

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
NÍVEL MESTRADO**

BRUNO SUSIN

**ESTUDO DE *LINERS* COMPOSTOS POR SOLO LOCAL E RESÍDUOS DE
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO RECICLADOS PARA IMPERMEABILIZAÇÃO
INFERIOR DE ATERROS SANITÁRIOS**

SÃO LEOPOLDO

2020

BRUNO SUSIN

ESTUDO DE *LINERS* COMPOSTOS POR SOLO LOCAL E RESÍDUOS DE
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO RECICLADOS PARA IMPERMEABILIZAÇÃO
INFERIOR DE ATERROS SANITÁRIOS

Dissertação apresentado como requisito
parcial para obtenção do título de Mestre
em Gerenciamento de Resíduos, pelo
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade do Vale
do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Oliveira Caetano

São Leopoldo
2020

S964e

Susin, Bruno.

Estudo de liners compostos por solo local e resíduos de construção e demolição reciclados para impermeabilização inferior de aterros sanitários / Bruno Susin. – 2020.

174 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2020.

“Orientador: Prof. Dr. Marcelo Oliveira Caetano.”

1. Liner. 2. Compacted clay liner (CCL). 3. Resíduo da construção ou demolição reciclado (RCDR). I. Título.

CDU 624

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecária: Amanda Schuster – CRB 10/2517)

Bruno Susin

ESTUDO DE *LINERS* COMPOSTOS POR SOLO LOCAL E RESÍDUOS DE
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO RECICLADOS PARA IMPERMEABILIZAÇÃO
INFERIOR DE ATERROS SANITÁRIOS

Dissertação apresentado como requisito
parcial para obtenção do título de Mestre
em Gerenciamento de Resíduos, pelo
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade do Vale
do Rio dos Sinos - UNISINOS

Aprovado em 19 de março de 2020

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ivo Andre Hormisch Schneider – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Profa. Dra. Luciana Paulo Gomes – Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)

Prof. Dr. Marcelo Oliveira Caetano – Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)

Dedico este trabalho a todos profissionais de engenharia do Brasil.
Que a ética conduza nossa profissão.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de poder ser menos objetivo nesta parte do trabalho, mas não consigo. Isso não significa que o meu objetivo obrigado não esteja repleto de sentimento de gratidão, puro e verdadeiro. Eu acredito que na vida nós mesmos escolhemos os nossos mestres. Com as suas graças me formo mestre em engenharia e tomo cada um no meu coração, como meus verdadeiros mestres das mais diversas “áreas da vida”. Obrigado.

Obrigado ao meu pai Nerio Jorge Susin, minha inspiração e motivação sempre.

Obrigado à minha mãe Janete Domingues Susin pela instrução e orientação.

Obrigado ao meu irmão Pedro Susin sem o qual jamais poderia descobrir tantas coisas.

Obrigado à minha companheira Karina Ferranti do Amarante pela paciência e apoio nos dias de pesquisa.

Obrigado à equipe da empresa Terraservice, pela ajuda, colaboração e apoio ao longo da minha pesquisa.

Obrigado Professora Dra. Luciana Paulo Gomes pela oportunidade de poder desenvolver meu trabalho e participar da equipe SAmb.

Obrigado Professor Dr. Marcelo Oliveira Caetano por toda ajuda, instrução e participação no desenvolvimento da minha dissertação.

Obrigado a todos os professores do PPGEC, em especial ao Professor Dr. Luiz Miranda pelo auxílio e disponibilidade.

Obrigado à Professora Dra. Andrea Sanders e à Geóloga Rita de Oliveira pelo auxílio e instrução com as questões geoquímicas.

Obrigado à CRVR - Unidade de São Leopoldo pela disponibilidade de área para o experimento piloto e horas de equipamento de terraplenagem.

À CAPES, pela bolsa PROSUC para a realização deste trabalho.

Agradeço também à UNISINOS pela presteza, estrutura e organização a qual foram a principal base para o desenvolvimento da toda a pesquisa.

“No hay nada más antiecológico que un infeliz.”
Bersuit Vergarabat

RESUMO

Os impactos ambientais do estilo de vida do ser humano são deflagrados pela ciência com resultados que comprometem a transgeracionalidade. A perspectiva holística, a reciclagem e a simbiose industrial devem orientar as decisões técnicas para ciclos fechados, promovendo a sustentabilidade. O objetivo deste trabalho foi a avaliação da instalação e monitoramento *in loco* de *liners* naturais e alternativos, compostos por solo local (SL), argila utilizada na construção de *liners* no aterro de resíduos do experimento piloto ou *liner* mineral padrão (LMP), resíduos da construção e demolição reciclado predominantemente vermelho e (RCDRV) resíduos da construção e demolição reciclado predominantemente cinza (RCDRC), para aplicação como camada de impermeabilização inferior em aterros sanitários. O experimento piloto considerou a aplicação em escala real de *liners* em local limdeiro a um aterro de resíduos sólidos urbanos, no município de São Leopoldo - RS. O programa experimental foi desenvolvido considerando a avaliação geotécnica e geoquímica dos materiais utilizados nos *liners* compostos por: *liner* 1 - 100% (SL); *liner* 2 - 100% LMP; *liner* 3 - 60% SL + 40% RCDRV; *liner* 4 - 60% SL + 40% RCDRC. Foram realizados ensaios de FRX e determinação de pH, com posterior avaliação do comportamento dos teores dos elementos ao longo do tempo. A partir disso, fez-se uma comparação dos resultados dos teores dos elementos químicos com o *background* geoquímico. Foi realizado controle tecnológico (CT) da compactação, desenvolvida e aplicada metodologia estatística para a compactação das praças na energia modificada *in loco*, coletadas amostras deformadas e indeformadas e realizados ensaios para a determinação da permeabilidade, índices físicos e resistência dos diferentes materiais estudados. Ajustes de escala foram realizados para a transposição dos dados de laboratório para o campo. No período de monitoramento todos os *liners* apresentaram alterações em suas condições geotécnicas e geoquímicas, com o *liner* 1 o mais alterado. O *liner* 2 é o único que pode ser utilizado com barreira impermeável de fundo, considerando suas propriedades geotécnicas. Por fim, o *liner* 4 apresentou melhores resultados geoquímicos, possibilitando uma indicação de um *liner* reativo para a proteção química do *liner* de impermeabilização. Após a avaliação geotécnica e geoquímica, comparando-se os resultados com o *background* geoquímico e entre si ao longo do tempo, evidencia-se o ambiente geoquímico antroposfera e se propõe

uma nova finalidade, a reatividade, para o uso de *liners* a partir da reciclagem do RCD predominantemente cinza.

Palavras-chave: *liner, compacted clay liner (CCL)*, resíduo da construção ou demolição reciclado (RCDR).

ABSTRACT

The environmental impacts of human being's lifestyle are been flared by science with results that compromise transgenerationality. The holistic perspective, the recycling and the industrial symbiosis must guide the technical decisions to close cycles promoting the sustainability. This paper target is the installation assessment and monitoring in loco of natural and alternative liners compounds of local soil (SL), local clay, used to build liners in the pilot experiment landfill (LMP), construction and demolition waste recycled predominantly red (RCDRV) and construction and demolition waste recycled predominantly grey (RCDRC), for application as a lower waterproofing layer in landfills. The pilot experiment considered the full-scale application of liners. It was carried out in a location adjacent to a landfill of solid urban waste, in the municipality of São Leopoldo - RS. The experimental program was developed considering the geochemical and geotechnical evaluation of the materials used in the liners. Liner 1: 100% (SL), liner 2 100% LMP, 60% SL + 40% RCDRV and liner 4 60% SL + 40% RCDRC. FRX tests and pH determination were carried out with later elements content behavior evaluation over time. Defined and comparing the results of the contents of chemical elements with the geochemical background. Compaction technological control (CT) was carried out, statistical methodology was developed and applied for the squares compaction in the modified energy in loco, deformed and undeformed samples were collected and tests were carried out to determine the different materials studied permeability, physical indices and resistance. Scale adjustments were made to transpose laboratory data to the field. During the monitoring period, all liners showed changes in their geotechnical and geochemical conditions, with liner 1 being the most altered. Liner 2 is the only one that can be used with a waterproof bottom barrier. Liner 4 showed better geochemical results, with a proposal for the definition of a reactive liner for the chemical protection of the waterproofing liner. After the geotechnical and geochemical evaluation, comparing the results with the geochemical background and with each other over time, the geochemical anthroposphere environment becomes evident, a new proposal for the use of liners is indicated, the reactivity, to use liners from the RCD predominantly grey recycle.

Keywords: liner, compacted clay liner (CCL), recycled construction or demolition waste (RCDR).

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 Elemento químico Cd.....	120
Quadro 2 Elemento químico Co.....	121
Quadro 3 Elemento químico Cr.	121
Quadro 4 Elemento químico Cu.....	122
Quadro 5 Elemento químico Hg.....	122
Quadro 6 Elemento Químico Ni.	123
Quadro 7 Elemento químico Pb.....	123
Quadro 8 Elemento químico V.....	124
Quadro 9 Elemento químico Zn.	125
Quadro 10 Elemento químico Al.	126
Quadro 11 Elemento químico As.	126
Quadro 12 Elemento químico B.....	127
Quadro 13 Elemento químico B.....	127
Quadro 14 Elemento químico Cl.....	128
Quadro 15 Elemento químico F.....	128
Quadro 16 Elemento químico Fe.	128
Quadro 17 Elemento químico K.....	129
Quadro 18 Elemento químico Mg.	129
Quadro 19 Elemento químico Mn.	130
Quadro 20 Elemento químico Na.....	130
Quadro 21 Elemento químico P.....	130
Quadro 22 Elemento químico S.....	131
Quadro 23 Elemento químico Si.	131
Quadro 24 Elemento químico Sn.....	132
Quadro 25 Elemento químico Ba.....	132
Quadro 26 Elemento químico Eu.....	133
Quadro 27 Elemento químico Ga.	133
Quadro 28 Elemento químico Nb.....	134
Quadro 29 Elemento Químico Nd.....	134
Quadro 30 Elemento químico Rb.....	135
Quadro 31 Elemento químico Sr.....	135
Quadro 32 Elemento químico Y.....	136

Quadro 33 Elemento químico Yb.	136
Quadro 34 Elemento químico Zr	137

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Requisitos gerais para agregado reciclado destinado a pavimentação.....	39
Tabela 2 Requisitos específicos para agregado reciclado destinado a pavimentação.	39
Tabela 3 GC por tipo de obra.	57
Tabela 4 Caracterização física dos materiais utilizados para composição dos <i>liners</i>	64
Tabela 5 Caracterização dos <i>liners</i> em laboratório.	65
Tabela 6 Quantitativos de material para a execução dos <i>liners</i>	77
Tabela 7 Tempo e parâmetros de monitoramento do experimento piloto.	79
Tabela 8 Apresentação dos métodos para avaliação do monitoramento geotécnico dos <i>liners</i>	80
Tabela 9 Apresentação dos métodos para avaliação do monitoramento geoquímico dos <i>liners</i>	81
Tabela 10 Valores de referência (VRQs) para determinação de <i>background</i> geoquímico (ppm).	84
Tabela 11 Análises químicas do lixiviado bruto gerado no aterro de resíduos estudo de caso.....	86
Tabela 12 Controle tecnológico.....	89
Tabela 13 Resultados para o teste de energia recebida.	90
Tabela 14 Resultados geotécnicos	92
Tabela 15 Ângulo de atrito interno.	97
Tabela 16 Coesão.	97
Tabela 17 Análise da percolação em situação extrema.	102
Tabela 18 pH dos <i>liners</i> e comportamento no tempo.....	107
Tabela 19 Resultados em comparação as especificações de Rose <i>et al.</i> (1979). ..	109
Tabela 20 Teor dos elementos em ppm, por <i>liner</i> e no tempo.	111
Tabela 21 Comportamento geoquímico dos elementos no tempo.	139
Tabela 22 Teor em ppm dos elementos óxidos, por <i>liner</i> e no tempo.....	141
Tabela 23 Comportamento C% dos elementos categorizados no tempo, por <i>liner</i> . ..	143
Tabela 24 Comportamento C% dos elementos químicos por <i>liner</i>	148
Tabela 25 Comportamento C% no tempo dos elementos categorizados.....	149

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Linha do tempo da história da compactação moderna.....	52
Figura 2 Processos de compactação.	53
Figura 3 Curvas de Compactação.....	54
Figura 4 Aterro de RSU – Unidade São Leopoldo.....	66
Figura 5 Litoestratigrafia do Rio Grande do Sul.	67
.Figura 6 Mapa geológico de localização da área em questão.....	68
Figura 7 Layout dos liners instalados no experimento piloto estudado.	70
Figura 8 Interpolação entre o índice de vazios e o peso específico aparente seco máximo.....	73
Figura 9 Procedimento de mistura do material.	75
Figura 10 Procedimento de compactação do material.	75
Figura 11 Procedimento para determinar o GC do liner.	76
Figura 12 Procedimento para testar a umidade do material.....	76
Figura 13 Procedimento para testar a energia de compactação recebida na praça.	77
Figura 14 Fluxograma de instalação do experimento.....	78
Figura 15 Pontos e material para a coleta.....	81
Figura 16 Províncias geoquímicas do Estado do RS.	83
Figura 17 Monitoramento no tempo 90 e coleta de amostra indeformada.	88
Figura 18 Realização do ensaio DCP <i>in loco</i> e curva com nº de golpes acumulados.	91
Figura 19 Tensão cisalhante versus deformação para tensão normal de 50 kPa para o <i>liner</i> 1.....	93
Figura 20 Tensão cisalhante versus deformação p ara tensão normal de 100 kPa para o <i>liner</i> 1.....	93
Figura 21 Tensão cisalhante versus deformação para tensão normal de 200 kPa para o <i>liner</i> 1.....	93
Figura 22 Tensão cisalhante versus tensão normal para o <i>liner</i> 1.	93
Figura 23 Tensão cisalhante versus deformação para tensão normal de 50 kPa para o <i>liner</i> 2.....	94
Figura 24 Tensão cisalhante versus deformação para tensão normal de 100 kPa para o <i>liner</i> 2.....	94

Figura 25 Tensão cisalhante versus deformação para tensão normal de 200 kPa para o <i>liner</i> 2.....	94
Figura 26 Tensão cisalhante versus tensão normal para o <i>liner</i> 2.....	94
Figura 27 Tensão cisalhante versus deformação para tensão normal de 50 kPa para o <i>liner</i> 3.....	95
Figura 28 Tensão cisalhante versus deformação para tensão normal de 100 kPa para o <i>liner</i> 3.....	95
Figura 29 Tensão cisalhante versus deformação para tensão normal de 200k Pa para o <i>liner</i> 3.....	95
Figura 30 Tensão cisalhante versus tensão normal para o <i>liner</i> 3.....	95
Figura 31 Tensão cisalhante versus deformação para tensão normal de 50 kPa para o <i>liner</i> 4.....	96
Figura 32 Tensão cisalhante versus deformação para tensão normal de 100 kPa para o <i>liner</i> 4.....	96
Figura 33 Tensão cisalhante versus deformação para tensão normal de 200 kPa para o <i>liner</i> 4.....	96
Figura 34 Tensão cisalhante versus tensão normal para o <i>liner</i> 4.....	96
Figura 35 Curva granulométrica do material RCDRV.....	99
Figura 36 Curva granulométrica do material RCDRC.....	99
Figura 37 Gráfico do comportamento da permeabilidade dos <i>liners</i> no tempo.....	101
Figura 38 Gráfico de tendência do comportamento do teor de óxido CaO no <i>liner</i> 2, com comportamento de crescimento (C).....	105
Figura 39 Média e desvio padrão da pluviometria no período de testes.....	106
Figura 40 Valores de pH, por <i>liner</i> e no tempo.....	108
Figura 41 Relação de mobilidade de alguns elementos com o pH.....	109
Figura 42 Teores de elementos químicos no <i>liner</i> 1 no tempo.....	114
Figura 43 Teores de elementos químicos no <i>liner</i> 2 no tempo.....	115
Figura 44 Teores de elementos químicos no <i>liner</i> 3 no tempo.....	116
Figura 45 Teores de elementos químicos no <i>liner</i> 4 no tempo.....	117
Figura 46 Evolução geoquímica do <i>liner</i> 1.....	144
Figura 47 Evolução geoquímica do <i>liner</i> 2.....	145
Figura 48: Evolução geoquímica do <i>liner</i> 3.....	146
Figura 49: Evolução geoquímica do <i>liner</i> 4.....	147
Figura 50 Geometria da célula e rompimento do talude.....	150

Figura 51 Talude da célula de resíduos rompido.	151
Figura 52 Amostra indeformada da última campanha de monitoramento do <i>liner 1</i>	152
Figura 53 Amostra indeformada da última campanha de monitoramento do <i>liner 1</i>	152
Figura 54 Amostra indeformada da última campanha de monitoramento do <i>liner 1</i>	153
Figura 55 Amostra indeformada da última campanha de monitoramento do <i>liner 1</i>	153

LISTA DE SIGLAS

ABGE	Associação Brasileira de Geologia e Engenharia
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ACV	Análise de Ciclo de Vida
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CCL	<i>Compacted Clay Liner</i>
CPRM	
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CRVR	Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos
CT	Controle Tecnológico
CTA	Capacidade de Troca Aniônica
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
DAER	Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (RS)
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DCP	<i>Dynamic Cone Penetrometer</i>
DDL	<i>Difuse Double Layer</i>
DMA	Desgaste Em Meio Acuoso
DMA	Desgaste Em Meio Acuoso
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DRX	Difratometria de Raio X
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPA	<i>US Environmental Protection Agency</i>
EPIs	Equipamento de Proteção Individual
EUA	Estados Unidos da América
FEPAM	Fundação Estadual de Proteção Ambiental
FRX	Espectrometria Fluorescente de Raio-X
GBR-P	Geomembrana de PEAD
GC	Grau de Compactação

GPS	<i>Global Position System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	Índice de Consistência
ISM	<i>Incremental Sampling Methodology</i>
ITRC	<i>Interstate Technology & Regulatory Council.</i>
itt	Instituto de Tecnologia
LL	Limite de Liquidez
LMP	<i>Liner Minera Padrão</i>
LOI	<i>Lost in Ignition</i>
LP	Limite de Plasticidade
MB	Para Normas de Método de Ensaio
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
NTK	Nitrogênio Total Kjeldahl (amônia + nitrogênio orgânico)
ppb	Parte Por Bilhão
ppm	Parte Por Milhão
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
RCDR	Resíduo de Construção e Demolição Reciclado
RCDRC	Resíduo de Construção e Demolição Reciclado Predominantemente Cinza
RCDRV	Resíduo de Construção e Demolição Reciclado Predominantemente Vermelho
RSU	Resíduo Sólido Urbano
SL	Solo Local
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos
USP	Universidade de São Paulo
VRQ	Valor Referência de Qualidade
WCED	World Commission on Environment and Development

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
1.1 JUSTIFICATIVA	28
1.2 OBJETIVOS	33
1.2.1 Objetivo Geral	33
1.2.2 Objetivos Específicos	33
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	34
2.1 SUSTENTABILIDADE	34
2.2 GEOTECNIA AMBIENTAL	35
2.3 RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO OU DEMOLIÇÃO REICLADO (RCDR)	36
2.4 ATERROS DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....	39
2.5 <i>LINERS</i> EM ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....	42
2.5.1 Solos Argilosos a sua formação e Composição	43
2.5.2 Geossintéticos	44
2.5.3 Qualidades Geotécnicas para <i>liners</i>	45
2.5.4 Mecanismos de Migração e Retenção em <i>liner</i> Mineral	46
2.5.5 <i>Liners</i> alternativos	51
2.6 COMPACTAÇÃO DOS SOLOS	51
2.7 <i>BACKGROUND</i> GEOQUÍMICO	58
3 METODOLOGIA	62
3.1. ORIGEM E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E <i>LINERS</i> UTILIZADOS NA PESQUISA	62
3.1.1. Origem Dos Materiais Utilizados Para Os <i>Liners</i>	62
3.1.2. Caracterização Dos Materiais Dos <i>Liners</i>	63
3.1.3. Caracterização Dos <i>Liners</i>	64
3.2. MONTAGEM DO EXPERIMENTO PILOTO	66
3.2.1. Local De Instalação	66
3.2.2. Adaptação Dos Materiais Para Aplicação Em Campo	69
3.2.3. Geometria do Experimento	70
3.2.4. Transposição Da Compactação Da Energia Modificada Do Laboratório Para O Campo	70
3.2.5. Procedimento De Execução Das Praças	74
3.3. MONITORAMENTO DO EXPERIMENTO PILOTO	79

3.3.1. Tempo De Monitoramento	79
3.3.2. Monitoramento Geotécnico dos <i>liners</i>	79
3.3.3. Monitoramento Geoquímico dos <i>liners</i>	80
3.3.3.1 Amostras e análises.....	80
3.3.3.2 Definição do Background Geoquímico.....	82
4 RESULTADOS	87
4.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CAMPO.....	87
4.1.1 Grau de compactação (GC) e Teor de Umidade (W%)	87
4.1.2 Energia Recebida	89
4.1.3 Dynamic Cone Penetrometer (DCP)	90
4.2. RESULTADOS DO MONITORAMENTO GEOTÉCNICO	91
4.2.1 Cisalhamento Direto	92
4.2.3 Índices Físicos	97
4.2.4 Granulometria	98
4.2.5 Permeabilidade	100
4.3. RESULTADOS DO MONITORAMENTO GEOQUÍMICO	104
4.3.1 Pluviometria	105
4.3.2 pH	106
4.3.3 FRX	110
4.3.3.1 Elementos químicos.....	110
4.3.3.1.1 <i>Categoria de Elementos FEPAM (2014)</i>	120
4.3.3.1.2 <i>Categoria de Elementos Maiores:</i>	125
4.3.3.1.3 <i>Categoria de Elementos Traço</i>	132
4.3.3.2 Óxidos.....	137
4.4. ANÁLISE TÉCNICA DOS <i>LINERS</i>	149
4.4.1 <i>Liner</i> 1 – 100% Solo Local (SL)	152
4.4.2 <i>Liner</i> 2 – 100% <i>Liner</i> Mineral Padrão (LMP)	154
4.4.3 <i>Liner</i> 3 – 60% Solo Local (SL) + 40% Resíduo da Construção ou Demolição Reciclado Predominantemente Vermelho (RCDRV)	155
4.4.4 <i>Liner</i> 4 – 60% Solo Local (SL) + 40% Resíduo da Construção ou Demolição Reciclado Predominantemente Cinza (RCDRC)	156
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	158
REFERÊNCIAS	161

1 INTRODUÇÃO

É importante contextualizar historicamente a realidade tecnológica atual, justificando o presente trabalho e apresentando o estado da arte nos tópicos abordados. A problemática da geração de resíduos não é novidade, o ser humano especializou-se no processamento dos materiais naturais em prol de seu conforto e segurança, hodiernamente trabalhamos para processar o que foi processado.

A revolução industrial aliada ao *baby boom* e ao desenvolvimento e aprimoramento do capitalismo, das mídias de massa e da publicidade e propaganda resultaram em grandes populações consumidoras e com poder aquisitivo. A obsolescência programada explorando questões de estéticas, de durabilidade de materiais e de novas tecnologias e necessidades promoveu, aliado aos fatos históricos supracitados, uma grande geração de resíduos sólidos, os quais vem sendo processados ao redor de todo o planeta.

A abordagem holística do meio ambiente, e das problemáticas relacionadas ao ser humano com esse, traz a ideia de que tudo está inter-relacionado e já não basta mais somente processar os bens naturais em prol do conforto e segurança da sociedade, mas também é preciso, para fazer isso, não degradar o meio ambiente ao ponto em que esse impacto prejudique ou onere a qualidade de vida e a saúde pública agora mas principalmente no futuro. Sob essa ótica a geotecnia ambiental, em seu último estágio tecnológico, busca o uso de materiais supostamente inservíveis, resultantes de outros processos necessários à sociedade, avaliando pela geotecnia esses materiais dentro de suas qualidades técnicas e possíveis usos.

Neste contexto, a construção civil representa uma importante fatia na economia do país. E, em função de sua grande geração e propriedades físicas inertes (Resíduo Classe IIB), o resíduo da construção civil e demolição (RCD), considerando os materiais resultantes dos processos de construção, demolição e reforma de obras residenciais, industriais e civis, vêm sendo bastante estudado para seu uso como substituição ou aprimoramento de materiais de finalidade geotécnica.

Num contexto mais amplo, considerando a gestão e o gerenciamento de resíduos sólidos urbanos (RSU), uma importante fração de todo esse resíduo sólido gerado, em todo o mundo, quando apropriadamente gerido, foi e ainda é encaminhado para aterramento. Os aterros de resíduos sólidos são obras de engenharia que buscavam confinar em um local tecnicamente e ambientalmente seguro a massa e

drenar de seu interior os fluidos resultantes da degradação natural dos resíduos. Modernamente aterro de resíduos sólidos buscam não somente o confinamento físico dos resíduos, mas também é avaliada a interação química e biológica dos contaminantes entre si e com o meio, funcionando como um biorreator capaz de gerar biogás para ser utilizado como gás natural ou geração de energia.

Um elemento construtivo essencial para que qualquer aterro de resíduos sólidos possa atingir os objetivos técnicos requeridos é o *liner*. O *liner* é a base e o topo do aterro de resíduos sólidos, pode ser mineral e ou pré-fabricado, precisa atender os critérios físico-químicos mínimos de impermeabilização e capacidade de adsorção ou de reatividade, para efetivamente funcionar como barreira aos contaminantes resultantes da decomposição dos resíduos no interior do aterro de resíduos sólidos. A utilização de cargas e misturas de materiais alternativos, com as qualidades geotécnicas e químicas requeridas para o uso, vem sendo estudado para utilização na construção de *liners* alternativos.

1.1 JUSTIFICATIVA

Diversos estudos atuais apontam para a escassez de recursos naturais, denunciam o fato de que já foi superado o limite de recuperação natural de diversos recursos e já é ultrapassada a capacidade do planeta terra em fornecer esses, podendo comprometer às futuras gerações (GLOBAL FOOTPRINT NETWORK, 2016; PRIOR *et al.*, 2012; SHAFIEE e TOPAL, 2009). A busca por opções tecnológicas que corroborem com os preceitos da simbiose industrial fechada, sobretudo no que se refere a possibilidade de co-processamento de resíduos de um setor produtivo em outro, ampliando a sustentabilidade das partes envolvidas, como uma alternativa sistêmica e operacional para a produção de bens e serviços, pode promover um melhor aproveitamento dos recursos naturais necessários a manutenção da saúde e do bem estar social

Partindo do supracitado, o presente trabalho busca desenvolver uma alternativa material quando objetiva estudar a adição de RCDR ao solo local para construção de *liner* e promover a sustentabilidade através de uma abordagem aplicada em escala real, *in loco*, a fim de avaliar a viabilidade, tecnológica e ambiental, do material proposto. Os estudos pretendidos pelo trabalho da sequência às pesquisas experimentais para utilização de RCDR em *liners* de aterros sanitários, desenvolvidas

no Departamento de Sanemaneto Ambeintal do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - PPGEC da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS.

Ao estudar química e fisicamente o material composto por SL do estudo de caso e RCDR e a sua aplicação *in loco*, dentro do que é usual em termos de escala, equipamento e método, abrem-se novas possibilidades de entendimento das relações geoquímicas e ambientais dos materiais componentes do *liner*, e da reciclagem do RCD. A hipótese de pesquisa é que a partir das qualidades técnicas requeridas para o material em uso na sua aplicação como *liner* é possível, se comprovada a eficiência do sistema proposto, promover maior sustentabilidade para os processos de aterramento de resíduos e destinação de RCD nas cidades, gerando empregos e investimentos em tecnologia; minimizando a geração de carbono reduzindo a distância percorrida para o transporte de solo entre outros; garantindo destino apropriado e seguro para o RCDR; gerando economia na aquisição e transporte de insumos; e diminuindo a extração e o consumo de matéria prima não renovável.

Segundo Cossu (2014), a reciclagem promove a preservação dos recursos naturais já que passam a ser extraídos em menor quantidade, além de gerar economia diminuindo o montante de resíduos a ser processado e tratado pelas cidades. Susin, Caetano e Grienbler (2019) apresentam viável a eficiência ambiental do uso de RCDR em *liner* de aterros de resíduos.

O crescimento populacional previsto para o mundo somente agrava a situação de bem-estar de mais de um bilhão de pessoas que vivem na faixa da miséria. A pegada ecológica de carbono é somente um dos indicadores de que não conseguiremos preservar a qualidade ambiental do planeta para as futuras gerações. Os desafios que a sociedade enfrenta são significativos e são um problema de engenharia. Estes incluem escassez de energia, recursos naturais, água e comida; guerra e instabilidade política; níveis crescentes de pobreza, falta de moradia e doença; e redução da qualidade da educação e da infraestrutura. População em rápida expansão acelera a pressão sobre os recursos naturais, ampliando o impacto que temos sobre a saúde do planeta que apoia a vida humana (BLIZZARD E KLOTZ, 2012).

Des de que se iniciaram as medições de volume e de peso de resíduos gerados no mundo nunca houve um registro de diminuição. Para Licht (2001), quanto mais evoluído for um grupamento humano, mais complexos são as composições químicas

de seus produtos e conseqüentemente de seus dejetos ou resíduos, apoiando o conceito de antroposfera.

O crescimento de geração de resíduos *per capto* aumenta e a população também cresce, resultando em um crescimento exponencial na geração de resíduos no mundo. A Lei Federal 12.305 exige a destinação final em locais ambientalmente seguros (BRASIL, 2010):

“CAPÍTULO II Art. 3o Para os efeitos desta Lei, entende-se por:

VII - destinação final ambientalmente adequada: destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos;

VIII - disposição final ambientalmente adequada: distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos

Art. 47. São proibidas as seguintes formas de destinação ou disposição final de resíduos sólidos ou rejeitos:

I - Lançamento em praias, no mar ou em quaisquer corpos hídricos;

II - Lançamento in natura a céu aberto, excetuados os resíduos de mineração;

III - Queima a céu aberto ou em recipientes, instalações e equipamentos não licenciados para essa finalidade;

IV - Outras formas vedadas pelo poder público.”

Segundo Sharff, Zomeren e Sloot (2011), aterros de resíduos estarão entre nós por longos períodos e medidas devem ser tomadas a fim de reduzir suas emissões de longo prazo. A tecnologia atual, o estado da arte, no que se refere à gestão e gerenciamento de resíduos ainda representa um ciclo aberto onde, ao final, resíduos com alta carga de metais pesados e sais são dispostos em aterros.

Sendo necessário à manutenção social na atual condição tecnológica da humanidade os aterros de resíduos devem ser obras de engenharia onde efetivamente se apliquem as tecnologias e os conhecimentos acerca do meio onde o aterro se instala, tipologia físico-química de seus resíduos e técnicas e materiais construtivos que efetivamente promovam a sustentabilidade corroborando no atendimento técnico aos requisitos necessários ao bom funcionamento deste tipo de estrutura, confinando o resíduo e considerando todas as etapas: projeto, licenciamento ambiental, operação e monitoramento. Um dos principais elementos construtivos de um aterro de resíduos é o seu sistema de impermeabilização de base,

distribuído em diferentes camadas onde a uma parte mineral compete a propriedade de impermeabilização e usualmente é construída de argila.

Guney, Koparal e Aydilek (2008), ressaltam a escassez de argila dentro das propriedades geotécnicas desejadas para o seu uso como *liner*. Segundo Susin, Caetano e Grienbler (2019), em alguns centros urbanos a importação de argila pode onerar o empreendimento em termos econômicos e ambientais, em função da distância de jazidas de argila. Ainda segundo os autores, nos moldes do experimento piloto, a utilização de RCDR pode apresentar 40% menos uso de matéria prima não renovável na construção de *liners*. A partir disso, estudos para o uso de *liners* alternativos vem sendo realizados no mundo todo nas últimas décadas (ABICHOU *et al.* 2004; AKSAKAL, ANGIN, OZTAS, 2013; CHAPUIS *et al.* 1992; COKCA e YILMAZ, 2004; ARLANGER *et al.* 1987; GLEASON *et al.* 1997; GUNEY, KOPARAL e AYDILEK 2008; NAVIA *et al.* 2005; PALMER *et al.* 2000; RODRIGUES 2012; SHUCK 2018; SUSIN, CAETANO e GRIEBLER, 2019 VARANK *et al.* 2017).

A aplicação de RCDR para finalidade sanitária integra uma de suas várias aplicações, com algumas já bastante difundidas como confecção de blocos de concreto, argamassa para revestimentos, em base e sub-base de pavimentos, na produção de concretos magros sem fins estruturais, entre outros (BARROS, 2005). O RCD Classe A apresenta propriedades inertes e com caracterização por batelada pode ser utilizado segundo a NBR 15.116 (ABNT, 2015), sendo a reciclagem do RCD uma alternativa para a gestão desse tipo de resíduo nas cidades brasileiras.

Com a proposta da realização de experimentos *in loco*, lindeiro a um aterro sanitário e posterior definição e comparação com o *background* geoquímico, este trabalho busca estabelecer também fundamentações para a interpretação de comportamentos anômalos geotécnicos e geoquímicos típicos da camada da antroposfera.

A distribuição dos elementos químicos no planeta está condicionada aos processos geoquímicos de migração, dispersão e redistribuição destes, seja no ambiente profundo quanto no superficial. Por não possuir limites nítidos em comparação com as outras esferas, as atividades humanas na antroposfera vem promovendo alterações geoquímicas de nível mundial. O teor no solo de determinados elementos químicos, principalmente os elementos traço, crescem regularmente com o crescimento populacional (LICHT, 2001).

Ainda segundo o autor,

“Variações do ambiente geoquímico que ocorrerem durante o processo de formação deixarão marcas permanentes na estrutura dos indivíduos, bióticos ou abióticos. De maneira geral, quanto mais complexo for o ambiente geoquímico, mais marcadas e notáveis serão as diferenças impressas na natureza.”

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a instalação e o monitoramento *in loco* de *liners* alternativos e naturais, compostos por argila local (LMP), solo local (SL) e Resíduos de Construção e Demolição (RCD), para aplicação como camada de impermeabilização inferior em aterros sanitários.

1.2.2 Objetivos Específicos

O objetivo geral é bastante amplo e para que o estudo seja viável diversas variáveis foram isoladas, de acordo com o descrito na metodologia. Os objetivos específicos são desenvolvidos no intuito de concretizar o objetivo geral, e são descritos a seguir:

- a) Propor experimento piloto com a instalação *in loco* de *liners*, compactados com energia modificada, para impermeabilização inferior de aterros sanitários. Os *liners* estudados eram compostos por solo local (SL), argila local (LMP), resíduo da construção e demolição reciclado predominantemente vermelho (RCDRV), resíduo da construção e demolição reciclado predominantemente cinza (RCDRC);
- b) Monitorar as características geotécnicas dos *liners* durante o período de estudo;
- c) Monitorar as características geoquímicas dos *liners* durante o período de estudo e comparar os resultados com *background* geoquímico.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para que se consiga delimitar a pesquisa proposta, é necessário um entendimento das características físico-químicas dos materiais em uso. Posterior a isso existe a necessidade de um entendimento dos fenômenos físico-químicos que ocorrem quando o lixiviado ou a água da chuva entra em contato com o *liner*. É importante entender, no que se refere ao estado da arte, como mensurar e qualificar cientificamente tais fenômenos e qualidades, para posteriormente, aplicar o material *in loco* e avaliar a sua eficiência e efetiva funcionalidade no uso proposto e se ocorrem alterações em suas propriedades iniciais ao longo do tempo.

2.1 SUSTENTABILIDADE

O uso comum do termo sustentabilidade começou com o relatório da *World Commission on Environment and Development*, intitulado *Our Common Future* (WCED, 1987). Esse documento cunhou a conhecida e amplamente referenciada definição de sustentabilidade que aborda a necessidade de comprometimento com a qualidade de vida das futuras gerações, a transgeracionalidade.

Em um dos conceitos mais modernos a sustentabilidade é vista como um tripé, onde 3 esferas: o meio ambiente, a sociedade e a economia coexistem de maneira que a sustentabilidade somente efetivamente existe quando ocorrem benefícios, ou minimamente a não degradação nos 3 âmbitos. Não é sustentável um meio ambiente preservado, recursos financeiros disponíveis, mas uma sociedade desigual e corrupta; não é sustentável uma sociedade com igualdade, recursos financeiros e o meio ambiente degradado; assim como não há sustentabilidade e uma situação de sociedade organizada, meio ambiente preservado, mas carência de recursos financeiros. (ELKINGTON, 1997).

A partir de tópicos de gestão mais avançados e da aplicação de metodologias como a análise de ciclo de vida (ACV), que se possibilitou uma avaliação mais quantitativa dos impactos gerados pelas atividades e processos desenvolvidos pelo ser humano (GOMES *et al.*, 2015). Tais análises levam a concluir que os processos, da maneira como são desenvolvidos atualmente,

requerem demasiada energia para sua realização (BLIZZARD e KLOTZ, 2012), de maneira que sustentável é aquele processo ou produto que agrega o mesmo valor a matéria prima, porém consome menos energia (SUSIN, 2010).

O crescimento populacional previsto para o mundo somente agrava a situação de bem-estar de mais de um bilhão de pessoas que vivem na faixa da miséria. A pegada de carbono é somente um dos indicativos de que não se conseguirá preservar a qualidade ambiental do planeta para as futuras gerações. Os desafios que se enfrenta como sociedade são significativos: escassez de energia, de recursos naturais, de água e de comida; guerra e instabilidade política; níveis crescentes de pobreza, falta de moradia e doença; e redução da qualidade da educação e da infraestrutura. População em rápida expansão acelera a pressão sobre os recursos naturais, ampliando o impacto sobre a saúde do planeta (BLIZZARD e KLOTZ 2012).

2.2 GEOTECNIA AMBIENTAL

A geotecnia ambiental nasceu no início da década de 1970, nos estudos de áreas para a disposição de resíduos sólidos (ZUQUETTE, 2015). Em um segundo momento, no fim dos anos 1970, houve a deflagração da contaminação do *Love Canal* nos EUA (EPA 1979), desencadeando um novo nicho importante no ramo da geotecnia ambiental a investigação geoambiental e a remediação de áreas contaminadas. Modernamente a geotecnia ambiental procura desenvolver novos materiais para uso em substituição a matéria prima não renovável, reciclando e reutilizando rejeitos de outras indústrias além da construção civil para fins geotécnicos.

Segundo Boscov (2008), a abordagem geotécnica no intuito de proteger o meio ambiente contra os impactos antrópicos, é denominada geotecnia ambiental. Para Zuquette (2015), geotecnia ambiental é a ciência aplicada para propor a solução e prever problemas ambientais de modo que o meio ambiente preserve o equilíbrio ao longo do tempo, não se comprometendo vidas.

Geotecnia Ambiental é uma ciência multidisciplinar que se integra a outras disciplinas a fim de solucionar problemas ambientais de diferentes origens. São exemplos de atuação: projeto operação e monitoramento de centrais de

resíduos; prevenção e remediação de contaminação do solo e da água subsuperficial; mapeamento geotécnico e geoambiental; controle de movimentos de massa; e reuso e reciclagem de materiais de diversas fontes para novas finalidades (BOSCOV, 2008; ZUQUETTE, 2015).

2.3 RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO OU DEMOLIÇÃO RECICLADO (RCDR)

Barros (2005), define RCD como as sobras e rejeitos de materiais resultantes das obras de construção civil, reformas e demolições. Para uma adequada gestão destes inservíveis a legislação brasileira estabeleceu uma série de resoluções e normas onde cabe salientar as classificações do RCD, pela Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002. A legislação apresenta classificações dos RCDs conforme a origem, contudo cabe um destaque para os resíduos Classe A. Segundo o CONAMA,

“(...) os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infra-estrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento, etc.), argamassa e concreto; c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios, etc.) produzidas nos canteiros de obras(...)”(BRSIL, 2010)

A indústria da construção civil é responsável por significativa parcela dos impactos ambientais no mundo e segundo Macedo *et al.* (2011), a reciclagem do RCD é importante para a redução da degradação ambiental promovida pelo setor.

A ABRELPE (2019) demonstra uma geração em 2018 de RCD para o Brasil, coletado pelos municípios de 0,585 kg/hab.dia. Para o Estado do Rio Grande do Sul, também em 2018, este índice é de 0,546 kg/hab.dia. Em termos de geração por área construída, os estudos conduzidos por Pinto (1986), apontam para uma geração de 150 kg/m² de RCD.

Barros (2005), atenta para as questões relacionadas ao desenvolvimento sociocultural e econômico dos centros urbanos, o crescimento econômico é diretamente proporcional ao crescimento do setor da construção civil, de forma

que a ingerência dos processos produtivos pode aumentar também a geração de resíduos. O autor salienta o déficit habitacional brasileiro, que também apresenta riscos ao aumento de geração de RCD nas cidades.

Reciclagem de entulho não é um tema exclusivo da atualidade. Levy e Helene (2000) estabelecem o ano de 1946 como o marco para o início das técnicas de utilização de RCD. Muitas cidades alemãs e inglesas impactadas pela segunda guerra mundial, por escassez e forte demanda de recursos, fizeram uso de escombros para sua reconstrução (BARROS, 2005). Foi no Japão, durante a década de 70 que se propuseram os primeiros estudos sistemáticos para reciclagem de RCD no mundo (LEITE, 2001). O arquiteto Tarcísio de Paula Pinto (1986) realizou o primeiro estudo técnico para utilização de RCD, no entanto foi somente na década de 90, na cidade de Belo Horizonte, que efetivamente se iniciou a reciclagem de RCD no Brasil (BARROS, 2005; SCHULZ e HENDRICKS, 1992).

Alguns autores relatam que da totalidade de RCD gerado, elevada parcela (cerca de 80%) poderiam ser classificados como Classe A, sendo passíveis de reciclagem ou reuso (MIRANDA *ET AL.*, 2009; EVANGELISTA, COSTA E ZANTA, 2010; MÁLIA *ET AL.*, 2011; DING & XIAO, 2014; CAETANO, LAMBIASE E GOMES, 2016; CAETANO, SELBACH E GOMES, 2016).

