



Isabel Amado Perez

**Avaliação do Potencial de Encapsulamento de um Solo
Contaminado com Cloreto de Zinco através da Adição de
Cal e Cimento**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a Michéle Dal Toé Casagrande

Co-Orientadora: Prof^a Maria Isabel Pais da Silva

Rio de Janeiro
Março de 2017



Isabel Amado Perez

**Avaliação do Potencial de Encapsulamento de um Solo
Contaminado com Cloreto de Zinco através da Adição de
Cal e Cimento**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof^a. Michéle Dal Toé Casagrande

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil / PUC-Rio

Prof^a. Maria Isabel Pais da Silva

Co-Orientadora

Departamento de Química / PUC-Rio

Prof. Tácio Mauro Pereira de Campos

Departamento de Engenharia Civil / PUC-Rio

Prof^a. Ana Cristina Castro Fontenla Sieira

Departamento de Engenharia Civil / UERJ

Dr. Alexander Zhemchuzhnikov

Departamento de Engenharia Civil / PUC-Rio

Prof. Marcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio.

Rio de Janeiro, 24 de março de 2017

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização do autor, da orientadora e da universidade.

Isabel Amado Perez

Graduou-se em Engenharia Ambiental pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2014. Ingressou no mestrado na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em março de 2015, desenvolvendo dissertação na linha de pesquisa de Geotecnia Ambiental e Experimental aplicada a solos contaminados.

Ficha Catalográfica

Perez, Isabel Amado

Avaliação do Potencial de Encapsulamento de um Solo Contaminado com Cloreto de Zinco através da Adição de Cal e Cimento / Isabel Amado Perez; orientadora: Michéle Dal Toé Casagrande. – 2017.

118 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2016.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Encapsulamento. 3. Cloreto de Zinco. 4. Solo Contaminado. 5. Lixiviação. 6. Remediação. I. Casagrande, Michéle Dal Toé. II. Silva, Maria Isabel Pais. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

*Dedico este trabalho à minha família, que sempre
me incentivou e acreditou em mim.*

Agradecimentos

Ao meu pai e minha mãe, que tanto me incentivaram. Se não fosse por vocês eu não estaria onde estou e não seria quem eu sou. Dedico a vocês todas as minhas vitórias e conquistas, por que sem vocês eu não seria ninguém. Obrigada pelo apoio, pelo amor, pelas brigas, por me acalmar, por me incentivar, obrigada por serem pais tão incríveis.

Aos meus irmãos, Joana, Pedro, Manuel e Maria Luiza, meu cunhado Beto, minha cunhada Diana e meus sobrinhos Roberto e Rodrigo por sempre me apoiarem, estarem por perto em todos os momentos, em confiarem em mim e entenderem a minha ausência. Amo vocês.

Ao Pedro, que trilhou, junto comigo, o mesmo caminho. Sempre acompanhados por amor e companheirismo. Faltam palavras para agradecer a todos os momentos de desespero em que você me fez erguer a cabeça e dizer que “eu sou capaz”. Esses dois anos foram duros para a gente, mas tenho certeza que nos fez crescer como pessoas e profissionais.

À minha orientadora Michéle Casagrande, que me guiou desde o início, que sempre esteve por perto para me auxiliar em todos os momentos e me acalmar nos meus desesperos. Pela confiança prestada, ensinamentos e constantes incentivos. Aprendi muito neste tempo.

À minha co-orientadora Maria Isabel, que confiou em mim e sempre se mostrou disposta a ajudar e ensinar.

Aos profissionais do Laboratório de Geotecnia, Edson, Carlos e Josué que me ajudaram e apoiaram desde os estágios iniciais até o último ensaio, em especial ao Amaury que sempre ajudou em todos os ensaios e deixou os dias no laboratório mais animados.

À Phillipe Senez, Thaiana Alvim e Fabrício Valente, por terem sido tão companheiros todos os dias desses dois longos anos que enfrentamos juntos, seja na favelinha estudando, seja no bar dos funcionários tomando um cafezinho pra distrair.

Aos amigos feitos durante o período do mestrado, Arthur Amaral, Mariana Silveira, Natalia Durán, Nathalia Louzada e Adriano Malko. Obrigado por me ajudarem tanto. Aos alunos de iniciação Bianca e João Pedro pelo tempo e ajuda de sempre.

Ao laboratório de química, laboratório de microscopia eletrônica e laboratório de microscopia digital da PUC-Rio.

À CAPES e a PUC-Rio, pelo financiamento e auxílio concedidos ao longo destes dois anos.

Resumo

Perez, Isabel Amado; Casagrande, Michéle Dal Toé (Orientadora). Silva, Maria Isabel Pais (Co-Orientadora). **Avaliação do Potencial de Encapsulamento de um Solo Contaminado com Cloreto de Zinco através da Adição de Cal e Cimento**. Rio de Janeiro, 2017. 118 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Junto com o desenvolvimento industrial no Brasil vieram os problemas ambientais, como poluição do ar por gases poluentes, poluição de sistemas hídricos por acidentes ambientais, contaminação de solos provocada pela disposição inadequada de resíduos, entre outros. Em virtude disso as áreas contaminadas foram aumentando e, dessa forma, surgiu a necessidade de formulação de programas de preservação e gerenciamento ambiental, bem como estudos de controle e remediação de áreas contaminadas. Esse estudo tem como objetivo analisar o comportamento de um solo argiloso contaminado por cloreto de zinco quando submetido à técnica de encapsulamento. Essa técnica de remediação consiste na inserção de um agente encapsulante que reage com o solo contaminado, solidificando e estabilizando quimicamente o contaminante. Os agentes cimentantes utilizados nesta pesquisa foram a cal hidratada e o cimento Portland (CP V – ARI). Foram estudadas diversas misturas contendo solo argiloso, cloreto de zinco (nos teores de 5 e 10%) e os agentes encapsulantes (cal e cimento, nos teores de 5 e 10%), em diversos tempos de cura. Caracterização geotécnica, ensaios de compactação, de resistência à compressão simples e ensaio de lixiviação (adaptado à um permeâmetro) foram realizados, assim como as análises químicas das amostras e dos lixiviados coletados, para assegurar a eficiência da técnica de encapsulamento. Ensaios de Tomografia e a Microscopia Eletrônica de Varredura também foram realizados para analisar o comportamento e a estrutura das amostras. Os resultados desta pesquisa se mostraram satisfatórios, uma vez que houve uma significativa redução da concentração de contaminante nos lixiviados quando as amostras continham maior quantidade de agente cimentante, prevenindo a poluição do lençol freático. Além disso, também foi possível notar, a partir dos resultados de resistência à compressão simples, que o tempo de cura e as concentrações de contaminante e dos agentes cimentantes

influenciam muito na resistência do solo contaminado. Portanto, essas escolhas são determinantes para a eficiência desse tipo de remediação.

Palavras-chave

Encapsulamento; cloreto de zinco; solo contaminado; lixiviação; remediação.

Abstract

Perez, Isabel Amado; Casagrande, Michéle Dal Toé (Advisor). Silva, Maria Isabel Pais (Co-Advisor). **Evaluation of the Encapsulation Potential of a Contaminated Soil with Zinc Chloride through the Lime and Cement Addition.** Rio de Janeiro, 2017. 118 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Along with the industrial development in Brazil, several environmental problems arose, such as greenhouse gas emissions, pollution of water systems, soil contamination caused by improper disposal of waste, among others. Because of that, contaminated areas soared and consequently the need for the development of remediation studies of contaminated areas emerged. This study aimed to analyze the behavior of a zinc chloride contaminated soil when subjected to the encapsulation technique. This procedure consists of inserting an encapsulating agent to react with the contaminated soil, solidifying and chemically stabilizing the contaminant. The cementing agents used in this research were hydrated lime and Portland cement (CP V – ARI). Different mixtures of clay soil, zinc chloride (in contents of 5 and 10%) and those agents (lime and cement, in contents of 5 and 10%) were studied in several curing times. Geotechnical characterization tests, compaction tests, unconfined compressive strength tests and leaching tests (adapted from a permeameter) were performed as well as the leachate and samples chemical analysis to ensure the efficiency of the encapsulation technique. Tomography and Scanning Electron Microscopy were also realized to analyse the the behavior and structure of the samples. Research results were satisfactory, since there was a significant reduction of leachate toxicity when the sample had higher contents of encapsulant, preventing the contaminant to pollute water resources. Moreover, it was also possible to realize, from the unconfined compressive strength test, that the curing time and the contaminant and encapsulant agents concentration influences in the contaminated soil strength. Therefore, those choices are crucial for the efficiency of this type of remediation.

Keywords

Encapsulation; zinc chloride; contaminated soil; leaching; remediation.

Sumário

1	Introdução	19
1.1	Relevância e Justificativa da Pesquisa	19
1.2	Objetivos	21
1.3	Estrutura do trabalho	22
2	Revisão Bibliográfica	24
2.1	Considerações Iniciais	24
2.2	Técnicas de Remediação de Solos Contaminados	24
2.3	Estabilização de Solo	27
2.4	Conceito e Aplicações da Técnica de Encapsulamento	30
2.4.1	Vantagens e Desvantagens do Encapsulamento	33
2.4.2	A Técnica de Encapsulamento em Pesquisas	34
2.4.3	Comportamento Mecânico e Químico dos Solos Encapsulados	37
3	Programa Experimental	40
3.1	Materiais Utilizados	40
3.1.1	Solo Argiloso	40
3.1.2	Contaminante	41
3.1.2.1	Aspectos Gerais do Cloreto de Zinco	42
3.1.2.2	Impacto Ambiental do Cloreto de Zinco	44
3.1.3	Cimento	44
3.1.4	Cal	45
3.1.5	Água	46
3.2	Métodos e Procedimentos de Ensaio	46
3.2.1	Ensaio de Caracterização Física	46
3.2.1.1	Análise Granulométrica	47
3.2.1.2	Densidade Relativa dos Grãos	47
3.2.1.3	Limites de Atterberg	48
3.2.2	Ensaio de Compactação Proctor Normal	48
3.2.3	Preparação dos corpos de prova	49
3.2.3.1	Mistura e Moldagem das Amostras	49
3.2.4	Ensaio de Resistência à Compressão Simples	53
3.2.5	Ensaio de Lixiviação no Permeâmetro	53
3.2.6	Análises Químicas dos Lixiviados	56
3.2.7	Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV	58
3.2.8	Tomografia	59
4	Resultados e Discussões	62
4.1	Considerações Iniciais	62
4.2	Caracterização Física do Solo	62
4.3	Ensaio de Compactação Proctor Normal	63
4.4	Resistência à Compressão Simples	65
4.4.1	Misturas com Cimento	66
4.4.2	Misturas com Cal	69
4.5	Análise Química dos Lixiviados	72
4.6	Análise global dos resultados	78
4.6.1	Influência da adição de cimento	78
4.6.2	Influência da adição de cal	79
4.6.3	Influência do tempo de cura	81
4.6.4	Comparação entre cimento e cal	83
4.7	Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV	85

4.8	Tomografia	89
4.9	Comparativo de Técnicas de Remediação Relativo a Custos	91
5	Conclusão	93
5.1	Conclusões Gerais	93
5.2	Sugestões para Futuros Trabalhos	95
6	Referências Bibliográficas	96
Apêndice A – Relatório de Ensaios de Massa Bruta, Ensaios de Lixiviação e Ensaios de Solubilização		103
Apêndice B – Relatório de Ensaios de Lixiviação e Solubilização para metais específicos		114

Lista de figuras

Figura 2-1: Sistema de Barreiras Reativas Permeáveis (fonte: Tavares, 2013).	26
Figura 2-2: Técnicas de remediação implantadas (adaptado de CETESB, 2013).	27
Figura 2-3: Técnica de solidificação/estabilização <i>in situ</i> (fonte: Grobbel e Wang, 2013)	31
Figura 2-4: Efeito do teor de cal sobre a resistência à compressão simples para alguns solos tratados com a cal e curados por 7 dias (fonte: Ingles & Metcalf, 1972 <i>apud</i> Szeliga, 2014).	37
Figura 2-5: Efeito do teor de cimento sobre a resistência à compressão simples para alguns solos tratados com a cimento e curados por 7 dias (fonte: Ingles & Metcalf, 1972 <i>apud</i> Foppa, 2005).	38
Figura 3-1: Materiais utilizados	40
Figura 3-2: Local de extração do solo argiloso – Campo Experimental II – PUC Rio (Soares, 2005).	41
Figura 3-3: Amostragem do solo	41
Figura 3-4: Evolução da resistência à compressão dos tipos de cimento Portland (fonte: ABCP, 1996).	45
Figura 3-5 - Mistura de cada camada da moldagem	50
Figura 3-6: A - Molde bipartido e soquete; B - Molde tripartido.	51
Figura 3-7: Bipartido com a altura de cada camada marcada	51
Figura 3-8: (a) molde utilizado para preparar amostras para o MEV; (b) amostra utilizada no MEV.	52
Figura 3-9: Acondicionamento das amostras em cura	52
Figura 3-10: Permeâmetro: (I) Interface aonde o lixiviado era coletado; (II) Válvula por onde se retirava o lixiviado; (III) Saída do lixiviado do topo da amostra; (IV) Medidor de Variação de Volume; (V) Painel de Pressão; (VI) Câmara do Permeâmetro; (VII) Amostra; (VIII) Transdutor de pressão.	54
Figura 3-11: A - Amostra no pedestal com pedra porosa e papel filtro;	55
Figura 3-12: Equipamento utilizado nas análises químicas - Fluorescência de Raios-X.	56
Figura 3-13: Tubos cônicos com lixiviados coletados	57
Figura 3-14: Equipamento de Microscopia Eletrônica de Varredura	59
Figura 3-15: Amostras no MEV	59
Figura 3-16: Descrição do equipamento XRadia Versa 510 3D	60
Figura 4-1: Curva Granulométrica do Solo Argiloso	62
Figura 4-2: Curvas de Compactação do solo puro, solo + 5%ZnCl ₂ e solo + 10%ZnCl ₂	64
Figura 4-3: Curvas de Compactação para misturas contendo Solo, ZnCl ₂ e Cimento.	64
Figura 4-4: Curvas de Compactação para misturas contendo Solo, ZnCl ₂ e Cal.	65
Figura 4-5: Resistência à Compressão Simples para solo puro e solo contaminado	66
Figura 4-6: Resistência à Compressão Simples para concentrações de	

(a) 5% ZnCl_2 + 5% cimento; (b) 5% ZnCl_2 + 10% Cimento; (c) 10% ZnCl_2 + 5% cimento; (d) 10% ZnCl_2 + 10% cimento.	66
Figura 4-7: Resistência à Compressão Simples de misturas com cimento para: (a) 7; (b) 28; (c) 60 dias de cura.	67
Figura 4-8: Resistência à Compressão Simples sem imersão, para 10% ZnCl_2 + 10% de Cimento (0, 7 e 28 dias de cura), Argila Pura e 10% ZnCl_2 .	68
Figura 4-9: Planos de ruptura: (a) 10% ZnCl_2 + 5% de cimento, 0 dias de cura; (b) 5% ZnCl_2 + 10% de cimento, 7 dias de cura; (c) 5% ZnCl_2 + 10% de cimento, 28 dias de cura.	69
Figura 4-10: Resistência à Compressão Simples para concentrações de (a) 5% ZnCl_2 + 5% cal; (b) 5% ZnCl_2 + 10% cal; (c) 10% ZnCl_2 + 5% cal; (d) 10% ZnCl_2 + 10% cal.	70
Figura 4-11: Resistência à Compressão Simples de misturas com cal para: (a) 7; (b) 28; (c) 60 dias de cura.	71
Figura 4-12: Resistência à Compressão Simples, sem imersão, para 10% ZnCl_2 + 10% de Cal (0, 7 e 28 dias de cura), argila pura e 10% ZnCl_2 .	71
Figura 4-13: Planos de ruptura: (a) 10% ZnCl_2 + 5% de cal, 0 dias de cura; (b) 5% ZnCl_2 + 10% de cal, 7 dias de cura; (c) 5% ZnCl_2 + 5% de cal, 28 dias de cura.	72
Figura 4-14: Aparência das amostras de lixiviados	74
Figura 4-15: Gráfico de comparação entre os valores de concentração de zinco encontrados nas análises químicas do lixiviado e os valores definidos nas Resoluções CONAMA.	76
Figura 4-16: Porcentagem de Zinco lixiviado nas misturas contendo cimento	79
Figura 4-17: Efeito da quantidade de cal sobre a resistência à compressão simples para alguns solos tratados com cal e curados por 7 dias (fonte: adaptado de Ingles & Metcalf, 1972 <i>apud</i> Dalla Rosa, 2009).	80
Figura 4-18: Porcentagem de Zinco lixiviado nas misturas contendo cal	81
Figura 4-19: Resistência à compressão simples x Tempo de cura para misturas com cimento	81
Figura 4-20: Resistência à compressão simples x Tempo de cura para misturas com cal	82
Figura 4-21: Resistência à Compressão Simples para misturas com cimento e cal para (a) 0 dias de cura e (b) 7 dias de cura.	83
Figura 4-22: Resistência à Compressão Simples para misturas com cimento e cal para (a) 28 dias de cura e (b) 60 dias de cura.	84
Figura 4-23: Porcentagens de Zinco após ensaio de lixiviação das misturas contendo cimento e cal.	85
Figura 4-24: Microscopia Eletrônica de Varredura de amostras de solo puro, solo/contaminante, solo/contaminante/cal e solo/contaminante/cimento.	87
Figura 4-25: Microscopia Eletrônica de Varredura da mistura de 10% ZnCl_2 + 10% cimento (100x)	87

Figura 4-26: EDS da amostra de Solo Puro	88
Figura 4-27: EDS da amostra de Solo +10% ZnCl_2.	88
Figura 4-28: EDS da amostra de 10% ZnCl_2 + 10% Cimento.	89
Figura 4-29: Imagens da Tomografia realizada para cada mistura	90
Figura 4-30: Imagens da Tomografia em 3D representando os vazios de cada mistura	91

Lista de tabelas

Tabela 3-1: Especificação do Cloreto de Zinco (fonte: B'Herzog)	43
Tabela 3-2: Composição do Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (fonte: ABCP, 2002).	45
Tabela 4-1: Caracterização Física do solo do Campo Experimental II da PUC-Rio	63
Tabela 4-2: Resultados dos ensaios de compactação	65
Tabela 4-3: Resultado das análises químicas das misturas	73
Tabela 4-4: Resultados das análises químicas dos lixiviados (%)	75
Tabela 4-5: Ensaio de espectrometria de absorção atômica	76
Tabela 4-6: Comparação entre a quantidade de zinco encontrada no ensaio de lixiviação no permeâmetro e no ensaio de lixiviação realizado de acordo com a NBR 10.005	77
Tabela 4-7: Resistência à Compressão Simples das misturas contendo cimento.	79

Lista de abreviações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Técnica
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
ASTM	American Society for Testing and Materials
EPA	Environmental Protection Agency
USACE	U. S. Army Corps of Engineers
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
SVE	Extração de Vapores do Solo
CPV – ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CH-III	Cal Hidratada tipo III
EDX	Espectroscopia de raios-X por dispersão em energia
ZnCl ₂	Cloreto de Zinco
EDS	Sistema de Energia Dispersiva

Lista de símbolos

$W_{ót\text{m}}$	Umidade ótima
$\gamma_{d\text{máx}}$	Peso específico seco máximo
ZnCl_2	Cloreto de Zinco
$\rho_{d\text{máx}}$	Massa específica seca máxima

*"A ciência nunca resolve um problema sem criar
pelo menos outros dez."*

George Bernard Shaw

1

Introdução

1.1

Relevância e Justificativa da Pesquisa

A rápida industrialização, a crescente urbanização, a modernização das práticas agrícolas e os métodos inadequados de disposição dos rejeitos foram os principais fatores que contribuíram para a poluição dos solos por metais, se tornando uma grande preocupação ambiental no mundo todo.

No Brasil, a falta de uma política ambiental adequada permitiu que a disposição de resíduos sólidos fosse feita sem controle e sem restrição, levando à contaminação das águas e do solo, além de afetar diretamente a saúde humana e o meio ambiente (Lora, 2000). Entretanto, nas últimas décadas, as restrições quanto ao uso do solo para disposição final de resíduos, principalmente àqueles considerados perigosos, tem se tornado cada vez mais rígidas, requerendo das empresas que tratam e dispõe esses resíduos a busca de alternativas de tratamentos seguros e eficazes. A legislação solicita que o gerador se responsabilize desde a geração, estocagem, armazenamento, transporte, tratamento até sua disposição final.

Segundo Fausto e Chasin (2003) com o aumento da produção, armazenamento, manipulação, transporte, uso e disposição das substâncias químicas, o potencial de exposição humana e contaminação do ambiente pelos acidentes e incidentes, no trabalho ou em casa estão aumentando. Em face deste aumento, os riscos ambientais associados a estes resíduos ficam mais evidentes devido ao desconhecimento de sua composição e formas adequadas de acondicioná-los.

De acordo com Korf (2011) as atividades que mais contribuem para a geração de resíduos com constituintes metálicos são:

- i) Disposição de resíduos sólidos urbanos e industriais no solo;
- ii) Vazamentos e derramamentos acidentais de substâncias químicas em atividades industriais e de transporte;

- iii) Atividades industriais de galvanoplastia, mineração e fundição;
- iv) Aplicação de fertilizantes, agroquímicos e pesticidas agrícolas;
- v) Emissão atmosférica de poluentes provenientes da volatilização de pesticidas, motores veiculares, atividade de mineração, incineração e transporte de resíduos, processos industriais e produção de energia;
- vi) Disposição no solo de dejetos agropecuários;
- vii) Disposição no solo de lodo de estações de tratamento de efluentes e esgotos sanitários.

Segundo Wowk e Melo (2005) as principais preocupações quanto aos efeitos da contaminação de metais em solos, são o seu ingresso na cadeia alimentar, a redução da produtividade agrícola devido aos efeitos fitotóxicos, as alterações nas atividades microbianas, acumulação no solo e a contaminação de recursos hídricos superficiais e subterrâneos, devido ao escoamento superficial e da infiltração da água da chuva, respectivamente. Repetto (1995) relata que uma vez presente no ambiente, os metais podem desencadear problemas de toxicidade em seres humanos, animais e plantas que forem expostos, devido à sua mobilidade nos diferentes compartimentos ambientais.

Já ocorreram diversos acidentes ambientais envolvendo a contaminação por metais no mundo todo. De acordo com Mirsal (2008), em 1986, houve a poluição do rio Reno entre a Alemanha e a França, devido a práticas industriais e agrícolas, que gerou a contaminação do meio por mercúrio e provocou a morte e sequelas graves nos seres humanos e biota.

No Brasil, a Cia Mercantil e Industrial Ingá, que processava minério para produzir lingotes de zinco de alta pureza, causou uma contaminação de grande relevância na Baía de Sepetiba. Outro acidente ocorreu em 2006 na unidade de zinco da Votorantim Metais, localizada no município de Três Marias, Minas Gerais. Esses acidentes são abordados no item 3.1.2.2.

No ano de 2007, apenas 5 milhões de toneladas de resíduos industriais foram tratados no país, sendo que o Brasil gera em torno de 53 milhões de toneladas de resíduos industriais por ano. Somente no Estado de São Paulo, a CETESB em 2015 identificou 5.376 áreas contaminadas. Destas áreas, 3.979 são de postos de combustível e 917 são de atividades industriais.

O controle e remediação dessas áreas contaminadas se tornam cada vez mais complicados. Em função disso, o surgimento de programas de preservação e

gerenciamento e estudos de métodos de remediação mais atuais e capazes de diminuir o volume e a toxicidade dos resíduos industriais vêm crescendo cada vez mais.

Dentre os diversos processos de controle e remediação de solos contaminados, a tecnologia de solidificação/estabilização por meio de encapsulamento vem se tornando uma importante alternativa de tratamento face as, cada vez mais restritas, normas para disposição de resíduos perigosos em aterros, pois provê o melhoramento das características físicas e toxicológicas do resíduo, facilitando o seu gerenciamento de forma segura e eficaz. Além disso, o custo do processo de solidificação/estabilização tem sido considerado baixo em relação a outras técnicas de tratamento, fator este que tem impulsionado o desenvolvimento desta tecnologia nos últimos anos.

Embora esta técnica seja amplamente utilizada há mais de 30 anos em países como os Estados Unidos, Alemanha, França, Inglaterra e Japão, no Brasil, esta tecnologia ainda é considerada recente e está basicamente direcionada ao tratamento de resíduos industriais classificados segundo a NBR 10.004 – Classificação de Resíduos – como Classe I (perigoso) e Classe II (não inerte).

O desenvolvimento desta pesquisa, utilizando a técnica de encapsulamento, se justifica devido ao grande número de áreas contaminadas por atividades industriais, que em sua maioria dispõe seus resíduos de forma inadequada, contaminando o solo e as águas subterrâneas. Além disso, considerou-se também o fato do encapsulamento geotécnico ser uma das técnicas de remediação pouco utilizada no Brasil, apesar dos diversos estudos existentes e mais financeiramente viáveis.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é analisar a eficiência do emprego da técnica de encapsulamento aplicada em um solo argiloso contaminado por cloreto de zinco. O programa experimental consistiu em ensaios de caracterização físico-química, ensaios mecânicos, para a argila e diferentes misturas, determinando parâmetros que ajudarão no desenvolvimento da pesquisa.

De acordo com o principal objetivo, para chegar ao resultado final, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar física, química e geotecnicamente o solo e misturas estudadas;
- Determinar a resistência à compressão simples de amostras contendo solo, solo/contaminante, solo/contaminante/cimento e solo/contaminante/cal em diferentes concentrações (5 e 10% de cloreto de zinco e teores de 5 e 10% de cimento e cal) e tempos de cura (7, 28 e 60 dias);
- Realizar ensaios de lixiviação (adaptado a um permeâmetro) em amostras com diferentes concentrações de cloreto de zinco e agentes encapsulantes (cal e cimento), a fim de simular a passagem da água subterrânea por um solo contaminado.
- Executar análises químicas nos lixiviados, para determinar a concentração de contaminante lixiviado e o potencial de encapsulamento dos agentes estudados.

1.3

Estrutura do trabalho

Este trabalho é dividido em cinco capítulos, começando com este capítulo introdutório. Em seguida, no Capítulo 2, é apresentada a revisão bibliográfica sobre a técnica de encapsulamento, suas aplicações, vantagens e desvantagens. Na revisão bibliográfica também é abordado sobre os principais ensaios de laboratório que devem ser feitos para assegurar a eficiência da técnica de remediação. Por fim, é apresentada uma revisão sucinta sobre a estabilização solo-cimento e solo-cal.

O Capítulo 3 apresenta detalhadamente o programa experimental realizado nesta pesquisa. Descreve os materiais utilizados, equipamentos e procedimentos a serem seguidos para cada ensaio realizado.

O Capítulo 4 apresenta os resultados da caracterização física do solo, dos ensaios de resistência à compressão simples, dos ensaios de lixiviação e das análises químicas dos lixiviados. Também são apresentados os resultados dos ensaios de tomografia e da Microscopia Eletrônica de Varredura. Por fim, foi feita uma análise global, onde foram analisadas as influências da adição de cimento, da

adição de cal, do tempo de cura e também a comparação entre o uso de cimento e cal.

E por último, o Capítulo 5 apresenta as considerações finais obtidas a partir das análises dos resultados e recomendações para futuros trabalhos.

2

Revisão Bibliográfica

2.1

Considerações Iniciais

No presente capítulo, é apresentada a revisão bibliográfica encontrada sobre algumas técnicas de remediação de solo contaminado, em especial da técnica de encapsulamento, como conceitos básicos e aplicações, além das vantagens e desvantagens do emprego desta técnica.

Em seguida, são abordados os conceitos e condições gerais para a realização do ensaio de resistência à compressão simples e do ensaio de lixiviação, que são ensaios importantes para a determinação da eficiência do método de encapsulamento. Por último, os mecanismos da estabilização de solos através do emprego de cimento e da cal são brevemente abordados.

2.2

Técnicas de Remediação de Solos Contaminados

Uma área contaminada é definida como um local ou terreno onde há comprovadamente poluição ou contaminação causada pela introdução de quaisquer substâncias ou resíduos que nela tenham sido depositados, acumulados, armazenados, enterrados ou infiltrados de forma planejada ou acidental. Nessa área, os poluentes ou contaminantes podem concentrar-se em subsuperfície nos diferentes compartimentos do ambiente como, por exemplo, no solo, nas rochas, nos materiais utilizados para aterrar os terrenos, nas águas subterrâneas ou, de uma forma geral, nas zonas não saturada e saturada, além de poderem concentrar-se nas paredes, nos pisos e nas estruturas de construções (CETESB, 2017).

A remediação de solos contaminados consiste na redução dos teores de contaminantes a níveis seguros para a saúde humana. Essa redução pode ser feita para impedir ou dificultar a disseminação de substâncias nocivas ao ambiente (Tavares, 2013).

Devido à grande ocorrência de acidentes ambientais surgiram inúmeros métodos para remediação e mitigação dos passivos ambientais. Alguns desses são realizados *in situ*, já em outros, a massa contaminada é removida, tratada e depois pode retornar ao local de onde foi retirada, estes são denominados *ex situ* (Rojas e Fonini, 2006). Tavares (2013) cita que atualmente as técnicas de remediação *in situ* têm sido mais utilizadas por apresetarem baixo custo e não provocarem contaminações secundárias, o que já foi observado na remediação *ex situ*, devido ao transporte do material contaminado até o local de tratamento.

A escolha da tecnologia adotada deve ser realizada conforme as características de cada área contaminada, além de atender à legislação ambiental vigente (Tavares, 2013). De acordo com Azambuja *et al* (2000) existem diversos processos de remediação, desde a simples remoção do solo contaminado, confinando o material em aterros de resíduos sólidos ou dispendo em *landfarmings*, até a técnica de bombeamento com tratamento externo (*pump and treat*) a fim de preservar os aquíferos.

A técnica de bombeamento e tratamento (*pump and treat*) consiste no bombeamento de água contaminada a partir de um poço de extração. A água contaminada é armazenada em um *holding tank* e em seguida é feito o seu tratamento, que vai variar de acordo com o tipo de contaminante. Esta é uma técnica muito utilizada, pois apresenta baixo custo de instalação e é possível ter um controle do tratamento. Apesar do baixo custo, a técnica possui algumas desvantagens, como a necessidade de uma área para o tratamento da água na superfície e o contínuo fornecimento de energia para o funcionamento da bomba. Além disso, o tempo de duração da remediação vai depender da concentração dos contaminantes, da dimensão da pluma e do fluxo de água (Gusmão, 2002).

As barreiras reativas são estruturas permeáveis instaladas no subsolo, no caminho do fluxo da água subterrânea contaminada, como mostra a Figura 2-1. O funcionamento consiste na passagem da água contaminada pela barreira, onde ocorre o tratamento pelo material reativo. Os tratamentos mais utilizados são a degradação, sorção e precipitação do contaminante. Esta é uma técnica pouco utilizada no Brasil apesar dos diversos estudos existentes. Como vantagem pode-se citar que o tratamento é feito no local da contaminação, sem a necessidade de bombeamento ou disposição final e o baixo custo de operação e manutenção. Por

outro lado, a técnica apresenta um alto custo de instalação e existe a chance de serem formados contaminantes mais tóxicos como subprodutos (Gusmão, 2002).

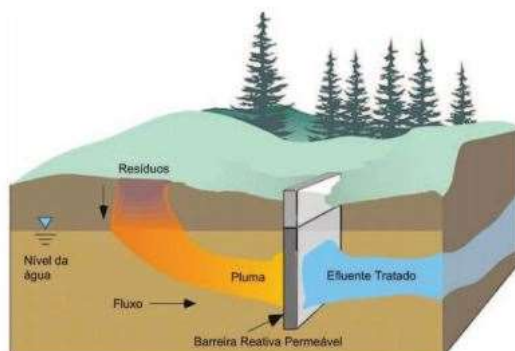


Figura 2-1: Sistema de Barreiras Reativas Permeáveis (fonte: Tavares, 2013).

