_geracoes_2002.asp)>. Acesso em: jun. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 5734:1984. *Peneiras para ensaio - especificação*.

\_\_\_\_\_. NBR 6457: 1984. *Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*.

\_\_\_\_\_. NBR 6459:1984. *Determinação do limite de liquidez*.

\_\_\_\_\_. NBR 6508: 1984. *Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - determinação da massa específica*.

\_\_\_\_\_. NBR 7180:1984. *Determinação do limite de plasticidade*.

\_\_\_\_\_. NBR 7181: 1984. *Solo - análise granulométrica*.

\_\_\_\_\_. NBR 7182: 1984. *Solo – ensaio de compactação (método de ensaio)*.

\_\_\_\_\_. NBR 1200: 1990. *Ensaio de adensamento*.

Ávila, J.P.; soares, R.; costa, L.H.D. 1995. Deposição de rejeitos finos pelo método de secagem. In: III Simpósio de Barragens de Rejeito e de Disposição de Resíduos - REGEO. Ouro Preto. *Anais*, 1:97-108.

Bally, J.L.; Atonesceu, I.P.; Andrei, S.V.; Dron, A.; Popescu, D. 1973. Hidrotechnical structures on loessial collapsible soil. *8<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscow, *Proceedings*, 2(2):17-22.

- Barone, F.S; yanful, E.K.; quigley, R.M; Rowe, R.K. 1989. Multiple contaminant migration on diffusion and adsorption of some domestic wastes contaminants in a natural clayey soil. *Canadian Geotechnical Journal*, **26**:189-198.
- Benvenuti, S.M.P. 1995. *Avaliação da Poluição do Flúor em Solos e Plantas das Redondezas da Fábrica de Alumínio Albrás, Barcarena-Pa*. Dissertação de Mestrado. Centro de Geociências. Universidade Federal do Pará, 156p.
- Benson, C.H. 2002. Containment systems: lessons learned from north american failures. *In: De Mello & Almeida (eds.). 4th. ICEG*, p.: 1095-1112.
- Betioli, A.M; John, V.M.; Gleize, P.J.P.; Pileggi, R. G. 2009. Caracterização reológica de pasta cimentícia: associação de técnicas. *Ambiente Construído*, **9**(4):37-48.
- Boscov, M.E.G. 1997. *Contribuição ao projeto de contenção de resíduos perigosos utilizando solos lateríticos*. Dissertação de Doutorado, Escola Politécnica São Paulo, 350p.
- Boscov, M.E.G.; Abreu, R.C. 2000. "Aterros sanitários - previsão de desempenho x comportamento real" - *ABMS/NRSP*, São Paulo, p.: 7-44.
- Boscov, M.E.G. 2006. Desafios Geotécnicos no projeto e construção de aterros de resíduos. *In: XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - COBRAMSEG*. Curitiba. *Volume de Palestras*, p.: 145-174.
- Boynton, S.S. & Daniel, D.E. 1984. Hydraulic conductivity tests on compacted clay. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **111**(4):465-478.
- Brandl, H. Mineral liners for hazardous waste containment. 1992. *Géotechnique*, **42**:1: 57-65.
- Broderick, G.P. & Daniel, D.E. 1990. Stabilizing compacted clay against chemical attack. *Journal of Geotechnical Engineering*, **116**(10):1549-1567.
- Carrara, S.M.C.M. 2003. *Biorremediação de áreas contaminadas por plastificantes; caso do ftalato de di-2-etilhexila*. Dissertação de Doutorado, Escola Politécnica São Paulo, 386p.
- Carvalho, J.C. 1994. Considerações sobre o estudo e análise do colapso de solos porosos naturais. *In: Simpósio sobre Solos não Saturados*. Recife. *Anais*, **2**:99-104.
- Carvalho, T.M.O. 2006. *Efeitos de um licor cáustico na resistência ao cisalhamento de um solo residual de sienito e um coluvionar indeformados*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 167p.
- Castro, A.L.; Liborio, J. B. L.; Pandolfelli, V.C. 2009. Avaliação do comportamento de concretos de alto desempenho no estado fresco com o auxílio de um reômetro, **2**(4):282 - 305.
- Cazaux, D. & Didier, G. 2000. Field evaluation of hydraulic performances of geosynthetic clay liners by small and large-scale tests. *Geotextiles & Geomenbranes*, **18**(2-4):163-178.

- Chaves, A. G. F. 1962. A lama vermelha e sua eliminação da fábrica de alumina. 2ª semana de estudos. Alumínio e Zinco. *Sociedade de Intercâmbio Cultural e Estudos Geológicos dos Alunos da Escola de Minas de Ouro Preto*. Ouro Preto, MG. Publicação nº 2.
- Chen, J.; Anadarajah, A.; Inyang, H. 2000. Pore fluid properties and compressibility of kaolinite. *Journal of geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **126**(9):798-807.
- Claret, F.; Bauer, A.; Schäfer, T.; Griffault, L.; Lanson, B. 2002. Experimental investigation on the interaction of clays with high-pH solutions: A case study from the Callovo-Oxfordian formation, Meuse-Haute Marne underground laboratory (France). *Clays and Clay Minerals*, **50**(5):633-646.
- Collares, A.C.Z.B. & Vilar, O.M. 1998. A influencia do pH do fluido de saturação no colapso dos solos. In: XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - COBRAMSEG. Brasília. *Anais*, p.: 123-129.
- Collares, A.C.Z.B. 2002. *Influência de fatores estruturais e químicos no colapso e dispersão de dois solos*. Dissertação de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 246p.
- Collins, K. & McGown, A. 1974. The form and function of microfabric features in a variety of natural soils. London. *Geotechnique*, **24**(2):223-254.
- Constantino, V.R.L.; Araki, K.; Silva, D.D.O.; Oliveira, W. 2002. Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático. *Química Nova*, **25**(3):490-498.
- Costa Junior, F.A. 2001. *Estudo da influência da infiltração de soda cáustica nas características de resistência de um solo laterítico*. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 256p.
- Costa, M.L. 1991. Aspectos Geológicos dos Lateritos da Amazônia. *Revista Brasileira de Geociências*. **21**(2): 146-160
- Cruz, P.T.; Ferreira, R.C.; Peres, J.E.E. 1994. Análise de alguns fatores que afetam a colapsividade dos solos porosos. X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações - COBRAMSEF. Foz do Iguaçu. *Anais*, **4**:1127-1134.
- D'Appolonia, D. 1980. Soil-Bentonite slurry trench cut-offs. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, **106**(40):399-417.
- Daniel, D.E. & Benson, C.H. 1830. "Water content-density criteria for compacted soil liners". *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **116**(12):1811.
- Daniel, D.E. 1993. Clay Liners. *Geotechnical Practice for Waste Disposal*. London, Chapman & Hall, p.: 3-14.
- Decourt, L. & Quaresma Filho, A.R. 1994. Practical applications of the standard penetration test complemented by torque measurements, SPT-T; Present Stage and Future Trends".



13<sup>th</sup> *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. New Delhi, India. *Proceedings*. 1:143-146.

Derbyshire, E. & Mellors, T.W. 1988. Geological and geotechnical characteristics of some loess and loessic soils from China and Britain: a comparison engineering geology, v. 96, n. SM3, p.: 925-947.

Dudley, J.H. 1970. Review of collapsing soils. Journal of the soil mechanics and foundations division, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, v. 96, n. SM3, p.: 925-947.

Elsbury, B.R.; Daniel, D.E.; Sraders, G.A.; Anderson, D.C. 1990. "Lessons learned from compacted clay liner". *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **116**(11):1641-1660.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. 1999. *Sistema brasileiro de classificação de solos*, 412p.

Espósito, T.J. 2000. *Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico*. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, 120p.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. 1992. "Requirements for hazardous waste landfill design, construction, and closure". Seminar Publication, Cincinnati. United States.

