

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Avaliação do desempenho mecânico e hidráulico de uma lama de
preenchimento de barreiras verticais com diferentes dosagens e
técnicas de cimentação.**

Laís Rodrigues da Costa Chaves

Porto Alegre
2020

LAÍS RODRIGUES DA COSTA CHAVES

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO E
HIDRÁULICO DE UMA LAMA DE PREENCHIMENTO DE
BARREIRAS VERTICAIS COM DIFERENTES DOSAGENS E
TÉCNICAS DE CIMENTAÇÃO.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia.

Porto Alegre
2020

LAÍS RODRIGUES DA COSTA CHAVES

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO E
HIDRÁULICO DE UMA LAMA DE PREENCHIMENTO DE
BARREIRAS VERTICAIS COM DIFERENTES DOSAGENS E
TÉCNICAS DE CIMENTAÇÃO.**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Área de Concentração Geotecnia e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 29 de dezembro de 2020

Prof^a. Karla Salvagni Heineck (UFRGS)
Dr^a. pela Universidade federal do Rio Grande do Sul
orientadora

Prof. Nilo Cesar Consoli
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Michéle Dal Toé Casagrande (UnB)
Dr^a. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Nilo Cesar Consoli (UFRGS)
Ph.D. pela Concordia University

Prof. Lucas Festugato (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a minha família, pela pelo incentivo e
compreensão durante o todo desenvolvimento deste
trabalho.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço à Deus, meu grande provedor, por me sustentar ao longo de toda minha vida, me guardando de todo o mal, iluminando cada decisão tomada e me guiando segundo a sua vontade, toda honra e glória a ti meu senhor!

Agradeço a meu pai e mãe, por cada esforço despendido, assim como as privações que passaram para me ajudar a chegar até aqui, a minha irmã, pelo auxílio nas minhas dificuldades e por estar sempre presente quando preciso.

Agradeço especialmente ao grande amor da minha vida Helder Mansur Chaves, que sempre me apoiou durante nossa caminhada de vida, tanto no âmbito acadêmico, pessoal e profissional. Obrigada por estar ao meu lado todos esses anos, em especial durante a vinda de nossa filha Heloísa da Costa Chaves, à qual dedico essa vitória.

Agradeço à minha orientadora Karla Salvagni Heineck por todo apoio, conhecimento transmitido, confiança e disponibilidade em me orientar, mesmo diante de todas as dificuldades.

Agradeço aos professores Gérson Miranda, Nilo Consoli, Lucas Festugato, e Sérgio Marques, pelo apoio, amizade, incentivo, motivação e disponibilidade em ajudar a qualquer momento durante a realização do mestrado.

Agradeço aos amigos que sempre estiveram presentes durante essa caminhada, Samuel Bandeira, Aziz Tebechrani, Gustavo Dias, Luciana Queiroz, Max Deluan, Andres Lotero, Cindy Moncaleano, Camila Martinatto, Mariana Tonini, Suéllen Ferrazzo, Flávio Ferreira, Giovani Bruschi, Mozara Benetti, Rosanne Santos, Bruna Hoch e a todos integrantes da PPGE, especialmente à família LEGG.

Agradeço à UFRGS pela oportunidade em cursar um mestrado de excelência. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa concedida e pelo financiamento deste trabalho.

Se o Senhor não construir a casa, em vão trabalharão os
construtores.

Salmos, 127

RESUMO

CHAVES, L.R. da C. **Avaliação do desempenho mecânico e hidráulico de uma lama de preenchimento de barreiras verticais com diferentes dosagens e técnicas de cimentação.** 2020. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Dentre os métodos de remediação de contaminantes nos solos, as barreiras hidráulicas verticais são conhecidas por utilizar cimento e bentonita para contenção de plumas de contaminação em água subterrânea. Tendo em vista a atual preocupação com os danos causados ao meio ambiente devido à produção de cimento do tipo Portland, a dissertação tem por objetivo analisar o comportamento hidráulico e mecânico de misturas de solo, bentonita sódica e técnicas cimentantes alternativas ao cimento Portland, visando seu potencial de utilização como material de preenchimento de barreiras de contenção submetidas a contaminação por soda cáustica (NaOH). A matriz das misturas consiste de um solo areno-siltoso característico da região de São Leopoldo/RS, adicionando-se neste bentonita sódica, que auxiliará na diminuição da condutividade hidráulica das amostras, e material cimentante, para ganho de resistência. Foram comparadas misturas de Cimento Portland tipo CP V e CP IV, com duas técnicas de cimentação alternativa, com baixa e alta alcalinidade inicial, tendo como precursor o resíduo da fibra de vidro moída (RFVM), um subproduto do processo de controle de fabricação da fibra de vidro. Como ativador de baixa alcalinidade inicial, foi utilizado a cal de carbureto (CC), resíduo da produção do gás acetileno. Como ativador de alta alcalinidade inicial, foi utilizada a CC e uma solução de NaOH e Na₂SiO₃. Para o estudo do comportamento mecânico, foram realizados ensaios de resistência à compressão simples e mini abatimento de cone, em diversas relações água/cimento. Foram ainda avaliadas as interações entre os materiais utilizados, percolados inicialmente com água e posteriormente com o agente contaminante, medindo-se o pH durante o ensaio de condutividade hidráulica, para verificar possíveis alterações devido ao contato com esse. Os resultados demonstram que, para cimentos alternativos, a utilização de ativadores com alta alcalinidade inicial, aumentam a resistência e melhoram o desempenho da estrutura cimentada quando submetidas ao contaminante. Além disso, tais amostras apresentaram valores de condutividade hidráulica a longo prazo entre 10⁻⁸ e 10⁻⁹ cm/s, valores condizentes com os comumente utilizados para barreiras hidráulicas verticais.

Palavras-chave: *Barreiras Hidráulicas Verticais; Ativação alcalina; Resíduos Industriais.*

ABSTRACT

CHAVES, L.R. da C. **Evaluation of the mechanical and hydraulic performance of a slurry used as backfill for vertical barriers sludge with different dosages and cementation techniques.** 2020. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Among the methods of remediation of contaminants in soils, vertical hydraulic barriers are known for using cement and bentonite to contain contamination plumes in groundwater. In view of the current concern with damage to the environment due to the production of Portland cement, this work aims to analyze the hydraulic and mechanical behavior of mixtures of soil, sodium bentonite and cementing techniques alternative to Portland cement, aiming at its potential for use as filling material for containment barriers subjected to caustic soda (NaOH) contamination. The mixtures matrix consists of a sandy-silty soil characteristic of the region of São Leopoldo/RS, adding to this sodium bentonite, which will assist in decreasing the hydraulic conductivity of the samples, and cementing material, for strength gain. Were compared mixtures of Portland cement type CP V and CP IV, with two alternative cementation techniques, with low and high initial alkalinity, having as a precursor the ground glass fiber residue (RFVM), a by-product of the manufacturing control process of the fiberglass company. As a low initial alkalinity activator, carbide lime (CC), residue from the production of acetylene gas, was used. As an initial high alkalinity activator, CC and a solution of NaOH and Na₂SiO₃ were used. For the study of mechanical behavior, tests of resistance to simple compression and mini cone slump were carried out, in different water/cement ratios. The interactions between the materials used were also evaluated, percolated initially with water and later with the contaminating agent, measuring the pH during the hydraulic conductivity test, to check for possible changes due to contact with it. The results demonstrate that, for alternative cements, the use of activators with high initial alkalinity, increase the strength and improve the performance of the cemented structure when subjected to the contaminant. In addition, such samples showed long-term hydraulic conductivity values between 10⁻⁸ and 10⁻⁹, values consistent with those commonly used for vertical hydraulic barriers.

Key-words: *Vertical Hydraulic Barriers; action of alkalis; Industrial waste.*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 ASPECTOS GERAIS	11
1.2 JUSTIFICATIVA	12
1.3 OBJETIVO GERAL	13
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 CONTAMINAÇÕES ALCALINAS	14
2.1.1 Hidróxido de Sódio (NaOH)	14
2.1.2 Impactos das Contaminações Alcalinas nos Cursos d'água	16
2.1.3 Impactos das Contaminações Alcalinas nos Solos	17
2.2 DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA	20
2.2.1 Permeâmetros	23
2.2.1.1 Permeâmetro de Parede Rígida	24
2.2.2 Transporte de Contaminantes em Solos	25
2.3 BARREIRAS HIDRÁULICAS VERTICAIS (<i>SLURRY WALLS</i>)	27
2.3.1 Conhecimentos Básicos	27
2.3.2 Propriedades Hidráulicas	31
2.3.3 Propriedades Mecânicas	33
2.3.4 Efeito dos Poluentes nas Barreiras de Contaminantes	34
2.4 AGENTES CIMENTANTES	36
2.4.1 Cimento Portland	37
2.4.1.1 Hidratação do Cimento Portland	38
2.4.1.2 Reatividade Pozolânica	40
2.4.2 Ativação Alcalina	41
2.4.2.1 Ativadores	42

2.4.2.2 Precusores	45
2.5 COMPORTAMENTO MECÂNICO E HIDRÁULICO DE SOLOS CIMENTADOS	46
3 MATERIAIS E MÉTODOS	48
3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL	48
3.1.1 Variáveis Investigadas	49
3.1.1.1 Variáveis Controláveis	49
3.1.1.2 Variáveis Constantes	49
3.1.1.3 Variáveis Dependentes	49
3.1.2 Ensaios Preliminares de Caracterização	49
3.1.3 Definição das Dosagens	50
3.1.4 Definição do Teor de Álcalis	52
3.1.5 Planejamento Experimental	53
3.2 MATERIAIS	54
3.2.1 Bentonita Sódica – BS	54
3.2.2 Solo Residual Arenito Botucatu – SRAB	56
3.2.3 Cimento Portland pozolânico - CP IV	57
3.2.4 Cimento Portland de Alta Resistência Inicial - CP V-ARI	58
3.2.5 Cal de Carbureto	58
3.2.6 Resíduo da Fibra de Vidro Moído - RFVM	61
3.2.7 Hidróxido de Sódio – NaOH	64
3.2.8 Silicato de Sódio – Na ₂ SiO ₃	64
3.2.9 Água	64
3.3 MÉTODOS	64
3.3.1 Ensaios de Compressão Simples	64
3.3.2 Mini Abatimento de Cone	66
3.3.3 Ensaios de condutividade hidráulica	67
3.3.3.1 Montagem do Permeômetro	67
3.3.3.2 Preparação dos Corpos de Prova	69
3.3.3.3 Permeação	70

3.3.4 Medição do pH	71
4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	72
4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)	72
4.1.1 CPV	73
4.1.2 CPIV	75
4.1.3 RFVM _p	76
4.1.4 RFVM _a	77
4.1.5 Relação entre a RCS e fator a/c (4)	79
4.1.6 Relação entre a RCS e fator a/c (3,5)	80
4.1.7 Relação entre a RCS e fator a/c (3)	81
4.1.8 Relação entre a RCS e fator a/c (2,5)	82
4.2 MINI ABATIMENTO DE CONE	83
4.3 ENSAIOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA	85
4.3.1 Análise de pH ao longo da percolação	91
4.3.2 Relação entre a condutividade hidráulica e o abatimento	93
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
5.1 MICROESTRUTURA DAS MATÉRIAS-PRIMAS (LEMOS, 2006) .	95
5.2 SÍNTESE DOS RESULTADOS	96
5.2.1 Resistência a Compressão Simples	96
5.2.2 Mini abatimento de cone	97
5.2.3 Condutividade hidráulica	97
5.2.4 Medição do pH	99
5.3 CONCLUSÕES	100
5.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Hidróxido de sódio: a) em lentilhas; b) Queimadura por contato (SILVA, 2012)	15
Figura 2.2: Experimento de Darcy (adaptado de BEAR, 1979)	21
Figura 2.3: método construtivo das Barreiras Hidráulicas Verticais: a) deposição do material de preenchimento no trecho; b) mistura do Solo-Cimento-bentonita in situ. (RYAN e DAY, 2002)	28
Figura 2.4: Formação do filter cake: a) deposição das partículas coloidais nos vazios do solo; b) filtração da lama por diferença de pressões; c) formação do filme protetor ao longo da face da escavação (adaptado de XANTHAKOS, 1979)	29
Figura 2.5: Esquema do desenvolvimento da microestrutura da pasta de cimento durante a hidratação (COUTINHO, 2002)	39
Figura 3.1: RCS para dosagem do teor de álcalis de Na ₂ O: a) 2% Na ₂ O (Na ₂ SiO ₃); b) 6% Na ₂ O (Na ₂ SiO ₃)	53
Figura 3.2: Curva granulométrica da BS	55
Figura 3.3: Mapa da bacia do Paraná (RIOS, 2017)	56
Figura 3.4: Curva granulométrica do SRAB	57
Figura 3.5: Curva granulométrica da CC (QUEIROZ, 2019)	59
Figura 3.6: Difractometria de raios X da CC. (QUEIROZ, 2019)	60
Figura 3.7: análise térmica da CC (SALDANHA, 2018)	60
Figura 3.8: MEV da CC: a) 500x; b) 1000x (QUEIROZ, 2019)	61
Figura 3.9: Curva granulométrica do RFVM (QUEIROZ, 2019)	61
Figura 3.10: Difractometria de raios X da RFVM. (QUEIROZ, 2019)	62
Figura 3.11: análise térmica do RFVM (QUEIROZ, 2019)	63
Figura 3.12: MEV do RFVM: a) 500x; b) 1000x (QUEIROZ, 2019)	63
Figura 3.13: RCS: a) molde partido; b) base do molde; c) armazenamento dos CP's	65
Figura 3.14: Mini Abatimento de Cone: a) molde; b) sistema de ensaio	66
Figura 3.15: Mini Abatimento de Cone: a) medição do abatimento; b) medição do espalhamento das amostras	67