Por suas propriedades inertes (SOUTSOS e FULTON 2015), este RCD definido como classe A, já vem sendo beneficiado em plantas de reciclagem, em diversos municípios brasileiros, como por exemplo Belo Horizonte, São Paulo, Rio de Janeiro, São José do Rio Preto, Londrina, Caxias do Sul, etc. O processo de beneficiamento básico contempla a triagem e separação, a britagem e a segregação granulométrica do RCD e segundo Soutsos e Fulton (2015), os equipamentos de britagem utilizados para esse fim não sofreram grades modificações tecnológicas desde a década de 90.

Existe relação entre a tipologia do RCD e a etapa do processo produtivo da obra (ANGULO, 2001). Segundo ABRECON (2015), dos 70% de RCD processado no país 50% é cinza e 50% vermelho, evidenciando a sua predominância. Entende-se aqui resíduo de construção e demolição reciclado vermelho (RCDRV) aquele predominantemente composto por cerâmicas e solo e resíduo de construção ou demolição reciclado cinza (RCDRC) aquele composto predominantemente de concreto, artefatos de cimento e argamassa.

Pelas características intrínsecas o RCDR vem sendo utilizado em pavimentações, na substituição de materiais virgens. Segundo Silva *et al.* (2015), existem diversos casos de uso de RCDR em pavimentação no Brasil, em camadas de reforço do subleito, de base, de sub-base e no concreto asfáltico. O autor também salienta para a viabilidade econômica do emprego de RCDR em pavimentação.

A Resolução CONAMA nº 307 de 5 de julho de 2012 ressalta a necessidade da gestão e manejo correto do RCD para a viabilização de destinos mais nobres para o mesmo. A NBR 15.116 (ABNT, 2004) apresenta critérios técnicos para a utilização de RCDR em camadas de pavimentação e em preparo de concretos sem função estrutural. As Tabelas 1 e 2 apresentam os requisitos gerais para agregado reciclado destinado a pavimentação e requisitos específicos para agregado reciclado destinado a pavimentação, respectivamente.

Tabela 1 Requisitos gerais para agregado reciclado destinado a pavimentação.

Propriedades	Agregado reciclado classe A		Normas de ensaios	
	Graúdo	Miúdo	Graúdo	Miúdo
Composição granulométrica	Não uniforme e bem graduado com coeficiente de uniformidade $C_u > 10$		ABNT NBR 7181	
Dimensão máxima característica	≤ 63 mm		ABNT NBR NM 245	
Índice de Forma	≤ 3	-	ABNT NBR 7809	-
Teor de material passante na peneira 0,42 mm	Entre 10% e 40%		ABNT NBR 7181	
Contaminantes - teores máximos em massa do agregado reciclado (%)	Materiais não minerais de mesmas características (1)		Anexo A	Anexo B
	Materiais não minerais de características distintas (1)		Anexo A	Anexo B
	Sulfatos		ABNT NBR 9917	

(1) Para os efeitos dessa Norma, são exemplos de materiais não minerais: madeira, plástico, betume, materiais carbonizados, vidros e vidrados cerâmicos.

Fonte: ABNT NBR 15.116 (2005).

Tabela 2 Requisitos específicos para agregado reciclado destinado a pavimentação.

Aplicação	CBR %	Expansibilidade %	Energia de compactação
Material para execução de reforço de subleito	≥ 12	$\leq 1,0$	Normal
Material para execução de revestimento primário e sub-base	> 20	$\leq 1,0$	Intermediária
Material para execução de base de pavimento (1)	≥ 60	$\leq 0,5$	Intermediária ou modificada

(1) Permitido o uso como material de base somente para vias de tráfego $N \leq 10E8$ repetições de eixo padrão de 80kN no pavimento de projeto.

Fonte: ABNT NBR 15.116 (2005)

2.4 ATERROS DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Segundo Sharff, Zomeren e Sloot (2011), mesmo com os esforços de muitos países no intuito de reciclar e reutilizar os resíduos, o aterramento ainda será necessário para se destinar os rejeitos. No Brasil, o aterramento de resíduos sólidos urbanos é uma prática usual. Conforme o relatório da ABRELPE (2019), o país gera cerca de 216.629 ton/ano e um índice per capita de 1,039 kg/hab.dia.

Destes, 59,5% são destinados de forma ambientalmente segura em aterros sanitários. Outros 23% e 17% são destinados de forma incorreta em aterros controlados e lixões, respectivamente. Num contraponto, a Lei Federal 12.305 (Brasil, 2010) exige a destinação final em locais ambientalmente seguros, sendo proibida a destinação em lixões.

Cossu, Raga e Rossetti (2003) relatam que a tecnologia atual de aterramento faz com que processos de degradação anaeróbica se desenvolvam e persistam na massa de resíduos, produzindo lixiviados e biogás por um longo tempo. Algumas pesquisas concluem que o impacto ambiental de longo prazo causado pelos aterros de resíduos sólidos urbanos (RSU) pode durar séculos (KRUEMPELBECK e EHRIG, 1999). As consequências são que os sistemas de impermeabilização correm o risco de vazar e os sistemas de drenagem colmatam (BRUNE *et al.*, 1993; FARQUHAR, 1989; ROLLIN *et al.*, 1991). Além disso, existem os impactos tradicionais, como a ocorrência de odores, que invariavelmente tornam a localização do aterro e a aceitação pública um problema (KRUEMPELBECK *et al.*, 1999).

Consequentemente, a sustentabilidade de um aterro, em que nenhum problema ambiental deve ser deixado para as gerações futuras, representa o principal objetivo a ser alcançado pelas estratégias modernas de aterramento de resíduos (KRUEMPELBECK *et al.*, 1999).

Conforme Boscov (2008) e Junior (2006), o aterro de resíduos sólidos é concebido para realizar o confinamento dos resíduos, reduzir o volume destes e consequentemente minimizar os impactos ambientais controlando a migração de contaminantes para o meio. Tal confinamento se realiza impedindo o contato direto do resíduo com o terreno natural e com a exposição na atmosfera.

Aterro de resíduo pode ser definido como uma obra de engenharia com a finalidade de conter e confinar materiais inservíveis, garantindo estanqueidade por um período mínimo de tempo, drenando e tratando os efluentes fluidos resultantes dos processos de degradação ambiental dos rejeitos aterrados (SUSIN *et al.*, 2017). Segundo Boscov (2008), os aterros de resíduos sólidos apresentam uma peculiaridade em comparação com as tradicionais obras grandes de infraestrutura da engenharia civil. A operação do aterro de resíduos é a sua execução de maneira que o fim de sua operação, ou fim de sua execução, também representa o fim de seu uso e finalidade.

Para Susin *et al.* (2017), um aterro de resíduos sólidos, seja esse para resíduo industrial, urbano, perigoso ou de baixo nível radioativo, no Brasil e no mundo, é uma opção para a destinação dos materiais inservíveis ao homem. Boas práticas são de grande importância para que tais materiais realmente fiquem confinados e ao longo de sua decomposição não degradem o ambiente em que se instala o aterro. Para reduzir os impactos ambientais o processo de aterramento de resíduos, necessário para se destinar os rejeitos não passíveis de reciclagem ou reaproveitamento, necessita que medidas técnicas de monitoramento devam ser tomadas (SHARFF; ZOMEREN e SLOOT, 2011).

Segundo Sharff, Zomeren e Slood (2011), a sustentabilidade para aterros de resíduos sólidos demanda a possibilidade de aterros de resíduos diferenciados para diferentes tipos de resíduos. O biorreator para resíduos biodegradáveis é uma abordagem que objetiva a aceleração do processo de biodegradação através da injeção de água e calor, possibilitando a otimização da fabricação de metano e a recuperação de energia. A abordagem *equifill* se aplica predominantemente para resíduos inorgânicos, onde se busca uma estabilização físico química entre diferentes tipos de resíduos o que resulta em um armazenamento irreversível no interior do aterro e conseqüentemente baixas emissões. A abordagem monolítica para resíduos contaminantes se trata da imobilização do resíduo através da mistura com minerais específicos onde ocorre a mineralização dos resíduos resultando em blocos monolíticos completamente estáveis.

De acordo com Gomes *et al.* (2015), existe uma crescente preocupação com relação aos impactos ambientais gerados pelos aterros de resíduos sólidos, o que vem promovendo uma série de estudos para a determinação do risco ambiental efetivo de um aterro de resíduos sólidos dentro de suas peculiaridades técnicas.

A contaminação das águas subterrâneas é a principal preocupação relacionada com o resíduo aterrado (EL-FADEL; FINDIKAKIS; LECKIE, 1997). Segundo Varank *et al.* (2011) o lixiviado de aterros contém muitos componentes tóxicos: aromáticos, halogenados, pesticidas, metais pesados, amônio, cresóis e fenóis substituídos e clorados. Além da possibilidade de transporte de contaminantes orgânicos através das camadas geossintéticas por difusão (PARK e NIBRAS, 1993). Há dois problemas relacionados ao transporte de

contaminantes em *liner* compostos: o transporte advectivo e dispersivo de contaminantes inorgânicos e orgânicos através de defeitos na solda da geomembrana e através do *liner* de argila subjacente à geomembrana, e o transporte difusivo de contaminantes através de revestimentos compostos não defeituosos. (FOOSE; BENSON; EDIL, 2002; KATSUMI *et al.*, 2001).

A idade do lixiviado pode ser definida a partir da concentração dos poluentes. Dados de aterro de resíduos sólidos antigos apresentam baixa concentração de poluentes e é sabido que ocorre uma dramática alteração dos parâmetros físico-químicos durante a estabilização do aterro de resíduos sólidos. Durante a fase acidogênica o pH do lixiviado cai e há uma alta concentração de componentes orgânicos facilmente biodegradáveis. Na última fase de metanogênica, o pH aumenta, a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e a demanda química de oxigênio (DQO) aumenta em função da degradabilidade do produto orgânico, o carbono é reduzido drasticamente. (VARANK *et al.*, 2017).

As estruturas que compõe um aterro de resíduos contemplam: sistema de impermeabilizante de fundo; sistema de drenagem de lixiviado de fundo e intermediária; sistema de drenagem vertical de gases e de gases; barreira impermeabilizante de cobertura, drenagem pluvial, sistema de monitoramento geotécnico, sistema de monitoramento ambiental, sistema de tratamento de tratamento de lixiviado; e instalações de apoio (ABNT NBR 8.419, 1992; BOSCOV, 2008; CETESB, 2005 e SUSIN, 2010).

2.5 LINERS EM ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

O revestimento de fundo, ou barreira de fundo, é constituído por diversas camadas com propriedades e objetivos distintos. De acordo com Boscov (2008), o revestimento de fundo é composto de baixo para cima por: camada de argila compactada; geomembrana; geotêxtil; material drenante granular e camada de separação e filtração de granulometria intermediária entre os resíduos e a camada drenante.

Todas essas camadas são importantes para o funcionamento do aterro e segundo Musso (2008), esta configuração vem sendo utilizada na base de aterros para resíduos domiciliares, industriais e perigosos. Devido ao contexto

do trabalho, será dada maior atenção a camada de argila compactada. Essa definida como revestimento mineral de fundo ou *compacted clay liner* (CCL), em que apesar de antagônicos (VARANK *et al.*, 2017), Impermeabilização e adsorção são os objetivos principais dessas estruturas.

Liner é a camada individual funcional de fundo que constitui a barreira de fundo. Solos compactados fazem presença constante em barreiras impermeáveis de sistemas de contenção de resíduos. Pode compor as barreiras impermeabilizantes, ou *liners*, de base e das laterais dos taludes do aterro de resíduos (MACAMBIRA, 2002).

2.5.1 Solos Argilosos a sua formação e Composição

A energia cinética dos átomos e dos íons diminui quando a temperatura cai e a energia potencial também diminui quando eles são arranjados de maneira ordenada em um retículo cristalino. A situação físico-química em que os minerais se encontram na rocha em contato com a atmosfera, é uma situação de completo desequilíbrio se comparada a situação ambiental em que a terra se encontrava no instante da formação da rocha (MASON, 1971).

No Brasil, o último grande evento geológico, de grande energia, que ocorreu foi na separação do continente gonduânico, no período cretáceo da era mesozoica, a cerca de 145,5 milhões de anos atrás. No país também se encontra região de clima tropical e subtropical, onde imperam grandes volumes de águas pluviais incidentes por sobre a superfície geológica, potencializando fenômenos de formação de solos residuais. (BRESSANI, FLORES e NUNES, 2005).

Segundo Caputo (1988) os solos são resultado de intemperismo ou meteorização das rochas, são uma função da rocha matriz e dos diferentes agentes de alteração. Como o último grande evento geológico ocorreu há 145 milhões de anos atrás, o solo formado no Brasil é predominantemente resultado do processo de intemperismo das rochas. O clima predominantemente tropical ao longo da extensão do Brasil e a ausência de movimentações estruturais significantes do embasamento desde o final do Cretáceo proporcionaram condições físicas e químicas para tal predominância.

De acordo com Pinto (2002), os solos são constituídos de três fases: sólida (minerais e matéria orgânica), líquida (solução do solo) e gasosa (ar).

Essas fases podem ser encontradas em diferentes proporções, dependendo de fatores como tipo de solo e forma de utilização.

Todas as argilas são constituídas essencialmente por partículas de cristais extremamente pequenas de um número restrito de minerais conhecidos como argilominerais, apresentam textura terrosa, baixa granulometria e geralmente desenvolvem plasticidade quando misturadas a um teor limitado de água (SANTOS, 1975). O termo argilomineral pode apresentar diversos significados: silicatos hidratados em que podem participar cátions de Al, Fe, Mg, K, etc. ou a fração que compreende as partículas menores que $0,2 \mu\text{m}$ responsável pela fixação de cátions e ânions como NH_4^+ , K^+ , PO_4^{3-} , NO_3^- , etc. são as definições dadas por mineralogistas e pedologistas respectivamente (CAPUTO, 1988; LICHT, 2001).

A capacidade de troca catiônica (CTC) de um argilomineral pode ser o resultado do desequilíbrio das cargas resultantes da substituição isomórfica no próprio reticulado cristalino, das ligações químicas quebradas nas arestas das partículas e da substituição de hidrogênio por hidroxilas. Em função de sua gênese as argilas apresentam caráter iônico, sobretudo em contato com a água, além de serem capazes de abrigar em seus interstícios atômicos partículas de menor raio atômico (SANTOS, 1975).

Segundo Santos (1975), umidade residual ou higroscópica que compete à possibilidade de contato direto ou não entre os coloides da argila, com a presença de água, as forças de Van Der Waals exercem ação adesiva entre as partículas, as mantém fixas e evitam o seu deslizamento.

2.5.2 Geossintéticos

Os geossintéticos, segundo NBR 12.553 (ABNT, 2003), são genericamente denominados como produtos poliméricos, industrializados, desenvolvido para utilização em obras geotécnicas, que desempenham uma ou mais funções, dentre as quais impermeabilização. A aplicação de geossintéticos em obras de aterros de resíduos sólidos é essencial, porém não se enquadra no objetivo do presente trabalho.

Comumente utilizada para a finalidade de impermeabilização, o uso da geomembrana (GBR-P), no Brasil, é regrado pela NBR 16.199 (ABNT, 2013), e segundo a mesma, o seu escopo é estabelecer:

“(…) estabelece requisitos a serem cumpridos por projetistas para a especificação e detalhamento dos projetos básico e executivo da instalação de geomembranas termoplásticas utilizadas como barreira em sistemas de controle e desvio de fluxo, em obras geotécnicas ou de proteção ambiental. Estabelece procedimentos também aos proprietários, gerenciadores e fiscalizadores das obras que utilizam geomembranas, assim como as empresas que executam a sua instalação, tendo a finalidade de assegurar a correta execução dos serviços e a qualidade da obra como um todo (ABNT, 2013).”

A NBR 16.199 (ABNT, 2013), especifica metodologia para projeto, execução e controle tecnológico, distinguindo critérios de acordo com tipos de obra. Apresenta metodologia para ensaios destrutivos e não destrutivos a serem realizados após a instalação e em lotes de material fornecido, a saber:

- Ensaio de pressurização;
- Ensaio de lança de ar;
- Ensaio de faísca elétrica;
- Resistência ao cisalhamento;
- Lâmina d'água;
- Ensaios geoeletricos de detecção de vazamento.

2.5.3 Qualidades Geotécnicas para *liners*

Segundo Edil (2003), a espessura do *liner*, o tipo de material utilizado como camada e a permeabilidade são as características geotécnicas mais importantes a se avaliar no material para uso em construção de *liners* em aterro de resíduos sólidos.

Visando a estanqueidade, a NBR 13.896 (ABNT, 1997) define impermeabilização como a deposição de camadas de materiais naturais ou artificiais, que impeça ou reduza substancialmente a infiltração de água no solo. A norma estabelece ainda algumas diretrizes: que no local a ser implantado o aterro haja uma extensa jazida de argila com coeficiente de permeabilidade inferior a $10E-06$ cm/s e uma zona não saturada de no mínimo 3,0 m, além da

necessidade de haver entre a superfície inferior do aterro e o mais alto nível do lençol freático uma camada natural de no mínimo 1,50 m.

Francesschet (2006) estabelece que o solo deva possuir condutividade hidráulica inferior a $10E-07$ cm/s e que para tanto deve apresentar: porcentagem de finos (*filler*) entre 20 e 30%, porcentagem de pedregulho (peso seco retido na peneira 4) inferior ou igual a 30%, índice de plasticidade (IP) entre 7% e 10% e tamanho máximo de partícula de 25 a 50 mm. Boscov (2008) determina que o coeficiente de permeabilidade da argila compactada deva ser menor ou igual a $10E-07$ cm/s e que os requisitos para a barreira mineral são, em ordem de importância: condutividade hidráulica baixa no campo, compatibilidade em longo prazo com as substâncias químicas a serem contidas, capacidade alta de adsorção e coeficiente de difusão baixo.

Segundo Macambira (2002), solos lateríticos argilosos, que apresentam maior quantidade de finos, quando compactados acima da umidade ótima apresentam diminuição do coeficiente de permeabilidade hidráulico (k). CETESB (2005) define que o solo deve ser homogêneo e trabalhável isento de blocos e grandes matacões e apresentam algumas outras diretrizes a serem seguidas: índice de contração (IC) entre 0,5 e 1,00, resistência a compressão simples entre 0,5 e 4,00 kgf/cm², porcentagem de *filler* superior a 30%, limite de liquidez (LL) maior ou igual a 30%, e k em torno de $10E-07$.

Em função da baixa permeabilidade encontrada nas argilas, a capacidade de adsorção do *liner* não era devidamente considerada pois acreditava-se que com a baixa permeabilidade não haveria migração do contaminante. Mas a capacidade de adsorção passou a ser bastante relevante no caso de contaminantes tóxicos metálicos e orgânicos (GUNEY; KOPARAL e AYDILEK, 2008).

2.5.4 Mecanismos de Migração e Retenção em *liner* Mineral

Para se avaliar qualitativamente um material para a sua aplicação como *liner* de aterros de resíduos é importante conhecer os processos físico-químicos que podem ocorrer quando o lixiviado entra em contato com a barreira mineral.

Segundo Costa (2006), quando um fluido aquoso migra em um meio geológico reações que dependem da química das partes ocorrem. Troca iônica,

adsorção, complexação, precipitação, oxidação, redução e filtração de precipitado são exemplos.

Boscov (2008), trata da compatibilidade, considerando a percolação de um soluto no solo. Compatibilidade entre solo e poluente seria com relação as reações químicas em que os efeitos destas se relacionam com as constâncias das propriedades geotécnicas. A plasticidade, compressibilidade, resistência e permeabilidade podem aumentar ou diminuir em contato com o lixiviado.

Palma, Scudelariabilio e Matos (2015) abordam os mecanismos de migração na formação e desenvolvimento de plumas de contaminação em materiais geológicos e água subterrânea. Distinguem os mecanismos em: processos físicos considerando advecção, dispersão hidrodinâmica, dispersão mecânica, difusão molecular; e processos bio-físico-químicos, podendo ser de retardamento ou aceleração, de degradação ou decaimento; considerando os processos de sorção (adsorção/dessorção), precipitação, dissolução, troca iônica, óxido-redução, complexação, filtração, hidrólise, metabolização e volatilização.

Varank *et al.* (2017), se referem à migração de contaminantes orgânicos no solo por meio de difusão e migração de contaminantes inorgânicos por advecção e dispersão. De acordo com Das (2007), as partículas de argila carregam uma carga negativa na sua superfície principalmente devido à substituição isomorfa e quebra na continuidade estrutural em sua borda em função de processos intempéricos. Em argila seca, a neutralidade elétrica é preservada pela atração eletrostática entre os cátions trocáveis como Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ e K^+ e a partícula carregada negativamente superfície. A dupla camada difusa ou *diffuse double layer* (DDL) é formada quando a água é adicionada à argila seca, os cátions e alguns ânions encapsulam a partícula de argila. A concentração de cátions diminui quanto maior a distância das partículas de argila, enquanto a concentração de ânions aumenta quando distância aumenta. A uma distância conhecida da partícula de argila, os cátions e ânions alcançam o equilíbrio.

Esse equilíbrio pode ser expresso através do potencial de carga zero (PZC). O índice da tendência de uma superfície carregada em função do pH é o mesmo requerido para que a carga líquida do adsorvente seja nula, definido PZC. Os grupamentos de hidroxílicos OH^- e os prótons H^+ constituem íons em

potencial, em solução aquosa o adsorvente pode adsorver tanto íons H^+ como íons OH^- , a carga superficial das partículas depende do pH e a superfície dos sítios ativos carrega-se positivamente quando se associa com os prótons do sorvato (em meio ácido) ou se carrega negativamente quando ocorre a perda de prótons para o sorvato (em meio alcalino) com cada componente ativo associando ou dissociando prótons da solução dependendo das características do adsorvente e do adsorvato. O pH do PZC é o pH em que a superfície do adsorvente é positiva e acima desse valor é negativa (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

O pH pode ser interpretado como o logaritmo na base dez da atividade de íons hidrônio em mol por litro multiplicado por menos um ou $(-1) \cdot [H^+] = 10 \text{ mol L}^{-1}$. O pH acusa a quantidade de íons H^+ livres e segundo Nascimento (2014), determina o grau de distribuição das espécies químicas.

Segundo El-Hajji (2006), a espessura da DDL é diretamente proporcional à capacidade de adsorção e inversamente proporcional à sua permeabilidade. Um aumento na espessura da DDL resulta em diminuição da permeabilidade do solo, restringindo o caminho do fluxo disponível para o líquido permear e viajar entre as partículas do solo. O gradiente hidráulico e a pressão têm influências óbvias no *liner* e a troca catiônica acontece instantaneamente quando o lixiviado entra em contato com o solo.

A DDL é definida pelos íons de oxigênio, hidroxilas das folhas de silicato e hidróxido ou pela deficiência de cargas positivas devido a substituição isomórfica no reticulado cristalino dos argilominerais. É composta por uma camada de íons, que naturalmente fazem parte do eletrólito estabilizante, rigidamente ligada à superfície (camada de Stern), que se move rigidamente a ela e que a uma distância, dada pela distribuição de Poisson, a camada difusa de íons começa. Forças de Van Der Waals variam inversamente com potenciais superiores ao cubo das distâncias das partículas e regem as forças de atração entre as partículas coloidais (SANTOS, 1975).

A adsorção pode ser considerada como uma operação de transferência de massa, consiste na possibilidade de separação de certas substâncias difusas em meio fluido por meio de sua retenção na superfície de determinados sólidos, quanto maior a superfície específica do material sólido maior é a capacidade de adsorção (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

De intensidade química ou física (químiosorção e fisiosorção), processos de adsorção são baseados em três mecanismos: estérico, de equilíbrio e cinéticos. Os conceitos de químiosorção e fisiosorção são distintos, mas não são completamente independentes. O processo de adsorção pode ser influenciado por diversos fatores, de diversas maneiras: propriedade do adsorvente, considerando área superficial externa por unidade de massa sólida, porosidade, volume específico dos poros, distribuição e tamanho do poro e grupos funcionais presentes na superfície do mesmo e do adsorvato, polaridade e tamanho da espécie; temperatura influenciando na constante de velocidade de adsorção; e pH (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

Os estudos em *liners* abordam condições de laboratório de maneira a isolar diferentes variáveis, por exemplo a composição química do soluto ou a análise de um fenômeno físico químico em exclusivo (LU, LUAN e ZHANG, 2011; XIE *et al.*, 2008; NGUYEN *et al.*, 2010; STRINGFELLOW, 2011). Ocorre que, na aplicação, todos esses diversos fenômenos físico-químicos acontecem quase que simultaneamente. Além de questões externas e naturais como a idade do lixiviado, o regime de chuvas, temperatura,...; o sistema de impermeabilização composto proposto, afetam diretamente a dinâmica de reações e de fenômenos no *liner*, por vezes comprometendo a sua eficiência como por exemplo a bentonita, utilizada nas mantas GCL (revestimento de argila geossintética), em ambientes ácidos (VARANK *et al.*, 2017).

Navia *et al.* (2005) propõe uma abordagem metodológica a fim de avaliar, em termos de qualidades físico-químicas requeridas, o material sepiolita para a aplicação em *liner* de aterros de resíduos. Segundo o autor argilominerais possuem uma grande capacidade de sorver os poluentes do percolado, assim como íons de metais pesados, graças a sua grande área específica e o grande número de ligações carregadas negativamente. A relação de ensaios proposta pelo autor considera os ensaios relacionados a seguir:

- Carbono orgânico total, Carbono inorgânico total e Carbono total: Segundo Navia *et al.* (2005), em um perfil de solo residual quanto mais próximo da superfície maior o teor de material orgânico, em solos, o termo sorção é utilizado para referir os diversos mecanismos de retenção de íons e moléculas pela fase sólida. No contexto, fenômeno este desejável.

- Espectrometria fluorescente de raio-X (FRX): Segundo Navia *et al.* (2005), a FRX é um ensaio rápido e não invasivo apropriado para a avaliação de sólidos e líquidos. Será realizada para a determinação química quantitativa dos materiais, para aqueles elementos químicos com número atômico maior que 5. O método em questão é usualmente utilizado para a determinação das quantidades de elementos primários e secundários, por exemplo Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, S, Si e Ti em silicatos de rocha, assim como traços de componentes como metais pesados Cd, Cr, Pb e Zn.
- Capacidade efetiva de troca catiônica (CTC): O solo apresenta constituintes minerais e orgânicos que possuem, predominantemente, cargas negativas. Por serem negativos os íons atraem cargas positivas. A capacidade de reter íons positivos é conhecida como capacidade de troca catiônica. É desejada uma alta capacidade de troca catiônica por parte da estrutura do *liner*.
- Capacidade efetiva de troca aniônica (CTA): Definida como o poder do solo de reter ânions na fase sólida, possui relação com o pH do meio, diminui-se o pH aumentam e as cargas positivas do solo e a adsorção aniônica aumenta.
- Difração de raio-X: É o método mais indicado para a determinação das fases cristalinas presentes em um material ideal para a determinação de argilominerais.
- pH: A definição do pH dos materiais utilizados na pesquisa é importante para avaliar-se o transporte de inorgânicos através do *liner*. Varank *et al.* (2017) apresentam nexos causais entre o crescimento do pH e a prevenção de transporte de contaminantes inorgânicos. Serão realizados testes de pH em pontos brancos no material analisado e nas misturas com diferentes teores de RCD e argila.
- Perda na combustão (LOI): Segundo Navia *et al.* (2005) é possível se determinar a massa orgânica total de um solo a partir do ensaio de LOI.

2.5.5 *Liners* alternativos

Segundo Guney, Koparal e Aydilek (2008), a escassez de argila dentro das propriedades geotécnicas requeridas pela EPA vem motivando pesquisas para a utilização de materiais alternativos semelhantes ao solo para sua utilização como *liner* em aterro de resíduos sólidos. Vários materiais geotécnicos alternativos vêm sendo estudados como: misturas com bentonita, areia de fundição, cinzas volantes de carvão, cinzas volantes residuais municipais e borracha de pneu nessa finalidade (ABICHOU *et al.* 2004; CHAPUIS; LAVOIE; GIRARD, *et al.* 1992; COKCA e YILMAZ, 2004; Garlanger et al.GARLANGER; CHEUNG; TANNOUS, 1987;.GLEASON; DANIEL; EYKHOLT, 1997; PALMER; EDIL; BENSON, 2000). Segundo Abichou *et al.* (2004), a aplicação de materiais alternativos pode promover significativa economia financeira, no entanto segundo Guney; Koparal e Aydilek (2008), materiais geotécnicos alternativos podem apresentar propriedades não desejadas principalmente quando em contato com o lixiviado. Por exemplo areias com adição de bentonita, quando permeadas com soluções químicas e lixiviados de aterros sanitários apresentaram significativo aumento na condutividade hidráulica (ALTHER, 1987).

Varank *et al.* (2017) apresentam a concepção de *liner* de adsorção, executado sobre a camada de *liner* impermeabilizante, sob o resíduo, com material de capacidade de adsorção para a retenção principalmente dos metais pesados antes do contato com a CCL.

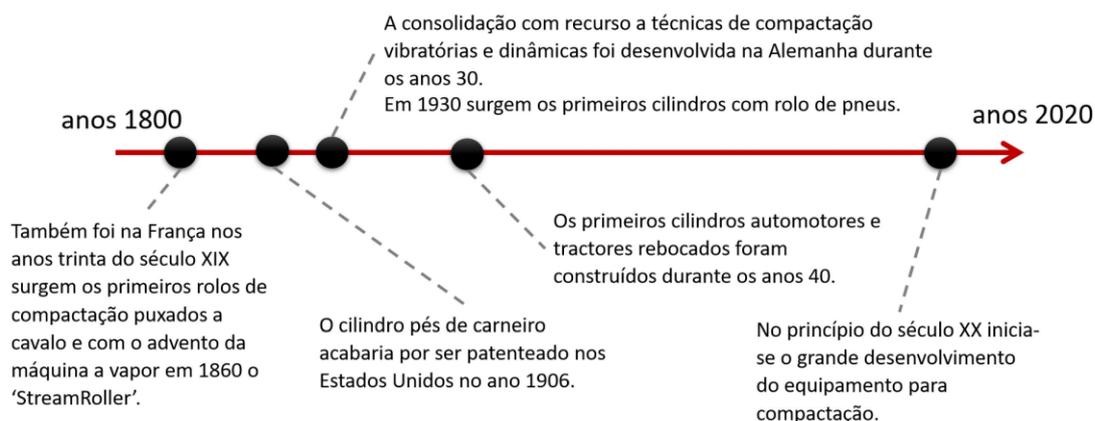
2.6 COMPACTAÇÃO DOS SOLOS

A compactação desde seus princípios mais rudimentares é um método de estabilização dos solos, para tornar o solo firme e impedi-lo de mover-se. Ribeiro (2008) apresenta a história da compactação dos solos adaptada a seguir.

Os primeiros registros históricos de obras de compactação são de 3.500 AC, um rolo compactador de pedra Inca, após isso os Romanos desenvolveram e aplicaram técnicas de pavimentação ao longo de toda Europa compactando solos. Durante a idade média não houveram avanços mas no século XVII com a

necessidade de estradas interurbanas, surge na França o 'Corps des Ponts et Chaussées' com os soldados treinados para o desenvolvimento da infraestruturas, dando origem, posteriormente, a uma escola civil, a 'Ecole des Ponts et Chaussées' onde especialistas desenvolveram as técnicas de pavimentação Romanas. Para as eras modernas a Figura 1 apresenta a linha do tempo adaptada de Ribeiro (2008).

Figura 1 Linha do tempo da história da compactação moderna.



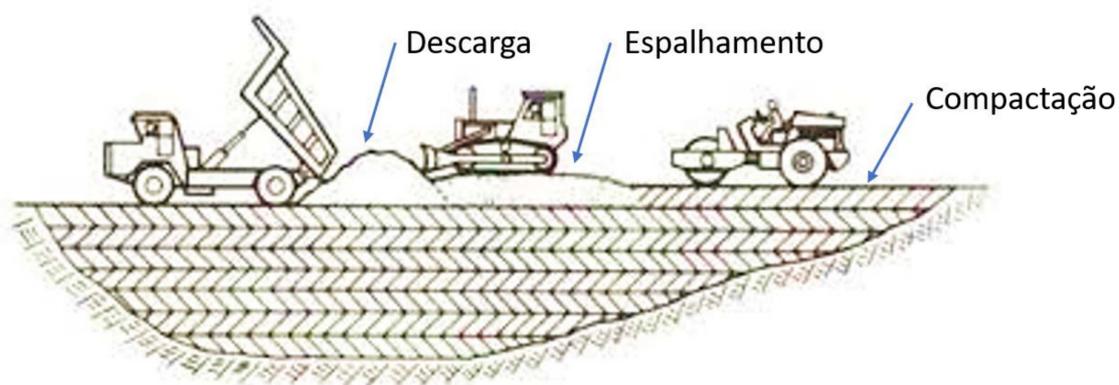
Fonte: Ribeiro (2008).

Segundo Ricardo e Catalani (2007) é possível afirmar que toda a obra de engenharia civil, em algum momento, deverá passar por trabalhos de terraplenagem. Pode-se definir a terraplenagem como o processo para a remoção de excessos de terras para o local onde esteja em falta e a compactação dos solos é uma etapa do processo de terraplenagem de uma área para o apropriado ajuste do greide.

Sob a ótica processual a compactação é uma das etapas do aterro e pode ser considerada uma das mais importantes etapas da terraplenagem pois é ela responsável por garantir um adensamento uniforme em todo o maciço de terra, onde falhas cometidas podem resultar em escorregamentos, processos erosivos e recalques excessivos proporcionando retrabalho. A compactação ainda depende de fatores inexoráveis naturais como variações imprevistas do material nas jazidas e pluviometria. Esses fatores acabam agregando bastante responsabilidade ao trabalho de compactação executado, dadas as proporções financeiras de uma obra de terraplenagem (RICARDO e CATALANI, 2007).

De acordo com Susin, Caetano e Griebler (2019), a execução de *liners* minerais, seja com material importado de jazida seja com material local, é uma obra de terraplenagem e que como tal demanda e faz uso das especificidades técnicas desses tipos de obras. Com o material pré-selecionado, a instalação do *liner* contempla as etapas de lançamento, espalhamento e compactação das camadas, como mostra Figura 2.

Figura 2 Processos de compactação.



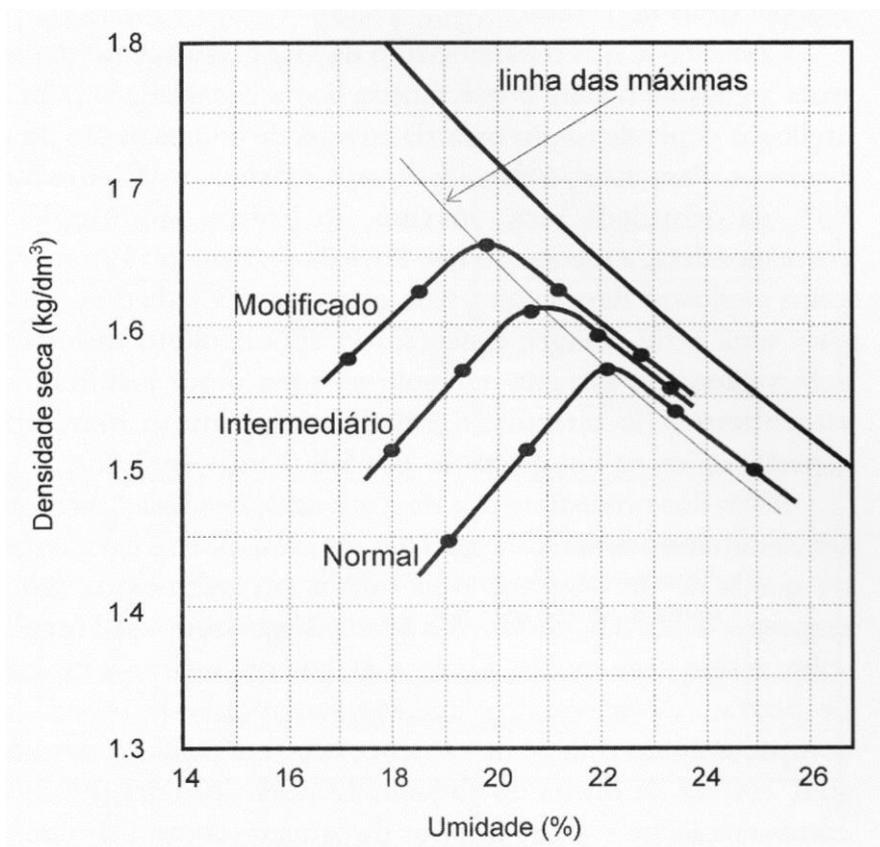
Fonte: Adaptado de Ricardo e Catalani (2007).

De acordo com Caputo (1988), o solo subterrâneo é uma matriz predominantemente composta por três elementos de estados físicos distintos: ar, água e minerais. Segundo Pinto (2002) os trabalhos de compactação do solo objetivam a densificação mecânica dos solos. O que ocorre com a utilização de equipamentos pesados, usualmente rolos compactadores, mecanicamente promovendo a expulsão da fase gasosa com o aumento do fator de empacotamento do material. Sendo a água um dos três constituintes do solo, tal processo é totalmente condicionado ao teor de umidade.

Ainda segundo ao autor a compactação, se realizada com pouca umidade apresenta grande atrito entre as partículas sólidas e pouca redução de vazios e se realizada com umidade muito elevada (alto grau de saturação) a expulsão do ar fica comprometida e a água passa a promover um maior afastamento entre as partículas sólidas. Em 1933 o engenheiro norte americano Proctor cunhou o termo técnico umidade ótima dos solos, definida como o teor de umidade para que se atinja, em uma determinada energia aplicada, uma massa específica seca máxima. A água provoca um efeito de lubrificação nos sólidos que nos processos de compactação se acomodam em um arranjo mais cerrado (PINTO, 2002).

O ensaio de Proctor surgiu a partir de seus apontamentos técnicos e é mundialmente padronizado. Também chamado de ensaio de compactação, este foi normatizado no Brasil pela ABNT na norma NBR 7.182 em 1986 com posteriores atualizações, a última em 2016. A Figura 3 apresenta a curva de compactação de Proctor, onde é possível perceber a relação direta do peso específico seco máximo com o teor de umidade e a limitação que o material impõe com relação à umidade ótima.

Figura 3 Curvas de Compactação.



Fonte: Pinto (2002).

Já que o *liner* é uma obra de terraplenagem, a execução dos mesmos fica condicionada aos requisitos legais aplicáveis às obras de terraplenagem convencionais, onde no Brasil as Normas ABNT e DNER contemplam respectivamente:

- Normas ABNT: NBR 5.681/2015 – Controle Tecnológico da execução de aterros em obras de edificações; NBR 9.895/1987 – Solo – Índice de Suporte Califórnia; NBR 6.457/1986 – Amostras de Solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de

Caracterização; NBR 9.603/2015 – Sondagem a Trado Manual; NBR 12102/1991 MB 3.443 – Controle de compactação pelo método de *Hilf*; NBR 9.813/2016 – Solo – Determinação de massa específica aparente do solo *in situ*, com emprego de cilindro de cravação; NBR 7.181/2018 – Solo – Análise Granulométrica; NBR 6.459/2016 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez; NBR 7.180/2016 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade; NBR 7.182/2016 – Solo – Ensaio de compactação.

- Normas DNER: DNER-ME 213/94 – Solos – Determinação do teor de umidade; DNER-ME 088/94 – Solos – Determinação da umidade pelo método expedito do álcool; DNER-ME 041/94 – Preparação de Amostras de Solos para Ensaio de Caracterização; DNER-ME 129/94 – Compactação dos Solos; DNER-ME 080/94 – Análise Granulométrica dos Solos; DNER-ME 122/94 – Solos – Determinação do Limite de Liquidez; DNER-ME 082/94 – Solos – Determinação do Limite de Plasticidade; DNER-ME 049/94 – Índice de Suporte Califórnia (CBR); DNER-ME 052/94 – Determinação do Teor de Umidade com o Emprego do *SPEEDY*; DNER-ME 092/94 – Determinação da Densidade Aparente “*IN SITU*” com Emprego do Frasco de Areia.

As normas DNER são mais voltadas às técnicas de pavimentação, mas possuem igual relevância em sua aplicabilidade às da ABNT. Essas normas apresentam critérios técnicos a serem seguidos nos trabalhos de terraplenagem, como caracterização e ensaios de Proctor por batelada de material, onde que cabe salientar algumas definições:

- Praça de compactação: área determinada em planta para a intercalação das atividades de terraplenagem de uma obra. Com a obra dividida em praças enquanto se realiza o espalhamento em uma praça, compacta-se outra e testa-se outra, assim sucessivamente;
- Camada de compactação: os trabalhos de compactação devem ser realizados de baixo para cima, de maneira que as camadas de solo compactado vão sendo controladas e quando aprovadas ficam

sotopostas. A camada de compactação é a espessura de material a ser espalhada, compactada e controlada na praça;

- Fecha: Segundo Ricardo e Catalani (2007), as primeiras passadas do rolo compactador sobre a camada fofa são as que agregam maior compactação ao material, a velocidade do rolo, espessura da camada e número de fechas determinam a qualidade e produção dos trabalhos de compactação. O rolo compactador passa uma vez na ida e outra vez na volta sobre a camada fofa configurando uma fecha;
- Controle Tecnológico (CT): O CT é realizado por camada, por praça de compactação visando garantir a qualidade da obra. Segundo Fortes e Merighi (2004), o CT trata da amostragem dos serviços em execução e da aplicação de ensaios para verificação das diversas fases dos trabalhos de execução, desde a seleção dos materiais, misturas ou aplicação desses materiais, até fases posteriores;
- Categoria dos Materiais: para a engenharia civil materiais de terraplenagem, em função das diferenças técnicas para a movimentação de solos e rochas, são distinguidos em categorias, a saber: Materiais de 1ª categoria são facilmente escaváveis com equipamento de terraplenagem convencionais; de 2ª categoria são dificilmente escaváveis com equipamento de terraplenagem convencional, sendo estes escarificáveis; e materiais de 3ª categoria não são escaváveis com equipamento convencional de terraplenagem havendo a necessidade de desmonte por explosivos.

A engenharia geotécnica, no intuito de garantir determinado nível de qualidade nas execuções das obras de terraplenagem, sobretudo na compactação dos solos, estabeleceu a partir das normas supracitadas critérios e metodologias técnicas para a realização do CT. Acordando com estas o CT da compactação deve avaliar *in loco* o teor de umidade e a densidade do material. A determinação da umidade pode ser realizada pelos métodos da frigideira, *speedy* ou estufa, sendo o último o mais preciso; e para a determinação do peso específico pelo método do cone de areia, balão dessimétrico, tubo *shelby* ou

medidor nuclear. O método de *Hilf* controla simultaneamente o desvio de umidade e a densidade aparente.