Fadigas, F.S; Amaral Sobrinho, N.M.B.; Mazur, N.; Anjos, L.H.C.; Freixo, A.A. 2002. *Concentração natural de metais pesados em algumas classes de solos brasileiros*. *Braganta*, Campinas, **61**(2):151-159.

Faure, G. 1998. *Principles and applications of geochemistry*. Prentice Hall: Upper Saddle River, 600p.

Feda, J. 1966. Structural stability of subsident loess soil from prahadejvice. *Engineering Geology*, **3**:201-219.

Fernández, C.; Garcia, P.; Campo, J.J.D.; Ayala, J.; Blanco, F. 1996. Use of red mud in construction materials. *Light Metals*, p.: 99-106.

Ferreira, S.R.M. 1990. Banco de dados de solos especiais - Colapsíveis em Pernambuco. IX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações - COBRAMSEF. Salvador-BA, p.: 81-87.

Ferreira, S.R.M. & Lacerda, W.A. 1993. Variações de volume em solo colapsível medidas através de ensaios de laboratório e de campo. *Revista Solos e Rochas*, **16**(4):245-253.

Ferreira, S.R.M. 1995. *Colapso e expansão de solos naturais não saturados devido à inundação*. COOPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 379p.

Finno, R.J.; Schubert, W.R. 1986. Clay liner compatibility in waste disposal practice. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **112**(6):1070-1085.

- Folkes, D.J. 1982. Fifth Canadian Geotechnical Colloquium: Control of contaminant migration by the use of liners. *Canadian Geotechnical Journal*, **19**(3):120-121p.
- Freeze, R.A.; & Cherry, J.A. 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc., Englewoods Cliffs, N.J., 640p.
- Freitas, R.A.S. 2003. *Comportamento de geotêxteis como filtro em resíduos - fosfogesso e lama vermelha*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE/UFRJ. 122p.
- Futai, M.M. 2000. Comportamento colapsível de solos tropicais brasileiros, *In: Congresso Nacional de Geotecnia, Porto, Anais*, **1**:193-203.
- Gabas, S.G. 2005. *Avaliação da adsorção de cádmio e chumbo em solo laterítico compactado por meio de extração seqüencial*. Dissertação de Doutorado, Escola Politécnica São Paulo, 239p.
- Garcia, J.R.; Rodrigues, R.A.; Lollo, J.A. 2004. A influência de diferentes fluidos de inundação no colapso estrutural de um solo arenoso laterítico. *Engenharia Civil UM*, **21**:49-58p.
- Gillman, G.P. & Sumpter, E.A. 1986. Modification to the compulsive exchange method for measuring exchange characteristics of soils. *Austr. Joun. Soil. Res.*, **24**:61-66.
- Góis, C.C.; Lima, R.M.F.; Melo, A.C. 2003. Sedimentação de resíduo Bayer utilizando floculantes hidroxamatos e poliacrilamida. *Revista Escola Minas (REM)*, **56**(2):119-122.
- Gibbs, H.J. & Bara, J.P. 1962. Predicting surface subsidence from basic soil test. *Special Technical Publication*, n. 322, ASTM, Philadelphia.
- Gibbs, H.J. & Bara, J.P. 1967. Stability problems of collapsing soils. *Journal of the Soil Mech. And Found. Div.*, **93**:4:557-594.
- Guimarães Neto, J.S.F. 1997. *Análise de alguns fatores que influenciam a colapsividade de um solo compactado devido à inundação*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 107p.
- GUTIERREZ, N.H.M. 2005. *Influência de aspectos estruturais no colapso de solos do Norte do Paraná*. Dissertação de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 304p.
- Hildebrando, E.A. 1998. *Aplicação do rejeito do processo Bayer (lama vermelha) como matéria prima na indústria de cerâmica*. Dissertação de Mestrado. Centro Tecnológico. Universidade Federal do Pará, 83p.
- Hemsi, P. S. 2001. Um estudo da adsorção de poluentes em um latossolo paulista considerando a carga variável e o ponto de carga nula. Dissertação de Mestrado. Departamento de Estrutura e Fundações. Universidade de São Paulo, 120p.

- Horbe, A.M.C.; Costa, M.L. 2005. Lateritic crusts and related soils in eastern Brazilian Amazonia. *Geoderma*, **126**:225-239.
- Ignatius, S.G. & Pinto, C.S. 1991. Aspectos do comportamento de um solo em presença de efluente químico a base de soda cáustica. *In: II Simpósio sobre Barragens de Disposição de Resíduos*. Rio de Janeiro, Brasil, *Anais*, p.: 233-241.
- Jenning, J.E.B. & Knight, K. 1957. The additional settlement of foundations due to a collapse of structure of sandy subsoils on wetting. *4<sup>th</sup> International Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering*, London, *Proceeding*, **1**:316-319.
- Jenning, J.E.B. & Knight, K. 1975. A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to a collapse of grain structure. *4<sup>th</sup> Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Durban, *Proceedings*, p.: 99-105.
- Jonh, V.M. 2000. *Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento*. Dissertação de Livre Docência. Universidade de São Paulo. 113p.
- Jozefaciuk, G.; Muranyi, A.; Alekseeva, T. 2002. Effect of extreme acid and alkali treatment on soil variable charge. *Geoderma*, **109**:225-243.
- Kalkan, E & Akbulut, S. 2004. The positive effects of silica fume on the permeability, swelling pressure and compressive strength of natural clay liners. *Engineering Geology*, **73**:145-156.
- Kassif, G. & Henkin, E.N. 1967. Engineering and physico-chemical properties affecting pipping failure of loess dams in the negev. *3<sup>rd</sup> Asian regional Conference on soil Mechanics and Foudation Engineering*. Haifa, *Proceedings*, **1**:13-16.
- Kumapley, N. K. & Ishola, A. 1985. The effect of chemical contamination on soil strength. *XI Internetal Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. San Francisco, *Proccedings*, **3**:1199-1201.
- La Grega, M.D.; Bucking, P.L.; Evans, C.J. 1994 “*Hazardous waste management*”. McGraw-Hill International Editions, 1146p.
- Lambe, T.W. 1958. The engineering behavior of compacted clay. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, v.84, SM2, p.: 16551- 16553.
- Lambe, T.W.; Whitman, R.E. 1969. “*Soil mechanics*”. John Wiley & Sons, New York, 553p.
- Leite, A.L. 2001. *Migração de íons inorgânicos em alguns solos tropicais, com ênfase nos processos de sorção e difusão molecular*. Dissertação de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 253p.
- Lemarchand, D. 2004. Waste treatment in Europe and co-processing. *VI Fimai. Lafarge Cement Division*. São Paulo, 120p.

- Lentz, W.R.; Horst, W.D.; Uppot, J.O. 1985. *The permeability of clay to acidic and caustic permeants*. STP 874. ASTM, p.: 127-139.
- Li, L.Y. & Li, F. 2001. Heavy metal sorption and hydraulic conductivity studies using three types of bentonite admixes. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **127**(5):420-429.
- Lima, F.S.S. 2006. *A utilização da lama vermelha e do resíduo do beneficiamento do caulim na produção de pigmentos pozolânicos*. Dissertação de Mestrado. Centro Tecnológico. Universidade Federal do Pará, 120p.
- Lutenegger, A.J. & Saber, R.T. 1988. Determination of collapse potencial of soils. *Geotechnical Testing Journal. ASTM*, **11**(3):173-178.
- Madson, T. & Mitchell, J.K. 1989. *Chemical effects on clay hydraulic conductivity and their determination*. Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanick Eidgenössichr Technische Hochschule Zürich, Nr. 135. Zürich, 120p.
- McBride, M.B. 1994. *Environmental chemistry of soils*. New York. Oxford University Press. 405p.
- Manassero, M.; Van Impe, W.F.; Bouazza, A. 1997. *Waste disposal and containment*. 2nd. ICEG, Osaka, Kamon Ed. Balkema, Rotterdam, 120p.
- Massad, F. 2003. "*Obras de Terra - Curso Básico*". Oficina de Textos, São Paulo, 120p.
- Mello, L.G.; Boscov, M.E.G. 1998. "Discussão da prática brasileira de disposição de resíduos à luz das tendências internacionais". In: XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - COBRASMEG. ABMS, Brasília, *Anais*, **4**:195.
- Melo Junior, H.R. 2002. *Mapeamento da Vulnerabilidade e análise de risco de contaminação como instrumentos de proteção das águas subterrâneas em área industriais: caso de Albras, Barcarena-Pa*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará, 129p.
- Mitchell, J.K.; Hooper, D.R.; Campanella, R.G. 1965. Permeability of compacted clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, **92**(4):41-66.
- Mitchell, J.K. 1991. Conduction phenomena: from theory to geotechnical practice. *Géotechnique*, **41**:3:299-340.
- Mitchell, J.K. 1993. "*Fundamentals of soil behavior*", 2 edn, John Wiley & Sons, New York, 442p.
- Moncada, M.P.H. 2004. *Estudo em laboratório de características de colapso e transporte de solutos associados à infiltração de licor cáustico em um solo laterítico*. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 219p.
- Monteiro, P.C.L. 2005. *Estudo da influência da interação solo-líquido nas características de compressibilidade e colapso de um arenito pleistocênico*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 97p.