Figura 3.16: Esquema do permeametro de parede rígida	68
Figura 3.17: Moldagem dos Corpos de Prova: a) bateadeira industrial; b) mistura homogeneizada; c) cilindros com anel de moldagem	69
Figura 3.18: Fechamento da célula da amostra: a) retirada do anel de moldagem; b) regularização da superfície; c) papel filtro + malha de aço	70
Figura 3.19: Medição de pH: a) pHmetro; b) eletrodo de pH e sensor de temperatura ..	71
Figura 4.1: Gráfico de Resistência por idade CP V ARI	74
Figura 4.2: Gráfico de Resistência por idade CP IV	76
Figura 4.3: Gráfico de Resistência por idade RFVMp	77
Figura 4.4: Gráfico de Resistência por idade RFVMa	79
Figura 4.5: Gráfico da Relação entre RCS e fator a/c (4)	80
Figura 4.6: Gráfico da Relação entre RCS e fator a/c (3,5)	81
Figura 4.7: Gráfico da Relação entre RCS e fator a/c (3)	82
Figura 4.8: Gráfico da Relação entre RCS e fator a/c (2,5)	83
Figura 4.9: Gráfico das Alturas de Cone das Misturas	84
Figura 4.10: Ensaio Mini Abatimento de Cone: a) RFVMa (3); b) RFVMa (2,5)	84
Figura 4.11: Condutividade hidráulica CPV (4): a) Corpo de prova após percolação; b) divisão do CP; c) Moldagem CP's 5x10	86
Figura 4.12: Condutividade hidráulica RFVMp (4): a) Ruptura Hidráulica; b) Perda de Volume; c) Líquido Percolado	86
Figura 4.13: Condutividade hidráulica RFVMa (4): a) CP antes da Percolação; b) CP após Percolação; c) CP desmoldado	87
Figura 4.14: Condutividade hidráulica RFVMp x CPIV	88
Figura 4.15: Condutividade hidráulica RFVMa (2,5): a) CP desmoldado; b) Divisão do CP 15x15	88
Figura 4.16: Condutividade hidráulica RFVMa (1,5): a) CP após percolação; b) Equipamento de Extração	89
Figura 4.17: Condutividade hidráulica RFVMa x CPV	90
Figura 4.18: Condutividade hidráulica RFVMp x CP IV	90
Figura 4.19: Condutividade hidráulica x volume de vazios	91

Figura 4.20: pH: CP V x CP IV x RFVMp	92
Figura 4.21: pH: CP V x RFVMa	93
Figura 4.22: Abatimento x Condutividade Hidráulica	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Parâmetros típicos para material de preenchimento (ANDROMALOS e FISHER, 2001)	34
Tabela 3.1: Ensaio de caracterização e análise química dos materiais	50
Tabela 3.2: Teores de Matérias Primas para cada mistura	52
Tabela 3.3: Resultados RCS para definição do Teor de Álcalis	53
Tabela 3.4: Número de ensaios realizados	54
Tabela 3.5: Características físicas da BS	55
Tabela 3.6: Análise química da BS	56
Tabela 3.7: Características físicas do SRAB	57
Tabela 3.8: Características físicas do CPIV	58
Tabela 3.9: Características físicas do CP V-ARI	58
Tabela 3.10: Características físicas da CC	59
Tabela 3.11: Análise química da CC. (QUEIROZ, 2019)	59
Tabela 3.12: Características físicas do RFVM	62
Tabela 3.13: Análise química da RFVM. (QUEIROZ, 2019)	62
Tabela 4.1: Características Físicas Médias dos Corpos de Prova 5x10	73
Tabela 4.2: Resultados RCS CP V ARI	74
Tabela 4.3: Resultados RCS CP IV	75
Tabela 4.4: Resultados RCS RFVMp	76
Tabela 4.5: Resultados RCS RFVMA	78
Tabela 4.6: Abatimento e Espalhamento das Misturas	83
Tabela 4.7: Propriedades das misturas (Corpo de Prova 15x15)	85
Tabela 4.8: Resultados de condutividade hidráulica	92

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

SB	Mistura SRAB-BS
SCB	Mistura solo-cimento-BS
SRAB	Solo residual arenito botucatu
BS	Bentonita sódica
CPIV(a/c)	Mistura cimento Portland pozolânico-SRAB-BS
CPV(a/c)	cimento Portland de alta resistência inicial-SRAB-BS
RFVM	Resíduo da fibra de vidro moído
RFVMa(a/c)	Mistura RFVM-SRAB-BS-CC-ativadores de alta alcalinidade inicial
CC	Cal de carbureto
RFVMp(a/c)	Mistura RFVM-SRAB-BS-CC-ativadores de baixa alcalinidade inicial
pH	Potencial hidrogeniônico
a/c	Fator água/cimento
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
ANA	Agência Nacional de Águas
IQA	Índice de Qualidade da Água
A	Área
L	Espessura
Q	Taxa de escoamento ou vazão do fluido
k	Coefficiente de permeabilidade intrínseca do solo
μ	viscosidade dinâmica do fluido
ΔP	Diferença de pressão aplicada na amostra ou perda de carga
v	Velocidade superficial do fluxo
i	Gradiente hidráulico
K	Constante de proporcionalidade
ρ	Densidade do fluido percolante

<i>g</i>	Aceleração
ν	Viscosidade cinemática do fluido
m	Metros
s	Segundos
V	Volume
kPa	Unidade de pressão quilopascal
C-S-H	Silicatos de cálcio hidratados
B.E.T.	Teoria de absorção multimolecular
t	tempo
CCA	Cinza da casca do arroz
SA	Sílica ativa
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
Å	Angstrom
CTC	Capacidade de troca catiônica
D ₅₀	Diâmetro mediano das partículas
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
IP	Índice de plasticidade
G _s	Massa específica real dos grãos
SSA	Superfície específica
DTG	Análise termogravimétrica
CP	Corpo de prova
DRX	Difratometria de raio X
FRX	Fluorescência de raio X
RCS	Resistência a compressão simples
D	Diâmetro

ϕ	Diâmetro
h	Altura
kgf	Quilograma força
°C	Graus Celsius
IR	Índice de retração
Perc.	Percolado
VV	Volume de vazios
LEGG	Laboratório de Ensaios Geotécnicos e Geoambientais
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será descrito de forma breve os aspectos gerais deste estudo, a justificativa para sua realização, com foco no problema central, ligado à busca de novos materiais cimentantes para melhoria das propriedades hidráulicas e mecânicas de barreiras hidráulicas verticais, além dos objetivos geral e específicos que se almeja alcançar.

1.1 ASPECTOS GERAIS

Esta pesquisa busca encontrar uma alternativa viável ao cimento Portland, utilizado como agente estruturante em barreiras hidráulicas verticais. Para isso, serão testadas diferentes matérias primas e misturas, sendo realizados estudos de caracterização física e química previamente, bem como a percolação do agente contaminante através de ensaios de determinação da condutividade hidráulica, com análises posteriores dos efeitos microestruturais e na resistência oriundos do contato das misturas com a soda cáustica.

Foram realizados ensaios em amostras contendo solo-bentonita (SB) e solo-cimento-bentonita (SCB), pois representam as configurações mais utilizadas como material de preenchimento nas barreiras hidráulicas verticais. Foi escolhido um solo residual areno-siltoso, que apresenta menor porcentagem de partículas plásticas em comparação com os recomendados na literatura, o que levou a uma dosagem diferente das normalmente utilizadas nas barreiras hidráulicas, equiparando-se aos valores de condutividade hidráulica obtidos com solos argilosos.

A bentonita utilizada em todas as amostras foi a bentonita sódica, cuja atração intercamadas é menor em comparação com bentonitas cálcicas, fornecendo maior viscosidade. Nas misturas SCB, o cimento Portland utilizado será o cimento Portland pozolânico (CP IV) e o de alta resistência inicial (CP V), que são produzidos no Brasil com alto padrão de qualidade.

Posteriormente, foram realizados ensaios em amostras contendo solo, bentonita e materiais álcali-ativados, tendo como ativadores a cal de carbureto e uma mistura de hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (Na_2SiO_3), como agente precursor foi utilizado o resíduo da fibra de vidro moído (RFVM).

1.2 JUSTIFICATIVA

A atividade industrial é responsável pela geração de grande quantidade de resíduos, que geralmente são depositados no meio ambiente sem um destino final adequado, muitas vezes de forma irregular, gerando impactos ambientais, sociais e econômicos.

A indústria da construção civil está entre os setores mais impactantes ao meio ambiente com danos provenientes desde a exploração de matérias primas até a geração de resíduos. A produção de cimento Portland, principal matéria prima utilizada na construção civil, gera grandes impactos ambientais, o que tem motivado a realização de diversas pesquisas de materiais alternativos a este agente. A reincorporação de resíduos industriais nesse setor traz uma alternativa de minimização dos impactos ambientais causados.

Os principais materiais utilizados na substituição do cimento são os obtidos através da ativação alcalina. O material álcali-ativado possui propriedades comparáveis a de uma pasta de cimento, sendo obtido a partir de um precursor à base de silicatos ou aluminossilicatos na forma de pó e um ativador alcalino, que proporciona ao meio de reação um elevado pH, podendo ser empregado como solução aquosa ou em pó.

Com relação ao estudo desses materiais, a cimentação foi realizada para diferentes fatores água/cimento (a/c), tendo como ativador a cal de carbureto, um resíduo industrial obtido através da reação química do carbeto de cálcio com água na produção do gás acetileno; e uma mistura de O hidróxido de sódio (NaOH), produto químico altamente solúvel e miscível na presença de água, obtido pelo processo cloro-alcálico, e Silicato de sódio (Na_2SiO_3), que é um composto inorgânico obtido pela combinação de SiO_2 (dióxido de silício ou sílica) e Na_2O (óxido de sódio).

Como agente precursor foi estudado o resíduo da fibra de vidro moído, obtido a partir da fabricação da fibra de vidro.

Como agente contaminante foi empregado a soda cáustica, que é amplamente utilizado em indústrias eletrônicas, farmacêuticas, fotográfica, alimentícias, de tintas e corantes, de bebidas (para lavagem de frascos), no tratamento de celulose, como matéria-prima para refratários, entre outras funções. Porém seu descarte irregular gera impactos ao meio ambiente, contaminando o solo e águas subterrâneas. Logo, este trabalho busca estudar a eficiência de barreiras hidráulicas

na contenção desse contaminante, com a utilização de materiais alternativos ao cimento Portland, analisando as propriedades de condutividade hidráulica e propriedades físicas da barreira, após a interação com o contaminante.

1.3 OBJETIVO GERAL

Analisar o comportamento hidráulico e mecânico de misturas de solo areno-siltoso, bentonita sódica e materiais cimentantes alternativos ao cimento Portland.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) verificar se as misturas, com diferentes fatores a/c, atendem aos padrões de condutividade hidráulica para serem consideradas barreiras hidráulicas verticais;
- b) avaliar a viabilidade de substituição do cimento Portland por resíduos descartados pela indústria, dando-lhes uma destinação final mais adequada;
- c) classificar a eficiência dos agentes cimentantes, utilizando como padrão o cimento Portland.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo busca compreender a importância dos métodos de contenção de contaminantes nos solos e mananciais subterrâneos para a proteção e desenvolvimento dos ecossistemas atuais, através de estudos ligados à geotecnia ambiental, tendo como foco as contaminações alcalinas derivadas da produção industrial. A partir desse tema inicial, será realizado um estudo do método de contenção por barreiras hidráulicas verticais, suas características e potenciais vinculados a utilização de técnicas alternativas de cimentação, buscando aumentar o ganho ambiental.

2.1 CONTAMINAÇÕES ALCALINAS

O termo contaminante é utilizado quando substâncias são introduzidas num meio como resultado da ação do homem. A contaminação pode ocorrer nos diversos componentes ambientais, incluindo a litosfera (solo e rocha), hidrosfera, atmosfera e biosfera. Uma atenção especial deve ser dada à contaminação da água subterrânea, devido à sua importância como recurso hídrico. Ressalta-se, ainda, que os impactos da contaminação normalmente são de longa duração, de difícil remediação e de alto custo.

Com desenvolvimento das atividades industriais, diversas cadeias de produção foram se atrelando para a geração de tecnologias. Novas fontes de energia, transporte de insumos e etapas de produção passaram a ser utilizados. Em grande parte desses processos, ocorre o uso de matérias-primas altamente alcalinas, ligado ao beneficiamento de produtos e à higiene geral.

2.1.1 Hidróxido de Sódio (NaOH)

A soda cáustica, ou hidróxido de sódio (NaOH), é um reagente de origem natural, com elevado Potencial hidrogeniônico (pH), apresentando-se como uma substância fortemente alcalina de alto poder corrosivo. Segundo Silva (2012), o uso das soluções de NaOH datam do século XVIII, porém sua fabricação industrial para comercialização é atribuída ao químico francês Nicolas LeBlanc, que inventou em 1853 o processo de fabricação LeBlanc, que consiste na passagem de corrente elétrica por uma solução contendo cloreto de sódio (sal) e água, originalmente a partir do sal marinho. Durante esse processo ocorre a quebra e reagrupamento as moléculas para a formação de soda cáustica, cloro e hidrogênio. A produção resulta numa

proporção fixa de 1,12 tonelada de soda cáustica para cada 1 tonelada de cloro. (FERNANDES; GLÓRIA; GUIMARÃES, 2009)

As principais aplicações da soda cáustica estão ligadas ao branqueamento de celulose, produção de alumina, plástico, vidro, sabões e detergentes, sendo ainda utilizadas nas indústrias eletrônica, farmacêutica, fotográfica, de tintas, têxtil e de alimentos, possuindo também um papel importante no tratamento de efluentes e potabilidade da água para uso humano, quando utilizada em baixas concentrações. Porém, quando mal administrada, pode gerar sérios danos ao meio ambiente e à saúde pública.

Devido ao seu alto poder corrosivo, a soda cáustica é classificada como produto perigoso e possui uma série de restrições, quanto a fabricação, transporte e manuseio. A Resolução nº 5.232/16 da ANTT a descreve como Classe 8 (substância corrosiva), que contempla substâncias que, “(...) por ação química, causam severos danos quando em contato com tecidos vivos ou, em caso de vazamento, danificam ou destroem outras cargas ou o próprio veículo”. (BRASIL, 2016)

Quanto à reatividade química com água, ao dissolver libera muito calor, podendo evaporar, recomenda-se para diluí-lo, adicionar o produto sobre a água, mas nunca o inverso. Em relação à sua reatividade química com metais, quando molhado, ataca o alumínio, chumbo, estanho, zinco, produzindo gás hidrogênio inflamável. O contato ao pó desse produto pode trazer consequências à saúde humana, como irritação no nariz, garganta e olhos. Já o contato ao produto sólido traz consequências de queimaduras na pele, olhos e se ingerido é prejudicial à saúde. (CETESB, 2014).