No processo de Extração de Vapores do Solo (SVE) ocorre a injeção de vácuo na zona não-saturada do solo (zona vadosa) através de poços. Isto induz o fluxo de ar, reduzindo a concentração de constituintes voláteis adsorvidos no solo. Com o tempo, o contaminante que está na fase líquida passa para o gás que aos poucos vai saindo e limpando as duas fases (Fitts, 2012). Este método é constituído por uma fase de tratamento do vapor e pode levar muito tempo dependendo da dimensão da pluma. Além disso, é recomendado para produtos mais voláteis, como gasolina e menos recomendado para diesel e querosene, pois são menos voláteis.

A técnica de *Air Sparging* pode ser utilizada sozinha ou conjugada com um sistema de extração de vapores. Este método consiste na extração de compostos orgânicos voláteis que se encontram na zona saturada do solo. Bolhas de ar são injetadas por um poço na zona saturada. À medida que o ar injetado migra para cima, em direção à zona não-saturada, as moléculas contaminantes se desprendem da água subterrânea, pois se volatilizam. As bolhas de ar para onde vai o contaminante, quando atingem a zona não saturada, podem ser captadas através de um sistema de extração de vapores (Fitts, 2012).

O encapsulamento geotécnico consiste na inserção de um agente cimentante no solo contaminado, que reduz ou impede o movimento dos poluentes no solo, além de reduzir a solubilidade e toxicidade. Esta técnica é apresentada mais detalhadamente no item 2.4. O método de encapsulamento de solos contaminados é uma técnica de grande potencial de uso na redução do poder de contaminação

por hidrocarbonetos e metais pesados, porém ainda não possui tecnologia nacional capacitada para seu emprego correto (Knop, 2003).

Dentre as diversas técnicas de remediação existentes, a técnica de encapsulamento de solos contaminados foi escolhida para esta pesquisa por se tratar de uma técnica que, muitas vezes, apresenta baixo custo em relação às outras. Além disso, no Brasil, apesar dos diversos estudos em que a técnica tem sido explorada, ainda é uma prática que precisa ser mais desenvolvida e também é uma técnica pouco empregada no país. Como exemplo, no Estado de São Paulo, enquanto 913 bombeamentos e tratamentos foram implementados, apenas 7 encapsulamentos geotécnicos foram realizados até o ano de 2013, como mostra a Figura 2-2.

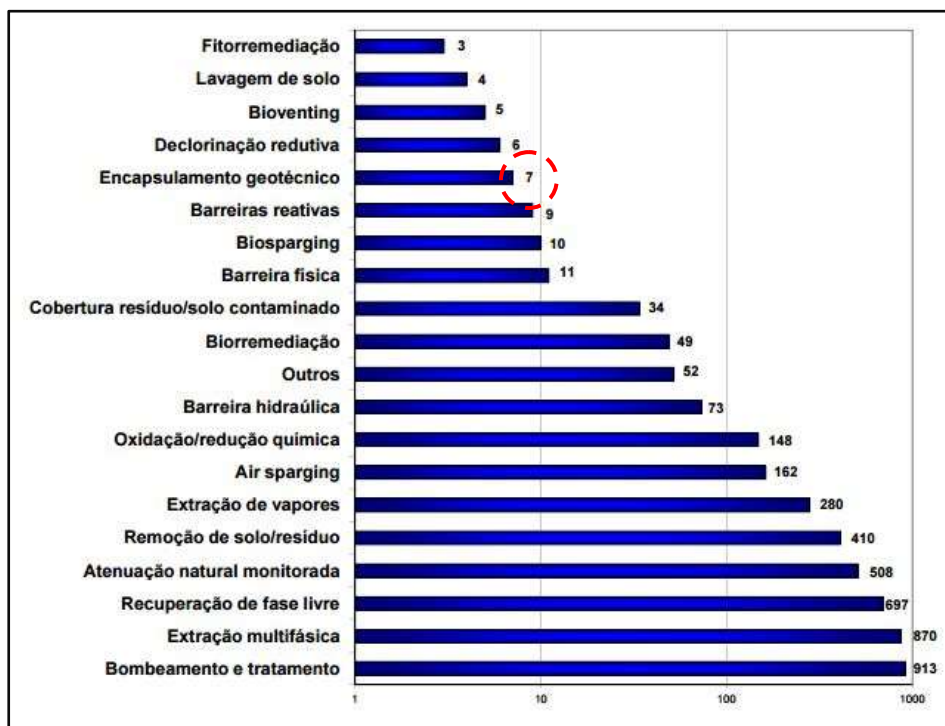


Figura 2-2: Técnicas de remediação implantadas (adaptado de CETESB, 2013).

2.3 Estabilização de Solo

Apesar da estabilização de solos não ser o foco desta pesquisa, a técnica de encapsulamento de solos contaminados se dá por reações de solidificação e estabilização do material. Desta forma, é abordado brevemente sobre a estabilização de solo por cimento e cal, que foram os materiais utilizados nesta pesquisa.

Inglês & Metcalf (1972) definem que a estabilização de solos se trata da aplicação de processos técnicos que buscam a melhoria das propriedades mecânicas de um solo, em especial daquelas relacionadas com resistência, deformabilidade, condutividade hidráulica e durabilidade. A presença de agentes cimentantes no solo provoca mudanças nas propriedades geotécnicas do material, que vão depender das características específicas do solo, do teor de aditivos, da quantidade de água, do tipo e do grau de compactação, do tipo e do tempo de cura. Em geral, a adição de cimento e cal aumentará a resistência e a rigidez, diminuirá a compressibilidade e alterará os limites de consistência. Já a condutividade hidráulica reduzirá nos solos granulares, mas aumentará nos solos argilosos (Prietto, 1996).

Segundo Das (2001) o cimento é cada vez mais utilizado como estabilizador de solos, tanto arenosos quanto argilosos, principalmente na construção de pavimentos e aterros. A presença do cimento em misturas com solos argilosos reduz o limite de liquidez e incrementa o índice de plasticidade, assim como a cal. Em solos argilosos, a estabilização com cimento se torna mais eficiente quando o limite de liquidez é menor que 45-50 e o índice de plasticidade é menor que 25.

A estabilização solo-cimento ocorre a partir da hidratação do cimento dentro dos vazios do solo. Solos granulares conseguem atingir resistências mais elevadas com menores teores de cimento do que solos argilosos, que requerem maior quantidade (Das, 2001).

Segundo Medina (1987 *apud* Szeliga, 2014), durante o processo de estabilização do solo com cimento, ocorrem dois tipos de reações: as reações de hidratação do cimento Portland e as reações entre os argilominerais e a cal liberada na hidratação do cimento, conhecidas como reações pozolânicas e ocorrem mais lentamente.

Em solos argilosos, a reação da cal com a sílica e alumina do solo desenvolve fortes ligações entre as partículas do solo. Já em solos granulares são desenvolvidos vínculos de coesão em pontos de contato entre grãos. A reação da cal gerada na hidratação provoca uma redução do pH da mistura, o que afeta a hidratação e endurecimento do cimento. Por isso, os solos granulares respondem melhor à estabilização com cimento do que solos argilosos (Szeliga, 2014).

A utilização da cal para estabilização de solos é um dos métodos de estabilização química mais conhecidos e possui diversas aplicações, como em

base ou sub-base de pavimentos ou em aterros. As propriedades da cal promovem inicialmente uma melhoria na deformabilidade e permeabilidade e depois de mais tempo um ganho de resistência quando adicionadas ao solo.

De acordo com Castro (1995) algumas reações químicas ocorrem simultaneamente quando se adiciona cal a um solo fino em presença de água. A estabilização química da cal se dá a partir de duas etapas: (i) a fase rápida, que dura de horas a dias e pode ser originada devido a processos de interação da cal com um solo fino a partir de troca catiônica, floculação-aglomeração, compressão da dupla camada elétrica, adsorção da cal e reações químicas, que geram uma melhora na plasticidade do material; e (ii) a fase lenta que pode levar de meses a anos para acontecer e é caracterizada pelas reações pozolânicas, quando formam produtos cimentante que proporcionam um aumento da resistência, e pela carbonatação (converte a cal em carbonato de cálcio), que é uma reação prejudicial pois reduz a quantidade de cal disponível para a produção de reações pozolânicas.

Segundo Bell (1996), a hidratação da cal modifica o pH da mistura, tornando a sílica e a alumina mais solúveis. Com a dissolução desses elementos no solo, são formados géis de silicato ou aluminato hidratados de cálcio que provocam a floculação das argilas em função das reações de troca de cátions.

Os géis de silicato, segundo Ingles & Metcalf (1972), cobrem e ligam as partículas de argila imediatamente, bloqueando os vazios. Essas reações só ocorrem na presença de água, que tem a função de trazer os íons para a superfície das partículas de argila. Com o tempo, há a produção de reações pozolânicas e fenômenos de carbonatação, proporcionando ao material melhores características geo-mecânicas. As reações pozolânicas são responsáveis pelo aumento da resistência mecânica de misturas solo-cal. E isso ocorre porque, como citado anteriormente, fontes de sílica, alumina e ferro presentes no solo reagem com a cal e a água, formando diversos produtos cimentantes.

A adição de cal em solos argilosos reforça propriedades importantes para a engenharia, mas sempre vai depender do tipo do solo, do tempo de cura e do método e qualidade da sua utilização em algum tipo de obra. Inicialmente, a primeira resposta da mistura solo-cal será a redução do índice de plasticidade e melhoria na trabalhabilidade e a segunda resposta será o ganho de resistência

através da cimentação das partículas (Ingles & Metcalf, 1972; Bell, 1996; Dalla Rosa, 2013).

2.4

Conceito e Aplicações da Técnica de Encapsulamento

A técnica de encapsulamento, também é conhecida como solidificação/estabilização. A solidificação consiste em agregar os resíduos em um bloco sólido de materiais (solo + contaminante + agente encapsulante), que se torna menos permeável à água do que o resíduo puro. A fase estabilização se caracteriza pela geração de uma reação química que reduz a mobilidade, solubilidade e toxicidade do contaminante, reduzindo a probabilidade deste ser lixiviado para o meio ambiente (EPA, 2012). Segundo Wiles (1987), a técnica consiste no completo revestimento de um resíduo tóxico por um agente encapsulante, que pode ser cal ou cimento Portland.

Wiles (1987) aborda que o encapsulamento se trata de um termo referente à sistemas de tratamento projetados que utilizam técnicas de solidificação e estabilização para alcançar um ou mais dos seguintes objetivos: a) melhorar as características físicas e de manuseio de um resíduo; b) diminuir a superfície de exposição, através da qual possa ocorrer perda ou transferência de contaminantes; c) limitar a solubilidade ou desintoxicar qualquer constituinte presente ao resíduo; d) minimizar a taxa de migração de contaminantes para o meio ambiente; e e) reduzir o nível de toxicidade.

A *Environmental Protection Agency* (EPA, 2012), que é uma agência americana de proteção à saúde humana e ao meio ambiente, se refere ao processo de solidificação/estabilização como um grupo de métodos de limpeza que previne ou retarda a liberação de produtos químicos perigosos oriundos de solos contaminados. Esses métodos, geralmente, não destroem os contaminantes. Em vez disso, os conservam em níveis seguros no processo de "lixiviação" para o ambiente circundante. Sendo que a lixiviação ocorre quando a água da chuva ou outras fontes podem dissolver e carrear os contaminantes até atingir as águas subterrâneas ou por terra chegando aos lagos e riachos, contaminando o meio ambiente.

De acordo com Braga *et al* (2002) o processo de encapsulamento é uma alternativa às técnicas convencionais de tratamento/disposição final de resíduos

oleosos (incineração, *landfarming* e aterros). A U.S. Army Corps of Engineers (1995) ressalta que a técnica é, de preferência, aplicada a contaminantes constituídos de metais pesados, pois dessa forma, a adição de cimento eleva o pH das misturas, formando hidróxidos de metais, que por sua vez são menos solúveis que outras espécies iônicas dos metais. Park (1999) destaca que a técnica de solidificação/estabilização tem sido empregada há décadas como tratamento final antes da disposição de compostos radioativos e contaminantes químicos.

Os processos utilizados na técnica de encapsulamento podem ser *in situ* ou *ex situ*. No primeiro é realizada a mistura de agentes cimentantes no local onde se encontra o solo contaminado, como mostra a Figura 2-3, prevenindo a lixiviação do contaminante para o lençol freático.



Figura 2-3: Técnica de solidificação/estabilização *in situ* (fonte: Grobbel e Wang, 2013)

No segundo ocorre a escavação do material contaminado. Em seguida o material é levado para uma unidade onde será misturado com o reagente e por fim é utilizado em um aterro ou reaterro do solo tratado (Knop, 2003). Bruce *et al* (1998) explicam que o processo utilizado varia de acordo com a rigidez, permeabilidade e o tipo do solo contaminado.

Os reagentes adicionados aos contaminantes para gerar a estabilização e solidificação podem ser orgânicos ou inorgânicos. Os reagentes orgânicos raramente são empregados. Já os inorgânicos são mais utilizados por reagirem quimicamente com a água presente, com os contaminantes e por proporcionar o

encapsulamento destes. Um exemplo de reagente orgânico é a argila modificada, e os reagentes inorgânicos são o cimento, a cinza volante, a cal, fosfatos, rejeitos de fornos, entre outros (USACE, 1995).

Segundo Rojas (2007) os agentes mais empregados para o encapsulamento são o cimento Portland e a cal. Em termos físicos, o cimento apresenta uma resposta em um intervalo de tempo bem menor que o da cal, visto que a sua cura se dá em menos tempo. Para Stegemann *et al* (2002), o encapsulamento com cimento Portland ou outro agente cimentante hidráulico é geralmente sugerido como o melhor tratamento para rejeitos que não podem ser eliminados ou reciclados.

Os resultados apresentados por Rojas (2007) mostram que a utilização do cimento Portland como encapsulante promove resultados físicos e químicos satisfatórios em relação ao comportamento pós-tratamento. Verificou-se que quanto maior a quantidade de cimento nas amostras de solo contaminado com borra oleosa ácida, maior é a resistência à compressão simples e menor é a concentração de contaminantes no lixiviado. No entanto para maiores quantidades de contaminante no solo há uma queda significativa do desempenho físico e químico do composto encapsulado. O principal motivo da diminuição da concentração de poluentes no lixiviado, é o processo de precipitação e/ou absorção devido ao elevado pH do meio, que aumentou com a quantidade de cimento.

Kogbara *et al* (2011) mostrou a eficiência da cal hidratada em reduzir a quantidade de cádmio e níquel no lixiviado de um solo contaminado por metais pesados e hidrocarbonetos. As propriedades mecânicas foram controladas pelas proporções de água e encapsulante, enquanto que a lixiviação foi controlada principalmente pelo pH e pela dosagem do encapsulante.

A *U.S. Army Corps of Engineers* (1995) cita que existem alguns ensaios físicos e químicos que são necessários para assegurar a eficiência da técnica do encapsulamento. Dentre os ensaios mecânicos estão o ensaio de compactação e o ensaio de resistência à compressão simples, que vão fornecer os parâmetros físicos do solo. Além disso, devem ser realizadas análises químicas no lixiviado obtido a partir do ensaio de lixiviação, para garantir a eficiência da técnica de encapsulamento do contaminante.

2.4.1

Vantagens e Desvantagens do Encapsulamento

De acordo com Wiles (1986) as vantagens e desvantagens da técnica do encapsulamento de solo contaminado variam de acordo com os processos, o tipo de contaminante, as condições do solo e locais, o grau de contaminação, os agentes encapsulantes utilizados, entre outros fatores.

A principal vantagem da técnica do encapsulamento é a redução da mobilidade do contaminante, reduzindo a contaminação do lençol freático e do meio ambiente. Além disso, vale destacar que a aplicação desta técnica transforma o solo contaminado em um material com elevada resistência, podendo ser empregado em obras civis e geotécnicas e até mesmo como base e sub-base de pavimentos.

Rojas (2007) cita as vantagens e desvantagens dos métodos *in situ* e *ex situ*. Apesar do tratamento *in situ* não necessitar da retirada e deslocamento do solo contaminado até uma usina de mistura, este método possui uma desvantagem que é a falta de controle na qualidade da mistura. Isso não ocorre no tratamento *ex situ*, pois nesse caso há o controle da uniformidade e homogeneização da mistura.

Saito *et al* (1985) relatam as vantagens de técnicas de remediação que utilizam o cimento: a) matéria-prima abundante e barata; b) tecnologia de mistura e manuseio bem conhecida; c) não é necessária a secagem do resíduo; d) sistemas tolerantes às variações químicas e os resíduos somente necessitam de um pré-tratamento se contiverem componentes que retardem as reações do cimento; e e) pode-se variar a quantidade de cimento usado para se produzir produtos com alta capacidade de suporte.

A adição de um agente encapsulante no solo contaminado gera um aumento do volume do material final, o que pode afetar as condições de espaço no local do tratamento e o gerenciamento deste produto final, se tornando uma desvantagem da utilização da técnica de encapsulamento (Wiles, 1986). Outras desvantagens são: (i) a possível perda de eficiência ao longo do tempo, que pode ocorrer devido ao intemperismo do agente encapsulante; (ii) a dificuldade de fazer misturas homogêneas em campo e (iii) o elevado custo do agente cimentante.

Cruz (2004) relata que o custo do processo de encapsulamento geralmente é considerado baixo se comparado a outras técnicas de remediação. O emprego de

aditivos, muitas vezes necessário dependendo do tipo de contaminante, torna o custo desta técnica mais elevado. Para determinar o custo da execução desta técnica de remediação, deve-se considerar:

- a) As características do contaminante, pois dependendo do tipo de contaminante pode ser necessário um pré-tratamento do local, como remoção do excesso de água, ou demais constituintes do solo contaminado;
- b) A distância de transporte de solo contaminado até a usina e novamente até o local (mistura em usinas) ou do transporte de reagentes até o local da contaminação (misturas *in situ*);
- c) O tipo de processo adotado. Por exemplo, a utilização de cimento e cinza volante aumenta muito o volume da massa e consequentemente os gastos com transporte em misturas em usinas.

Por fim, apesar da técnica de solidificação/estabilização se tratar de um processo simples e barato, por utilizar equipamentos convencionais e facilmente disponíveis, este processo também exige um longo período de monitoramento, pois existem chances do processo reverter e liberar os contaminantes para o lençol freático, contaminando o meio ambiente e trazendo prejuízos para a vida de seres vivos.

2.4.2 A Técnica de Encapsulamento em Pesquisas

Este item aborda sobre algumas das diversas pesquisas que existem sobre a técnica de encapsulamento de solos contaminados. São apresentados os agentes encapsulantes utilizados, o contaminante e os principais resultados de ensaios de lixiviação e de resistência à compressão simples.

Park (1999) utilizou três misturas de agentes cimentantes diferentes para investigar a técnica de encapsulamento de solo contaminado por metais pesados: 100% de cimento Portland, 80% de cimento + 20% de escória de alto forno e 75% de cimento + 15% de escória + 10% de um agente de rápida solidificação. A terceira mistura de agentes encapsulantes apresentou a maior resistência à compressão simples, enquanto o cimento puro obteve a menor resistência. Para todas as misturas, a concentração de contaminantes reduziu e a resistência à compressão simples aumentou com o tempo de cura.

Li *et al* (2000) aplicou a técnica de encapsulamento em uma lama de fábrica de impressão de placas de circuito contendo altas concentrações de cobre, zinco e chumbo utilizando diferentes concentrações de cimento Portland comum e cinzas volantes como agentes encapsulantes. Todas as misturas continham 50% de contaminante enquanto as concentrações de agente encapsulante variavam entre 0 e 50%. A partir dos resultados dos ensaios de lixiviação notou-se que houve a redução dos metais pesados para todas as misturas que continham cimento Portland. Já a quantidade de metais na mistura que continha 50% de cinzas volantes reduziu em relação ao solo não tratado, mas mesmo assim apresentou elevadas concentrações de cobre, zinco e chumbo.

Knop (2003) construiu um equipamento de lixiviação em coluna de acordo com a norma americana ASTM D 4874 para que fosse possível analisar o método do encapsulamento para diferentes quantidades de contaminante e agente cimentante. Além disso, também foram realizados ensaios de lixiviação proposto pela norma ABNT (NBR 10.005) com o objetivo de comparar com os resultados obtidos a partir da norma americana. Também foram feitos ensaio de resistência à compressão simples, onde o material ensaiado consistiu no solo residual arenito Botucatu, com diferentes porcentagens de óleo diesel (0, 10, 20, 30, 40, 50 e 70%) e de cimento Portland CP V – ARI (10, 20, 30, 40 e 50%). Nesses ensaios, observou-se um aumento da resistência para crescentes concentrações de cimento e um decréscimo na resistência para crescentes quantidades de contaminante. Os ensaios de lixiviação em coluna foram realizados apenas para misturas contendo 10 e 40% de contaminante e 10 e 20% de cimento. Para ambos os ensaios de lixiviação realizados, tanto conforme a norma brasileira (ABNT) quanto a norma americana (ASTM), houve a redução da concentração de contaminante no lixiviado para maiores quantidades de cimento. Mas o ensaio de lixiviação em coluna (ASTM) se mostrou mais adequado, pois além de simular as condições reais de campo, também é capaz de analisar a massa de contaminante lixiviado e o volume total de fluido percolado.

Assim como Knop (2003), Cruz (2004) também construiu um permeâmetro de parede flexível adaptado para receber percolados químicos, onde eram realizados ensaios de condutividade hidráulica. A técnica de encapsulamento foi avaliada em um solo residual de arenito Botucatu, contaminado com diferentes concentrações de óleo diesel (0, 10, 20, 30, 40, 50, 75 e 100%) e o cimento

Portland CP V - ARI (0, 10, 20, 30, 40, 50%) foi utilizado como agente encapsulante. A partir dos resultados dos ensaios de resistência à compressão simples, foi possível notar que a resistência aumenta com o acréscimo de cimento e reduz com o aumento de contaminante. Porém, até 20% de contaminante, a resistência se mantém adequada. Em relação aos ensaios de lixiviação em coluna, pode-se notar que a técnica se mostrou eficaz com valores de até 20% de contaminante. Para quantidades elevadas, seria necessário adicionar mais cimento à mistura.

Rojas (2007) aplicou a técnica de encapsulamento em um solo contaminado com crescentes quantidades de borra oleosa ácida (0, 2, 4 e 6%), utilizando o cimento Portland CP V – ARI (10 e 20%) como agente encapsulante. A partir de seus resultados, observou-se que o aumento do teor de cimento e do tempo de cura demonstrou ter um impacto positivo em relação à resistência à compressão simples. A adição do cimento Portland também se mostrou eficaz quanto a redução de metais pesados presentes no solo contaminado, principalmente por 2 e 6% de borra oleosa ácida. Já as crescentes quantidades de contaminantes presentes no solo, reduziram significativamente o desempenho físico e químico do composto.

Kogbara *et al* (2011) trataram um solo arenoso contaminado com metais pesados e hidrocarbonetos a partir de uma mistura de cal hidratada e escória de alto forno granulada moída com dosagens de 5, 10 e 20%. A partir dos resultados dessa pesquisa pode-se concluir que a mistura de agente encapsulante reduziu significativamente a lixiviação do cádmio e do níquel, onde a dosagem de 20% se mostrou a mais efetiva. Por outro lado, os resultados de resistência à compressão simples se mostraram abaixo do esperado, alcançando o valor máximo de 800 kPa para a dosagem de 20% de agente encapsulante após 28 dias de cura.

Dessa forma, pode-se observar que grande parte dos resultados do ensaio de resistência à compressão simples foi diretamente afetada pela presença de contaminante, que reduz a resistência do solo. E os ensaios de lixiviação são afetados pelos agentes encapsulantes que, independente do tipo, reduzem a concentração de contaminante no lixiviado.

2.4.3

Comportamento Mecânico e Químico dos Solos Encapsulados

- Ensaio de Resistência à Compressão Simples

De acordo com LaGrega *et al* (2001), o ensaio de resistência à compressão simples é frequentemente utilizado para estimar a eficácia da técnica de encapsulamento. Os materiais encapsulados devem ter resistência suficiente para suportar elevadas cargas colocadas sobre eles.

LaGrega *et al* (2001) também evidenciam que a resistência à compressão simples, medida em poucos dias, não é confiável para se representar o comportamento a longo prazo de amostras encapsuladas. O autor destaca que a durabilidade do composto encapsulado interfere na resistência do material como um todo.

Segundo Szeliga (2014), quanto maior o teor de cal, maior a troca catiônica e formação de produtos cimentantes, mas não existe um teor ótimo de cal a ser adotado para todos os solos. Um estudo apresentado por Ingles & Metcalf (1972), representado na Figura 2-4, mostra que a resistência à compressão simples aumenta linearmente com a quantidade de cal até determinado momento, em que a taxa de acréscimo de resistência diminui com a quantidade de cal. Isso ocorre devido à lenta cimentação das misturas solo-cal que dependem do tipo de solo.

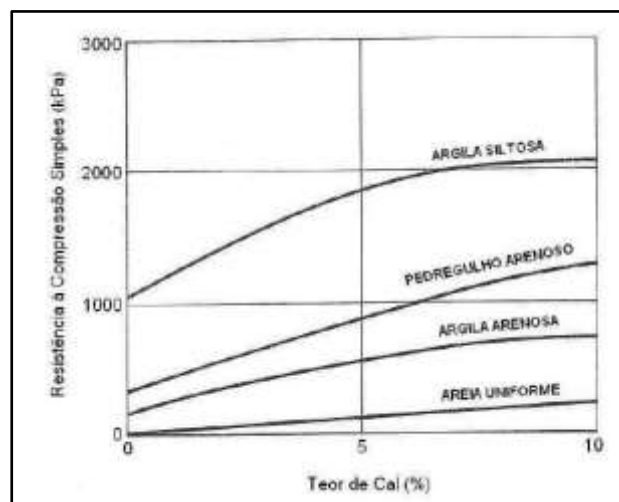


Figura 2-4: Efeito do teor de cal sobre a resistência à compressão simples para alguns solos tratados com a cal e curados por 7 dias (fonte: Ingles & Metcalf, 1972 *apud* Szeliga, 2014).

Ingles & Metcalf (1972) apresentam o mesmo estudo em relação ao cimento, como mostra a Figura 2-5. Pode-se notar que, em geral, a resistência à

compressão simples aumenta linearmente com a quantidade de cimento, mas com taxas diferentes, dependendo do tipo de solo.

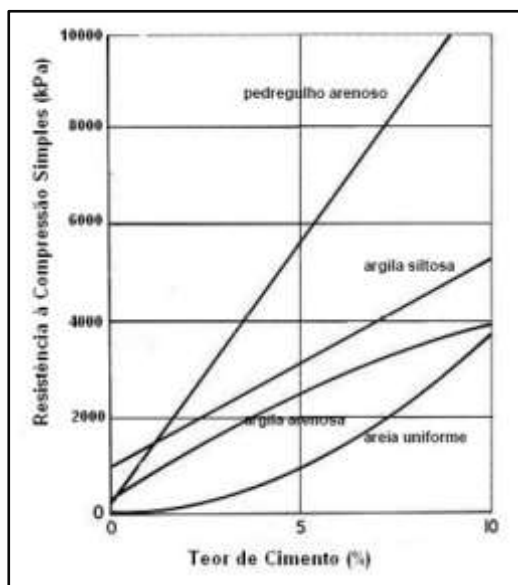


Figura 2-5: Efeito do teor de cimento sobre a resistência à compressão simples para alguns solos tratados com a cimento e curados por 7 dias (fonte: Ingles & Metcalf, 1972 *apud* Foppa, 2005).

- Ensaio de Lixiviação

O ensaio de lixiviação de um solo contaminado é essencial para determinar seus possíveis riscos ao meio ambiente (Li *et al*, 2001) e é um dos mais importantes ensaios para determinar a eficiência da aplicação da técnica de encapsulamento (Cocke, 1990).

Lixiviação pode ser definida como a extração de um componente através do fluxo de um fluido, geralmente água, através de um elemento sólido. Esta pode ser influenciada pelo pH, temperatura, complexidade dos compostos, oxidação e redução gradativa do potencial (Knop, 2003).

Segundo Li *et al* (2001), a lixiviação é o processo pelo qual os contaminantes são transferidos de uma matriz estabilizada para um meio líquido, tal como água ou outras soluções. A partir deste ensaio é possível determinar o potencial que a técnica de encapsulamento possui para conter o contaminante no solo após a inserção de um agente cimentante, como cimento ou cal. Este ensaio também é importante para classificar os contaminantes, principalmente em relação à avaliação de seus impactos ambientais reais e potenciais.

Os órgãos ambientais de cada país estabelecem testes de lixiviação com o objetivo de classificar os resíduos quanto à toxicidade e propõem recomendações e restrições quanto ao tipo de tratamento a ser empregado, quando necessário,

visando à disposição final (Silva, 2002). No Brasil, o ensaio de lixiviação mais utilizado é realizado de acordo com a norma NBR 10.005 (ABNT, 2004), que assim como muitos métodos já existentes, exigem certo tipo de agitação para estimular o contato entre o sólido e o fluido lixiviante. O fluido que percolou pelas amostras ensaiadas nessa pesquisa foi a água.

Knop (2003) cita que diversos procedimentos de lixiviação têm sido desenvolvidos para ensaiar rejeitos e solos encapsulados, entre estes está o ensaio de lixiviação em coluna, descrito na norma americana ASTM D 4874 (1995). Este método, diferente do descrito na norma brasileira, procura eliminar o efeito da solubilização e simular um maior tempo de exposição do lixiviado com a amostra. Este ensaio é considerado como um simulador de fluxo de percolação do nível de água através dos poros do material granular. No estudo realizado por Knop (2003), onde foram comparados os ensaios de lixiviação de acordo com a norma brasileira e com a norma americana, chegou-se à conclusão de que o ensaio de lixiviação em coluna se mostrou mais consistente, uma vez que simula as condições reais de campo e também é capaz de analisar duas variáveis: massa de contaminante lixiviado e volume total de fluido percolado.

Segundo Suthersan (1997 *apud* Rojas, 2007), o transporte do contaminante é influenciado por alguns fatores, tais como: composição química do contaminante, propriedades físicas, gradiente hidráulico, polaridade da solução lixiviante, condições de oxidação-redução e reações cinéticas, difusão química do contaminante com a matriz, concentração de compostos reativos e acumulação de contaminantes em solução nos poros da superfície da partícula.

3

Programa Experimental

3.1

Materiais Utilizados

Neste item são apresentados os materiais utilizados nesta pesquisa. A Figura 3-1 ilustra tais materiais: solo argiloso, cloreto de zinco, cimento e cal.



Figura 3-1: Materiais utilizados

3.1.1

Solo Argiloso

As amostras de argila utilizadas neste estudo são procedentes da encosta do Campo Experimental II da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, apresentado na Figura 3-2. O solo consiste em um solo coluvionar de tonalidade vermelho amarelado devido à presença de óxido de ferro e alumínio, como demonstra a Figura 3-3. A escolha do solo foi feita considerando o fácil acesso ao local de retirada. Além disso, existe grande quantidade de informações devido às pesquisas já realizadas na área, tais como Soares (2005); Meliande (2014); Jaramillo (2016). A amostragem do solo foi realizada a uma profundidade de 15 a

20 cm. O solo coletado passou por ensaios de caracterização realizados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio e seus resultados são apresentados no próximo capítulo.