- Motta, E.Q. 2006. *Análise do colapso de um solo compactado devido à inundação e à interação solo-líquido contaminante*. Dissertação de Mestrado. Centro tecnológico e Geociências. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco. 114p.
- Nunn, R.F. 1998. Advances in red mud dewatering and disposal technologies. *Light Metals*, p.: 107-113.
- O'Connor, D.J. 1988. *Alumina extraction from non bauxite materials*. Aluminum-verlag GmbH. Disseldorf, 120p.
- Oeberg, N.C.R. & Steinlechner, E.H. 1996. Red mud and sands handling new thoughts on an old problem. *Light Metals*, p.: 67-73.
- Ola, S.A. 1983. Permeability of some compacted nigerian soils. In: Balkema A.A (ed.) *Tropical soils of Nigeria in Engineering Practice*, Rotterdam, p.: 155-171.
- Pacheco Junior, A.C. 2003. *Estudo experimental do comportamento de fenóis em aquífero livre na área da Albras - Barcarena/Pa*. Dissertação de Mestrado. Centro de Geociências. Universidade Federal do Pará, 168p.
- Paramguru, R.K.; Rath, P.C.; Misra. V.N. 2005. Trends in red mud utilization - a review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. **26**(1):1-29.
- Pasqualini, E.; Fratolocchi, E.; Stella, M. 2002. Stability of liners: some particular issues. In: De Mello & Almeida (eds.). *4th. ICEG*, p.: 895-912.
- Pavilonsky, V.N. 1985. Varying permeability of clayey soils linings. *11<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, *Proceedings*, **3**:1213-1216.
- Peirce, J.J; Salfors, G.; Peterson, E. 1986. Clay liner construction and quality control. *Journ. Environm. Eng. ASCE*, **112**(1):13-23.
- Peirce, J.J.; Witter, K.A. 1986. Termination criteria for clay permeability testing. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **112**(9):841-854.
- Pinto, C.S. 2000. *Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas*. Ed. Oficina de Textos. 247p.
- Potter, H.A.B.; Yong, R.N. 1993. Waste disposal by landfill in Britain: problems, solutions and the way forward. In: Symposium on Geotechnics Related to The European Environmental - Green 93, *Proceedings*, p.: 41-48.
- Qian, X.; Koerner, R.M.; Gray, D.H. 2002. *“Geotechnical aspects of landfill design and construction”*. Prentice Hall, Upper Saddle River, 120p.
- RADAM. 1974. Departamento Nacional de Produção Mineral. Folha SA. 22 Belém - Pa; geologia, geomorfologia, solos, vegetais e uso potencial, Rio de Janeiro.

- Rao, M.S. & Subba Rao, K.S. 1994. Ground heave from caustic soda solution spillage - A case study. *Soils and Foundations*, **34**(2):13-18.
- Reginatto, A.R. & Ferrero, J.C. 1973. Collapse potential of soils and soil-water chemistry. 8<sup>th</sup> *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscow, *Proceedings*, **2**:177-183.
- RELATÓRIO PA-105-001-RT. 1994. *Relatório de investigações de campo - Área 54-A. Alumina do Norte do Brasil - Alunorte*. 30p.
- Rijswick, G. VAN, ET AL. 2000. *Advanced bauxite residue transportation technology*. SYMFLOC 200, Damanjodi, p.: 1-30.
- Resnik, Y.M. 1989. Discursions of determination of collapse potencial of soils. *Geotechnical Testing Journal. ASTM*, **12**(3):248-249.
- Rodrigues, S.F. 1999. *Avaliação dos riscos de contaminação do aquífero livre na área de lançamento de rejeitos sólidos na fábrica da ALBRAS, Barcarena-Pa*. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro de Geociências. Universidade Federal do Pará, 52p.
- Rodrigues, R.A. 2003. *Influência do esgoto doméstico como fluido de saturação no colapso de um solo arenoso*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira Universidade Estadual Paulista, 130p.
- Rowe, R.K. 1987. Pollutant transport trough barriers. *Geotechnical practice for Waste Disposal '87 ASCE*. Specialty Conf. Michigan, EUA.
- Rowe, R.K.; Caers, C.J.; Barone, F. 1988. Laboratory determination of diffusion and distribution coefficients of contaminants using undisturbed clayey soil. *Canadian Geotechnical Journal*, **25**:108-118.
- Rowe, R.K; Booker, J.R; Fraser, M.J. 1994. POLLUTE v.6 and POLLUTE-GUI: User-s Guide, GAEA Environmental Engineering LTd., London, Ontario.
- Rowe, R.K; Quigley, M.; Booker, J.R. 1995. *Clayey Barrier Systems for Waste Disposal Facilities*. London, E & FN Spon.
- Salopek, B. & Strazisar, J. 1993. The influence of Red Mud impoundments on the environment. *Light Metals*, p.: 41-44.
- Santos, D.C. Dobscha. 1998. *Determinação das propriedades de Compressibilidade e Permeabilidade do Rejeito de Bauxita da Barragem de Marzagão através de Ensaios de Laboratório e Campo*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, 132 p.
- Savage, D.; Noy, D.; Mihara, M. 2002. Modeling the interaction of bentonita with hyper alkaline fluids. *Applied Geochemistry*, **17**:207-223.