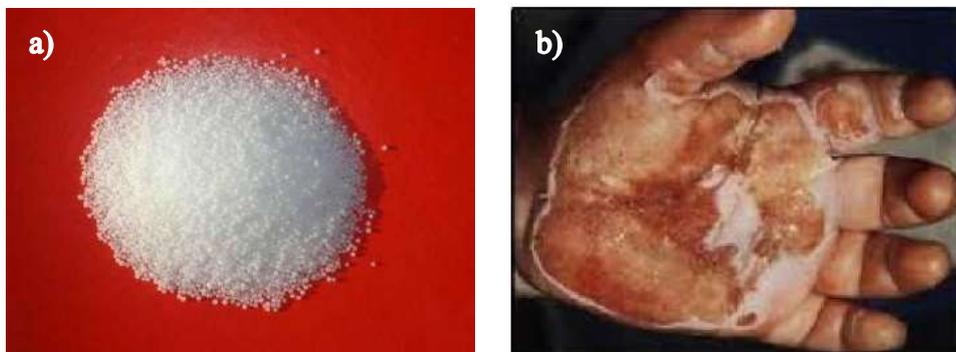


Figura 2.1: Hidróxido de sódio: a) em lentilhas; b) Queimadura por contato (SILVA, 2012).

No Brasil, existem diversos acidentes ambientais ligados à contaminação por soda cáustica. Os casos mais graves estão ligados à utilização da soda cáustica nas diversas indústrias. Em 2003, ocorreu o rompimento de uma barragem de celulose na região de Cataguases (MG), com vazamento de 900.000 m³ de rejeitos compostos por resíduos orgânicos e soda cáustica. Os resíduos atingiram os rios Pomba e Paraíba do Sul, originando prejuízos ao ecossistema e à população ribeirinha, que teve o abastecimento de água interrompido (ALMEIDA, 2015). Em fevereiro de 2018, ocorreram dois casos envolvendo despejos de soda cáustica em rios brasileiros. Um deles ocorreu no estado da Paraíba, devido ao vazamento em um tanque que armazenava soda cáustica utilizada no tratamento da água da estação de tratamento de água da Companhia de Água e Esgoto da Paraíba (Cagepa), despejando cerca de 40 mil litros de soda cáustica no Rio Gramame, próximo a João Pessoa (COSTA, 2018). O segundo foi registrado no estado do Pará, onde houve a contaminação do rio Murucupi, localizado no município de Barcarena, durante as fortes chuvas, que causaram o transbordo de uma barragem de rejeitos, oriundos do processo de beneficiamento da bauxita, compostos por metais pesados e soda cáustica. O Instituto de perícias científicas Evandro Chagas analisou amostras da água do rio e identificou um alto valor de pH (10), indicando uma solução extremamente alcalina, além de níveis de Alumínio 25 vezes mais altos que os estabelecidos pela legislação, e constatou ainda que a empresa possuía uma tubulação que despejava resíduos diretamente no meio-ambiente, conforme o laudo da perícia (SENRA, 2018).

2.1.2 Impactos das Contaminações Alcalinas nos Cursos d'água

A soda cáustica, em solução ou na forma sólida, é uma substância extremamente alcalina que em contato com a água provoca elevação do seu pH. Se a solução formada for despejada de maneira inadequada no meio ambiente, causa poluição e consequentes impactos aos agentes que interagem com meio contaminado.

Nos ecossistemas aquáticos naturais, a alteração do pH gera efeitos diretos sobre a fisiologia de diversas espécies, e indiretamente influencia tanto na precipitação de elementos químicos tóxicos, como metais pesados, quanto na solubilidade de nutrientes.

Segundo Oliveira e Cunha (2014), o pH do meio em que ocorre reações químicas, naturais ou causadas por agentes externos, é um dos principais fatores que influenciam no comportamento delas, assim como no seu resultado final, dessa forma ele é um parâmetro que deve ser monitorado, para que o seu desequilíbrio não gere prejuízos ao meio ambiente e a saúde pública.

Segundo a Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde, os níveis aceitáveis de pH na água para o consumo humano é de 6,0 a 9,5. Já a resolução n° 357 do CONAMA, de março de 2005, estabelece uma faixa de valores de pH entre 6,0 e 9,0, visando a proteção da vida aquática. Vale ressaltar também que a Agência Nacional de Águas (ANA), utiliza o valor de pH como um dos nove parâmetros que compõem o cálculo do Índice de Qualidade da Água (IQA), utilizado como principal referência no Brasil.

2.1.3 Impactos das Contaminações Alcalinas nos Solos

As partículas de argila se diferem dos grãos de areia, pois possuem uma superfície específica consideravelmente maior, ou seja, para uma determinada quantidade de massa, há uma quantidade maior de área de superfície. Essa propriedade das partículas de argila as torna mais suscetíveis a efeitos químicos e elétricos. Além desse fator, o formato das partículas também influenciam no seu comportamento. Os grãos de areia são partículas esféricas maiores, enquanto os minerais de argila são partículas menores em forma plana. Partículas de argila, embora consideravelmente maiores que átomos ou moléculas simples, ainda são pequenas demais para serem vistas apenas com o olho humano. Partículas desse tamanho, de 10^{-7} a 10^{-3} cm, são classificadas como colóides. Os colóides diferem de outras partículas, pois seu comportamento é mais influenciado pelas forças da superfície do que pelas forças relacionadas à massa. Quando partículas do tamanho de colóides são misturadas com água, elas formam suspensões. As partículas microscópicas nessas misturas sofrem movimento browniano, um movimento aleatório perpétuo causado por colisões irregulares com moléculas no fluido circundante. (IANNACCONE, 1998)

A bentonita é uma argila composta de montmorilonita. Essas partículas têm tipicamente 1000 angstroms por apenas 10 ângstroms de espessura, o que confere à argila uma área superficial extraordinária de aproximadamente $800 \text{ m}^2/\text{g}$. A água pode ser adsorvida nessa área de superfície até que as folhas de cristal individuais sejam separadas. O volume de água adsorvida, geralmente chamado de camada dupla, fica preso em volta da argila para equilibrar qualquer carga. As partículas de argila possuem cargas superficiais negativas que seriam equilibradas pelos íons presentes. Se a água for disponibilizada para esses íons, a água irá hidratar os íons junto com a superfície da partícula de argila. (LAMBE e WHITMANN, 1979)

Quaisquer efeitos físico-químicos, como uma alteração no pH ou na concentração de sal, afetarão a maneira como a dupla camada equilibra a carga superficial e, por sua vez, afeta as propriedades coesivas da argila. Esta propriedade resulta das forças de atração eletroquímica

entre as partículas de argila do solo e pode ser afetada negativamente por substâncias dispersantes de natureza alcalina, como no caso da soda cáustica, uma típica base de Arrhenius, logo, quando dissociada em água, libera íons hidroxila (OH^-) e cátions monovalentes de sódio (Na^+), como demonstra a equação 2.1:



Dentre os argilo-minerais, a caulinita é o mais sensível à dispersão na presença de tais substâncias devido à sua estrutura cristalina que combina a hidroxila da superfície com a hidroxila do fluido gerando uma carga superficial negativa que adsorve cátions monovalentes, com forte potencial de solvatação. (FRENKEL; FEY; LEVY, 1992). A adsorção de sódio hidratado promove o distanciamento dos criptocristais com consequente diminuição das forças de atração eletrostáticas entre eles e perda de coesão do solo. Ao contrário dos cátions monovalentes, os divalentes e trivalentes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+}) atuam como floculantes quando em solução (KIRKHAM; POWERS, 1972). Com isso, sua presença como cátions trocáveis pode inibir os efeitos do sódio na dispersão e nas propriedades mecânicas do solo, mesmo sob condições alcalinas. O efeito dispersivo do hidróxido de sódio é bem conhecido nos estudos de solo na área agrônômica (BORJA; MERCADO; COMBATT, 2015), onde esta substância é utilizada como defloculante nos ensaios granulométricos.

Pavilonsky (1985) analisou as variações do coeficiente de condutividade hidráulica de diferentes solos submetidos à percolação de diferentes solutos, entre eles hidróxido de sódio a diferentes concentrações. Para uma argila caulinitica, ensaiada com NaOH, ele achou uma queda da condutividade hidráulica para uma concentração de 4%, e um aumento na condutividade hidráulica para uma concentração de 0,4 %.

D'Appolonia (1980), estudando o efeito de diferentes contaminantes na condutividade hidráulica de *cuttoffs* de bentonita, achou um incremento de 2 a 5 com o aumento em uma solução de soda cáustica de 1% a 5%, com relação ao coeficiente de condutividade hidráulica medido em água.

Kumapley e Ishola (1985) estudaram os efeitos da contaminação química na resistência não drenada do solo e nos limites de consistência. O solo analisado foi uma argila caulinitica, e trabalharam com amostras amolgadas, preparadas mediante a mistura de solo e soda cáustica.

Os resultados que eles apresentam mostram que, para concentrações crescentes de soda cáustica, o limite de liquidez decresce, assim como a resistência não drenada do solo.

Ignatius e Souza Pinto (1991) determinaram o efeito da contaminação, com um efluente à base de soda cáustica (pH=13,7), numa argila arenosa, com predominância de partículas de caulinita. Eles estudaram três aspectos: granulometria e limites; adensamento e colapsividade; e resistência à compressão simples. Eles julgaram que o efluente se comporta como defloculante para certa faixa de concentrações. Para concentrações maiores, a tendência defloculante diminui. O solo em estudo é colapsível em presença de água e sua colapsividade é aumentada em presença do efluente químico. Com respeito à resistência à compressão simples, eles observaram uma queda na resistência em presença do efluente.

Collares e Vilar (1998) analisou o colapso em solos tropicais considerando diferentes soluções químicas a fim de mostrar que a presença de um agente dispersivo na solução pode influenciar mais que o seu pH, na magnitude do colapso dos solos. Como fluidos percolantes utilizou água destilada de pH igual a 6,8, uma mistura de soda cáustica (NaOH) com hexametáfosfato de sódio (NaPO₄)₆ até atingir o pH igual a 11 e, outra mistura contendo (NaPO₄)₆ e ácido fosfórico (H₃PO₄), com pH igual a 3. Descobriu que a amostra inundada com água sofreu colapso repentino, mas estabilizou-se em poucos minutos, enquanto que as amostras inundadas com as substâncias químicas, apesar de apresentarem um potencial de colapso superior quando comparadas com a água, continuaram a se deformar ao longo do tempo.

Anandarajah e Zhao (2000) registraram a redução da resistência à compressão triaxial do argilomineral caolinita contaminada com fluidos intersticiais contendo NaOH e outros compostos.

Savage, Noy, Mihara (2002) trabalharam com uma argila bentonítica, procurando simular o fenômeno que acontece num liner de impermeabilização para disposição de resíduos. A argila foi colocada em contato com água por um lado e com um líquido de pH elevado no outro, permitindo-se, então, a difusão do contaminante através do solo bentonítico. Esta configuração procurou simular o contato de barreiras de concreto e de bentonita potencialmente utilizáveis para a contenção de resíduos radioativos. As maiores alterações foram observadas para o líquido com pH mais elevado (13,2), que mostrou uma remoção dos elementos primários da bentonita, e um aumento da porosidade (excesso em até 80-90 %) numa zona estreita perto do contato fluido-bentonita.

Os efeitos da soda cáustica na erosão do solo também foram observados por Ferreira et al. (2002). Neste estudo, a soda cáustica promoveu um aumento da dispersão das partículas de solo e, conseqüentemente, na erodibilidade.

Moncada (2004) estudou os efeitos de licor cáustico (hidróxido de sódio, ferro e alumínio) na resistência ao cisalhamento e nas características físico-mineralógicas de solo saprolítico. Os resultados apontaram que o referido licor resulta no aumento da dispersão e na redução da resistência ao cisalhamento do solo contaminado.

Rao e Chittaranjan (2012) observaram que outros contaminantes ricos em metais pesados, divalentes e trivalentes, como efluentes de curtume e baterias, também afetam as propriedades mecânicas de solos coesivos com efeito contrário ao da soda cáustica.

Toniolo (2016) avaliou a influência da contaminação com soda cáustica em uma unidade industrial do norte de Minas Gerais, onde foram encontrados pontos de contaminação de soda cáustica vinculados à erosão hídrica subterrânea no solo, que gerou a ocorrência de patologias em algumas estruturas construtivas da unidade industrial. Posteriormente, foram realizados ensaios em um solo residual de alteração de rocha granítica, coletada em ponto localizado entre Guaíba e Tapes/RS. Parte de material coletado foi colocado em contato com soda cáustica, constatou-se que sua capacidade de suporte a cargas é reduzida 36,5% em comparação ao mesmo solo não contaminado, assim como redução aproximada de 6% no grau de saturação e 1,3% no teor de umidade.

2.2 DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

A relação entre a taxa de escoamento de um fluido em um meio poroso e a diferença de potencial a ele aplicada foi primeiramente quantificada por Henri Darcy em 1856. Trabalhando em meios granulares não-consolidados, desenvolveu um experimento que consistia em fazer escoar, sob pressão, um fluido de massa específica e viscosidade uniformes através de um tubo cilíndrico de seção transversal de área A , com uma parte de espessura L preenchida com areia completamente saturada.

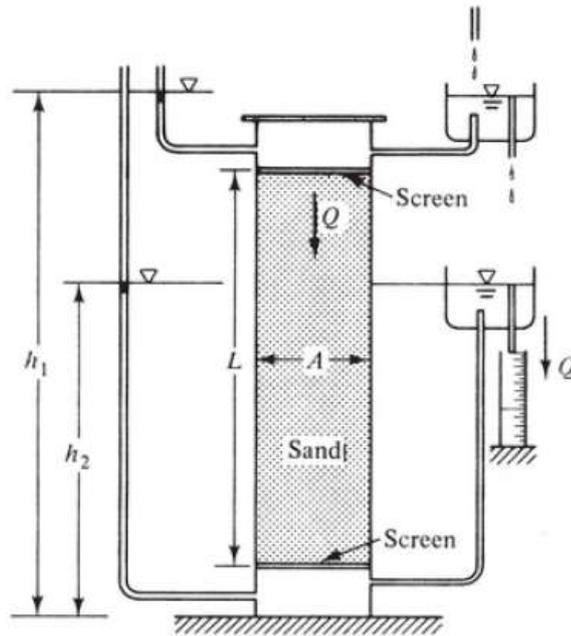


Figura 2.2: Experimento de Darcy (adaptado de BEAR, 1979).