Figura 3-2: Local de extração do solo argiloso – Campo Experimental II – PUC Rio (Soares, 2005).



Figura 3-3: Amostragem do solo

3.1.2 Contaminante

Inicialmente, o contaminante utilizado foi o zinco. Foram realizados ensaios de compactação, ensaios de resistência à compressão simples e ensaios de lixiviação adaptado ao permeâmetro para as diversas misturas. Porém, nas análises químicas dos lixiviados, não era detectada a presença de zinco, nem mesmo nas amostras que continham apenas solo e zinco.

De acordo com Sodré *et al.* (2001), os ambientes ácidos proporcionam maior mobilidade dos metais no solo, enquanto valores de pH acima de seis favorecem a retenção destes. A mobilidade dos metais pesados varia de acordo com o teor e tipo de argila, pH, capacidade de troca de cátions, teor de matéria

orgânica, entre outros. Esses fatores influenciam nas reações de adsorção/dessorção, precipitação/dissolução, complexação e oxirredução (Oliveira e Mattiazzo, 2001). Um estudo realizado por Barros *et al* (2003), indicou que os solos argilosos retêm maiores concentrações de cobre e de zinco, diminuindo as chances destes irem para o lençol freático.

Em geral, a maioria dos estudos sobre a retenção de metais pesados no solo aponta que os mecanismos de adsorção são reconhecidamente os determinantes no controle da disponibilidade e solubilidade dos metais no solo (Chang et al., 2002; Ford et al., 2001 e Ross, 1994 *apud* Tavares, 2009).

Adsorção se trata de um processo físico-químico onde há o acúmulo de uma substância numa interface, entre as fases sólido-líquido. Denomina-se adsorvato, a substância que está sendo removida da fase líquida e adsorvente, a fase sólida na qual a acumulação ocorre (Bosco, 1997 *apud* Vinhal-Freitas *et al*, 2010). A adsorção específica é de ocorrência comum entre os metais pesados, principalmente Cu, Zn, Co e Cd (Tavares, 2009).

Ao ocorrer um acidente, o zinco pode se apresentar sob diversas formas, como por exemplo, cloreto de zinco, nitrato de zinco e óxido de zinco. Ao longo do tempo, num determinado ambiente, a tendência é que o contaminante se decomponha ou seja oxidado devido à exposição ao sol e ao ar. Portanto, foi utilizado um modelo, com cloreto de zinco, pela facilidade de quantificar o quanto de zinco foi adsorvido no sistema. O cloreto de zinco foi escolhido para substituir o zinco puro e assim foi possível observar que, nessa forma, o zinco passa para a água que percola pela amostra, se tornando um potencial poluidor do lençol freático.

Em seguida são apresentadas as características do cloreto de zinco, sua influência nos comportamentos físico e químico do solo e sua utilização nas indústrias metalúrgicas. Também são apresentados acidentes que ocorreram no Brasil, em que elevadas concentrações de zinco foram encontradas em corpos hídricos e no solo.

3.1.2.1

Aspectos Gerais do Cloreto de Zinco

O cloreto de zinco utilizado nesta pesquisa foi adquirido através da empresa B'Herzog e a Tabela 3-1 apresenta as especificações do contaminante:

Tabela 3-1: Especificação do Cloreto de Zinco (fonte: B'Herzog)

ESPECIFICAÇÕES	
Dosagem.....	mín. 96,0%
Limite máximo de impurezas:	
Ferro (Fe).....	0,001%
Sulfato (So ₄).....	0,01%
Chumbo (Pb).....	0,005%

O cloreto de zinco pode ser aplicado de diversas formas, como desidratante e condensador em síntese orgânica, refinação de petróleo, aditivo alimentício, entre outros. Também pode ser utilizado em galvanoplastias, indústrias de catalisadores, metalúrgicas e indústrias de corantes. Existem diversos riscos à saúde relacionados ao contato com o cloreto de zinco:

- Quando inalado é extremamente nocivo aos tecidos das mucosas e do trato respiratório superior;
- Em caso de ingestão, pode causar irritação ou corrosão ao trato gastrointestinal, com dores abdominais, náuseas e vômitos;
- Em contato com a pele pode causar irritação severa, queimaduras e ulceração;
- Respingos de solução podem danificar os olhos;
- Contato frequente com a pele pode causar inúmeros problemas de graus variados, desde dermatites a ulcerações;
- Inalação frequente pode causar asma ocupacional.

O zinco é considerado um metal do tipo essencial e simultaneamente micro-contaminante, pois até certa concentração ele é essencial para a saúde humana, mas ao ultrapassar essa concentração, torna-se um vilão, trazendo diversos riscos à saúde. Além de também poder agir como contaminante ambiental, pois em contato com a água pode formar ácido clorídrico, se tornando um meio corrosivo para metais. O zinco contribui na formação de uma proteína que, em excesso, formam placas que se acumulam no cérebro. Este processo de neurotoxicidade é responsável pelo desenvolvimento do mal de Alzheimer (Horning, 2000 *apud* Shuqair, 2002).

3.1.2.2

Impacto Ambiental do Cloreto de Zinco

Como no princípio desta pesquisa o contaminante utilizado foi o zinco, foram escolhidos dois principais acidentes que ocorreram no Brasil, onde houve a contaminação do solo e água por zinco, para serem apresentados.

De acordo com Delmonte (2010) em 1962, a Cia Mercantil e Industrial Ingá, localizada na Baía de Sepetiba, município de Itaguaí no Rio de Janeiro, iniciou suas atividades de processamento de minério para a produção de lingotes de zinco de alta pureza. O zinco em pó consumido era de 5 a 6 sacos de 50 kg cada por hora, totalizando 6 t/dia de consumo diário. Em 1996, a Companhia era uma das três produtoras de zinco do Brasil, com capacidade total de 60mil toneladas por ano. Desde 1965 haviam denúncias de moradores devido ao lançamento de efluente inadequado. Em 1984 foi construído um dique para contenção do resíduo tóxico, que doze anos depois rompeu, contaminando a Baía de Sepetiba com altos índices de zinco e cádmio. Em 1998 houve a falência da companhia, porém foi deixado um passivo ambiental, estimou-se que cerca de 10 milhões de toneladas de zinco e cádmio haviam sido despejadas na Baía nos últimos vinte anos.

Outro acidente, mais recente, ocorreu em 2006 na unidade de zinco da Votorantim Metais localizada no município de Três Marias, Minas Gerais, onde 80 mil litros de rejeitos tóxicos, rico em metais pesados como zinco, cádmio e chumbo, vazaram após o rompimento de tubulação que leva o material da usina até uma barragem de contenção.

3.1.3

Cimento

Um dos agentes encapsulantes escolhidos para ser utilizado nesta pesquisa foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI). O material, proveniente da empresa Lafarge, é da marca Holcim. O emprego deste tipo de cimento se destaca em solos orgânicos devido ao seu maior teor de cálcio comparado aos demais, fato este que pode contrabalançar a presença de matéria orgânica (Knop, 2003).

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), a alta resistência inicial deste tipo de cimento se dá devido à utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer e devido à moagem mais fina do cimento. Portanto, ao reagir com a água, ele adquire elevada resistência mais rapidamente. A Figura 3-4 apresenta um gráfico que demonstra a evolução média da resistência à compressão dos diversos tipos de cimento Portland.

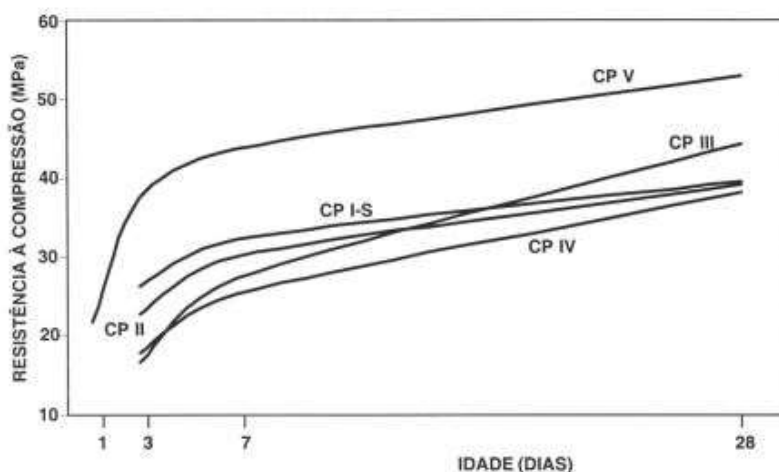


Figura 3-4: Evolução da resistência à compressão dos tipos de cimento Portland (fonte: ABCP, 1996).

A Tabela 3-2 apresenta a composição do Cimento Portland (CP V-ARI), segundo a ABCP.

Tabela 3-2: Composição do Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (fonte: ABCP, 2002).

Tipo	Sigla	Composição (% em massa)		Norma Brasileira
		Clínquer + Gesso	Material Carbonático	
Alta Resistência Inicial	CP V-ARI	100 - 95	0 - 5	NBR 5733

3.1.4 Cal

O outro agente encapsulante escolhido para esta pesquisa foi a cal hidratada calcítica, do tipo CH-III, da marca Votorantim Cimentos. De acordo com Silva (2009), a cal virgem é o principal produto da calcinação das rochas carbonatas cálcicas e cálcio-magnesianas. Na literatura brasileira e nas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é o termo utilizado para indicar o produto composto predominantemente por óxido de cálcio ou por óxido de cálcio e de

magnésio, resultantes da calcinação, à temperatura de 900-1200°C de calcários, calcários magnesianos e dolomitos.

Segundo Silva (2009), a cal hidratada é outro tipo comum de cal, encontrada em forma de pó seco, resultante da hidratação da cal virgem. É classificada, também, conforme o hidróxido predominante presente ou, melhor, de acordo com a cal virgem que lhe dá origem, em: Cal Hidratada Cálcica (alto teor de óxido de cálcio), Magnesiana e Dolomítica (baixo teor de óxido de cálcio).

3.1.5

Água

A água utilizada na preparação das misturas para realização dos ensaios foi proveniente da rede pública de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro. Já para os ensaios de caracterização física e na moldagem dos corpos-de-prova foi utilizado água destilada, conforme especificado em normas técnicas.

3.2

Métodos e Procedimentos de Ensaio

3.2.1

Ensaio de Caracterização Física

Para a determinação das propriedades índice das amostras de solo, foram realizados ensaios de caracterização física no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC – Rio. O solo foi preparado de acordo com as normas brasileiras da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT):

NBR 6457/1986 – Amostras de Solos – Preparação para Ensaios de Compactação e Caracterização;

NBR 7181/1984 – Solo – Análise Granulométrica;

NBR 6508/1984 – Solo – Determinação da densidade relativa dos grãos;

NBR 6459/1984 – Solo – Determinação do limite de liquidez;

NBR 7180/1984 – Solo – Determinação do limite de plasticidade;

3.2.1.1

Análise Granulométrica

A análise granulométrica do solo foi realizada combinando ensaios de peneiramento e de sedimentação como descrito na norma técnica NBR 7181/1984. Para a determinação da curva granulométrica do solo foram peneirados 1.000 gramas do material retido na peneira nº 40 (0,425 mm). Em seguida o material retido na peneira foi lavado e posteriormente secado em estufa a 100°C, passando pelo peneiramento grosso após 24hrs. Do material passante na peneira nº 40, utilizou-se uma parte para realizar a sedimentação. O solo foi misturado à solução de 125 ml de hexametáfosfato de sódio e deixado em repouso durante 24hrs. Após a execução da sedimentação, o solo foi lavado na peneira nº200 e o material retido foi levado à estufa. Ao secar, o material passou pelo procedimento de peneiramento fino. Os resultados da análise granulométrica do solo argiloso são apresentados no item 4.2.

3.2.1.2

Densidade Relativa dos Grãos

A determinação da densidade relativa dos grãos do solo, G_s , foi realizada de acordo com instruções da norma NBR 6508 /1984, utilizando o material passante na peneira nº 40 (0,425 mm).

Amostras de 25 gramas de solo seco em estufa foram colocadas em três picnômetros de 250 ml, onde se adicionou água até que o solo ficasse submerso. Em seguida, foi aplicado o vácuo com o objetivo de retirar todo o ar presente nos vazios do solo. Ao final, completou-se lentamente o volume restante do picnômetro com água destilada, sem que houvesse entrada de ar. Os picnômetros então foram deixados em repouso para equalizar com a temperatura ambiente. Ao equilibrar a temperatura, pesou-se o picnômetro com água e solo e em seguida o material foi descartado. Pesou-se também o picnômetro apenas com água destilada e por fim foi calculado o valor da densidade relativa dos grãos.

3.2.1.3 Limites de Atterberg

Os limites de Atterberg, limite de liquidez e limite de plasticidade, foram determinados utilizando o material passante na peneira #40. O material utilizado foi ensaiado de acordo com as normas NBR 6459/1984 e NBR 7180/1984, respectivamente.

3.2.2 Ensaio de Compactação Proctor Normal

Os ensaios de compactação proctor normal foram realizados de acordo com a NBR 7182/1986 para as misturas contendo apenas solo e a NBR 12023/1990 para as misturas que continham cimento e cal.

Os ensaios de compactação com energia proctor normal foram realizados no solo argiloso puro, nas misturas de solo com 5% e 10% de cloreto de zinco e nas misturas de solo com 5% e 10% de cloreto de zinco e 5% e 10% de cimento ou 5% e 10% de cal, isto é, no total foram realizados 11 ensaios de compactação. Os ensaios foram realizados conforme descrito nas normas NBR7182/1986 (Solo) e NBR12023/1990 (Solo-Cimento e Solo-Cal) com o objetivo de determinar a umidade ótima de compactação ($w_{ót}$) e o peso específico seco máximo ($\gamma_{dmáx}$) do solo puro e das misturas.

Após secagem do solo em estufa a 60°C, este foi destorroado e peneirado na peneira nº 4 (4,76 mm). Em seguida, adicionou-se uma determinada quantidade de água ao material, a fim de que este ficasse com cerca de 5% de umidade abaixo da umidade ótima, valor este que pode ser estimado a partir dos resultados do ensaio de limite de plasticidade. Nas misturas contendo cloreto de zinco, cimento ou cal, houve a homogeneização do material seco antes de adicionar água.

O material homogeneizado foi colocado dentro de um molde cilíndrico, dividindo o seu volume em três camadas iguais. Ao final de cada camada aplicava-se 26 golpes com um soquete pequeno, com peso de 2,5 kg a uma altura de queda de 30,5 cm. Ao finalizar as três camadas, atingiu-se uma altura maior que a do molde, devido à utilização de um anel complementar. Portanto, o material excedido é removido de forma a acertar o volume de solo em relação à altura do molde (12,7 cm). Então o peso do cilindro junto com o solo é anotado e

determina-se assim o peso específico total. O peso específico seco do material é determinado a partir da umidade média de três amostras retiradas do centro do corpo de prova e posteriormente secas na estufa. Para a construção da curva de compactação foram realizadas seis compactações por mistura com um determinado acréscimo de umidade a cada uma, obtendo-se pontos com diferentes valores de umidade e peso específico seco.

A partir do gráfico de compactação foi possível determinar os valores de umidade ótima ($w_{ótima}$) e peso específico seco máximo ($\gamma_{dmáx}$), que correspondem as coordenadas do ponto máximo da curva. Esses valores foram utilizados para moldagem dos corpos de prova utilizados nos ensaios de resistência à compressão simples e lixiviação.

3.2.3

Preparação dos corpos de prova

Para a realização dos ensaios de resistência à compressão simples, lixiviação e microscopia eletrônica de varredura (MEV), os corpos-de-prova passaram pelos processos de mistura de componentes, moldagem, acondicionamento e tempo de cura. Estas etapas estão descritas nos itens que seguem.

3.2.3.1

Mistura e Moldagem das Amostras

A partir do peso específico seco do solo ou mistura, determinado no ensaio de compactação, e do volume da amostra, obteve-se a massa do solo ou mistura seca que seria necessária para preencher o molde. Foi definido que a soma dos percentuais dos materiais secos corresponderia a 100% do peso total dos materiais sólidos (solo, cimento, cal e cloreto de zinco). A pesagem, no caso das misturas, era feita separadamente para cada camada, como mostra a Figura 3-5. Após misturar os materiais secos, adicionava-se a quantidade de água requerida de acordo com o valor de umidade ótima estabelecido no ensaio de compactação.

No caso das amostras preparadas para o ensaio de microscopia eletrônica de varredura, a mistura foi feita para apenas uma camada, pois a amostra era reduzida. A mistura dos componentes foi realizada manualmente em um recipiente de aço inox e com auxílio de espátulas. No momento de manuseio do

contaminante foram utilizadas luvas, óculos e máscara para evitar possível contaminação.



Figura 3-5 - Mistura de cada camada da moldagem

Além dos corpos-de-prova do solo argiloso puro, foram preparados corpos-de-prova para 10 misturas diferentes:

- 95% Solo + 5% ZnCl_2 ;
- 90% Solo + 10% ZnCl_2 ;
- 90% Solo + 5% ZnCl_2 + 5% Cimento;
- 85% Solo + 5% ZnCl_2 + 10% Cimento;
- 90% Solo + 5% ZnCl_2 + 5% Cal;
- 85% Solo + 5% ZnCl_2 + 10% Cal;
- 85% Solo + 10% ZnCl_2 + 5% Cimento;
- 80% Solo + 10% ZnCl_2 + 10% Cimento;
- 85% Solo + 10% ZnCl_2 + 5% Cal;
- 80% Solo + 10% ZnCl_2 + 10% Cal.

A produção dos corpos-de-prova para o ensaio de resistência à compressão simples foi realizada por compactação estática diretamente em um molde metálico bipartido com 5 cm de diâmetro e 15 cm de altura, como mostra a Figura 3-6 – A, onde a altura obtida do corpo-de-prova era de 10 cm. Os corpos-de-prova para o ensaio de lixiviação foram confeccionados em um molde metálico tripartido, como mostra a Figura 3-6 – B com 4,04 cm de diâmetro e 10 cm de altura, onde os corpos-de-prova tinham uma altura de 7,8 cm. Os procedimentos realizados foram os mesmos para ambos os ensaios.



Figura 3-6: A - Molde bipartido e soquete; B - Molde tripartido.

Após homogeneizar a mistura, esta era colocada dentro do molde e então era compactada. O topo de cada camada era escarificado a fim de que as camadas ficassem com uma maior superfície de contato. A compactação foi realizada manualmente em três camadas. A densidade dos corpos-de-prova era controlada a partir do peso de cada camada e da altura, que era marcada no próprio molde, como mostra a Figura 3-7.



Figura 3-7: Bipartido com a altura de cada camada marcada

As amostras para o MEV foram moldadas em um molde metálico, como mostra a Figura 3-8 – a com 10,15 mm de diâmetro e 28,6 mm de altura, onde os corpos de prova tinham uma altura de 10 mm, como mostra a Figura 3-8 – b. Após homogeneizar a mistura seca, acrescentava-se a água necessária para alcançar a umidade ótima da mistura. Em seguida, colocava a mistura dentro do molde e compactava-se com um compactador estático até chegar à altura necessária.

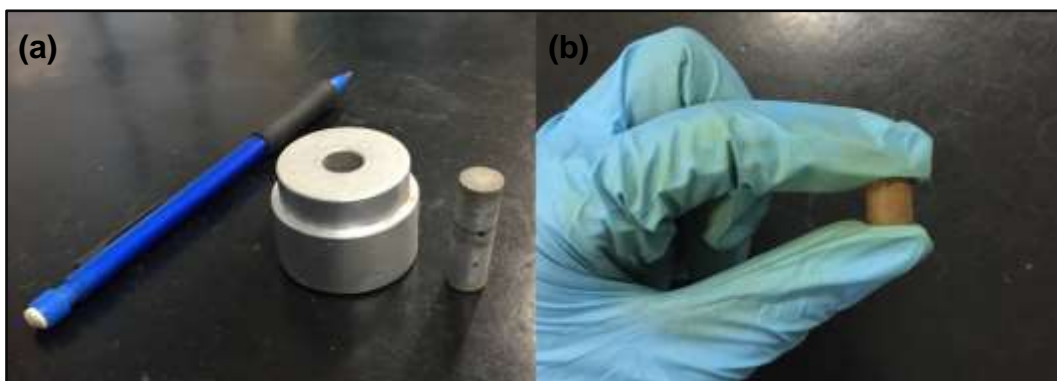


Figura 3-8: (a) molde utilizado para preparar amostras para o MEV; (b) amostra utilizada no MEV.

Após o processo de moldagem, o corpo-de-prova era retirado do molde a partir de um extrator de amostras. Em seguida, o corpo-de-prova tinha seu peso, altura e diâmetro anotados. Por fim, era embrulhado em papel filme, para evitar variações de umidade, identificado e acondicionado em um isopor, como mostra a Figura 3-9.



Figura 3-9: Acondicionamento das amostras em cura

As amostras de MEV foram retiradas do molde e em seguida quebradas ao meio para que fosse possível ver sua estrutura interna no ensaio. E então, embrulhadas em papel filme e acondicionadas no mesmo isopor até que chegasse ao tempo de cura necessário.

Os tempos de cura dos corpos-de-prova moldados com cimento ou cal para os ensaios de resistência à compressão simples foram de 0, 7, 28 e 60 dias. Como os ensaios de lixiviação eram mais longos, os corpos-de-prova permaneceram apenas 3 dias em cura. E as amostras ensaiadas no MEV e no tomógrafo permaneceram 14 e 18 dias em cura, respectivamente.

3.2.4

Ensaio de Resistência à Compressão Simples

Para os ensaios de resistência à compressão simples foram adotados os procedimentos determinados nas normas NBR 12770 (ABNT, 1992) para misturas de solo e contaminante e NBR 12025 (ABNT, 1990) para misturas que continham cimento e cal. Foram moldadas duas amostras por mistura e então os valores de tensão de ruptura foram definidos como a média dos resultados. Quando os valores dos dois ensaios eram muito diferentes, era realizado um terceiro ensaio para então fazer novamente a média. No total foram realizados 76 ensaios de resistência à compressão simples. A prensa utilizada para o ensaio é da marca Test Top, com capacidade máxima de 10 kN. E a velocidade de deformação utilizada foi de 0,4064 mm/min.

As amostras contendo cimento ou cal passaram por um período de 4 horas imersas em água, como descrito na norma, para que houvesse a saturação do corpo-de-prova. As amostras que foram moldadas e ensaiadas no mesmo dia, não suportaram a imersão de 4 horas em água. Após esse tempo, estas se desfaziam. Isso pode ser explicado, por que o cloreto de zinco é solúvel em água. Portanto, também foram feitos ensaios de 7 e 28 dias de cura sem que houvesse a imersão em água para que fosse possível comparar com os resultados de 0 dias de cura.

3.2.5

Ensaio de Lixiviação no Permeâmetro

Borges (1996) desenvolveu um equipamento no Laboratório de Geotecnia da PUC-Rio para realizar ensaios de transporte, isto é, para determinar os parâmetros de transporte de contaminante no solo (fator de retardamento, dispersão mecânica e difusão molecular). O procedimento deste ensaio é idêntico aos ensaios de permeabilidade, mas ao invés de usar água como fluido percolante, foi utilizado soro.

Portanto, para esta pesquisa, optou-se por adaptar o permeâmetro já existente no Laboratório de Geotecnia da PUC-Rio, onde foi possível aplicar o mesmo tipo de pressão, percolar água pela amostra tratada e obter o lixiviado ao final do ensaio, assim como definido na norma americana de lixiviação (ASTM D 4874). O equipamento foi adaptado de forma que fosse possível coletar o

lixiviado a partir de uma válvula. A Figura 3-10 mostra os principais componentes do sistema, bem como a interface para onde o lixiviado se acumulava após percolar pela amostra e sair pelo topo, por onde era retirado o lixiviado utilizado nas análises químicas. No total, 11 amostras com diferentes misturas de solo/contaminante, solo/contaminante/cimento e solo/contaminante/cal, além da amostra de solo puro, que serviu de referência para as outras, foram ensaiadas.

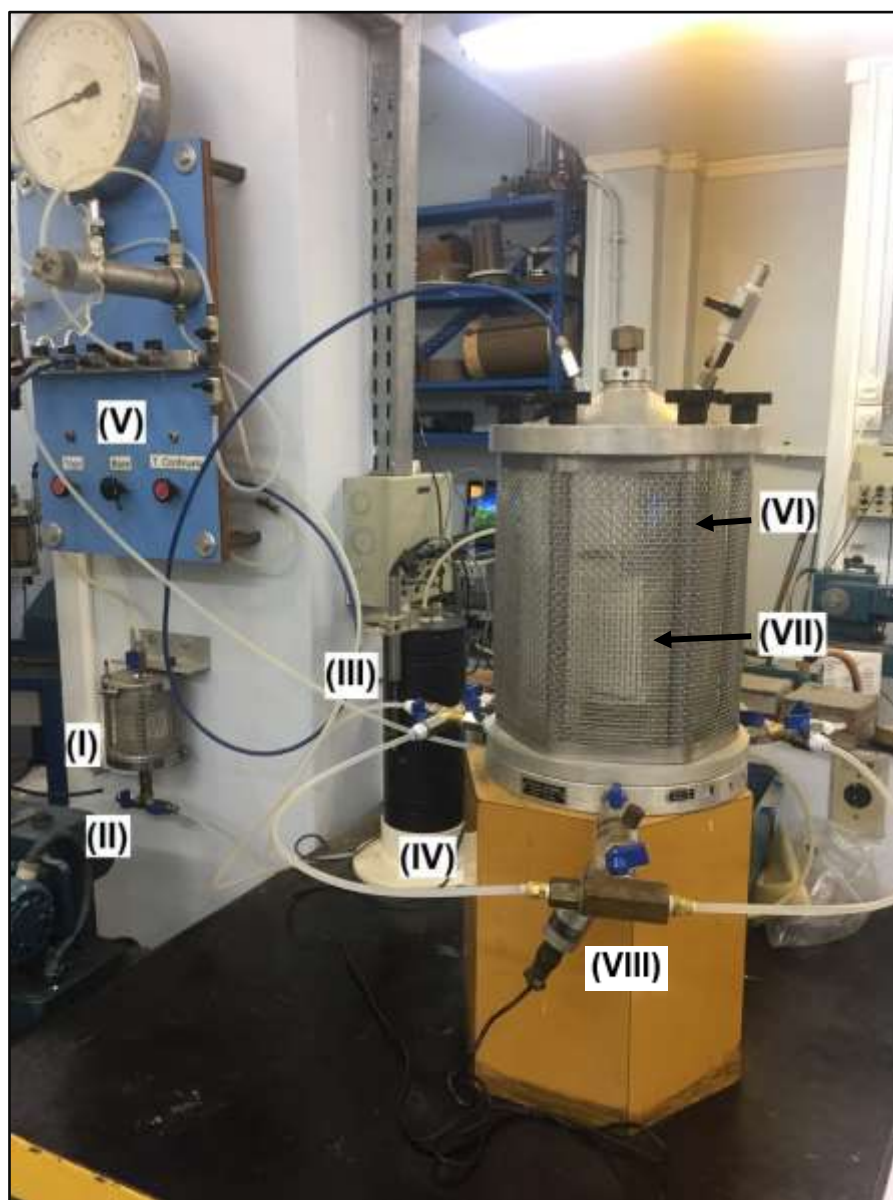


Figura 3-10: Permeâmetro: (I) Interface aonde o lixiviado era coletado; (II) Válvula por onde se retirava o lixiviado; (III) Saída do lixiviado do topo da amostra; (IV) Medidor de Variação de Volume; (V) Painel de Pressão; (VI) Câmara do Permeâmetro; (VII) Amostra; (VIII) Transdutor de pressão.

Os corpos-de-prova foram instalados no pedestal da câmara do permeâmetro com pedras porosas, previamente saturadas, e papel filtro em suas extremidades, conforme Figura 3-11 – A. Em seguida acomodava-se a membrana, aplicando

sucção entre suas paredes, e posteriormente esta era fixada com anéis de vedação, de acordo com Figura 3-11 – B.

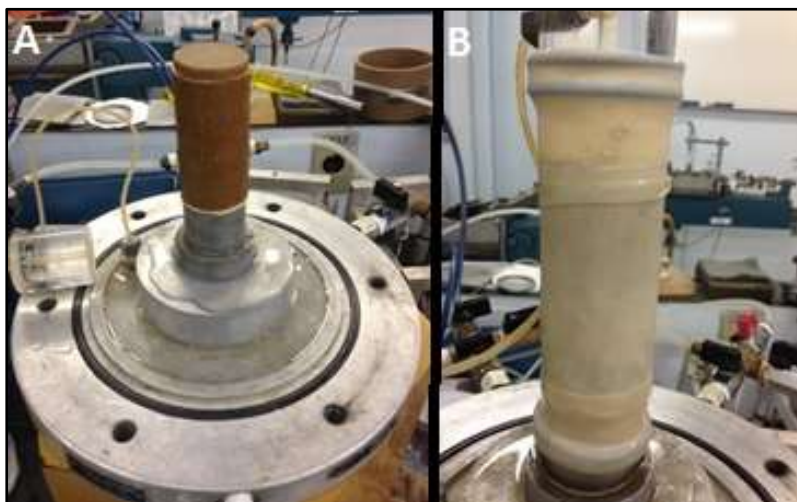


Figura 3-11: A - Amostra no pedestal com pedra porosa e papel filtro;
B - Amostra envolta por membrana.

A câmara era fechada e preenchida por água. Inicialmente, era aplicada uma pressão confinante ao corpo de prova, excedendo a contrapressão em 10 kPa, onde o fluxo de água acontecia pelo topo e pela base da amostra, com a mesma pressão. Depois, foram aplicados incrementos de tensão de 50 kPa na tensão confinante e na contra-pressão. Mantendo a diferença de 10 kPa entre as pressões. Tais incrementos foram aplicados até alcançar valores de 350-400 kPa de tensão confinante, onde começava o processo de percolação de água na amostra. Para que a percolação fosse ascendente, a pressão no topo era mantida com uma diferença de 50 kPa da pressão da base, que por sua vez, tinha o valor de menos 5 kPa em relação à tensão confinante. A base da amostra era conectada ao medidor de variação de volume, de onde vinha a água que percolava pelas amostras, e o topo a uma interface, onde era coletado o lixiviado. Após coletado, o lixiviado era entregue, no mesmo dia, ao Laboratório de Química da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro para que fossem feitas as análises químicas no lixiviado. Vale ressaltar que, o parâmetro de poropressão B, era calculado para determinar o grau de saturação da mistura.

Ao obter o resultado das análises químicas dos lixiviados coletados do ensaio realizado no permeâmetro, a mistura que teve a menor quantidade de zinco no lixiviado foi enviada para o laboratório da empresa Eurofins Anatech com o objetivo de verificar a acurácia do resultado obtido a partir de uma adaptação do

ensaio. O laboratório realizou o ensaio de lixiviação de acordo com a norma NBR 10.005 (ABNT, 2004) e os resultados são apresentados no item 4.5, a fim de comparar com os resultados obtidos no ensaio adaptado e o restante nos Apêndices A e B.

3.2.6 Análises Químicas dos Lixiviados

As análises químicas das amostras de solo, solo/contaminante, solo/contaminante/encapsulante e dos lixiviados coletados no ensaio de lixiviação adaptado ao permeâmetro foram realizadas no analisador de fluorescência de raios-X da marca Shimadzu modelo EDX-700, no Laboratório de Química da PUC-Rio, como mostra a Figura 3-12.



Figura 3-12: Equipamento utilizado nas análises químicas - Fluorescência de Raios-X.

O ensaio foi realizado conforme um documento de instrução de trabalho, preparado pelo Laboratório de Caracterização de Combustíveis da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, que descreve os procedimentos básicos de operação do equipamento de fluorescência de raios-X para as etapas de preparação do equipamento, verificação e execução de ensaios.