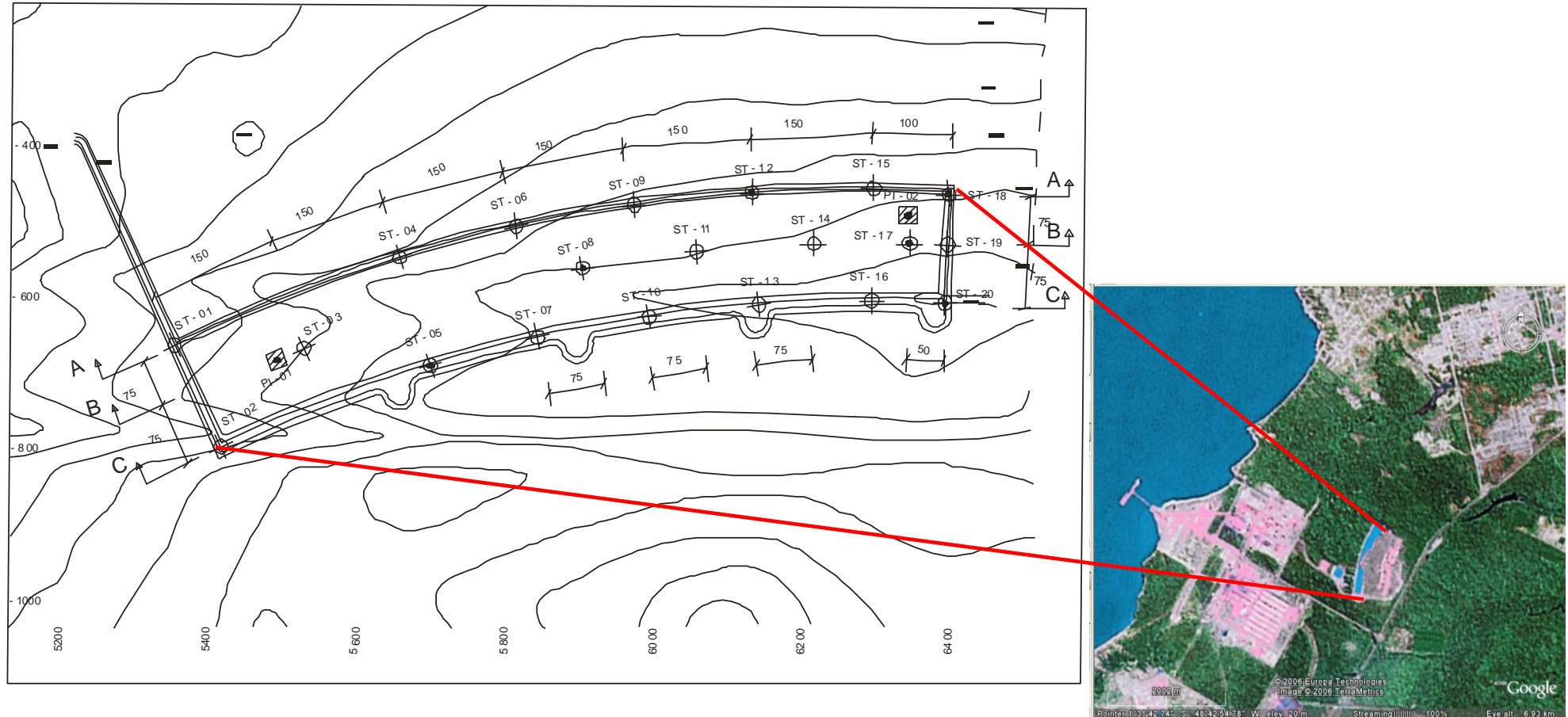
- Shackelford, C. D. 1991. Laboratory diffusion testing for waste disposal - A review. *Journal of Contaminant Hydrology*, **7**:177-217.
- Shackelford, C.D. 1993. Contaminant transport. In: Daniel D. E. (ed.) *Geotechnical Practice for Waste Disposal*, London, Chapman and Hall, p.: 33-65.
- \_\_\_\_\_. 1994. Critical concepts for column testing. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, **120**:1804-1828.
- Shackelford, C.D & Rowe, R.K. 1998. Contaminant transport modeling. *3<sup>rd</sup> International Congress of Environmental Geotechnics*, Lisboa, Portugal, *Proceedings*, p.: 939-956.
- Silva Filho, E.B.; Alves, M.C.M.; Da Motta, M. 2007. Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. *Revista Matéria*, **12**(2):322 - 338.
- Silva Filho, E.B.; Alves, M.C.M.; Da Motta, M.; Oliveira, E.H.DAC.; Brander Junior, W. 2008. Estudo sobre a utilização da lama vermelha para a remoção de corantes em efluentes têxteis. *Quim. Nova*, **31**(5):985-989.
- Simons, H & Reuter, 1985. The physical and chemical behavior of clay-based barriers under percolation with test liquids. *Engineering Geology*, **21**:301-310.
- Simpson, B.E. 1995. Five factors influencing the clay/geomembrane interface. *Proceedings Specialty Conference*, Special Publication n. 46, Louisiana, EUA, p.: 995-1003.
- Singh, M.; Upadhyay, S.N. & Prasad, P.M. 1996. Preparation of special cements from red mud. *Pergamon. Waste Management*, **16**(8):665-67.
- Singh, M.; Upadhyay, S.N. & Prasad, P.M. 1997. Preparation of iron rich cements using red mud. *Pergamon. Cement and Concrete Research*, **27**(7):1037-1046.
- SOLOTÉCNICA. 2002. *Relatórios de sondagens a trado realizados na bacia de expansão da área 54 - Rodovia PA-481, km 12, Vila Murucupi - Barcarena-PA*. Solotécnica Engenharia Ltda. 10p.
- Sousa, G.M.P. de. 2000. *Avaliação do sistema de tratamento do chorume utilizado no aterro sanitário do Aurá: proposta de aproveitamento da lama vermelha como adsorvente de matéria orgânica presente no chorume*. Dissertação de Mestrado. Centro Tecnológico. Universidade Federal do Pará, 105p.
- Souza Neto, J.B. 2004. Comportamento de um solo colapsível avaliado a partir de ensaios de laboratório e campo, e previsão de recalques devidos à inundação (colapso). COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 432p.
- Sposito, G. 1989. *The chemistry of soils*. New York, Claredon Press, 262p.
- Sridharan, A.; Rao, S.M.; Gajarajan, V.S. 1990. *Effect of sulfate contamination on volume change behavior of bentonite*. *Physico-Chemical Aspects of Soil Related Materials*. ASTM STP 1095, p.: 60-68.

- Sturmer, M.M. 2005. *Contribuição ao estudo de um solo saprolítico como revestimento impermeabilizante de fundo de aterros de resíduos*. Dissertação de Doutorado. Universidade de São Paulo, 207p.
- Taubald, H.; Bauer, A.; Schäfer, T.; Geckeis, H.; SatiR, M.; Kim, J.I. 2000. Experimental investigation of the effect of high-pH solutions on the Opalinus Shale and Hammerschmiede Smectite. *Clay Minerals*, **35**:515-524.
- Teixeira, Z. 2009. Potencial zeta. Disponível em: <[HTTP://www.nanobiotec.iqm.unicamp.br/download/Aula12-09-%20zeta.ppt](http://www.nanobiotec.iqm.unicamp.br/download/Aula12-09-%20zeta.ppt)>. Acesso em: mar. 2010.
- Tomé Junior, J.B. 1997. *Manual para interpretação de análise de solo*. Ed. Gaúba: Agropecuária, 247p.
- Van Ree, C.C.D.F.; Weststrate, F.A.; Meskers, C.G.; Bremmer, C.N. 1992. Design aspects and permeability testing of natural clay and sand-bentonite liners. *Géotechnique*. v. XLII, n.1, p.: 120-130.
- Vargas, M. 1973. Structurally unstable soils in southern Brazil. *8<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, Proceedings*, **2**:239-246.
- Vilar, O.M.; Rodrigues, J.E.; & Nogueira, J.B. 1981. Solos colapsíveis: um problema para a engenharia dos solos tropicais. *In: Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia*. Rio de Janeiro, *Anais*, **1**:209-224.
- Vilar, O.M. & Gaioto, N. 1994. Comportamento colapsível de um solo laterítico compactado. *In: Simpósio sobre Solos Não Saturados, Recife, Anais*, **2**:185-190.
- Villar, L.F. 2002. *Estudo de Adensamento e Ressecamento de Resíduos de Mineração e Processamento de Bauxita*. Dissertação de Doutorado Rio de Janeiro. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 120p.
- Wolle, C.M.; Benvenuto, C.; Victorio, F.C.; Polla, C.M.; Puleghini, P. 1978. Estudo preliminar da colapsividade dos solos no Projeto Jaíba (MG). *In: II Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, São Paulo, Anais*, **1**:179-193.
- Yong, R.N.; Tan, B.K.; Mohamed, A.M. O. 1994. Evaluation of attenuation capability of a micaceous soil as determined from column leaching tests. *In: Daniel e Trautwein (ed.) Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil - ASTM - STP*, **1142**:586-607.
- Yong, N.R. 2001. *Geoenviromental engineering: contaminated soils, pollutant fate and mitigation*. CRC Press LLC., 120p.