A partir desse experimento, Darcy propôs que, para um fluxo horizontal de um fluido monofásico, a taxa de escoamento Q , também chamada de vazão do fluido, dada pela Equação 2.2:

$$Q = \frac{kA \Delta P}{\mu L} \quad (2.2)$$

onde k é o coeficiente de permeabilidade intrínseca do solo, uma propriedade que é função exclusiva do meio poroso; μ é viscosidade dinâmica do fluido; e ΔP é a diferença de pressão aplicada na amostra, ou seja, a perda de carga.

A lei de Darcy pode ser escrita na forma diferencial (Equação 2.3), o sinal negativo indica que a pressão diminui na direção do fluxo:

$$v = \frac{Q}{A} = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (2.3)$$

onde v é a velocidade superficial do fluxo.

Esta é uma velocidade média tomada a partir da vazão sobre toda a seção A , e não deve ser confundida com a velocidade real do fluido nos poros, que deve ser medida a partir da área efetiva dos poros na seção. A velocidade superficial do fluxo também pode ser descrita como:

$$v = K * i \quad (2.4)$$

Segundo a equação 2.4, a velocidade de descarga de um fluido através de um meio poroso é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico i (Equação 2.6), sendo estes relacionados por uma constante de proporcionalidade K (Equação 2.5), denominada de condutividade hidráulica, sendo:

$$K = \frac{k\rho g}{\nu} \quad (2.5)$$

$$i = \frac{\Delta P}{L} \quad (2.6)$$

onde ρ é a densidade do fluido percolante, g é a aceleração da gravidade e ν é a viscosidade cinemática do fluido.

A condutividade hidráulica é uma grandeza dependente das características do meio poroso e do fluido que percola por este meio, logo, mudanças na densidade e viscosidade do fluido ou no meio poroso geram valores de K diferentes, lembrando que a viscosidade é fortemente influenciada pela temperatura (DANIEL, 1994). É possível observar também que, para uma mesma geometria, mesma diferença de pressão e mesmas condições do fluido, a vazão é diretamente proporcional ao coeficiente de permeabilidade k .

A condutividade hidráulica é um dos parâmetros que apresenta maior faixa de variação para os solos. Os valores variam da ordem de 10^{+2} cm/s para materiais com alta condutividade hidráulica como pedregulhos, a valores da ordem de 10^{-12} cm/s, para materiais com baixíssimos valores de condutividade hidráulica, como solos com a presença de argilas de alta atividade. (LUKIANCHUKI, 2007)

Desse modo, a condutividade hidráulica de um solo pode ser definida como a habilidade ou capacidade do mesmo permitir o fluxo do fluido (do qual está saturado) através dos seus poros,

propriedade esta que varia de acordo com os diversos tipos de solos encontrados, tais como areia, argila, entre outros. A unidade de medida de condutividade hidráulica mais utilizada é o Darcy. A complexa interação entre o fluido e os canais porosos de um solo causa transformações na energia do sistema, geralmente associadas à diminuição da pressão exercida pelo fluido. A condutividade hidráulica é, assim, uma propriedade não apenas do meio poroso ou do fluido, mas também da interação dinâmica entre ambos (SCHEIDEGGER, 1974).

2.2.1 Permeâmetros

A determinação dos valores de condutividade hidráulica pode ser realizada através de ensaios de campo e ensaios de laboratório. Segundo Daniel (1987), os ensaios de laboratório apresentam como vantagens o controle das condições de contorno tais como: a saturação, o nível de tensões efetivas, a carga hidráulica e a direção de fluxo; tempo de ensaio curto, e custo baixo. Em contrapartida, os ensaios de campo sofrem um menor de efeito escala, devido ao fato de que o volume de solo ensaiado é superior ao volume ensaiado em laboratório.

A realização de testes nos permeâmetros deve ser feita com controle de entrada de líquido na amostra. A lei de Darcy relaciona a taxa de fluxo com o gradiente hidráulico. Assume-se que a área transversal da amostra A e a altura da amostra L sejam conhecidas. Então, para a determinação da condutividade hidráulica é necessária a medição da taxa de escoamento Q e da carga hidráulica aplicada na amostra ΔP . Segundo Cruz (2004), o controle de entrada de líquido na amostra pode ser feito de três diferentes formas:

- a) Carga Constante: existem várias maneiras de manter a carga hidráulica constante, dentre elas a utilização de reservatórios ou com tubo de Mariotti. Possui a vantagem da simplicidade de cálculo e pressão constante na amostra, o que evita a sua variação volumétrica;
- b) Carga Variável: pode ser feito com carga hidráulica de entrada variável e carga hidráulica de saída constante (atmosfera), recomendado para solo com condutividade hidráulica maior que 1×10^{-5} m/s, ou com cargas hidráulicas de entrada e de saída variáveis, recomendado para solos com baixa condutividade hidráulica. Possui a desvantagem de que a variação de carga pode liberar bolhas de gás dissolvidas e também pode causar variações na tensão efetiva, resultando em consolidação da amostra.

- c) Fluxo constante: é realizado através do bombeamento do líquido através da amostra a uma taxa de fluxo constante e medição de perda de pressão ocasionada pela passagem do líquido pela amostra através de um transdutor diferencial de pressão. Possui a vantagem da possibilidade de realização de ensaios em curto espaço de tempo e automação total do equipamento. Por outro lado, é um equipamento caro e existe a possibilidade do desenvolvimento de gradientes hidráulicos altíssimos, se a taxa de fluxo utilizada for alta.

Existem ainda variações do equipamento para medição da condutividade hidráulica de solo saturado em laboratório, que dependem das condições de contorno a serem utilizadas, do tipo de material a ser ensaiado, das condições de pressão e do fluido percolante. Basicamente dois tipos de permeômetros podem ser utilizados: permeômetros de parede rígida e permeômetros de parede flexível. As células de parede rígida são preferíveis para materiais de difícil moldagem, como solos granulares, e os de células flexíveis são preferíveis para os de baixa condutividade hidráulica dependendo do tipo de amostra a ser testada e as condições a serem simuladas. Como o objeto desta pesquisa consiste em uma lama, optou-se pela moldagem no próprio equipamento, logo, será realizado a seguir um estudo mais aprofundado sobre o permeômetro de parede rígida.

2.2.1.1 Permeômetro de Parede Rígida

O permeômetro de parede rígida tende a ser de mais baixo custo e mais fácil de usar. É formado por um cilindro contido em uma caixa ou tubo rígido. O fluido percolante atravessa o corpo de prova ao longo do seu eixo. As amostras ensaiadas em permeômetros de parede rígida apresentam menor expansividade do que as amostras ensaiadas em permeômetros de parede flexível. Os permeômetros de parede rígida apresentam como vantagem a facilidade de uso. No entanto, apresentam como desvantagem: a impossibilidade de saturação total da amostra por contrapressão; a inexistência de controle sobre as pressões atuantes na amostra; e a possibilidade de ocorrer fluxo lateral pelas paredes do tubo do permeômetro.

O método de ensaio descrito pela ASTM D5856/15 é próprio para amostras cuja condutividade hidráulica é menor ou igual a 10^{-5} m/s e é aplicado para materiais compactados. É adequado à permeação de água, mas pode ser utilizado para permeação de outros líquidos como detritos químicos (resíduos industriais), sendo que nestes casos os procedimentos devem ser adequados à situação.

A correlação entre os resultados obtidos com este método de teste para condutividade hidráulica e os resultados obtidos através dos ensaios de campo não foi totalmente investigada. As experiências algumas vezes demonstraram que o fluxo escoado no interior das amostras, não necessariamente seguiram o mesmo padrão, em grande escala (situação de campo). Portanto os resultados devem ser aplicados para situações de campo com cautela.

O problema potencial de escoamento ao longo da interface entre a amostra a ser testada e a cápsula do permeâmetro tende a ser de menor significância para materiais que incham quando expostos à água. A bentonita sódica utilizada nesta pesquisa, reduz esta problemática, pois ao ser hidratada durante o ensaio de condutividade hidráulica, expande muito, ocupando os espaços vazios e aderindo às paredes do permeâmetro de parede rígida.

Quando os solos são permeados com água, existem alguns critérios que devem ser observados para determinar quando um teste pode ser finalizado: os fluxos de entrada e saída de água da amostra devem ser razoavelmente iguais; a condutividade hidráulica deve estar razoavelmente estável; e devem ser coletados pontos suficientes para que um resultado representativo seja obtido.

A utilização de compostos químicos como líquido permeante ou misturados ao solo apresentam desafios adicionais, os quais incluem considerações quanto a cuidados na moldagem e no ensaio e considerações quanto à compatibilidade do líquido com o material do equipamento. A compatibilidade do líquido com o equipamento normalmente é feita com a utilização de aço inox e nylon nos componentes que estão em contato com o líquido permeante.

Quando um solo é permeado com compostos químicos, critérios adicionais aos citados anteriormente devem ser aplicados: o ensaio deverá continuar até que o volume de líquido permeado corresponda a dois volumes de vazios da amostra; o ensaio deverá ocorrer até que a composição química do líquido de entrada seja igual à composição química do líquido de saída da amostra; e deve-se plotar a concentração de todos os íons críticos do líquido efluente.

2.2.2 Transporte de Contaminantes em Solos

Os fenômenos de transporte em solos podem ser definidos como sendo o movimento de determinado composto em meio a uma ou mais camadas de solo, em ambiente saturado ou não. A migração destes compostos é influenciada por vários fatores, os quais determinam uma maior, menor ou nenhuma movimentação do composto no solo. O movimento destes compostos não depende apenas do fluxo do fluido no qual essas substâncias se dissolvem, mas também de

mecanismos que por sua vez dependem de processos físicos, químicos e biológicos aos quais estas substâncias são submetidas. (KNOP, 2007)

Os estudos sobre os fatores que promovem o transporte de compostos em solos foram inicialmente determinados por Slichter (1899), o qual foi o primeiro a reconhecer que o cálculo de transporte advectivo puro, empregando uma velocidade de infiltração média, não permite descrever a totalidade do transporte de solutos. Na década de 30, a teoria do fluxo através de meios porosos foi amplamente desenvolvida na engenharia de petróleo, onde o transporte de solutos era aplicável principalmente no estudo de intrusão de água marinha em aquíferos terrestres (MUSKAT, 1937).

A partir da década de 50 o regime do fluxo subterrâneo foi considerado como um sistema hidrodinâmico e físico-químico em conjunto, onde alguns aspectos de qualidade de água se determinam como uma seqüência de processos que ocorrem na trajetória do fluxo. Nas décadas seguintes este conceito foi aplicado ao estudo da evolução da qualidade da água subterrânea natural e a problemas de contaminação devido a materiais não radioativos. Para entender as características dos novos fenômenos foram desenvolvidas teorias estatísticas e de dispersão hidrodinâmica (SCHEIDEGGER, 1954; DE JOSSELIN DE JONG, 1958; SAFFMAN, 1959), semelhantes a teoria da difusão.

Os processos físicos, em geral, envolvem os fenômenos de advecção e dispersão hidrodinâmica. Neles, o meio poroso, como o solo, apresenta-se como uma barreira física que oferece resistência ao escoamento de uma pluma de contaminante. Os processos bio-físico-químicos estão relacionados às interações físicas, químicas e biológicas que podem ocorrer entre o solo e o poluente. Nesses processos, a interação entre as condições ambientais, o contaminante e o meio poroso ocasionam o retardamento, a aceleração ou a degradação do contaminante (YONG; MOHAMED; WARKENTIN, 1992; SHACKELFORD, 1993; AZAMBUJA; CANCELIER; NANNI, 2000; DELGADO, 2002; MONCADA, 2004, SHARMA e REDDY, 2004; LEMOS, 2006)

Segundo Chardon e Schoumans (2002), os processos que causam a retenção ou não de um determinado composto são influenciados pelo pH, força iônica/catiônica, ácidos orgânicos, potencial redox e temperatura. com relação as alterações no pH, estas levam a uma grande influência na fase sólida do solo. Um aumento do pH reduz a carga positiva dos hidróxidos e mobiliza formas aniônicas. Assim, tem-se que um aumento do pH diminui a solubilidade de substâncias como os metais pesados, e propicia a solubilização dos mesmos em casos de

ambiente com pH ácido. Um exemplo do contrário é o Fósforo, o qual tem sua solubilização estimulada em casos de pH alcalino.

2.3 BARREIRAS HIDRÁULICAS VERTICAIS (*SLURRY WALLS*)

Dentre os métodos de contenção de contaminantes convencionais, denomina-se de *Slurry Walls* as barreiras hidráulicas verticais subterrâneas, que funcionam como paredes semi-permeáveis com o objetivo de conter o lençol freático contaminado ou redirecioná-lo para áreas de tratamento. Neste capítulo serão abordadas suas características principais características e os tipos de misturas mais utilizadas.

Uma barreira impermeável ideal seria aquela que proporcionasse baixa condutividade hidráulica e um retardamento dos contaminantes. Diversos materiais reativos vêm sendo estudados nos últimos anos a fim de propiciar uma melhor remediação/degradação para diferentes tipos de compostos inorgânicos, dentre eles os metais, e orgânicos, derivados de solventes de origem industrial e derivados de petróleo. Dentre os principais estudos encontrados na literatura citam-se o uso de cal, cimento portland e bentonita em misturas ou em aplicação individual em solos compactados (KNOP et al., 2008).

2.3.1 Conhecimentos Básicos

As *Slurry Walls*, conhecidas também como paredes de lama, são barreiras verticais inseridas no solo através da escavação de uma trincheira, preenchida com lama estabilizante, que podem ser constituídas apenas por bentonita, solo-bentonita, solo-cimento-bentonita. A lama forma uma película de baixa condutividade hidráulica ($<10^{-8}$ cm/s), o que interfere no fluxo do contaminante.

D'Appolonia e Ray (1979) destacam que a barreira vertical usando como preenchimento solo-bentonita foi primeiramente utilizada nos Estados Unidos no ano de 1940. Desde então muitas barreiras deste tipo têm sido construídas, tanto para controle permanente, quanto temporário da percolação de vários poluentes nas águas subterrâneas.

A construção da barreira consiste inicialmente na escavação de um trecho, entre 0,6 e 1,5 m de largura (D'APPOLONIA, 1980), com profundidade até camadas de materiais impenetráveis, preferencialmente rochas. Porém se o contaminante presente no subsolo tiver uma densidade inferior à da água, mantendo-se na fase superior da solução, ou existir a presença de um

gradiente ascendente, não é necessário a barreira ser escavada até uma camada impenetrável, elas são conhecidas como barreiras suspensas (BAXTER, 2000).