Segundo Ricardo e Catalani (2007), hoje em dia em função da variabilidade nos métodos, equipamentos e materiais de terraplenagem os projetos geotécnicos não especificam exatamente o número de fechas, a velocidade e o peso do rolo ou a espessura da camada. Os projetos devem apresentar o grau de compactação (GC) requerido e os respectivos desvios possíveis para a umidade ótima. O CT, tanto da execução como da fiscalização, deve atingir essas determinadas faixas para a garantia de qualidade dos trabalhos, homogeneização da densidade e otimização operacional e financeira da execução da obra, pois as compactações realizadas na umidade ótima, usualmente, requerem um menor número de fechas para atingir o GC requerido. A Equação 1 apresenta o cálculo do GC e a Tabela 3 apresenta os GC para projeto por finalidade.

$$GC = \frac{\gamma_s}{\gamma_{sm\acute{a}x}} * 100$$

Eq. (1)
Fonte: Ricardo
e Catalani, 2007

Onde:

GC = Grau de compactação (%);

γ_s = Peso específico aparente seco máximo de campo (kN/m^3);

$\gamma_{sm\acute{a}x}$ = Peso específico aparente seco máximo determinado em laboratório (kN/m^3).

Tabela 3 GC por tipo de obra.

Tipo de Obra	GC (%)
Aterros Rodoviários	90-95% do Proctor Modificado
	95-100% do Proctor Simples
Barragens de Terra	95-100% do Proctor Modificado
Aterros Sob Fundações de Prédios	90-95% do Proctor Modificado
	95-100% do Proctor Simples
Camadas de Base em Pavimentos	95-100% do Proctor Modificado

Fonte: Ricardo e Catalani (2007).

Bosco (2008), atesta que a execução da compactação de argilas ligeiramente acima da umidade ótima, no ramo úmido, apresenta coeficientes de permeabilidade inferiores aquelas executadas na umidade ótima.

Além do Proctor, outros engenheiros contribuíram significativamente nas teorias e métodos para a compactação dos solos dentre eles: Hogentogler, Lambe, Hilf, etc. A teoria da compactação dos solos apresenta no estado da arte duas vertentes: a possibilidade de que a compactação ocorra devido a lubrificação físico química das partículas, quando da aplicação de energia na umidade ótima, havendo organização e aproximação das mesmas e ou a compactação devido as tensões efetivas em função da formação de agregações no solo ou da pressão capilar resultante dos trabalhos mecânicos dos equipamentos (SANTOS, 2015).

Diversos estudos de compactação são realizados no mundo todo com o objetivo da utilização de materiais locais e ou alternativos na confecção de *liners* para aterros de resíduos (AKSAKAL; ANGIN; OZTAS; 2013; BECK-BROICHSITTER; GERKE; HORN, 2018; KAMINSKA e DZIERWA, 2019; QU *et al.*, 2014). Com a inserção da construção civil na indústria 4.0, as novas tecnologias para a compactação contemplam equipamentos para automação dos ensaios, novas técnicas de avaliação da compactação (como a sísmica) e softwares para realização de projetos de compactação a partir dos tipos de equipamentos, qualidade dos materiais e requisitos técnicos requeridos (RIBEIRO 2008; MEEHAN, TEHRANI e VAHEDIFARD, 2012; MEEHAN *et al.*, 2017; SULEWSKA e TYMOSIAK, 2018; LEONARD *et al.*, 2019).

2.7 BACKGROUND GEOQUÍMICO

Segundo Licht (2001), se considerar o planeta terra um sistema dinâmico, o tempo de permanência dos elementos numa certa posição do sistema pode mostrar enormes variações. Essa permanência é sensível às diversas condições ambientais que acontecem nas várias posições desse sistema, qualificada em função da pressão, da temperatura e da disponibilidade de água e oxigênio livres. Na porção superior da crosta ocorrem processos naturais de erosão, sedimentação, diagênese precoce, dissolução, hidrolise e oxidação assim como a maioria dos processos biológicos e antrópicos. Na superfície o ambiente fica em contato direto, ou quase direto, com a atmosfera, em baixas pressões e temperaturas, com oxigênio livre abundante e livre circulação de água.

A presença da água no estado líquido em contato com as rochas promove reações químicas. Ao conjunto destas reações se dá o nome de intemperismo químico, resumido da seguinte maneira: a água da chuva, considerada neste contexto como uma “solução de alteração” ou “de intemperismo”, carregada de substâncias dissolvidas ao longo de sua trajetória pela atmosfera e pelo contato com a biosfera, quando em contato com os minerais primários, estes sofrem reações químicas diversas, que dependem dos reagentes (minerais originais da rocha e soluções de alteração) e das condições em que as reações se processam (clima, relevo, biologia e tempo). O resultado destas reações será o conjunto de minerais secundários (ou supérgenos, pois são gerados na superfície), que constituem as formações superficiais sendo chamados de argilominerais, podendo conter altas concentrações de metais presentes na rocha mãe (TOLEDO e OLIVEIRA, 2009).

De acordo com Licht (2001), são os processos geoquímicos que condicionam a mobilidade dos elementos na geosfera. Estes são responsáveis por diversos eventos naturais relacionados com a litogênese, pedogênese e biogênese. Configuram trocas e interações naturais ou antropogênicas na geosfera, constituindo um sistema aberto integrado de diversos sub-sistemas: litosfera, hidrosfera, biosfera, atmosfera e antroposfera.

Rollinson (1993) cita o CIA para a identificação de condições de intemperismo para rochas sedimentares. Nesbitt e Young (1982), apresentam o CIA, ou *Chemical Alteration Index*, para a classificação do grau de alteração químico das rochas através da Equação 02. Os mesmos ainda estabelecem valores de CIA próximos de 0 correspondem a feldspato, anortita e potássio; próximos de 30 a 45 para basalto; granitos na faixa dos 45; 50 para albite inalterada e para caulinita; e illite entre 75 e 85.

$$CIA = \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O}$$

Eq. (2)
Fonte: Nesbitt
e Young (1982)

Para Rohde (2013), a geoquímica ambiental é a disciplina que estuda os processos geoquímicos na antroposfera, o compartimento geoquímico terrestre produzido pelas ações antrópicas e suas influências. Ele afirma que o estágio atual evolutivo da humanidade nos coloca em uma situação global capaz de

promover alterações de larga escala geológica. A principal característica geoquímica das emissões antrópicas é a existência de elementos em fase móvel em função de desequilíbrios. Segundo Licht (2001), os processos antropogênicos não seguem padrões comportamentais naturais promovendo associações elementares exóticas de maneira que o sistema de classificação geoquímico de Goldschmidt é incompatível.

A constatação de que as atividades antrópicas têm intensificado os impactos nos ecossistemas naturais justifica a necessidade de entendimento das dinâmicas e da disponibilidade dos elementos no meio ambiente. A liberação de elementos tem sido frequentemente associada à contaminação e a efeitos tóxicos sobre as comunidades bióticas. Acima de determinadas concentrações alguns elementos tornam-se perigosos e causam impactos negativos ao ecossistema. Se não há o conhecimento de qual é o nível considerado natural de um determinado elemento no ecossistema não há como saber se sua origem é antrópica ou se tal concentração pode afetar os seres vivos. É de grande importância o estabelecimento do *background* geoquímico seja na identificação de elementos naturais em diferentes amostras seja na comprovação de valores anômalos prejudiciais as formas de vida (RODRIGUES e JÚNIOR, 2009).

Para Licht (2001), nos modelos geoquímicos mais modernos, considera-se as variáveis antrópicas e biológicas como captoras e mobilizadoras de elementos. Segundo Rohde (2013), anomalias são valores acrescidos ao *background* em razão do aumento de concentração em um ou mais elementos que estão relacionados à contaminação ambiental, com algumas exceções.

De acordo com Rodrigues e Júnior (2009), o termo *background* geoquímico surgiu em meados do século XX para avaliar a abundância de elementos nas formações rochosas e atualmente o termo é utilizado nas diversas áreas das ciências ambientais com muitas divergências a respeito do seu significado. Rohde (2013), define *background* geoquímico como a abundância normal de um elemento em um material sem influência antrópica onde o limiar é o valor superior de oscilação do *background*. Segundo Galuszka (2006), *background* se define a uma concentração teoricamente natural de um elemento em uma amostra, considerando as variáveis de tempo e espaço. Existem dois métodos a serem utilizados para a determinação do *background* geoquímico de determinada área, método direto (geoquímico) e método indireto (estatístico).

Segundo Toledo e Oliveira (2009), a influência do material original estende-se não apenas à composição das rochas em vias de intemperismo, mas também à sua textura e estrutura. Quanto à composição das rochas, deve ser levado em conta que os minerais respondem de maneira diversa à alteração intempérica, sendo uns minerais mais frágeis que outros perante esse processo natural. Os minerais formados em temperaturas e pressões maiores serão os primeiros a serem desestabilizados (olivina, plagioclásio cálcico e piroxênio) que cristalizam no ambiente magmático a temperaturas próximas ou maiores que 1.000° C. Já os minerais formados em temperaturas menores têm arranjo cristalquímico mais resistente às condições do meio na superfície. O quartzo, por exemplo, cristaliza em condições mais superficiais, sendo muito mais resistente que outros minerais cristalizados sob pressão e temperaturas mais elevadas. Alguns dos fatores determinantes do intemperismo são o tempo e o material original. O tempo age permitindo que o progresso do intemperismo aprofunde os perfis e que os materiais intemperizados evoluam, em sua organização, rumo à adaptação às condições de superfície.

3 METODOLOGIA

Esta pesquisa iniciou com o estudo de caracterização de possíveis materiais para confecção de *liners* alternativos aplicados como sistema de impermeabilização em aterros sanitários. A pesquisa exploratória inicial, realizada em laboratório, foi executada por Schuck (2018) e a caracterização é apresentada neste capítulo de metodologia. Na sequência, apresenta-se o projeto para a execução *in loco* dos diferentes *liners*; a metodologia para execução de compactação na energia modificada *in loco* e o monitoramento dos *liners* instalados.

3.1. ORIGEM E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E *LINERS* UTILIZADOS NA PESQUISA

Nesta etapa apresenta-se os resultados obtidos por Schuck (2018), que iniciou os estudos de *liners* composto por solo local do aterro sanitário de São Leopoldo e resíduos da construção e demolição (RCD). Estas caracterizações serviram como base para estruturação dessa dissertação de mestrado.

3.1.1. Origem Dos Materiais Utilizados Para Os *Liners*

Os solos estudados para compor os *liners* desta pesquisa são originados de um Aterro Sanitário Privado localizado no município de São Leopoldo, Brasil. O empreendimento recebe o resíduo sólido urbano (RSU) de 26 municípios da bacia do Rio dos Sinos. Está instalado em uma área de 1.350.000 m², onde 600.000 m² são utilizados para a disposição de resíduos, a área restante abriga áreas de preservação, o local tem capacidade para receber 5 milhões de toneladas de resíduos e vida útil de 20 anos (CRVR, 2017).

Foram identificados dois tipos de solos na área para serem utilizados. Um solo argiloso, considerado como solo de referência (branco), que devido suas propriedades geotécnicas é utilizado como *liner* mineral para impermeabilização inferior do aterro de resíduos. Este foi denominado *liner* mineral padrão (LMP). E um solo mais arenoso disponível em maior volume, não possuindo capacidade

hidráulica e mecânica que permitiria a utilização como impermeabilização inferior. Este foi denominado Solo Local (SL).

Os resíduos de construção e demolição (RCD) são originados dos experimentos dos laboratórios de construção da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS). Estes foram divididos em blocos ou placas cerâmicas RCDRV (resíduo da construção e demolição reciclado predominantemente vermelho) e concreto RCDRC (resíduo da construção e demolição reciclado predominantemente cinza). O material, antes da utilização foi beneficiado utilizando um moinho de mandíbulas e um moinho de facas, objetivando a obtenção de uma granulometria das partículas similar a uma areia fina.

3.1.2. Caracterização Dos Materiais Dos *Liners*

A definição da composição dos *liners* utilizando SL e RCD, foi definida considerando o conceito de empacotamento de partículas. A partir das propriedades granulométricas dos materiais, utilizou-se o software *EMMA Mix Analyzer*, para obter melhores composição de empacotamento na mistura SL e RCDRV e RCDRC. As melhores misturas obtidas por Schuck (2018), em sua pesquisa, consideraram: 60% de SL + 40% de RCDRV; 60% de SL + 40% de RCDRC; 60% de SL + 20% de RCDRV + 20% de RCDRC. Também foram caracterizados os materiais 100% LMP e 100% SL como materiais de referências para comparações. A Tabela 4 apresenta um resumo dos índices físicos dos materiais utilizados na pesquisa.

Tabela 4 Caracterização física dos materiais utilizados para composição dos *liners*.

Parâmetros Físicos	Unidade	SL	LMP	RCDRC	RCDRV
Umidade	%	15,74	18,75	1,45	1,13
Peso Específico Natural (γ_n)	kN/m ³	17,13	16,1	-	-
Peso Específico Aparente Seco (γ_d)	kN/m ³	14,8	13,56	13,11	11,47
Peso Específico Real dos Grãos (γ_s)	kN/m ³	26,36	26,2	26,65	26,51
Índices de Vazios (e)	-	0,78	0,93	0,98	1,27
Porosidade (η)	%	43,85	48,26	49,49	55,95
Grau de Saturação (S)	%	48,35	48,73	-	-
Peso Específico Saturado (γ_{sat})	kN/m ³	17,13	16,1	-	-
Limite de plasticidade (LP)	%	20	28	-	-
Limite de liquidez (LL)	%	28	43	-	-
Índice de plasticidade (IP)	%	8	15	-	-
Pedregulho	%	0	0	0	0
Areia Grossa	%	0,23	2,37	50,81	35,97
Areia Média	%	22,1	23,78	36,9	46,4
Areia Fina	%	47,59	35,37	4,35	6,58
Silte	%	22,69	9,29	6,39	8,9
Argila	%	7,4	29,2	1,54	2,15

Fonte: Schuck (2018).

3.1.3. Caracterização Dos *Liners*

Schuck (2018) caracterizou, através de ensaios de compactação e permeabilidade os *liners*, considerando 3 graus de compactação (normal, intermediário e modificado). A Tabela 5 apresenta um resumo dos resultados apresentados pelo autor para a caracterizações dos *liners* utilizados na pesquisa e dimensionamento do experimento piloto.

Tabela 5 Caracterização dos *liners* em laboratório.

Nomenclatura/Energia aplicada	Peso específico aparente seco máximo (kN/m ³)	Umidade ótima (%)	Índice de Vazios	Coefficiente de condutividade hidráulica (cm/s)
SL – Energia Normal	17,9	14	0,47	2,86 x 10 ⁻⁶
SL – Energia Intermediária	18,8	12	0,40	2,96 x 10 ⁻⁶
SL – Energia Modificada	19,7	10	0,34	1,90 x 10 ⁻⁷
LMP – Energia Normal	16,6	18	0,58	9,79 x 10 ⁻⁷
LMP – Energia Intermediária	17,5	17	0,50	9,77 x 10 ⁻⁷
LMP – Energia Modificada	18,8	12	0,39	9,37 x 10 ⁻⁷
SL 60% e 40% RCDRC – Energia Normal	17,7	18,5	0,49	1,36 x 10 ⁻⁶
SL 60% e 40% RCDRC – Energia Intermediária	18,6	12	0,42	1,59 x 10 ⁻⁶
SL 60% e 40% RCDRC – Energia Modificada	20,5	9,5	0,29	5,51 x 10 ⁻⁷
SL 60% e 40% RCDRV – Energia Normal	17	17,5	0,55	1,05 x 10 ⁻⁶
SL 60% e 40% RCDRV – Energia Intermediária	18,7	11,5	0,41	1,46 x 10 ⁻⁶
SL 60% e 40% RCDRV – Energia Modificada	19	12,5	0,39	9,96 x 10 ⁻⁷

Fonte: Schuck (2018).

A partir dessas caracterizações, percebe-se que para utilização como camada de impermeabilização inferior de aterros sanitários (CCL), os *liners* alternativos necessitam um grau de compactação modificada. Esta característica, então, foi adotada para implantação do experimento piloto, objeto de estudo desta pesquisa.

3.2. MONTAGEM DO EXPERIMENTO PILOTO

3.2.1. Local De Instalação

O programa experimental piloto foi instalado na área do aterro sanitário da cidade de São Leopoldo - RS. A Figura 4 apresenta imagem com a aérea do empreendimento, destacando o local de execução do programa experimental.



Figura 4 Aterro de RSU – Unidade São Leopoldo

Fonte: Google Earth (2019).

A Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2008), determina para a região geográfica em questão a Formação Pirambóia. A Formação Pirambóia é essencialmente formada por litologias predominantemente arenosas, friáveis e espessas com poucos e preservados afloramentos. Arenitos de fino a médios, bem selecionados, síltico-argilosos, esbranquiçados, amarelados, avermelhados e arroxeados. No RS a formação foi definida a partir do trabalho de Lavina, Faccini e Ribeiro (1993).

Segundo estes, a Formação Pirambóia é representada por sedimentos de origem eólica, localmente lacustre e fluvial. Os autores ainda caracterizam a Formação Pirambóia como a parte inferior da Formação Sanga do Cabral. Aboarrage e Lopes (1986) apresentam a litoestratigrafia representada na Figura 5.

Figura 5 Litoestratigrafia do Rio Grande do Sul.

Cronoes.		LITOESTRATIGRAFIA						
		Rio Grande do Sul	Santa Catarina	Paraná	São Paulo			
Quat.		Barreiras, Terraços Aluviões	Barreiras, Terraços Aluviões	Qha	Qha			
Terc.		Associação litológica primária	Associação litológica primária	TQi	TQi Fm. Rio Claro			
Cret.	Gr. Bauru				Fm. Marília			
Juro-Cretáceo	Gr. São Bento	Fm. Serra Geral	Fm. Serra Geral	Fm. Serra Geral	Fm. Serra Geral			
		Fm. Botucatu	Fm. Botucatu	Fm. Botucatu	Fm. Botucatu			
Trias.	Gr. São Bento	Mb. Sta. Maria Fm. Rosário do Sul		Fm. Pirambóia				
Permiano	Gr. Passa Dois	Fm. Rio do Rasto	Mb. Morro Pelado Mb. Serrinha	Fm. Rio do Rasto	Mb. Morro Pelado Mb. Serrinha	Fm. Rio do Rasto	Mb. Morro Pelado Mb. Serrinha	Fm. Corumbatal
		Fm. Teresina	Fm. Est. Nova	Fm. Teresina	Fm. Teresina	Fm. Teresina		
		Fm. Serra Alta		Fm. Serra Alta	Fm. Serra Alta			
	Fm. Irati		Mb. Assistência Mb. Taquaral					
	Gr. Guatá	Fm. Palermo	Fm. Palermo	Fm. Palermo				
		Fm. Rio Bonito	Fm. Rio Bonito	Mb. Siderópolis Mb. Paraguaçu Mb. Triunfo	Fm. Rio Bonito	Mb. Paraguaçu Mb. Triunfo	Fm. Tatul	Fm. Tietê
Carb. Sup.	Gr. Itararé	Fm. Rio do Sul	Fm. Rio do Sul	Fm. Rio do Sul			Fm. Aquidauana	
			Fm. Mafra	Fm. Mafra				
			Fm. Campo do Tenente	Fm. Campo do Tenente				
Devoniano	Gr. Paraná	Fm. Ponta Grossa	Fm. Ponta Grossa	Fm. Ponta Grossa				
		Fm. Furnas	Fm. Furnas	Fm. Furnas			Fm. Furnas	
		Embasamento pré-Gonduânico						

Fonte: Aboarrage e Lopes (1986).

Conformando-se, no local em questão, materiais sedimentares, de acordo com Rollinson (1993), a concentração de elementos em sedimentos resulta da concorrente influência entre província geotectônica, intemperismo, diagênese, granulometria dos sedimentos e a hidrogeoquímica dos elementos individuais, as maiores concentrações de elementos traço encontram-se em sedimentos ricos em argila. Diferentes de muitas rochas ígneas é difícil de achar uma relação simples entre a mineralogia de arenitos e sua composição química. Por esta razão a classificação geoquímica de arenitos não imita a classificação mineralógica de basaltos, baseada na proporção de quartzo, feldspato e fragmentos líticos, ao invés disso diferencia entre sedimentos maduros e imaturos.

Sob a ótica pedológica, no Mapa Exploratório Solos do estado do Rio Grande do Sul classifica o solo da região como PLe2 - Planosolo Háplicos e Planosolos Hidromórficos. A Figura 6 apresenta o mapa com a localização da área em questão. Háplico, se refere a todos os demais solos não distinguidos nas classes precedentes Hidromórfico, com restrição de drenagem e com presença de horizonte glei. Planossólico define-se por horizonte B textural com mudança abrupta e sem cores (IBGE, 2002).

.Figura 6 Mapa geológico de localização da área em questão.



Fonte: CPRM (2008).

Compreendem solos minerais, imperfeitamente ou mal drenados, com horizonte superficial ou subsuperficial eluvial, de textura mais leve que contrasta abruptamente com o horizonte B imediatamente subjacente, adensado e geralmente com acentuada concentração de argila (lentes), com permeabilidade lenta ou muito lenta. São solos constituídos por material mineral com horizonte A ou E seguidos de horizonte B plânico. Horizonte plânico sem caráter sódico perde em precedência taxonômica para o horizonte plíntico. Têm ocorrência expressiva no Nordeste brasileiro onde são predominantemente nátricos (norte da Bahia até o Ceará), no Pantanal Mato-grossense e no sul do Rio Grande do Sul, onde são muito explorados com arroz e pastagens. (IBGE, 2002).

Segundo EMBRAPA (2006), a definição de caráter plânico é usado para identificar horizonte adensado e com permeabilidade lenta ou muito lenta, cores acinzentadas ou escurecidas, neutras ou próximo delas, ou com mosqueados de redução, que não satisfazem os requisitos para horizonte plânico e que ocorrem em toda a extensão do horizonte, excluindo-se horizonte com caráter plíntico. É também aplicado para solos com caráter redóxico acima do horizonte B conjugado com mudança textural abrupta.

3.2.2. Adaptação Dos Materiais Para Aplicação Em Campo

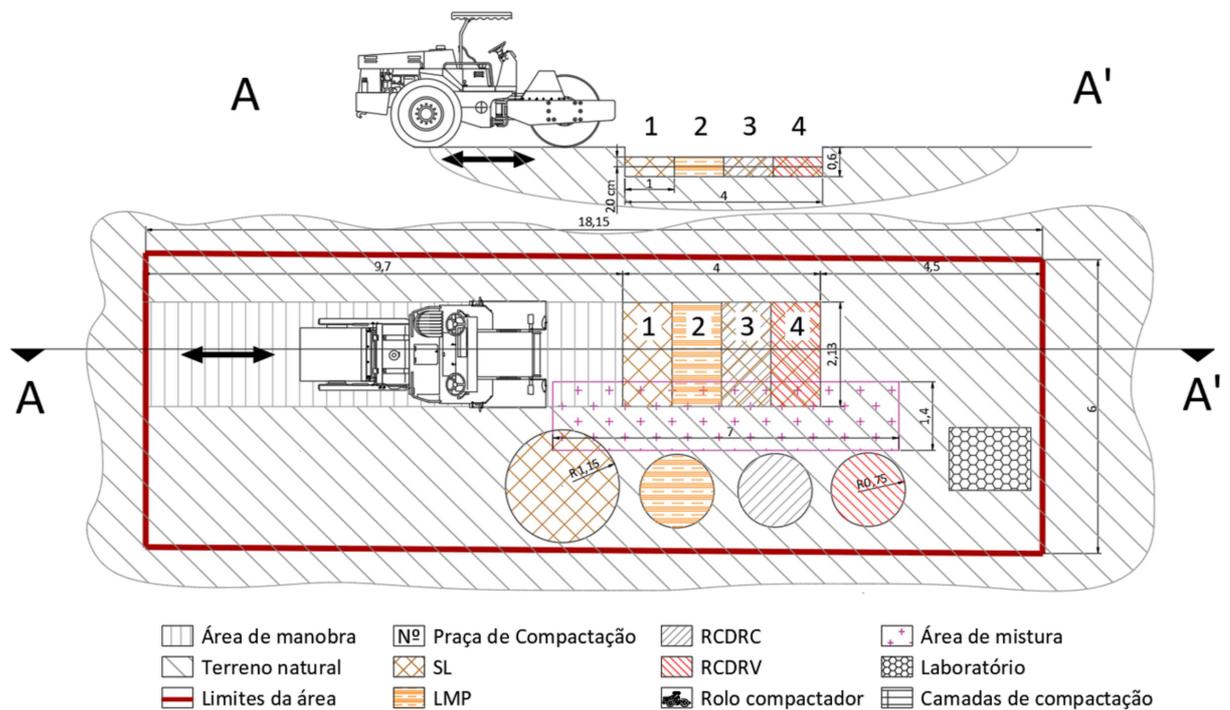
Com o intuito da transferência de um experimento de escala laboratorial para escala piloto, buscou-se utilizar características de materiais que retratem a aplicação prática dos possíveis *liners*. Embora a caracterização relatada no item 3.1 desta metodologia seja essencial para esta pesquisa, a granulometria dos materiais adotada para os ensaios de laboratórios, são difíceis de serem obtidas em uma aplicação real.

Para retratar uma aplicação deste porte, optou-se por triturar os RCD em um moinho de mandíbulas e um moinho de facas de alta rotação. Esse tamanho de partícula é o usual em Usinas de Beneficiamento de RCD no país, motivo pelo qual foi utilizado para montagem do experimento desta dissertação.

3.2.3. Geometria do Experimento

Foram projetados quatro *liners*, dois executados totalmente com material mineral natural (*Liner 1* – 100% SL; *Liner 2* – 100% LMP) e dois com materiais alternativos (*Liner 3* - 60% SL + 40% RCDRC; *Liner 4* - 60% SL + 40% RCDRV). Os quatro *liners* foram dispostos em quatro praças alinhadas, cada uma nas dimensões de 2,13m x 1,0m e 0,40m de espessura da camada. A Figura 8 apresenta o *layout* de instalação dos *liners* estudados.

Figura 7 Layout dos liners instalados no experimento piloto estudado.



A escala de trabalho exigiu área dedicada para a manobra do equipamento de compactação e espaço suficiente para que o rolo conseguisse passar totalmente por sobre as praças de compactação, carregar e descarregar totalmente a energia de compactação sobre a área das mesmas, conforme pode ser visualizado no *layout* da Figura 8 anteriormente apresentada.

3.2.4. Transposição Da Compactação Da Energia Modificada Do Laboratório Para O Campo

Buscando determinar a energia de compactação simulada em laboratório e transpor essa para o ensaio de campo, fez-se um estudo estatístico para

definição deste procedimento. Para o estudo em questão, as energias aplicadas em laboratório para as energias normal, intermediária e modificada foram respectivamente 59,47 kN/m², 130,60 kN/m² e 279,85 kN/m².

Considerando as médias e os erros para o peso específico aparente seco máximo nas três energias estudadas por Schuck (2018) e plotando-se as mesmas em histogramas, observa-se uma sobreposição do peso específico seco máximo nas energias intermediária e modificada. Para que no instante da execução haja certeza de que se está trabalhando na energia modificada o desvio padrão negativo do peso específico aparente seco máximo para a energia modificada foi corrigido através da Equação 3 a seguir.

$$-DPC_{\gamma_s} = \frac{(I-3*DP_I)-(M-3*DP_M)}{2} \therefore \text{Eq. (3)}$$

$$\frac{(18,48-3*0,55)-(19,52-3*0,67)}{2} = 0,34 \frac{kN}{m^3}$$

Onde:

$-DPC_{\gamma_s}$ = Desvio padrão negativo do peso específico aparente seco máximo para a energia modificada;

I = Peso específico médio na energia de compactação intermediária;

DP_I = Desvio padrão do peso específico seco máximo na energia de compactação intermediária;

M = Peso específico médio na energia de compactação modificada;

DP_M = Desvio padrão do peso específico seco máximo na energia de compactação modificada.

Segundo Ricardo e Catalani 2007, não existe relação matemática entre a energia de compactação no campo e no laboratório. No entanto, como a proposta desta pesquisa visa a instalação do experimento simulando uma condição de energia modificada, similar ao obtido em laboratório, esta etapa da metodologia buscou estabelecer critérios técnicos executivos para os materiais em uso na aplicabilidade requerida.

Trabalhando-se com as médias e erros extraídos do trabalho de Shuck (2018), estabeleceu-se uma relação estatística entre o peso específico aparente seco máximo dos materiais compactados em diferentes energias e o índice de vazios dos mesmos. A partir dos resultados do modelo desenvolveu-se um método de campo para a avaliação da energia aplicada na compactação.

Denominado teste de energia recebida, o procedimento do ensaio de campo proposto é apresentado no item 3.2.5. a seguir.

A metodologia proposta para a definição do teste de energia recebida contempla: avaliar a correlação entre a peso específico aparente seco máximo e o índice de vazios em três diferentes energias de compactação de todos os materiais: normal, intermediária e modificada; Testar a hipótese de médias iguais com 95% de certeza; definir equação linear de ajuste; determinar o desvio padrão e as faixas de aceitação para os valores de peso específico aparente seco máximo e índice de vazios em campo para que se atinja a energia modificada na compactação *in loco* (ensaio de energia recebida).

Neste sentido, o estudo de Mitchell, Hooper e Campanella. (1965) encontrou relação direta entre a energia de compactação e a impermeabilização. A pesquisa aponta para a relação que existe entre o índice de vazios e a porosidade de maneira que na energia modificada, o espaço no solo é reduzido e a permeabilidade está relacionada com a área da seção destes poros. Conforme apresentado na Tabela 7 do item 3.1.3, o material alternativo somente atinge o coeficiente de permeabilidade inferior a $10E-07$ cm/s se compactado na energia modificada.

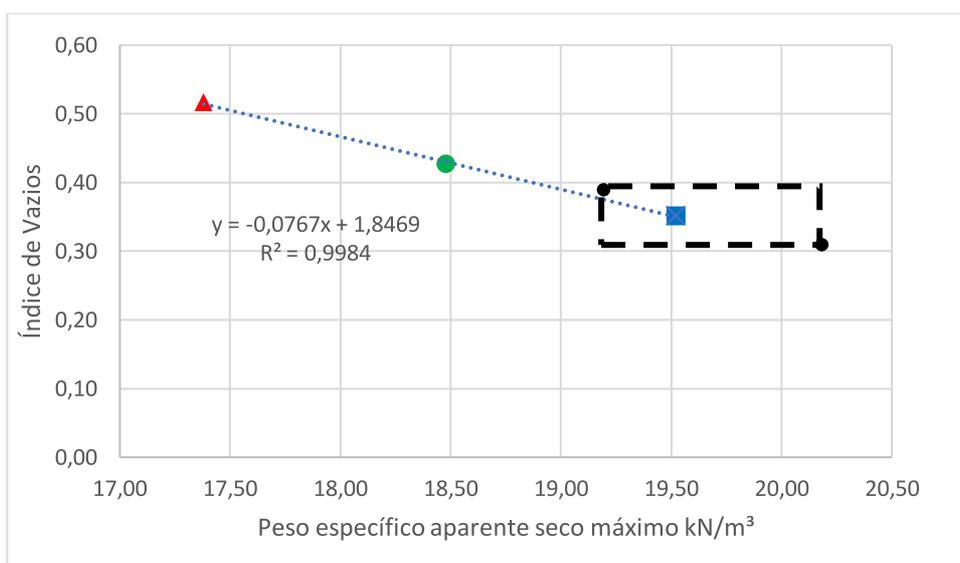
Aplicando-se o teste *t* para hipótese de igualdade entre as médias do peso específico aparente seco máximo e do índice de vazios dos materiais naturais e alternativos (resultados apresentados na Tabela 7 do item 3.1.3), com 95% de confiança, aceita-se a hipótese nula de que as médias são iguais. Foram obtidos $t = 0,46779$ e $t = 0,38173$, respectivamente, para o peso específico seco aparente máximo e o índice de vazios. Assim, não foi evidenciada diferença entre as médias e as correlações avaliadas entre as duas categorias de material. Considera-se então para o estudo, nos critérios determinados, que todos os materiais são iguais.

No teste de correlação linear de Pearson, para a comparação entre as médias dos resultados de peso específico aparente seco máximo e de índice de vazios, obteve-se correlação forte negativa ($t = -0,99984$). Isto significa dizer que existe uma correlação estatística entre as médias supracitadas. E, no teste de hipóteses para igualdade entre as médias (teste *t*), não há evidência suficiente, ao nível de significância de 5%, para rejeitar a hipótese de que as médias entre

peso específico aparente seco máximo e índice de vazios, nas três energias, sejam iguais, com $t = 29,85$.

A comprovação estatística analisada e apresentada anteriormente, permitiu traçar uma equação de regressão linear que permite uma relação entre índice de vazios e peso específico aparente seco máximo. A Figura 8 apresenta a representação gráfica e o modelo de regressão gerado a partir dessa análise. O retângulo destacado na Figura 8, representa o a combinação das variáveis estudadas que devem ser buscadas na instalação do experimento em campo. Ou seja, para conseguir transpor as condições de energia modificada do laboratório para o experimento piloto em campo, os *liners* devem possuir características físicas variando entre 0,31 e 0,39 para o índice de vazios e 19,19 kN/m^3 e 20,19 kN/m^3 para o peso específico aparente seco máximo.

Figura 8 Interpolação entre o índice de vazios e o peso específico aparente seco máximo.



Nos pontos do gráfico, o triângulo representa as médias na energia normal de compactação, o círculo as médias na energia intermediária e o quadrado as médias na energia modificada.

A regressão linear apresentou coeficiente de correção linear de 0,9984 e erro médio quadrático de 0,062843. Em outros termos, no modelo 99,84% do peso específico aparente seco máximo é explicado pelo índice de vazios e a acurácia do modelo numérico proposto é de 0,062843 nas mesmas dimensões da variável analisada.

3.2.5. Procedimento De Execução Das Praças

Para execução das praças aplicou-se a metodologia apresentada anteriormente nos itens 3.2.3 e 3.2.4. Buscando garantir essa execução, o procedimento levou em consideração:

- Material local foi escavado no dia e com determinação do Teor de umidade;
- Determinação do Teor de Umidade do RCDR;
- Todo o material utilizado foi pesado *in loco* e misturado utilizando caixas kanban, pás, enxadas e retro-escavadeira;
- Mistura do material 2,5 (SL): 1 (RCDR);
- Utilizou-se duas camadas de compactação de 20 cm, cada, compactadas com rolo liso, vibratório, com peso de 15 ton e a velocidade de execução de 5 km/h e 6 fechas de rolo;
- Coleta da amostra indeformada para calcular o índice de vazios e o peso específico aparente seco máximo. A amostragem indeformada foi realizada com o método de cravação de cilindro, conforme a NBR 9.813 (ABNT, 2016). A amostra foi rasada e o teor de umidade obtido na estufa, segundo a NBR 6.457 (ABNT, 2016).

Os valores determinados a partir da modelagem, máximos e mínimos para peso específico aparente seco máximo e para o índice de vazios são respectivamente: $0,39 > e > 0,31$ e $19,19 \text{ kN/m}^3 < \gamma_s < 20,19 \text{ kN/m}^3$.

O procedimento de execução das praças está resumido nas Figuras 9 a 13 a seguir apresentadas e para aplicá-lo houve no mínimo três dias de sol anteriores à data de execução.

Figura 9 Procedimento de mistura do material.

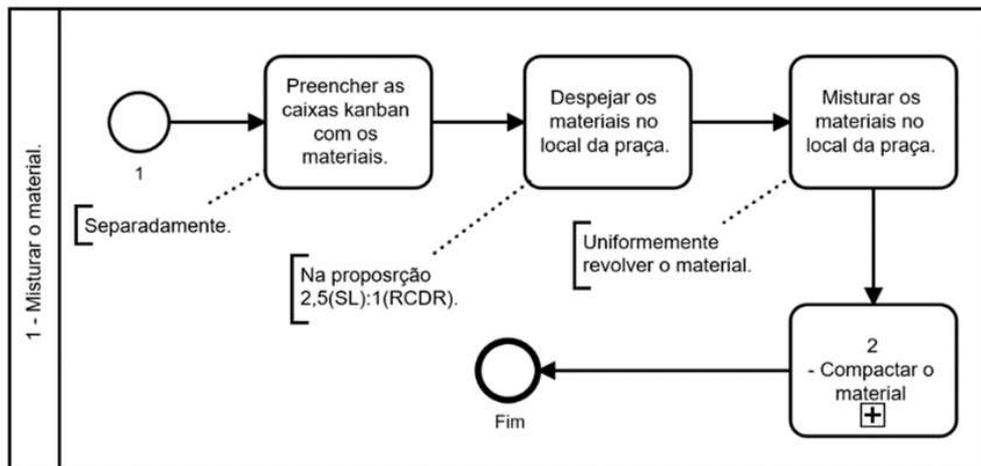


Figura 10 Procedimento de compactação do material.

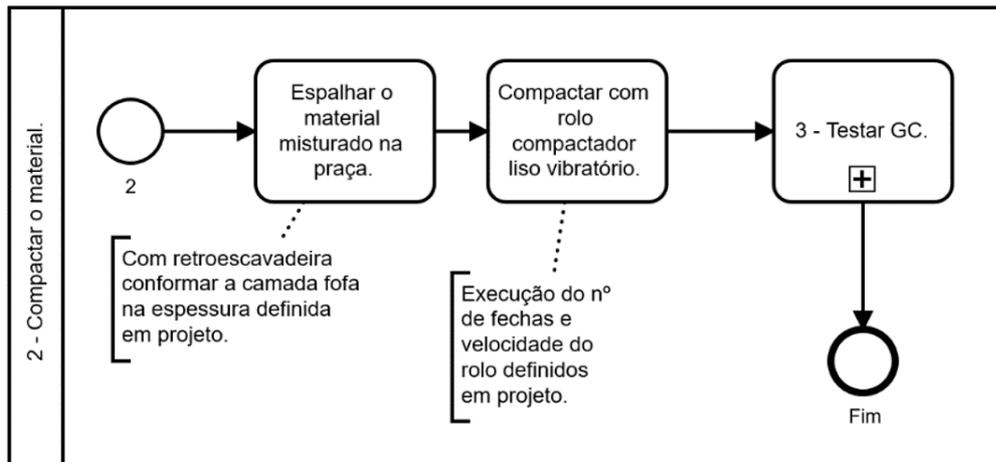


Figura 11 Procedimento para determinar o GC do liner.

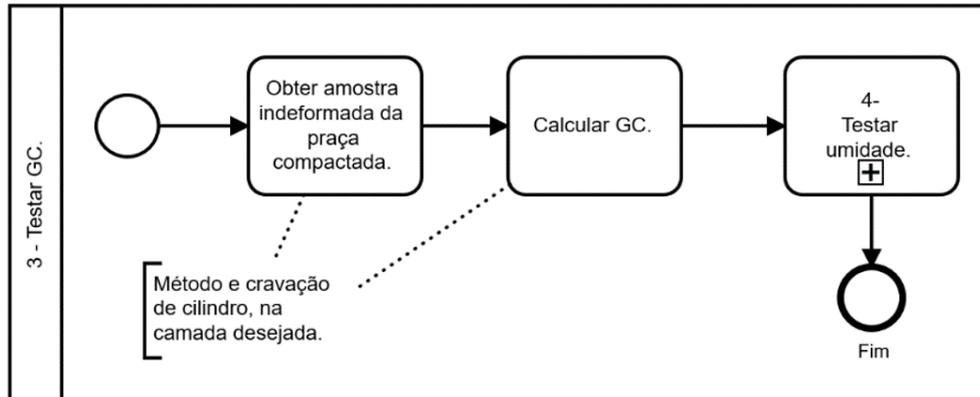


Figura 12 Procedimento para testar a umidade do material.

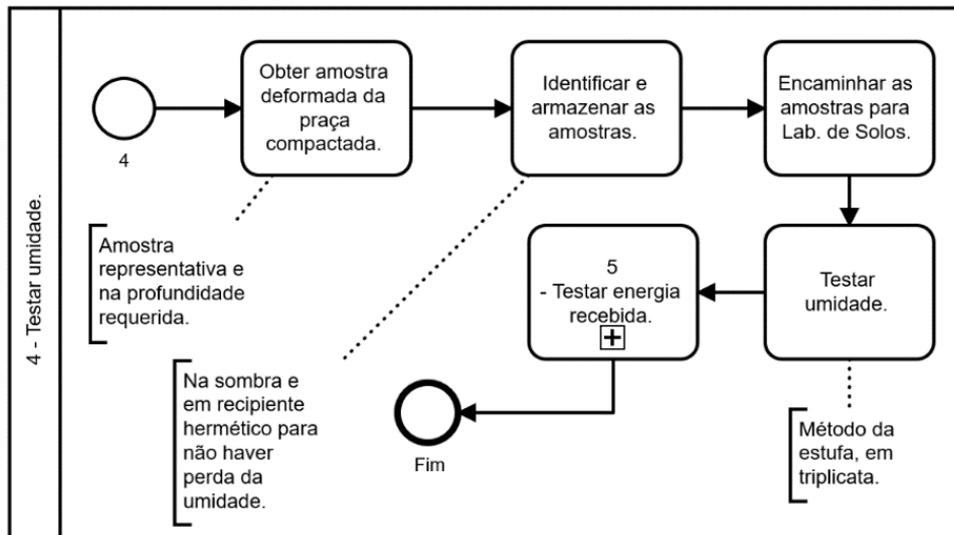
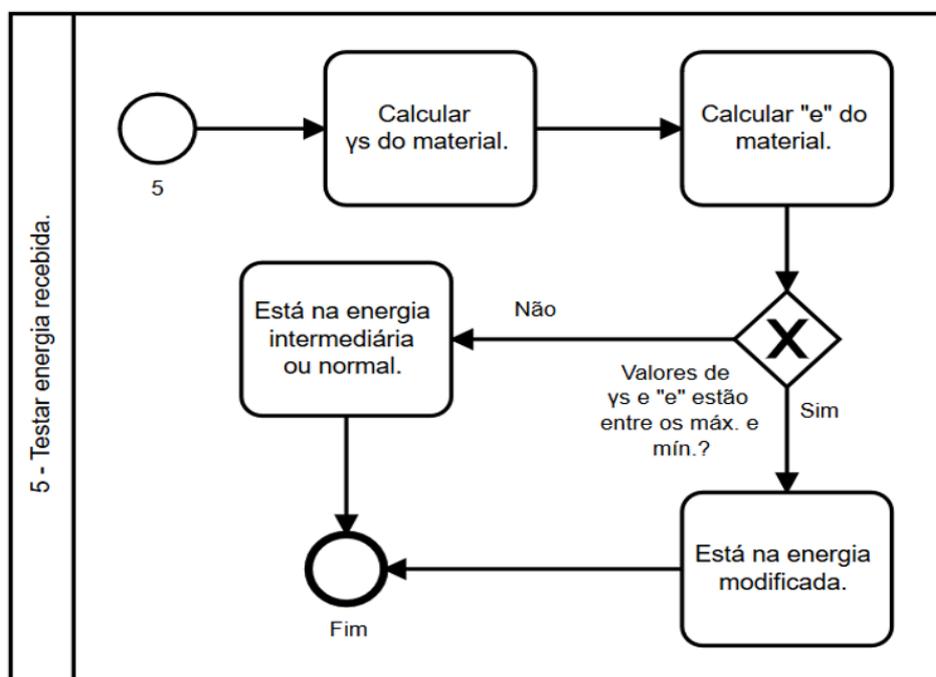


Figura 13 Procedimento para testar a energia de compactação recebida na praça.