A fluorescência de raios-X é uma técnica não destrutiva utilizada para identificar os elementos presentes em uma amostra (análise qualitativa) e estabelecer a concentração em que cada elemento se encontra presente na amostra. A fluorescência de raios-X utiliza uma fonte de radiação de elevada energia (radiação gama ou radiação X) para excitar os átomos da substância que será analisada (Oliveira, 2011).

O átomo excitado tende, naturalmente, a retornar ao seu estado fundamental (estável), ocorrendo uma emissão de energia. Esta energia envolvida na absorção é uma característica específica de cada elemento químico, permitindo a sua identificação e correspondente quantificação. Os resultados foram apresentados em porcentagem de elementos químicos encontrados nos lixiviados.

Após coletados, os lixiviados eram identificados e entregues nos mesmos dias no laboratório em tubo cônicos, como mostra a Figura 3-13, onde estão todos os onze lixiviados entregues.



Figura 3-13: Tubos cônicos com lixiviados coletados

A análise química foi realizada duas vezes para cada amostra de lixiviado coletado para assegurar a acurácia dos resultados obtidos. Também foi realizado o ensaio de espectrometria de absorção atômica para determinar a concentração do zinco, em mg/L, de cada amostra. Dessa forma, foi possível determinar quais amostras se encontraram dentro dos padrões determinados pelas Resoluções CONAMA nº 420/2009 e nº 396/2008 e também foi possível comparar com a análise realizada no laboratório da empresa Eurofins Anatech.

O ensaio foi realizado no equipamento Analytikjena ContrAA 300 do Laboratório de Química da PUC-Rio. O preparo das amostras se deu pela coleta de 2 ml do lixiviado em um tubo falcon, em seguida adicionou-se 1 ml de HNO_3 (ácido nítrico) concentrado. Essa solução ficou em banho maria por 1 horas e após esfriar houve um aumento do volume para 10 ml. Portanto, o volume final de todas as amostras foi o mesmo.

3.2.7

Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV

Com o avanço tecnológico, a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) tornou-se um método muito promissor devido à sua capacidade de investigar a superfície de amostras em escala micrométrica ou submicrométrica, onde é possível observar, analisar e explicar corretamente os fenômenos que ocorrem nessas escalas. Para estudos na área de solos, é possível analisar não só as partículas e os vazios do solo, como também os arranjos de agregações e a microestrutura de floculação.

A microscopia eletrônica de varredura permite alcançar aumentos superiores aos da microscopia ótica. Para a análise de materiais normalmente o aumento é da ordem de 10.000 vezes. Segundo Maliska (2007), que também descreve o ensaio como um feixe de elétrons que varre a superfície da amostra e sua interação com o material analisado gera diversos tipos de sinais que são utilizados para a formação de imagens ou análise da composição da amostra. As imagens podem fornecer informações em relação à morfologia e topografia, e a composição química pode ser determinada pelo EDS (Sistema de Energia Dispersiva).

As amostras utilizadas neste ensaio permaneceram 14 dias em cura. Foram moldadas 4 amostras: (i) Solo puro; (ii) 90% Solo + 10% ZnCl_2 ; (iii) 95% Solo + 5% ZnCl_2 ; (iv) 80% Solo + 10% ZnCl_2 + 10% Cimento; (v) 85% Solo + 5% ZnCl_2 + 10% Cal. O ensaio foi realizado também no solo puro para fornecer um padrão. As misturas com cimento e cal foram escolhidas por terem alcançado o melhor resultado de lixiviação, onde menor quantidade de zinco foi encontrado. E as misturas de solo com contaminante foram definidas para que fosse possível compará-las com as que tinham presença de encapsulante.

O ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura foi realizado no Laboratório de microscopia eletrônica da PUC-Rio, no equipamento apresentado na Figura 3-14, modelo JSM-6510LV, onde foi aplicado baixo vácuo, devido à umidade das amostras.



Figura 3-14: Equipamento de Microscopia Eletrônica de Varredura

Com o objetivo de atrair elétrons para as amostras, aplicou-se emulsão de carbono na base do *stab*, que também foi envolto por fita de carbono para que as amostras ficassem fixas. A Figura 3-15 mostra as amostras já prontas e introduzidas no equipamento para serem analisadas.



Figura 3-15: Amostras no MEV

3.2.8 Tomografia

O ensaio de tomografia foi realizado no Laboratório de Microscopia Digital da PUC-Rio e teve por objetivo avaliar a estrutura das amostras e a interação entre solo puro, solo/contaminante, solo/contaminante/cal e solo/contaminante/cimento. As amostras analisadas foram previamente utilizadas no ensaio de MEV.

O equipamento utilizado neste estudo, mostrado na Figura 3-17, com o qual é possível investigar, de forma não destrutiva, o interior de amostras, é da marca ZEISS, modelo XRadia Versa 510 3D (Microscópio de raios-X). A partir dos resultados obtidos, consegue-se estudar a evolução das propriedades ao longo do tempo, além de caracterizar a microestrutura dos materiais, que neste caso, é influenciada pela adição de cal e cimento.

O funcionamento do equipamento é baseado no processamento de diversas capturas de imagens, tiradas de diferentes ângulos de uma amostra que gira em torno do seu próprio eixo, a partir de uma fonte de raios-X. As combinações de imagens obtidas e processadas pelo computador permitem obter imagens da seção transversal de áreas específicas da amostra analisada.

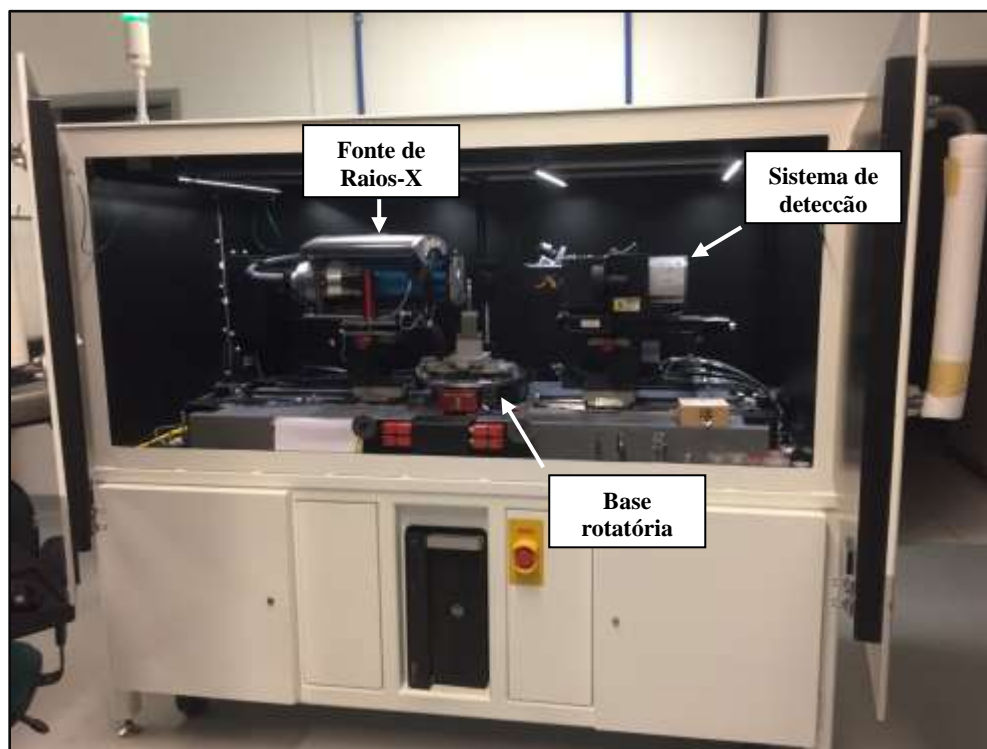


Figura 3-16: Descrição do equipamento XRadia Versa 510 3D

O equipamento permite analisar amostras com diferentes resoluções. Nesta pesquisa foram utilizadas resoluções entre 10.500 e 10.800 nm dependendo da amostra. Ao final do ensaio, as imagens capturadas foram levadas para o software Image J, onde foram reconstruídas para tirar a informação de cada sessão 2D e gerar a imagem final 3D.

O desenvolvimento do ensaio permite realizar estudos em 3 dimensões (3D) em escalas micrométricas, a fim de investigar diversos fenômenos físicos do

solo. (Baveye *et al.*, 2002; Monga *et al.*, 2007; Tippkötter *et al.*, 2009 *apud* Belchior, 2016).

O ensaio consiste em dois estágios de ampliação para atingir exclusivamente a resolução (Raad). Na primeira etapa, as imagens das amostras passam por uma ampliação geométrica. Na segunda etapa, um cintilador converte os raios-X em luz visível, que é então opticamente ampliada. As imagens são tomadas repetidas vezes e à alta velocidade, produzindo numerosas imagens para cada elemento estudado e desagregando-as por capas. Os elementos da amostra vão tomando forma nas imagens, conforme a absorção dos raios-X acontece (Aguilar, 2015).

4 Resultados e Discussões

4.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados os resultados e análises dos ensaios realizados nesta pesquisa, para as diversas misturas contendo solo argiloso, cloreto de zinco, cimento e cal. A partir dos resultados é possível visualizar o comportamento físico e químico das misturas e como a adição de diferentes concentrações de cloreto de zinco, cimento e cal influenciam na eficiência do encapsulamento e na resistência das misturas.

4.2 Caracterização Física do Solo

A curva granulométrica do solo, obtida a partir da combinação de ensaios de sedimentação e peneiramento, está ilustrada na Figura 4-1 e tem como objetivo determinar as frações constituintes do solo e classificar o material. O solo é coluvionar e, de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), este solo pode ser classificado como uma argila inorgânica de alta plasticidade (CH).

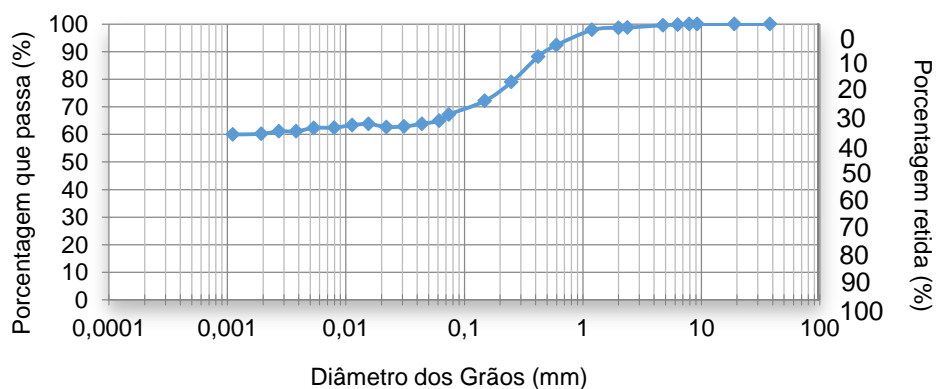


Figura 4-1: Curva Granulométrica do Solo Argiloso

A Tabela 4-1 compara os resultados dos índices físicos encontrados nesta pesquisa e em pesquisas anteriormente realizadas, para o mesmo solo. Como o solo estudado se trata de um solo coluvionar, as suas características podem variar ao longo do perfil. É possível notar que os valores de limite de liquidez e a densidade real dos grãos determinados nesta pesquisa são menores e o limite de plasticidade se encontra na faixa média em comparação com os resultados apresentados. Mas, ao final, a classificação geral do solo é a mesma, sendo uma argila inorgânica de alta plasticidade.

Tabela 4-1: Caracterização Física do solo do Campo Experimental II da PUC-Rio

Autor	Gs	LL	LP	IP	SUCS
Beneveli (2002)	2.76	56	31	25	CH
Soares (2005)	2.74	54	28	26	CH
Duran (2012)	2.72	53	39	14	CH
Jaramillo (2016)	2,72	61	33	28	CH
Perez (2017)	2,69	51,6	33,8	17,8	CH

4.3

Ensaio de Compactação Proctor Normal

O objetivo do ensaio de compactação Proctor Normal foi determinar a umidade ótima e o peso específico máximo seco, que posteriormente foram utilizados para moldar os corpos-de-prova para os diferentes ensaios desta pesquisa. Foram realizados ensaios para o solo puro, para o solo com dois teores de contaminante, 5% e 10% e para o solo com estes dois teores de contaminante e adicionando dois teores para a cal e para o cimento, 5% e 10%. Portanto, no total, foram realizados 11 ensaios de compactação.

A Figura 4-2 apresenta os resultados do ensaio de compactação para o solo puro e para o solo com contaminante. Observa-se que a adição de 5% de contaminante ao solo, provoca um aumento no valor do peso específico seco máximo, de 1,55 g/cm³ do solo puro para 1,608 kN/m³ com cloreto de zinco. E o solo com 10% de cloreto de zinco, este valor aumenta ainda mais, para peso específico de 1,729 g/cm³. Os valores de umidade ótima reduziram em relação ao

aumento da concentração de contaminante, alcançando o valor de 19,4% para o solo com 10% de contaminante. A redução da umidade ótima com o aumento da quantidade de contaminante ocorre por que o cloreto de zinco apresenta moléculas de água em sua composição.

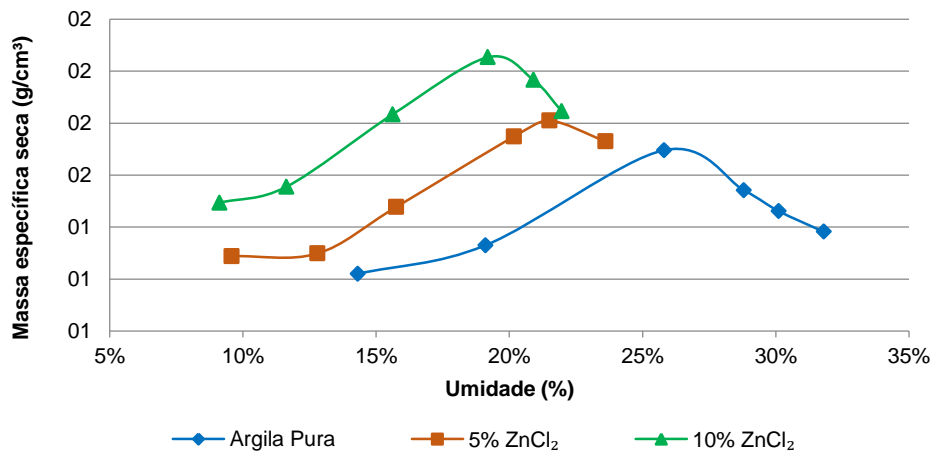


Figura 4-2: Curvas de Compactação do solo puro, solo + 5%ZnCl₂ e solo + 10%ZnCl₂

As Figura 4-3 e Figura 4-4 apresentam as curvas de compactação das misturas de solo e contaminante contendo cimento e cal, respectivamente. Da Figura 4-3, nota-se que quanto maior a concentração de cimento na mistura, menor o valor do peso específico seco máximo. Já os valores de umidade ótima tiveram uma pequena variação entre 20,6% e 23%, mas reduziram em relação à umidade ótima do solo puro, 26,3%. A partir da Figura 4-4, pode-se notar um comportamento semelhante. Quanto maior a quantidade de cal na mistura menor o peso específico seco máximo. E os valores das umidades ótimas dessas mistura também são menores que a do solo puro e não apresentam grandes variações entre si.

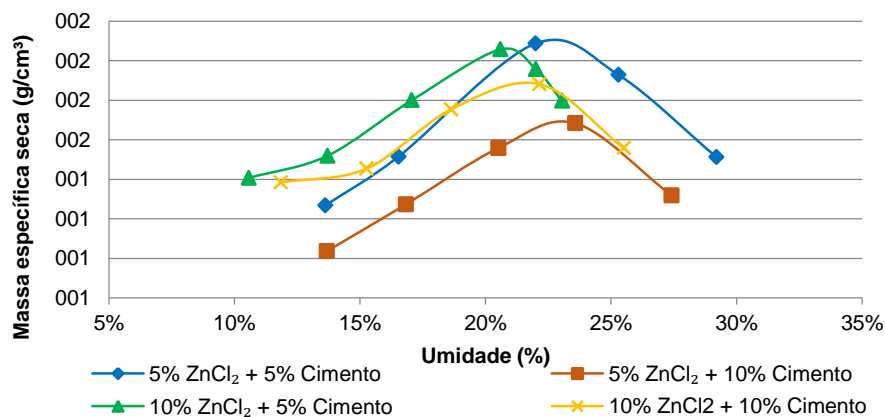


Figura 4-3: Curvas de Compactação para misturas contendo Solo, ZnCl₂ e Cimento.

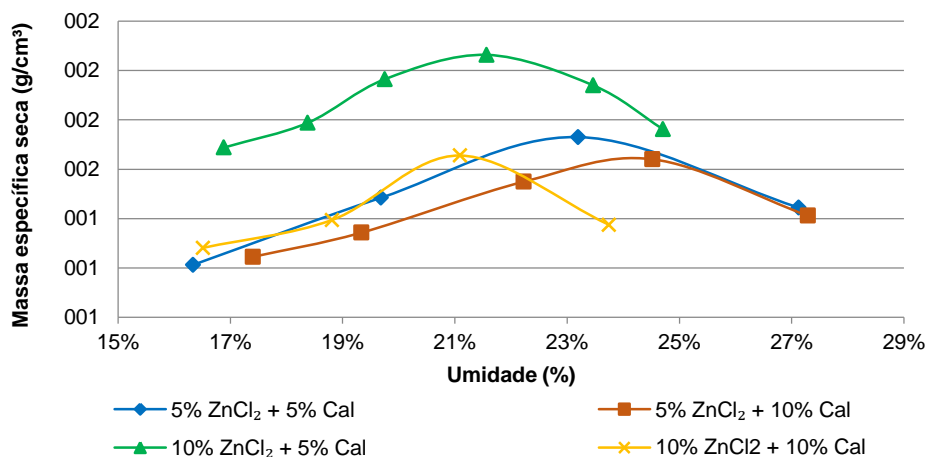


Figura 4-4: Curvas de Compactação para misturas contendo Solo, ZnCl₂ e Cal.

A Tabela 4-2 exibe os valores obtidos para umidade ótima ($w_{ótima}$) e massa específica seca máxima ($\rho_{dmáx}$) para todas as misturas.

Tabela 4-2: Resultados dos ensaios de compactação

Solo	Dosagem			Umidade ótima (%)	Massa específica seca máx (g/cm³)
	ZnCl ₂	Cimento	Cal		
100%	-	-	-	26,3	1,555
95%	5%	-	-	21,5	1,608
90%	10%	-	-	19,4	1,729
90%	5%	5%	-	22,7	1,626
85%	5%	10%	-	23,0	1,523
85%	10%	5%	-	20,6	1,615
80%	10%	10%	-	21,7	1,572
90%	5%	-	5%	23,2	1,534
85%	5%	-	10%	24,2	1,512
85%	10%	-	5%	21,5	1,616
80%	10%	-	10%	21,1	1,514

4.4

Resistência à Compressão Simples

Neste item são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples realizados com o objetivo de determinar o comportamento mecânico do solo e das misturas solo/contaminante, solo/contaminante/cimento e solo/contaminante/cal.

A Figura 4-5 apresenta a resistência à compressão simples do solo puro e do solo com duas porcentagens diferentes de cloreto de zinco. É possível notar que a presença do contaminante diminui muito a resistência do solo e que, quanto maior a concentração de contaminante, menor é a resistência do solo.

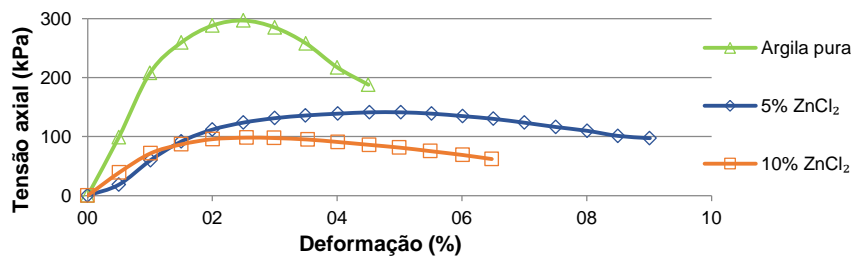


Figura 4-5: Resistência à Compressão Simples para solo puro e solo contaminado

Nos itens a seguir são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples para misturas contendo cimento e cal.

4.4.1 Misturas com Cimento

Foram realizados ensaios de resistência à compressão simples para quatro misturas diferentes contendo cloreto de zinco e cimento: (a) 5% $ZnCl_2$ + 5% de cimento, (a) 5% $ZnCl_2$ + 10% de cimento, (c) 10% $ZnCl_2$ + 5% de cimento e (d) 10% $ZnCl_2$ + 10% de cimento. As Figura 4-6 (a; b; c; d) apresentam a resistência à compressão simples de cada mistura, para 7, 28 e 60 dias de cura. Os resultados demonstram que todas as misturas com cimento obtiveram um mesmo comportamento, que indica que quanto maior o tempo de cura, maior a resistência da mistura. As amostras ensaiadas em 60 dias de cura se mostraram mais rígidas, com maior resistência de pico e menor queda pós-pico.

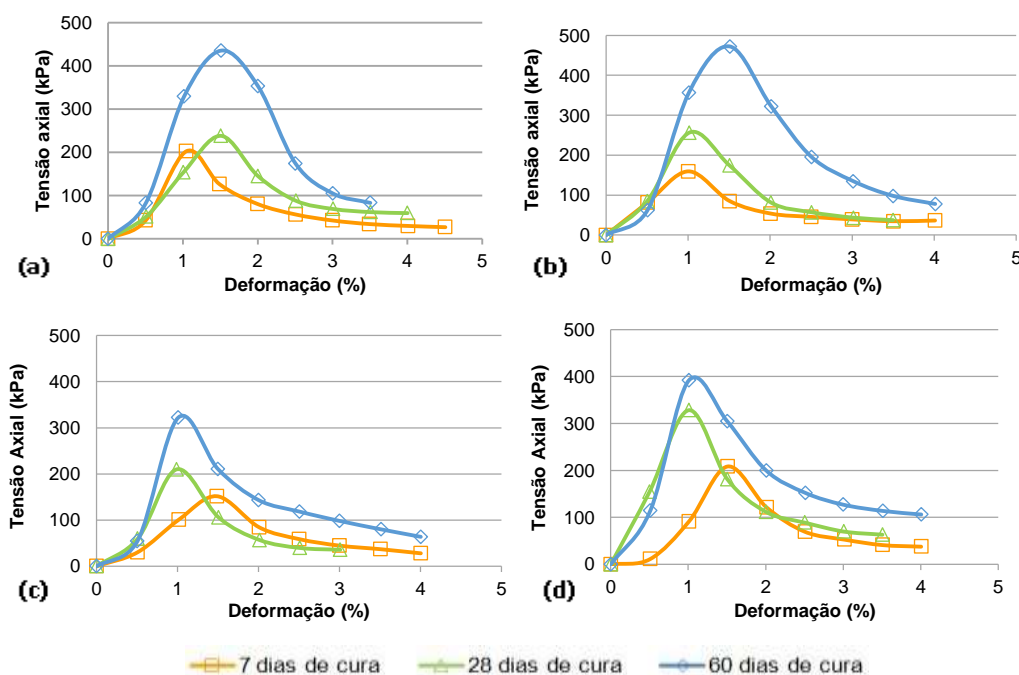


Figura 4-6: Resistência à Compressão Simples para concentrações de (a) 5% $ZnCl_2$ + 5% cimento; (b) 5% $ZnCl_2$ + 10% cimento; (c) 10% $ZnCl_2$ + 5% cimento; (d) 10% $ZnCl_2$ + 10% cimento.

As Figura 4-7 (a; b; c) apresentam os mesmos resultados das Figuras 4-6 a cima, porém por outra perspectiva. Neste caso, cada figura apresenta os resultados de resistência à compressão simples de todas as misturas contendo cimento para cada tempo de cura. Ressalta-se que a mistura 10% ZnCl_2 + 10% de cimento apresentou maior resistência para 7 e 28 dias de cura, enquanto para 60 dias de cura a mistura 5% ZnCl_2 + 10% de cimento se mostrou mais resistente. E, como já era de se esperar, para os três tempos de cura, a mistura 10% ZnCl_2 + 5% de cimento se mostrou a menos resistente.

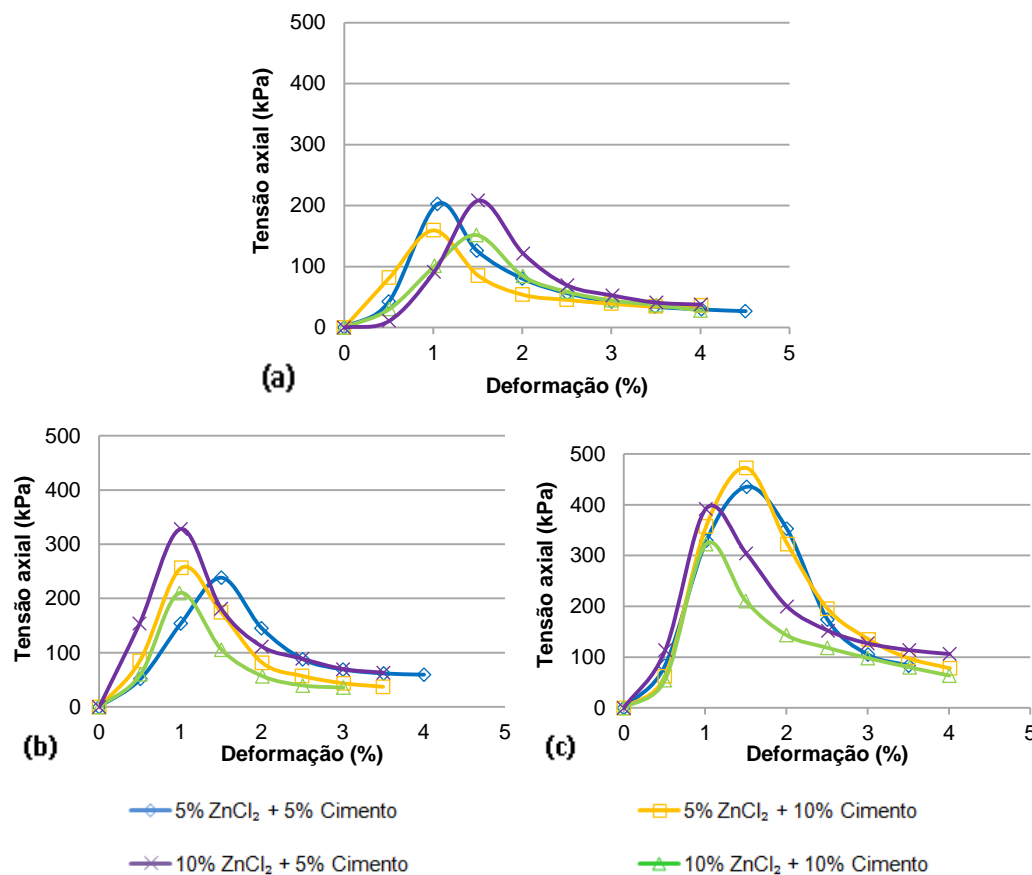


Figura 4-7: Resistência à Compressão Simples de misturas com cimento para: (a) 7; (b) 28; (c) 60 dias de cura.

As amostras ensaiadas em zero dia de cura não suportaram ser imersas 4 horas em água antes do ensaio, pois se desfaziam. Portanto, foram realizados ensaios de 7 e 28 dias de cura sem imersão, apenas para a mistura de 10% ZnCl_2 + 10% de cimento, para que fosse possível comparar. A Figura 4-8 apresenta os resultados desses ensaios, onde se pode notar que a resistência aumenta muito quando os corpos-de-prova não permaneceram 4 horas imersos em água. Essa imersão em água tem por objetivo submeter o corpo-de-prova a um estado crítico de saturação, representando uma situação de alto nível de lençol freático. Junto a

esses valores, estão os resultados dos ensaios para a argila pura e para a mistura de 10% ZnCl_2 . Como se pode observar, a resistência à compressão simples da mistura de 10% ZnCl_2 + 10% de cimento em zero dia de cura é a mesma que para a argila pura, mas em 7 e 28 dias essa resistência aumenta.

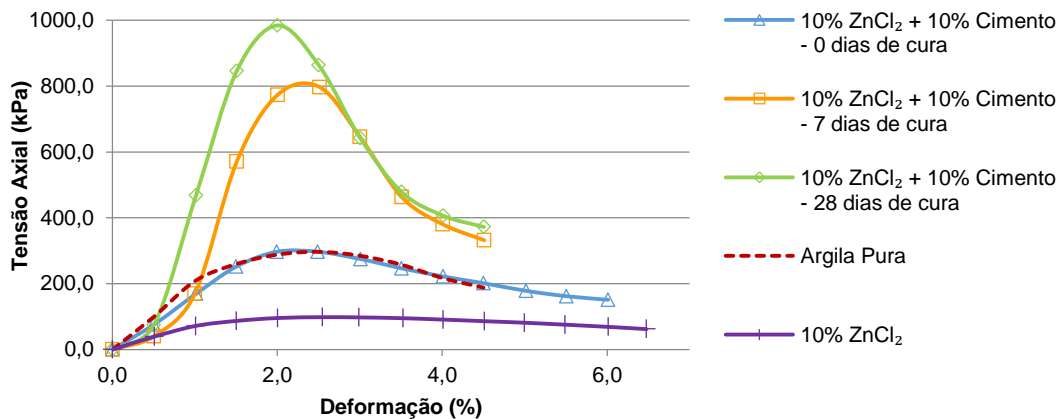


Figura 4-8: Resistência à Compressão Simples sem imersão, para 10% ZnCl_2 + 10% de Cimento (0, 7 e 28 dias de cura), Argila Pura e 10% ZnCl_2 .

Um motivo para a baixa resistência em 0 dias de cura, pode estar relacionado com o calor liberado pela hidratação do cimento nos minutos iniciais da mistura, podendo levar ao aparecimento de fissuras de origem térmica.

Ao final dos ensaios de resistência à compressão simples, notou-se que os corpos-de-prova ensaiados em 0 dias de cura tiveram planos de ruptura bem definidos, se comportando como dois blocos rígidos deslizando-se um sobre o outro, como mostra a Figura 4-9 (a). Também foi possível notar que os planos de ruptura para cada tempo de cura tiveram um comportamento diferente. Quanto maior o tempo de cura, mais vertical o plano de ruptura, de acordo com a Figura 4-9. Para os corpos-de-prova ensaiados em 0 e 7 dias de cura, observou-se que a concentração de contaminante influenciou na direção dos planos de ruptura, onde quanto maior a porcentagem de cloreto de zinco, mais inclinada era a fissura, independente da quantidade de cimento. Essa influência direta do contaminante na direção do plano de ruptura também foi observada por Knop (2003). Nas amostras ensaiadas em 28 dias de cura isso não aconteceu, todas as fissuras ficaram na vertical, assim como se comportam as rochas ao sofrerem ruptura, e o corpo-de-prova também sofreu um aumento de volume lateral.