Figura 2.3: método construtivo das Barreiras Hidráulicas Verticais: a) deposição do material de preenchimento no trecho; b) mistura do Solo-Cimento-bentonita in situ. (RYAN e DAY, 2002)

Durante a escavação utiliza-se bentonita como agente estabilizante para que não ocorra o colapso das paredes da escavação, ao mesmo tempo ela penetra nos vazios do solo adjacente, devido a diferença de pressões. Dessa forma, aglomerados de partículas sólidas se acumulam dentro dos poros do solo formando uma camada fina na interface lama-solo conhecida como *filter cake*. A formação desse revestimento permite que a pasta aplique uma pressão de fluido hidrostático na interface e evite qualquer perda adicional de lama. Em seguida, forma-se sobre o *filter cake* uma fina camada de bentonita, também chamada de filme protetor.

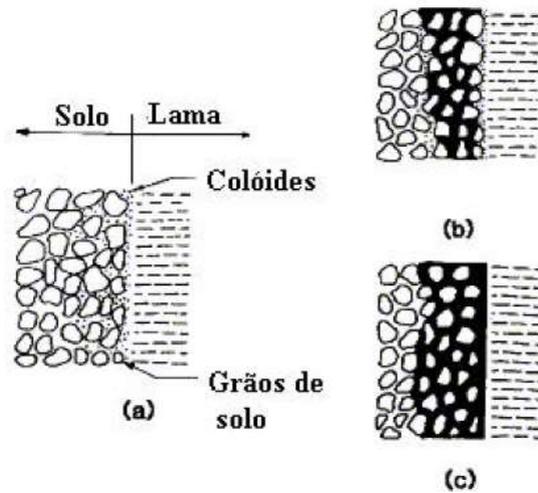


Figura 2.4: Formação do filter cake: a) deposição das partículas coloidais nos vazios do solo; b) filtração da lama por diferença de pressões; c) formação do filme protetor ao longo da face da escavação (adaptado de XANTHAKOS, 1979).

A figura 2.4a mostra a infiltração inicial da suspensão de lama em um solo granular devido a um gradiente de pressão e forças eletrocinéticas. As partículas coloidais se depositam dentro dos espaços vazios, como visto na figura 2.4b. O acúmulo de partículas atuará como um filtro, causando a deposição cada vez maior de argila ou outro material em suspensão. À medida que esse processo continua, os vazios ficam compactados com material sólido e a condutividade hidráulica cai até que uma vedação seja concluída ao longo da superfície de corte. (XANTHAKOS, 1994). Posteriormente a lama bentonítica pode permanecer na trincheira ou ser substituída por um material de preenchimento, cuja composição deve ser definida nas condições de projeto.

A lama bentonítica é mantida, durante toda a escavação, pelo menos 60 cm acima do nível d'água dentro do solo e, no máximo, 90 cm abaixo do nível da superfície (FILZ; BOYER; DAVIDSON, 1997). Se durante o processo de escavação o nível da lama bentonítica estiver inferior ao nível d'água interior ao solo, devido a um aumento repentino do lençol freático ou a uma perda excessiva de lama bentonítica para um solo adjacente muito poroso, a poro-pressão do solo adjacente irá gerar uma força sobre o *filter cake* provocando a sua desintegração. Com isso, o nível d'água ficará livre para escoar para dentro do trecho escavado gerando um colapso da parede de escavação (XANTHAKOS, 1979).

Nas barreiras preenchidas posteriormente por solo-bentonita, as propriedades da lama bentonítica são determinadas de maneira que mantenham o trecho de escavação estável. Para a formação da mistura na prática, é utilizado de 1 a 5 % de bentonita, enquanto que as quantidades de solo e água podem variar de acordo com as propriedades desejadas (D'APPOLONIA, 1980; ANDROMALOS e FISHER, 2001). Miller e Moslemi (1992) recomenda a utilização de 2 a 4% de bentonita. Enquanto que para a formação da lama bentonítica, geralmente é utilizado 5 % de bentonita misturada 95 % de água (EVANS e DAWSON, 1999).

Segundo Rowe (2000), a proporção adequada de bentonita para ser misturada com solo está entre 4 % e 10 %, obtendo-se assim valores de condutividade hidráulica entre 10^{-7} a 10^{-9} cm/s. Entretanto é importante estabelecer uma proporção ótima de bentonita e teor de umidade para cada caso específico.

Segundo Sharma e Reddy (2004), pode-se atingir condutividades hidráulicas de 1.10^{-9} m/s a 1.10^{-10} m/s com um teor de 1% até 5% de bentonita nas barreiras impermeáveis barreiras tipo solo-bentonita. Essa técnica é comumente aplicada em solos compactados que não tem capacidade de atingir condutividade hidráulica inferior a 10^{-9} m.s⁻¹ com a compactação na umidade ótima e com a aplicação de altas energias de compactação.

Por outro lado, a adição de cimento portland em altos teores nas barreiras solo-cimento-bentonita e cimento-bentonita pode promover o aumento da condutividade hidráulica devido à hidratação e solubilização, mas acrescenta um poder reativo no caso da imobilização de contaminantes, funcionando com um material de remediação e não apenas de contenção. O cimento apresenta-se como agente reativo com potencial de uso em barreiras impermeáveis, pois é um material de fácil acesso e já comumente utilizado em diversas obras de engenharia. Em função de seu potencial reativo, considera-se necessário o seu estudo em barreiras impermeáveis, de modo a verificar se o mesmo pode ser empregado com um material para construção dessas barreiras agregando caráter reativo e não modificando significativamente a condutividade hidráulica da barreira (SHARMA E REDDY, 2004).

Para Pearlman (1999), as barreiras de cimento-bentonita são mais vantajosas quando existe escassez de solos apropriados para a preparação do material de preenchimento, espaço insuficiente disponível para a mistura, ou quando é exigida uma grande resistência das barreiras. Entretanto, as barreiras de cimento-bentonita tendem a ter uma condutividade hidráulica maior em relação às barreiras de solo-bentonita atingindo valores de 10^{-8} m/s . Para outros autores a

condutividade hidráulica dessas barreiras pode atingir em média valores de 5×10^{-9} m/s (BHATIA e EL-DIN, 1989; EPA, 1998; JEFFERIS, 2001).

Jefferis (1981) relata que se a bentonita não for hidratada por um período de pelo menos 4 horas antes da aplicação do cimento, a mistura de cimento-bentonita terá uma segregação de materiais bastante considerável, fenômeno esse conhecido como *bleeding*. Além da seqüência de mistura dos materiais, a concentração de bentonita é um fator muito importante para a diminuição da segregação da lama de cimento-bentonita. Nas lamas de cimento-bentonita é a estrutura da bentonita no seu estado gel que suporta as partículas de cimento, portanto, quanto maior for a proporção de bentonita em relação ao cimento menor será a segregação dos materiais na mistura.

Quando o cimento e a lama bentonítica entram em contato, existe um rápido enrijecimento da mistura devido à floculação mútua dos materiais. Depois de alguns minutos de mistura, o compósito volta a seu estado fluido, isso porque ocorre a quebra da estrutura da bentonita no seu estado gel causado pela agregação das partículas de argila.

A barreira de solo-cimento-bentonita foi uma técnica de *slurry walls* desenvolvida posteriormente. Elas tentam combinar a baixa condutividade hidráulica das barreiras de solo-bentonita com um material de moderada resistência. Segundo Pearlman (1999), esta técnica pode ser mais vantajosa em lugares aonde seja possível utilizar o solo de escavação para a composição da mistura, portanto, diminuindo a quantidade de material disposta. Geralmente, as barreiras de solo-cimento-bentonita são utilizadas quando as barreiras de solo-bentonita não possuem resistência suficiente (ANDROMALOS e FISHER, 2001).

O teor normalmente utilizado, de acordo com Sharma e Reddy (2004), é de 4% a 7% de bentonita, 8% a 25% de cimento e 65% a 88% de água. No entanto, a adição de cimento nestas barreiras pode promover o aumento da permeabilidade, mas acrescenta um poder reativo a barreiras no caso da imobilização de contaminantes, funcionando com um material de remediação e não apenas de contenção.

2.3.2 Propriedades Hidráulicas

Para D'Appolonia (1980) a condutividade hidráulica de uma barreira de solo e bentonita é função do *filter cake*, camada que se forma na interface solo-barreira, e da condutividade hidráulica do material de preenchimento colocado dentro da escavação.

Quando a lama bentonítica é lançada na escavação sob um gradiente hidráulico dentro de qualquer tipo de solo penetrante, incluindo siltes de baixa condutividade hidráulica, um *filter cake* se forma na interface solo-lama bentonítica. As propriedades do *filter cake* formado em qualquer tipo de solo granular são independentes da condutividade hidráulica dos mesmos. Segundo Filz, Henry e Davidson (1998), o *filter cake* formado depende da lama bentonítica utilizada, da diferença de carga entre a lama e o fluido dos poros e do efeito de tempo da formação do *filter cake*, tendo este último uma influência muito maior sobre a condutividade hidráulica. D'Appolonia (1980) sugere um intervalo de 24 horas pelo menos entre a escavação do trecho e a aplicação do material de preenchimento de maneira a desenvolver um *filter cake* de baixa condutividade hidráulica.

Kenney et al. (1992) comentam que a barreira de solo e bentonita apresenta um limite máximo de condutividade hidráulica de 10^{-8} m/s, mesmo para um material de preenchimento mais arenoso, devido a baixíssima condutividade hidráulica do *filter cake*. Portanto, desde que o solo de preenchimento (*backfill*) seja bem graduado para evitar a extrusão e ruptura do *filter cake* para dentro da barreira, uma condutividade hidráulica de pelo menos 10^{-8} m/s é assegurada.

Quanto menor a condutividade hidráulica no solo, menor será a condutividade hidráulica da mistura. Solos com maior porcentagem de finos plásticos na sua granulometria irão ter menores valores de condutividade hidráulica se comparados a materiais de maior diâmetro e não-plásticos. Em muitas aplicações, um teor de pelo menos 20% de finos, de preferência plásticos, é recomendado. (XANTHAKOS, 1979).

A condutividade hidráulica de uma mistura de solo-cimento-bentonita é um resultado de complexas interações entre os vários componentes da mistura. O cimento Portland, quando adicionado à mistura altera as propriedades químicas da bentonita. A mesma é afetada na sua capacidade de inchamento e retenção de água (KOCH; PHILLIPS, 2002). Além disso, o cimento Portland requer mais água na mistura de solo-bentonita para que se consiga atingir o slump adequado para o material ser lançado para dentro da escavação (RYAN e DAY, 2002). Com a introdução de mais água, a densidade do material será menor, mais poros no *backfill* serão formados e, conseqüentemente, maior será a condutividade hidráulica da barreira de contenção.

A consistência ideal do material de preenchimento é uma pasta saturada tendo baixa resistência ao cisalhamento para ser capaz de escoar facilmente, mas ao mesmo tempo ter rigidez suficiente para permanecer estável numa declividade de 10:1. Esta consistência corresponde a um slump

de 10 a 15 cm e uma quantidade de água na mistura de solo- bentonita normalmente entre 25 a 30% em relação ao peso total. (D'APPOLONIA ,1980)

2.3.3 Propriedades Mecânicas

Na maioria dos projetos de barreiras, principalmente em aplicações com o objetivo de contenção de materiais contaminados, a compressibilidade e a resistência são fatores secundários, porém devem ser bem definidos e analisados para se garantir uma boa execução e posterior estabilidade da barreira. Para D'Appolonia (1980), a compressibilidade depende principalmente da porcentagem de partículas granulares presentes no solo. Portanto, será alcançada uma compressibilidade baixa quando existir a presença de materiais granulares suficientes na mistura para permitir o contato grão a grão entre as partículas de areia. Por outro lado, a compressibilidade será alta quando houver a presença de materiais finos de características plásticas na mistura solo bentonita.

Para se obter uma baixa condutividade hidráulica em barreiras de solo-bentonita é essencial a aplicação de uma grande quantidade de finos com características plásticas na sua granulometria, mas ao mesmo tempo a inserção desse material irá gerar uma alta compressibilidade. Uma combinação ótima para se gerar um material de baixa condutividade hidráulica e compressibilidade consiste de uma matriz granular cujos vazios gerados serão preenchidos por solos de grãos finos e bentonita. D'Appolonia (1980), por exemplo, sugere a combinação de uma areia com 20 a 30% de materiais finos de características plásticas. Evans (1991) recomenda uma matriz bem graduada de areia com 20 a 50% de finos plásticos e um mínimo de 1% de bentonita. Miller e Moslemi (1992) aconselha um material arenoso bem graduado, com a presença de 10 a 20% de finos e com uma proporção de 2 a 4 % de bentonita. Entretanto, quando não é necessária a obtenção de uma compressibilidade baixa, uma porcentagem maior de finos é desejável para a obtenção de valores menores de condutividade hidráulica.

A resistência encontrada nas barreiras está intrinsecamente relacionado com os materiais utilizados em seu preenchimento. Nas bentonitas, presente em todas as misturas estudadas neste trabalho, a resistência é função das forças elétricas que atuam entre as partículas e das tensões de contato interpartículas. Além disso, o espaço entre as partículas, a sua orientação, as tensões externas aplicadas, as características do líquido permeante e tudo o que afetar as forças elétricas interpartículas irá afetar sua resistência. Por ser altamente expansiva, a bentonita possui resistência mecânica muito menor que as outras argilas (LAMBE e WHITMANN, 1979).

Gleason, Daniel e Eykholt (1997) afirmam que líquidos com baixa constante dielétrica, alta concentração de eletrólitos ou alta valência de cátions podem causar o encolhimento da bentonita. O encolhimento pode levar a fissuras e a um grande aumento na condutividade hidráulica. Devido ao alto potencial inchamento-encolhimento, a bentonita sódica é mais suscetível a estes tipos de reações dielétricas do que outros tipos de bentonita.

Nas barreiras de cimento-bentonita e solo-cimento-bentonita, o fator água-cimento e o tempo de cura tem um efeito significativo em sua resistência. Quanto menor for o fator água-cimento das misturas, maior será a resistência ao cisalhamento alcançada (JEFFERIS, 1981).

Segundo Ryan e Day (2002), as especificações para a resistência mínima das barreiras de solo-cimento-bentonita variam em um intervalo de 100 a 700 kPa, sendo que alguns projetos existem um mínimo de resistência de 200 kPa aos 28 dias.