A Tabela 6 apresenta os quantitativos de materiais utilizados para montagem das praças. Esses valores foram calculados a partir dos traços determinados e do peso específico dos materiais.

Tabela 6 Quantitativos de material para a execução dos *liners*.

Material (kg)	Liner 1 - 100% SL	Liner 2 - 100% LMP	Liner 3 - 60% SL + 40% RCDRC	Liner 4 - 60% SL + 40% RCDRV	Total (kg)
SL	-	905,50	543,30	905,50	2.354,31
LMP	827,80	-	-	-	827,80
RCDRC	-	-	320,60	-	320,60
RCDRV	-	-	-	280,71	280,71
Total	827,80	905,50	863,90	1.186,21	3.783,41

Fonte: Adaptado de Shuck (2018).

A obra foi locada no dia 3 de maio de 2019 a partir de um ponto obtido com GPS de mão e trena. A execução dos *liners* ocorreu no dia 17 de maio de 2019. A área foi isolada, todos os trabalhos foram executados com o devido uso de equipamentos de proteção individual (EPIs). No dia da execução dos trabalhos o tempo estava bom.

Os trabalhos de campo ficam largamente condicionados as dimensões dos equipamentos de terraplenagem e as habilidades dos operadores. A

compactação ocorreu em duas camadas de 20 cm com 3 fechas considerando a ida uma passada e a volta outra passada do rolo, ou seja, duas passadas são iguais a uma fecha. O fluxograma de instalação do experimento está apresentado na Figura 14 a seguir.

Figura 14 Fluxograma de instalação do experimen



to.

3.3. MONITORAMENTO DO EXPERIMENTO PILOTO

Houve o monitoramento mensal da área do experimento. Quando nos instantes de visita já eram coletadas as diferentes amostras deformadas e indeformadas para as análises do programa experimental.

3.3.1. Tempo De Monitoramento

O experimento piloto foi monitorado durante 4 meses entre os meses de maio de 2019 e agosto de 2019. A Tabela 7 apresenta um resumo das análises executadas em cada período.

Tabela 7 Tempo e parâmetros de monitoramento do experimento piloto.

Etapa	Monitoramento Geotécnico	Monitoramento Geoquímico (semiquantitativo)
Tempo 0 dias	Peso específico aparente seco máximo; Umidade natural; Índice de Vazios; Porosidade; Coeficiente de condutividade hidráulica; CBR; Expansão; Determinação de umidade natural;	pH; FRX.
Tempo 30 dias	-	pH; FRX.
Tempo 60 dias	-	pH; FRX.
Tempo 90 dias	Peso específico aparente seco máximo; Umidade natural; Índice de Vazios; Porosidade; Coeficiente de condutividade hidráulica; Resistência ao Cisalhamento; DCP <i>in loco</i> ; Determinação de umidade natural;	pH; FRX.

Legenda: Tempo 0 (17/05/2019); Tempo 30 (13/06/2019); Tempo 60 (18/07/2019) e Tempo 90 (22/08/2019).

3.3.2. Monitoramento Geotécnico dos *liners*

A Tabela 8 a seguir apresenta os métodos para análises geotécnicas dos *liners* estudados.

Tabela 8 Apresentação dos métodos para avaliação do monitoramento geotécnico dos *liners*.

Parâmetros Físicos	Determinação / Método
Condutividade Hidráulica	ABNT NBR 14.545/00
CBR e Expansão	NBR ABNT NBR 9.895/16
DCP <i>in loco</i>	ASTM D6951/D6951M – 18
Determinação de umidade natural	Métodos <i>Speedy</i> , DNIT/DNER ME 052/94, e estufa ABNT NBR 6.457/86
Determinação da umidade ótima	Ensaio de Proctor ABNT NBR 7.186/16
Resistência ao Cisalhamento	ASTM D3080
Massa específica natural	ABNT NBR 9.813/87
Massa específica natural seca máximo	Ensaio de Proctor ABNT NBR 7.186/16
Peso específico natural	Método de cravação de cilindro, de acordo com ABNT NBR 9.813/87;
Determinação do grau de compactação (GC)	Realizadas <i>in loco</i> ABNT NBR 9.813/16 e ABNT NBR 6.457/86
Granulometria por peneiramento	ABNT NBR 7.211/17

Os ensaios geotécnicos foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da empresa Terraservice (LMST), laboratório com certificação de calibragem INMETRO. O ensaio de cisalhamento direto foi realizado de acordo com a norma internacional ASTM D3080 - 04 - *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions* (ASTM, 2011). Foi executado aplicando-se três cargas normais (50 kPa, 100 kPa e 200 kPa) e velocidade de 0,2 mm/min. O ensaio foi realizado a partir de amostras indeformadas obtidas na última data de monitoramento, para a determinação da coesão e do ângulo de atrito interno dos materiais *in loco*.

3.3.3. Monitoramento Geoquímico dos *liners*

3.3.3.1 Amostras e análises

Nas datas de monitoramento mensal, amostras representativas indeformadas do material de cada *liner* foram tomadas e encaminhadas para análise química. As amostras foram tomadas em pontos distintos e aleatórios de cada *liner* e em profundidade de 5 a 15 cm (Figura 15).

As amostras obtidas foram preservadas em sacos de polipropileno transparentes com fecho *zip-lock* e devidamente identificadas. Todo o material utilizado na amostragem foi previamente lavado com água deionizada e as

coletas foram realizadas com luvas inertes. Na realização da coleta não houve utilização de protetor solar ou repelente de insetos.

Figura 15 Pontos e material para a coleta.



Nessas amostragens foram realizados ensaios para determinação do pH, e FRX. A Tabela 9 a seguir apresenta os métodos para análises químicas e ambientais dos *liners* estudados.

Tabela 9 Apresentação dos métodos para avaliação do monitoramento geoquímico dos *liners*.

Parâmetros Químicos	Determinação / Método
pH	(20 mL de solo em proveta) + (20 mL de água deionizada) / APHA (2012)
FRX	Equipamento da marca PANalytical / semiquantitativo.

Os ensaios para a determinação do pH foram realizados no Laboratório de Saneamento Ambiental da Unisinos, em datas subsequentes às das amostragens indeformadas. A definição do pH é de grande importância pois determina a mobilidade de alguns elementos (KABATA-PENDIAS, 2011).

No it Fóssil foram executados o ensaio de FRX. Com este foi possível uma determinação semiquantitativa dos elementos constituintes dos materiais

em análise. A análise FRX realizada no período em momentos diferentes possibilita a avaliação das alterações químicas dos *liners* no tempo.

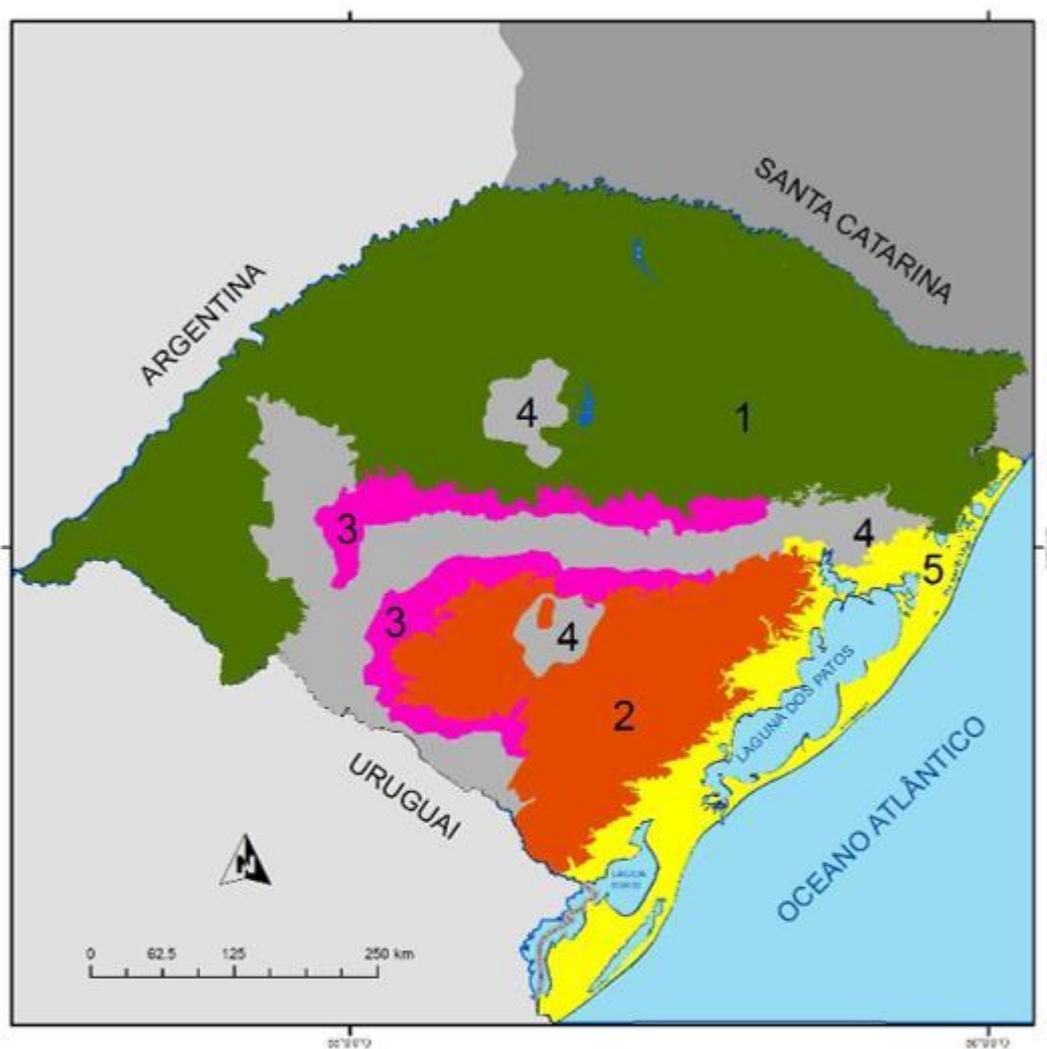
Secaram-se as amostras em estufa a 60°C por 24 h. Em grau de ágata, reduziu-se a granulometria das mesmas, obtendo-se uma fração o mais fina possível. Pesou-se 5 gramas de amostra e mais 1 gr de amido de milho, homogeneizou-se a mistura, e esta foi adicionada no suporte para a confecção das pastilhas para a análise em fluorescência de raios X (FRX). Para a análise, colocou-se a pastilha preparada em um suporte existente no equipamento, realizando-se a leitura da amostra.

Para um adequado estudo da situação e evolução geoambiental dos *liners* os resultados obtidos são confrontados com o *background* geoquímico e com análises químicas do lixiviado.

3.3.3.2 Definição do Background Geoquímico

Segundo Rodrigues e Júnior (2009), no Brasil não há um sistema elaborado e amplo que contenha valores padrões de referência de elementos, para a avaliação de áreas em relação à contaminação por esses. A Resolução n° 420 do CONAMA, Capítulo II, Art. 7° § 3° define " Os VRQ's do solo para substancias químicas naturalmente presentes serão estabelecidos pelos órgãos ambientais competentes dos Estados e do Distrito Federal...", na Portaria FEPAM n.° 85/2014 " Dispõe sobre e define o estabelecimento de Valores de Referência de Qualidade (VRQs) do solo para nove elementos químicos naturalmente presentes nas diferentes províncias geomorfológicas/geológicas do estado do Rio Grande do Sul. De acordo com FEPAM (2014), é apresentado na Figura 16 o mapa com as diferentes províncias. Para a região em questão caracteriza-se província geomorfológica 4 – rochas sedimentares arenitos do Planalto, da Depressão Periférica e do Escudo Sul-rio-grandense.

Figura 16 Províncias geoquímicas do Estado do RS.



Províncias geomorfológicas/geológicas do Estado do Rio Grande do Sul

- 1 - rochas vulcânicas do Planalto
- 2 - rochas cristalinas do Escudo Sul-riograndense
- 3 - rochas sedimentares pelíticas da Depressão Periférica
- 4 - rochas sedimentares areníticas do Planalto, da Depressão Periférica e do Escudo Sul-riograndense
- 5 - sedimentos inconsolidados da Planície Costeira

Fonte: FEPAM (2014).

A Tabela 10 apresenta valores de VRQs para folhelhos, por Bowen (1979), mais completos; para arenito por Mason e Moore (1982); e os valores determinados por FEPAM (2014).

Tabela 10 Valores de referência (VRQs) para determinação de *background* geoquímico (ppm).

Rocha Sedimentar	Folhelho Médio	Arenito	Prov. Geom. 4
Elemento (ppm)	Bowen (1979)	Mason e Moore (1982)	FEPAM (2014)
Ag	0,07	0,01-0,1	-
Al	88000	25000	-
Ar	0,05-0,5	-	-
As	13	1	-
Au	0,0025	-	-
B	130	35	-
Ba	550	1-10	-
Be	3	0,1-1	-
Bi	0,48	0,17	-
Br	24	1	-
C	14000	-	-
Ca	16000	39100	-
Cd	0,22	0,01-0,1	0,42
Ce	96	30	-
Cl	160	10	-
Co	19	0,3	7
Cr	90	35	21
Cs	5,5	0,1-1	-
Cu	39	1-10	11
Dy	5,8	2,6	-
Er	4	1,6	-
Eu	1,2	0,8	-
F	800	270	-
Fe	48000	9800	-
Ga	23	12	-
Gd	6	3,2	-
Ge	2	0,8	-
H	5600	-	-
He	0,004-0,007	-	-
Hf	2,8	3,9	-
Hg	0,18	0,3	0,015
Ho	1,8	1	-
I	19	1,7	-
In	0,057	0,01-0,1	-
K	24500	10700	-
Kr	0,0008	-	-
La	49	16	-
Li	76	15	-
Lu	0,8	0,4	-
Mg	16000	7000	-

Mn	850	10-100	-
Mo	2,6	0,2	-
N	600	-	-
Na	5900	3300	-
Nb	18	0,01-0,1	-
Nd	41	15	-
Ne	0,00008-0,0002	-	-
Ni	68	20	7
O	483000	-	-
P	700	170	-
Pb	23	7	16
Pr	11	4	-
Pt	0,0001	60	-
Ra	1,1 μ	-	-
Rb	160	-	-
S	2400	240	-
Sb	1,5	0,01-0,1	-
Sc	13	1	-
Se	0,5	0,05	-
Si	275000	368000	-
Sm	7	3,7	-
Sn	6	0,1-1	-
Sr	300	20	-
Ta	2	0,01-0,1	-
Tb	1	0,6	-
Te	<0,1	-	-
Th	12	1,7	-
Ti	4600	1500	-
Tl	1,2	0,5	-
Tm	0,6	0,3	-
U	3,7	0,45	-
V	130	20	76
W	1,9	1,6	-
Xe	0,0003-0,001	-	-
Y	41	15	-
Yb	3,9	1,2	-
Zn	120	16	29
Zr	160	220	-

Para efeito de comparação, mesmo considerando as diferenças físicas e de estado dos elementos em análise, Gomes e Caetano (2018a) apresentam (relacionados em adaptação na Tabela 11) análises químicas do lixiviado bruto gerado no aterro de resíduos estudo de caso.

Tabela 11 Análises químicas do lixiviado bruto gerado no aterro de resíduos estudo de caso.

Parâmetro	Média	Desvio Padrão
Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	12716,67	2887
Alumínio (mg/L)	28,1	65,11
Cádmio (mg/L)	ND	-
Chumbo (mg/L)	0,102	-
Cloreto (mg/L)	4208	1334
Cobre (mg/L)	ND	-
Coliformes Termotolerantes (NMP/100 mL)	552,1667	706
Coliformes Totais (NMP/100 mL)	712,1667	631
Condutividade (µs/cm)	28055	3736
Cromo Total* (mg/L)	1,1375	0,176
DBO** (mg/L)	2164,167	2268
DQO (mg/L)	7555,667	4740
Ferro (mg/L)	12,28333	4,03
Ferro dissolvido (mg/L)	8,596667	1,16
Fósforo Total (mg/L)	18,85	4,6
Manganês (mg/L)	0,5445	0,56
Manganês Dissolvido (mg/L)	0,518667	0,52
Merúrio (mg/L)	0,00127	0,0015
Níquel (mg/L)	0,311333	0,045
N-NH ₃ (mg/L)	2954,333	687
NTK***(mg/L)	2962,167	605
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	0,766667	0,4
pH	7,608333	0,5
Sólidos Sedimentáveis (mg/L)	0,2	ND
Sólidos Suspensos totais (mg/L)	476,3333	572
Sulfato (mg/L)	718	1090
Sulfeto (mg/L)	0,536667	0,23
Temperatura (°C)	28,2	4,4
Zinco (mg/L)	0,954833	0,31

Fonte: Adaptado de Gomes e Caetano (2018a); Gomes e Caetano (2018b); Gomes e Caetano (2018c); Gomes e Caetano (2019^a); Gomes e Caetano (2019b); Gomes e Caetano, (2019c).

4 RESULTADOS

O capítulo de resultados é apresentado em quatro subcapítulos. Primeiro apresenta-se os resultados da instalação do experimento em campo. Posteriormente discute-se os resultados obtidos no monitoramento geotécnico dos *liners* e, apresenta-se o monitoramento geoquímico (determinação semiquantitativa) das camadas estudadas. Por fim, faz-se uma análise técnica quanto a aplicação dos *liners* alternativos como sistema de impermeabilização inferior do aterro sanitário estudo de caso.

4.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CAMPO

Como o principal objetivo do *liner* mineral é a retenção, os projetos geotécnicos para *liners* devem apresentar desvios de umidade somente acima da umidade ótima (BOSCOV, 2008; MACAMBIRA, 2002). No CT para a execução de *liners* pode ser inserido o ensaio condutividade hidráulica (ABNT NBR 13.292, 1987) (SUSIN *et al.*, 2017), realizado a partir de amostras indeformadas do *liner* obtidas *in loco* com o método de cravação de cilindro (ABNT NBR 9.813, 2016).

O CT pode ser adaptado para os testes no *liner* mineral, incluindo o teste de energia recebida para a execução de compactações em outras energias e testes de permeabilidade a partir de amostras indeformadas representativas das praças de compactação.

Como a execução deve ser no ramo umido é necessário um cuidado especial para que não haja perda de umidade no *liner* depois de executado, pois a argila pode rachar e formar caminhos preferenciais para a percolação, reduzindo o coeficiente de permeabilidade. Podem ser instalados panos de geotêxtil sobre o *liner* executado, mantendo os mesmos sempre umidos até a instalação das próximas camadas de fundo.

4.1.1 Grau de compactação (GC) e Teor de Umidade (W%)

O GC foi calculado a partir das amostras indeformadas obtidas na primeira e última campanha de monitoramento dos *liners*. O GC também foi calculado

(Eq. 1) para a energia de compactação normal e para os quatro materiais. O cálculo foi realizado a partir dos resultados obtidos nos ensaios de Proctor na energia de compactação normal obtidos em ensaios de laboratório supracitados na Tabela 7 do Capítulo de Metodologia. A Figura 17 apresenta o momento da última coleta indeformada *in loco*.

Figura 17 Monitoramento no tempo 90 e coleta de amostra indeformada.



Os valores obtidos para o GC variam de 83% a 101%. A Tabela 12 apresenta os resultados, considera-se GC_0 o resultado para a primeira campanha de amostragem e GC_{90} para a última, três meses depois. De forma geral o GC diminuiu comparando-se o primeiro resultado com o segundo. Para o *liner* 1 (100% SL) diminuição de 10%, para o *liner* 2 (100% LMP) 7%, 8% para o *liner* 3 (60%SL + 40% RCD-C) e 3% de diminuição para o *liner* 4 (60%SL + 40% RCD-CV).

O teor de umidade foi tomado no instante da execução dos *liners* e na última campanha de amostragem indeformada. Na primeira campanha a umidade apresentou desvio de -0,22%, 1,2%, 6,4% e 4,4% respectivamente para os *liners* 1, 2, 3 e 4 na data da execução das praças e -2,5%, 4,3%, 6,9% e 2,4% respectivamente para os *liners* 1, 2, 3 e 4 para a quarta campanha de monitoramento. Barros (2005) determinou umidade ótima - $W_{ót}$: 13,5% para o RCDR.

Tabela 12 Controle tecnológico.

Parâmetro Geotécnico	<i>Liners</i> Testados			
	1	2	3	4
GC ₀ EN(%)	96	101	98	86
GC ₉₀ EN(%)	86	93	90	83
Wnat ₀ (%)	14,22	16,8	11,7	11,8
Wnat ₉₀ (%)	16,5	13,7	11,2	13,8
Wót (%)	14	18	18,1	16,2

Legenda: tempo inicial do experimento piloto (0), tempo final do experimento piloto (90), grau de compactação (GC), energia normal (EN), teor de umidade natural (Wnat); teor de umidade ótima (Wót).

O GC é usualmente prescrito em projeto baseando-se nas necessidades de solicitação de fundação da superfície final do greide de projeto. A norma DNER - ES 282/97 determina os critérios para a realização de um ensaio de determinação de massa específica aparente *in loco* para praças de extensões limitadas, com volume de no máximo, 1.200 m³ no corpo do aterro ou 800 m³ para as camadas finais; a quantidade de ensaios de massa específica aparente *in loco*, para o controle da execução, deve ser definido em função do risco de rejeição de um serviço de boa qualidade a ser assumido pelo executante; e GC ≥ 95% para o corpo do aterro e GC ≥ 100% para as camadas finais. Essa norma foi desenvolvida para emprego na execução de aterros como parte integrante da plataforma da rodovia podendo ser adaptada para outros tipos de obras de terraplenagem.

Boscov *et al.* (2019) realizaram ensaios de compactação com material alternativo composto por 35% e 50% de solo argiloso (Taguá) e 65% e 50% de RCDR em escala de laboratório e obteve resultados de 20% e 21% para umidade ótima. Valores maiores do que obtidos no presente estudo em função do maior teor de argila.

4.1.2 Energia Recebida

A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos pelos métodos propostos.

Tabela 13 Resultados para o teste de energia recebida.

	<i>Liner 1</i>	<i>Liner 2</i>	<i>Liner 3</i>	<i>Liner 4</i>
e0	0,38	0,38	0,36	0,41
e90	0,24	0,25	0,22	0,23
γ_s0 (kN/m ³)	17,11	16,7	17,04	16,11
γ_s90 (kN/m ³)	15,39	15,45	15,73	15,55
EM	n	n	n	n

Legenda: tempo inicial do experimento piloto (₀), tempo final do experimento piloto (₉₀), índice de vazios (e), peso específico seco (γ_s) grau de compactação (GC), energia modificada (EM), não está compactado na energia modificada (n).

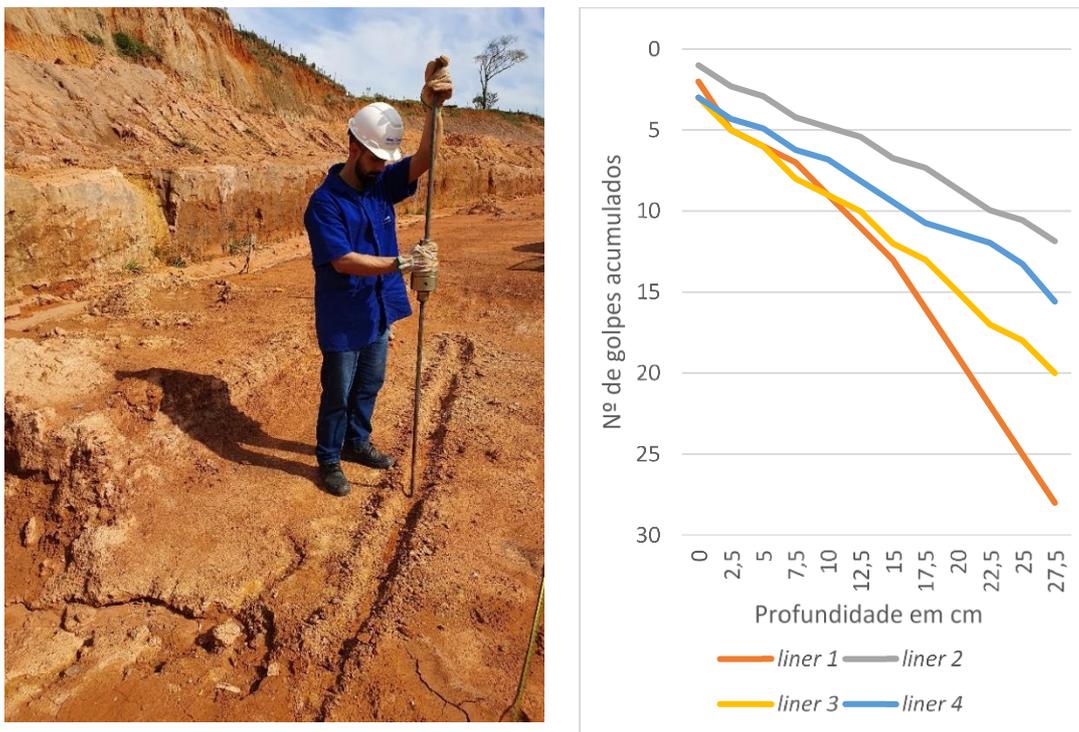
Aplicando-se o teste de energia recebida é identificado que nenhum dos *liners* foi compactado na energia modificada, objetivo inicial do projeto. Todos os valores de massa específica seca ficaram abaixo do mínimo necessário, tanto na primeira campanha de monitoramento como na última (<19,19 kN/m³). O melhor resultado atingiu 89,16% do peso específico seco requerido para a energia modificada, na praça do *liner 1*. A não concretização deste objetivo se deve às dificuldades operacionais em escala real e as limitações financeiras do projeto que não permitiram que se realizasse a compactação inúmeras vezes.

Na primeira campanha de monitoramento, com exceção do *liner 4* (Tabela 14), todos os outros *liners* atingiram valores de índice de vazios dentro do desejado (0,39 > e > 0,31). Na segunda todos os resultados apresentaram índices de vazio abaixo do esperado, com o *liner 2* com o melhor resultado 80,64% do índice de vazio requerido. Cabe aqui um comentário de que para que se consiga atingir os critérios técnicos projetados é necessário a prototipagem da compactação, realizando testes *in loco* com os equipamentos que serão utilizados na obra e com o laboratório do CT para a definição da velocidade do rolo, espessura de camada e número de fechas.

4.1.3 Dynamic Cone Penetrometer (DCP)

Este ensaio foi realizado na data da última campanha de monitoramento dos *liners*. Removendo-se 5 cm superficiais, foi realizado um ensaio em cada *liner* até a profundidade de 30 cm. A Figura 18 apresenta o ensaio sendo realizado *in loco* e o gráfico com o resultado obtido para cada *liner*.

Figura 18 Realização do ensaio DCP *in loco* e curva com nº de golpes acumulados.



Não foi realizada a calibragem do DCP segundo Berti (2005). Mas pela resistência aparente dos materiais, observada na Figura 18, expressa em número de golpes acumulados (DN) demonstra que na data do último monitoramento o *liner 1* apresenta a maior resistência dentre todos, seguido do *liner 3*, do *liner 4* e do o *liner 2*.

4.2. RESULTADOS DO MONITORAMENTO GEOTÉCNICO

Neste subcapítulo são apresentados inicialmente a Tabela 14 com o resumo dos ensaios geotécnicos executados no experimento. Posteriormente, faz-se uma apresentação e uma análise de cada parâmetro.

Tabela 14 Resultados geotécnicos

Parâmetro Geotécnicos	Liners			
	1	2	3	4
c (kPa)	34,95	26,02	30,22	47,94
Φ (°)	34,87	40,94	43,69	37,5
CBR (%)	-	-	11	13
Expansão (%)	-	-	0,01	0,07
K20 ₀ (cm/s)	2,24E-04	3,41E-06	1,34E-05	7,17E-06
K20 ₉₀ (cm/s)	4,19E-05	2,96E-06	1,21E-05	8,73E-06
γ_{s0} (g/cm ³)	1,745	1,703	1,738	1,643
γ_{s90} (g/cm ³)	1,57	1,576	1,604	1,586
$\gamma_{gr\tilde{a}o0}$ (g/cm ³)	2,7939	2,7355	2,7194	2,7959
$\gamma_{gr\tilde{a}o90}$ (g/cm ³)	2,0698	2,101	2,0673	2,0638
e ₀	0,38	0,38	0,36	0,41
e ₉₀	0,24	0,25	0,22	0,23

Legenda: tempo inicial do experimento piloto (0), tempo final do experimento piloto (90), coesão (c), Índice de Suporte California (CBR), coeficiente de permeabilidade hidráulica a 20°C (k20), peso específico seco (γ_s), peso específico do grão ($\gamma_{gr\tilde{a}o}$), índice de vazios (e).

A seguir discute-se cada parâmetro geotécnico separadamente.

4.2.1 Cisalhamento Direto

As amostras indeformadas coletadas *in loco*, no último mês de monitoramento, foram rompidas por cisalhamento direto. As Figuras 19 a 21 apresentam os respectivos gráficos de ruptura do *liner* 1. A Figura 22 mostra o gráfico de tensão de cisalhamento e tensão normal e o respectivo modelo de regressão linear e coeficiente de determinação (R^2) do *liner* 1 (100%SL).

Figura 19 Tensão cisalhante versus deformação para tensão normal de 50 kPa para o *liner* 1.

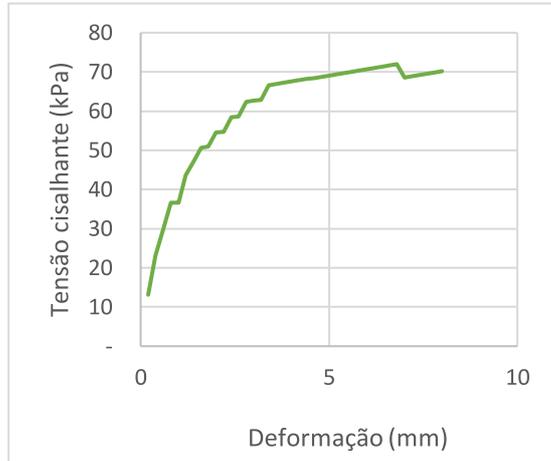


Figura 20 Tensão cisalhante versus deformação para tensão normal de 100 kPa para o *liner* 1.

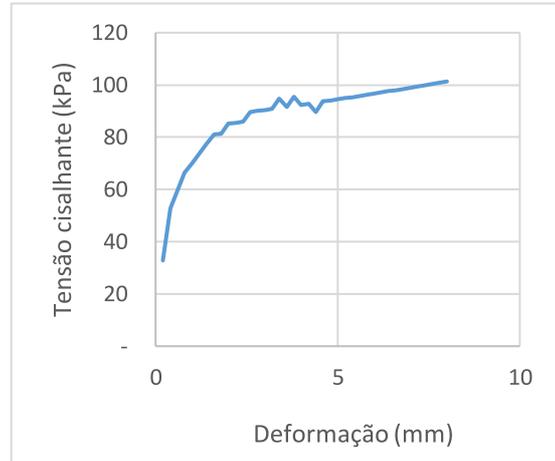


Figura 21 Tensão cisalhante versus deformação para tensão normal de 200 kPa para o *liner* 1.

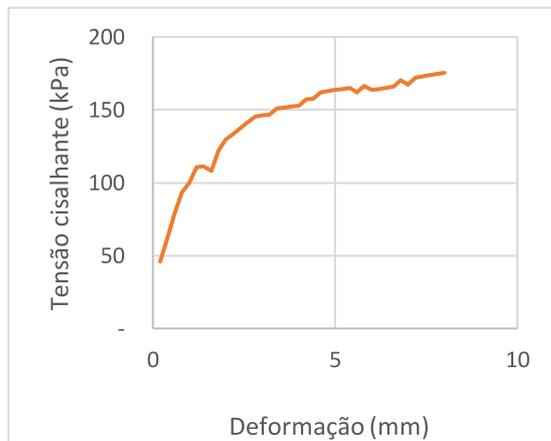
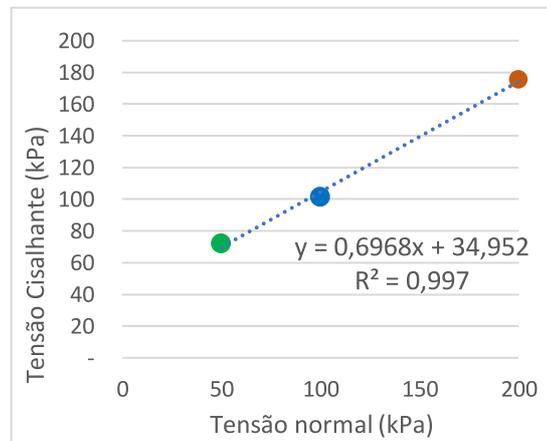


Figura 22 Tensão cisalhante versus tensão normal para o *liner* 1.



Os gráficos de ruptura do *liner* 2 estão apresentadas nas Figuras 23, 24 e 25 a seguir. A Figura 26 apresenta o gráfico de tensão de cisalhamento e tensão normal e o respectivo modelo de regressão linear e R^2 do *liner* 2 (100%LMP).

Figura 23 Tensão cisalhante versus deformação para tensão normal de 50 kPa para o *liner* 2.

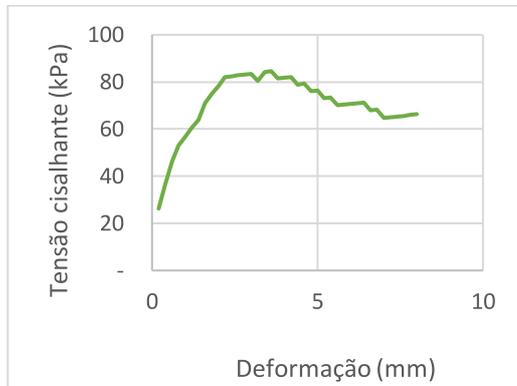


Figura 24 Tensão cisalhante versus deformação para tensão normal de 100 kPa para o *liner* 2.

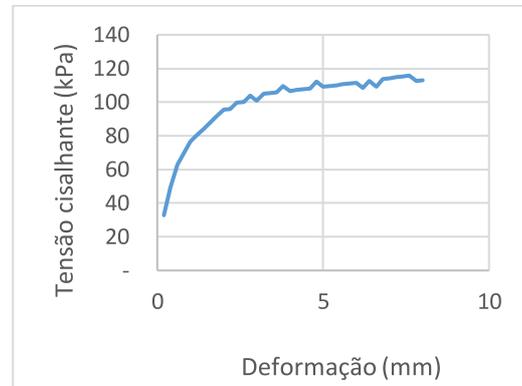


Figura 25 Tensão cisalhante versus deformação para tensão normal de 200 kPa para o *liner* 2.

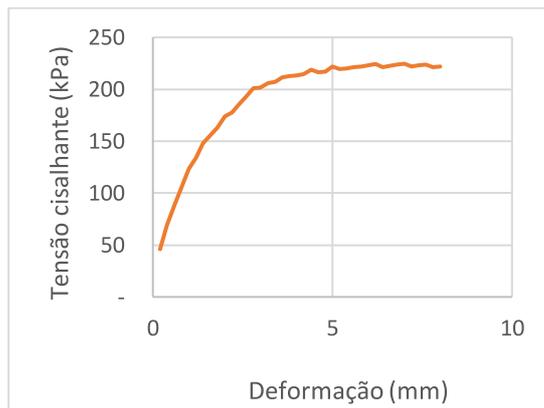
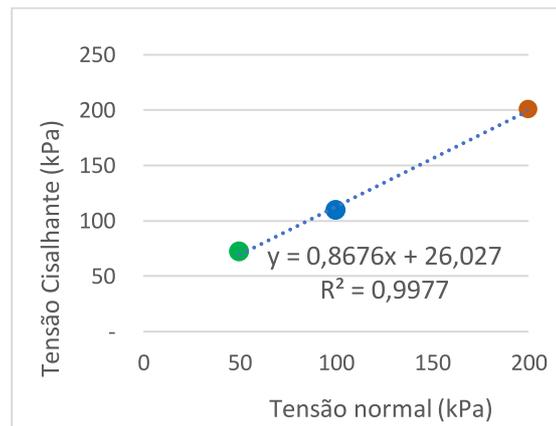


Figura 26 Tensão cisalhante versus tensão normal para o *liner* 2.



Já os gráficos apresentados nas Figuras 27, 28 e 29 são relativos aos gráficos de ruptura do *liner* 3. A Figura 30 apresenta o gráfico de tensão de cisalhamento e tensão normal e o respectivo modelo de regressão linear e R^2 do *liner* 3 (60%SL+40%RCDRV).

Figura 27 Tensão cisalhante versus deformação para tensão normal de 50 kPa para o *liner* 3.



Figura 28 Tensão cisalhante versus deformação para tensão normal de 100 kPa para o *liner* 3.

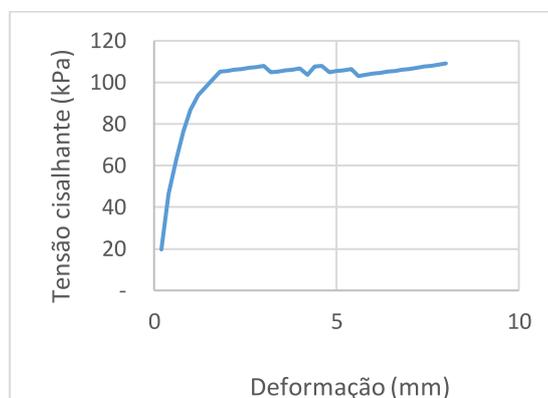


Figura 29 Tensão cisalhante versus deformação para tensão normal de 200 kPa para o *liner* 3.

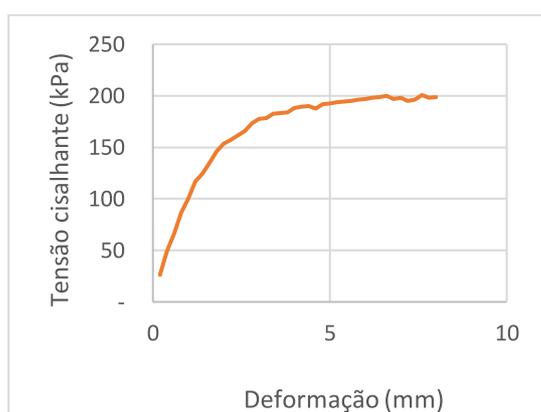
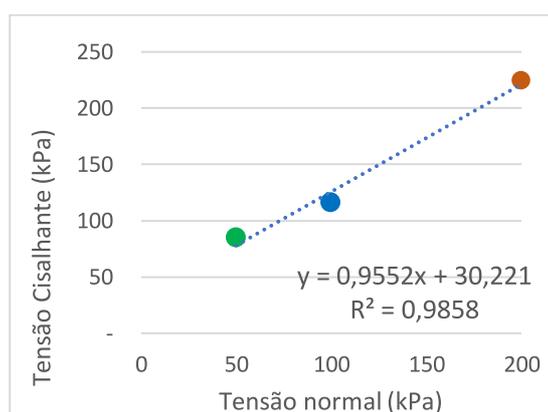


Figura 30 Tensão cisalhante versus tensão normal para o *liner* 3.



As Figuras 31, 32 e 33 apresentam os gráficos de ruptura do *liner* 4. A Figura 34 apresenta o gráfico de tensão de cisalhamento e tensão normal e o respectivo modelo de regressão linear e R^2 do *liner* 4 (60%SL+40%RCDRC).

Figura 31 Tensão cisalhante versus deformação para tensão normal de 50 kPa para o *liner* 4.



Figura 32 Tensão cisalhante versus deformação para tensão normal de 100 kPa para o *liner* 4.

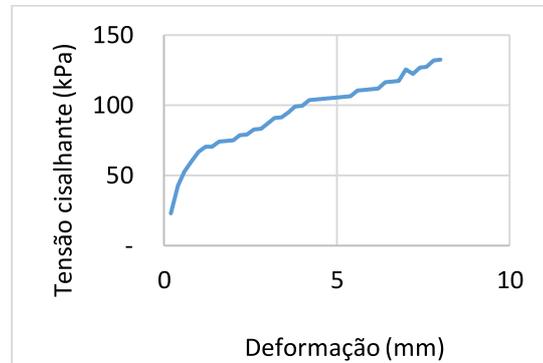


Figura 33 Tensão cisalhante versus deformação para tensão normal de 200 kPa para o *liner* 4.