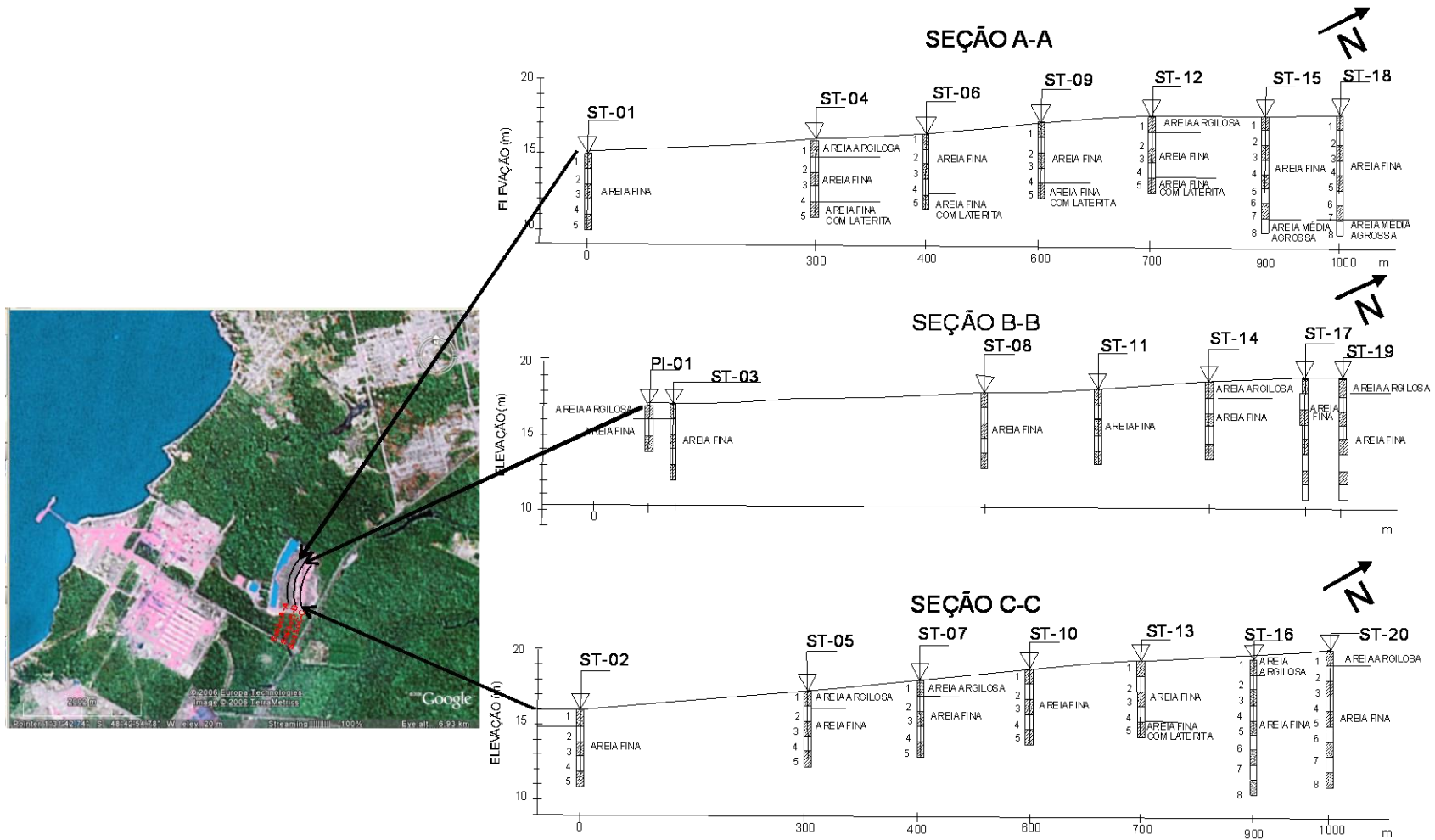


**ANEXOS**

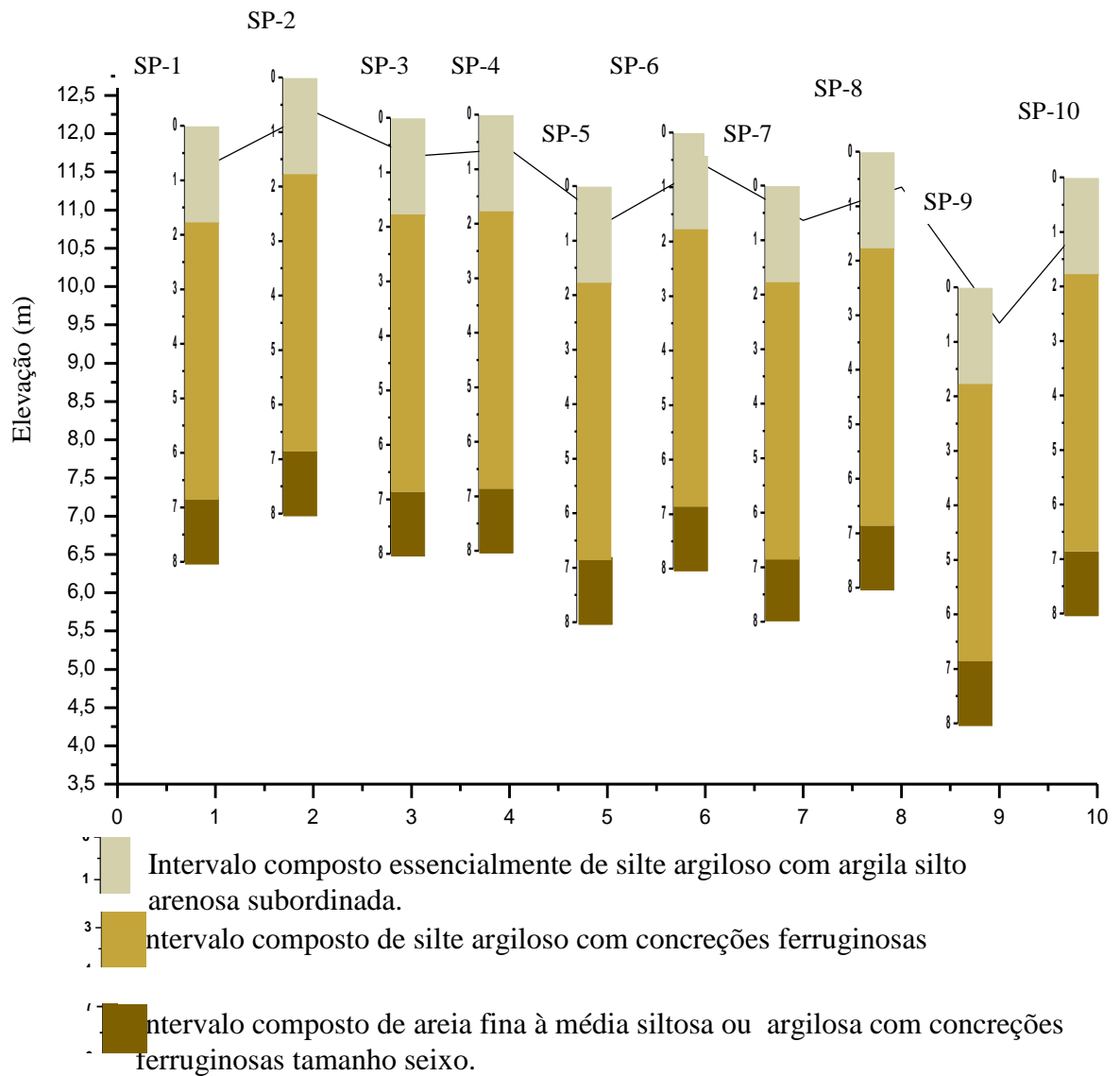
**ANEXO A** – localização das investigações geotécnicas realizada pela empresa LPS com sondagens a trado e poços, quando da implantação da área basia de disposição da lama vermelha (área 54-A).