Andromalos e Fisher (2001), argumentam que o material de preenchimento mais adequado depende de uma variedade de parâmetros que inclui permeabilidade, resistência, densidade, compatibilidade com contaminantes e custos. Muitas vezes o material de preenchimento é constituído do próprio material da escavação, acrescido de bentonita ou bentonita-cimento. Alguns parâmetros típicos de *backfill* para cortinas verticais são mostrados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Parâmetros típicos para material de preenchimento (ANDROMALOS e FISHER, 2001)

MATERIAL REATERRO	PERMEABILIDADE cm / s	RESISTENCIA kPa	DENSIDADE pcf	COMENTARIOS
Solo-Bentonita	1×10^{-7}	0	100 - 130	Requer mínimo de 15% de finos
Solo-Cimento-Bentonita	1×10^{-7}	350	95 - 120	Misturas tipicamente remotas
Cimento-Bentonita	1×10^{-6}	175	70 - 75	Pastas de auto-endurecimento

2.3.4 Efeito dos Poluentes nas Barreiras de Contaminantes

O fluxo de poluentes através do *filter cake* ou do *backfill* pode provocar um aumento na condutividade hidráulica na barreira. Para D'Appolonia (1980) dois mecanismos podem contribuir para o acréscimo da condutividade hidráulica: os minerais do solo podem ser solúveis no poluente, levando a uma perda de sólidos, e uma correspondente formação de vazios entre as partículas; a substituição do fluido dos vazios pode levar a uma redução da camada de água

que envolve as partículas de bentonita (dupla-camada) ou outras partículas de argila hidratada, diminuindo o tamanho efetivo das partículas de argila que preenchem os vazios entre os grãos maiores. Consequentemente, os canais de fluxo dentro do solo ficarão maiores provocando um aumento da sua condutividade hidráulica.

Dois fatores independentes associados com a substituição do fluido dos vazios contribuem para a ocorrência do segundo mecanismo: a concentração de sal afeta o potencial elétrico das partículas de argila e da água livre, a qual controla quão aderida essa camada é mantida; os íons de sódio, associados a bentonita, trocam íons carregados pelo poluente, reações essas, que também levam a uma redução da camada de água que circunda a bentonita. O tempo requerido para as trocas de cátions está relacionado com o potencial de troca de cátions do sódio da bentonita e com a concentração de cátions livres carregados pelo poluente.

Para D'Appolonia (1980) materiais que tem grande quantidade de finos não apresentam acréscimos significativos na condutividade hidráulica, mesmo se o pH dos poluentes for menor que 2 ou superior a 11. Materiais granulares com bentonita apresentam um acréscimo maior de condutividade hidráulica, além de existir o risco de falhar por *piping*.

Segundo Favaretti, Moraci e Previatello (1994), aumentos na condutividade hidráulica podem ocorrer devido à estrutura do solo ser mais floculada e sua porosidade maior. Além disso, a dissolução dos minerais do solo pode ocorrer em pHs altos, reduzindo o teor de sílica tetraédrica.

Segundo Pearlman (1999) contaminantes muito ácidos ou muito básicos têm um efeito maior na condutividade hidráulica, sendo que as soluções muito alcalinas produzem efeitos deletérios maiores em relação a soluções muito ácidas. Caso exista a presença desses tipos de contaminantes, eles podem alterar, ou até mesmo dissolver, tanto a bentonita quanto a porção de solo utilizados na mistura de solo-bentonita. O projetista deve realizar ensaios com permeação prolongada para determinar exatamente os efeitos que esses tipos de poluentes podem gerar na barreira subterrânea.

O cimento é muito mais sensível ao ataque de poluentes químicos em relação a bentonita, sendo esse um dos fatores para a limitação de sua utilização na construção de barreiras de contenção. Os contaminantes muito ácidos causam uma rápida desintegração da mistura, assim como acontece com os concretos. Os álcalis não provocam grandes prejuízos na interação com barreiras compostas por cimento, assim como acontece com os cloretos de cálcio e magnésio.

2.4 AGENTES CIMENTANTES

Na natureza, todos os componentes da litosfera estão submetidos a um potencial de transformação que se exerce de maneira permanente e que visa sempre a obtenção de condições de maior estabilidade. Neste sentido, certas reações químicas de combinação entre os mais distintos componentes das rochas e dos solos com a água e o ar, podem, por si só, originar ruptura parcial ou total da estrutura do material, ou torná-lo mais facilmente erodível pelas ações físicas e químicas a que o mesmo está submetido. Outras reações, porém, conduzem a materiais mais estáveis e menos erodíveis.

Nos materiais de construção que se utilizam no dia a dia, este tipo de comportamento está naturalmente presente. A cimentação é um processo bem conhecido na geologia, sendo uma forma de agregação de partículas de solo por agentes cimentantes como o carbonato de cálcio, sílica, óxidos de ferro e de alumínio etc.

O cimento do tipo Portland, cuja invenção é atribuída a J. Aspdin na primeira metade do século XIX, tem assumido um papel primordial como material de construção que proporciona significativos níveis de resistência mecânica, com apreciável durabilidade.

Os cimentos modernos do tipo Portland são constituídos pela combinação de óxidos de cálcio, silício, alumínio e ferro, provenientes do calcário (CaCO_3), do gesso e da argila, sendo essas últimas responsáveis pela presença dos óxidos de silício, alumínio, ferro, magnésio, entre outros.

Sua obtenção é relativamente barata e sua manipulação não envolve tecnologias muito elaboradas, sendo de fácil moldagem. Porém, durante sua fabricação existe uma etapa denominada calcinação, onde a mistura é levada a temperaturas da ordem dos 1450 a 1500°C (COUTINHO, 1973), perdendo grande parte da água de formação e também o dióxido carbônico (CO_2) presente no carbonato de cálcio, que é devolvido para a atmosfera juntamente com os gases resultantes da queima do combustível. Essas emissões fazem a indústria do cimento apresentar um alto grau de poluição ambiental, devido tanto ao consumo energético na fase de fabricação, quanto na produção de enormes quantidades de CO_2 . Estima-se que a cada 1 kg de clínquer (resultado da calcinação), 1 kg de CO_2 libertado para a atmosfera, sendo esta indústria responsável por cerca de 5 a 7% das emissões globais de CO_2 . (FELIX E POSSAN, 2018)

Ao mesmo tempo, vem-se notando que concretos executados com Cimento Portland apresentam outros problemas vinculados à durabilidade e estabilidade química. Observou-se, por outro lado, a estabilidade das obras construídas na antiguidade. Desse modo, através de estudos microestruturais realizados nos cimentos antigos, foi constatado que apesar das múltiplas formas de obtenção de cimentos, o emprego de materiais reagentes de natureza alcalina parece constituir o traço comum (DAVIDOVITS, 1993). Tais sistemas têm como base os aluminossilicatos, que compõem grande parte dos compostos sólidos inorgânicos da crosta terrestre, sendo por isso mais abundantes que as matérias-primas usadas na fabricação do Cimento Portland e que reproduzem artificialmente a síntese das rochas naturais silicosas, com elevado desempenho em termos da resistência mecânica e durabilidade (DAVIDOVITS, 1991). Neste sentido, a ativação alcalina se apresenta como uma alternativa aos cimentos do tipo Portland, tendo como vantagem seu comportamento mais neutro e mais estável, comparado aos sistemas cimentícios em que o cálcio é indispensável. A seguir, serão descritas as características de ambos processos de cimentação, tendo como foco os materiais que a serem utilizados nesta pesquisa.

2.4.1 Cimento Portland

O cimento Portland é ligante hidráulico muito resistente, composto de *clínquer* e de *adições*. O clínquer é seu principal componente e tem a peculiaridade de desenvolver uma reação química em presença de água, na qual, primeiramente, torna-se pastoso e, em seguida, endurece, adquirindo elevada resistência e durabilidade. As adições são matérias-primas misturadas ao clínquer na fase de moagem e podem variar de um tipo de cimento para outro, destacam-se abaixo algumas delas e suas propriedades:

- a) gesso: tem como função básica controlar o tempo de pega, isto é, o início do endurecimento do clínquer moído quando este é misturado com água;
- b) materiais carbonáticos: presentes em pequena proporção, são rochas moídas, que apresentam carbonato de cálcio em sua constituição tais como o próprio calcário. Tal adição serve também para tornar os concretos e as argamassas mais trabalháveis, porque os grãos ou partículas desses materiais moídos têm dimensões adequadas para se alojar entre os grãos ou partículas dos demais componentes do cimento, funcionando como um verdadeiro lubrificante. (ABCP, 2002).

No que se refere ao cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), embora contemplado pela ABNT como norma separada do cimento Portland comum, é na verdade um tipo particular deste, que tem a peculiaridade de atingir altas resistências já nos primeiros dias da aplicação. O desenvolvimento da alta resistência inicial é conseguido pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, bem como pela moagem mais fina do cimento, de modo que, ao reagir com a água, ele adquira elevadas resistências, com maior velocidade (ABCP, 2002).

2.4.1.1 Hidratação do Cimento Portland

Na química do cimento, a hidratação é entendida como a reação entre o cimento e/ou os seus constituintes na forma não hidratada e a água, provocando mudanças, quer químicas quer físico-mecânicas no sistema, conduzindo à pega e ao endurecimento do cimento. É possível que exista hidratação parcial do cimento apenas por contato com o ar úmido. No entanto, a sua hidratação completa só é possível quando adicionada uma quantidade suficiente de água.

A combinação do cimento com a água vai originar reações de hidratação, nesse processo os silicatos de cálcio dão lugar à formação de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) e de hidróxido de cálcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$. Os primeiros, apresentam uma morfologia de um gel pouco cristalino, com uma estrutura que se vai densificando ao longo do tempo, conforme o avanço das reações de hidratação. Já o hidróxido de cálcio apresenta uma única fase de hidratação que tem composição química e estrutura cristalina bem definidas. A sua morfologia consiste basicamente em massivos cristais hexagonais (CASTRO GOMES, 1996).

A resistência mecânica final apresentada pelas pastas já endurecidas de cimento é devida à presença de uma rede tridimensional contínua de fases hidratadas. Grandes concentrações de íons de Na^+ , K^+ , e OH^- são responsáveis pelo alto valor do pH, de 12,5 a 13,5, do fluido nos poros das pastas de cimento Portland.

A relação água/cimento influencia a reologia das suspensões produzidas pela adição de água ao cimento; o progresso da hidratação do cimento; e as propriedades finais do hidratado. É assim usual, a utilização de relação a/c (massa/massa) entre 0,3 e 0,6 (ODLER, 1998)

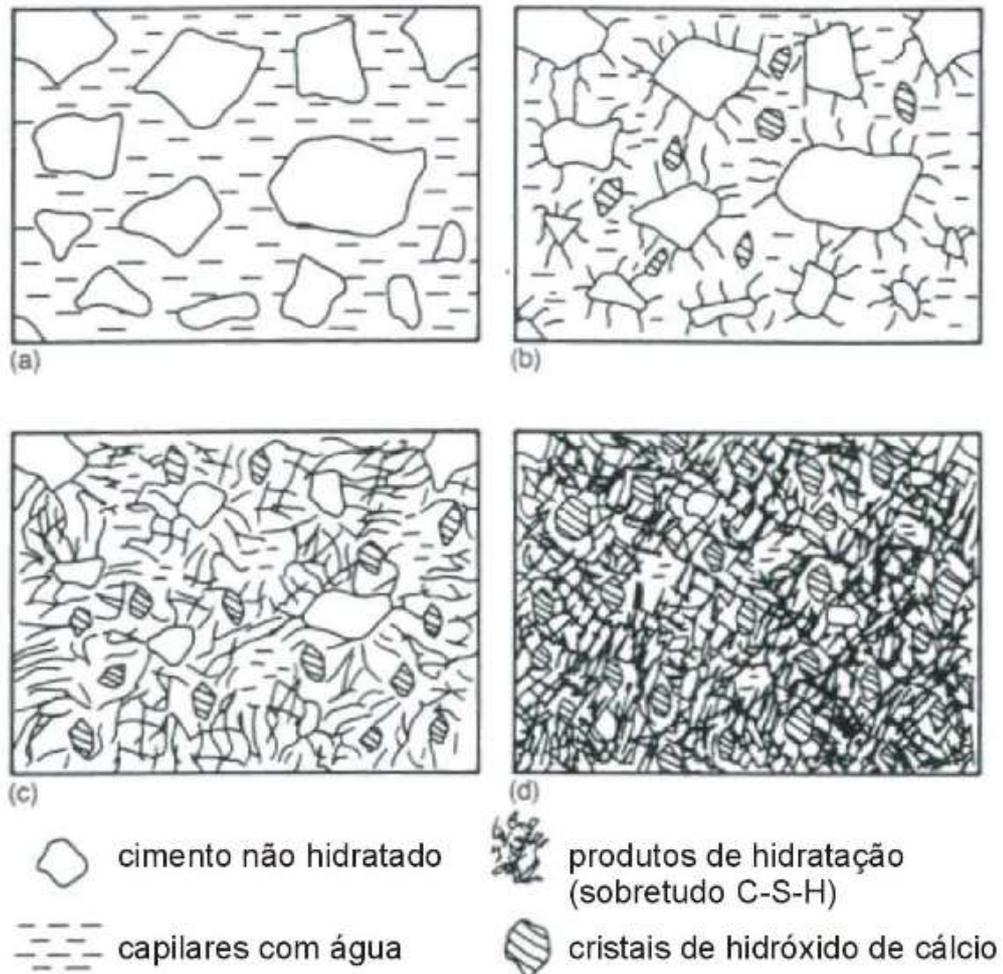


Figura 2.5: Esquema do desenvolvimento da microestrutura da pasta de cimento durante a hidratação (COUTINHO, 2002).