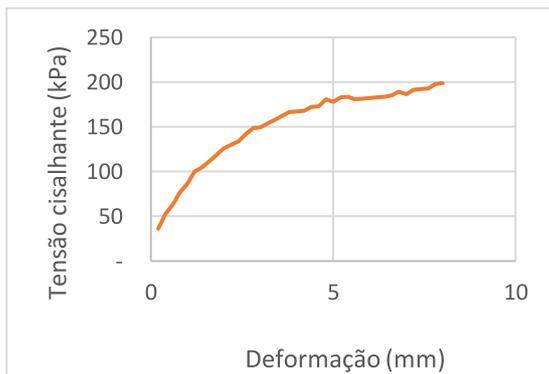
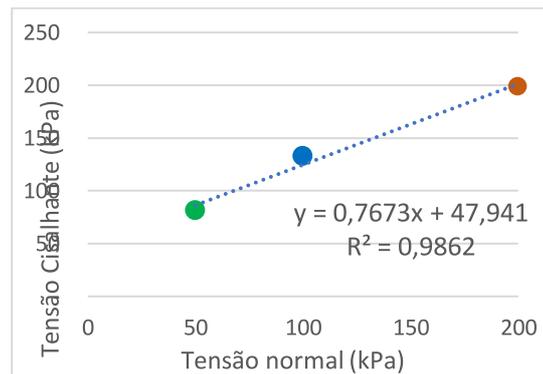


Figura 34 Tensão cisalhante versus tensão normal para o *liner* 4.



Os resultados obtidos pelos ensaios para coesão e ângulo de atrito interno, para cada material, são apresentados na Tabela 14. O material do *liner* 4 apresentou maior coesão, já o do *liner* 2 a menor, 47,94 kPa e 26,02 kPa respectivamente. Na resistência ao cisalhamento o material mais resistente é o presente no *liner* 3 com 43,69° e o mais fraco do *liner* 1, 34,87°.

Conforme Alonso (2010), quanto maior o ângulo de atrito interno, maior a compactação da camada. As Tabelas 15 e 16 resumem a classificação do autor. Barros (2005) em ensaios para a definição da resistência ao cisalhamento de RCDR e definiu ângulo de atrito interno (Φ) de 35°.

Tabela 15 Ângulo de atrito interno.

Areia	Ângulo de Atrito ϕ (°)
Fofa	< 30
Pouco compacta	30 a 35
Medianamente compacta	35 a 40
Compacta	40 a 45
Muito compacta	> 45

Fonte: Adaptada Alonso (2010).

Tabela 16 Coesão.

Argilas	Coesão C (kPa)
Muito moles	< 9,8
Mole	9,8 a 24,51
Média	24,51 a 49,03
Rija	49,03 a 98,6
Muito Rija	98,6 a 196,13
Dura	> 196,13

Fonte: Adaptada Alonso (2010).

Alonso (2010) desenvolveu essa classificação para materiais naturais, como os solos aplicados nos *liners* 1 e 2, mas é possível usar os resultados obtidos para os materiais alternativos dos *liner* 3 e 4 também na comparação. O material do *liner* 1 (100% SL) apresenta média coesão e é pouco compacto, já para o *liner* 2 (100%LMP), *liner* 3 (60% SL + 40% RCDRV) e *liner* 4 (60% SL + 40% RCDRC), o material é classificado com média coesão e medianamente compacto.

4.2.3 Índices Físicos

Foram determinados índices físicos dos diferentes materiais de acordo com o estabelecido no programa experimental. Cabe salientar que alguns ensaios foram feitos a partir de coletas obtidas na primeira data de monitoramento e na última, por exemplo massa específica seca e massa específica do grão. Esses ensaios, realizados em dois momentos pelo estudo, são identificados através do algarismo 0, sendo os da primeira bateria de ensaios e 90 da última data de coleta indeformada.

A Tabela 14 apresenta os resultados obtidos para os índices físicos dos quatro materiais. Assim como no GC, ocorre uma pequena diminuição nos valores referentes a massa específica seca se comparados os resultados das análises da primeira coleta com os da última. Essa diminuição segue a proporcional do GC pois há relação matemática entre os valores. Assim, 10%, 7%, 8% e 3% para os *liners* 1, 2, 3, e 4 respectivamente.

Foi evidenciada uma diminuição do índice de vazios quando se comparando os resultados obtidos a partir da primeira campanha de monitoramento em relação com a 4, aparentemente com o passar do tempo o

material compactado se arranja e o índice de vazios diminui. Na média essa redução foi de 38%. Isoladamente, 36% para o *liner* 1, 34% para o 2, 38% para o 3 e 44% para o 4. Essa redução é diretamente proporcional à redução da massa específica dos grãos, o que pode sugerir algum tipo de alteração química do material. A Tabela 14 apresenta os resultados.

Boscov *et al.* (2019) realizaram testes em materiais alternativos compostos por solo e RDRC. Os valores apresentados pelos autores: para a densidade especificam seca máxima valores que variam entre 1,22 g/cm³ e 1,42 g/cm³; porosidade entre 0,48 e 0,55; e densidade real dos grãos de 2,73 g/cm³. Barros (2005) determinou peso específico seco máximo de 1,93 g/cm³ para o RCDR.

4.2.4 Granulometria

O RCDR foi triturado primeiramente por um pequeno moinho de mandíbulas e depois o material passou por um moinho de facas de alta rotação. Isso fez com que o material ao final apresentasse uma granulometria mais grosseira do que a trabalhada por Schuck (2018). As Figuras 35 e 36 apresentam as curvas granulométricas do peneiramento dos materiais RCDRV e RCDRC respectivamente.

Figura 35 Curva granulométrica do material RCDRV.

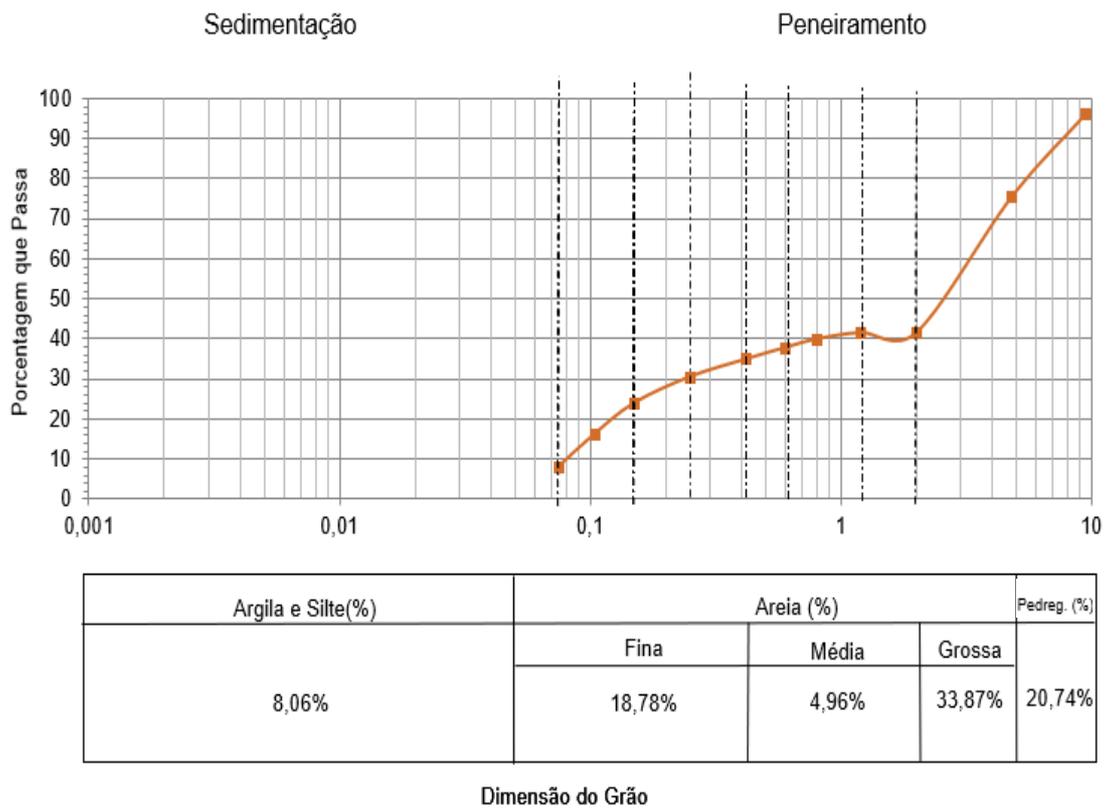
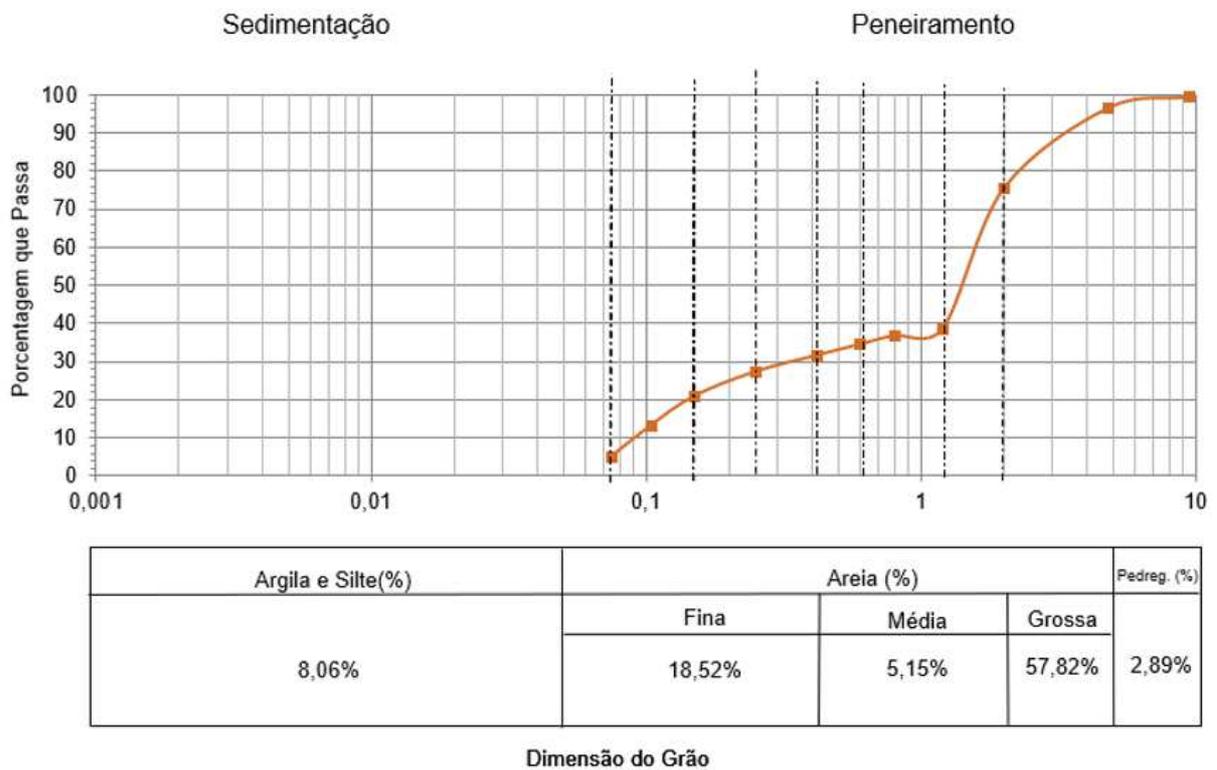


Figura 36 Curva granulométrica do material RCDRC.



Os valores obtidos para os teores de finos (*filler*) para os materiais foram abaixo dos estabelecidos por Franceschet (2006), de 20% a 30%, para a sua aplicação como barreira mineral de fundo. Os materiais reagem de maneira diferente aos processos de moagem, com predominância da granulometria de areia grossa no RCDRC e predominância de pedregulho no RCDRV.

4.2.5 Permeabilidade

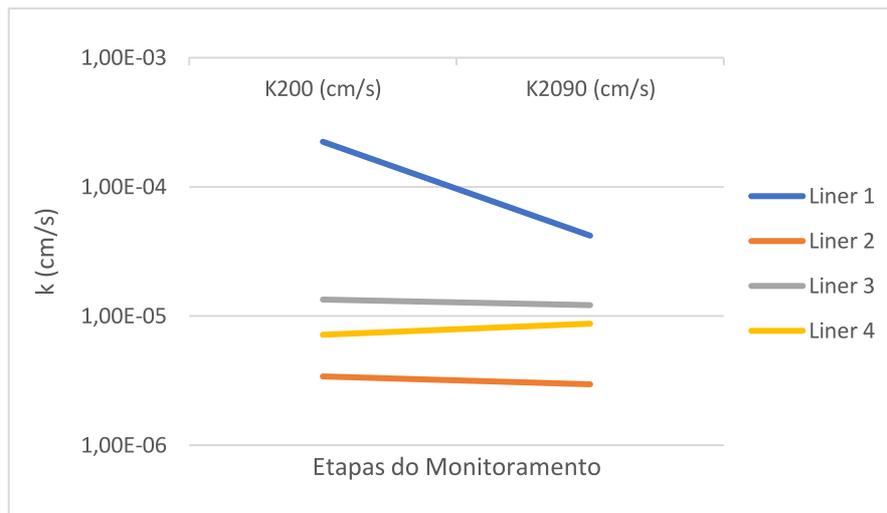
A partir das amostras indeformadas coletadas nas diferentes datas previstas na metodologia, foram realizados ensaios de permeabilidade de acordo com o programa experimental. Os resultados são apresentados na Tabela 14. Nenhum coeficiente de permeabilidade atingiu o valor de referência de $k = 10E-07$ cm/s, para revestimento de fundo mineral em aterros de resíduos sólidos, todos apresentaram maior permeabilidade (BOSCOV, 2008; CETESB, 2005; FRANCESCHET, 2006 e MACAMBIRA, 2002).

Comparando-se os resultados obtidos para os ensaios de permeabilidade nas amostras indeformadas obtidas na primeira e na última campanha de monitoramento identifica-se o seguinte comportamento:

- *Liner* 1: redução de 81%;
- *Liner* 2: redução de 13%;
- *Liner* 3: redução de 9%;
- *Liner* 4: aumento de 22%.

A Figura 37 apresenta em gráfico o comportamento da permeabilidade dos *liners* no tempo. Para explicar este fenômeno, acredita-se que a diminuição da permeabilidade dos materiais pode ser em função da degradação do SL pelo ataque ácido, que promoveu formação autogênica de argilominerais, aumentando o fator de empacotamento

Figura 37 Gráfico do comportamento da permeabilidade dos *liners* no tempo.



A partir das propriedades geotécnicas obtidas dos materiais em estudo, aplicando-se a teoria de Darcy, é possível calcular quantas vezes uma gota d'água percolaria a espessura total do *liner* quando em situação extrema. A Tabela 17 apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação da Equação 5.

Assim segundo Darcy:

$$V = \frac{k * A * \frac{\Delta h}{L}}{\frac{e}{1+e} * A} \quad \text{Eq. (5)}$$

Onde:

V = velocidade limiar média (m/s);

k = coeficiente de permeabilidade (cm/s);

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

Δh = carga hidráulica (m);

A = área (m²);

e = índice de vazios.

Tabela 17 Análise da percolação em situação extrema.

Parâmetro	Liner 1	Liner 2	Liner 3	Liner 4
k médio (cm/s)	1,33E-04	3,19E-06	1,28E-05	7,95E-06
DP de k (cm/s)	1,15E-04	2,82E-07	9,19E-07	9,89E-07
A (m ²)	2,13	2,13	2,13	2,13
e	0,31	0,315	0,29	0,32
DP e	0,10	0,09	0,10	0,013
h1-h2/L	0,75	0,75	0,75	0,75
Q (m ³ /s)	5,13E-07	5,09E-06	2,04E-05	1,27E-05
n	0,62	0,63	0,58	0,64
V (m/s)	3,89E-07	3,79E-06	1,65E-05	9,32E-06
t (s)	8467200	8467200	8467200	8467200
m (m)	8467200	8467200	8467200	8467200
X (un)	1.359	32	139	78

Legenda: área (A), índice de vazios (e), coeficiente de permeabilidade (k), desvio padrão (DP); porosidade (n); velocidade (V); tempo (t); metros percolados no meio poroso do *liner* para o tempo t (m), nº de vezes que uma gota de água percola pela espessura total do *liner* (X).

A NBR 10.157 (ABNT, 1987), prevê a possibilidade de existir uma lâmina de líquido de até 0,30 m sobre a impermeabilização de fundo. No presente estudo considera-se 3 cm (10%) a lâmina máxima possível no local, pois o local onde os *liners* foram instalados é bem drenado e dificilmente uma precipitação pluviométrica acumularia espessas lâminas d'água no local, mesmo com fortes incidências. Para a simulação crítica aplica-se os critérios da NBR 10.157 (ABNT, 1987).

A partir dos cálculos de Darcy, considerando o solo saturado, regime uniforme de fluxo, meio homogêneo e isotrópico, espessura da lâmina de água de 30 cm e a geometria instalada dos *liners* é possível calcular quantas vezes a água percolaria através de todo o *liner* ao longo do período do experimento. Foram 98 dias de maneira que se houvesse uma carga constante de 30 cm sobre os *liners*. O *liner* 1 seria percolado mais mil vezes, o 2 oitenta vezes, o *liner* 3 cento e trinta e nove e o 4 setenta e nove vezes. A análise evidencia a eficiência do *liner* 2, conforme esperado já que esta camada retrata o usual para impermeabilização inferior de aterros sanitários.

Com relação à permeabilidade, nos mesmos moldes, porém considerando lâmina d'água de 3 cm. O *liner* 2 é permeado somente uma vez, de maneira que para o presente estudo pode-se considerar que o *liner* 2 não foi totalmente

permeado em nenhum momento ao longo do experimento piloto. Cabe ressaltar que a metodologia proposta para o cálculo é realizada em uma situação virtual e com as devidas adaptações pode ser aplicada em outras finalidades como na previsão do deslocamento de plumas de contaminação.

Para avaliar as propriedades técnicas de diferentes materiais para o uso como *liner* em aterro de resíduos, Varnak *et al.* (2017) apresentam resultados para ensaios de permeabilidade com água, de $3,1E-5$ cm/s para kaolinita, $6,3E-06$ cm/s para argila, $8,8E-06$ cm/s para zeolita e $2,7E-08$ cm/s para bentonita. Barros (2005) apresenta $k=10E-05$ para RCDR.

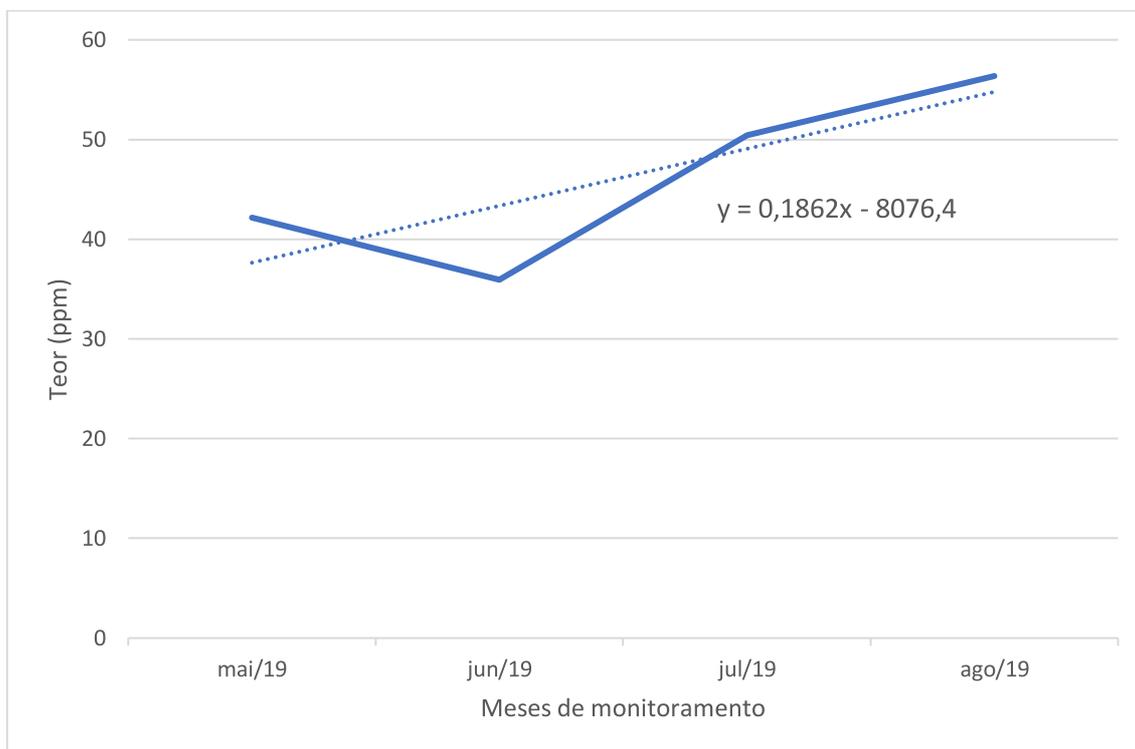
4.3. RESULTADOS DO MONITORAMENTO GEOQUÍMICO

São apresentados os resultados dos ensaios, do plano experimental proposto, para o monitoramento geoquímico dos *liners*. Todos os resultados obtidos foram plotados em gráficos versus o tempo. Para facilitar a análise dos dados e avaliar a tendência dos parâmetros ao longo do experimento, criou-se um método de classificação dos resultados obtidos. Este baseou-se no sinal do elemento “a” e inclinação da reta da equação de ajuste resultante da linha de tendência linear do comportamento do material no tempo de acordo com a Equação 6.

$$f(x) = \pm ax + b \quad \text{Eq. (6)}$$

De maneira que: sinais negativos denotam comportamento de decréscimo nos resultados dos ensaios no tempo (D); sinais positivos comportamento de crescimento (C); linhas de tendência com pequena inclinação, com valores que não variam em mais de uma casa decimal, denotam comportamento de linearidade, havendo essa classificação também (L); e situações onde não se consegue determinar um comportamento, classificados como sem comportamento (SC). A Figura 38 apresentam, como exemplo, os gráficos de tendência do comportamento dos elementos Mn do *liner 2*.

Figura 38 Gráfico de tendência do comportamento do teor de óxido CaO no *liner 2*, com comportamento de crescimento (C).

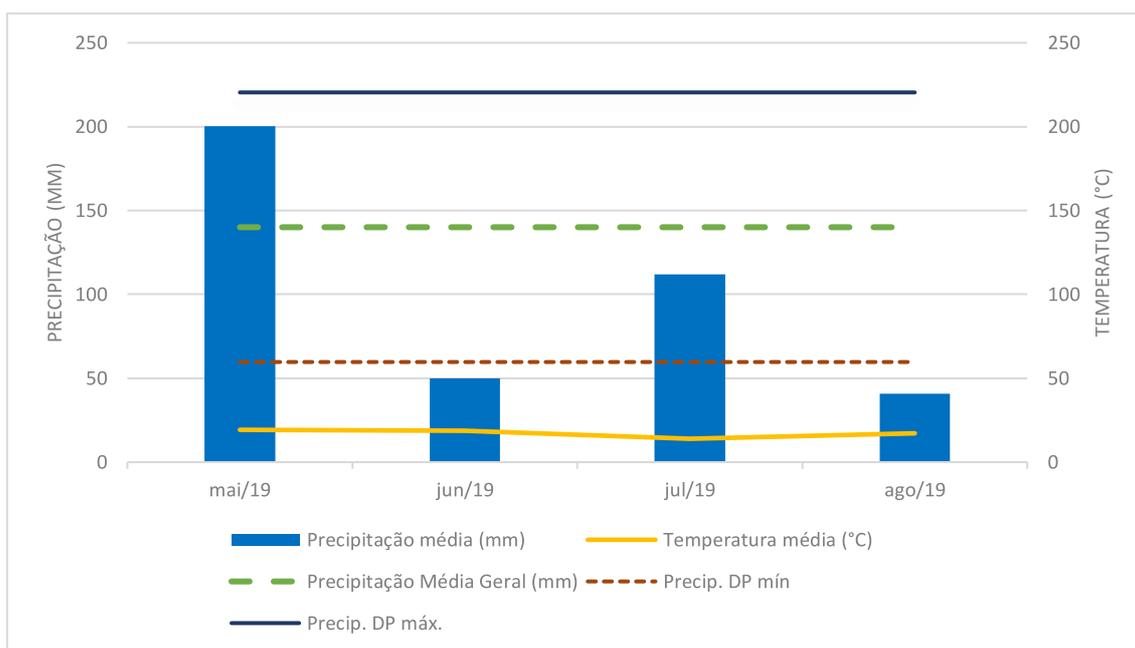


4.3.1 Pluviometria

Fica evidente a influência da água nos sistemas geoquímicos, nas propriedades geotécnicas e nos impactos ambientais, interagindo em diferentes escalas com o material mineral alterando suas propriedades químicas e físicas. Para uma correta avaliação química ambiental é necessário observar a pluviometria regional para o período de monitoramento. O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2019) disponibiliza dados obtidos a partir das suas diversas estações meteorológicas.

Foi avaliada a Estação São Leopoldo no período entre os meses de maio e agosto de 2019. A Figura 39 apresenta a precipitação média com o desvio padrão e a temperatura média para o período.

Figura 39 Média e desvio padrão da pluviometria no período de testes.



Fonte: INMET (2019)

De acordo com INMET (2019), houve médias mais altas no mês de maio/19 e julho/19, com médias menos expressivas nos meses de junho/19 e agosto/19. A chuva disponibiliza água e acidez para as reações de intemperismo que segundo Lincht (2001), ocorrem não somente nos materiais minerais naturais, mas também nos artificiais, como resíduos urbanos e industriais, sofrendo impacto destrutivo. O autor ainda coloca que alguns componentes minerais ou orgânicos mais frágeis liberam os elementos que os constituem mais rápido com a presença pluvial.

4.3.2 pH

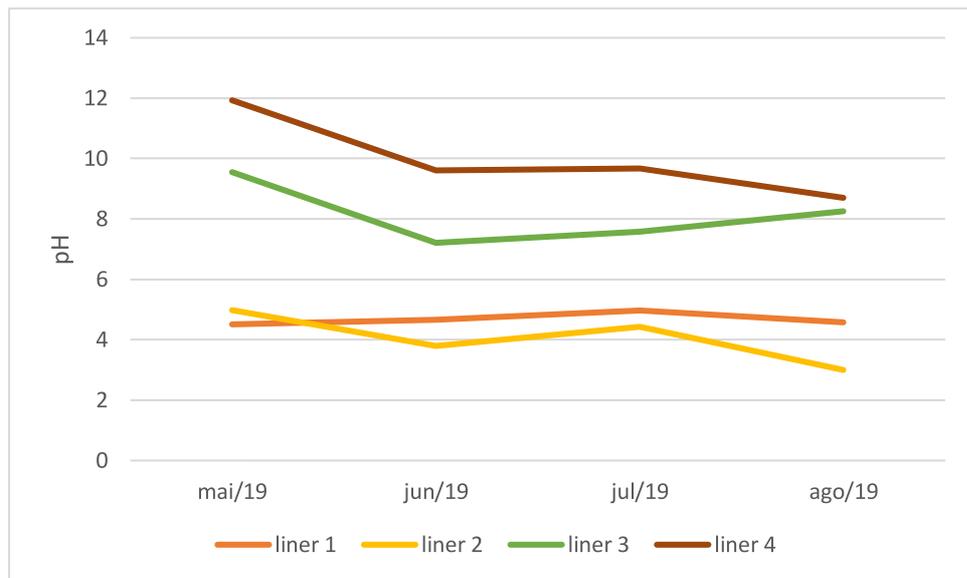
A determinação do pH apresentou grande oscilação no tempo e níveis mais ácidos, o que não era esperado. O comportamento do pH no tempo para: o *liner 1* é linearmente crescente; decrescente para o *liner 2*, linearmente decrescente para o *liner 3* com pico negativo no mês 6 e decrescente para o *liner 4*. Comparando-se diretamente o primeiro mês com o último o *liner 1* apresentou perda de 1,52% na acidez, aumento de 66% da acidez do *liner 2*, 15,75% do *liner 3* e 37,15% de aumento da acidez do *liner 4*.

O *liner 4* apresentou o comportamento mais básico dentre os quatro e o *liner 2* o mais ácido. A Tabela 18 e a Figura 40 apresentam os valores de pH obtidos para os *liners 1, 2, 3 e 4* a partir das amostras indeformadas obtidas nas datas de monitoramento nos meses de maio, junho, julho e agosto de 2019. Os materiais utilizados em bancada nos ensaios de Shuck (2018) também foram submetidos à testes de pH, havendo coerência em comparação com os resultados de campo.

Tabela 18 pH dos *liners* e comportamento no tempo.

	Material de Shuck (2018)	Maio/19	Junho/19	Julho/19	Agosto/19	Comportamento
<i>liner 1</i>	4,73	4,51	4,66	4,97	4,58	L
<i>liner 2</i>	4,85	4,98	3,79	4,43	3	D
<i>liner 3</i>	8,87	9,55	7,21	7,57	8,25	D
<i>liner 4</i>	8,88	11,93	9,61	9,67	8,7	D

O instante mais ácido dos *liners* foi no mês de maio, agosto, junho e junho respectivamente para os *liners 1, 2, 3 e 4* e mais básicos nos meses de julho, maio, maio e maio, para os *liners*. O período de ensaios apresentou grandes índices pluviométricos na região, a proximidade com a célula do aterro e a situação topográfica do local podem ter acarretando influências nas alterações do pH e de todo o restante das análises em função da atividade bacteriana, dos processos de adsorção e dissolução dos argilominerais, e mobilidade dos elementos.

Figura 40 Valores de pH, por *liner* e no tempo.

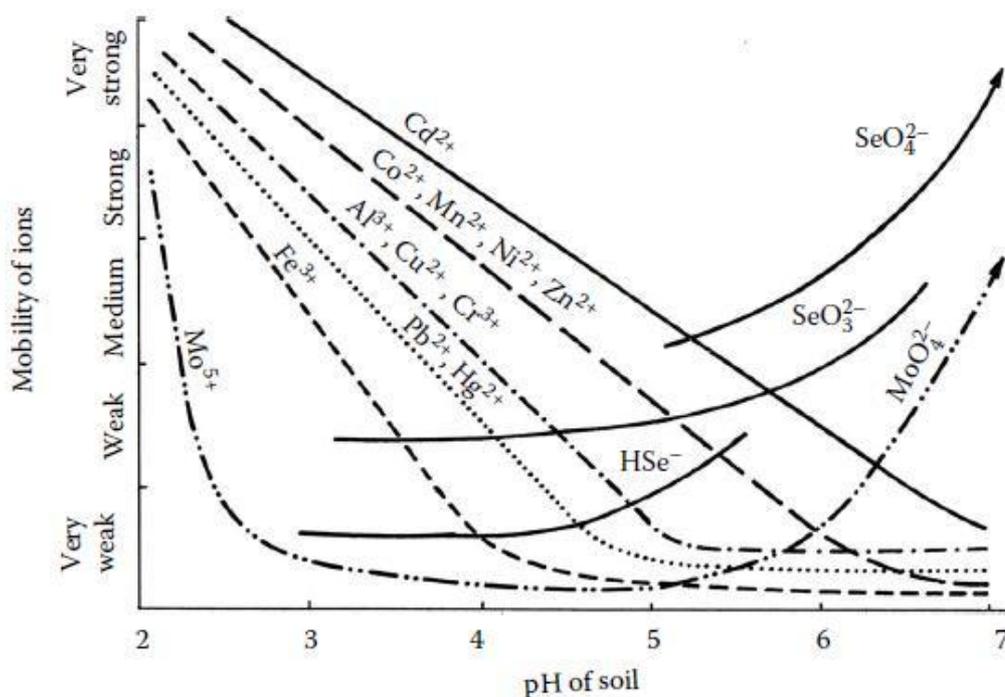
De acordo com Licht (2001), a mobilidade dos elementos em solução e uma condição da pressão e da temperatura e a 1 atm e 25°C, a mobilidade apresenta importante dependência ao pH. Rose *et al.* (1979) traz a reação de mobilidade de alguns elementos com o pH (Tabela 19). Os autores apresentam as faixas de mobilidade relativa para pH de 5 a 8, pH de 4 a 5 e redutoras para pH abaixo de 4 e acima de 8, de maneira que para a análise são adotadas classificações a partir de Rose *et al.* (1979). Kabata-Pendias (2011) apresenta a imagem da Figura 41, relacionando o pH à mobilidade de alguns óxidos.

Tabela 19 Resultados em comparação as especificações de Rose *et al.* (1979).

	pH	classificação adotada	Altamente moveis	Moderadamente móveis	Pouco móveis	Muito pouco móveis
<i>liner 1</i>	4,51 a 4,58	pH 5 - 8	Cl, Br, S, Rn, B	Ca, Na, Mg, Li, F, Zn, Ag, As, Sr	K, Ba, Mn, Si, P, Pb, Cu, Ni, Co, Cd,	Fe, Al, Ga, Zr, Sn, Cr,
<i>liner 2</i>	4,98 a 3	pH < 4	Cl, Br, S, Rn, S, B	Ca, Na, Mg, Cu, Ag, Hg, Zn, Cd, Ni, As, Mn, P	k, Rb, Si, Ba	Fe, Al, Ga, Zr, Sn, As
<i>liner 3</i>	9,55 a 7,21	Redutora	Cl, Br	Ca, Mg, Na, Li, F, M	K, P, Si, Fe	Fe, Al, Ga, Sn, Cu, Ag, Pb, Zn Cd, Ni, As, V, Cr, Nb
<i>liner 4</i>	11,93 a 8,7	Redutora	Cl, Br	Ca, Mg, Na, Li, F, M	K, P, Si, Fe	Fe, Al, Ga, Sn, Cu, Ag, Pb, Zn Cd, Ni, As, V, Cr, Nb

Fonte: Adaptado de Rose *et al.* (1979)

Figura 41 Relação de mobilidade de alguns elementos com o pH.



Fonte: Kabata-Pendias (2011).

4.3.3 FRX

São apresentados os valores obtidos a partir da metodologia proposta para os ensaios de FRX realizados a partir das amostras indeformadas obtidas *in loco* nas datas de monitoramento. Foram realizadas quatro análises, em meses distintos, para cada *liner*. Cabe a ressalva de que os resultados do FRX são semiquantitativos para os teores dos elementos detectados, principalmente os menores que 100 ppm.

4.3.3.1 Elementos químicos

Para interpretação desses resultados, cabe duas importantes questões a serem observadas. Com relação ao solo, as avaliações e estudos de materiais sedimentares apresentados na literatura é mais direcionada a fatores físicos do que químicos. Contudo, conforme Rollinson (1993) a constituição química de materiais sedimentares depende do estágio de sua formação, de sua origem e do meio de transporte. Na área de estudo desta pesquisa, em função de sua gênese o solo local está em um estágio geoquímico muito suscetível a alterações. Como característica, solos sedimentares passaram por intensos processos intempéricos fazendo com que fique difícil a determinação de um *background* geoquímico principalmente para os elementos menores e traço. A Tabela 20, apresenta os resultados dos ensaios de FRX realizados nas diferentes amostras, nos diferentes tempos e nos diferentes *liners*.

Tabela 20 Teor dos elementos em ppm, por *liner* e no tempo.

Elemento (ppm)	<i>liner</i> 1				<i>liner</i> 2				<i>liner</i> 3				<i>liner</i> 4			
	Maio19	Junho19	Julho19	Agosto19	Maio19	Junho19	Julho19	Agosto19	Maio19	Junho19	Julho19	Agosto19	Maio19	Junho19	Julho19	Agosto19
Ag	6112,474	5874,921	5.904	5975,665	6074,085	6288,879	6134,242	5960,44	5497,103	6007,6	5998,481	5884,626	5262,44	5804,259	5690,114	5957,34
Al ₃	2859262	2392576	2518881	1979417	2807836	2643428	2490972	2390173	2334734	2463044	2541273	2247451	2504372	2494365	2179965	2388601
As	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	12,39428	12,64702	14,882	ND	13,09301	11,7982	10,39936	ND
Ca ₂	472,748	421,9808	378,4624	ND	467,9543	390,8649	543,6093	599,1905	6112,09	1697,7	3370,8	2014,3	11523,2	5931,8	33823,9	4878,1
Cl ₃	206,8357	219,5415	245,2819	236,6135	188,6147	229,42	206,1621	194,9643	114,7226	287,791	163,4213	204,0551	140,622	226,117	181,4627	203,1146
Cr ₂	75,85253	44,37574	58,84644	ND	80,06118	80,20246	48,52756	42,78562	75,88087	50,71286	54,89506	53,71317	73,41957	68,95473	36,30147	39,997
Cu	30,05347	32,95244	37,08438	24,00002	29,5094	26,88347	28,50572	28,96384	44,0663	31,17076	32,65558	30,8934	42,43353	34,60429	36,06079	31,85828
Eu ₂	245,1216	255,87,23	235,9	147,8758	155,9203	236,306	223,4059	189,1631	252,5592	258,9966	228,0736	246,5254	295,294	308,4817	243,0956	163,1133
Fe ₂	40066,4	46748,1	45630,7	31784,8	40871,6	37131,3	35807,9	39236	49272,8	42187,3	41083,3	36165,2	52168,5	49149	40827,3	36075,1
Ga	28,85033	22,79181	26,36522	18,15647	24,38628	26,71987	24,74873	23,61076	21,20004	25,03844	28,62755	21,72823	30,27157	25,21425	20,33698	21,44657
K ₂	4500,9	4817,2	4549,2	4418	5524,1	3943,6	3973,9	4934,6	8033	5669,4	4744,9	6267	9960,6	5699,7	6719,1	5510,6
Mg ₃	6254,9	ND	ND	5924,8	5264,5	ND	ND	4369,9	3837,5	ND	ND	6393,7	1426,2	ND	3145	5169,1
Mn ₂	77,00665	122,9217	122,4159	150,9022	131,4965	90,14372	102,8643	113,8671	244,5075	147,387	108,642	135,5519	292,7281	158,4242	600,4946	135,8675
Na ₃	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Nb	18,55871	15,39434	17,03574	ND	ND	17,44469	16,99509	14,94511	58,67081	ND	50,16113	41,93509	19,01636	18,17672	16,55664	14,6924
Nd ₂	49,51661	52,45221	61,74244	50,85476	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Ni	21,94971	26,79382	25,82281	16,48258	20,98547	24,52035	25,01239	22,1372	24,9825	19,27899	28,23008	14,63531	20,5188	28,90586	20,49468	20,75071
P ₃	868,8642	1242,2	984,4766	1052,7	1178,8	786,0135	767,291	1089,3	ND	ND	ND	ND	1306,9	1242,2	ND	972,4861
Pb	46,95721	35,15717	34,60125	34,13795	44,78887	34,30009	29,11875	42,90575	34,93149	32,12553	31,207	37,38266	38,16773	42,28059	36,76095	39,38108
Rb	34,24145	24,62107	28,75766	16,28713	27,02511	27,9505	27,9251	23,94554	39,61849	34,65984	35,03173	28,15689	47,6302	34,27836	32,27554	27,67324
S ₃	600,9071	469,3794	414,2672	286,9511	506,974	489,963	426,7334	405,5227	3995,6	508,3482	933,0845	263,0038	1018,7	479,6677	2240,8	407,1846
Si ₃	6124060	6526131	6366643	7098232	6112011	6296322	6456235	6596175	5926859	6462580	6368781	6737924	6286788	6307857	6345440	6539875
Sn ₁	46,71765	40,7478	45,49871	ND	48,62905	41,56705	41,02752	46,27356	ND	ND	ND	ND	44,53755	50,56425	153,1178	14,6924

Sr	110,0969	124,1802	111,5257	138,5062	137,7279	120,6228	107,4	127,5554	251,7638	112,527	108,8096	134,5481	162,2532	126,7448	175,5085	125,5294
Ti ₂	7089,4	5263,8	6289,2	3439,3	5202,7	6201,9	6106,2	4903,3	5537,6	6113,9	6929,2	4779,9	7144,8	5931,8	4901,7	5258,9
V ₂	147,5106	109,2239	139,3677	59,35402	108,7861	126,3726	138,6771	90,45237	136,8136	115,2448	149,9137	92,21747	158,6716	136,8967	115,751	100,1184
Y	20,24394	20,51164	23,84367	18,53131	ND	19,68241	19,6822	21,60904	25,7638	20,22401	21,29943	21,61294	34,40825	20,89442	22,47708	20,54474
Yb	35,88868	35,15062	35,1296	27,54393	35,1417	34,60576	31,7621	34,81752	37,3935	33,65297	27,20427	32,03645	47,23493	35,57731	28,56341	39,38108
Zn	27,54292	31,94795	32,31163	21,43423	22,05339	33,08832	26,23475	26,50694	47,7197	30,36268	31,7053	27,53422	45,7391	32,30203	38,53552	28,31719
Zr	422,7431	422,7853	411,0608	306,8779	396,2839	359,4163	441,9138	377,9938	386,7007	381,4311	432,9356	383,4175	474,5641	473,1283	398,5939	402,2766
pH	4,51	4,66	4,97	4,58	4,98	3,79	4,43	3	9,55	7,21	7,57	8,25	11,93	9,61	9,67	8,7

A partir da tabela supracitada são apresentados os gráficos nas Figuras 42, 43, 44 e 45 com a evolução dos teores dos elementos no tempo e separadamente por *liner*.