**ANEXO B - Seções geológicas – geotécnica obtidas por poços e sondagens a trado pela empresa LPS .**



## ANEXO C – Perfil Geológico - Geotécnico



**Anexo D** – Concentrações dos elementos maiores (em % de peso) nos perfis RI-1, RI-2 e RI-3.

<b>Amostras</b>	<b>Profundidade (cm)</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>MgO</b>	<b>CaO</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>PF</b>
RI 1-1	0	74,04	10,29	6,12	0,05	0,02	0,01	0,07	1,07	8,0
RI 1-2	110	70,16	14,61	6,76	0,06	<0,01	0,02	0,14	1,18	6,8
RI 1-3	240	65,13	20,21	4,22	0,09	0,02	0,03	0,29	1,46	8,2
RI 1-4	590	90,46	4,41	2,37	0,03	<0,01	0,01	0,07	0,42	2,1
RI 1-5	610	65,48	21,88	1,70	0,04	<0,01	0,01	0,05	1,62	9,0
RI 2-1	0	80,76	10,15	2,07	0,04	0,01	0,01	0,03	1,15	5,6
RI 2-2	70	75,03	13,75	2,97	0,04	<0,01	0,01	0,05	1,17	6,8
RI 2-3	220	74,63	14,20	3,00	0,03	<0,01	0,01	0,05	1,26	6,6
RI 2-4	315	76,11	13,10	3,39	0,03	0,02	0,01	0,06	1,18	5,9
RI 2-5	360	82,90	6,41	6,16	0,02	0,01	0,01	0,07	0,59	3,7
RI 3-1	0	70,55	8,65	8,51	0,06	0,12	0,02	0,07	1,24	10,4
RI 3-2	70	53,25	23,41	9,17	0,07	0,01	0,01	0,12	1,79	11,9
RI 3-3	200	54,92	25,16	6,36	0,07	<0,01	0,02	0,25	1,93	11,0
RI 3-4	300	65,98	19,41	3,72	0,07	<0,01	0,02	0,24	1,68	8,6
RI 3-5	380	55,01	23,62	8,25	0,11	<0,01	0,03	0,41	1,81	10,5

Anexo E - Distribuição das concentrações dos elementos-traço nos perfis RI-1, RI-2 e RI-3.

Amostras	Profundidade (cm)	Sc	V	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Sn	Cs	Ba	Ta
RI-1	10-20	8	118	1,2	20	1,0	26	13,7	11,5	1,5	2,8	28,4	17,7	985,3	21,2	0,8	3	0,4	35	1,7
	100-110	11	136	5,2	44	10,5	20	17,9	13,0	0,6	5,9	40,7	21,8	848,2	22,3	1,1	3	0,6	59	1,6
	230-240	15	122	6,4	56	1,3	9	23,8	10,4	<0,5	12,5	61,2	24,1	855,6	27,5	0,7	4	1,0	103	2,0
	560-590	4	55	7,3	80	4,5	5	5,9	7,9	<0,5	3,0	13,0	6,0	284,8	7,7	1,0	<1	0,3	24	0,6
	590-610	11	60	1,5	20	0,4	16	25,0	1,0	<0,5	2,2	29,0	19,9	633,2	31,2	0,1	4	0,3	33	2,3
RI-2	0-20	5	50	0,9	20	0,4	4	13,3	<0,5	<0,5	1,5	11,8	16,3	1020,1	22,4	0,3	2	0,3	13	1,7
	50-70	6	58	4,6	39	1,4	6	18,5	0,5	<0,5	2,2	16,0	15,5	822,6	23,5	0,4	3	0,5	22	1,6
	200-220	8	62	3,7	26	2,6	5	17,9	0,5	<0,5	2,1	15,2	15,3	874,3	23,7	0,5	3	0,4	21	1,6
	290-315	7	71	4,0	32	2,1	8	17,7	0,8	<0,5	2,5	16,1	15,6	781,6	22,6	0,5	4	0,3	23	1,7
	360	5	188	0,8	20	0,5	2	10,4	22,4	0,5	3,4	10,2	7,4	364,3	11,2	0,6	2	0,3	17	0,8
RI-3	0-20	7	204	4,2	37	7,2	75	17,9	10,1	2,0	3,7	17,1	20,1	1287,9	23,4	1,4	3	0,9	23	1,7
	60-70	13	202	1,9	20	2,1	20	36,6	4,7	1,3	5,6	25,1	21,4	1184,4	35,2	0,8	6	1,3	44	2,6
	200	16	142	1,7	20	1,1	7	38,2	2,7	<0,5	9,7	29,9	22,8	892,2	36,7	0,5	6	0,8	78	2,5
	300	13	87	2,2	20	1,5	16	29,7	0,8	<0,5	9,4	25,0	20,1	939,5	32,3	0,3	5	0,8	70	2,3
	380	16	200	1,8	20	0,5	3	40,8	3,1	0,5	16,2	29,8	24,3	771,1	35,2	0,5	5	1,3	108	2,7
CTS		7	53	11,6	18,6	14,3	52	14	2	0,083	110	316	20,7	237	26	1,4	2,5	5,8	668	1,5

Amostras	Profundidade (cm)	Ag	Cd	Sm	Sb	Cs	W	Am	Hg	Tl	Bi
RI-1	10-20	<0,1	<0,1	3	<0,1	0,4	17,7	1,1	0,07	<0,1	0,1
	100-110	<0,1	<0,1	3	<0,1	0,6	21,8	0,5	0,09	<0,1	0,2
	230-240	<0,1	<0,1	4	<0,1	1,0	24,1	0,6	0,06	<0,1	0,1
	560-590	<0,1	<0,1	<1	<0,1	0,3	6,0	<0,5	0,01	<0,1	<0,1
	590-610	<0,1	<0,1	4	<0,1	0,3	19,9	<0,5	0,02	<0,1	<0,1
RI-2	0-20	<0,1	<0,1	2	<0,1	0,3	16,3	<0,5	0,04	<0,1	0,1
	50-70	<0,1	<0,1	3	<0,1	0,5	15,5	<0,5	0,09	<0,1	0,1
	200-220	<0,1	<0,1	3	<0,1	0,4	15,3	<0,5	0,05	<0,1	0,1
	290-315	<0,1	<0,1	4	<0,1	0,3	15,6	<0,5	0,05	<0,1	0,1
	360	<0,1	<0,1	2	<0,1	0,3	7,4	<0,5	0,07	<0,1	0,1
RI-3	0-20	<0,1	<0,1	3	0,1	0,9	20,1	<0,5	0,12	<0,1	0,2
	60-70	<0,1	<0,1	6	<0,1	1,3	21,4	<0,5	0,31	<0,1	0,2
	200	<0,1	<0,1	6	<0,1	0,8	22,8	<0,5	0,10	<0,1	0,2
	300	<0,1	<0,1	5	<0,1	0,8	20,1	<0,5	0,06	<0,1	0,1
	380	<0,1	<0,1	5	<0,1	1,3	24,3	<0,5	0,08	<0,1	0,2
CTC		-	-	3	-	5,8	-	-	-	-	

CTS-crosta terrestre superior (Wedepohl, 1995)