A Figura 2.5a representa a pasta de cimento imediatamente após a mistura da água com o cimento. As partículas de cimento encontram-se dispersas no meio aquoso, quer individualmente, quer sob a forma de flocos. O espaçamento entre as partículas depende da relação a/c utilizado. Na Figura 2.5b está representada a formação da fase C-S-H, o seu entrelaçamento e a presença dos cristais de Portlandita. No final do período de Indução, que corresponde aproximadamente ao início de pega, a etringita das partículas adjacentes começa a interferir e dá-se a formação de partículas de C-S-H com aspecto de “papel de prata” e de forma alongada. Ao fim de 2 ou 3 dias, situação representada pela Figura 2.5c, a pasta já possui uma maior resistência devido à maior densidade dos silicatos de cálcio hidratados que se vão formando. Continua a formação de cristais de Portlandita. A Figura 2.5d corresponde a uma pasta endurecida onde se podem ver produtos de hidratação de maior densidade, cristais de

Portlandita, resíduos de partículas de cimento não hidratadas e espaços vazios que ficam na estrutura. (COUTINHO, 2002)

2.4.1.2 Reatividade Pozolânica

A porosidade acessível do concreto representa, de fato, uma porta aberta para a entrada dos agentes líquidos e gasosos capazes de favorecer e/ou promover alterações químicas no interior do concreto, alterações que podem afetar a durabilidade e a estabilidade do cimento. E por isso, têm-se proposto modificações importantes na composição dos cimentos e dos próprios concretos, misturando materiais muito finos e reativos que exercem simultaneamente ações químicas de combinação e físicas de ocupação dos vazios.

Segundo a NBR 12653/2014, pozolanas são materiais silicosos ou silico-aluminosos que, sozinhos, possuem pouca ou nenhuma propriedade ligante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio $[Ca(OH)_2]$ à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades ligantes.

Os materiais pozolânicos apresentam composição química variada, porém os principais constituintes que caracterizam uma pozolana são os teores de alumina e/ou sílica. Segundo Massaza (1992), o percentual de SiO_2 presente nas fases ativas é um dos principais fatores que influenciam no potencial pozolânico de um material. O percentual de sílica está relacionado com a cal consumida e pode variar entre 45% a 85%. O autor salienta que o papel desempenhado por outros compostos, como a alumina, ao longo do tempo de conclusão da reação pozolânica não devem ser negligenciados.

Nos concretos de cimento Portland, as reações de caráter pozolânico decorrentes das adições só se verificam após a formação do hidróxido de cálcio, $Ca(OH)_2$, ou seja, após a hidratação do cimento. As pequenas partículas de pozolana (naturais ou artificiais) são geralmente mais lentas a reagir que as partículas do cimento, logo, os produtos de reação que se obtêm (do tipo C-S-H) são precipitados nos vazios da estrutura primeiramente constituída pelos produtos de hidratação do cimento. Todavia, quando são dispersadas na massa do concreto, geram um grande número de pontos de nucleação à volta dos quais se podem formar ou precipitar os produtos de hidratação. Este mecanismo torna a pasta mais homogênea e mais densa, promovendo-se em fase posterior a chamada reação pozolânica entre a sílica amorfa da adição e o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento Portland. Além do mais, verifica-

se, como se referiu, o efeito físico complementar de preenchimento dos vazios, cujo volume final fica assim mais reduzido.

Porém, com o passar do tempo, o hidróxido de cálcio, responsável pelo ambiente alcalino nos concretos, se combina com os materiais pozolânicos e com o CO₂ nos fenômenos de carbonatação natural, provoca a descida do pH e a instabilização dos silicatos cálcicos, que se transformam então em hidróxido por perda de parte do óxido de cálcio que os constituem. A progressiva descalcificação dos concretos dá lugar à formação de sílica gel, um pó sem propriedades ligantes, reduzindo o nível de estabilidade dos componentes hidratados do cimento Portland, que assim ficam sujeitos a corrosão (COUTINHO, 1973).

A problemática da durabilidade dos concretos fabricados com este tipo de ligante, especialmente em meios de maior agressividade química e física, levou a procura de soluções alternativas de cimentação.

2.4.2 Ativação Alcalina

A ativação alcalina é um processo químico que permite transformar estruturas vítreas (parcialmente ou totalmente amorfas e/ou metaestáveis), como as pozolanas, em um material compacto e cimentante. Tratam-se de ligantes alternativos aos ligantes convencionais, como o cimento e a cal, e a sua utilização tem vantagens, sobretudo do ponto de vista ambiental, uma vez que permitem a redução das emissões de dióxido de carbono associadas à produção dos ligantes tradicionais, uma redução da necessidade de áreas de aterros para a deposição dos resíduos, a conservação de recursos naturais e permite ainda a reintrodução de resíduos industriais na economia. (SILVA, 2016)

O material álcali-ativado é formado pela reação entre um precursor à base de silicatos ou aluminossilicatos na forma de pó, e por um ativador alcalino, sendo este na forma de solução aquosa ou em pó e que proporciona ao meio um elevado pH. Possui versatilidade quanto a utilização tanto de materiais naturais (como argila ou feldspatos) quanto subprodutos industriais (como escória, cinza volante e lodo de papel) (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015). Porém, o processo exato através do qual se dá a pega e o endurecimento dos ligantes ativados alcalinamente não está totalmente conhecido e encontra-se dependente do precursor e ativador utilizado.

Para Glukhovskiy, Rostovskaja e Rumyna (1980), o mecanismo de ativação alcalina consiste num conjunto de reações de destruição-condensação, que inclui a destruição do material de

partida em unidades estruturais pouco estáveis, a sua interação com estruturas de coagulação e a criação de estruturas de condensação. De acordo com este autor, inicialmente, ocorre a quebra das ligações Si-O-Si e Al-O-Al, presentes no precursor devido ao elevado pH da solução provocado pelos ativadores e, conseqüente, transformação dos grupos numa fase coloidal. Numa segunda fase, há uma acumulação de produtos destruídos que, interagindo entre si, vão formar uma estrutura coagulada a partir da qual vão ocorrer processos de policondensação (polimerização por etapas).

Assim sendo, pode se afirmar que no processo de ativação alcalina ocorre a dissolução de sílica e alumina presente nos precursores que, ao longo do tempo coagulam e dão origem a núcleos maiores. O aumento desses núcleos ocorre devido à dissolução de sílica e alumina e devido à aglomeração das novas partículas. Em termos mecânicos, o aumento do núcleo traduz-se num incremento das características mecânicas. O aumento da resistência cessa quando não é permitida mais a expansão dos núcleos (CRISTELO, 2009).

Davidovits, em 1978, alargou os conceitos da ativação alcalina a produtos totalmente isentos de cálcio, formulando compostos designados de geopolímeros, em que a sílica (SiO_2) e a alumina (Al_2O_3) constituintes dos aluminossilicatos reagem entre si em ambiente fortemente alcalino. Os geopolímeros são um subconjunto da ativação alcalina, que se caracterizam pela não formação de cadeias características de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), devido ao seu reduzido teor de cálcio.

No que diz respeito à organização química estrutural final, de acordo com Davidovits (1988) os ligantes geopoliméricos são constituídos por uma malha tridimensional em que os átomos de silício (Si^{4+}) alternam com os de alumínio (Al^{3+}) compartilhando 4 átomos de oxigênio (O^{2-}). O déficit de carga negativa é compensado pela presença de cátions, normalmente Na^+ , K^+ ou Ca^+ provenientes do próprio ativador ou existentes no precursor.

2.4.2.1 Ativadores

Os ativadores químicos são soluções líquidas com elevado pH, utilizado para que ocorra o processo de cimentação, conforme descrito acima. Livi (2013), descreve que na ativação alcalina comumente são utilizados como ativadores os meta-alcalinos e os alcalino-terrosos, que podem ser classificados de acordo com a classificação abaixo:

- a) Álcalis cáusticos ou hidróxidos: MOH , M(OH)_2 ;
- b) Sais não silicatos fracamente ácidos: M_2CO_3 , M_2SO_3 , M_3PO_4 , MF;

- c) Silicatos: $M_2O \cdot nSiO_2$;
- d) Aluminatos: $M_2O \cdot nAl_2O_3$;
- e) Aluminossilicatos: $M_2O \cdot Al_2O_3 \cdot (2-6)SiO_2$;
- f) Sais não silicatos fortemente ácidos: M_2SO_4 .

Sendo o “M” um íon alcalino ou alcalino-terroso.

Os ativadores mais difundidos na literatura são o hidróxido de sódio (NaOH), hidróxido de potássio (KOH), hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), o silicato de sódio (Na_2SiO_3). Ressalta-se que eles podem ser usados de forma isolada ou em misturas.

De modo geral, pode-se afirmar que os álcalis agem mantendo a alcalinidade do meio ($pH > 12$), favorecendo o processo de dissolução e policondensação dos géis, e além disso eles atuam como elemento formador da estrutura dos géis cimentantes, balanceando a carga negativa da estrutura transportada pelo tetraedro de alumínio, assim como dos elementos secundários (principalmente Zeolitas), Já os íons agem como catalisadores das reações químicas (DUXSON et al., 2007).

No caso das hidroxilas (OH^-), elas agem como catalisadoras da dissolução dos cátions Si^{4+} e Al_3 . Já os silicatos (SiO_2^-) aumentam a velocidade do processo de polimerização do sistema de reações geopoliméricas, diminui a porosidade do produto de reação e forma um gel mais rico em silício e mais geopolimerizado, melhorando o desempenho mecânico nas primeiras idades, e as características estruturais dos geopolímeros formados.

O tipo de cátion do hidróxido envolvido na geopolimerização tem grande influência na microestrutural do cimento formado, porém na literatura não se tem um consenso ao se comparar a utilização de hidróxidos alcalinos. Como exemplo, Palomo et al (2005), descrevem que o NaOH apresenta maior capacidade de liberação de monômeros de silicato e aluminato, incrementado o processo de reação inicial do material, formando estruturas mais compactas, ricas em Si, o que gera maiores resistências mecânicas em comparação com o KOH.

Já Zhang et al (2017) e Yun-Ming et al (2016), relatam que os geopolímeros produzidos com potássio (KOH) apresentam uma resistência à compressão 42% maior se comparados com aqueles produzidos com sódio (NaOH), apesar dos aluminossilicatos serem dissolvidos mais facilmente em hidróxido de sódio do que em hidróxido de potássio. Isso ocorre porque a presença do íon K^+ aumenta a desordem na fase gel, por ser maior e mais reativo. Logo, eles

concluem que não se deve associar a resistência à compressão final dos geopolímeros, apenas à habilidade de dissolução.

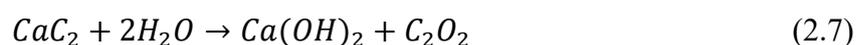
Em relação à utilização de silicatos alcalinos, estudos descrevem como efeito positivo, a formação de géis mais ricos em silício e mais geopolimerizados, diminuição da velocidade e uma microestrutura mais compactas e menos porosas (exceto em escórias de alto forno, na qual geram mais poros, se comparado com NaOH), melhorando as características estruturais e o desempenho mecânico dos geopolímeros formados. Porém, o excesso de silicato no sistema pode reduzir a resistência mecânica, pelo fato de reduzir a evaporação de água e dificultar a formação da estrutura geopolimérica (EDUOK, 2016). Além de reduzir o pH, aumentar a viscosidade da dissolução e gerar grande retrações nas amostras.

Em relação à concentração de álcalis, estudos demonstram que em baixas concentrações de álcalis as reações de síntese são limitadas ou não ocorrem. Já com altos conteúdos de álcalis, não se tem o incremento da resistência mecânica, apenas geram um maior custo e problemas de eflorescência, podendo ocorrer também a precipitação do gel antecipadamente, resultando em um geopolímero com uma menor resistência (EDUOK, 2016).

O silicato de sódio é um composto inorgânico, cujo a fórmula geral é $\text{Na}_2\text{O} \cdot x\text{SiO}_2$, obtido através da combinação de SiO_2 (dióxido de silício ou sílica) e Na_2O (óxido de sódio). O composto pode ser encontrado tanto em solução aquosa como na forma sólida, sendo utilizado em diversos processos e produtos industriais. Os silicatos de sódios, também conhecidos como vidro, apresentam características vítreas, incolores e transparentes, e dissolvem-se em água. Na indústria da construção civil, o silicato de sódio é utilizado na fabricação de impermeabilizantes aplicados a estruturas, como aditivo para acelerar a cura do cimento, na fabricação de divisórias de paredes e portas corta fogo, devido a sua resistência a altas temperaturas, é além disso, como visto acima, é empregado como ativador para a produção de materiais álcali ativados.

A utilização do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) como ativador, retoma a dois contextos na história dos materiais, o primeiro baseado nas edificações históricas que utilizavam ligantes a base de cal e a segunda está relacionada ao uso de adições pozolânicas a matriz cimentícia.

A cal utilizada como ativador neste trabalho é a cal de carbureto, resíduo industrial obtido através da reação química do carbeto de cálcio com água na produção do gás acetileno (Equação 2.7).



A cal de carbureto apresenta excelente condição de uso para aplicação na construção civil, através da incorporação em argamassas e produção de concretos convencionais, na remediação de solos contaminados e estabilização de solos. Essa condição se deve a sua composição química por apresentar cerca de 70 a 90% de hidróxido de cálcio disponível, bem como sua viabilidade econômica.

A produção mundial de acetileno está em cerca de 500 mil toneladas métricas por ano, gerando em torno de 1.423 mil toneladas de cal de carbureto. No Brasil a capacidade de produção é de aproximadamente 12 mil toneladas ao ano, desta forma gera-se cerca de 6 mil toneladas de cal de carbureto (EIGA, 2017).

Segundo a European Industrial Gases Association (2017), a maioria das plantas produtoras de gás acetileno utilizam tanques para armazenamento da cal de carbureto, onde a água clarificada é reciclada através de seu bombeamento para o gerador de acetileno, tonando a pasta de cal de carbureto mais concentrada para recuperação.

Estudos realizados por Saldanha et al. (2018) identificaram que a composição química da cal de carbureto e da cal hidratada comercializada são equivalentes, logo sua utilização apresenta potencial técnico e sustentável, uma vez que reduz significativamente o impacto ambiental negativo causado pelo descarte de cal de carbureto como resíduos em aterros sanitários e, ao mesmo tempo, conservar o recurso natural de calcário.

2.4.2.2 Precursores

Os precursores devem apresentar como fase predominante a sílica e/ou a alumina para serem ativados alcalinamente. Porém, apenas a composição química não garante reatividade. Outros fatores são considerados como essenciais neste processo, sendo eles, o teor de material amorfo, superfície específica do material, o teor de fase vítrea e o tamanho da partícula (QUEIROZ, 2019). Neste trabalho foi utilizado como precursor o resíduo da fibra de vidro moído. A seguir será apresentada um breve comentário sobre esse precursor o resíduo da fibra de vidro moído, material utilizado nessa pesquisa.