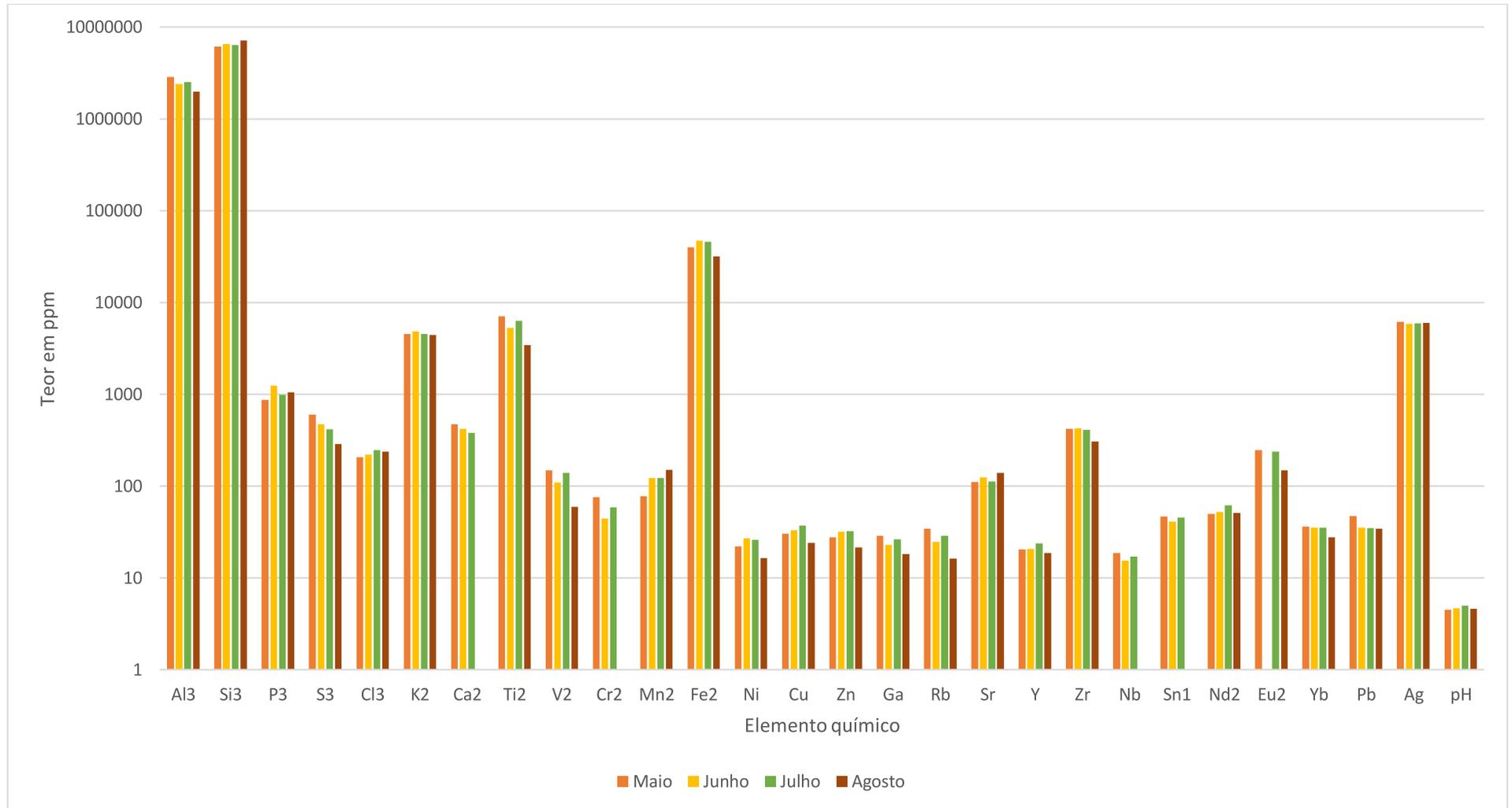
Figura 42 Teores de elementos químicos no *liner* 1 no tempo

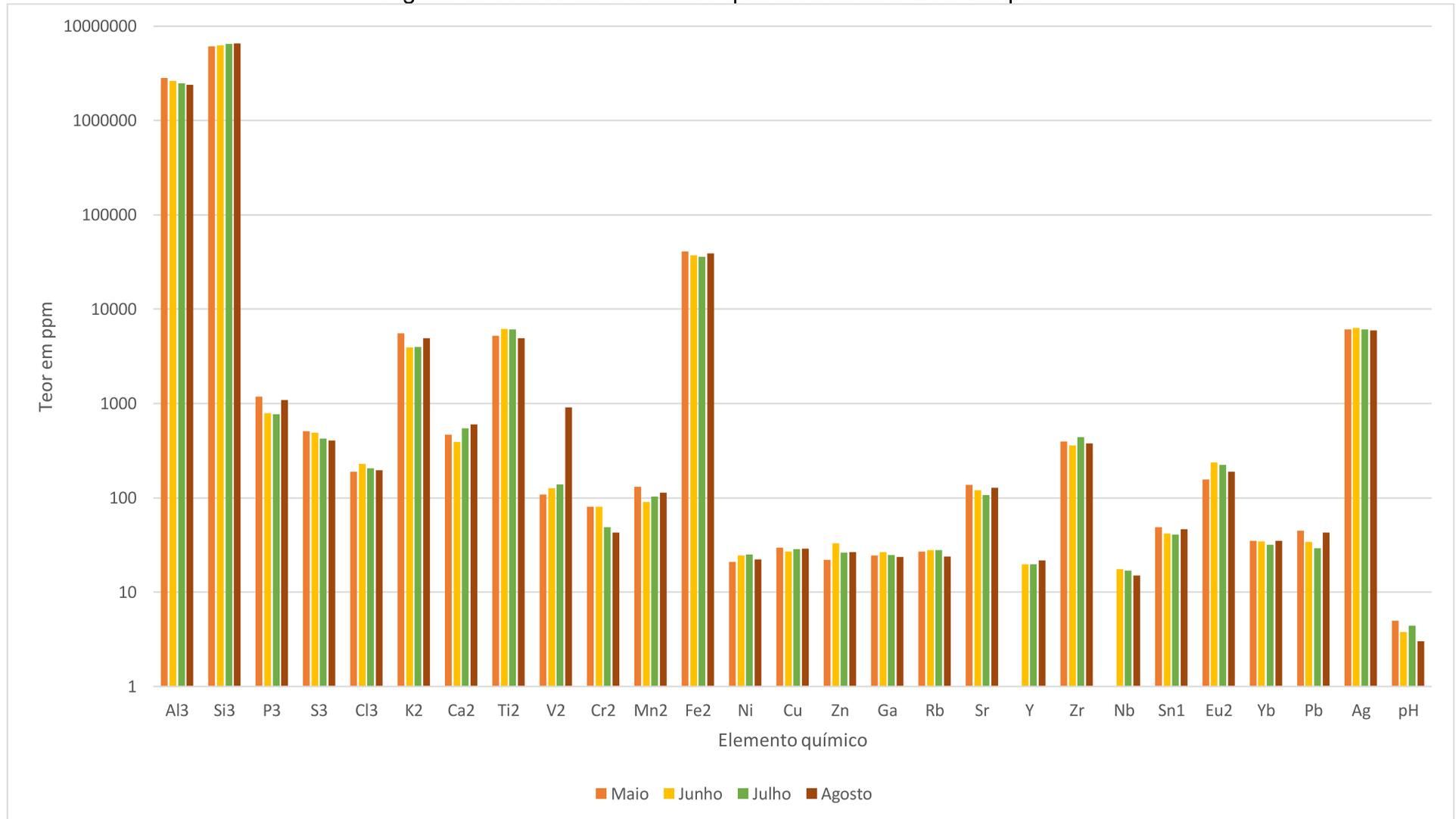
Figura 43 Teores de elementos químicos no *liner 2* no tempo.

Figura 44 Teores de elementos químicos no *liner* 3 no tempo.

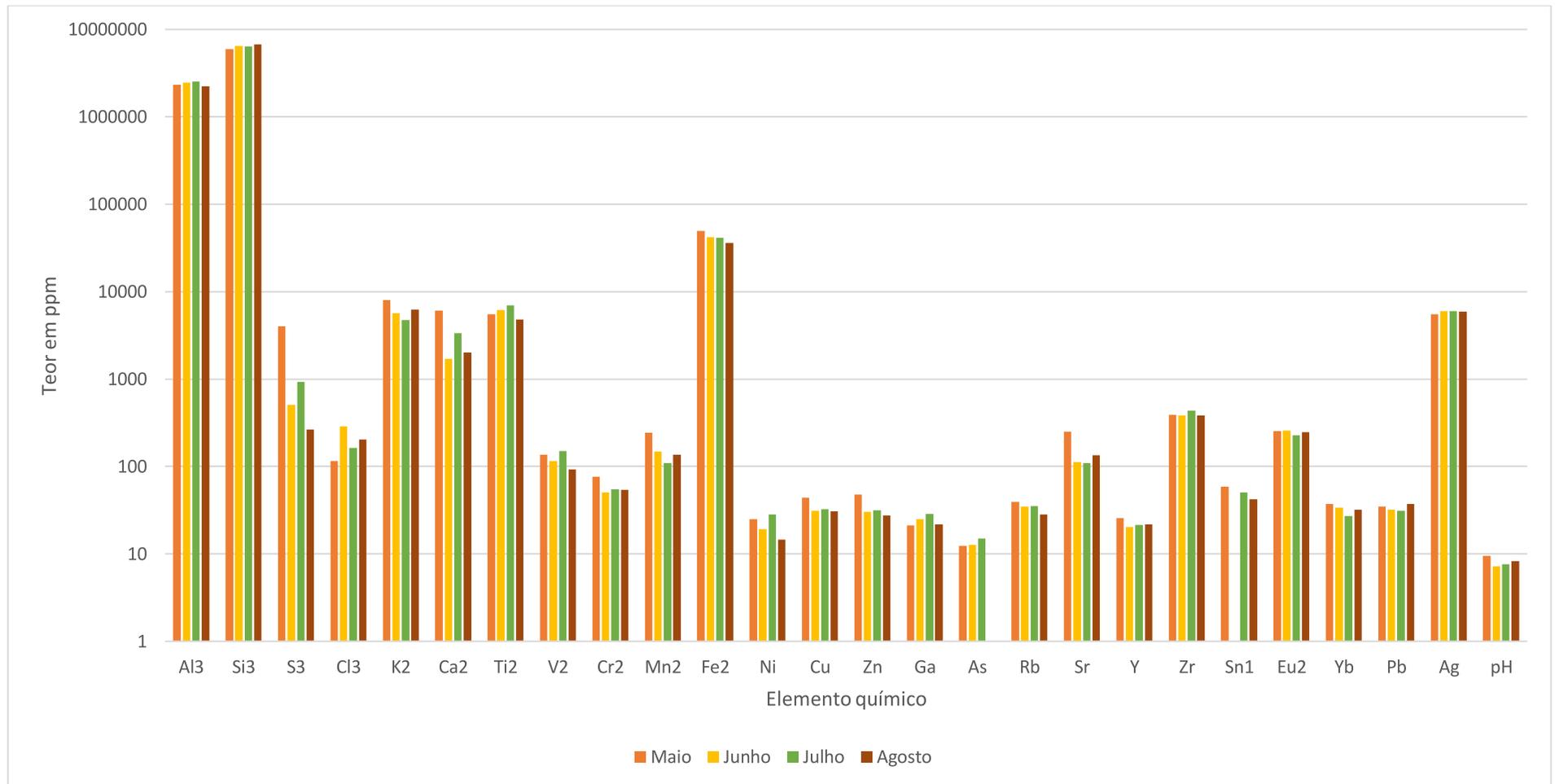
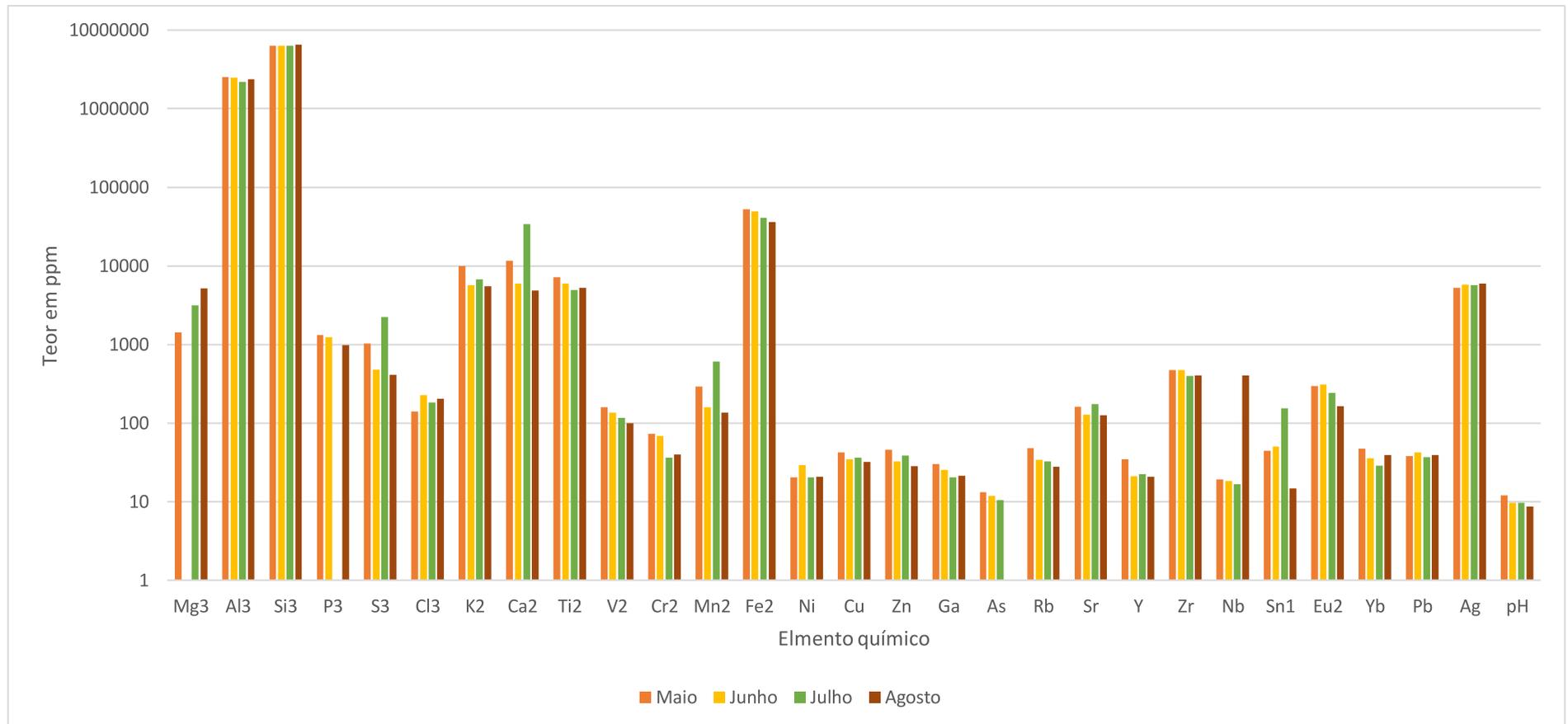


Figura 45 Teores de elementos químicos no liner 4 no tempo.



Os elementos são identificados como macronutrientes primários (N, P, K), macronutrientes secundários (Ca, Mg, S) e micronutrientes (B, Co, Fe, Mn, Mo, Zn) os que participam do ciclo biológico como Al, C, Ca, Fe, H, K, Mn, N, Na, O, Si. Ou elementos maiores como Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, e Si formadores de rocha, componentes da água e alguns dos principais constituintes dos organismos; elementos menores: Ti, P, S e Mn tem abundancia na faixa entre 1% e 0,01%; são elementos traço, Ba, Ce, Co, Cs, Cr, Hf, La, Ni, Rb, Sc Sr, Ta, Th, U e Zr; e além de elementos sub-traço Pt e Pd com teores na faixa da parte por bilhão (ppb) (LICHT, 2001).

Não foram avaliados todos os elementos identificados pela análise. Os elementos químicos Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, V e Zn, são apresentados por FEPAM (2014) com os respectivos VRQs regionalizados, por isso foram selecionados. Os elementos Ba, Eu, Ga, Nb, Nd, Rb, Sr, Y, Yb e Zr são elementos traço e foram escolhidos. Os elementos químicos Al, As, B, Ca, Cl, F, Fe, K, Mg, Mn, Na, P e S, Si e Sn são abundantes (maiores) na crosta terrestre e foram escolhidos para a comparação com o *background* geoquímico por serem elementos maiores e estarem presentes nas análises.

Para determinada avaliação química e ambiental de uma área é necessário a determinação do *background* geoquímico. O tópico *background* geoquímico é complexo trazendo consigo incertezas e imprecisão, como é possível observar através do expressivo desvio padrão que existe entre os VRQs do presente estudo (FEPAM, 2014; MASON E MOORE, 1982; BOWEN, 1979). Mesmo assim alguns elementos apresentaram teores elevados acima de todos os VRQs do estudo deflagrando atividade anômala em função das influências antrópicas.

Comenta-se que a coleta de materiais em campo para a análise em laboratório deve ser muito bem parametrizada e organizada para a preservação e controle das amostras. É necessário sempre a aplicação e alguma metodologia de amostragem incremental pois a coleta pontual pode acarretar resultados atípicos das análises em função da anisotropia do material, como pode ser percebido alguns meses com valores não detectados e outros com valores acima dos VRQs do estudo para determinados elementos.

No presente estudo, foram considerados anômalos aqueles elementos químicos cujo teor se encontra acima de todos os VRQs adotados no *background*

geoquímico. Os elementos anômalos do presente estudo são: Eu, Cl, Nd, P, Pb, Si, Sn, Yb e Zr, as análises ambientais foram realizadas no solo e não na água que percolou através do solo. Como fica evidenciado nos resultados do trabalho e acordando com Licht (2001), Kabata-Pendias (2011), Rose *et al.* (1979) e Rohde (2013) a mobilidade e a disponibilidade de elementos no solo é complexa e influenciada por diversas variáveis naturais e antrópicas, físicas e químicas.

Todos os elementos da categoria FEPAM (2014) apresentam teores superiores aos estabelecidos pelo *background* geoquímico. Com relação aos VRQs determinados por Mason e Moore (1982) e Bowen (1979) os teores de *background* para muitos elementos não são semelhantes e os resultados obtidos a partir das análises químicas oscilam havendo situações em que o teor encontrado na análise encontra-se acima de determinado VRQ mas abaixo de outro, como por exemplo com o Cr (Quadro 3).

Licht (2001) estabelece que processos antropogênicos, no ambiente urbano, são responsáveis pela produção, mobilização e emissão de incontáveis, complexos e pouco conhecidos resíduos sólidos e efluentes fluidos. Licht (2001) e Rohde (2013) tratam da complexidade dos processos, das interpretações e interações naturais ou antropicas relacionadas ao ambiente quimio-físico. Os autores colocam que as avaliações empíricas já não cabem mais e que o atual estágio de desenvolvimento humano demanda da aplicação de tecnologia para a preservação e intergeracionalidade dos recursos naturais.

Para a geoquímica, em função das diferenças ambientais e cíclicas, divide-se o planeta terra em “camadas” ou “esferas”. As atividades antrópicas já deflagram uma alteração a nível global, principalmente nos teores de determinados elementos na geosfera, de maneira que já é considerada uma camada de influência e ciclos antrópicos para a geoquímica, a antroposfera.

A visão simplista aplicada nas análises de áreas contaminadas não consideram todas as variáveis relativas aos fenômenos físico-químicos resultantes das atividades humanas. As atividades antropogênicas modificam a natureza de maneira drástica e imprevisível. Nesta pesquisa evidenciou-se a acidificação das superfícies no entorno do aterro de resíduos, assunto que será mais bem detalhado no item 4.4 deste trabalho. Esta ocorrência, no entanto, promoveu uma redução do coeficiente de permeabilidade do local, o que em uma

análise ambiental pode ser positivo, já que para uma impermeabilização inferior do aterro sanitário quanto mais impermeável o *liner* mais segura é a operação.

A seguir são apresentados os resultados obtidos quando comparando-se os teores dos elementos obtidos no presente trabalho com os de FEPAM (2014), de Mason e Moore (1982) e de Bowen (1979). A comparação, de caráter analítico, não é considerada a precisão já que é um método semiquantitativo. Foram determinados, em função da geologia local, *background* geoquímico para folhelho e arenito. O folhelho é um material bastante estudado pela geoquímica em função de sua proximidade e relação geológica com o petróleo. O arenito é formação típica e facilmente evidenciada na região em questão e o solo local é tipicamente sedimentar.

4.3.3.1.1 Categoria de Elementos FEPAM (2014)

A seguir os quadros de 1 a 9 apresentam a avaliação ambiental do teor dos elementos Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, V e Zn, respectivamente, categorizados como FEPAM (2014).

Quadro 1 Elemento químico Cd.

Cadmio (Cd): alguns metais como Cd, em condições especiais, formam fases sólidas discretas no solo, quando em elevadas concentrações e devido a processos diagenéticos ou poluição (KABATA-PENDIAS, 2011). Não detectado nas análises do lixiviado.	
<i>Liner</i> 1: Pouco móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979). Não detectado.	<i>Liner</i> 2: Moderadamente móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979). Não detectado.
<i>Liner</i> 3: Muito pouco móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979). Não detectado.	<i>Liner</i> 4: Muito pouco móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979). Não detectado.

Para o Cd, comparando os *liners* referência (1 e 2) com o *liners* alternativos (3 e 4), percebe-se uma redução na mobilidade.

Quadro 2 Elemento químico Co.

Cobalto (Co): Segundo Kabata-Pendias (2011), rochas ígneas e sedimentares não apresentam teor de Co.	
<i>Liner 1</i> : Não detectado.	<i>Liner 2</i> : Não detectado.
<i>Liner 3</i> : Não detectado.	<i>Liner 4</i> : Não detectado.

Quadro 3 Elemento químico Cr.

Cromo (Cr): O Cr em condições especiais, forma fases sólidas discretas no solo, quando em elevadas concentrações e devido a processos diagenéticos ou poluição (KABATA-PENDIAS, 2011). Elemento presente o lixiviado.	
<i>Liner 1</i> : de 58 ppm a 75 ppm, bem próximos dos valores de Mason e Moore (1982) e Bowen (1979) mas acima de FEPAM (2014). Muito pouco móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979).	<i>Liner 2</i> : de 48 ppm a 80 ppm, bem próximos dos valores de Mason e Moore (1982) e dos de Bowen (1979) mas acima de FEPAM (2014).
<i>Liner 3</i> : de 50 ppm a 75 ppm, bem próximos dos valores de Mason e Moore (1982) e Bowen (1979) mas acima de FEPAM (2014). Muito pouco móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979).	<i>Liner 4</i> : de 39 ppm a 73 ppm, bem próximos dos valores de Mason e Moore (1982) e dos de Bowen (1979) mas acima de FEPAM (2014). Muito pouco móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979).

O Cr apresentou teores próximos dos de Mason e Moore (1979), acima dos de FEPAM (2014) e com comportamento predominantemente muito pouco móvel (ROSE *et al.*, 1979).

Quadro 4 Elemento químico Cu.

Cobre (Cu): Cu, em condições especiais, forma fases sólidas discretas no solo, quando em elevadas concentrações e devido a processos diagenéticos ou poluição (KABATA-PENDIAS, 2011).	
<i>Liner 1</i> : VRQs próximos aos de Bowen (1979) e acima dos da FEPAM (2014).	<i>Liner 2</i> : VRQs próximos aos de Bowen (1979) e acima dos da FEPAM (2014), sensivelmente inferiores aos dos outros <i>liners</i> .
<i>Liner 3</i> : VRQs próximos aos de Bowen (1979) e acima dos da FEPAM (2014).	<i>Liner 4</i> : VRQs próximos aos de Bowen (1979) e acima dos da FEPAM (2014).

O teor de Cu apresenta praticamente o mesmo comportamento em todos os *liners*, com teores pouco inferiores no *liner 2*.

Quadro 5 Elemento químico Hg.

Mercúrio (Hg): Moderadamente móvel para Rose <i>et al.</i> (1979). Elemento presente no lixiviado.	
<i>Liner 1</i> : Não detectado.	<i>Liner 2</i> : Não detectado.
<i>Liner 3</i> : Não detectado.	<i>Liner 4</i> : Não detectado.

Quadro 6 Elemento Químico Ni.

<p>Níquel (Ni): O Ni apresenta, em termos de abundancia na crosta terrestre, valor estimado médio de 20 mg/kg, seu teor está fortemente relacionado com a sua presença na rocha matriz e não existem comprovações científicas da participação do Ni no metabolismo das plantas, apresentando forte relação com Fe e Mn (KABATA-PENDIAS, 2011). Elemento presente no lixiviado.</p>	
<p><i>Liner 1:</i> Maio e agosto com valores abaixo dos de Mason e Moore (1982) com agosto próximo aos valores de FEPAM (2014), mas todos acima dos VRQs. Todos valores abaixo dos VRQs de Bowen (1979).</p>	<p><i>Liner 2:</i> Todos valores acima dos de FEPAM (2014), acima também dos de Mason e Moore (1979) e abaixo dos de Bowen (1979). Moderadamente móvel, segundo Rose <i>et al.</i> (1979).</p>
<p><i>Liner 3:</i> Todos valores acima dos VRQs de FEPAM (2014). Junho e agosto abaixo dos de Mason e Moore (1982). Todos valores abaixo dos VRQs de Bowen (1979). Para Rose <i>et al.</i> (1979) muito pouco móvel.</p>	<p><i>Liner 4:</i> Valores próximos dos de Mason e Moore (1982), mas todos acima dos VRQs do estudo. Para Rose <i>et al.</i> (1979) muito pouco móvel.</p>

O teor do elemento químico Ni apresentou comportamento anômalo no *liner 4* e com pouca mobilidade nos *liners* alternativos.

Quadro 7 Elemento químico Pb.

<p>Chumbo (Pb): Alguns metais como Pb, em condições especiais, formam fases sólidas discretas no solo, quando em elevadas concentrações e devido a processos diagenéticos ou antropização (KABATA-PEDIAS, 2011). Comportamento anômalo com presença no lixiviado.</p>	
<p><i>Liner 1:</i> Todos valores acima dos VRQs do estudo. Pouco móvel (ROSE <i>et al.</i>, 1979).</p>	<p><i>Liner 2:</i> Todos valores acima dos VRQs do estudo.</p>
<p><i>Liner 3:</i> Todos valores acima dos VRQs do estudo. Muito pouco móvel (ROSE <i>et al.</i>, 1979).</p>	<p><i>Liner 4:</i> Todos valores acima dos VRQs do estudo. Muito pouco móvel (ROSE <i>et al.</i>, 1979).</p>

O elemento Pb apresentou pouca mobilidade nos *liners* alternativos em função do pH.

Quadro 8 Elemento químico V.

Vanádio (V): Os teores de V estão fortemente relacionados com o tipo da rocha matriz. No solo do planeta terra o teor de V varia na faixa de 69 a 320 ppm. Durante os processos de intemperismo a mobilidade do V depende da mineralogia, apresentando forte relação com Fe e Mn (KABATA-PENDIAS, 2011).	
<i>Liner 1</i> : Somente no mês de agosto abaixo de FEPAM (2014). Maio e julho acima dos valores de Bowen (1979), todos os meses acima dos VRQs de Mason e Moore (1982).	<i>Liner 2</i> : Segundo Rose <i>et al.</i> (1979), moderadamente móvel. Valores de agosto abaixo somente dos de Bowen (1979), junho e julho acima. Todos acima dos de FEPAM (2014) e dos de Mason e Moore (1982).
<i>Liner 3</i> : Muito pouco móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979). Todos valores acima dos VRQs do estudo, com exceção do mês de agosto, abaixo dos valores de Bowen (1979).	<i>Liner 4</i> : Muito pouco móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979). Todos valores acima dos VRQs do estudo.

Os teores de V apresentam comportamento anômalo no *liner 4*. O *liner 3* quase apresenta comportamento 100% anômalo. Todos acima dos VRQs de FEPAM (2014) em todos os *liners*.

Quadro 9 Elemento químico Zn.

Zinco (Zn): Com média de teor na crosta terrestre de 70 ppm, atividades rurais tendem a apresentar um aumento no teor de Zn no solo. Alguns metais como Zn, em condições especiais, formam fases sólidas discretas no solo, quando em elevadas concentrações e devido a processos diagenéticos ou poluição (KABATA-PENDIAS, 2011). Elemento presente no lixiviado.	
<i>Liner 1:</i> Acima dos VRQs de FEPAM (2014) e Mason e Moore (1982), e abaixo dos de Bowen (1979). Moderadamente móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979).	<i>Liner 2:</i> Acima dos VRQs de FEPAM (2014) e Mason e Moore (1982), e abaixo dos de Bowen (1979). Moderadamente móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979).
<i>Liner 3:</i> Acima dos VRQs de FEPAM (2014) e Mason e Moore (1982), e abaixo dos de Bowen (1979). Muito pouco móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979).	<i>Liner 4:</i> Acima dos VRQs de FEPAM (2014) e Mason e Moore (1982), e abaixo dos de Bowen (1979). Muito pouco móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979).

Em comparação, o elemento Zn apresentou menor mobilidade nos *liners* alternativos do que nos naturais.

4.3.3.1.2 Categoria de Elementos Maiores:

Os elementos categorizados como elementos maiores são Al, As, B, Ca, Cl, F, Fe, K, Mg, Mn, Na, P e S, Si e Sn e são detalhadas as análises nos Quadros 10 a 24, respectivamente.

Quadro 10 Elemento químico Al.

Alumínio (Al): Para Kabata-Pendias (2011) o segundo elemento mais abundante no planeta terra, torna-se tóxico em meio ácido. De acordo com Rose et al. (1979) muito pouco móvel. Elemento presente no lixiviado.	
<i>Liner 1</i> : valores próximos aos de Mason e Moore (1982) e abaixo dos de Bowen (1979).	<i>Liner 2</i> : valores próximos aos de Mason e Moore (1982) e abaixo dos de Bowen (1979).
<i>Liner 3</i> : valores sensivelmente menores. Próximos aos de Mason e Moore (1982) e abaixo dos de Bowen (1979).	<i>Liner 4</i> : valores próximos aos de Mason e Moore (1982) e abaixo dos de Bowen (1979).

Mesmo com presença constante no lixiviado o elemento Al não apresentou comportamento anômalo.

Quadro 11 Elemento químico As.

Arsênio (As): A partir dos resultados é possível inferir a sua presença no RCDR. Óxidos de ferro apresentam importante influência no controle dos teores de As cujo são relativamente baixos na superfície da crosta terrestre (KABATA-PENDIAS, 2011).	
<i>Liner 1</i> : Não detectado. Moderadamente móvel segundo Rose et al. (1979).	<i>Liner 2</i> : Não detectado. Moderadamente móvel segundo Rose et al. (1979).
<i>Liner 3</i> : Abaixo dos VRQs. Muito pouco móvel (ROSE et al., 1979).	<i>Liner 4</i> : Abaixo dos VRQs. Muito pouco móvel (ROSE et al., 1979).

O elemento As não foi detectado nos *liners* naturais mas foi detectado nos *liners* alternativos, abaixo dos VRQs do estudo e com comportamento de pouca mobilidade.

Quadro 12 Elemento químico B.

Boro (B): Segundo Kabata-Pendias (2011), é estimado o teor de 42 ppm para os solos do mundo. É o elemento mais móvel dentre os micronutrientes e pouco solúvel.	
<i>Liner 1</i> : valores acima dos valores de Mason e Moore (1982) e abaixo dos de Bowen (1979).	<i>Liner 2</i> : valores acima dos valores de Mason e Moore (1982) e abaixo dos de Bowen (1979). Altamente móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979).
<i>Liner 3</i> : valores acima dos valores de Mason e Moore (1982) e somente em maio acima dos de Bowen (1979).	<i>Liner 4</i> : valores acima dos valores de Mason e Moore (1982) e abaixo dos de Bowen (1979).

O elemento químico B apresentou grande mobilidade no *liner 2* e mobilidade desconhecida para os demais *liners*.

Quadro 13 Elemento químico B.

Cálcio (Ca): segundo Kabata-Pendias (2011) elemento químico que pode ser constituinte do verniz do deserto. Ainda segundo a autora a chuva, a evapotranspiração e a transpiração das plantas podem mudar a concentração do Ca e de outros íons maiores.	
<i>Liner 1</i> : Valores abaixo aos VRQs do estudo.	<i>Liner 2</i> : Valores abaixo aos VRQs do estudo.
<i>Liner 3</i> : Valores abaixo aos VRQs do estudo.	<i>Liner 4</i> : Valores abaixo aos VRQs do estudo. Teores mais elevados que os demais <i>liners</i> .

O maior teor de Ca encontrado no *liner 4* pode ser em função da presença do RCDRC. O Ca no *liner 1* apresentou comportamento de decréscimo de seu teor no tempo com o mês de agosto não detectado.

Quadro 14 Elemento químico Cl.

Cloro (Cl): bastante móvel na maioria das condições o Cl pode constituir vários minerais e em condições especiais os ânions podem facilmente se associar a outros metais e formar minerais (KABATA-PENDIAS, 2011). Anomalia somente nos materiais naturais. Altamente móvel segundo Rose <i>et al.</i> (1979). Apresenta comportamento anômalo. Elemento presente no lixiviado.	
<i>Liner 1</i> : em torno do dobro do VRQ de Mason e Moore (1982) e 20x dos de Bowen (1979).	<i>Liner 2</i> : em torno do dobro do VRQ de Mason e Moore (1982) e 20x dos de Bowen (1979).
<i>Liner 3</i> : valores de maio e julho mais próximos dos valores de Bowen (1979).	<i>Liner 4</i> : valores de maio e julho mais próximos dos valores de Bowen (1979).

Os *liners* alternativos apresentaram teores de Cl menores se comparados com os resultados dos teores de Cl obtidos para os *liners* naturais.

Quadro 15 Elemento químico F.

Flúor (F): O F é mais comum em rochas ígneas (KABATA-PENDIAS, 2011).	
<i>Liner 1</i> : Não detectado.	<i>Liner 2</i> : Não detectado.
<i>Liner 3</i> : Não detectado.	<i>Liner 4</i> : Não detectado.

Quadro 16 Elemento químico Fe.

Ferro (Fe): A geoquímica do Fe em seus ciclos e sob influência biológica é bastante complexa. As reações envolvendo Fe na natureza dependem fortemente do pH. Com abundância no solo em média de 3,5% está relacionado com a coloração do solo (KABATA-PENDIAS, 2011). Elemento presente no lixiviado.	
<i>Liner 1</i> : VRQs abaixo dos de Bowen (1979) e acima dos de Mason e Moore (1982).	<i>Liner 2</i> : VRQs abaixo dos de Bowen (1979) e acima dos de Mason e Moore (1982).
<i>Liner 3</i> : VRQs acima dos de Bowen (1979) e acima dos de Mason e Moore (1982).	<i>Liner 4</i> : VRQs abaixo dos de Bowen (1979) e acima dos de Mason e Moore (1982).

O teor de Fe apresentou comportamento anômalo no *liner* 3.

Quadro 17 Elemento químico K.

Potássio (K): A chuva, a evapotranspiração e a transpiração das plantas podem mudar a concentração do K e de outros íons maiores (KABATA-PENDIAS, 2011).	
<i>Liner</i> 1: Abaixo dos VRQs do estudo.	<i>Liner</i> 2: Abaixo dos VRQs do estudo.
<i>Liner</i> 3: Abaixo dos VRQs do estudo.	<i>Liner</i> 4: Abaixo dos VRQs do estudo.

O teor de K apresentou-se abaixo dos VRQs do estudo em todos os *liners*.

Quadro 18 Elemento químico Mg.

Magnésio (Mg): Segundo Kabata-Pendias (2011), o Mg, juntamente com o Ca são os elementos de maior prioridade no regime de oxidação. Ainda segundo o autor a chuva, a evapotranspiração e a transpiração das plantas podem mudar a concentração do Mg e de outros íons maiores.	
<i>Liner</i> 1: Detectado somente nos meses de maio e agosto. Abaixo dos VRQs do estudo.	<i>Liner</i> 2: Detectado somente nos meses de maio e agosto. Abaixo dos VRQs do estudo.
<i>Liner</i> 3: Detectado somente nos meses de maio e agosto. Abaixo dos VRQs do estudo.	<i>Liner</i> 4: Abaixo dos VRQs do estudo. Não detectado no mês de julho.

O Mg não foi detectado em todos os meses de análise talvez por não ter sido adotado nenhum procedimento de coleta incremental. A heterogeneidade dos materiais granulares pode promover alterações deste tipo nos resultados (ITRC, 2012).

Quadro 19 Elemento químico Mn.

Manganês (Mn): Segundo Kabata-Pendias (2011), o Mn ocorre em águas subterrâneas, é elemento constituinte do verniz do deserto e apresenta adsorção aos metais. Elemento presente no lixiviado.	
<i>Liner 1</i> : no mês de maio abaixo dos VRQs do estudo. Nos outros meses acima dos VRQs de Mason e Moore (1982).	<i>Liner 2</i> : valores abaixo dos de Bowen (1979) e acima dos de Mason e Moore (1982).
<i>Liner 3</i> : valores abaixo dos de Bowen (1979) e acima dos de Mason e Moore (1982).	<i>Liner 4</i> : valores abaixo dos de Bowen (1979) e acima dos de Mason e Moore (1982).

Com exceção do mês de maio no *liner 1*, todos apresetaram teores abaixo dos de Bowen (1979) e acima dos de Mason e Moore (1982).

Quadro 20 Elemento químico Na.

Sódio (Na): Segundo Rose <i>et al.</i> 1979) moderadamente móvel para as faixas de pH dos <i>liners</i> .	
<i>Liner 1</i> : Não detectado.	<i>Liner 2</i> : Não detectado.
<i>Liner 3</i> : Não detectado.	<i>Liner 4</i> : Não detectado.

Quadro 21 Elemento químico P.

Fosforo (P): Para Licht (2001) o aumento dos teores de P nas águas, acompanha a atividade humana. No presente estudo apresenta comportamento anômalo com presença no lixiviado.	
<i>Liner 1</i> : Valores acima dos VRQs do estudo. Pouco móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979).	<i>Liner 2</i> : Valores acima dos VRQs do estudo. Moderadamente móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979).
<i>Liner 3</i> : Não detectado. Pouco móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979).	<i>Liner 4</i> : Acima dos VRQs do estudo, não detectado no mês de julho. Pouco móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979).

O elemento químico P apresentou comportamento anômalo e presença no lixiviado com provável origem do aterro sanitário lindeiro.

Quadro 22 Elemento químico S.

Enxofre (S): Segundo Licht (2001), os elementos classificados a partir da classificação geoquímica de Goldschmidt como Calcófilos são os que apresentam afinidade pelo elemento químico S (Ag, Cd, Ga, Hg, In, Tl, Zn, etc.).	
<i>Liner 1</i> : Valores abaixo dos de Bowen (1979), acima dos de Mason e Moore (1982). Altamente móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979).	<i>Liner 2</i> : Valores abaixo dos de Bowen (1979), acima dos de Mason e Moore (1982). Altamente móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979).
<i>Liner 3</i> : Valores abaixo dos de Bowen (1979), acima dos de Mason e Moore (1982).	<i>Liner 4</i> : Valores abaixo dos de Bowen (1979), acima dos de Mason e Moore (1982). Valores de maio e julho bem próximos dos de Bowen (1979).

Com relação aos teores de S, os *liners* alternativos apresentaram comportamento igual entre si. Os *liners* compostos por material natural apresentaram comportamento altamente móvel para o elemento S e também são iguais entre si.

Quadro 23 Elemento químico Si.

Sílica (Si): O fator que mais influencia a solubilidade da sílica é o aumento de temperatura (LAZZERINI e BONOTTO, 2014). Pouco móvel para Rose <i>et al.</i> (1979). Teores de Si do presente estudo anômalos.	
<i>Liner 1</i> : Teores de Si anômalos. Faixa de pH próxima ao ideal para precipitação (LAZZERINI e BONOTTO, 2014).	<i>Liner 2</i> : Teores de Si anômalos. Solubilidade da sílica é constante (LAZZERINI e BONOTTO, 2014).
<i>Liner 3</i> : Teores de Si anômalos. Nesse pH a solubilidade da sílica é constante (LAZZERINI e BONOTTO, 2014).	<i>Liner 4</i> : Teores de Si anômalos. Tendência de ocorrer como molécula dispersa nesse pH (LAZZERINI e BONOTTO, 2014).

O teor de Si é anômalo em todos os *liners*.

Quadro 24 Elemento químico Sn.

Estanho (Sn): Segundo Kabata-Pendias (2011), nos processos de intemperismo, a mobilidade do Sn é relacionada com o pH, segue o comportamento do Fe e do Al. O Sn é largamente utilizado em ligas metálicas, apresentando anomalia nos teores do presente estudo.	
<i>Liner 1</i> : Muito pouco móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979). Valores consideravelmente acima dos VRQs do estudo.	<i>Liner 2</i> : Muito pouco móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979). Valores consideravelmente acima dos VRQs do estudo.
<i>Liner 3</i> : Muito pouco móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979). Valores consideravelmente acima dos VRQs do estudo.	<i>Liner 4</i> : Muito pouco móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979). Valores consideravelmente acima dos VRQs do estudo.

O teor de Sn é anômalo em todos os *liners*, apresentando muito pouca mobilidade.

4.3.3.1.3 Categoria de Elementos Traço

Os elementos químicos Ba, Eu, Ga, Nb, Nd, Rb, Sr, Y, Yb Zr são categorizados como elementos traço e a suas análises ambientais são apresentadas nos Quadros 25 a 34.

Quadro 25 Elemento químico Ba.

Bário (Ba): para Kabata-Pendias (2011), na crosta cerca de 400 ppm e faixa entre 250 ppm e 584 ppm no topo da crosta terrestre.	
<i>Liner 1</i> : Não detectado. Pouco móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979).	<i>Liner 2</i> : Não detectado. Pouco móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979).
<i>Liner 3</i> : Não detectado. Moderadamente móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979).	<i>Liner 4</i> : Não detectado. Moderadamente móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979).

O elemento químico Ba não foi detectado.

Quadro 26 Elemento químico Eu.

Európio (Eu): Segundo Kabata-Pendias (2011), Eu apresenta teor médio na crosta terrestre de 1,2 ppm, sendo identificada aqui uma anomalia pois todos os materiais em todos os meses apresentaram teores maiores do que todas as referências de <i>background</i> geoquímico estudadas. Comportamento anômalo.	
<i>Liner</i> 1: valores acima dos VRQs do estudo.	<i>Liner</i> 2: valores acima dos VRQs do estudo.
<i>Liner</i> 3: valores acima dos VRQs do estudo.	<i>Liner</i> 4: valores acima dos VRQs do estudo.

O teor de Eu é anômalo em todos os *liners*.

Quadro 27 Elemento químico Ga.

Gálio (Ga): Apesar de menos reativo, a geoquímica do elemento Ga é bastante similar à do elemento Al. A sua presença está associada à feldspatos, anfibólios e micas. A distribuição dos teores de Ga está correlacionada com a fração de argila do solo e hidróxidos de Fe e Mn (KABATA-PENDIAS, 2011).	
<i>Liner</i> 1: Valores acima dos VRQs do estudo, com exceção do mês de agosto, abaixo dos valores de Mason e Moore (1982). Muito pouco móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979).	<i>Liner</i> 2: Valores acima dos VRQs do estudo, próximos dos de Bowen (1979). Muito pouco móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979).
<i>Liner</i> 3: Valores próximos aos de Bowen (1979). Muito pouco móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979).	<i>Liner</i> 4: Valores próximos aos de Bowen (1979). Muito pouco móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979).

Os *liners* alternativos apresentaram teores de Ga próximos aos de Bowen (1979) e os *liners* naturais VRQs acima dos do estudo.

Quadro 28 Elemento químico Nb.