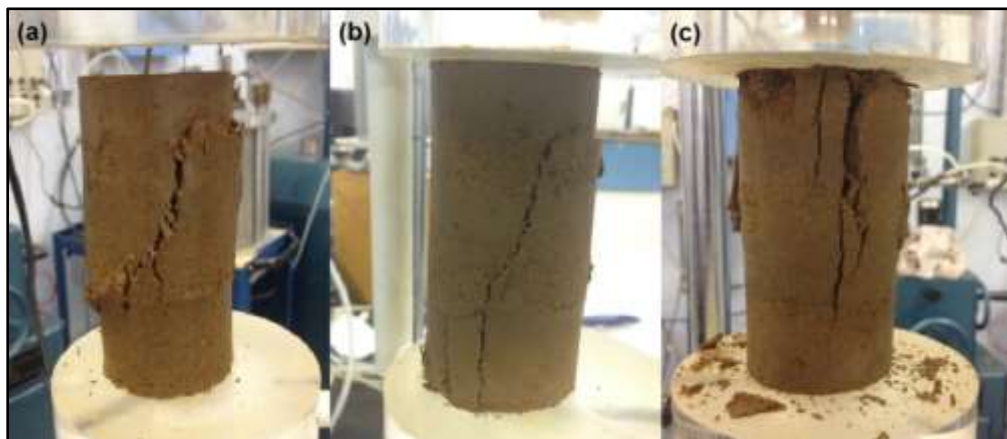


Figura 4-9: Planos de ruptura: (a) 10% ZnCl_2 + 5% de cimento, 0 dias de cura; (b) 5% ZnCl_2 + 10% de cimento, 7 dias de cura; (c) 5% ZnCl_2 + 10% de cimento, 28 dias de cura.

4.4.2 Misturas com Cal

Os ensaios de resistência à compressão simples para as misturas contendo cloreto de zinco e cal seguiram os mesmos padrões que os das misturas de cimento. Foram ensaiadas quatro misturas distintas: (i) 5% ZnCl_2 + 5% de cal, (ii) 5% ZnCl_2 + 10% de cal, (iii) 10% ZnCl_2 + 5% de cal e (iv) 10% ZnCl_2 + 10% de cal. As Figura 4-10 (a; b; c; d) apresentam a resistência à compressão simples de cada mistura para 7, 28 e 60 dias de cura. A partir dos resultados, observa-se que apesar da resistência aumentar de acordo com o tempo de cura, esse aumento não foi significativo como aconteceu no comportamento das misturas contendo cimento. Isso se deve ao fato de que o cloreto de zinco reage com a cal presente nessas misturas.

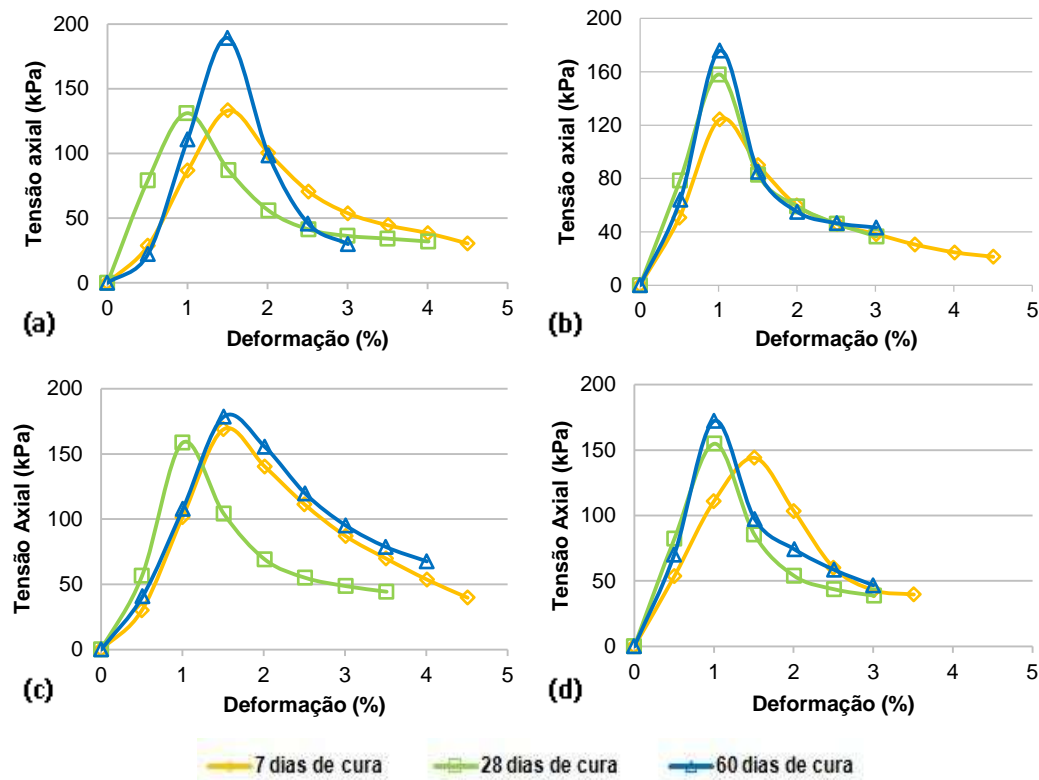


Figura 4-10: Resistência à Compressão Simples para concentrações de (a) 5% $ZnCl_2$ + 5% cal; (b) 5% $ZnCl_2$ + 10% cal; (c) 10% $ZnCl_2$ + 5% cal; (d) 10% $ZnCl_2$ + 10% cal.

Na Figura 4-11 são expostos os mesmos resultados apresentados na Figura 4.10, mas em outro formato. Assim como foi mostrado nos resultados das misturas contendo cimento, as Figura 4-11 (a; b; c) apresentam os resultados de resistência à compressão simples das misturas contendo cal em cada tempo de cura. Os resultados variaram muito de acordo com cada mistura. Para 7 dias de cura, a mistura de 10% $ZnCl_2$ + 5% de cal mostrou ser a mais resistente, enquanto em 60 dias de cura a mistura mais resistente foi a de 5% $ZnCl_2$ + 5% de cal. Já em 28 dias de cura, os resultados foram muito parecidos, com exceção da mistura de 5% $ZnCl_2$ + 5% de cal que se mostrou menos resistente.

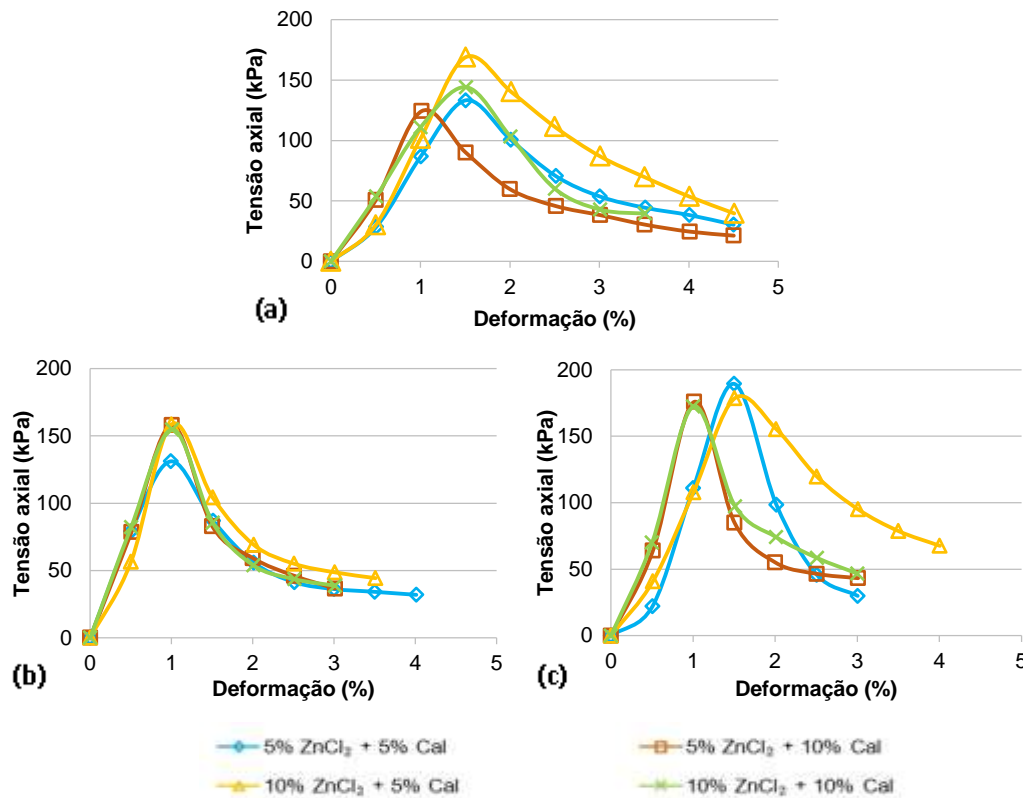


Figura 4-11: Resistência à Compressão Simples de misturas com cal para: (a) 7; (b) 28; (c) 60 dias de cura.

As amostras contendo cal também não aguentaram ficar imersas 4 horas em água, assim como as amostras de cimento. Foram escolhidas as mesmas concentrações de cloreto de zinco e cal para fazer os ensaios de 7 e 28 dias de cura sem imersão. A Figura 4-12 apresenta as resistências das amostras ensaiadas sem imersão de 10% ZnCl_2 + 10% de cal para 0, 7 e 28 dias de cura, para a amostra de argila pura e para a amostra de 10% ZnCl_2 . Assim como os resultados com cimento, os resultados com cal mostram que quanto maior o tempo de cura, maior a resistência e que para 0 dia de cura, a resistência é semelhante à da argila pura.

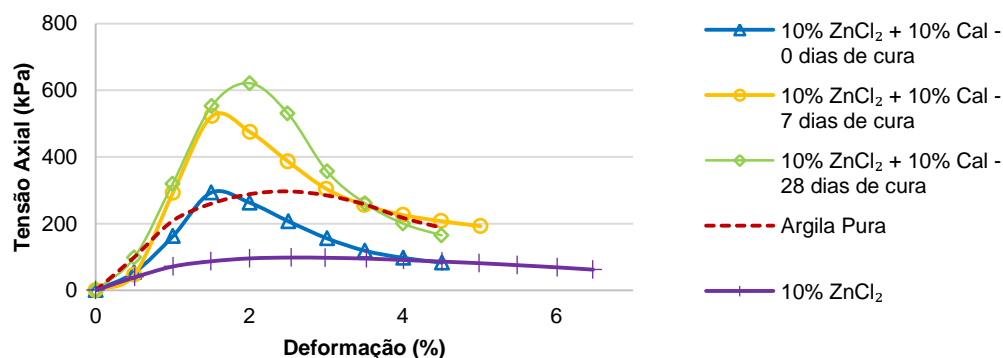


Figura 4-12: Resistência à Compressão Simples, sem imersão, para 10% ZnCl_2 + 10% de Cal (0, 7 e 28 dias de cura), argila pura e 10% ZnCl_2 .

Existem dois modos de ruptura, a frágil e a dúctil. A ruptura frágil se caracteriza por uma queda brusca na resistência e apresenta plano de ruptura bem definidos. Este tipo de ruptura é característica de materiais muito rígidos como areias densas, argilas fortemente pré-adensadas e solos cimentados. Já a ruptura dúctil não apresenta uma queda significativa de resistência e nem planos de ruptura bem definidos. E esse tipo de ruptura é característico de areias fofas e argilas moles.

As amostras contendo cal tiveram planos de ruptura bem definidos, como mostra a Figura 4-13. Nos corpos-de-prova ensaiados com cal, a concentração do contaminante não influenciou na direção do plano de ruptura das amostras, como aconteceu nas amostras com cimento. Os planos de ruptura para cada tempo de cura, independente da quantidade de agente cimentante e de contaminante, tiveram o mesmo comportamento. Assim como nas misturas com cimento, quanto maior o tempo de cura, menor a inclinação das fissuras.

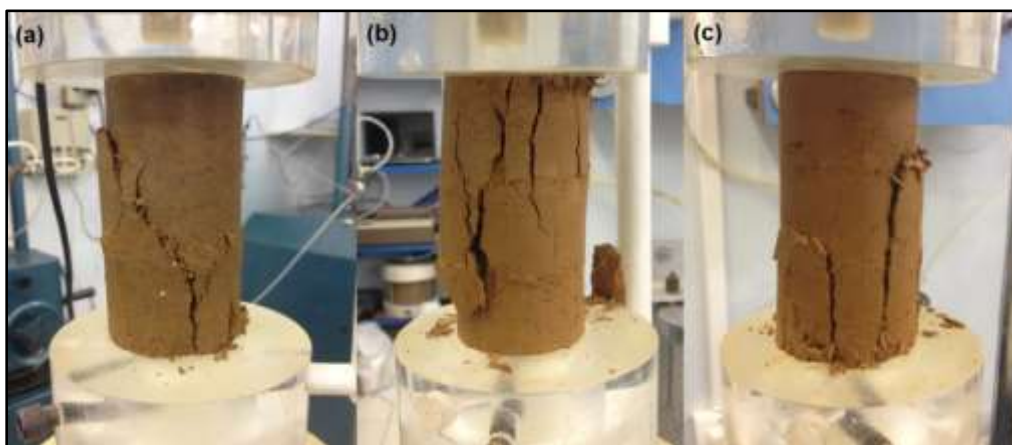


Figura 4-13: Planos de ruptura: (a) 10% ZnCl_2 + 5% de cal, 0 dias de cura; (b) 5% ZnCl_2 + 10% de cal, 7 dias de cura; (c) 5% ZnCl_2 + 5% de cal, 28 dias de cura.

4.5 Análise Química dos Lixiviados

Neste item são apresentados inicialmente os resultados das análises químicas das misturas de solo, solo/contaminante, solo/contaminante/cimento e solo/contaminante/cal. Em seguida são apresentadas algumas considerações sobre o ensaio de lixiviação adaptado ao permeâmetro e os resultados das análises químicas dos lixiviados coletados neste ensaio. Estes resultados são importantes para assegurar a eficiência da técnica de encapsulamento para um solo contaminado com cloreto de zinco.

A Tabela 4-3 apresenta os resultados das análises químicas dos materiais utilizados nessa pesquisa e das misturas estudadas, onde foram entregues amostras de 2 g para cada mistura. A partir desses resultados, já é possível observar que quanto maior a quantidade de agente encapsulante (cal e cimento) menor é a quantidade de zinco presente. Também é notável a redução da quantidade de ferro, alumínio e silício, elementos que proporcionam resistência ao solo, nas misturas contendo cloreto de zinco, cal e cimento. O cloro, presente em maior quantidade na amostra de cloreto de zinco puro, está presente também apenas nas amostras contendo cloreto de zinco e 5% de cal.

Tabela 4-3: Resultado das análises químicas das misturas

Elem	Solo Puro	ZnCl ₂ Puro	Cal Pura	Cim Puro	95% Solo + 5% ZnCl ₂	90% Solo + 10% ZnCl ₂	90% Solo + 5% ZnCl ₂ + 5% Cim
Fe	43,2	ND	0,5	5,3	38,5	40,0	38,4
Al	25,8	ND	ND	1,5	27,2	28,2	19,7
Si	25,2	ND	ND	3,3	22,3	24,3	16,3
Ti	3,7	ND	ND	0,3	3,7	3,9	3,7
Zn	ND	74,4	ND	ND	6,6	1,6	0,9
Ca	ND	0,2	86,7	87,4	ND	ND	18,8
Cl	ND	25,1	ND	ND	ND	ND	ND
Mg	ND	ND	11,5	ND	ND	ND	ND
Elem	85% Solo + 5% ZnCl ₂ + 10% Cim	85% Solo + 10% ZnCl ₂ + 5% Cim	80% Solo + 10% ZnCl ₂ + 10% Cim	90% Solo + 5% ZnCl ₂ + 5% Cal	85% Solo + 5% ZnCl ₂ + 10% Cal	85% Solo + 10% ZnCl ₂ + 5% Cal	80% Solo + 10% ZnCl ₂ + 10% Cal
Fe	31,3	37,1	28,6	34,0	33,1	30,6	31,6
Al	14,6	21,1	12,5	22,0	17,4	20,5	12,2
Si	12,6	18,6	10,9	18,2	14,7	16,9	9,5
Ti	3,3	3,7	3,0	3,5	3,6	3,0	3,2
Zn	0,4	1,2	0,5	8,2	5,9	13,8	0,6
Ca	35,9	16,4	42,4	8,9	21,2	10,1	35,6
Cl	ND	ND	ND	3,5	ND	4,2	ND
Mg	ND	ND	ND	ND	3,4	ND	6,1

ND: não detectado

No total foram realizados 11 ensaios de lixiviação adaptados ao permeâmetro. O tempo de cura para as amostras que continham cimento ou cal foi de 3 dias, devido ao longo tempo de duração do ensaio. O ensaio também foi realizado em uma amostra contendo apenas solo para fins de comparação com as amostras contendo contaminante, cimento e cal. O tempo de coleta do lixiviado para cada ensaio variou de acordo com as misturas. Foi adotado que a coleta seria feita a partir do momento em que o volume extraído de lixiviado fosse significativo para realizar as análises químicas.

A partir da Figura 4-14, percebe-se que o lixiviado da amostra que continha 10% de cloreto de zinco apresentou uma coloração amarelada e turva, diferente da amostra de solo puro. E o lixiviado da amostra que continha 10% de cloreto de zinco e 5% de cimento retornou à transparência semelhante ao lixiviado do solo puro, o que significa que a presença do cimento altera o comportamento do cloreto de zinco.

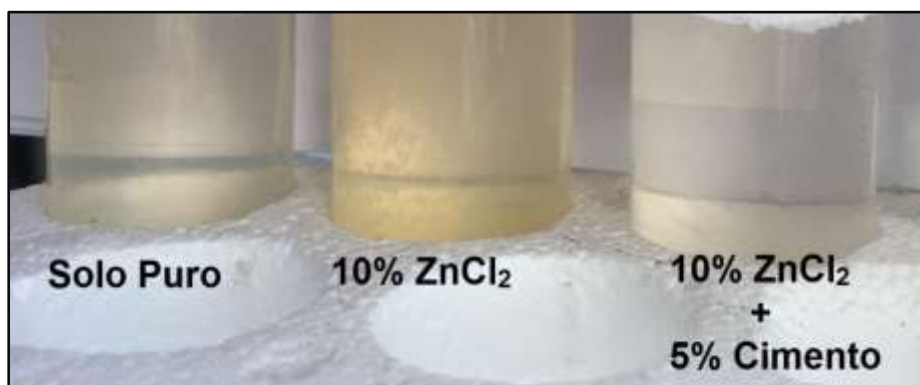


Figura 4-14: Aparência das amostras de lixiviados

Após a coleta do lixiviado no permeâmetro, as amostras foram enviadas para o laboratório de química da PUC-Rio, onde foram feitas análises no equipamento de Fluorescência em Raios-X para determinar quais elementos estavam presentes nas amostras. Os lixiviados coletados da amostra que continha apenas solo e das amostras de solo e contaminante foram adotados como níveis de referência para interpretar os dados obtidos nas outras amostras.

A Tabela 4-4 apresenta os resultados obtidos nas análises químicas das amostras submetidas ao ensaio de lixiviação adaptado ao permeâmetro. Nota-se que a quantidade de zinco encontrada nos lixiviados das misturas de solo com contaminante foram elevadas. Já na presença de agentes encapsulantes, essa concentração reduziu significativamente. A mistura contendo 5% de contaminante e 5% de cimento teve uma redução de 78,9% de zinco em relação à mistura contendo apenas 5% de contaminante, isto é, sem a adição de agente encapsulante. Já a mistura contendo 5% cloreto de zinco e 5% de cal teve uma redução de 98,2% de zinco em relação a mistura de solo contaminado com 5% de cloreto de zinco.

Tabela 4-4: Resultados das análises químicas dos lixiviados (%)

Elemento	Solo Puro	5% ZnCl ₂	10% ZnCl ₂	5% ZnCl ₂ + 5% Cim	5% ZnCl ₂ + 10% Cim	10% ZnCl ₂ + 5% Cim	10% ZnCl ₂ + 10% Cim	5% ZnCl ₂ + 5% Cal	5% ZnCl ₂ + 10% Cal	10% ZnCl ₂ + 5% Cal	10% ZnCl ₂ + 10% Cal
Zinco	ND	73,9	72,2	15,6	1,3	35,0	0,6	1,3	ND	37,0	2,0
Cloro	ND	22,9	26,8	28,5	27,8	29,3	28,4	42,7	31,4	36,9	46,3
Cálcio	ND	0,9	0,8	55,6	70,1	34,2	69,5	49,2	67,0	24,8	49,8
Enxofre	0,7	1,4	0,2	0,2	0,2	0,8	0,6	0,2	1,0	0,7	1,1
Ferro	43,2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Alumínio	25,8	ND	ND	ND	ND	0,4	0,4	ND	ND	ND	0,8
Silício	25,2	0,8	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,6	0,5	ND

ND: não detectado

Observa-se que, no caso das misturas contendo cimento, quanto maior a quantidade de cimento, maior é a eficiência do encapsulamento, pois a quantidade de zinco reduziu significativamente nas misturas contendo 10% de cimento. O mesmo pode ser notado para as misturas contendo cal.

A mistura mais eficiente contendo cimento foi a de 10% ZnCl₂ + 10% cimento, onde foi detectado 0,6% de zinco. Já a mistura contendo 5% de contaminante e 10% de cal foi a única que não detectou a presença de zinco no lixiviado, sendo assim a mais eficiente em relação às misturas estudadas nesta pesquisa.

A reação do cloreto de zinco com a cal produz cloreto de cálcio e óxido de zinco ($\text{ZnCl}_2 + \text{CaO} \longrightarrow \text{ZnO} + \text{CaCl}_2$), por isso nos lixiviados das misturas contendo cal a porcentagem de cloro se encontra mais elevada.

Os resultados obtidos neste ensaio estão em porcentagem, onde é feita a proporção dos elementos presentes na amostra. Sendo assim, não é possível comparar com os valores determinados pelas Resoluções CONAMA e nem com o resultado do ensaio realizado no laboratório da empresa Eurofins Anatech. Dessa forma, um ensaio de espectrometria de absorção atômica foi realizado para detecção da concentração de zinco nos lixiviados.

A Tabela 4-5 apresenta os valores em mg/L de zinco encontrada no novo ensaio. Nota-se que esses resultados estão condizentes com os do ensaio realizado no equipamento de fluorescência de raios-x, onde as misturas que tiveram maior concentração de zinco no lixiviado continuaram sendo as mesmas e as que tiveram menor concentração também.

Tabela 4-5: Ensaio de espectrometria de absorção atômica

Mistura	Zn (mg/L)
5% ZnCl ₂	21110
10% ZnCl ₂	53060
5% ZnCl ₂ + 5% Cim	1550
5% ZnCl ₂ + 10% Cim	26
10% ZnCl ₂ + 5% Cim	10000
10% ZnCl ₂ + 10% Cim	15
5% ZnCl ₂ + 5% Cal	60
5% ZnCl ₂ + 10% Cal	12
10% ZnCl ₂ + 5% Cal	12000
10% ZnCl ₂ + 10% Cal	90

A Figura 4-15 apresenta a comparação dos valores da concentração de zinco obtidos no ensaio de espectrometria de absorção atômica, em mg/L, com os valores de intervenção ou investigação definidos pelas seguintes Resoluções:

- Resolução CONAMA nº 420/2009 – Dispõe sobre critérios e valores orientadores e 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. Desta Resolução foi retirado o valor orientador de investigação para água subterrânea.
- Resolução CONAMA nº 396/2008 – Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Desta Resolução foi retirado o valor máximo permitido para o uso da água subterrânea para consumo humano.

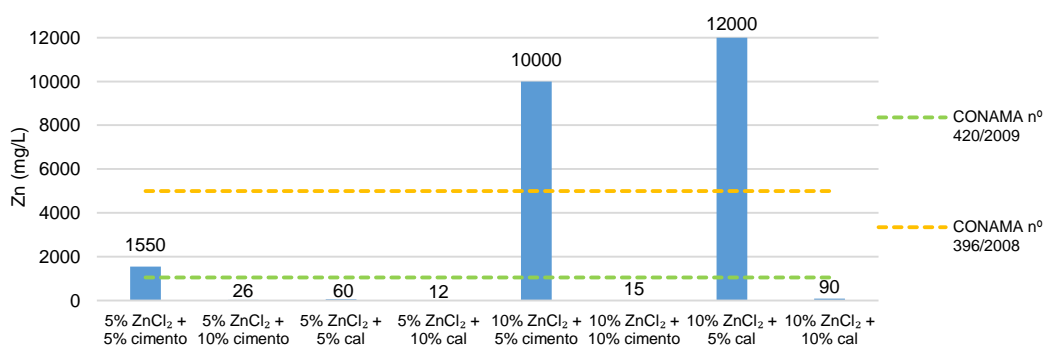


Figura 4-15: Gráfico de comparação entre os valores de concentração de zinco encontrados nas análises químicas do lixiviado e os valores definidos nas Resoluções CONAMA.

A Resolução CONAMA nº 420/2009 determina que o valor orientador para que haja investigação da água subterrânea é de 1050 mg/L. Esse valor foi atendido por cinco misturas, das quais quatro apresentam maior concentração de agente encapsulante. Já o valor máximo permitido para consumo humano definido pela Resolução CONAMA nº 396/2008, 5.000 mg/L de zinco, foi atendido por 6 misturas. Nota-se que as das misturas que não atendem nenhuma das Resoluções, apresentam a maior quantidade de contaminante e a menor quantidade de encapsulante.

A mistura que teve a menor quantidade de zinco no lixiviado, isto é, a mistura de 5% ZnCl_2 + 10% de cal foi enviada para o laboratório da empresa Eurofins Anatech, onde foi realizado o ensaio de lixiviação conforme a norma NBR 10.005 (ABNT, 2004), com o objetivo de verificar a acurácia do resultado obtido a partir de uma adaptação do ensaio de lixiviação.

A Tabela 4-6 mostra a comparação entre a quantidade de zinco encontrada no ensaio de espectrometria realizada no lixiviado coletado no permeâmetro e no ensaio de lixiviação realizado conforme NBR 10.005 (ABNT, 2004). Nota-se uma discrepância nos valores de cada ensaio, possivelmente pela diferença dos métodos de análise utilizados. Apesar da concentração de zinco encontrada pela empresa ser maior que a encontrada na análise de espectrometria, este valor ainda se encontra abaixo dos limites determinados pelas Resoluções CONAMA. A diferença dos valores de zinco encontrados se deve ao fato das duas técnicas utilizadas apresentarem diferentes métodos de obtenção de lixiviado, onde no método utilizado pela empresa, a superfície de contato entre o solo e contaminante é maior, o que pode explicar a concentração de zinco mais elevada no lixiviado.

Tabela 4-6: Comparação entre a quantidade de zinco encontrada no ensaio de lixiviação no permeâmetro e no ensaio de lixiviação realizado de acordo com a NBR 10.005

5% ZnCl_2 + 10% de cal	
Ensaio	Zinco (mg/L)
Ensaio de lixiviação no permeâmetro	12
Ensaio de Lixiviação (NBR 10.005, 2004)	460

4.6

Análise global dos resultados

A partir dos resultados obtidos, observou-se que a resistência à compressão simples de um solo contaminado está diretamente ligada a três fatores: a quantidade de agente cimentante adicionada, a quantidade de contaminante presente e o tempo de cura. Esses fatores são analisados separadamente nos itens a seguir. Juntamente é analisada a influência da adição de cal e cimento nos resultados das análises químicas dos lixiviados.

4.6.1

Influência da adição de cimento

A adição de cimento foi significativa para o ganho de resistência à compressão simples das misturas que antes continham apenas solo e contaminante. Notou-se também que as maiores resistências foram alcançadas para as misturas que continham maior concentração de cimento. Esses mesmos comportamentos também foram encontrados em outros trabalhos consultados (Knop, 2003; Junior, 2007; Rojas, 2009). Vale ressaltar que o tipo de cimento empregado na produção das amostras foi um cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI), que possui uma dosagem diferente de calcário e argila no clínquer e um grão mais fino, aumentando a velocidade no ganho de resistência.

A partir dos resultados, mostrados na Tabela 4-7, pode-se notar que, no geral, para mesmas concentrações de contaminante e diferentes concentrações de cimento, tem-se um aumento na resistência com o aumento do tempo de cura e também para a maior porcentagem de cimento. Também é notável que a presença do cloreto de zinco afeta a resistência que normalmente o cimento proporciona, pois para diferentes concentrações de contaminante e mesmas concentrações de cimento, em geral, a resistência diminui quando se tem uma maior porcentagem de contaminante.

Tabela 4-7: Resistência à Compressão Simples das misturas contendo cimento.

Tempo de cura (dias)	5% ZnCl_2 + 5% cimento (kPa)	5% ZnCl_2 + 10% cimento (kPa)	10% ZnCl_2 + 5% cimento (kPa)	10% ZnCl_2 + 10% cimento (kPa)
7	202,6	159,4	151,7	208,3
28	238,2	256,5	210,1	328,2
60	435,3	472,3	322,4	391,6

Em relação à análise química dos resultados de lixiviação, as misturas contendo maior concentração de cimento se mostraram mais eficientes para reduzir a concentração de zinco, até mesmo a mistura com 10% de cloreto de zinco. A partir da Figura 4-16 é possível notar que as amostras sem cimento apresentaram uma quantidade de zinco muito elevado em relação às amostras que foram tratadas com cimento.

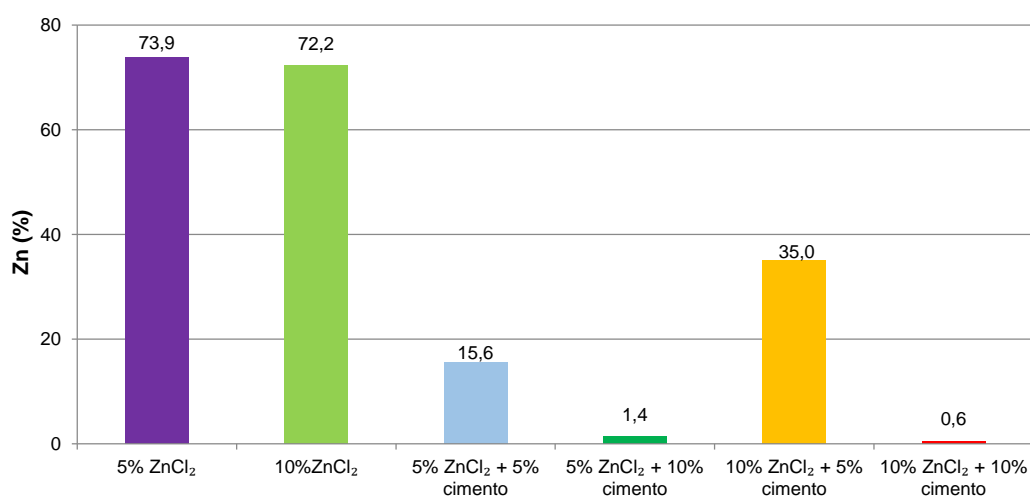


Figura 4-16: Porcentagem de Zinco lixiviado nas misturas contendo cimento

4.6.2 Influência da adição de cal

Assim como no caso das misturas contendo cimento, a inserção da cal nas misturas de solo com contaminante acarretou um aumento significativo na resistência à compressão simples, como reportado em diversos trabalhos consultados (Junior 2007; Saldanha, 2014; Dalla Rosa, 2009). Por outro lado, as resistências das amostras com cal se mostraram inferiores às amostras com cimento. Porém, também deve-se considerar a presença do contaminante, que pode gerar reações químicas adversas ao ganho de resistência.

Nesta pesquisa, as resistências mais elevadas foram para as misturas contendo 5% de cal e não para as que continham 10%. Isso pode ser explicado a partir da Figura 4-17, onde Ingles & Metcalf (1972) explicam que, em geral, a resistência à compressão simples aumenta linearmente com a quantidade de cal até certo nível, normalmente 8% para solos argilosos. A partir deste ponto, a taxa de acréscimo de resistência diminui com a quantidade de cal, pois as misturas solo-cal apresentam uma cimentação lenta que depende do tipo de solo.