**Anexo F** - Distribuição das concentrações dos ETR nos perfis RI-1, RI-2 e RI-3.

<b>Amostras</b>	<b>Profundidade (cm)</b>	<b>La</b>	<b>Ce</b>	<b>Pr</b>	<b>Nd</b>	<b>Sm</b>	<b>Eu</b>	<b>Gd</b>	<b>Tb</b>	<b>Dy</b>	<b>Ho</b>	<b>Yb</b>	<b>Lu</b>
RI -1	10-20	27,7	48,8	4,48	13,5	1,85	0,38	1,76	0,36	2,53	0,60	2,59	0,42
	100-110	39,1	67,3	6,04	16,9	2,36	0,49	2,28	0,45	2,87	0,73	2,88	0,45
	230-240	70,7	137,6	12,12	32,0	3,88	0,74	3,24	0,56	3,69	0,81	3,33	0,53
	560-590	14,7	28,4	2,72	7,7	1,05	0,19	0,84	0,14	0,91	0,20	0,92	0,14
	590-610	26,6	44,6	4,65	14,7	2,21	0,46	2,17	0,44	3,03	0,68	2,77	0,43
RI -2	0-20	8,5	14,9	1,59	5,5	0,99	0,24	1,30	0,30	2,11	0,54	2,43	0,40
	50-70	13,5	24,3	2,50	7,6	1,32	0,28	1,40	0,30	2,20	0,53	2,28	0,36
	200-220	12,4	21,1	2,28	7,2	1,27	0,29	1,36	0,30	2,12	0,52	2,19	0,36
	290-315	13,0	22,0	2,33	7,6	1,29	0,28	1,43	0,30	2,16	0,52	2,16	0,36
	360	9,9	16,3	1,57	5,1	0,82	0,16	0,78	0,16	1,11	0,26	1,08	0,17
RI -3	0-20	9,2	14,7	1,65	5,6	1,19	0,27	1,55	0,38	2,73	0,68	2,95	0,49
	60-70	20,8	31,5	3,50	11,5	1,99	0,44	2,07	0,44	3,01	0,74	3,00	0,50
	200	25,4	38,8	4,02	12,9	2,25	0,50	2,27	0,51	3,39	0,75	2,87	0,46
	300	21,7	32,0	3,38	11,2	1,95	0,43	2,03	0,42	2,92	0,70	2,91	0,46
	380	24,8	35,9	3,76	12,9	2,15	0,48	2,39	0,50	3,51	0,83	3,17	0,49
CTC		32	66	6,3	26	4,7	0,95	2,8	0,5	2,9	0,6	1,5	0,27

CTS-crosta terrestre superior (Wedepohl, 1995)

Anexo G – Composição química dos elementos-traço do solo para CCL, bauxita e LV (em ppm)

Identificação da amostra	em ppm																						
	Sc	Be	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ag	In	Sn	Sb	Pb	Hf
Solo (SL-1)	5,0	<1	54,0	80,0	2	<20	<10	<30	21,0	2,0	<5	3	18,0	19,0	1158,0	28,0	<2	<0,5	<0,2	3,0	0,9	28	29,7
Solo (SL-2)	5,0	<1	61,0	70,0	1	<20	<10	<30	22,0	1,0	<5	3	17,0	20,0	1179,0	30,0	<2	1,6	<0,2	3,0	0,8	13	30,5
Solo (SL-3)	3,0	<1	43,0	40,0	<1	<20	<10	<30	13,0	1,0	<5	<2	8,0	33,0	526,0	18,0	<2	<0,5	<0,2	2,0	0,7	<5	13,8
Média (SL)	4,3	-	52,7	63,3	-	-	-	-	18,7	1,3	-	-	14,3	24,0	954,3	25,3	-	-	-	2,7	0,8	20,5	24,7
Bauxita (Baux)	7	1	278	140	1	<20	70	<30	63,0	2,0	5,0	<2	3,0	11,0	948,0	42,0	2,0	1,3	<0,2	6	0,6	71	26
Lama Vermelha (LV-1)	21	2	668	280	<1	<20	<10	<30	72,0	3,0	6,0	<2	10,0	34,0	2742,0	121,0	5,0	3,0	0,3	16	1,7	35	72,8
Lama Vermelha (LV-2)	21	2	667	270	<1	<20	<10	<30	96,0	3,0	7,0	<2	13,0	36,0	2676,0	127,0	5,0	3,2	0,3	16	1,6	20	72,5
Média (LV)	21	2	667,5	275	-	-	-	-	84,0	3,0	6,5	-	11,5	35,0	2709,0	124,0	5,0	3,1	0,3	16	1,65	27,5	72,7
Fator de concentração (LV/B)	3,0	2,0	2,4	2,0	-	-	-	-	1,3	1,5	1,3	-	3,8	3,2	2,9	3,0	2,5	2,4	-	2,7	2,8	0,4	2,8

Identificação da amostra	em ppm																					
	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Ta	W	Tl	Bi	Th	U
Solo (SL-1)	0,5	32,0	15,3	23,2	2,4	7,7	1,6	0,4	1,7	0,4	2,8	0,7	2,3	0,4	2,9	0,5	2,4	2,0	<0,1	0,4	18,0	2,6
Solo (SL-2)	0,7	26,0	17,1	26,2	2,6	8,4	1,7	0,4	1,9	0,4	3,2	0,7	2,5	0,4	3,1	0,5	2,6	2,0	<0,1	<0,4	17,3	2,9
Solo (SL-3)	<0,5	13,0	5,7	9,9	1,0	3,9	0,8	0,2	1,1	0,3	2,4	0,6	2,2	0,4	2,8	0,4	1,7	1,0	<0,1	<0,4	9,2	1,5
Média (SL)	0,6	23,7	12,7	19,8	2,0	6,7	1,4	0,3	1,6	0,4	2,8	0,7	2,3	0,4	2,9	0,5	2,2	1,7	-	-	14,8	2,3
Bauxita (Baux)	<0,5	<3	5,5	8,7	0,66	2,4	0,6	0,15	0,8	0,2	1,7	0,4	1,6	0,31	2,5	0,43	2,6	4	<0,1	16,8	36,5	3,6
Lama Vermelha (LV-1)	<0,5	8	15,9	25,3	1,94	7,3	1,9	0,42	2,2	0,6	4,9	1,2	4,7	0,91	7,1	1,23	10,1	10	<0,1	1	100	10,6
Lama Vermelha (LV-2)	<0,5	10	20,3	31,3	2,42	8,6	2,2	0,45	2,4	0,6	5,3	1,3	5	0,99	7,5	1,33	11	11	<0,1	4	98,4	11,2
Média (LV)	-	9	18,1	28,3	2,18	7,95	2,05	0,435	2,3	0,6	5,1	1,25	4,9	1,0	7,3	1,3	10,6	10,5	-	2,5	99,2	10,9
Fator de concentração (LV/B)	-	-	3,3	3,3	3,3	3,3	3,4	2,9	2,9	3,0	3,0	3,1	3,0	3,1	2,9	3,0	4,1	2,6	-	0,1	2,7	3,0



## Anexo H – Modelo de planilha de ensaios de permeabilidade e Coluna

Estágio de adensamento

### MOLDAGEM DO CORPO-DE-PROVA

Situação	Proctor	Moldado
Data =	14/3/2008	14/3/2008
H (cm) =	12,79	6,35
D (cm) =	10,06	6,56
A (cm <sup>2</sup> ) =	79,49	33,80
V (cm <sup>3</sup> ) =	1000,00	214,62
P (gf) =	2053,9	439,06
$\gamma$ (gf/cm <sup>3</sup> ) =	2,054	2,046
h (%) =	17,66	17,42
$\gamma_s$ (gf/cm <sup>3</sup> ) =	1,746	1,742
e =	0,51	0,51
n =	0,34	0,34
s (%) =	91,67	89,91
V <sub>v</sub> (cm <sup>3</sup> ) =	336,24	72,44
V <sub>s</sub> (cm <sup>3</sup> ) =	663,76	142,18
P <sub>s</sub> (gf) =	1745,68	373,93
GC (%) =	99,75	99,56
$\Delta h$ (%) =	-0,3	-0,6
$\delta$ (gf/cm <sup>3</sup> ) =	2,63	
$\gamma_{smax}$ (gf/cm <sup>3</sup> ) =	1,750	
h <sub>ot</sub> (%) =	18,0	

Situação	Proctor		Moldado	
Data				
Pu+t	83,36	80,40	63,88	69,22
Ps+t	74,82	72,15	56,97	62,68
T	26,60	25,28	17,50	25,28
h	17,71	17,60	17,51	17,33
hmed	17,66		17,42	