Nióbio (Nb): O comportamento do Nb durante o tempo é altamente dependente dos argilominerais. Com relatos de acúmulos de teores de Nb em certos solos sedimentares este apresenta pouca mobilidade na crosta terrestre (KABATA-PENDIAS).	
<i>Liner 1</i> : Valores próximos de Bowen (1979). Muito pouco móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979).	<i>Liner 2</i> : Valores abaixo dos de Bowen (1979), acima dos de Mason e Moore (1982).
<i>Liner 3</i> : Não detectado. Muito pouco móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979).	<i>Liner 4</i> : Valores próximos de Bowen (1979). Menor valor no mês de agosto, abaixo dos de Bowen (1979). Muito pouco móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979).

O elemento químico Nb não foi detectado no *liner 3*.

Quadro 29 Elemento Químico Nd.

Neodímio (Nd): Segundo Kabata-Pendias (2011), Nd apresenta teor médio na crosta estimado de 28 ppm, com anomalia identificada no presente estudo.	
<i>Liner 1</i> : Valores acima dos VRQs do estudo.	<i>Liner 2</i> : Não detectado.
<i>Liner 3</i> : Não detectado.	<i>Liner 4</i> : Não detectado.

O Nd é utilizado na confecção das pastilhas do ensaio de FRX, tendo sido detectado por algum erro no procedimento de análise.

Quadro 30 Elemento químico Rb.

Rubídio (Rb): o comportamento do Rb nos processos sedimentares e pedogênicos estão relacionados com a adsorção em coloides de argilas., (KABATA-PENDIAS, 2011). Pouco móvel (ROSE <i>et al.</i> , 1979).	
<i>Liner 1</i> : Abaixo dos VRQs de Bowen (1982).	<i>Liner 2</i> : Abaixo dos VRQs de Bowen (1982).
<i>Liner 3</i> : Abaixo dos VRQs de Bowen (1982).	<i>Liner 4</i> : Abaixo dos VRQs de Bowen (1982).

O Rb é pouco móvel e com teor bastante reduzido em todos os *liners*.

Quadro 31 Elemento químico Sr.

Estrôncio (Sr): Argilas apresentam grande poder de adsorção do metal Sr e tanto as características geoquímicas como as bioquímicas do Sr se assemelham às do Ca. O Sr apresenta comportamento moderadamente móvel em solos e seu cátion é facilmente adsorvido, na forma hidratada, por argilominerais, óxidos de Fe e hidróxidos (KABATA-PENDIAS, 2011).	
<i>Liner 1</i> : Valores abaixo dos de Bowen (1979), acima dos de Mason e Moore (1982).	<i>Liner 2</i> : Valores abaixo dos de Bowen (1979), acima dos de Mason e Moore (1982).
<i>Liner 3</i> : Valores abaixo dos de Bowen (1979), acima dos de Mason e Moore (1982).	<i>Liner 4</i> : Valores abaixo dos de Bowen (1979), acima dos de Mason e Moore (1982).

O Sr apresenta teores abaixo dos VRQs de Bowen (1979), acima dos VRQs de Mason e Moore (1982) em todos os *liners*.

Quadro 32 Elemento químico Y.

Ítrio (Y): Na faixa de 20 a 33 ppm na crosta terrestre o Y apresenta comportamento geoquímico semelhante aos elementos classificados como Terra Rara. Exibe afinidade litofílica e incorporado em diversos minerais como óxidos, carbonatos, silicatos e fosfatos (KABATA-PENDIAS, 2011).	
<i>Liner 1</i> : Valores abaixo dos de Bowen (1979), acima dos de Mason e Moore (1982).	<i>Liner 2</i> : Valores abaixo dos de Bowen (1979), acima dos de Mason e Moore (1982), em maio não detectado.
<i>Liner 3</i> : Valores abaixo dos de Bowen (1979), acima dos de Mason e Moore (1982), sensivelmente menores aos dos outros <i>liners</i> .	<i>Liner 4</i> : Valores abaixo dos de Bowen (1979), acima dos de Mason e Moore (1982).

O elemento químico Y apresentou teores abaixo dos de Bowen (1979), acima dos de Mason e Moore (1982) em todos os *liners*.

Quadro 33 Elemento químico Yb.

Ítérbio (Yb): Kabata-Pendias (2011) apresentam <i>background</i> para a crosta terrestre com teor médio de Yb de 2,2 ppm.	
<i>Liner 1</i> : Valores acima dos VRQs do estudo (~10x dos de Bowen, 1979).	<i>Liner 2</i> : Valores acima dos VRQs do estudo (~10x dos de Bowen, 1979).
<i>Liner 3</i> : Valores acima dos VRQs do estudo (~10x dos de Bowen, 1979).	<i>Liner 4</i> : Valores acima dos VRQs do estudo (~10x dos de Bowen, 1979).

O elemento químico Yb apresentou comportamento anômalo em seu teor em todos os *liners*.

Quadro 34 Elemento químico Zr

Zircônio (Zr): a abundância na crosta terrestre varia de 100 a 200 ppm, apresentando teores menores em rochas ultramáficas e sedimentos calcários, (KABATA-PENDIAS, 2011). Comportamento anômalo no presente estudo.	
<i>Liner 1</i> : valores <i>in loco</i> superiores aos VRQs do presente estudo (~2x). Zn muito pouco móvel para a faixa de pH (ROSE <i>et al.</i> , 1979).	<i>Liner 2</i> : <i>Liner 1</i> : valores <i>in loco</i> superiores aos VRQs do presente estudo (~2x). Zn muito pouco móvel para a faixa de pH (ROSE <i>et al.</i> , 1979).
<i>Liner 3</i> : Valores <i>in loco</i> superiores aos VRQs do presente estudo (~2x).	<i>Liner 4</i> : Valores <i>in loco</i> superiores aos VRQs do presente estudo (~2x).

Para o Zr, todos os *liners* apresentaram cerca de duas vezes o teor dos VRQs do presente estudo em todos os *liners*, com comportamento anômalo.

4.3.3.2 Óxidos

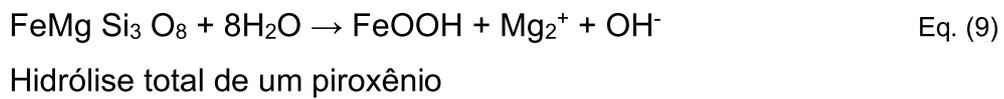
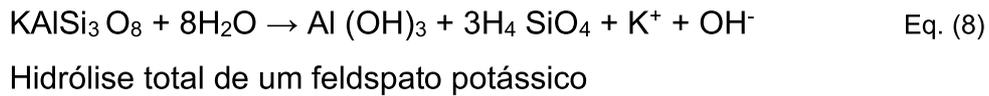
Segundo Licht (2001), são os óxidos hidratados de Al, Fe e Mn e matéria orgânica que são os constituintes químicos, cuja forma de ocorrência e dispersão estão relacionadas aos processos de sorção em argilas. Os óxidos estão mais relacionados às reações e à suscetibilidade química.

De acordo com Toledo e Oliveira (2009), a presença da água no estado líquido em contato com as rochas promove reações químicas. Ao conjunto destas reações se dá o nome de intemperismo químico, resumido da seguinte maneira:

(...)“a água da chuva, considerada neste contexto como uma “solução de alteração” ou “de intemperismo”, carregada de substâncias dissolvidas ao longo de sua trajetória pela atmosfera e pelo contato com a biosfera, quando em contato com os minerais primários, estes sofrem reações químicas diversas, que dependem dos reagentes (minerais originais da rocha e soluções de alteração) e das condições em que as reações se processam (clima, relevo, presença de organismos e tempo). O resultado destas reações será o conjunto de minerais secundários (ou supérgenos, pois são gerados na superfície), que constituem as formações superficiais sendo chamados de argilo minerais, podendo conter altas concentrações de metais presentes na rocha mãe. A seguinte reação geral pode ser considerada para ilustrar o intemperismo químico.”(Equação 7).



Ainda conforme Toledo e Oliveira (2009), as principais reações que ocorrem neste tipo de intemperismo são: hidratação, hidrólise, oxidação, carbonatação e complexação. Como exemplo de reação, a hidrólise de feldspatos e piroxênio apresentados nas Equações 8 e 9, respectivamente.



Como as reações estão mais relacionadas aos óxidos é avaliado o comportamento dos óxidos nos *liners* no tempo a fim de se avaliar o nível de reatividade do material. A Tabela 21 apresenta o comportamento de cada elemento em cada *liner* no decorrer do período de tempo estudado e as respectivas categorias adotadas.

Tabela 21 Comportamento geoquímico dos elementos no tempo.

Categoria	Óxido	Liner 1	Liner 2	Liner 3	Liner 4
FEPAM (2014)	Cd	ND	ND	ND	ND
	Co	ND	ND	ND	ND
	Cr ₂ O ₃	D	D	L	D
	CuO	L	C	D	L
	Hg	ND	ND	ND	ND
	NiO	L	L	D	D
	PbO	L	L	L	L
	V ₂ O ₅	C	L	L	L
	ZnO	L	D	L	L
	Elementos Traço	Ga ₂ O ₃	L	C	C
Nb ₂ O ₅		SC	C	SC	L
Nd ₂ O ₃		L	SC	SC	SC
Ba		ND	ND	ND	ND
Rb ₂ O		D	D	L	D
SrO		C	L	L	L
Y ₂ O ₃		L	C	L	L
Eu ₂ O ₃		D	L	L	L
Yb ₂ O ₃		D	D	L	L
ZrO ₂		D	L	C	L
Elementos Maiores	Al ₂ O ₃	D	D	L	L
	As ₂ O ₃	SC	SC	SC	D
	B ₂ O ₃	ND	ND	ND	ND
	CaO	D	C	D	L
	Cl	C	L	C	C
	F ₂ O ₃	ND	ND	ND	ND
	Fe ₂ O ₃	L	L	D	L
	K ₂ O	C	L	L	D
	MgO	SC	SC	SC	SC
	MnO	C	L	D	L
	Na ₂ O	SC	SC	SC	SC
	P ₂ O ₅	L	L	SC	D
	SO ₃	D	D	D	L
	SiO ₂	C	C	C	L
	SnO ₂	SC	L	SC	L
	TiO ₂	D	L	L	L
TeO ₂	SC	SC	SC	SC	

Legenda: L: comportamento linear; C: comportamento de crescimento; D: comportamento de decréscimo; SC: sem comportamento; ND: não detectado.

A Tabela 22 apresenta os resultados dos teores dos elementos óxidos, em ppm, obtidos a partir dos ensaios realizados nas amostras deformadas

coletadas nas campanhas de monitoramento nos meses de maio, junho, julho e agosto de 2019.

Tabela 22 Teor em ppm dos elementos óxidos, por *liner* e no tempo.

Elemento (ppm)	1				2				3				4			
	Maio19	Junho19	Julho19	Agosto19												
Al ₂ O ₃	3712,296	2944,291	3306,897	2986,976	3696,739	3586,02	3439,017	3369,268	2427,878	3166,427	3280,85	3084,111	2787,607	3122,674	2554,858	3288,931
As ₂ O ₃	ND	10,1495	14,4068	ND	ND	11,2599	12,9728	ND	9,1103	11,8466	ND	ND	9,2487	10,5036	8,6892	ND
CaO	42,3138	39,146	35,4993	ND	42,1398	35,9378	50,407	56,3696	5251,949	155,8822	299,5695	193,4994	883,9313	509,8732	3040,596	460,655
Cl	93,6348	93,9265	112,3564	121,8903	86,8204	108,0124	98,4862	95,0934	43,4004	128,4794	73,4221	96,7168	55,114	99,3872	75,6406	97,0608
Cr ₂ O ₃	29,9285	18,2014	24,3444	ND	31,9383	32,9742	19,9193	17,7252	25,3202	20,517	21,3681	22,8534	24,1334	28,763	13,4365	16,5948
CuO	9,0437	9,997	11,3998	8,7817	8,9374	8,43	9,0735	9,2374	11,0354	9,871	9,6484	10,171	10,1813	10,3754	10,2272	10,2604
Eu ₂ O ₃	63,7277	68,5675	63,4805	44,2688	40,9384	63,5457	60,7108	52,0407	55,2902	68,8653	58,4205	69,4334	63,1795	82,1445	59,3879	44,8144
Fe ₂ O ₃	22588,2	27071,22	26699,08	20707,12	23258,03	21675,28	21136,79	23410,57	23333,03	24294,06	22802,52	22121,73	24078,49	28255,3	21630,29	21530,8
Ga ₂ O ₃	15,5014	12,3405	14,4646	11,8884	13,1898	14,9671	14,075	13,4514	9,4455	14,1625	15,1	12,8036	12,9429	13,4828	10,282	12,3395
K ₂ O	235,0886	260,9323	249,0365	258,867	290,9601	211,2292	214,6545	271,0495	416,9959	304,7087	246,4998	352,7441	452,5816	313,2354	359,356	304,7841
MgO	13,2424	ND	ND	14,5122	11,2801	ND	ND	9,9959	6,4311	ND	ND	14,2604	2,5642	ND	5,9432	11,5561
MnO	41,9472	69,1201	69,5004	94,472	72,3524	50,7528	58,5074	65,6207	112,2012	82,1326	58,3166	79,9026	131,486	88,5452	307,1497	78,1335
Nb ₂ O ₅	44,7911	37,3997	42,5684	ND	ND	43,9446	43,4736	38,2934	ND	40,9752	40,0002	ND	36,3123	43,5071	37,4206	38,0145
Nd ₂ O ₃	9,186	10,1086	12,0024	10,7717	13,3512	ND	ND	9,9779	ND	ND	8,9146	ND	ND	ND	ND	10,6901
NiO	4,5118	5,5547	5,4238	4,1191	4,3405	5,2521	5,4383	4,8229	4,2784	4,1713	5,6986	3,2977	4109,2	5,9236	3,9732	4,5649
P ₂ O ₅	50,4527	68,1206	57,8019	69,4197	69,5926	47,4202	46,9596	68,0857	ND	55,7753	ND	65,4342	65,7786	70,028	ND	59,5583
PbO	41,1431	31,0313	30,9433	36,5625	39,5082	31,3432	27,0203	39,8777	25,2981	29,6825	26,8382	35,9442	26,5626	36,8312	30,2636	36,965
Rb ₂ O	78,6529	56,9365	67,3742	45,8792	62,4957	66,9889	67,9915	58,3721	74,8094	84,0427	78,9592	71,0323	86,6677	78,155	69,4761	16,1333
SiO ₂	19105,09	19923,37	20559,8	27261,66	19409,11	20777,02	21902,93	23046,1	15535,78	20491,39	20172	23147,21	17294,25	19459,5	18833,86	22331,38
SnO ₂	3,7989	3,342	3,7778	ND	3,9814	3,5189	3,5226	3,9953	3,9817	ND	4,0035	3,7422	2,8876	4,09	4,0752	3,2635
SO ₃	71,4351	52,7101	49,8019	38,7777	61,2711	60,5488	53,5006	51,913	398,2523	59,5745	110,077	32,7134	104,908	55,3559	245,595	51,074
SrO	277,9535	315,6006	287,487	429,6181	349,6456	317,8648	287,3944	341,861	522,2294	300,2676	269,5244	373,1947	324,2617	317,4633	415,1696	339,747

TeO ₂	ND	4,6429						ND	ND	5,1192	ND						
ThO ₂	ND	ND	12,4147	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
TiO ₂	1297,384	999,3325	1206,507	711,4564	989,1634	1167,568	1159,373	944,683	855,2846	1145,674	1251,024	938,0869	1091,923	1123,322	838,2207	1007,49	
V ₂ O ₅	35,1294	26,3325	34,7796	258,867	26,1025	30,9742	34,2872	22,7086	27,4801	28,1038	35,2221	23,5708	31,523	33,7145	25,7625	24,9786	
Y ₂ O ₃	50,3431	51,3444	60,4675	56,7132	ND	51,0953	4,1789	57,0538	52,3306	53,2284	51,9663	59,0652	67,7023	51,5366	52,3498	54,7776	
Yb ₂ O ₃	4,4639	4,4086	4,4651	4,1677	4,3988	4,4853	4,1789	4,5903	3,8678	4,409	3,3231	4,3683	4,6884	4,412	3,3511	4,2713	
ZnO	12,8499	15,0231	15,3961	12,1738	10,3569	16,0897	12,951	9,2374	18,4943	14,9101	14,5219	14,0838	16,9977	15,006	16,9305	14,1441	
ZrO ₂	970,0768	976,6832	962,0023	857,8041	904,1356	861,0275	1074,91	921,046	719,6317	928,5142	974,6854	954,6736	861,7264	1076,821	856,8441	989,7979	
pH	4,51	4,66	4,97	4,58	4,98	3,79	4,43	3	9,55	7,21	7,57	8,25	11,93	9,61	9,67	8,7	

A partir das análises de comportamento dos teores dos elementos, estabelecidos nas categorias: FEPAM (2014), elementos traço e elementos maiores; são realizadas comparações percentuais para se compreender a evolução geoquímica dos elementos no tempo e o nível de reatividade do material com o meio. Com definição do comportamento do elemento no tempo (Tabela 23) é avaliada, na Tabela 23, a predominância percentual de frequência de cada comportamento, de cada elemento, por categoria e por *liner*.

Cada elemento analisado, em cada mês e em cada *liner* apresenta um comportamento (D, C ou L). Os comportamentos percentuais (C%) são o número total de vezes que determinado comportamento se manifesta (c) dividido pelo número total de avaliações (a), como na Equação 10.

$$C\% = \frac{c}{a} * 100 \quad \text{Eq. (10)}$$

Tabela 23 Comportamento C% dos elementos categorizados no tempo, por *liner*.

	Categoria	Decrescimento	Crescimento	Linear
	FEPAM (2014)	20%	20%	60%
<i>Liner 1</i>	Elementos Traço	50%	13%	38%
	Elementos Maiores	44%	33%	22%
	FEPAM (2014)	33%	17%	50%
<i>Liner 2</i>	Elementos Traço	25%	38%	38%
	Elementos Maiores	18%	18%	64%
	FEPAM (2014)	40%	0%	60%
<i>Liner 3</i>	Elementos Traço	0%	17%	83%
	Elementos Maiores	43%	29%	29%
	FEPAM (2014)	40%	0%	60%
<i>Liner 4</i>	Elementos Traço	13%	0%	88%
	Elementos Maiores	33%	11%	56%

As Figuras 46, 47, 48 e 49 apresentam a evolução geoquímica dos *liners* no tempo. Os gráficos apresentam os diferentes teores dos diferentes materiais, no tempo e por *liner*. Percebe-se o aparecimento e desaparecimento de alguns elementos no tempo, isso credita-se à técnica de coleta utilizada, já que não se utilizou, por exemplo, amostragem por incremento e/ou composta.

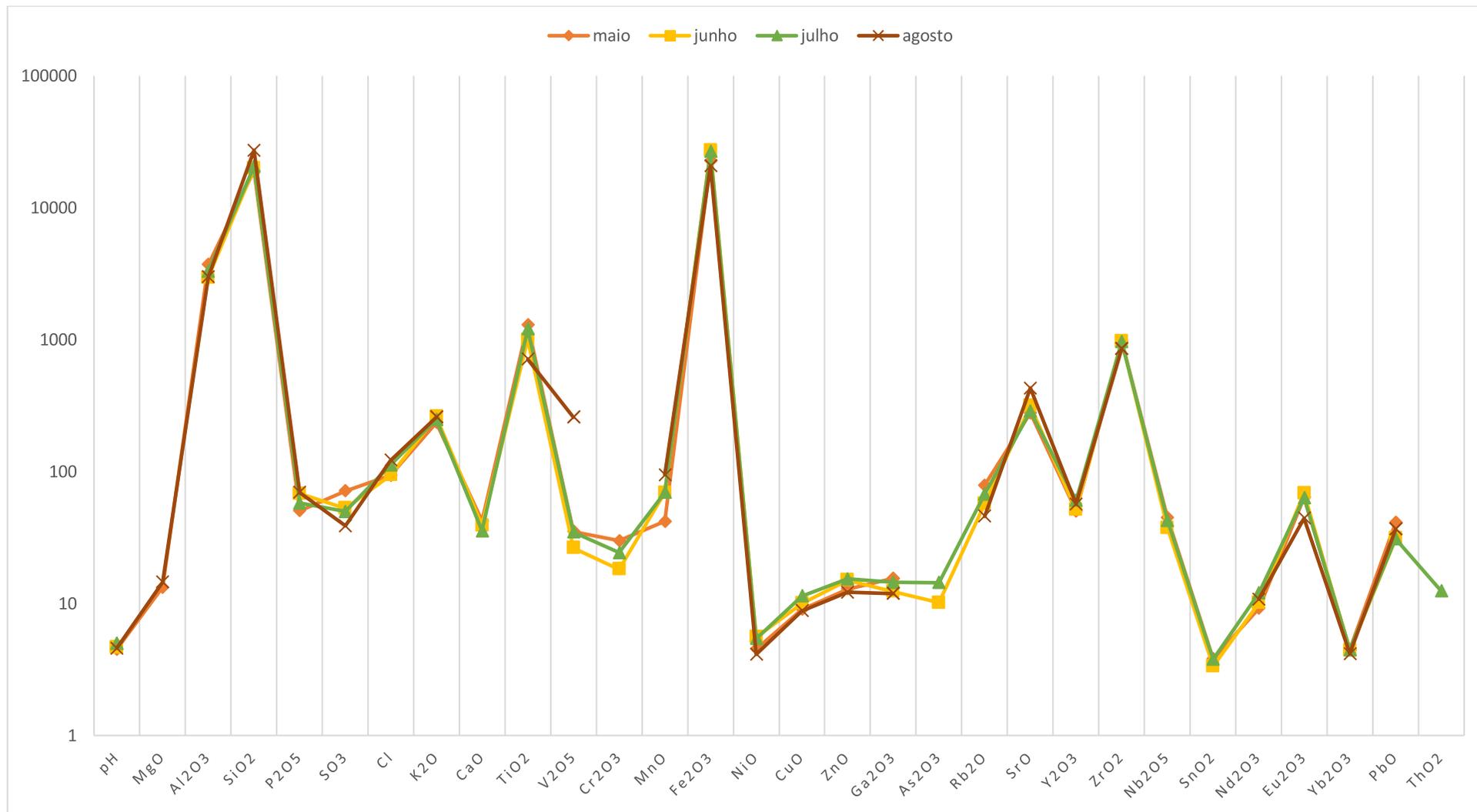
Figura 46 Evolução geoquímica do *liner* 1.

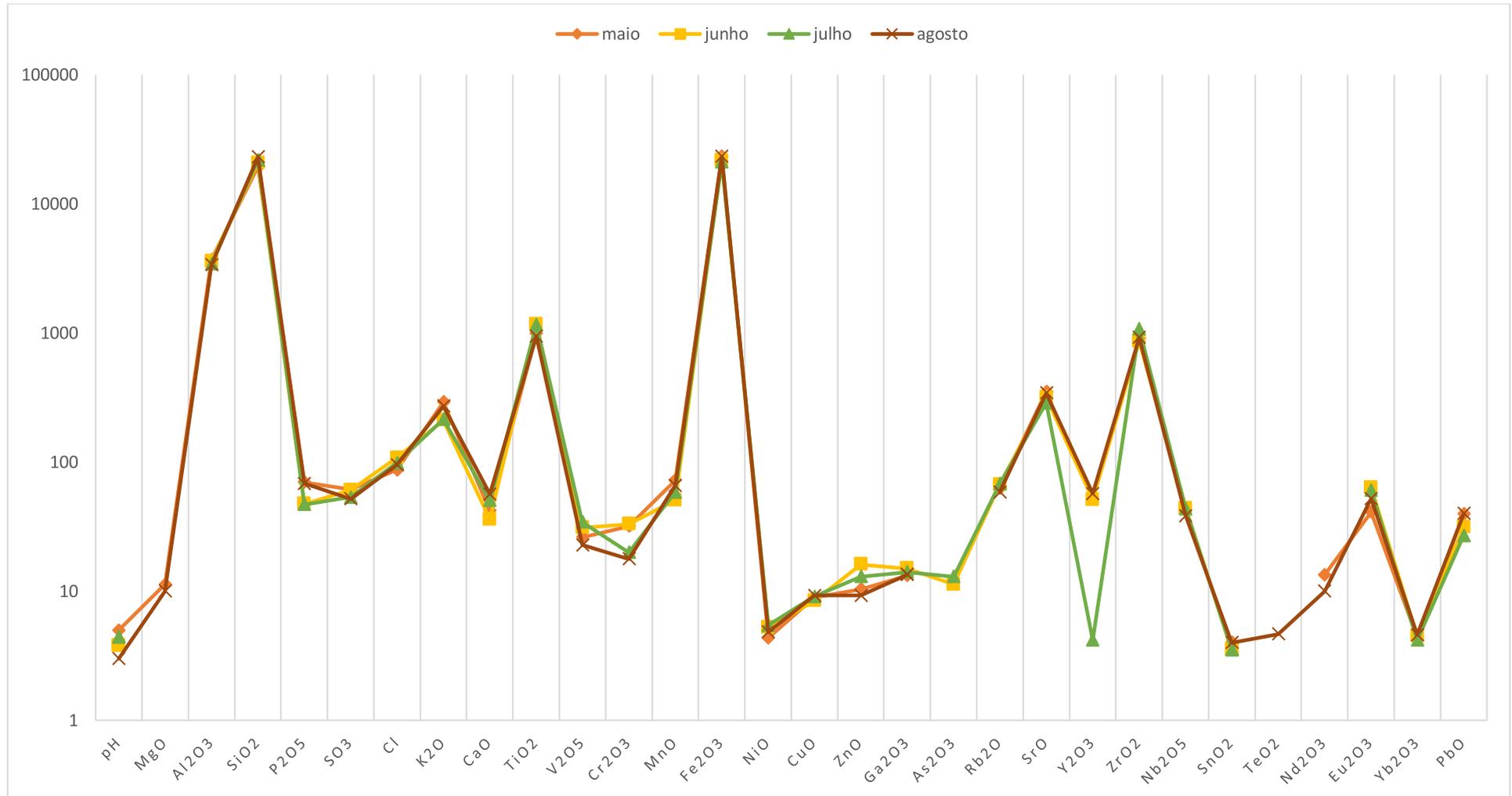
Figura 47 Evolução geoquímica do *liner* 2.

Figura 48: Evolução geoquímica do *liner* 3.

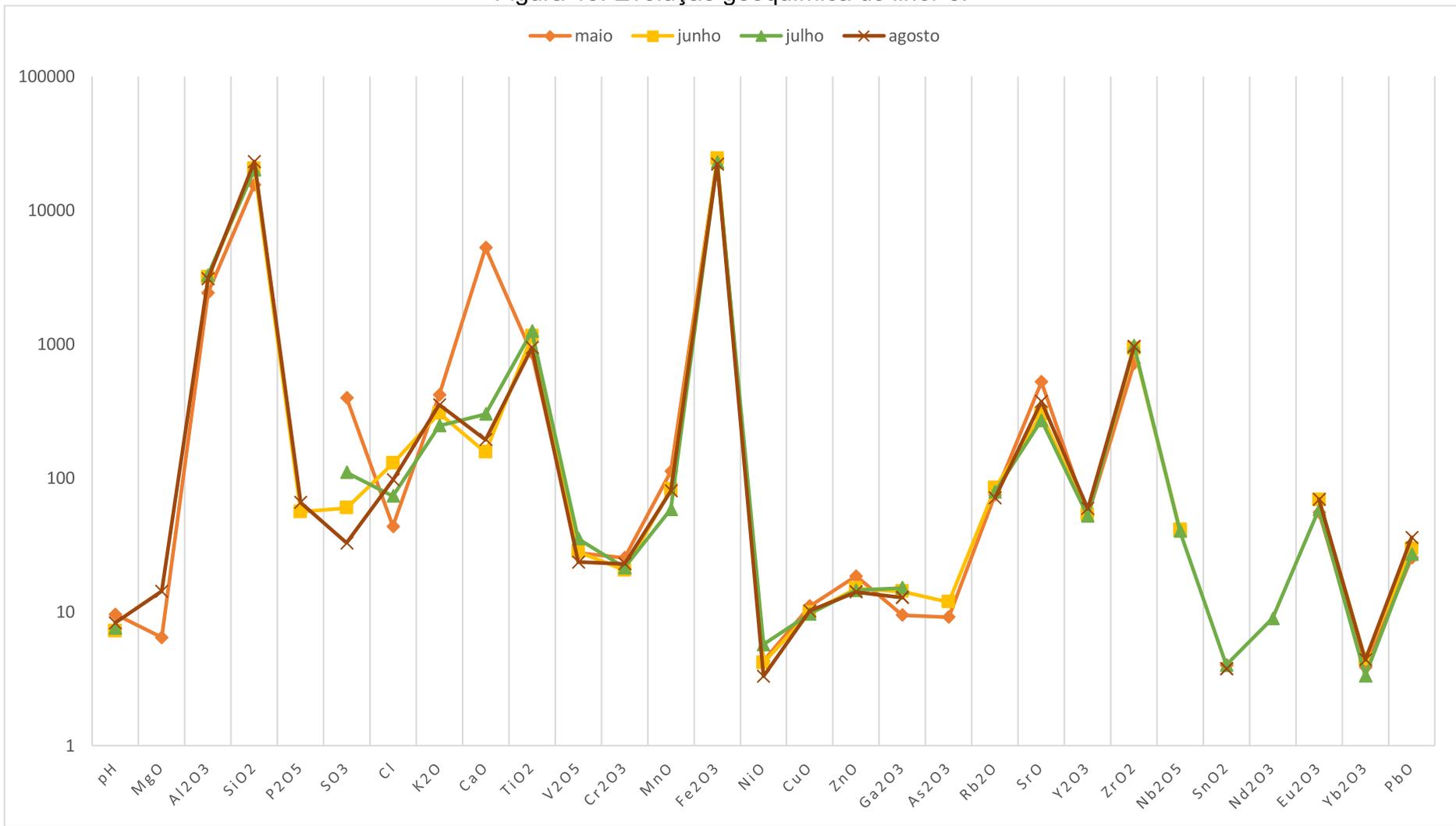
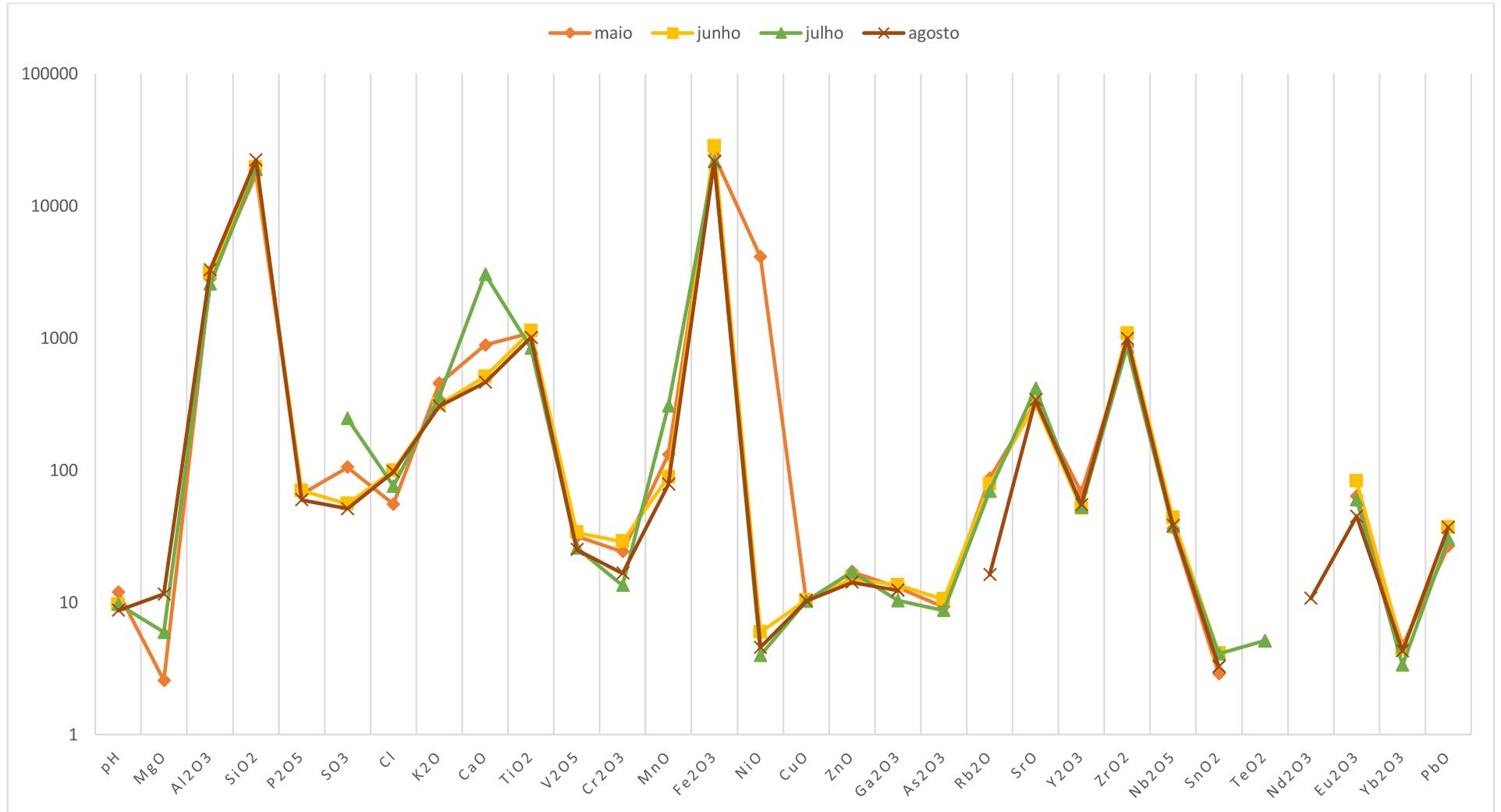


Figura 49: Evolução geoquímica do *liner 4*

Os elementos FEPAM (2014) apresentaram comportamento predominantemente linear em todos *liners*, o que significa que esses elementos químicos não reagiram (lixiviaram ou concentraram) no *liner*. A categoria elementos maiores apresentam maior mobilidade dos parâmetros ao longo do tempo de monitoramento. Já os elementos traço apresentaram comportamento predominantemente linear, 68% e nenhuma categoria de elemento apresentou comportamento predominantemente de crescimento nos teores no tempo. Quando se projeta um *liner* com a finalidade de impermeabilização é importante um comportamento linear dos teores de elementos no tempo.

O *liner* 3 apresentou bastante mobilidade para os elementos maiores. O crescimento e/ou o decrescimento do teor de determinado elemento no tempo deflagra sua mobilidade. A mobilidade de determinado elemento tem relação com processos de lixiviação ou adsorção, processos que ocorrem a partir de reações físico-químicas. Sob uma nova perspectiva, quando se projeta um *liner* com a finalidade de reagir quimicamente, estabilizar ou adsorver determinados elementos químicos do lixiviado pode ser que seja requerida a capacidade de reação ou a avaliação da mobilidade de determinado tipo de elemento.

O *liner* 4 tem comportamento linear independente da categoria de elemento. O *liner* 1 apresentou lixiviação de elementos traço e de elementos maiores, comportamento evidenciado pelos resultados geotécnicos com evidente perda de massa específica. A Tabela 24 apresenta o comportamento percentual predominante dos elementos nos *liners* independente da categoria.

Tabela 24 Comportamento C% dos elementos químicos por *liner*.

<i>Liner</i>	Decrescimento	Crescimento	Linear
1	41%	23%	36%
2	24%	24%	52%
3	28%	17%	56%
4	27%	5%	68%

Concluindo, então, o *liner* 1 apresentou comportamento de decrescimento no teor de seus elementos constituintes. Já os *liners* 2, 3 e 4 apresentaram comportamento linear com relação aos teores de seus elementos constituintes no tempo. A Tabela 25 apresenta o comportamento percentual por categoria.

Tabela 25 Comportamento C% no tempo dos elementos categorizados.

Categoria	Decrescimento	Crescimento	Linear
FEPAM (2014)	33%	7%	60%
Elementos Traço	23%	9%	68%
Elementos Maiores	40%	24%	36%

4.4. ANÁLISE TÉCNICA DOS LINERS

A partir da interpretação dos resultados obtidos nos ensaios geotécnicos e geoquímicos é possível avaliar tecnicamente a funcionalidade de cada *liner* estudado. De forma não esperada o *liner* 1 foi o que passou por maiores alterações no tempo, já o *liner* 2 o que se apresentou mais estável no tempo, como esperado.

Para a aplicação como impermeabilização inferior de aterros sanitários, com esta pesquisa, os *liners* alternativos podem ser analisados de duas formas:

- Pelas características geotécnicas, principalmente devido ao coeficiente de permeabilidade, índice de vazios e peso específico;
- Pelas características geoambientais, há possibilidade de utilizar o RCDR como uma barreira reativa para conter ou tornar mais básico o lixiviado percolado, para evitar ataques ácidos aos *liners* impermeabilizantes instalados, então, abaixo. O RCDRC principalmente apresenta-se bastante básico, mesmo após os ataques ácidos da água da chuva, e com comportamento de linearidade, ou seja, pouco reativo. O RCDRV apresentou perda no teor dos elementos maiores no tempo, o que indica algum nível de reatividade.

Previamente a apresentação desses resultados, cabe uma observação que pode ter influência na análise a seguir. Durante o experimento houve o rompimento parcial de um talude de RSU a montante da área do experimento piloto, como mostra a Figura 50. O gradiente hidráulico dos *liners* do experimento piloto ficou em direção ortogonal à maior dimensão, em planta, do *liner* ou na direção oeste.

Figura 50 Geometria da célula e rompimento do talude.



Fonte: Adaptado de Google Earth (2019).

Avaliando os índices pluviométricos e as datas das fotos é possível afirmar que o talude rompeu entre o final do mês de maio/19 e o início do mês de junho/19, período bastante chuvoso (INMET, 2019) e logo em seguida foi reconfigurado, com o reaterro do local e aplicação de camada de solo SL por sobre o resíduo. A Figura 51 apresenta o talude rompido. Tal fenômeno explicaria as alterações de pH encontradas nos *liners* durante o período de monitoramento.

Figura 51 Talude da célula de resíduos rompido.



Esse acontecimento, pode explicar o comportamento anômalo do pH, conforme previamente visualizado no item 4.3.2 desse trabalho. Conseqüentemente a alteração do pH, esse fenômeno pode ter contribuído para alguma alteração física e/ou química que a seguir será mais bem discutida, individualmente para cada *liner* estudado.

O rompimento do talude expõe camadas de resíduos mais novas, com grande atividade bacteriana na fase acidogênica. Pela situação topográfica da área é evidenciado o contato da área do experimento piloto com as águas pluviais que incidem por sobre a célula do aterro, carreando consigo lixiviado do aterro. Assim, a atividade das bactérias acidogênicas presentes no lixiviado novo, fruto das camadas mais superficiais do aterro juntamente com a pluviometria podem ter influenciado nas variações de pH identificadas nos *liners*.

O impacto na geoquímica dos materiais é decorrente da presença do aterro de resíduos, em operação, limdeiro à área do experimento piloto. É percebida alterações das propriedades geotécnicas dos materiais analisados, com menores alterações evidenciadas no *liner 2*. Rodrigues (2012) ao realizar testes de desgaste em meio acuoso (DMA) com RCDR em contato com lixiviado

com pH entre 7,6 e 5,5 e identificou diminuição do peso específico do material e resistência mecânica ao desgaste.

Nunca ignorando a possibilidade de erros inerentes aos processos de análise, também são evidenciadas alterações químicas no passar do tempo e diversos padrões de comportamento dos teores de elementos nas diferentes categorias propostas: FEPAM (2014), elementos maiores e elementos traço.

4.4.1 *Liner 1* – 100% Solo Local (SL)

O *liner 1* foi composto 100% de solo local (SL). Ao final, no teste de permeabilidade com as últimas amostras indeformadas, após o teste, foi identificado um acamamento esbranquiçado no interior das amostras, como uma reorganização do material. As Figuras 52, 53, 55 e 56 apresentam esse aspecto do material.

Figura 52 Amostra indeformada da última campanha de monitoramento do *liner 1*.



Figura 53 Amostra indeformada da última campanha de monitoramento do *liner 1*.



Figura 54 Amostra indeformada da última campanha de monitoramento do *liner 1*.



Figura 55 Amostra indeformada da última campanha de monitoramento do *liner 1*.



A explicação para este comportamento, considerando a perspectiva geotécnica, pode estar relacionada a compactação do material utilizando-se rolo liso vibratório. Conforme relatado por Ribeiro (2008), aplica-se uma onda que reverbera com e organiza o material, de uma determinada forma que, mesmo que se faça uso das teorias de Darcy para a análise da permeabilidade do *liner*, é sabido que não ocorre uma perfeita anisotropia do coeficiente de permeabilidade do material compactado seja qual for a direção, de maneira que a permeabilidade fica favorecida em determinados caminhos, onde estão os grãos maiores.

Utilizando-se das análises químicas, esse esbranquiçamento pode ser justificado pelo decréscimo da presença de alguns elementos químicos, como Cr, Yb, Zr, Ca, S, e Ti ao longo do tempo de monitoramento do *liner*. Em alguns casos, considerando os tempos 0 e 90, percebe-se uma remoção completa dos componentes químicos. Analogamente, esse efeito remove química e fisicamente o verniz do deserto das partículas de quartzo, com maior granulometria e maior permeabilidade na camada esbranquiçada.

Segundo CPRM (2001) o verniz do deserto pode ser definido como:

...” Capa fina ou película brilhante de argilas ou de óxidos e hidróxidos de Fe e/ou de Mn que cobre rochas e fragmentos de rocha em áreas desérticas, podendo mudar significativamente a cor e aparência geral das rochas. O verniz do deserto é fixado por colônias simbióticas de líquens e bactérias que suportam as drásticas condições de calor e frio

que ocorre na superfície rochosa de afloramentos, de *boulders* e de fragmentos menores de rocha "cozinhados" pelo sol escaldante de dia e congelados pelo frio noturno das regiões áridas."

O *liner* 1, apresentou comportamento linear do pH no tempo, o que pode ser em função dos processos de reações químicas que ocorreram. Os elementos traço e os elementos maiores apresentam comportamento de decréscimo no tempo. Elementos categorizados como FEPAM (2014) apresentam comportamento de linearidade no tempo.

Com provável presença dos argilominerais feldspato, esmectita, plagioclásio, caulinita e periclásio em função de sua gênese (CPRM,2008).