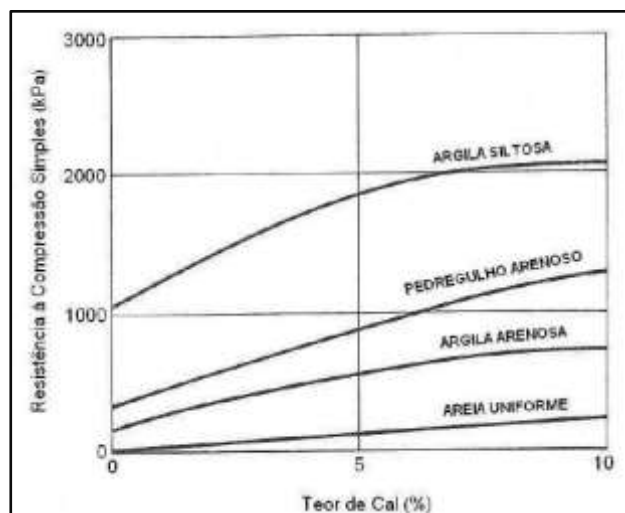


Figura 4-17: Efeito da quantidade de cal sobre a resistência à compressão simples para alguns solos tratados com cal e curados por 7 dias (fonte: adaptado de Ingles & Metcalf, 1972 *apud* Dalla Rosa, 2009).

Já Herrin e Mitchell (1961, *apud* Dalla Rosa, 2009) afirmaram que não há, aparentemente, um teor ótimo de cal, que produza a máxima resistência em um solo estabilizado. Eles abordaram que o teor e o tipo de cal, o tipo de solo, o peso específico, o tempo e tipo de cura, são os principais fatores que influenciam a resistência de misturas de solo e cal.

A partir das análises químicas dos lixiviados, pode-se notar que o trabalho da cal como encapsulante, foi diretamente afetado pela concentração de contaminante. As misturas de solo/contaminante/cal mais eficientes, isto é, que mais reduziram a concentração de zinco no lixiviado, foram as misturas que continham 5% ou 10% de cal com apenas 5% de cloreto de zinco, como mostra a Figura 4-18. As misturas que continham 10% de cloreto de zinco foram as que apresentaram maior concentração de zinco no lixiviado, principalmente a mistura que continha apenas 5% de cal.

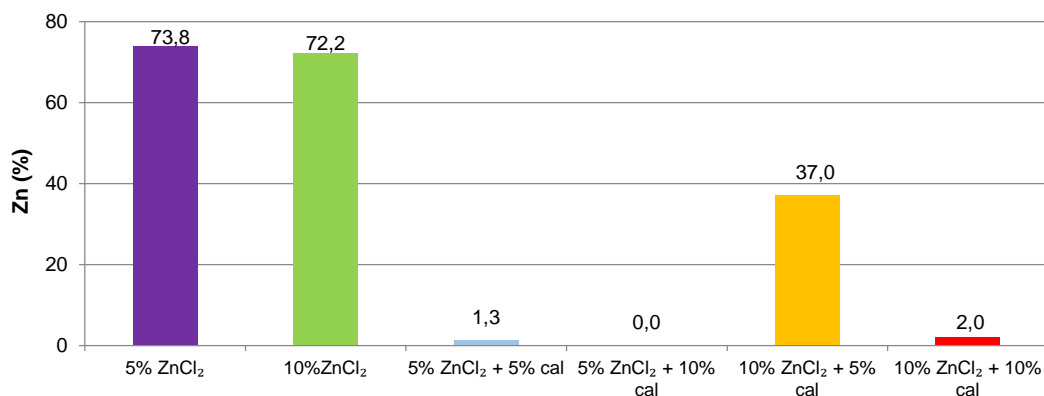


Figura 4-18: Porcentagem de Zinco lixiviado nas misturas contendo cal

4.6.3 Influência do tempo de cura

Em relação à influência do tempo de cura na resistência à compressão simples das misturas, as Figuras 4-19 e 4-20 apresentam os valores de q_u variando de acordo com os tempos de cura de 7, 28 e 60 dias. Sendo a primeira para misturas contendo cimento e a segunda para misturas contendo cal. A partir da Figura 4-19 verifica-se que independente da mistura, quanto maior o tempo de cura, maior a resistência. A mistura de 5% ZnCl₂ + 10% de cimento foi a que ganhou mais resistência ao longo dos tempos de cura, se tornando a mais resistente ao final de 60 dias de cura, chegando à 472 kPa. E a mistura de 10% ZnCl₂ + 10% de cimento, que inicialmente era a mais resistente, se tornou menos resistente após 60 dias de cura. Também é possível notar que a mistura de 10% ZnCl₂ + 5% de cimento foi a menos resistente desde o princípio.

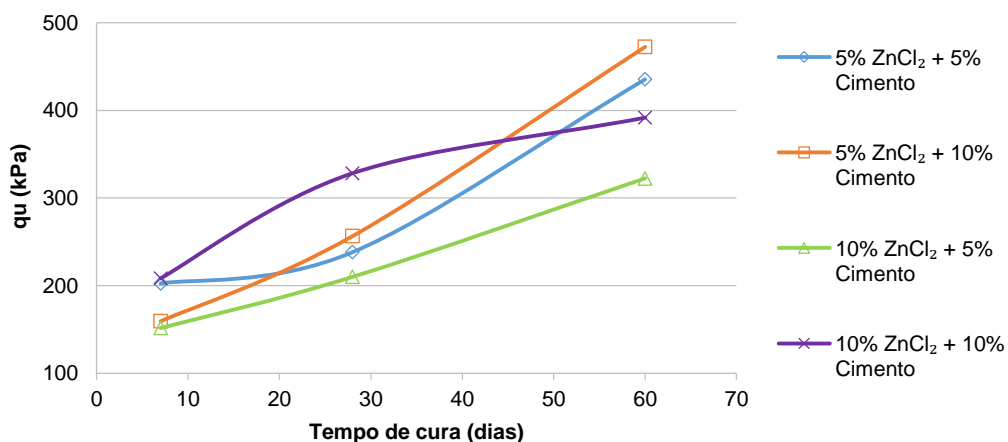


Figura 4-19: Resistência à compressão simples x Tempo de cura para misturas com cimento

Já nas misturas contendo cal, o comportamento foi diferente, como mostra a Figura 4-20. A mistura de 5% ZnCl_2 + 5% de cal foi a que teve um maior ganho de resistência ao longo do tempo de cura, apesar de ter perdido um pouco de resistência entre 7 e 28 dias de cura, no final dos 60 dias se tornou a mistura mais resistente, alcançando 189 kPa. A mistura de 10% ZnCl_2 + 5% de cal iniciou com uma resistência elevada aos 7 dias de cura, depois perdeu um pouco de resistência em 28 dias e em 60 dias a resistência foi recuperada. Pode-se notar que ao final de 60 dias de cura, as resistências à compressão simples das misturas ficaram muito parecidas.

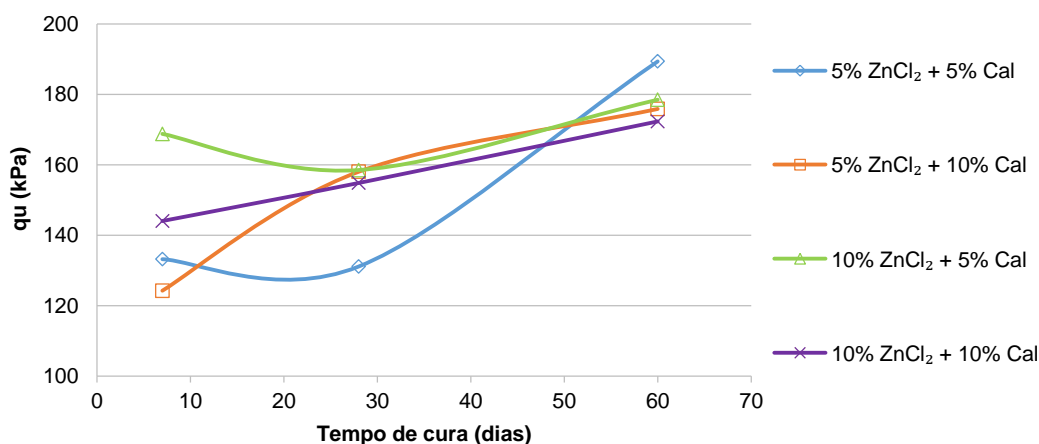


Figura 4-20: Resistência à compressão simples x Tempo de cura para misturas com cal

Nesta pesquisa, as resistências das misturas contendo cal não apresentaram variações significativas assim como as que continham cimento. Isso pode ter ocorrido devido às reações da cal com o cloreto de zinco ao longo do tempo, mas também pode ter ocorrido, de alguma forma, o impedimento das reações pozolânicas ou a quantidade de cal foi insuficiente para cimentar as partículas. De acordo com Thomé (1994) as reações pozolânicas podem ser impedidas por três fatores independentes ou conjuntos: falta de água, temperatura de cura muito baixa ou teor de cal insuficiente. A falta de água pode ser descartada, pois todas as amostras foram moldadas de acordo com a umidade ótima de cada mistura obtida nos ensaios de compactação e era em torno de 23%. Em relação à temperatura, Anday (1963, *apud* Thomé, 1994) cita que as reações diminuem de intensidade a temperaturas em torno de 16°C e cessam completamente abaixo de 4°C. E no caso desta pesquisa, as amostras foram moldadas e curadas em temperatura ambiente, isto é, em torno de 25°C. Portanto, é possível que a quantidade de cal tenha sido

insuficiente para que as reações pozolânicas continuassem a ocorrer ao longo do tempo de cura.

4.6.4 Comparação entre cimento e cal

O comportamento das misturas contendo cimento e cal se mostrou muito controverso em relação ao ensaio de resistência à compressão simples. Enquanto as amostras que continham cimento ganhavam resistência ao longo dos tempos de cura, as amostras contendo cal perderam resistência. Todavia, inicialmente, para 0 dias de cura, a maioria das misturas com cal se mostraram mais resistentes em relação às de cimento, como mostra a Figura 4-21 – a. E a partir dos 7 dias de cura, esse comportamento foi se alternando, onde apenas uma mistura de cal ficou com resistência mais elevada que duas misturas contendo cimento, como mostra a Figura 4-21 – b.

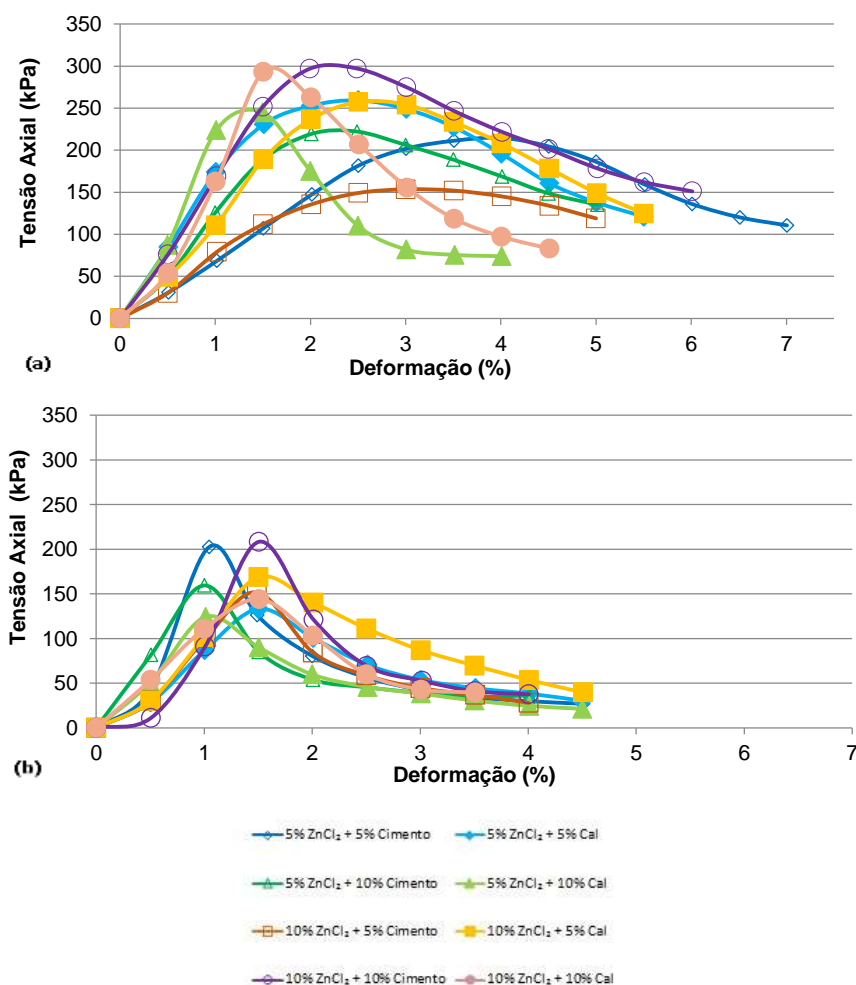


Figura 4-21: Resistência à Compressão Simples para misturas com cimento e cal para (a) 0 dias de cura e (b) 7 dias de cura.

Diferente de 0 e 7 dias de cura, a partir dos 28 dias de cura, nota-se que as misturas contendo cimento se tornam cada vez mais resistentes e as misturas com cal começam a perder ou estabilizar a resistência, como mostra a Figura 4-22 – a. Em 60 dias de cura, a diferença de resistência à compressão simples entre as misturas contendo cal e cimento se torna mais evidente, como apresenta a Figura 4-22 – b. As misturas com cal, mesmo apresentando uma baixa resistência ao final de 60 dias de cura, ainda é mais resistente do que o solo contaminado sem a adição de agente cimentante.

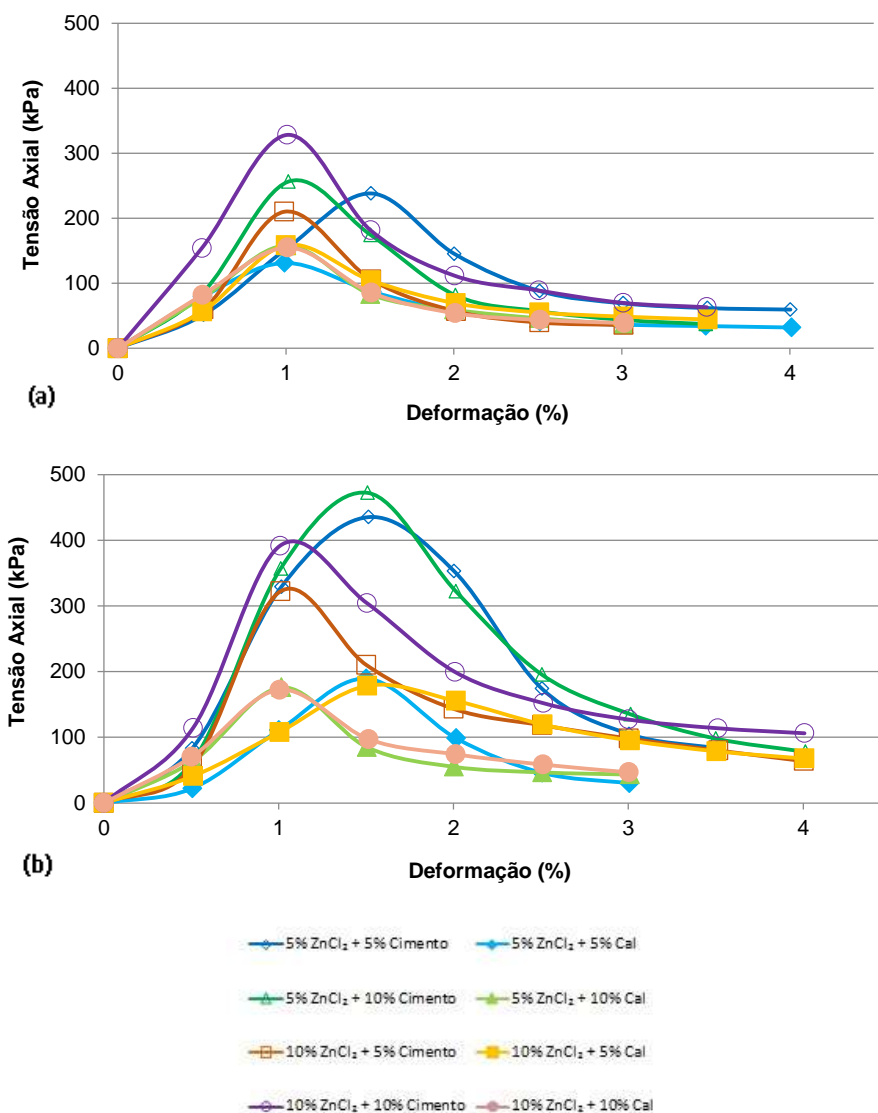


Figura 4-22: Resistência à Compressão Simples para misturas com cimento e cal para (a) 28 dias de cura e (b) 60 dias de cura.

Nos resultados da análise química dos lixiviados, o comportamento das misturas contendo cal foi similar ao das misturas contendo cimento. A partir da Figura 4-23 pode-se notar que para as misturas com maior porcentagem de

contaminante e menor porcentagem de agente encapsulante, houve uma maior concentração de zinco encontrada no lixiviado. Além disso, as misturas contendo cimento foram mais eficientes que as misturas de cal para as amostras que apresentavam 10% de cloreto de zinco. E o oposto para as amostras que continham 5% de cloreto de zinco.

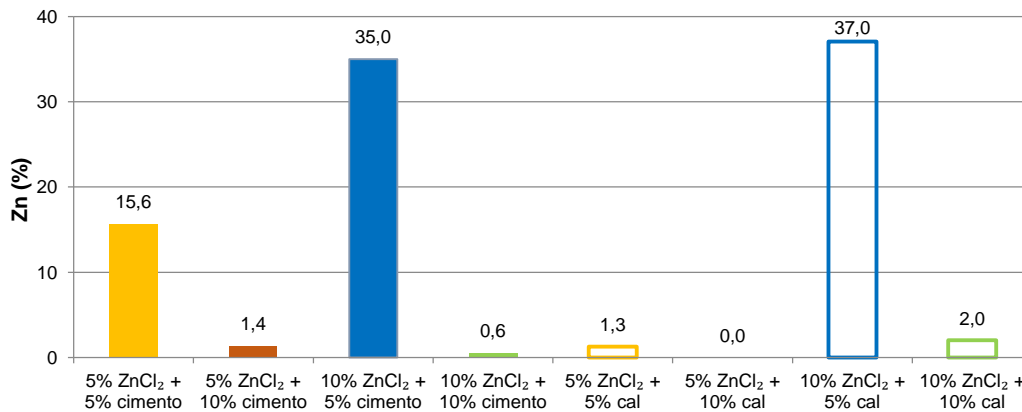


Figura 4-23: Porcentagens de Zinco após ensaio de lixiviação das misturas contendo cimento e cal.

4.7 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizada para observar a disposição geral da matriz do solo, a disposição da microestrutura na presença de cloreto de zinco e a microestrutura das misturas com adição de cal e cimento. Além disso, o equipamento permitiu obter espectros EDS (Sistema de Energia Dispersiva) para uma análise elementar qualitativa em determinadas áreas selecionadas, a fim de analisar a distribuição de elementos químicos.

As amostras utilizadas para fazer o ensaio permaneceram 14 dias em cura. As Figuras 4-24 (a; b; c; d; e; f) apresentam as cinco misturas analisadas: (i) Solo puro; (ii) Solo + 5% ZnCl₂; (iii) Solo + 10% ZnCl₂; (iv) Solo + 5% ZnCl₂ + 10% Cal; (v) Solo + 10% ZnCl₂ + 10% Cimento. Essas misturas contendo cal e cimento foram escolhidas, por terem melhores resultados no ensaio de lixiviação, isto é, apresentou menos quantidade de zinco no lixiviado analisado em relação às outras misturas.

A partir das Figura 4-24 (a) e (b) apresentadas, é possível notar que a estrutura do solo puro se trata de uma matriz mais densa, onde os brumos se encontram bem conectadas, com poucos vazios entre elas. Esse tipo de estrutura

torna o solo mais resistente, diferentes das imagens vistas das misturas de solo com contaminante. Na presença do contaminante, Figura 4-24 (c) e (e) observa-se que os vazios do solo se encontram mais evidentes, o que explica a menor resistência encontrada para esse tipo de mistura nos ensaios de resistência à compressão simples.

Na presença de cal e cimento, Figura 4-24 (d) e (f), a matriz do solo formou pequenos aglomerados, principalmente na mistura contendo cimento. Isso pode ter ocorrido devido às reações pozolânicas que geram a floculação e cimentação da estrutura do solo em partículas de argila. A floculação é um mecanismo que aumenta a resistência do solo e diminui a sua expansão (Belchior, 2016). Essa estrutura não só torna o solo mais rígido, como também nos mostra que houve o encapsulamento do contaminante.

A Figura 4-25, apresenta a matriz da mistura contendo 10% ZnCl_2 + 10% Cimento com uma aproximação de 100x, onde pode-se observar a formação de uma estrutura laminar. De acordo com Braga (2002), a hidratação do cimento se dá em dois estágios, sendo que no primeiro ocorre a formação de uma membrana protetora na superfície das partículas de silicato de cálcio e no segundo, após a cura inicial, observa-se nos grãos de cimento o crescimento de fibrilas, que se irradiam por todo o espaço intersticial. Desta forma, ocorre um aumento do comprimento e do número de fibrilas, que gradualmente começam a emaranhar-se uma com as outras e, quando cessa o seu crescimento, elas começam a unir-se lateralmente formando lâminas contínuas do material. Essa matriz fibrilar incorpora os agregados e/ou resíduos adicionados na massa sólida monolítica, tornando a mistura mais resistente.

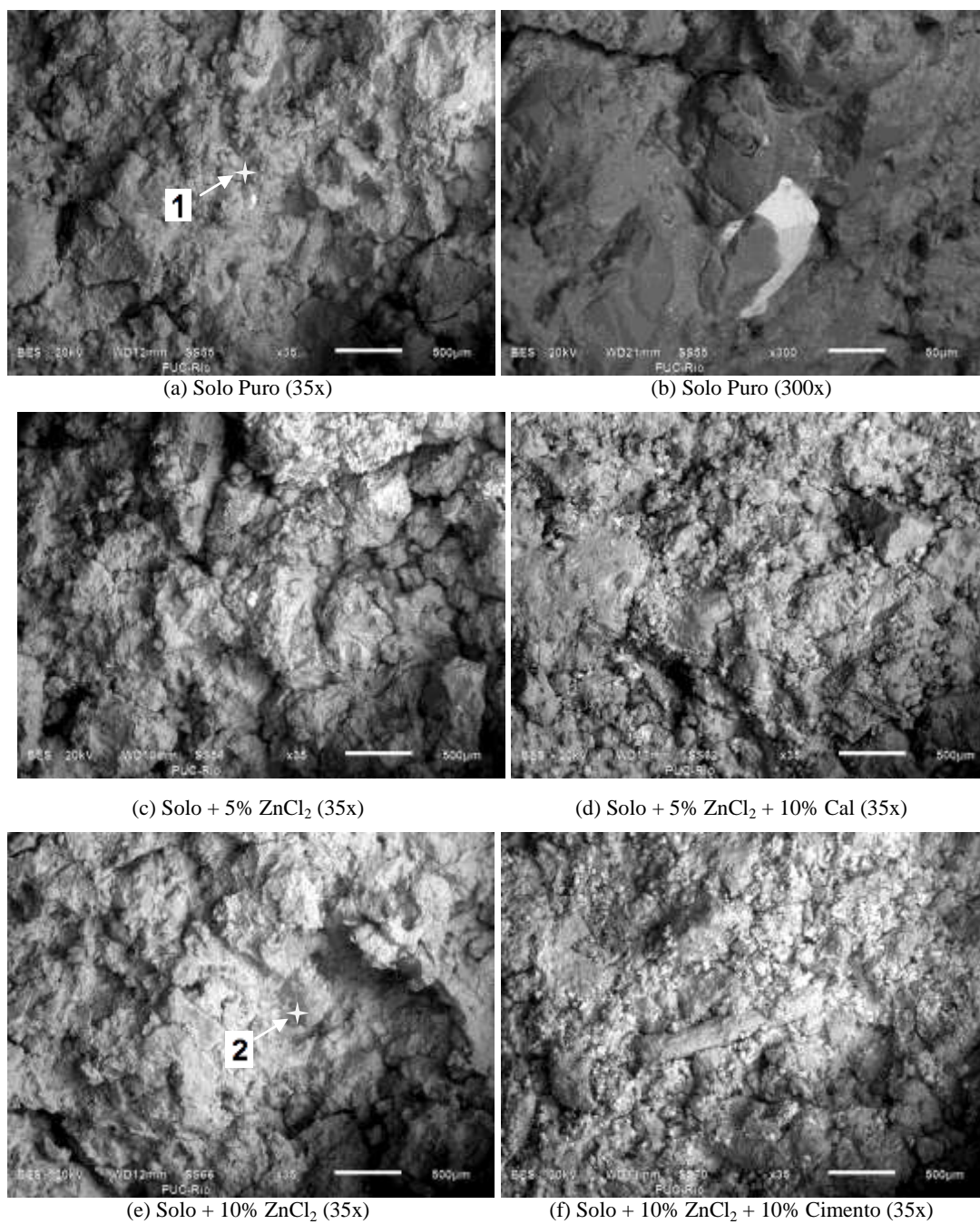


Figura 4-24: Microscopia Eletrônica de Varredura de amostras de solo puro, solo/contaminante, solo/contaminante/cal e solo/contaminante/cimento.

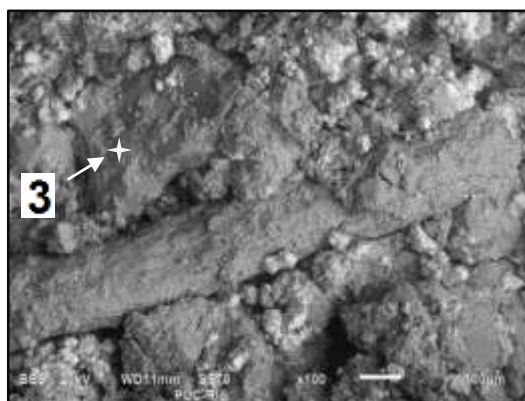


Figura 4-25: Microscopia Eletrônica de Varredura da mistura de 10% ZnCl_2 + 10% cimento (100x)

Durante o ensaio de MEV, alguns pontos das imagens foram escolhidos para se fazer análise da distribuição de elementos químicos a partir do EDS. O espectro EDS da argila pura é apresentado pela Figura 4-26 e corresponde ao ponto 1 da Figura 4-24 (a). Assim como nas análises químicas das misturas, neste ensaio, apareceram picos de Silício (Si), Ferro (Fe) e Alumínio (Al).

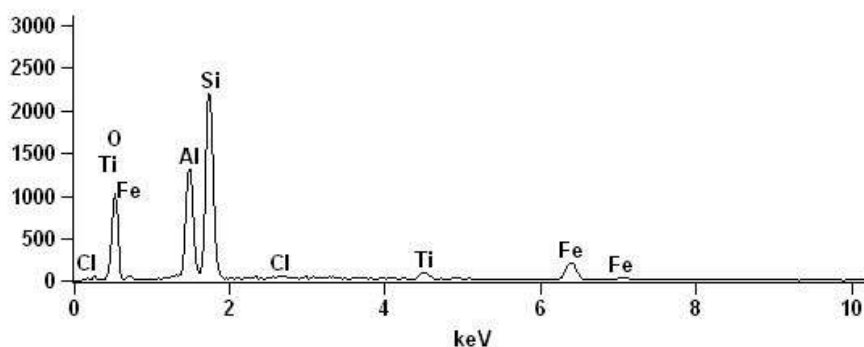


Figura 4-26: EDS da amostra de Solo Puro

Como era de se esperar, nas misturas de solo e cloreto de zinco, surgiram picos de Cloro (Cl) e de Zinco (Zn), além de Silício (Si), Oxigênio (O), Alumínio (Al) e Ferro (Fe), como apresenta a Figura 4-27. Este EDS foi realizado no ponto 2, mostrado na Figura 4-24 (e), na mistura de solo com 10% de cloreto de zinco.

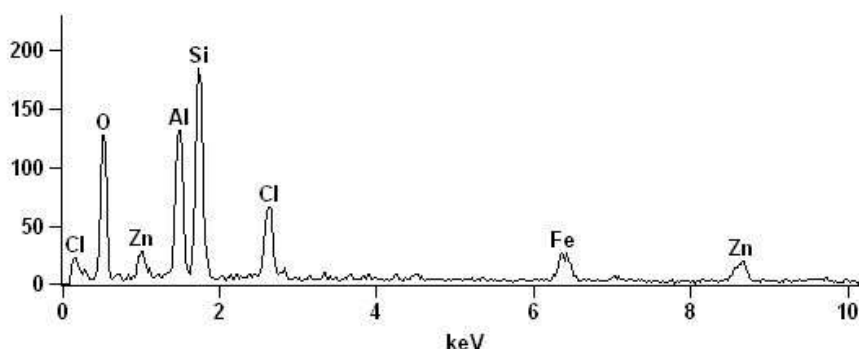


Figura 4-27: EDS da amostra de Solo +10% ZnCl_2 .

Nos ensaios realizados em amostras contendo cal e cimento, o espectro exibe um pico de Cálcio (Ca), o que evidencia a adição desses agentes encapsulantes e promove a formação de produtos cimentados no solo. A Figura 4-28 representa o ensaio de EDS realizado no ponto 3, indicado na Figura 4-25, da amostra contendo 10% de cloreto de zinco e 10% de cimento.

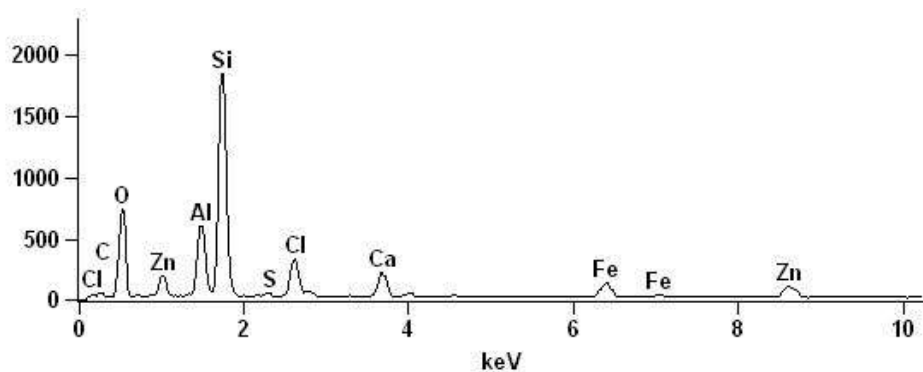


Figura 4-28: EDS da amostra de 10% ZnCl_2 + 10% Cimento.

4.8 Tomografia

Inicialmente, nos resultados dos ensaios de tomografia são obtidas *stack* de imagens em 2D que juntas formam uma imagem 3D. Para cada ensaio realizado, foram obtidas uma média de 1.000 imagens 2D. A Figura 4-29 representa as partículas sólidas e os vazios das misturas estudadas: (a) solo puro; (b) 5% ZnCl_2 ; (c) 10% ZnCl_2 + 10% Cimento e (d) 5% ZnCl_2 + 10% Cal.

A partir da Figura 4-29 (a, b, c e d) nota-se que em todas as misturas apareceram partículas brancas, que são aquela que absorvem mais os raios-X e são representadas por elementos com maior densidade atômica, como ferro, presente no solo puro e zinco, presente nas amostras contaminadas. Nas amostras que contem agente encapsulante (cimento e cal) as partículas ficaram mais aglomeradas e surgiram partículas acinzentadas (entre as brancas e as mais escuras), o que pode representar a presença de cálcio, já que sua densidade atômica é intermediária e que pode representar a possível “cimentação” entre as partículas do solo contaminado, que não aparecia antes.