Tensão confinante = 50 kPa

Data	t (min)	Topo (cm <sup>3</sup> )	Base (cm <sup>3</sup> )	DTopo (cm <sup>3</sup> )	DBase (cm <sup>3</sup> )	DV (cm <sup>3</sup> )	DV/V0 (%)
15/3/2008 11:10	0	22,70	22,70	0,00	0,00	0,00	0,00
15/3/2008 11:11	1,00	22,70	22,60	0,00	0,00	0,00	0,00
15/3/2008 11:12	2,0	22,70	22,60	0,00	0,00	0,00	0,00
15/3/2008 11:14	4	22,70	22,60	0,00	0,00	0,00	0,00
15/3/2008 11:18	8	22,60	22,60	0,10	0,10	0,20	0,09
15/3/2008 11:40	30	22,60	22,60	0,10	0,10	0,20	0,09
15/3/2008 12:10	60	22,50	22,50	0,20	0,20	0,40	0,19
15/3/2008 12:35	85	22,30	22,50	0,40	0,40	0,80	0,37
15/3/2008 12:45	95	22,20	22,40	0,50	0,50	1,00	0,47
17/3/2008 08:13	2703	20,20	22,10	2,50	2,50	5,00	2,33
17/3/2008 09:06	2756	20,20	22,10	2,50	2,50	5,00	2,33

$V_v$  (cm<sup>3</sup>) = 72,4

e = 0,51



Percolação com hidróxido de sódio

Tensão confinante (kPa) : 50  
 Percolação : 1,5  
 Gradiente hidráulico : 23  
 Massa do recipiente (g) : 19,10

Data	Leitura Proveta (cm <sup>3</sup> )	Massa do recipiente (g)	volume na Proveta	Volume	Volume Acumulado (V <sub>v</sub> )	Tempo (h)	Tempo Acumulado (h)	Tempo Acumulado Total (h)	k <sub>pontual</sub> (m/s)	K <sub>médio</sub> (m/s)	C Na (mg/mL)	C Na (%)	Massa Na Acumulada (mg)	Tempo Acumulado (d)
16/7/2008 15:50						0	0				0	0		0
17/7/2008 16:20	22,64	19,1	3,54	3,54	0,05	24,50	24,50	2004,30	5,2E-10	5,2E-10				1,0208333
18/7/2008 16:20	23,97	19,1	4,87	1,33	0,07	24,00	48,50	2028,30	2,0E-10	3,6E-10				2,0208333
21/7/2008 16:50	25,50	19,1	6,40	1,53	0,09	72,50	121,00	2100,80	7,7E-11	1,9E-10				5,0416667
23/7/2008 15:15	20,80	19,1	1,70	1,70	0,11	46,42	167,42	2147,22	1,3E-10	1,8E-10	0,05	0,00500		6,9756944
24/7/2008 14:15	21,61	19,1	2,51	0,81	0,12	23,00	190,42	2170,22	1,3E-10	1,7E-10				7,9340278
25/7/2008 11:44	22,80	19,1	3,70	1,19	0,14	21,48	211,90	2191,70	2,0E-10	1,7E-10				8,8291667
28/7/2008 15:25	24,01	19,1	4,91	1,21	0,16	75,68	287,58	2267,38	5,8E-11	1,4E-10				11,982639
29/7/2008 15:10	24,87	19,1	5,77	0,86	0,17	23,75	311,33	2291,13	1,3E-10	1,4E-10				12,972222
30/7/2008 16:04	25,57	19,1	6,47	0,70	0,18	24,90	336,23	2316,03	1,0E-10	1,4E-10	0,0757	0,00757	25,57	14,009722
1/8/2008 10:24	19,59	19,1	0,49	0,49	0,18	42,33	378,57	2358,37	4,2E-11	1,3E-10				15,773611
4/8/2008 17:10	20,73	19,1	1,63	1,14	0,20	78,77	457,33	2437,13	5,3E-11	1,2E-10				19,055556
9/8/2008 11:25	22,34	19,1	3,24	1,61	0,22	114,25	571,58	2551,38	5,1E-11	1,0E-10				23,815972
11/8/2008 16:30	23,22	19,1	4,12	0,88	0,23	53,08	624,67	2604,47	6,0E-11	9,9E-11	0,0931	0,00931	23,22	26,027778
14/8/2008 19:50	19,91	19,1	0,81	0,81	0,25	75,33	700,00	2679,80	3,9E-11	9,2E-11				29,166667
18/8/2008 18:43	20,30	19,1	1,20	0,39	0,25	94,88	794,88	2774,68	1,5E-11	8,3E-11				33,120139
19/8/2008 19:50	20,61	19,1	1,51	0,31	0,26	25,12	820,00	2799,80	4,5E-11	8,2E-11				34,166667
20/8/2008 18:30	21,03	19,1	1,93	0,42	0,26	22,67	842,67	2822,47	6,7E-11	8,2E-11				35,111111
22/8/2008 15:05	21,30	19,1	2,20	0,27	0,26	44,58	887,25	2867,05	2,2E-11	7,9E-11				36,96875
1/9/2008 19:50	23,22	19,1	4,12	1,92	0,29	244,75	1132,00	3111,80	2,9E-11	6,8E-11				47,166667
2/9/2008 14:55	23,64	19,1	4,54	0,42	0,30	19,08	1151,08	3130,88	8,0E-11	6,8E-11				47,961806
4/9/2008 16:05	24,84	19,1	5,74	1,20	0,31	49,17	1200,25	3180,05	8,9E-11	6,9E-11				50,010417
6/9/2008 11:03	25,34	19,1	6,24	0,50	0,32	42,97	1243,22	3223,02	4,2E-11	6,8E-11	0,5527	0,05527	25,34	51,800694
10/9/2008 17:40	19,22	19,1	0,12	0,12	0,32	102,62	1345,83	3325,63		6,3E-11				56,076389
11/9/2008 17:40	21,47	19,1	2,37	2,25	0,35	24,00	1369,83	3349,63	3,4E-10	6,8E-11				57,076389
12/9/2008 18:30	22,34	19,1	3,24	0,87	0,37	24,83	1394,67	3374,47	1,3E-10	6,9E-11				58,111111
15/9/2008 19:00	21,40	19,1	2,30	2,30	0,40	72,50	1467,17	3446,97	1,2E-10	7,1E-11				61,131944
17/9/2008 17:48	22,90	19,1	3,80	1,50	0,42	46,80	1513,97	3493,77	1,2E-10	7,3E-11				63,081944
18/9/2008 17:48	23,86	19,1	4,76	0,96	0,43	24,00	1537,97	3517,77	1,5E-10	7,4E-11				64,081944
19/9/2008 17:08	25,14	19,1	6,04	1,28	0,45	23,33	1561,30	3541,10	2,0E-10	7,6E-11	2,32395	0,23000	25,14	65,054167
24/9/2008 17:06	20,08	19,1	0,98	0,98	0,46	119,97	1681,27	3661,07	3,0E-11	7,2E-11				70,052778
25/9/2008 19:13	21,28	19,1	2,18	1,20	0,48	26,12	1707,38	3687,18	1,7E-10	7,4E-11				71,140972
26/9/2008 20:08	22,91	19,1	3,81	1,63	0,50	24,92	1732,30	3712,10	2,4E-10	7,6E-11				72,179167
29/9/2008 16:40	23,44	19,1	4,34	0,53	0,51	68,53	1800,83	3780,63	2,8E-11	7,4E-11				75,034722
30/9/2008 20:07	24,15	19,1	5,05	0,71	0,52	27,45	1828,28	3808,08	9,4E-11	7,5E-11				76,178472
3/10/2008 15:07	26,53	19,1	7,43	2,38	0,55	67,00	1895,28	3875,08	1,3E-10	7,7E-11	3,87	0,39000	26,53	78,970139
8/10/2008 17:25	21,36	19,1	2,26	2,26	0,58	122,30	2017,58	3997,38	6,7E-11	7,6E-11				84,065972
11/10/2008 10:45	24,25	19,1	5,15	2,89	0,62	65,33	2082,92	4062,72	1,6E-10	7,9E-11	5,04	0,5000	24,25	86,788194