Elevado ângulo de atrito interno em função da presença de areia com evidente perda de massa e redução do índice de vazios e da permeabilidade com o passar do tempo.

O *liner* 1 apresentou GC = 98% para o tempo 0 e diminuição de 10% do GC para o tempo 90. A umidade natural também diminuiu, 13%. Redução de 36% do índice de vazios.

A permeabilidade apresentou elevada redução (81%), tal efeito pode ser explicado em função do entupimento dos poros acelerou a intemperização dos argilominerais e diminuiu o tamanho dos grãos que se organizaram nos vazios e reduz a permeabilidade aumentando o fator de empacotamento. A compactação coloca energia promovendo diagênese antrópica, simulando um processo de soterramento natural que levaria anos para ocorrer naturalmente.

Altamente permeável e reagente o material SL não é indicado para ser utilizado na construção de *liners* de fundo em aterros de resíduos sólidos.

4.4.2 *Liner* 2 – 100% *Liner* Mineral Padrão (LMP)

O *liner* 2 é considerado ponto branco do estudo. É constituído 100% de LMP material utilizado como *liner* mineral padrão no aterro sanitário do estudo de caso. O LMP é o que apresentou comportamento mais linear no tempo em função de sua baixa permeabilidade ($10E-06$ cm/s) os líquidos não percolaram por toda a sua camada de 40 cm, mesmo assim apresentou redução de 13% no coeficiente de permeabilidade.

Na região a argila do LMP se apresenta em forma de lentes em que há a presença de SL no entorno. É identificada proporção entre ângulo de atrito interno e coesão, em função da distribuição granulométrica.

Foi o material que apresentou comportamento menos reativo com os elementos maiores e traço e com os elementos categorizados como FEPAM (2014) apresentou comportamento de linearidade no tempo, pouco reagente.

Comportamento de crescimento no teor de elementos traço na mesma proporção de comportamento linear, mas com evidente perda de massa com o passar do tempo e redução do índice de vazios e da permeabilidade.

O *liner 2* também apresentou perda no GC no tempo, onde para $t=0$ $GC=101$ e para $t=90$ $GC=93$. Redução também na umidade natural (18%). Com isso, esse é o *liner* ideal para utilização como camada de impermeabilização inferior em aterros sanitários.

4.4.3 Liner 3 – 60% Solo Local (SL) + 40% Resíduo da Construção ou Demolição Reciclado Predominantemente Vermelho (RCDRV)

Os processos mecânicos aplicados para a redução da granulometria do RCDR não foram suficientes para criar ligações químicas quebradas nas arestas das partículas e substituição de hidrogênio por hidroxilas (SANTOS, 1975). No entanto resultou em grãos inertes de granulometria pedregulhosa que acabou agregando resistência ao material provavelmente em função de seu imbricamento. O material apresentou elevado ângulo de atrito interno em comparação aos outros, e maior resistência no ensaio DCP *in loco* comparando-se com os resultados obtidos para o *liner 4*.

A presença do RCDR pode ter influenciado a favor da linearidade do comportamento geoquímico. Elementos categorizados como FEPAM (2014) apresentam comportamento de linearidade no tempo. No entanto também com evidente perda de massa com o passar do tempo e redução do índice de vazios e da permeabilidade.

O *liner 3* foi o que apresentou menor redução no teor de umidade (4%) e menor redução do coeficiente de permeabilidade (9%). Também com redução do GC.

Em função de suas características geotécnicas, esse *liner* não é indicado para impermeabilização inferior de aterros sanitários.

4.4.4 *Liner* 4 – 60% Solo Local (SL) + 40% Resíduo da Construção ou Demolição Reciclado Predominantemente Cinza (RCDRC)

O *liner* 4 foi composto pela mistura de 60% de SL + 40% de RCDRC. O RCDRC apresenta alto teor de Cimento Portland (CP) curado, o que lhe confere tal coloração.

Os elementos químicos do CP são anidridos e quando em contato com a água tornam-se hidratados e menos solúveis. O CP reage promovendo a cristalização de sais com a adição de água (PETRUCCI, 1971). Segundo Costa *et al.*, (2014) no processo de cura o pH do CP varia de 10,14 a 10,74 em média e com desvio padrão de 0,16 e 0,23 nas primeiras horas. Para Mizuno e Banzai (2008), o pH básico inibe o sistema enzimático microbiano e a presença dos íons cálcio ativa a fosfatase alcalina, favorecendo o processo de mineralização. Dentre os quatro *liners* analisados o *liner* 4 foi o que apresentou maior teor de Ca em função do RCDRC.

A presença do RCDRC pode ter influenciado na linearidade do comportamento geoquímico resultante, possivelmente inibindo as atividades bacterianas acidogênicas com a alcalinidade. Neste *liner*, elementos categorizados como FEPAM (2014) apresentam comportamento de linearidade no tempo.

Mesmo sendo constituído 60% por SL o *liner* 4 não apresentou a organização e acamadamento da amostra indeformada da última campanha de monitoramento do *liner* 1. Possivelmente pela presença do cimento, o pH alto impediu o ataque ácido tão intenso ao material SL.

Mais coeso e com CBR maior que o *liner* 3, mas mais expansivo, apresentou evidente perda de massa com o passar do tempo e redução do índice de vazios e da permeabilidade. Com relação ao GC o *liner* 4 apresentou menor redução do GC dentre os quatro *liners*. Também apresentou redução no teor de umidade natural.

O coeficiente de permeabilidade médio do *liner 4* é de $7,95E-06$ cm/s com desvio padrão de $9,89E-07$, de acordo os requisitos técnicos de NBR 13.896 (ABNT, 1997). O *liner 4* foi o único que apresentou aumento do coeficiente de permeabilidade hidráulico (k), de 22%. Tal comportamento pode ser explicado primeiramente em função da distribuição granulométrica do RCDRC e o aumento do k pela reatividade do CP ao ataque ácido e decorrente redução de elementos óxidos Cr, Ni, Rb, As, K e P.

Considerando suas características geotécnicas, o *liner 4* não poderia ser aplicado como barreira de fundo para a impermeabilização, mesmo atendendo a NBR 13.896 (ABNT, 1997). O material do *liner 4* apresenta comportamento de crescimento do seu k em contato com meios ácidos o que reprova o material no uso requerido. Contudo, o RCDRC pode ser utilizado como camada com a finalidade de estabilizar o lixiviado antes do contato deste com as camadas impermeabilizantes minerais de fundo, neutralizando o ataque ácido e imobilizando elementos maiores e traço.

Já é conhecida a agressão química que ocorre em GCLs em função do baixo pH e já é sabido que resíduos “jovens”, em parte por causa da atividade micro-bacteriana, geram lixiviados mais ácidos (VARANK *et al.*, 2011). A presença do RCDRC no *liner 4* promoveu aumento do pH e maior linearidade no comportamento dos teores dos elementos químicos do material.

Sobre a camada de CCL ou de GCL pode ser disposta uma camada de espessura dimensionada (em função da permeabilidade e alcalinidade requeridas) de RCDRC como uma barreira reativa, protetora das camadas inferiores e também como camada drenante, em função de sua granulometria, para estabilizar o lixiviado antes que esse entre em contato com as camadas impermeabilizantes inferiores. Trata-se aqui de uma conclusão prévia, necessitando o aprofundamento dos estudos com relação ao comportamento físico-químico e microbiológico da camada.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A transposição de resultados a partir de estudos realizados em bancada, em escala pequena, para escala real de campo na proposição de um experimento piloto agrega dificuldades pois oneram todo o programa experimental. Os trabalhos de campo contemplam mobilização de equipamento, fornecimento de insumos em maior quantidade e mão de obra especializada com horas dedicadas. Esta pesquisa mostrou uma maior necessidade de planejamento e implantação do sistema, se comparado a escala de laboratório, o que já era esperado. Neste sentido, para pesquisas futuras sugere-se um ajuste de cronograma, majorando o prazo para haver tempo hábil para a resolução de possíveis imprevistos *in loco*.

Com o viés da sustentabilidade e com aplicação e desenvolvimento tecnológico, o processamento de materiais alternativos exige maior controle da obra e segundo Susin, Caetano e Griebler, (2019), pode agregar um maior número de procedimentos e etapas construtivas. Percebeu-se que com o aumento da escala de trabalho os níveis de controle e fiscalização também devem receber ajuste de escala. Trabalhar com equipamentos de precisão e medições com exatidão na casa mil (0,001) pode ser considerado um elevado preciosismo em uma obra geotécnica e pode acarretar em erros. Quando bem fundamentado tecnicamente o engenheiro pode adotar medidas de CT diferentes das especificadas para outros tipos de obras em normas e adaptar os trabalhos para a finalidade técnica real requerida e não somente jurídica.

Estas questões abordadas nos últimos parágrafos justificam a primeira conclusão desta pesquisa. As limitações e dificuldades apresentadas da transposição de um sistema em escala laboratorial para uma escala piloto ou real possui diversas limitações. Devido a estas limitações e dificuldades operacionais, o presente estudo não conseguiu aplicar o GC modificado *in loco*. Mesmo assim os *liners* 2 e 4 apresentaram coeficiente de permeabilidade médio $k < 10E-06$ cm/s, atendendo a NBR 13.896 (ABNT, 1997), com o *liner* 2 podendo ser aplicado como *liners* para a impermeabilização de fundo.

Já na análise geoambiental deve-se reforçar que utilizou-se um método semianalítico. Embora este fator, como o objetivo era a verificação do comportamento / tendências dos parâmetros químicos ao longo do tempo, os

resultados obtidos no FRX não comprometeram as análises de comportamento dos teores dos elementos no tempo. Contudo, a análise dos resultados deixa evidente a necessidade de aplicação de metodologia incremental e/ou composta de coleta de amostras para uma melhor obtenção de resultados no laboratório. Assim como as escalas de trabalho devem ser ajustadas do laboratório de geotecnia para o campo o mesmo deve ocorrer, de forma mais rigorosa, quando se analisa pequenas quantidades de material heterogêneo, coletadas *in loco*, no laboratório de análises ambientais (ITRC, 2012).

Com relação aos *liners* alternativos e possibilidade de utilização de resíduos de construção e demolição, a presença do RCDR, principalmente o predominantemente cinza, agregou alcalinidade, segundo Mizuno e Banzai (2008), podendo ter inibido a atividade bacteriana e estabilizando o comportamento geoquímico dos elementos analisados. O *liner 4* apresenta uma nova proposta de finalidade para *liner*, como barreira reativa, anterior as camadas minerais, argilosas e impermeabilizantes. Esta inferência, no entanto, necessita de maiores estudos que confirmem esta possibilidade de uso.

A geotecnia e a geoquímica, associadas e aplicadas como ferramenta de gestão, podem desenvolver novas alternativas tecnológicas e promover efetivamente a sustentabilidade ambiental, otimizando o uso de recursos naturais não renováveis, o consumo de energia e potencializando a geração de empregos e de renda e gerando ciclos fechados

Dada a carência nos estudos focados na antroposfera, o presente trabalho evidencia o impacto no local em função das atividades antrópicas demonstrando comportamentos imprevistos e anômalos do teor de diferentes elementos e das propriedades químicas dos *liners* no tempo. É deflagrada a aceleração dos processos geoquímicos naturais de degradação intempérica dos solos sedimentares tanto em função da presença do lixiviado como em função dos trabalhos de compactação dos mesmos.

Através das análises geotécnicas e geoquímicas é possível identificar o impacto geoambiental nos solos decorrente das atividades antropicas limdeiras ao local de estudo. Mas também evidencia-se a complexidade na definição do estabelecimento de um *background* geoquímico preciso e da determinação de anomalias geoambientais no meio ambiente, já que os processos que resultam em disponibilidade, mobilidade e presença, das diferentes categorias de

elementos químicos avaliados, nas diferentes fases, são resultado da interpolação de diversas variáveis multidisciplinares que ainda pouco se conhece.

A engenharia projeta, executa e testa modificações na natureza a favor do conforto e do bem estar da sociedade e acaba gerando impactos que se opõe a esse objetivo principal. Com o meio ambiente degradado a manutenção do bem-estar é onerada. Cabe à boa técnica considerar com maior empenho as questões ambientais, caso contrário o futuro poderá ser complicado.

Para futuros trabalhos é sugerida a contagem modal de lamina petrografica e posterior análises difratometria de raios X (DRX) das amostras preservadas, com ajustes metodologicos para argilas. Além da definição dos teores de matéria orgânica, determinação do CTC e do Eh do material. Alguma investigação microbiologica também é sugerida para a avaliação das atividades bacterianas nos *liners* e posterior comparação dos resultados.

REFERÊNCIAS

ABGE -. **Boletim nº 04 - ensaios de permeabilidade em solos - orientações para sua execução no campo** - 3ª edição, 35 pág., 1996.

ABICHOU, T., BENSON, C. H., EDIL, T. B., e TAWFIQ, K.. **Hydraulic conductivity of foundry sands and their use as hydraulic barriers**. Recycled materials in geotechnics, A. H. Aydilek and J. Wartman, eds., Geotechnical Special Publication 127, ASCE, New York, 2004.

ABNT. **NBR 10.004: Resíduos sólidos - classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. **NBR 10.006: Procedimentos para obtenção de extrato de lixiviado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. **NBR 10.157: Aterros de resíduos perigosos - Critérios para projeto, construção e operação – Procedimento**. Rio de Janeiro, 1987.

ABNT. **NBR 12.102 MB 3443: Solo - Controle de Compactação Pelo Método de Hilf** . Rio de Janeiro, 1991.

ABNT. **NBR 12.553: geossintéticos - terminologia**. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT. **NBR 12.770: Determinação da resistência à compressão não confinada**. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT. **NBR 13.896: Aterros de resíduos não perigosos - critérios para projeto, implantação e operação**. Rio de Janeiro, 1997.

ABNT. **NBR 14.545: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável**. Rio de Janeiro, 2000.

ABNT. **NBR 15.116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. **NBR 16.199: Geomembranas termoplásticas — Instalação em obras geotécnicas e de saneamento ambiental**. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT. **NBR 5.681: Controle Tecnológico da execução de aterros em obras de edificações**. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT. **NBR 6.457: preparação para ensaios de. Compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT. **NBR 6.459: Solo – Determinação do Limite de Liquidez**. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT. **NBR 7.180: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT. **NBR 7.181: Solo – Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT. **NBR 7.182: Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT. **NBR 7.182: Solo – Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT. **NBR 9.603: Sondagem a Trado Manual**. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT. **NBR 9.813: Solo - Determinação da massa específica aparente *in situ*, com emprego de cilindro de cravação**. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT. **NBR 9.895: Solo – Índice de Suporte Califórnia**. Rio de Janeiro, 2016.

ABOARRAGE, A. M. & LOPES, R. da C.. **Projeto - A Borda Leste da Bacia do Paraná: integração geológica e avaliação econômica**. Porto Alegre: DNPM/CPRM, v. 18, 1986.

ABRECON, 2015. **Seminário nacional da reciclagem de resíduos da construção civil**. Disponível em: < <https://abrecon.org.br/seminario-nacional-da-reciclagem-de-residuos-da-construcao-civil-2015/>>. Acesso em 07 ago 2018.

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: < <http://abrelpe.org.br/download-panorama-2017/> >. Acesso em: 2 dez. 2018.

AKSAKAL, E. L.; ANGIN, I; ÖZTAS, T.. **Effects of diatomite on soil consistency limits and soil compactibility**. Catena v. 101, p. 157–163, 2013.

ALONSO, U. R. **Exercícios de fundações**. Edgard Blücher, ed. 2, p.216, São Paulo. 2010.

Alther, G. R.. **The qualifications of bentonite as a soil sealant**. Eng. Geol. Amsterdam, v. 23 n. 3–4, p. 177–191, 1987.

ÂNGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos da construção e demolição**. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 172f, 2001.

APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater – SMEWW**. American Public Health ... American Public Health Association – APHA, 22th ed., Washington – USA, 2012.

ASTM. **ASTM 3080: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions**. Washington DC. 2011.

ASTM. **ASTM D5084: Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter**. Washington DC. 1997.

BARROS, M. C.. **Avaliação de um resíduo da construção civil beneficiado como material alternativo para sistema de cobertura**. Dissertação (Mestrado) programas de pós-graduação de engenharia da UFRJ grau de mestre em ciência em engenharia civil. Rio de Janeiro, 2005.

BECK-BROICHSITTER, S.; GERKE, H. H.; HORN, R.; **Effect of Compaction on Soil Physical Properties of Differently Textured Landfill Liner Materials**. Geosciences, v. 9, n. 1, 2018

BERTI, C., **Avaliação da capacidade de suporte de solos “in situ” em obras viárias através do cone de penetração dinâmica Estudo experimental**, 142p, Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

BLIZZARD, J. L. e KLOTZ, L. E.. **A framework for sustainable whole systems design**. Elsevier Ltda. 2012.

BOSCOV, M. E. G.. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

BOSCOV, M. E. G.; ANGULO, S. C.; BENEVIDES, B. N.; STANKEVICIUS, P. M.. **Estabilização de Solo Expansivo com Material Escalpado de Resíduos de Construção Civil**. Geosul. Joinville, 2019.

BOWEN, H. J. M.. **Environmental chemistry of the elements**. Academic Press, p. 273, London, 1979.

BRASIL. **Lei no 12.305, de 2 de Agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, 2010.

BRESSANI, L. A.; FLORES, J. A. A.; NUNES, L. F. **Estudos para geração de mapa geotécnico da área urbana de Caxias do Sul**. Texto não publicado, 2005.

BRUNE, M., RAMKE, H.G., COLLINS, H.J., HANERT, H.H.. **Incrustation processes in drainage systems of sanitary landfills**. In: Proceedings Sardinia 91, Third International Landfill Symposium, Vol. II, CISA, Cagliari, pp. 999–1035, 1993.

CAETANO, M. O.; LAMBIASE, F. B.; GOMES, L. P.. **Composição dos RCD gerados em etapa de pós obra originadas de correções patológicas em edificações verticais**. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales, v. 9, p.331–348, 2016b.

CAETANO, M. O.; SELBACH, J. B. O.; GOMES, L. P. **Composição gravimétrica dos RCD para a etapa de acabamento em obras residenciais horizontais**. Ambiente Construído, v. 16, n. 2, p. 51-67. 2016a.

CAMPOS, B. C.; CAMPOS, C. N.; DUARTE, A. H.; CHAVES, M. G. A. M.; GRIZZO, T. L.; TOMARU-FILHO, M.. **Análise físico-química do MTA e do cimento Portland associado a quatro diferentes radiopacificadores**. Revista de Odontologia da UNESP, v. 43, ed. 4, pg 228-235. São Paulo, 2014.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6° ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1988.

CETESB. 2005. Secretaria de Estado de Meio Ambiente. **Procedimentos para implantação de aterro sanitário em valas**. São Paulo, Disponível em: <http://www.sorocaba.unesp.br/Home/Graduacao/EngenhariaAmbiental/Sandro D.Mancini/Aterro_em_Valas.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2018.

CHAPUIS, R. P., LAVOIE, J., AND GIRARD, D.. **Design, construction, performance, and repair of the soil-bentonite liners of two lagoons**. Can. Geotech. J., v. 29, n. 6, p. 638–49, 1992.

COKCA, E., AND YILMAZ, Z.. **Use of rubber and bentonite added fly ash as a liner material**. Waste Manage., v. 24, n. 2, p. 153–164, 2004.

CONAMA. **Resolução nº 307, de 5 de Julho de 2002 Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil**, 2002.

CONAMA. **Resolução nº 420, DE 28 DE DEZEMBRO DE 2009 Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas**, 2009.

COSSU, R.. **Collection of recyclables does not need demagoguery.** Waste Manage. v. 34, p. 1561–1563, 2014.

COSSU, R.; RAGA, R. e ROSSETTI, D.. **The PAF model: an integrated approach for landfill sustainability.** Waste Management, v. 23, 2003.

COSTA, H. R. da. **Estudo de mistura solo-carvão ativado como barreira reativa no tratamento de lixiviados** Dissertação Pós-Graduação em Geologia Área de Concentração Gerenciamento Ambiental, UNISINOS, São Leopoldo, 2006.

CPRM. 2001. **Verniz do deserto.** Disponível em: <http://sigep.cprm.gov.br/glossario/verbete/verniz_do_deserto.htm>. Acesso em 22/01/2020.

CPRM. **Geologia da Folha Gravataí.** 2008. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/geologia_basica/pgb/rel_gravatai.pdf>, acesso em 14/01/2020.

CRVR, C. R. DE V. DE R. **CRVR - Central de Tratamento de Resíduos de São Leopoldo.** Disponível em: <<http://crvr.com.br/area-de-atuacao/central-de-tratamento-de-residuos-de-sao-leopoldo/>>. Acesso em: 19 out. 2018.

DAER. RS. **DAER/RS-EL 301/99: determinação do teor de umidade em campo.** Manual de Ensaio Volume I. 2001.

DAS, Bajas M.. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica. 6 edição norte americana (tradução)** Sacramento 2007.

DING, T.; XIAO, J.. **Estimation of build related construction and demolition waste in Shanghai.** Waste Management, v. 34, p. 2327-2334, 2014.

DNER. **DNER - ES 282/97: Terraplenagem – aterros,** 1997.

DNER. **DNER-ME 041/94: Preparação de Amostras de Solos para Ensaio de Caracterização,** 1994.

DNER. **DNER-ME 049/94: Índice de Suporte Califórnia (CBR),** 1994.

DNER. **DNER-ME 052/94: Determinação do Teor de Umidade com o Emprego do SPEEDY,** 1994.

DNER. **DNER-ME 080/94: Análise Granulométrica dos Solos,** 1994.

DNER. **DNER-ME 082/94: Solos – Determinação do Limite de Plasticidade,** 1994.

DNER. **DNER-ME 088/94: Solos – Determinação da umidade pelo método expedito do álcool,** 1994.

DNER. **DNER-ME 092/94: Determinação da Densidade Aparente “IN SITU” com Emprego do Frasco de Areia**, 1994.

DNER. **DNER-ME 122/94 – Solos – Determinação do Limite de Liquidez**, 1994.

DNER. **DNER-ME 129/94: Compactação dos Solos**, 1994.

DNER. **DNER-ME 213/94: Solos – Determinação do teor de umidade**, 1994.

EDIL, T. B. **A Review of Aqueous-Phase VOC Transport in Modern Landfill Liners**. Waste Manage, v. 23, n. 7, p. 561–571, 2003.

EL-FADEL M, FINDIKAKIS AN, LECKIE JO.. **Environmental impacts of solid waste landfilling**. J. Environ Manage, v. 50, p. 1-25, 1997.

EL-HAJJI, D.. **Evaluation of the long Term Effect of Inorganic Leachate on Geosynthetic Clay Liners**. Tese submetida para obtenção de título Doctor of Philosophy Departament of Civil and Environmental Engineering College of Engeneering University of south Florida. 2006.

ELKINGTON, J.. **Cannibals with forks – Triple bottom line of 21st century business**. Stoney Creek, CT: New Society Publishers, 1997.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Editores Humberto Gonçalves dos Santos et al. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006

EPA - US Environmental Protection Agency. **EPA Journal - January 1979**. Disponível em: <<https://archive.epa.gov/epa/aboutepa/love-canal-tragedy.html>>.

EVANGELISTA, P. P. A.; COSTA, D. B.; ZANTA, V. M.. **Alternativa sustentável para destinação de resíduos de construção classe A: sistemática para reciclagem em canteiros de obras**. Ambiente Construído, v. 10, n. 3, p. 23-40, 2012.

FARQUHAR, G.J.. **Overview of landfill liners using natural material**. Proceedings Sardinia 89, Second International Landfill Symposium, CISA, Cagliari, paper IX, 1989.

FEPAM. **Portaria FEPAM nº 85/2014**. 2014. Disponível em: <<http://www.fepam.rs.gov.br/legislacao/arq/Portaria085-2014.pdf>>, Acesso em 14/01/20.

FOOSE GJ, BENSON CH, EDIL TB. **Comparison of solute transport in three composite liners**. J. Geotech Geoenviron, v. 128, n. 5, p. 391–403, 2002.

FORTES, R. M.; MERIGHI, J. V.. Controle tecnológico e controle de qualidade – um alerta sobre sua importância. COBENGE, Brasília, 2004.

FRANCESCHET, M.. **Estudo dos Solos Utilizados em Camadas de Base e Cobertura em Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos de Santa Catarina**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental da UFSC, 157 f. Florianópolis, SC, 2006.

GALUSZKA, A.. **Methods of determining geochemical *background* in environmental studies. Problems of landscape ecology**. Polish association of landscape ecology - Warsaw (in English v. 16, n. 1, p. 507-519, 2006.summary), v. 16, n. 1, p. 507-519, 2006.

GARLANGER, J. E., CHEUNG, F. K., AND TANNOUS, B. S. **Quality control testing for a sand-bentonite *liner***. Geotechnical Practice for Waste, Disposal, v. 87, Geotechnical Special Publication 13, ASCE, p. 488–499, 1987.

GLEASON, M. H., DANIEL, D. E., AND EYKHOLT, G. R.. **Calcium and sodium bentonite for hydraulic containment applications**. J. Geotech. Geoenviron. Eng., v. 123, n. 5, p. 438–445, 1997.

GLOBAL FOOTPRINT NETWORK. **National Footprint Accounts Are Out. Carbon Makes up 60% of World's Ecological Footprint**. 2016 Disponível em:

<http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/blog/national_footprint_accounts_2016_carbon_makes_up_60_of_worlds_footprin/>. Acesso em: 19 out. 2018.

GOMES, L. P.; CAETANO, M. O. **Consultoria técnica sobre resultados do monitoramento ambiental e geotécnico do aterro sanitário da CRVC em São Leopoldo**. Relatório 1: Monitoramento do período: Janeiro/Fevereiro/ Março de 2018. São Leopoldo, 2018a.

GOMES, L. P.; CAETANO, M. O. **Consultoria técnica sobre resultados do monitoramento ambiental e geotécnico do aterro sanitário da CRVC em São Leopoldo**. Relatório 2: Monitoramento do período: Abril/ Maio/ Junho de 2018. São Leopoldo, 2018b.

GOMES, L. P.; CAETANO, M. O. **Consultoria técnica sobre resultados do monitoramento ambiental e geotécnico do aterro sanitário da CRVC em**

São Leopoldo. Relatório 3: Monitoramento do período: Julho/ Agosto/ Setembro de 2018. São Leopoldo, 2018c.

GOMES, L. P.; CAETANO, M. O. **Consultoria técnica sobre resultados do monitoramento ambiental e geotécnico do aterro sanitário da CRVC em São Leopoldo.** Relatório 6: Monitoramento do período: Abril/ Maio/ Junho de 2019. São Leopoldo, 2019c.

GOMES, L. P.; CAETANO, M. O. **Consultoria técnica sobre resultados do monitoramento ambiental e geotécnico do aterro sanitário da CRVR em São Leopoldo.** Relatório 4: Monitoramento do período Outubro/Novembro/Dezembro de 2018. [s. n.]: São Leopoldo, 2019a.

GOMES, L. P.; CAETANO, M. O. **Consultoria técnica sobre resultados do monitoramento ambiental e geotécnico do aterro sanitário da CRVR em São Leopoldo.** Relatório 5: Monitoramento do período Janeiro/Fevereiro/Março de 2019. [s. n.]: São Leopoldo, 2019b.

GOMES, L. P.; KOHL, C. A.; SOUZA, C. L. de L.; R., N.; MIRANDA, L. Alcidez; MORAES, C. A. M.. **Avaliação Ambiental de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos precedidos ou não de compostagem.** Eng Sanit. Ambient, v. 20, n. 3, 2015.

GOOGLE, 2019. **Google Earth**, Maxar Technologies. Acesso em 27 set 2019.

GUNEY, Y.; KOPARAL, S. e AYDILEK A. H.. **Sepiolite as an alternative LINER material in municipal solid waste landfills.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008.

GUNEY, Y.; KOPARAL, S.; AYDILEK, A. H.. AKSAKAL, ANGIN, OZTAS, 2013 **Sepiolite as an Alternative Liner Material in Municipal Solid Waste Landfills.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. v. 134, ed. 8. Eskisehi, 2008.

IBGE. **Mapa exploratório de solos do estado do Rio Grande do Sul.** 2002. Disponível em: <<https://mapas.ibge.gov.br/tematicos/solos>>. Acesso em 10/01/2020.

INMET, 2019. Disponível em:< <http://www.inmet.gov.br/portal/>>. Acesso em 23 dez 2019.

ITRC - Interstate Technology & Regulatory Council. **Incremental Sample Methodology.** EUA, Washington, DC. 2012.

JUNIOR, A. B. DE C.. **Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos com ênfase na proteção de corpos d'água: prevenção, geração e tratamento de lixiviados de aterros sanitários.** [s.l: s.n.]. 2006.

KABATA-PENDIAS, A.. **Trace elements in soils and plants.** Taylor and Francis Group, ed. 4, New York, 2011.

KAMINSKA, K.; DZIERWA, P.. **The influence of compaction and saturation on compressibility of colliery waste.** Thermal Science, v. 23, p. S1345-S1355, 2019.

KATSUMI T, BENSON CH, FOOSE GJ, KAMON M.. **Performance-based design of landfill liners.** Eng Geol, v. 60, n. 1–4, p. 139–48, 2001

KRUEMPELBECK, I.; EHRIG, H.J.; CHRISTENSEN, T.H.; COSSU, R.; STEGMANN, R.. **Long term behaviour of municipal solid waste landfills in Germany.** Proceedings Sardinia 99, Seventh International Waste Management and Landfill Symposium, CISA Publisher, Italy, v. 1. p. 27–36. 1999.

LAVINA, E. L.; FACCINI, U. F.; RIBEIRO, H. J. S. **A formação Pirambóia (Permo-Triássico) no Estado do Rio Grande do Sul.** Acta Geológica Leopoldensia, v. 38, p. 179-197, São Leopoldo, 1993.

Lazzerini, F. T.; Bonotto, D. M.. **O silício em águas subterrâneas do Brasil.** Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas. v. 36, p. 161, Rio Claro, SP, 2014.

LEITE, M. B.. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** Tese (Doutorado) – Programam de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2001.

LEONARD, L.; EKWUE, E. I.; TAYLOR, A.; BIRCH, R.. **Evaluation of a machine to determine maximum bulk density of soils using the vibratory method.** Biosystems Engineering, v. 178, p. 109-117, 2019.

LEVY, S. M.; HELENE, P. R. L.. **Durability of concrete produced with mineral waste of civil construction industry.** CIB Symposium in Construction and Environment: Theory into Practice, São Paulo, Brazil, 2000.

LICHT, O. A. B.. **A geoquímica multielementar na gestão ambiental identificação e caracterização de províncias geoquímicas naturais, alterações antrópicas da paisagem, áreas favoráveis à prospecção mineral e regiões de risco para a saúde n estado do Paraná , Brasil.** Doutorado (Tese)

Curso de Pós-Graduação em Geologia, Área de Concentração - Geologia Ambiental, Setor de Ciências da Terra – UFP, Curitiba, 2001.

LU, H. J.; LUAN, M. T.; ZHANG, J. L.. **Study on transport of Cr(VI) through the landfill *liner* composed two-layer soils**. Desalination, v. 266, p. 87-92, 2011.

MACAMBIRA, I. Q.. **Comportamento Hidráulico de Alguns Solos Lateríticos para uso como Barreira Impermeável**. 140 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos da USP, São Carlos, SP, 2002.

MACEDO, T. F.; LAFAYETTE, P. V.; TAVARES, Y. V. P.; OLIVEIRA, Marília G. M.; SILVA, S. R. da. **Investigação dos resíduos da construção e demolição (RCD) para fins geotécnicos**. VI Encontro Nacional e IV Encontro Latino-americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, Vitória - ES, Brasil, 2011.

MÁLIA, M.; BRITO, J.; BRAVO, M.. **Indicadores de resíduos de construção e demolição para construções residenciais novas**. Ambiente Construído, v. 11, n. 3, p. 117-130, 2011.

MASON, B.. **Principal of Geochemistry**. John Wiley & Son Inc. Washington D.C., 1971.

MASON, B.; Moore, C. B.. Principles of geochemistry. John Wiley & Sons, ed. 4, New York, 1982.

MEEHAN, C. L.; CACCIOLA, D. V.; TEHRANI, F. S.; BAKER III, W. J.. **Assessing soil compaction using continuous compaction control and location-specific in situ tests**. Automatic in Construction, v. 73, p. 31-44, 2017.

MEEHAN, C. L.; TEHRANI, F. S.; VAHEDIFARD, F.. **A Comparison of Density-Based and Modulud-Based In Situ Test Measurements for Compaction Control**. Geotechnical Testing Journal, v. 35, n. 3, 9. 387-399, 2012.

MIRANDA, L. F. R.; ANGULO, S. C.; CARELI, E. D. **A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008**. Ambiente Construído, v. 9, n. 1, p. 57–71, 2009.

MITCHELL, J. K.; HOOPER, D. R.; CAMPANELLA, R. G.. **Permeability of compacted clay**. Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, v. 92, n. SM5, p. 490, 1965.

MIZUNO, M.; BANZAI, Y.. **Calcium ion release from calcium hydroxide stimulated fibronectin gene expression in dental pulp cells and the differentiation of dental pulp cells to mineralized tissue forming cells by fibronectin**. International Endodontic Journal. v. 41, ed. 11, pg. 933. Sapporo - Japan, 2008

MUSSO, M.; PEJON, O. J.. **Materiais para barreiras de fundo de aterros sanitários do interior do estado de São Paulo**. Congresso Brasileiro De Geologia De Engenharia e Ambiental, v. 12, Porto de Galinhas. Anais. São Paulo, 2008.

NASCIMENTO, R. F. do; LIMA, A. C. A. de; RAULINO, G. S. C.; MELO, D. de Q.; VIDAL, C. B.. **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. Fortaleza Imprensa Universitária, Fortaleza Ceara, 2014.

NAVIA, R.; HAFNER, G.; RABER, G.; LORBER, K. E., SCHÖFFMANN, E.; VORTISH, W.. **The use of volcanic soil as mineral landfill *liner* – I. Physicochemical characterization and comparison with zeolites**. Waste Manege, v. 23, p. 249-259 Princenton, UK, 2005.

Nesbitt, H.W., Young, G.M.. **Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites**. Nature, ed. 299, p. 715-717, Ontario, 1982.

NGUYEN, T.; LIM, J.; HANGSEOK, C.; STARK, T. D.. **Numerical modeling of diffusion for volatile organic compounds through composite landfill *liner* systems**. KSCE Journal of Civil Engineering, 2010.

PALMA, J. B.; SCUDELARIABILIO, G.; MATOS, S. L. F.. **Geotecnia Ambiental – Capítulo 7: Contaminação de materiais geológicos e da água subterrânea**. Elsevier Editora Ltda. São Paulo, 2015.

PALMER, B. G., EDIL, T. B., AND BENSON, C. H.. **Liners for waste containment constructed with class F and C fly ashes**. J. Hazard. Mater., v. 76, n. 2–3, p. 193–216, 2000.

PARK J.K.; NIBRAS M.. **Mass flux of organic chemicals through polyethylene geomembranes**. Water Environ, v. 65 n. 3, p. 227–37, 1993.

PETRUCCI, E. G.. **Concreto de cimento portland**. Editora Globo, 2ª ed.. Porto Alegre 1971.

PINTO, C.S.. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. Oficina de Textos, 2.ed São Paulo, 2002.

PINTO, T. P.. **Utilização de resíduos de construção: estudo do uso em argamassas**. 140p. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Arquitetura e Planejamento da Universidade de São Carlos – USP, 1986.

PRIOR, T.; GIURCO, D.; MUDD, G.; MASON, L.; BEHRISCH, J.. **Resource depletion, peakminerals and the implications for sustainable resource management**. Glob. Environ. Change, v. 22, p. 577–587, 2012.

PROSINOS. **Plano regional de gestão integrada de resíduos sólidos dos municípios integrantes do consórcio público de saneamento básico da bacia hidrográfica do rio dos sinos pró-sinos (PRGIRS)**. São Leopoldo/RS: [s.n.].

QU, J.; WEI, L. T.; LI, C.; LIU, B.. **Effects of rice-husk ash on soil consistency and compactibility**. Catena v. 122, p. 54-60, 2014.

RHODE, Geraldo Mario. **Geoquímica Ambiental e estudos de impacto**. 4ª ed. Oficina de Textos, São Paulo, 2013.

RIBEIRO, S. P. T.; **Terraplenagem. Metodologia e Técnicas de Compactação**. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.

RICARDO, G.; CATALANI, H. de S.. Manual prático de escavação – terraplenagem e escavação de rocha. PINI, São Paulo - SP, 2007.

RODRIGUES, A. S. de L.; JÚNIOR H. A. N.. **Valores de background geoquímico e suas implicações em estudos ambientais**. REM: R. Esc. Minas, ed. 62, v. 2, p. 155-165, Ouro Preto, 2009.

RODRIGUES, G. M. S.. **Reciclagem do ASIC e de RCD na camada de drenagem dos aterros de resíduos**. Dissertação (Mestrado) Engenharia Geológica (Geotecnia), Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) Universidade Nova Lisboa, Lisboa, 2012.

ROLLIN, A.L.; MLYNAREK, J.; Lafleur, J.; ZANESCU, A.. **The investigation of a seven year old HDPE geomembrane used in a landfill**. Proceedings Sardinia 91, Third International Landfill Symposium, CISA, Cagliari, v. 1, p. 667–677, 1991.

ROLLINSON, H. R.. **Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation**. London Group UK Limited, England, 1993.

ROSE, A.W.; HAWKES, H.E.; WEBB, J.S. **Geochemistry in mineral exploration**. Ed. 2. New York: Academic Press, 1979.

SAKTI J.P.. **Transport of organic chemicals in dilute aqueous solutions through intact geomembranes**. Ph.D. Tese, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin-Madison, USA; 1993.

SANTOS, P. de S.. **Tecnologia das argilas, aplicada as argilas brasileiras**. Editora Universidade de São Paulo - São Paulo, 1975.

SANTOS, Roberto A. dos. **Comportamento anisotrópico de um solo lateríticos compactado**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Geotecnia. 147 p. Orientador: Edmundo Rogério Esquivel. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo – USP. São Carlos, dezembro de 2015.

SCHULZ, R. R.; HENDRICKS, Ch. F.. **Recycling of masonry rubble**. Recycling of demolished concrete and masonry. London: Chapman & Hall. Part two, p. 161-255, 1992.

SELBACH, J. B. O.. **Emprego de agregado reciclado de rcd em liner de aterro sanitário**. Qualificação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Gerenciamento de Resíduos, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS. São Leopoldo. 2018.

SENÇO, W.. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. Pini, São Paulo, 2007.

SHAFIEE, S.; TOPAL, E.. **When will fossil fuel reserves be diminished?** Energy Policy, v. 37, ed. 1, pg. 181-189. France, 2009.

SHAHBAZI, S.; WIKTORSSON, M.; KURDVE, M.; JÖNSSON, C.; BJELKEMYR, M.. **Material efficiency in manufacturing: swedish evidence on potential, barriers and strategies**. J. Clean., v. 127, p. 438–450, 2016.

SHARFF, Heijo; ZOMEREN, André van e SLOOT, Hans A van der. **Landfill sustainability and aftercare completion criteria**. Waste and Management Reserch. 2011.

SHUCK, T. E.. **Alternativa de impermeabilização inferior de aterros sanitários utilizando resíduos de construção e demolição**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS. São Leopoldo. 2018.

SILVA, W.; JÚNIOR, E. S. M.; COELHO, G. F.; PERENIRA, D. R.. **Utilização de agregados do resíduos da construção e demolição (RCD) em**

pavimentação. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia CONTECC. Fortaleza, 2015.

SOUTSOS, Marios e FULTON, Matt C. **Recycling of demolition waste.** Merseyside. Construction Materials, v. 169, n. CM2, 2015.

STRINGFELLOW, A. M.; SIMOES, A.; SMALLMAN, D.; BEAVEN, R.; POWRIE, W.; POTTER, H. A. B.. **Sorption of mecoprop by two landfill liner materials: oxford clay and mercia mudstone.** Geological Society of London, v. 1470, n. 11, p. 9236, 2011.

SULEWSKA, M. J.; TYMOSIAK, D.. **Analysis of Compaction Parameters of the exemplary non-cohesive soil determined by Proctor methods and vibrating table tests.** Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, v. 2, n. 50, p. 99-108, 2018.

SUSIN, B.. **Identificação geotécnica de solos coesivos no município de Caxias do Sul e Avaliação de sua utilização na construção de liner em aterro de resíduos sólidos.** Trabalho de Conclusão de Curso Engenharia Civil, UNISINOS. São Leopoldo, 2010.

SUSIN, B.; BRITO, M. A. de; SUSIN, N. J.; SUSIN, P.; TOIGO, P.; V. VIGANÓ, V.. **Estudo da permeabilidade de solo local para utilização em liner de aterro de resíduos sólidos.** Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul GEORS. Caxias do Sul. 2017.

SUSIN, B.; CAETANO, M. e GRIEBLER, M. **ACV entre liner mineral padrão e liner alternativo em aterro sanitário.** Geosul, Joinvile, 2019.

TOLEDO, M. C. M.; OLIVEIRA, S. B. **Da rocha ao solo: intemperismo e pedogênese.** In: *Decifrando a Terra*[S.l: s.n.], 2009.

VARANK, G.; DEMIR, A.; BILGILI, M. S.; SELIN, T.; GUVENC, S. Y.; OZCBAN, M. S.. **Investigation of Liner Systems in Transport of Organic and Inorganic Contaminants in Sanytary Landfill: A Caso Study.** CSAWAC, v. 45, n. 1, 2017.

VARANK, G.; DEMIR, A.; TOP, S.; SEKMAN, E.; AKKAYA, E.; YETILMEZSOY, BILGILI, M. S.. **Migration behavior of landfill leachate contaminants through alternative composite liners.** Science of the Total Environment, v. 409, p. 3183–3196, 2011.

WCED. **Our Common Future.** 1987. Disponível em: < <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf>> Acesso em: 02 dez 2018.

XIE, H.; CHEN, Y.; KE, H.; TANG, X.; CHEN, R.. **Analysis of diffusion-adsorption equivalency of landfill *liner* systems for organic contaminants.** Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, China, 2008.

ZUQUETTE, L. V.. **Geotecnia Ambiental – Capítulo 1: Aspectos conceituais e abrangência do tema.** Elsevier Editora Ltda. São Paulo, 2015.