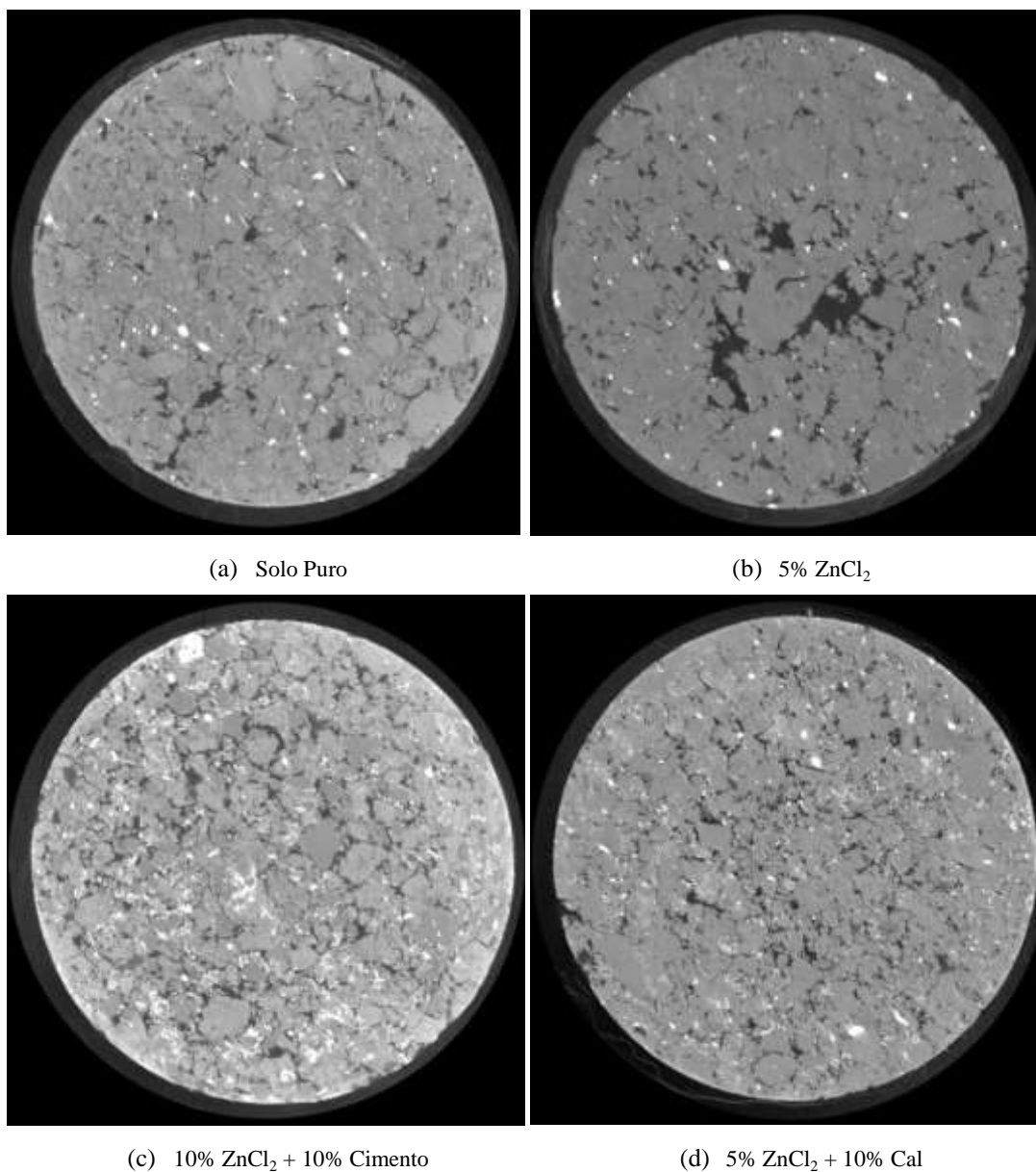


Figura 4-29: Imagens da Tomografia realizada para cada mistura

Para transformar as imagens 2D em 3D foi realizada uma seleção de 200-300 imagens, retirando aquelas capturadas do topo e da base. Além disso, para analisar a quantidade de poros em cada mistura, foi realizado um processo no qual as partes pretas, que representam os vazios, foram convertidas em brancas para tornar a sua visualização mais fácil. A Figura 4-30 (a, b, c e d) representa a imagem 3D dos vazios de cada amostra. Observa-se que apesar das misturas contendo cimento e cal conterem maior quantidade de vazios, a amostra se apresenta homogênea, pois os vazios são de tamanhos semelhantes, o que representa o aumento da rigidez e cimentação do solo. Já os vazios das amostras

de solo puro e solo contaminado são dispersos com diferentes proporções, o que caracteriza as amostras mais heterogêneas na sua formação.

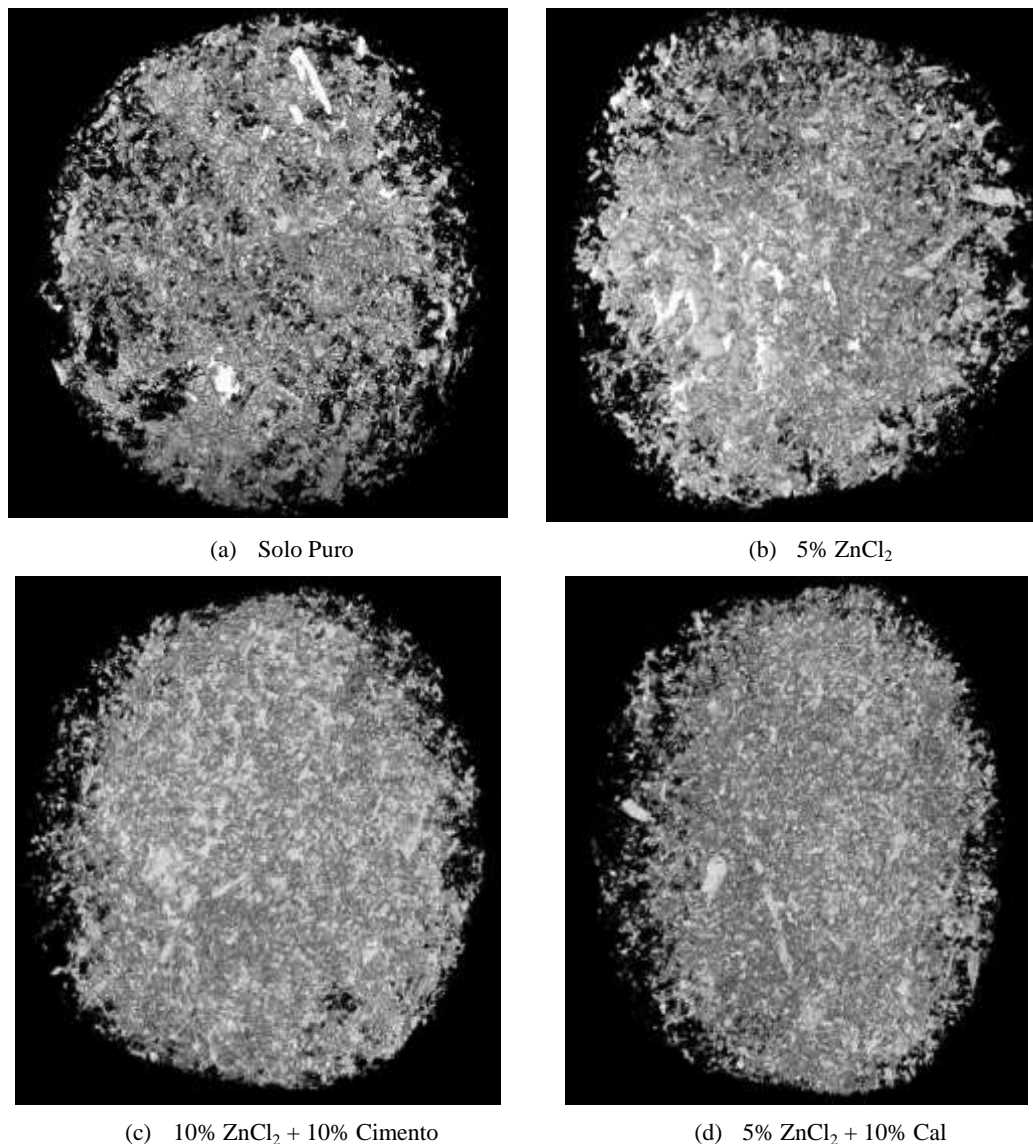


Figura 4-30: Imagens da Tomografia em 3D representando os vazios de cada mistura

4.9

Comparativo de Técnicas de Remediação Relativo a Custos

A técnica de encapsulamento possui a vantagem de apresentar um baixo custo comparado à outras técnicas de remediação, como a implantação de uma barreira reativa. Esta técnica consiste na instalação de uma barreira com material reativo à jusante da pluma de contaminação na direção do fluxo de água. O material reativo mais utilizado é o ferro granular, pois é um material disponível em larga escala e por um preço viável, se tratando de grandes obras. Mas o custo

deste material ainda assim é 2x mais caro que o preço da cal, por exemplo, utilizada no encapsulamento geotécnico.

Os custos que envolvem a técnica de encapsulamento *in situ* vão variar de acordo com o tipo de contaminante, que pode precisar de um pré-tratamento no local, a distância de transporte do agente encapsulante até o local e o tipo de encapsulante utilizado. Já as barreiras reativas, apresentam elevados custos de implantação que incluem: material reativo, custo de construção, custo de disposição e tratamento de rejeitos gerados durante a construção da barreira, como o material escavado e a água contaminada (Gusmão, 1999). Portanto, pode-se dizer que a técnica de encapsulamento apresenta um custo inferior ao que pode ser alcançado na utilização da técnica de remediação de barreiras reativas.

Outra vantagem do encapsulamento é que se uma empresa polui o solo, este pode ser tratado no local e utilizado na própria empresa para pavimentação. Isso, além de ser uma solução próxima e viável, torna o custo da empresa menor, já que esse tratamento teria de ser realizado de qualquer forma.

5 Conclusão

5.1 Conclusões Gerais

Neste capítulo final, são exibidas as conclusões obtidas através dos resultados apresentados e analisados nos capítulos anteriores. São apresentadas as principais conclusões relacionadas ao comportamento mecânico e químico das misturas ensaiadas, bem como as conclusões sobre a eficiência da técnica de encapsulamento com o tipo de contaminante e os agentes encapsulantes utilizados nessa pesquisa.

A partir dos resultados dos ensaios de resistência à compressão simples, foi possível notar que a presença do cloreto de zinco no solo reduz significativamente a resistência do solo. Isso pode ser corroborado pelas imagens do ensaio de MEV e tomografia, onde surgiram vazios maiores no solo contaminado, que não existiam no solo puro.

A adição de cal e cimento no solo contaminado fez com que a resistência aumentasse, mas nem todas as misturas obtiveram uma resistência mais elevada que a do solo puro. Todas as misturas contendo cimento e que ficaram 60 dias em cura, ultrapassaram a resistência do solo puro. Além dessas, a amostra de 10% de cloreto de zinco + 10% de cimento teve maiores resistências do que o solo puro em 0, 28 e 60 dias de cura e em 0, 7 e 28 dias de cura das amostras que não foram submetidas à imersão. Somente as amostras de cal, que não foram imersas em água e ficaram 7 e 28 dias em cura, ultrapassaram o valor da resistência do solo puro. Ressalta-se que todas as misturas solo/contaminante/cal ensaiadas em 0 dias de cura alcançaram valores similares ao da argila pura.

O tempo de cura foi fundamental no ganho de resistência das misturas contendo cimento. Já para as misturas contendo cal, a cura não influenciou tanto, pois não houve uma grande diferença nas resistências dessas misturas ao longo do tempo. Isso aconteceu devido à lenta cimentação da cal. As maiores resistências alcançadas foram para as misturas contendo 5% de cal.

As análises químicas dos lixiviados coletados mostraram que a presença da cal e do cimento diminuiu consideravelmente a concentração do zinco no lixiviado. Esse fato evidencia a efetividade da técnica de encapsulamento do solo contaminado por cloreto de zinco. O resultado mais favorável deste ensaio foi da mistura de 5% de cloreto de zinco + 10% de cal, onde foi encontrada a menor concentração de zinco na análise química do lixiviado. No geral, as misturas contendo maior concentração de agente encapsulante, também apresentaram um resultado adequado, pois a concentração de zinco encontrada não ultrapassou o valor máximo permitido para consumo humano, de acordo com a Resolução CONAMA nº 396 e nem o valor de investigação de águas subterrâneas, definido pela Resolução CONAMA nº 420.

A técnica de encapsulamento não abrange apenas a redução da concentração do contaminante no lixiviado, mas também a resistência que o solo adquire com a adição do agente encapsulante, para que o solo tratado possa ser utilizado em aterros ou até mesmo como material aproveitado em pavimentação de vias no próprio local de contaminação. Dessa forma, as misturas que contêm 10% de cimento representam bem a técnica de encapsulamento, pois não só forneceram uma redução expressiva da concentração do contaminante no lixiviado, atendendo às normas, como também apresentaram um ganho de resistência significativo, principalmente ao longo do tempo de cura. Já a mistura de 5% de cloreto de zinco + 10% de cal apresentou o melhor comportamento em relação à presença de zinco no lixiviado. Portanto, essas misturas atenderam as condições do encapsulamento.

A escolha do agente encapsulante também pode variar de acordo com o local do acidente, pois isso impacta nos custos do tratamento. Existem locais onde a fabricação da cal é mais abundante que do cimento, por exemplo, reduzindo os custos da remediação com a cal.

Por fim, pode-se dizer que o objetivo da pesquisa foi alcançado, uma vez que houve o encapsulamento do zinco a partir da amostra de 5% ZnCl_2 e 10% de cal. Além disso, a técnica se tornou viável e aplicável por apresentar valores de resistência à compressão simples adequados para o aproveitamento em pavimentos, como por exemplo, base estabilizada de pavimentos ou blocos para pavimentos intertravados.

5.2

Sugestões para Futuros Trabalhos

Ao longo dos experimentos realizados, muitas perguntas surgiram. A seguir são feitas algumas sugestões para futuras pesquisas, para que o conhecimento na área de remediação de solo contaminado seja ampliado.

- Empregar novos agentes encapsulantes para que novos recursos sejam utilizados e comparados com os resultados da cal e do cimento;
- Realizar ensaios de resistência à compressão simples e lixiviação para diferentes concentrações de cloreto de zinco, cimento e cal;
- Realizar ensaio de resistência à compressão simples com tempo de cura mais elevado, principalmente para as misturas contendo cal;

6 Referências Bibliográficas

AGUILAR, J. R. T. **Análise do comportamento mecânico de um solo arenoso reforçado com fibras de coco.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 114 p, 2015.

American Society for Testing and Materials. **D 4874:** Standard Test Method for Leaching Solid Material in a Column Apparatus. Philadelphia, 1995.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6457:** Amostras de solos – Preparação para ensaios de compactação e caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7181:** Solos – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6459:** Solos – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7180:** Solos – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6508:** Solos – Determinação da densidade real dos grãos. Rio de Janeiro, 1984.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7182:** Solos – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12023:** Solo-cimento – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1992.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12770:** Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada. Rio de Janeiro, 1992.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12025:** Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1990.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10.005:** Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

AZAMBUJA, E.; CANCELIER, D.B.; NANNI, A.S.; **Contaminação dos solos por LNAPL: Discussão sobre diagnóstico e remediação.** In: II Simpósio de

Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul – GEOSUL. Porto Alegre. p.185-201, 2000.

BARROS, L.S.S.; AMARAL, L.A. do; LUCAS JÚNIOR, J. de. **Poder poluente de águas residuárias de suinocultura após utilização de um tratamento integrado.** Brazilian Journal of Veterinary Research and Animal Science, SãoPaulo, v.40, n.2, p.126-135, 2003.

BELCHIOR, I. M. R. M. **Behavior of a lime-treated expansive soil.** Tese de Doutorado Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 191 p, 2016.

BELL, F. G. **Lime stabilization of Clay minerals and soil.** Engineering Geology Journal. South Africa, p. 223-237, 1996.

BENEVELI, R. M. **Estudo dos efeitos de umedecimento e secagem na resistência ao cisalhamento de um solo compactado em laboratório.** Dissertação de Mestrado, Programa Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2002.

BORGES, A. F. **Avaliação dos mecanismos de transporte de hexaclorociclohexano (HCH) no solo da Cidade dos Meninos, Duque de Caxias, RJ.** Dissertação de Mestrado, Programa Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1996.

BRAGA, F.S.; FONSECA, M. H. G. P.; AGOSTINI, R. M.; SILVA, V. V.; LOPES, V. L. **Encapsulamento: uma alternativa para o tratamento e destinação final de resíduos oleosos – Um enfoque ambiental (estudos preliminares).** VI Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Vitória, 2002.

BRUCE, D. A.; BRUCE, M. E. C.; DIMILLIO, A. F. **Deep mixing method: A global perspective.** Civil Enginnering. p. 38-41, 1998.

CASTRO, F.J. C. O. **Contribuição ao Conhecimento e à Determinação da Reatividade de Solos Sesquixídicos Utilizando o Hidróxido de Cálcio: Aplicação ao Processo de Geopolimerização (Estabilização).** Tese de Doutorado em Engenharia. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1995.

CETESB, 2017. **O que são áreas contaminadas.** Disponível em: <http://areascontaminadas.cetesb.sp.gov.br/> Acesso 25 jan. 2017

CETESB, Governo do Estado de São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente. **Qualidade das águas interiores no Estado de São Paulo.** 2009.

COCKE, D. L. **The binding chemistry and leaching mechanisms of hazardous substances in cementitious solidifications/stabilization systems.** Elsevier, Journal of Hazardous Materials, Amsterdam, v. 24, p. 231-253, 1990.

CRUZ, R. C. **Condutividade hidráulica em solos contaminados encapsulados.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 95 p, 2004.

DALLA ROSA, A. **Estudos dos Parâmetro-Chave no Controle da Resistência de Misturas Solo-Cinza-Cal.** Tese de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 198 p, 2009.

DALLA ROSA, A. **Metodologia para a Previsão do Comportamento Mecânico e para a Análise da Variação da Porosidade de um Solo Siltoso Tratado com Cal em Diferentes Tempos de Cura.** Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 271 p, 2013.

DAS, BRAJA M. **Principios de Ingenieria de Cimentaciones.** PWS, 4ª ed., Thomson Learning, Mexico, p. 764-813, 2001.

DELMONTE, B.A. **Caracterização Geoambiental da Cia Mercantil e Industrial Ingá.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 138 p, 2010.

DURAN, G. G. R. **Estudo experimental de solos reforçados com borracha de pneus inservíveis.** Dissertação de Mestrado, Programa Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 145 p, 2012.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **A Citizen's Guide to Solidification and Stabilization.** USA, 2012.

FAUSTO, A. A.; CHASIN, A. A. M. **Metais: gerenciamento da toxicidade.** São Paulo, 2003.

FITTS, C. **Groundwater Science.** 2nd Edition, 2012.

GROBBEL, L.; WANG, Z. A Review of Stabilization/Solification (S/S) Technology for Waste Soil Remediation. Disponível em: <http://www.geoengineer.org/education/web-based-class-projects/geoenvironmental-remediation-technologies/stabilization-solidification?showall=1&limitstart=> Acesso em 4 fev. 2017.

GUSMÃO, A. D. **Projeto de Barreiras Reativas**. Universidade de Pernambuco e CEFET/PE. 1999.

GUSMÃO, A. D. **Águas Subterrâneas: Aspectos de Contaminação e Remediação**. 2002.

INGLES, O. G.; METCALF J.B. **Soil stabilization – principles and practice**. Australia, 366p. 1972.

JARAMILLO, N. A. D. **Comportamento mecânico de solos reforçados com borracha de pneus**. Dissertação de Mestrado, Programa Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 112 p, 2016.

JUNIOR, L. S. L. **Parâmetros de controle da resistência mecânica de solos tratados com cal, cimento e rocha basáltica pulverizada**. Tese de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 147 p, 2007.

KNOP, A. **Encapsulamento de solos contaminados por hidrocarbonetos**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 67 p, 2003.

KOGBARA, R. B.; YI, Y.; AL-TABBAA, A. **Process envelopes for stabilisation/solidification of contaminated soil using lime-slag blend**. Environ Science and Pollution Research. p. 1286-1296, 2011.

KORF, E. P. **Comportamento hidráulico e reativo de uma mistura solo-cimento para aplicação em barreiras de contenção de resíduos ácidos contendo chumbo e cádmio**. Tese de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 143 p, 2011.

LA GREGA, M. D.; BUCKINGHAM P. L.; EVANS, J. C. **Hazardous waste management**. 2nd Edition, 1157 p, 2001.

LI, X. D.; POON, C.S.; SUN, H.; LO, I. M. C.; KIRK, D. W. **Heavy metal speciation and leaching behaviors in cement based solidified/stabilized waste materials.** Journal of Hazardous Materials. p. 215-230, 2001.

LORA, E. E. S. **Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte.** 1ª Ed. Aneel, Brasília, 2000.

MALISKA, A. M. **Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise.** Santa Catarina, 2007.

MELIANDE, A. M. C. **Análise do comportamento de misturas de solos com cinza volante de carvão mineral e cal.** Dissertação de Mestrado, Programa Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 149 p, 2014.

MIRSAL, I. A. **Soil pollution: Origin, Monitoring & Remediation.** 2. Ed. Berlin, 2008.

OLIVEIRA, E. A. **Confiabilidade metrológica na determinação de espécies químicas em materiais siderúrgicos por espectrometria de fluorescência de raios-X.** Tese de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Metrologia da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 115 p. 2011.

OLIVEIRA, F.C.; MATTIAZZO, M.E. **Mobilidade de metais pesados em um Latossolo Amarelo distrófico tratado com lodo de esgoto e cultivado com cana-de-açúcar.** Scientia Agrícola, p.807-812, 2001.

PARK, C. K. **Hydration and solidificatio of hazardous wastes containing heavy metals using modified cementitious materials.** Cement and Concrete Research. South Korea, p. 429-435, 1999.

PRIETTO, P. D. M. **Estudos do comportamento mecânico de um solo artificialemnte cimentado.** Tese de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – CPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 150 p. 1996.

REPETTO, M. **Toxicologia avanzada.** 621 p. Madrid, 1995.

Resolução CONAMA nº 396/2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências.

Resolução CONAMA nº 420/2009. Dispõe sobre critérios e valores orientados 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.

ROJAS, J. W. J.; FONINI, A. **Técnicas Empregadas na Remediação de Solos Contaminados**. Porto Alegre, Rio Grande do Sul. 2006.

ROJAS, J. W. J. **Estudo de remediação de solo contaminado por borra oleosa ácida utilizando a técnica de encapsulamento**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 130 p, 2007.

ROJAS, J. W. J.; HEINECK, K. S.; CONSOLI, N. C. **Resistência à compressão simples de um solo contaminado e cimentado**. Teoria e Prática na Engenharia Civil, p. 13-18, 2009.

SAITO, L.M. et al. **Encapsulamento de Resíduos Industriais Perigosos**. 13º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Maceió, 1985.

SALDANHA, R. B. **Misturas Cinza Volante e Cal de Carbureto: Comportamento da Resistência à Compressão Simples para Cura Acelerada**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 170 p, 2014.

SHUQAIR, M. S. S. **Estudo da contaminação do solo e água subterrânea por elementos tóxicos originados dos rejeitos das minas de carvão de Figueira no Estado do Paraná**. Tese de Doutorado, Ciência na área de tecnologia nuclear – materiais. Instituto de pesquisas energéticas e nucleares São Paulo, 2002.

SILVA, T. V. et al. **Estudo Comparativo de Normas de Lixiviação aplicadas a resíduos perigosos solidificados/estabilizados em cimento**. XXVIII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancún, México, 2002.

SILVA, J. O. **Perfil da Cal**. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de geologia, mineração e transformação mineral. Setembro de 2009.

SOARES, R. M. **Resistência ao cisalhamento de um solo coluvionar não saturado do Rio de Janeiro, RJ**. Dissertação de Mestrado, Programa Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 196 p, 2005.

SODRÉ, F.F.; LENZI, E.; COSTA, A.C. **Utilização de modelos físico-químicos de adsorção no estudo do comportamento do cobre em solos argilosos**. Química Nova, São Paulo, v.24, n.3, p.324-330, 2001.

STEGEMANN, J. A.; BUENFELD, N. R. **Prediction of leachate pH for cement paste containing pure metal compounds.** Journal of Hazardous Materials, p. 169-188, 2001.

SUTHERSAN, SUTHAN. S. **Remediation Engineering: Design Concepts.** CRC Press Inc. Lewis Publishers. 362 p. 1997.

SZELIGA, L. **Estudo Experimental de um Solo Arenoso Estabilizado com Cinzas de Resíduo Sólido Urbano e Cal.** Dissertação de Mestrado, Programa Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 160 p, 2014.

TAVARES, S. R. L. **Fitorremediação em solo e água de áreas contaminadas por metais pesados provenientes da disposição de resíduos perigosos.** Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 371 p, 2009.

TAVARES, S. R. L. **Remediação de solos e águas contaminadas: conceitos básicos e fundamentos.** 1ª ed. 2013.

THOMÉ, A. **Estudo do comportamento de um solo mole tratado com cal, visando seu uso em fundações superficiais.** Tese de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 149 p, 1994.

U.S. Army Corps of Engineers (USACE). **Tractability Studies for Solidification/Stabilization of Contaminated Material.** Technical Letter nº 1110-1-158. Washington, 1995.

VINHAL-FREITAS, I. C.; Maldonado, A. C. D.; Alvarenga, C. B.; Camargo, R.; Wendling, B. **Adsorção e dessorção de metais no solo e coeficientes de isoterma de freundlich e Langmuir.** Agropecuária Técnica. v. 31, n. 2, 2010

WILES, C. C. **A review of solidification/stabilization technology.** Journal of Hazardous Materials. Amsterdam, Vol. 14. p. 5-21. 1987.

WOWK, G. I. T. H.; Melo, V. F. **Avaliação do nível de chumbo, em solo de várzea, proveniente da reciclagem de baterias.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Campina Grande. p. 613-622, 2005.

Apêndice A – Relatório de Ensaios de Massa Bruta, Ensaios de Lixiviação e Ensaios de Solubilização



RELATÓRIO DE ENSAIO

INTERESSADO: ISABEL AMADO PEREZ
Rua Marques de São Vicente - Predio Leme (Eng.Civil),
225 PUC - 3ª andar - Gávea
CEP: 22.430-060 - Rio de Janeiro/RJ

LABORATÓRIO CONTRATADO: Analytical Technology Serviços
Analíticos e Ambientais Ltda.

PROJETO: 85% solo + 5% ZnCl₂ + 10% CAL
IDENTIFICAÇÃO AT: LOG nº 3353/2017



Anatech

Rua Bitencourt Sampaio, 105 - Vila Mariana - Cep: 04128-060 - São Paulo/SP
Tel: 11 5954 8800 Fax: 11 5904 8801
www.eurofins.com.br



Dados referentes ao Projeto

1. Identificação das amostras

ID AT	IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO
15725/2017-1.0	AMOSTRA: 85% SOLO + 5% ZNCL2 + 10% CAL / DATA: 09/02/2017 /HORA:NÃO INFORMADO / MATRIZ: / PROJETO: 85% SOLO + 5% ZNCL2 + 10% CAL
15725/2017-2.0	AMOSTRA: 85% SOLO + 5% ZNCL2 + 10% CAL / DATA: 09/02/2017 /HORA:NÃO INFORMADO / MATRIZ: / PROJETO: 85% SOLO + 5% ZNCL2 + 10% CAL
15725/2017-3.0	AMOSTRA: 85% SOLO + 5% ZNCL2 + 10% CAL / DATA: 09/02/2017 /HORA:NÃO INFORMADO / MATRIZ: / PROJETO: 85% SOLO + 5% ZNCL2 + 10% CAL

2. Custódia das amostras

Data de recebimento de amostra: 09/02/2017

Data de emissão do relatório eletrônico: 13/03/2017

Período de retenção das amostras: até 10 dias após a emissão do relatório (até essa data as amostras estarão disponíveis para devolução e/ou checagem)



Anatech

Rua Bittencourt Sampaio, 105 - Vila Mariana - Cep: 04129-060 - São Paulo/SP
Tel: 11 5904 8800 Fax: 11 5904 8801
www.eurofins.com.br



3. Resultados de análises

Massa Bruta segundo ABNT NBR 10004:2004

PROJETO: 85% SOLO + 5% ZNCL2 + 10% CAL		
LOGIN: 15725/2017-1.0	PONTO: 85% SOLO + 5% ZNCL2 + 10% CAL	
MATRIZ: RESIDUO	DATA: 09/02/2017	HORA: NÃO INFORMADO

PARÂMETROS	UNIDADE	RESULTADOS	LQ	VMP	Ref
Teor de Sólidos	%	92,0	0,03	-	681
Umidade	%	8,03	---	-	681
pH	-	5,73	---	>2,0;<12,5	504
Inflamabilidade	°C	Não Inflamável	---	60	829
Sulfeto (como H ₂ S)	mg/kg	< 0,174	0,174	500	837
Cianeto (como HCN)	mg/kg	< 0,068	0,068	250	571

Observações:

L.Q: Limite de Quantificação
Resultados expressos na base seca.

VMP: Valor Máximo Permitido segundo ABNT 10004:2004

Ensaio de Lixiviação segundo ABNT NBR 10005:2004

LOGIN: 15725/2017-2.0		PONTO: 85% SOLO + 5% ZNCL2 + 10% CAL	
pH do extrato lixiviado obtido:	Tempo total de lixiviado:	Volume dos extratos obtidos:	
6,60	18 horas	2000 mL	

PARÂMETROS INORGÂNICOS					
PARÂMETROS	UNIDADE	RESULTADOS	LQ	VMP	Ref
Arsênio Total	mg/L	< 0,010	0,010	1,0	498
Bário Total	mg/L	0,834	0,010	70,0	498
Cádmio Total	mg/L	< 0,004	0,004	0,5	498
Chumbo Total	mg/L	< 0,009	0,009	1,0	498
Cromo Total	mg/L	< 0,010	0,010	5,0	498
Fluoreto Total	mg/L	0,530	0,150	150	576
Mercurio Total	mg/L	< 0,0002	0,0002	0,1	495
Prata Total	mg/L	< 0,005	0,005	5	498
Selênio Total	mg/L	< 0,009	0,009	1,0	498

PARÂMETROS ORGÂNICOS					
PARÂMETROS	UNIDADE	RESULTADOS	LQ	VMP	Ref
1,1-Dicloroetano	mg/L	< 0,0030	0,0030	3,0	670
1,2-Dicloroetano	mg/L	< 0,0030	0,0030	1,0	670
1,4-Diclorobenzeno	mg/L	< 0,0015	0,0015	7,5	483
2,4,5-T	mg/L	< 0,0015	0,0015	0,2	483
2,4,5-TP	mg/L	< 0,0015	0,0015	1,0	483
2,4,5-Triclorofenol	mg/L	< 0,0015	0,0015	400	483
2,4,6-Triclorofenol	mg/L	< 0,0015	0,0015	20,0	483
2,4-D	mg/L	< 0,0015	0,0015	3,0	483
2,4-Dinitrotolueno	mg/L	< 0,0015	0,0015	0,13	483
Aldrin + Dieldrin	mg/L	< 0,000030	0,000030	0,003	485
Benzeno	mg/L	< 0,0030	0,0030	0,5	670
Benzo(a)pireno	mg/L	< 0,0015	0,0015	0,07	483
Clordano (Isômeros)	mg/L	< 0,000030	0,000030	0,02	485
Cloro de Vinila	mg/L	< 0,0030	0,0015	0,5	670
Clorobenzeno	mg/L	< 0,0030	0,0030	100	670
Clorofórmio	mg/L	< 0,0030	0,0030	6,0	670
DDT (Isômeros)	mg/L	< 0,000030	0,000030	0,2	485
Endrin	mg/L	< 0,000030	0,000030	0,06	485
Heptacloro e Heptacloro	mg/L	< 0,000030	0,000030	0,003	485
Epóxido	mg/L	< 0,0015	0,0015	0,1	483
Hexaclorobenzeno	mg/L	< 0,0015	0,0015	0,5	483
Hexaclorobutadieno	mg/L	< 0,0015	0,0015	3,0	483
Hexacloroetano	mg/L	< 0,0015	0,0015	0,2	485
Lindano (g-BHC)	mg/L	< 0,000030	0,000030	0,2	485
m,p-Cresol	mg/L	< 0,0015	0,0015	200	483
o-Cresol	mg/L	< 0,0015	0,0015	200	483
Metililecetona	mg/L	< 0,0090	0,0090	200	670
Metoxicloro	mg/L	< 0,000030	0,000030	2,0	485
Nitrobenzeno	mg/L	< 0,0015	0,0015	2,0	483
Pentaclorofenol	mg/L	< 0,0015	0,0015	0,9	483
Piridina	mg/L	< 0,0015	0,0015	5,0	483
Tetracloreto de Carbono	mg/L	< 0,0015	0,0015	0,2	670
Tetracloroetano	mg/L	< 0,0030	0,0030	4,0	670
Toxafeno	mg/L	< 0,000375	0,000375	0,5	485
Tricloroetano	mg/L	< 0,0030	0,0030	7,0	670

Observações:

LQ: Limite de Quantificação

VMP: Valor Máximo Permitido segundo ABNT 10004:2004, anexo F



Rua Bitencourt Sampaio, 105 - Vila Mariana - Cep: 04126-060 - São Paulo/SP
Tel: 11 5954 8800 Fax: 11 5954 8801
www.eurofins.com.br



Ensaio de Solubilização segundo ABNT NBR 10006:2004

LOGIN: 15725/2017-3.0	PONTO: 85% SOLO + 5% ZNCL2 + 10% CAL
pH do extrato Solubilizado obtido: 5,79	

		PARÂMETROS INORGÂNICOS			
PARÂMETROS	UNIDADE	RESULTADOS	LQ	VMP	Ref
Alumínio Total	mg/L	< 0,030	0,030	0,2	498
Arsênio Total	mg/L	< 0,010	0,010	0,01	498
Bário Total	mg/L	0,845	0,010	0,7	498
Cádmio Total	mg/L	< 0,004	0,004	0,005	498
Chumbo Total	mg/L	< 0,009	0,009	0,01	498
Cianeto	mg/L	< 0,0060	0,0060	0,07	571
Cloreto Total	mg/L	3202,4	0,600	250	499
Cobre Total	mg/L	< 0,009	0,009	2,0	498
Cromo Total	mg/L	< 0,010	0,010	0,05	498
Ferro Total	mg/L	< 0,030	0,030	0,3	498
Fluoreto Total	mg/L	< 0,030	0,030	1,5	499
Fenóis Totais	mg/L	< 0,009	0,009	0,01	626
Manganês Total	mg/L	0,119	0,010	0,1	498
Mercurio Total	mg/L	< 0,0002	0,0002	0,001	495
Nitrato (como N)	mg/L	0,688	0,300	10,0	499
Prata Total	mg/L	< 0,005	0,005	0,05	498
Selênio Total	mg/L	< 0,009	0,009	0,01	498
Sódio Total	mg/L	34,4	0,030	200	498
Sulfato Total	mg/L	11,9	0,600	250	499
Surfactantes	mg/L	< 0,015	0,015	0,5	556
Zinco Total	mg/L	156,5	0,070	5,0	498

		PARÂMETROS ORGÂNICOS			
PARÂMETROS	UNIDADE	RESULTADOS	LQ	VMP	Ref
2,4,5-T	mg/L	< 0,0009	0,0009	0,002	483
2,4,5-TP	mg/L	< 0,0009	0,0009	0,03	483
2,4-D	mg/L	< 0,0009	0,0009	0,03	483
Aldrin + Dieldrin	mg/L	< 0,000030	0,000030	0,00003	485
Clordano (Isômeros)	mg/L	< 0,000030	0,000030	0,0002	485
DDT (Isômeros)	mg/L	< 0,000030	0,000030	0,002	485
Endrin	mg/L	< 0,000030	0,000030	0,0006	485
Heptacloro e Heptacloro Epóxido	mg/L	< 0,000030	0,000030	0,00003	485
Hexaclorobenzeno	mg/L	< 0,0009	0,0009	0,001	483
Lindano (g-BHC)	mg/L	< 0,000030	0,000030	0,002	485
Metoxicloro	mg/L	< 0,000030	0,000030	0,02	485
Toxafeno	mg/L	< 0,000375	0,000375	0,005	485

Observações:

LQ: Limite de Quantificação

VMP: Valor Máximo Permitido segundo ABNT 10004:2004, Anexo G



Anatech

Rua Bitencourt Sampaio, 105 - Vila Mariana - Cep: 04126-060 - São Paulo/SP
 Tel: 11 5904 8800 Fax: 11 5904 8801
 www.eurofins.com.br



Classificação de resíduos.

Em função dos resultados obtidos neste relatório, assim como o relatório complementar log 3493/2017, a amostra de resíduo deve ser considerada como Classe II A - Resíduo Não Inerte.

- Massa Bruta:** De acordo com a VMP - Valores Máximos Permitidos segundo NBR 10004:2004: O(s) parâmetro(s) atende(m) os limites permitidos.
- Lixiviado:** De acordo com a VMP - Valores máximos permitidos segundo ABNT NBR 10004:2004 - Lixiviado: O(s) parâmetro(s) atende(m) os limites permitidos.
- Solubilizado:** De acordo com a VMP - Valores máximos permitidos segundo norma ABNT NBR 10004:2004 - Solubilizado: O(s) parâmetro(s) Bário Total, Cloreto Total, Manganês Total, Zinco Total não atende(m) os limites permitidos.



Rua Bitencourt Sampaio, 105 - Vila Mariana - Cep: 04128-080 - São Paulo/SP
Tel: 11 5954 8800 Fax: 11 5954 8801
www.eurofins.com.br



QA/QC – Branco de Análise

PARÂMETROS	UNIDADE	RESULTADOS	LQ	QA/QC	Ref.
Fluoreto Total	mg/L	< 0,030	0,030	3736/2017	499
Cloreto Total	mg/L	< 0,030	0,030	3736/2017	499
Nitrato (como N)	mg/L	< 0,015	0,015	3736/2017	499
Sulfato Total	mg/L	< 0,030	0,030	3736/2017	499
Cianeto (como HCN)	mg/kg	< 0,025	0,025	3630/2017	571
Cianeto	mg/L	< 0,0060	0,0060	3719/2017	571
Fluoreto Total	mg/L	< 0,150	0,150	3510/2017	576
Fenóis Totais	mg/L	< 0,009	0,009	3684/2017	870
Mercurio Total	mg/L	< 0,0002	0,0002	3615/2017	495
Mercurio Total	mg/L	< 0,0002	0,0002	3712/2017	495
Alumínio Total	mg/L	< 0,030	0,030	3709/2017	498
Arsênio Total	mg/L	< 0,010	0,010	3709/2017	498
Bário Total	mg/L	< 0,010	0,010	3709/2017	498
Cádmio Total	mg/L	< 0,004	0,004	3709/2017	498
Chumbo Total	mg/L	< 0,009	0,009	3709/2017	498
Cobre Total	mg/L	< 0,009	0,009	3709/2017	498
Cromo Total	mg/L	< 0,010	0,010	3709/2017	498
Ferro Total	mg/L	< 0,030	0,030	3709/2017	498
Manganês Total	mg/L	< 0,010	0,010	3709/2017	498
Prata Total	mg/L	< 0,004	0,004	3709/2017	498
Selênio Total	mg/L	< 0,009	0,009	3709/2017	498
Sódio Total	mg/L	< 0,030	0,030	3709/2017	498
Zinco Total	mg/L	< 0,070	0,070	3709/2017	498
Arsênio Total	mg/L	< 0,010	0,010	3614/2017	498
Bário Total	mg/L	< 0,010	0,010	3614/2017	498
Cádmio Total	mg/L	< 0,004	0,004	3614/2017	498
Chumbo Total	mg/L	< 0,009	0,009	3614/2017	498
Cromo Total	mg/L	< 0,010	0,010	3614/2017	498
Prata Total	mg/L	< 0,005	0,005	3614/2017	498
Selênio Total	mg/L	< 0,009	0,009	3614/2017	498
Aldrin + Dieldrin	mg/L	< 0,000030	0,000030	3091/2017	485
Clordano (Isômeros)	mg/L	< 0,000030	0,000030	3091/2017	485
DDT (Isômeros)	mg/L	< 0,000030	0,000030	3091/2017	485
Endrin	mg/L	< 0,000030	0,000030	3091/2017	485
Heptacloro e Heptacloro Epóxido	mg/L	< 0,000030	0,000030	3091/2017	485
Lindano (g-BHC)	mg/L	< 0,000030	0,000030	3091/2017	485
Metoxicloro	mg/L	< 0,000030	0,000030	3091/2017	485
Toxafeno	mg/L	< 0,000375	0,000375	3091/2017	485
Aldrin + Dieldrin	mg/L	< 0,000030	0,000030	3847/2017	485
Clordano (Isômeros)	mg/L	< 0,000030	0,000030	3847/2017	485
DDT (Isômeros)	mg/L	< 0,000030	0,000030	3847/2017	485
Endrin	mg/L	< 0,000030	0,000030	3847/2017	485
Heptacloro e Heptacloro Epóxido	mg/L	< 0,000030	0,000030	3847/2017	485
Lindano (g-BHC)	mg/L	< 0,000030	0,000030	3847/2017	485
Metoxicloro	mg/L	< 0,000030	0,000030	3847/2017	485
Toxafeno	mg/L	< 0,000375	0,000375	3847/2017	485
Sulfeto (como H2S)	mg/kg	< 0,064	0,064	3586/2017	837
Surfactantes	mg/L	< 0,015	0,015	3703/2017	556
2,4,5-T	mg/L	< 0,0015	0,0015	4187/2017	483
2,4,5-TP	mg/L	< 0,0015	0,0015	4187/2017	483
m,p-Cresol	mg/L	< 0,0015	0,0015	4187/2017	483
o-Cresol	mg/L	< 0,0015	0,0015	4187/2017	483
2,4-D	mg/L	< 0,0015	0,0015	4187/2017	483
1,4-Diclorobenzeno	mg/L	< 0,0015	0,0015	4187/2017	483
2,4,5-Triclorofenol	mg/L	< 0,0015	0,0015	4187/2017	483
2,4,6-Triclorofenol	mg/L	< 0,0015	0,0015	4187/2017	483
2,4-Dinitrotolueno	mg/L	< 0,0015	0,0015	4187/2017	483
Benzo(a)pireno	mg/L	< 0,0015	0,0015	4187/2017	483
Hexaclorobenzeno	mg/L	< 0,0015	0,0015	4187/2017	483
Hexaclorobutadieno	mg/L	< 0,0015	0,0015	4187/2017	483
Hexacloroetano	mg/L	< 0,0015	0,0015	4187/2017	483
Nitrobenzeno	mg/L	< 0,0015	0,0015	4187/2017	483
Pentaclorofenol	mg/L	< 0,0015	0,0015	4187/2017	483
Piridina	mg/L	< 0,0015	0,0015	4187/2017	483
2,4,5-T	mg/L	< 0,0009	0,0009	4189/2017	483
2,4,5-TP	mg/L	< 0,0009	0,0009	4189/2017	483
2,4-D	mg/L	< 0,0009	0,0009	4189/2017	483

LOG nº 3353/2017

Página 6 de 10

Aprovado por:
Fernanda Rodrigues da Silva
Analista Químico(a)



Anatech

Rua Bitencourt Sampaio, 105 - Vila Mariana - Cep: 04126-060 - São Paulo/SP
 Tel: 11 5904 8800 Fax: 11 5904 8801
 www.eurofins.com.br



Hexaclorobenzeno	mg/L	< 0,0009	0,0009	4189/2017	483
1,1-Dicloroeteno	mg/L	< 0,0030	0,0030	3559/2017	670
1,2-Dicloroetano	mg/L	< 0,0030	0,0030	3559/2017	670
Metiletilcetona	mg/L	< 0,0090	0,0090	3559/2017	670
Benzeno	mg/L	< 0,0030	0,0030	3559/2017	670
Cloro de Vinila	mg/L	< 0,0030	0,0030	3559/2017	670
Clorobenzeno	mg/L	< 0,0030	0,0030	3559/2017	670
Clorofórmio	mg/L	< 0,0030	0,0030	3559/2017	670
Tetracloreto de Carbono	mg/L	< 0,0030	0,0030	3559/2017	670
Tetracloreto	mg/L	< 0,0030	0,0030	3559/2017	670
Tricloroeteno	mg/L	< 0,0030	0,0030	3559/2017	670

Observações:

L.Q: Limite de Quantificação



Anatech

Rua Bitencourt Sampaio, 105 - Vila Mariana - Cep: 04126-060 - São Paulo/SP
Tel: 11 5954 8800 Fax: 11 5954 8801
www.eurofins.com.br



QA/QC – Spike

PARÂMETROS	UNIDADE	CONCENTRAÇÃO OBTIDA	CONCENTRAÇÃO TEÓRICA	RECUPERAÇÃO (%)	CRITÉRIO ACEITAÇÃO (%)	QA/QC	Ref.
Fluoreto Total	mg/L	0,951	1,00	95,1	75-125	3736/2017	499
Cloreto Total	mg/L	0,975	1,00	97,5	75-125	3736/2017	499
Nitrato (como N)	mg/L	0,227	0,226	100,5	75-125	3736/2017	499
Sulfato Total	mg/L	0,855	1,00	85,5	75-125	3736/2017	499
Cianeto (como HCN)	mg/kg	0,090	0,100	90,0	75-125	3630/2017	571
Cianeto	mg/L	0,091	0,100	91,0	75-125	3719/2017	571
Fluoreto Total	mg/L	0,920	1,00	92,0	75-125	3510/2017	576
Fenóis Totais	mg/L	0,195	0,200	97,5	75-125	3684/2017	626
Mercurio Total	mg/L	0,0020	0,0020	99,0	75-125	3615/2017	495
Mercurio Total	mg/L	0,0020	0,0020	98,0	75-125	3712/2017	495
Alumínio Total	mg/L	1,06	1,00	106,2	75-125	3709/2017	498
Arsênio Total	mg/L	0,11	0,100	114,1	75-125	3709/2017	498
Bário Total	mg/L	1,08	1,00	107,9	75-125	3709/2017	498
Cádmio Total	mg/L	1,04	1,00	104,1	75-125	3709/2017	498
Chumbo Total	mg/L	1,02	1,00	102,1	75-125	3709/2017	498
Cobre Total	mg/L	1,07	1,00	107,3	75-125	3709/2017	498
Cromo Total	mg/L	1,08	1,00	107,5	75-125	3709/2017	498
Ferro Total	mg/L	1,08	1,00	108,4	75-125	3709/2017	498
Manganês Total	mg/L	1,06	1,00	106,2	75-125	3709/2017	498
Prata Total	mg/L	0,62	0,500	123,7	75-125	3709/2017	498
Selênio Total	mg/L	0,10	0,100	95,7	75-125	3709/2017	498
Sódio Total	mg/L	1,03	1,00	102,8	75-125	3709/2017	498
Zinco Total	mg/L	1,03	1,00	102,8	75-125	3709/2017	498
Arsênio Total	mg/L	0,089	0,100	89,1	75-125	3614/2017	498
Bário Total	mg/L	0,897	1,00	89,7	75-125	3614/2017	498
Cádmio Total	mg/L	1,11	1,00	111,4	75-125	3614/2017	498
Chumbo Total	mg/L	1,02	1,00	101,7	75-125	3614/2017	498
Cromo Total	mg/L	0,874	1,00	87,4	75-125	3614/2017	498
Prata Total	mg/L	0,550	0,500	110,0	75-125	3614/2017	498
Selênio Total	mg/L	0,095	0,100	94,6	75-125	3614/2017	498
Aldrin + Dieldrin	mg/L	0,028988	0,040000	72,5	40-95	3091/2017	485
Clordano (Isômeros)	mg/L	0,029539	0,040000	73,8	40-95	3091/2017	485
DDT (Isômeros)	mg/L	0,043367	0,060000	72,3	40-95	3091/2017	485
Endrin	mg/L	0,013461	0,020000	67,3	40-95	3091/2017	485
Heptacloro e Heptacloro	mg/L	0,026592	0,040000	66,5	40-95	3091/2017	485
Epóxido	mg/L	0,013619	0,020000	68,1	40-95	3091/2017	485
Lindano (g-BHC)	mg/L	0,014528	0,020000	72,6	40-95	3091/2017	485
Metoxicloro	mg/L	0,448	0,800	56,0	40-95	3091/2017	485
Toxafeno	mg/L	0,027791	0,040000	69,5	40-95	3847/2017	485
Aldrin + Dieldrin	mg/L	0,025975	0,040000	64,9	40-95	3847/2017	485
Clordano (Isômeros)	mg/L	0,040786	0,060000	68,0	40-95	3847/2017	485
DDT (Isômeros)	mg/L	0,014101	0,040000	70,5	40-95	3847/2017	485
Endrin	mg/L	0,028234	0,020000	70,6	40-95	3847/2017	485
Heptacloro e Heptacloro	mg/L	0,014553	0,020000	72,8	40-95	3847/2017	485
Epóxido	mg/L	0,013521	0,020000	67,6	40-95	3847/2017	485
Lindano (g-BHC)	mg/L	0,420	0,800	52,5	40-95	3847/2017	485
Metoxicloro	mg/L	6,90	7,00	98,6	75-125	3151/2017	504
pH	-	1,92	2,00	96,0	75-125	3586/2017	837
Sulfeto (como H2S)	mg/kg	0,532	0,500	106,4	75-125	3703/2017	556
Surfactantes	mg/L	0,003	0,005	54,4	25-125	4187/2017	483
Pentaclorofenol	mg/L	0,004	0,005	70,7	25-125	4187/2017	483
2,4-Dinitrotolueno	mg/L	0,003	0,005	57,6	25-125	4189/2017	483
Pentaclorofenol	mg/L	0,004	0,005	76,4	25-125	4189/2017	483
2,4-Dinitrotolueno	mg/L	0,041	0,050	81,4	70-130	3559/2017	670
1,1-Dicloroetano	mg/L	0,064	0,050	128,1	70-130	3559/2017	670
Benzeno	mg/L	0,050	0,050	99,3	70-130	3559/2017	670
Clorobenzeno	mg/L	0,049	0,050	97,5	70-130	3559/2017	670
Tricloroetano	mg/L						



Anatech

Rua Bitencourt Sampaio, 105 - Vila Mariana - Cep: 04126-060 - São Paulo/SP
 Tel: 11 5904 8800 Fax: 11 5904 8801
 www.eurofins.com.br



Métodos e Datas dos ensaios

Ref.	Referência Externa	Referência Interna	Data do Preparo	Data da Análise	QA/QC
495	USEPA 7473:2007	POPLIN026	24/02/2017	24/02/2017	3712/2017
504	USEPA 9040C:2004	POPLAB010	16/02/2017	16/02/2017	3151/2017
571	SMEWW - 22nd Ed. 2012 - 4500CN- E	POPLIN024	24/02/2017	24/02/2017	3719/2017
681	USEPA 3550C:2007	POPLAB008	16/02/2017	17/02/2017	0/0
485	USEPA 8081B:2007	POPLOP018	28/02/2017	03/03/2017	3847/2017
556	SMEWW - 22nd Ed. 2012 - 5540C	POPLIN046	24/02/2017	24/02/2017	3703/2017
670	USEPA 8260C:2006	POPLOP013	23/02/2017	23/02/2017	3559/2017
499	USEPA 9056A:2007	POPLIN023.	24/02/2017	24/02/2017	3736/2017
576	SMEWW - 22nd Ed. 2012 - 4500F-C	POPLIN025	22/02/2017	22/02/2017	3510/2017
626	SM - 22nd Ed. 2012 - 5530D	POPLIN027	24/02/2017	24/02/2017	3684/2017
483	USEPA 8270D:2007	POPLOP015	20/02/2017	05/03/2017	4187/2017
483	USEPA 8270D:2007	POPLOP041	28/02/2017	06/03/2017	4189/2017
495	USEPA 7473:2007	POPLIN026	23/02/2017	24/02/2017	3615/2017
498	USEPA 6010C:2007	POPLIN002	23/02/2017	24/02/2017	3614/2017
498	USEPA 6010C:2007	POPLIN002	24/02/2017	24/02/2017	3709/2017
571	SMEWW - 22nd Ed. 2012 - 4500CN- E	POPLIN024	16/02/2017	16/02/2017	3630/2017
837	SMEWW - 22nd Ed. 2012 - 4500. S2-H	POPLIN039	15/02/2017	15/02/2017	3586/2017
485	USEPA 8081B:2007	POPLOP018	20/02/2017	01/03/2017	3091/2017
829	NBR 10004:2004	POPGE011	17/02/2017	17/02/2017	0/0



Anatech

Rua Bittencourt Sampaio, 105 - Vila Mariana - Cep: 04126-060 - São Paulo/SP
 Tel: 11 5904 8800 Fax: 11 5904 8801
 www.eurofins.com.br



4. Referências Externas

ABNT NBR 10004: 2004 - Classificação de Resíduos Sólidos
 ABNT NBR 10005: 2004 - Ensaio de Lixiviação
 ABNT NBR 10006: 2004 - Ensaio de Solubilização
 Standard Methods of Water and Wastewater – 21ª Edição.
 USEPA SW 846

5. Responsabilidade técnica

Ana Paula Ahualli	CRQ 4ª Região nº 04121814
-------------------	---------------------------

6. Informações Adicionais

- Procedimento e plano de amostragem foram definidos pelo cliente de acordo com o Projeto: 85% solo + 5% ZnCl₂ + 10% CAL
- Os resultados aqui apresentados referem-se exclusivamente às amostras enviadas pelo interessado, sendo que a amostragem não é de responsabilidade deste laboratório.
- O relatório de ensaio só deve ser reproduzido por completo. A reprodução parcial requer aprovação por escrita deste laboratório.
- Este relatório atende aos requisitos de acreditação da CGCRE que avaliou a competência do laboratório.
- As referências internas foram baseadas e validadas a partir das referências externas.

7. Anexos

Cadeia de Custódia e Check List.

8. Aprovação do relatório

Relatório aprovado segundo especificações comerciais e técnicas com base nos procedimentos do Sistema da Qualidade Analytical Technology e referências externas.

A validade jurídica dessa assinatura está embasada na medida provisória 2.200-2, de 24 de Agosto de 2001, a qual estabelece a autenticidade e a integridade do documento eletrônico com o uso do Certificado Digital.

Para verificar autenticidade deste documento acesse <http://relatorio.anatech.com.br/mylimsportal>, selecione a opção "Validar Documento", digite o seguinte número de amostra **15725/2017** e os últimos seis dígitos da chave de autenticação: **6ae62eb2d2fa6d491a2ae0047c85a935**

Fernanda Rodrigues da Silva
 CRQ 4ª Região nº 04163300
 Analista Químico(a)
 Responsável pela análise crítica e emissão do relatório.

Apêndice B – Relatório de Ensaios de Lixiviação e Solubilização para metais específicos



Anatech



RELATÓRIO DE ENSAIO

INTERESSADO: ISABEL AMADO PEREZ
Rua Marques de São Vicente - Predio Leme (Eng.Civil),
225 PUC - 3ª andar - Gávea
CEP: 22.430-060 - Rio de Janeiro/RJ

LABORATÓRIO CONTRATADO: Analytical Technology Serviços
Analíticos e Ambientais Ltda.

PROJETO: 85% solo + 5% ZnCl₂ + 10% CAL

IDENTIFICAÇÃO AT: LOG nº 3493/2017



Anatech

Rua Bittencourt Sampaio, 105 - Vila Mariana - Cep: 04128-060 - São Paulo/SP
Tel: 11 5954 8800 Fax: 11 5904 8801
www.eurofins.com.br



Dados referentes ao Projeto

1. Identificação das amostras

ID AT	IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO
15726/2017-1.0	AMOSTRA: 85% SOLO + 5% ZNCL2 + 10% CAL / DATA: 09/02/2017 /HORA:NÃO INFORMADO / MATRIZ: LIXIVIADO / PROJETO: 85% SOLO + 5% ZNCL2 + 10% CAL
15727/2017-1.0	AMOSTRA: 85% SOLO + 5% ZNCL2 + 10% CAL / DATA: 09/02/2017 /HORA:NÃO INFORMADO / MATRIZ: SOLUBILIZADO / PROJETO: 85% SOLO + 5% ZNCL2 + 10% CAL

2. Custódia das amostras

Data de recebimento de amostra: 09/02/2017

Data de emissão do relatório eletrônico: 10/03/2017

Período de retenção das amostras: até 10 dias após a emissão do relatório (até essa data as amostras estarão disponíveis para devolução e/ou checagem)



Anatech

Rua Bitencourt Sampaio, 105 - Vila Mariana - Cep: 04126-060 - São Paulo/SP
 Tel: 11 5954 8800 Fax: 11 5954 8801
 www.eurofins.com.br



3. Resultados de análises

PROJETO: 85% SOLO + 5% ZNCL2 + 10% CAL

MATRIZ: LIXIVIADO	DATA: 09/02/2017	HORA: NÃO INFORMADO
LOGIN: 15726/2017-1.0	PONTO: 85% SOLO + 5% ZNCL2 + 10% CAL	

FÍSICO-QUÍMICO						
Parâmetro	CAS	Diluição	Unidade	Resultados	L.Q	Ref.
Cloro Total	7782-50-5	1	mg/L	< 0,010	0,010	600
METAIS						
Parâmetro	CAS	Diluição	Unidade	Resultados	L.Q	Ref.
Zinco Total	7440-66-6	100	mg/L	459,8	7,00	498
Cálcio Total	14452-75-6	100	mg/L	1752,2	3,00	498
Enxofre Total	7704-34-9	1	mg/L	16,7	0,200	498
Silício Total	7440-21-3	1	mg/L	3,60	0,020	498
Alumínio Total	7429-90-5	1	mg/L	< 0,030	0,030	498

PROJETO: 85% SOLO + 5% ZNCL2 + 10% CAL

MATRIZ: SOLUBILIZADO	DATA: 09/02/2017	HORA: NÃO INFORMADO
LOGIN: 15727/2017-1.0	PONTO: 85% SOLO + 5% ZNCL2 + 10% CAL	

FÍSICO-QUÍMICO						
Parâmetro	CAS	Diluição	Unidade	Resultados	L.Q	Ref.
Cloro Total	7782-50-5	1	mg/L	< 0,010	0,010	600
METAIS						
Parâmetro	CAS	Diluição	Unidade	Resultados	L.Q	Ref.
Cálcio Total	14452-75-6	100	mg/L	1233,7	3,00	498
Enxofre Total	7704-34-9	1	mg/L	11,6	0,200	498
Silício Total	7440-21-3	1	mg/L	0,345	0,020	498



Anatech

Rua Bitencourt Sampaio, 105 - Vila Mariana - Cep: 04128-080 - São Paulo/SP
Tel: 11 5954 8800 Fax: 11 5954 8801
www.eurofins.com.br



QA/QC – Branco de Análise

Parâmetro	Unidade	Resultados	LQ	QA/QC	Ref.
Alumínio Total	mg/L	< 0,014	0,014	3821/2017	498
Alumínio Total	mg/L	< 0,030	0,030	3961/2017	498
Cálcio Total	mg/L	< 0,014	0,014	3821/2017	498
Cálcio Total	mg/L	< 0,030	0,030	3961/2017	498
Enxofre Total	mg/L	< 0,092	0,092	3821/2017	498
Enxofre Total	mg/L	< 0,200	0,200	3961/2017	498
Silício Total	mg/L	< 0,020	0,020	4000/2017	498
Zinco Total	mg/L	< 0,032	0,032	3821/2017	498
Zinco Total	mg/L	< 0,070	0,070	3961/2017	498
Cloro Total	mg/L	< 0,009	0,009	3714/2017	600

QA/QC – Spike

Parâmetro	Unidade	Concentração Teórica	Concentração Obtida	Recuperação	Critério Aceitação (%)	QA/QC	Ref.
Alumínio Total	mg/L	1,00	0,945	94,5	75-125	3821/2017	498
Alumínio Total	mg/L	1,00	0,946	94,6	75-125	3961/2017	498
Cálcio Total	mg/L	1,00	1,15	114,6	75-125	3821/2017	498
Cálcio Total	mg/L	1,00	0,915	91,5	75-125	3961/2017	498
Enxofre Total	mg/L	1,00	1,02	101,6	75-125	3821/2017	498
Enxofre Total	mg/L	1,00	0,993	99,3	75-125	3961/2017	498
Silício Total	mg/L	1,00	0,985	98,5	75-125	4000/2017	498
Zinco Total	mg/L	1,00	0,762	76,2	75-125	3961/2017	498
Zinco Total	mg/L	1,00	0,782	78,2	75-125	3821/2017	498
Cloro Total	mg/L	0,500	0,521	104	75-125	3714/2017	600

Métodos e Datas dos ensaios

Ref.	Referência Externa	Referência Interna	Data do Preparo	Data da Análise	QA/QC
498	USEPA 6010C:2007	POPLIN002	10/03/2017	24/02/2017	3821/2017
498	USEPA 6010C:2007	POPLIN002	03/03/2017	24/02/2017	3961/2017
498	USEPA 6010C:2007	POPLIN002	03/03/2017	24/02/2017	4000/2017
600	SMEWW - 22nd Ed. 2012 - 4500Cl-G	POPLIN048	24/02/2017	24/02/2017	3714/2017
681	USEPA 3550C:2007	POPLAB008	16/02/2017	17/02/2017	0/0

Observações:

LQ: Limite de Quantificação



Rua Bittencourt Sampaio, 105 - Vila Mariana - Cep: 04128-080 - São Paulo/SP
 Tel: 11 5904 8800 Fax: 11 5904 8801
 www.eurofins.com.br



4. Responsabilidade técnica

Ana Paula Ahualli	CRQ 4ª Região nº 04121814
-------------------	---------------------------

5. Informações Adicionais

- Procedimento e plano de amostragem foram definidos pelo cliente de acordo com o Projeto: 85% solo + 5% ZnCl₂ + 10% CAL
- Os resultados aqui apresentados referem-se exclusivamente às amostras enviadas pelo interessado, sendo que a amostragem não é de responsabilidade deste laboratório.
- O relatório de ensaio só deve ser reproduzido por completo. A reprodução parcial requer aprovação por escrita deste laboratório.
- Este relatório atende aos requisitos de acreditação da CGCRE que avaliou a competência do laboratório.
- As referências internas foram baseadas e validadas a partir das referências externas.

6. Anexos

Cadeia de Custódia e Check List.

7. Aprovação do relatório

Relatório aprovado segundo especificações comerciais e com base nos documentos do Sistema da Qualidade Analytical Technology.

A validade jurídica dessa assinatura está embasada na medida provisória 2.200-2, de 24 de Agosto de 2001, a qual estabelece a autenticidade e a integridade do documento eletrônico com o uso do Certificado Digital.

Para verificar autenticidade deste documento acesse <http://relatorio.anatech.com.br/mylmsportal>, selecione a opção "Validar Documento", digite o seguinte número de amostra **15727/2017** e os últimos seis dígitos da chave de autenticação: **2c8d43888d7f92ee1be8648a9929bb15**

Carla Raquel Rodrigues
 CRQ 4ª Região nº 04268000
 Analista Químico(a)
 Responsável pela análise crítica e emissão do relatório.