A fibra de vidro é obtida industrialmente através do vidro em estado líquido sob uma temperatura de 1600 °C. Esse líquido é submetido a um rápido resfriamento, onde o líquido é passado por orifícios reguláveis, obtendo-se fios em tamanhos e diâmetro desejados, porém durante esse processo é gerado um resíduo.

Diversas categorias de resíduos de vidro têm sido utilizadas em pesquisas aplicadas ao processo de geopolimerização, como por exemplo o vidro de garrafas, vidros automotivos, de painéis solares entre outros. Esse fato se deve, principalmente, às características químicas do material residual, que é rico em sílica, alumina e cálcio e ao ser finamente moído apresenta grande potencialmente ser usado como material precursor de reações cimentícias. Nesse sentido, surge a possibilidade do uso desse resíduo de fibra de vidro moído como material precursor e processos de álcali ativação.

2.5 COMPORTAMENTO MECÂNICO E HIDRÁULICO DE SOLOS CIMENTADOS

Solos estruturados são aqueles que possuem algum tipo de cimentação ou vínculo entre as partículas, possibilitando um comportamento de resistência, deformabilidade e porosidade inatingível em seu estado desestruturado.

O cimento usualmente utilizado para estabilização de solos artificialmente é o cimento do tipo Portland, composto pela combinação de óxidos de cálcio, silício, alumínio e ferro, provenientes do calcário, da argila e do gesso. A presença de sílica (SiO_2) e da alumina (Al_2O_3) tem importância fundamental na obtenção de produtos com elevadas resistências (COUTINHO, 1973). Porém, além do cimento Portland, outros aglomerantes são comumente utilizados a fim de garantir cimentação aos solos, como a cal, as cinzas e o asfalto. (BERNUCCI et al., 2008).

De maneira geral, a adição de cimento aumenta a resistência e a rigidez, diminui a compressibilidade e altera os limites de consistência; a condutividade hidráulica é reduzida nos solos granulares, mas pode aumentar nos solos argilosos; a durabilidade medida em ciclos de molhagem e secagem aumenta (MONTARDO, 1999).

O mecanismo de formação dos cristais oriundos da hidratação do cimento formam pontes de ligação envolvendo os grãos de areia produzindo uma densificação da mistura, essa densificação preenche os vazios do solo (QUEIROZ, 2019)

Devido a diversidade de matérias primas utilizadas nessa pesquisa, a seguir serão apresentados alguns estudos ligados ao efeito de agentes cimentantes em solos arenosos e argilas.

Clough et al. (1981) fizeram ensaios de compressão simples e de compressão triaxial para estudar o comportamento de um solo arenoso estabilizado com a injeção de sílica em gel. Os resultados

dos ensaios mostraram que o aumento da concentração de agente cimentante no gel aumenta a resistência do solo. O efeito da estabilização do silicato está no fato de transmitir rigidez e coesão ao solo, uma vez que o ângulo de atrito em solos melhorados com cimento ou agentes cimentantes, como é o caso, não são alterados significativamente. Sendo assim, concluíram que os fatores que afetam diretamente a estabilização de solos por silicatos injetados na forma de grante são: composição do grante; pressão confinante; taxa de carregamento; processo de cura da amostra; tempo de cura; e granulometria do solo.

Agentes cimentantes de natureza pozolânica, artificialmente introduzidos em mecanismos de estabilização de solos têm o tempo de cura como uma das variáveis mais significativas para a caracterização do comportamento mecânico, uma vez que este fator afeta diretamente a efetividade do grau de cimentação da mistura (CERATTI, 1979)

Segundo Prietto (1996), todos os aspectos analisados do comportamento mecânico do solo residual de arenito artificialmente cimentado com cimento pozolânico, foram, em maior ou menor grau, influenciados pela variação do grau de cimentação e da tensão efetiva média inicial.

Bellezza e Pasqualini (1997) estudaram a influência da adição de cimento e do tempo de cura na condutividade hidráulica de dois siltes argilosos e uma areia siltosa. Os resultados demonstraram que os valores de condutividade hidráulica obtidos com a adição de cimento dependem do tipo de solo e da umidade em que são feitas a mistura e a compactação. A adição de cimento pode provocar valores de condutividade hidráulica maiores ou menores em relação ao solo não tratado. Verificou-se que o tempo de cura diminui o valor da condutividade hidráulica, podendo este chegar a valores muito menores que os do solo não tratado. Outra observação importante é que as misturas solo-cimento percoladas imediatamente após a compactação apresentam condutividades hidráulicas menores que as mesmas misturas percoladas após um certo tempo.

De acordo com Croft (1967), a composição química e mineralógica do solo condiciona o sucesso de sua estabilização com cimento. Solos caoliníticos ou ílíticos podem ser considerados inertes e apresentarão um desenvolvimento adequado da resistência com econômicas quantidades de cimento. Já a presença de altos teores de argila montmorilonítica retarda a adequada hidratação e endurecimento do cimento, fazendo com que a estabilização com cal seja a mais eficiente. O autor explica que as reações entre a montmorilonita e cal liberada pela hidratação do cimento causam uma redução do pH da fase aquosa da mistura, o que retarda o endurecimento do gel de cimento e a cristalização de novos minerais.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir será descrito o programa experimental desta pesquisa, que se divide em três etapas distintas. Na primeira etapa foram escolhidas as matérias-primas, sendo realizados ensaios preliminares de caracterização física e química. Os materiais utilizados para a execução do preenchimento de barreiras hidráulicas verticais, incluindo o contaminante, foram escolhidos tendo como base os estudos de Azambuja (2004), Lemos (2006) e Pagani (2007).

Como matérias-primas principais foram utilizados o Solo Residual Arenito Botucatu (SRAB) e a Bentonita Sódica (BS). Para a cimentação das misturas, optou-se por dois tipos de cimento Portland (CP V e CP IV). Já os materiais álcali-ativados foi escolhido como precursor o Resíduo da Fibra de Vidro Moída (RFVM), e seguindo uma proposta de comparação entre as diferentes técnicas de alcali-ativação, foram realizadas duas misturas, a primeira tendo como ativador a Cal de Carbureto (CC), e segunda mistura composta de Cal de Carbureto (CC), Hidróxido de Sódio (NaOH) e Silicato de Sódio (Na_2SiO_3).

Na segunda etapa, realizou-se um estudo preliminar das dosagens, com posterior projeto experimental do comportamento mecânico das misturas, a partir de resistência à compressão não confinada e do ensaio de mini abatimento de cone.

A terceira etapa consistiu na seleção e determinação da condutividade hidráulica das misturas com potencial para material de preenchimento de barreiras hidráulicas verticais, a partir da percolação de água, seguido de percolação por soda cáustica. Ainda nessa etapa foi analisado o pH do líquido resultante das percolações por água e contaminante.

3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental tem por objetivo determinar a condutividade hidráulica a longo prazo, quando as misturas forem percoladas por água e soda cáustica (NaOH) e determinar a resistência à compressão não confinada das misturas compostas por SRAB, bentonita sódica e diferentes técnicas cimentantes, buscando-se um melhor desempenho. Não foram realizados ensaios de resistência à compressão não confinada com a mistura SB pelo fato do corpo de prova se desmanchar ao ser mergulhado em água (NBR 12.025/12).

3.1.1 Variáveis Investigadas

As Variáveis investigadas foram divididas em: dependentes e independentes. As dependentes são as variáveis resposta do planejamento experimental. Já as variáveis independentes, correspondem aos fatores que podem causar algum efeito nas variáveis dependentes e foram classificadas em: controláveis e constantes.

3.1.1.1 Variáveis Controláveis

- a) Tempo de Cura: 3, 7, 14, 28 dias;
- b) Fator a/c: 4, 3,5, 3, 2,5, 2, 1,5;
- c) Materiais cimentantes: CP V, CP IV, CC + RFVM;
- d) Ativadores para misturas álcali-ativadas: baixa alcalinidade inicial (CC), Alta alcalinidade inicial (CC + Na₂SiO₃ + NaOH).

3.1.1.2 Variáveis Constantes

- a) Temperatura de Cura: 23±2°C;
- b) Teor de Alkali: 2%;
- c) Materiais: Bentonita Sódica, Solo Residual Arenito Botucatu.

3.1.1.3 Variáveis Dependentes

- a) Resistência a Compressão Simples;
- b) Mini Abatimento de Cone;
- c) Ensaio de Condutividade Hidráulica;
- d) Medição de pH.

3.1.2 Ensaio Preliminares de Caracterização

A amostra de solo foi coletada no estado deformado, em quantidade suficiente para realização do ensaio. A preparação das amostras para os ensaios de caracterização, que envolvem a secagem ao ar, destorroamento, peneiramento e determinação da umidade hidrosférica, seguiu os procedimentos da NBR 6457/16. A amostra de bentonita sódica foi adquirida em sacos de 25 kg e passada na peneira com abertura de malha de #40.

A determinação dos limites de Atterberg do solo estudado seguiu as recomendações da NBR 6459/16 e da NBR 7180/16. A massa específica real dos grãos foi determinada conforme a NBR 6508/84. A análise granulométrica foi realizada por peneiramento e sedimentação, descrito pela NBR 7181/18, tendo como agente defloculante uma solução de hexametáfosfato de sódio.

Para os materiais cimentantes foram realizados os ensaios físico, químico e morfológico, de forma conjunta com a pesquisa de Queiroz (2019), de forma a entender suas características individuais e seu potencial cimentante. Para a identificação dos elementos químicos presentes nestes materiais foram realizados ensaios de fluorescência de raios X de dispersão por comprimento de onda, sendo preparadas 4g de amostra, passadas na peneira com abertura de malha de #325. A superfície específica, parâmetro essencial principalmente para determinar a reatividade dos materiais, foi obtida a partir de ensaio que utiliza o princípio da adsorção de nitrogênio na superfície do sólido, através da técnica B.E.T. A análise de difração de raios X foi utilizado para o estudo da estrutura cristalina das amostras, que foram passadas na peneira de 150 µm. As propriedades térmicas foram avaliadas através dos ensaios de termogravimetria (TGA) e calorimetria diferencial de varredura (DSC), com taxa de aquecimento de 10°C/min em atmosfera de nitrogênio com temperatura final de 1000°C (TGA) e 1500°C (DSC). As caracterizações geotécnica, química e mineralógica dos materiais estudados estão apresentadas de forma esquemática na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Ensaios de caracterização e análise química dos materiais.

Ensaio e Análise	Matérias-Primas					
	BS	SRAB	CP V	CPIV	CC	RFVM
Limites de Atterberg	x	x				
Granulometria	x	x			x	x
Identificação de elementos químicos	x				x	x
Massa específica real dos grãos	x	x	x	x	x	x
Área superficial - BET			x	x	x	x
Difração de raios X					x	x
Análise térmica - TG/DSC					x	x
Microscopia eletrônica de varredura - MEV					x	x

3.1.3 Definição das Dosagens

A definição da dosagem dos materiais utilizados para preenchimento das barreiras hidráulicas verticais foi feita baseada em valores publicados na literatura (XANTHAKOS, 1979;

D'APPOLONIA, 1980; PEARLMAN, 1999), bem como nos trabalhos de Azambuja (2004) e Lemos (2006).

Azambuja (2004) pesquisou a influência do teor de umidade e da relação água-cimento no coeficiente de condutividade hidráulica, índice de vazios e resistência à compressão simples de várias proporções utilizando as mesmas matérias-primas.

Lemos (2006), deu enfoque na trabalhabilidade e estabilidade volumétrica das misturas, bem como no comportamento mecânico após 72 horas de cura de seus corpos de prova, obtendo as seguintes dosagens: para a mistura solo-bentonita, teor de umidade igual a 100% e 12% de bentonita sódica; e para a mistura solo-cimento-bentonita, teor de umidade igual a 100%, 12% de bentonita sódica e fator água/cimento igual a 4. As proporções foram em relação ao total de sólidos, em massa.

Neste trabalho, se optou por manter a dosagem proposta por Lemos (2006), variando-se apenas a relação água/cimento, que foi usada para a determinação das quantidades dos agentes cimentantes. Para garantir a total reatividade entre precursor e ativador, obtendo assim uma coerente comparação ao cimento Portland, foi utilizada uma metodologia de cálculo com base na definição das relações molares, empregada por Murta (2008) e Queiroz (2019).

Murta (2008) estudou a ativação alcalina de pozolanas através do uso da cal virgem e cal hidratada como ativadores, propondo um cálculo simples para ativação. Inicialmente calculou o peso em gramas de um mol de CaO e de SiO₂, sendo estes 56,08g e 60,09g, respectivamente. Posteriormente realizou a análise da composição química dos materiais e calculou a quantidade necessária para se obter um mol de CaO e de SiO₂. Desse modo, pôde encontrar o peso em gramas do precursor e do ativador a ser utilizado. Para verificar a melhor proporção dos componentes da ativação alcalina, variou as relações molares CaO/Si₂O de 0,5 a 2,0 a cada 0,5, e observou que os materiais com relação molar 1, 1,5 e 2 apresentaram um comportamento mais representativos.

Queiroz (2019) realizou ensaios com estas três relações molares (1, 1,5 e 2), variando também os teores de agentes cimentantes nas misturas totais. Com o objetivo de estudar o comportamento de uma areia cimentada a partir de sistemas ligantes álcali-ativados, utilizou diferentes precursores (VM, CCA e SA), ativados alcalinamente pela cal de carbureto, analisando a resistência à compressão simples, rigidez à pequenas deformações e microestrutura

formada após a cimentação. Todas as misturas apresentaram resultados satisfatórios, sendo que os melhores resultados foram os com a relação molar 1.

Com base nesses estudos, as taxas de material cimentante utilizados na ativação alcalina ficaram fixadas como o somatório dos teores do precursor e ativador, utilizando a relação molar igual a 1. Devido a variação da quantidade de CaO e SiO₂ presente na composição química da cal de carbureto e do Resíduo da fibra de vidro moído, respectivamente, realizou-se ajustes nas porcentagens do precursor e do ativador, para se obter a proporção de reagentes desejada. Logo houve pequenas variações nas quantidades finais desses materiais, que foram posteriormente reajustadas em relação à quantidade de solo das misturas, para garantir 100% do teor de umidade, conforme tabela 3.2.

Tabela 3.2: Teores de Matérias Primas para cada mistura.

Mistura	Descrição	Teores das Matérias-Primas				
		Bentonita Sódica	SRAB	Cimento	Cal de Carbureto	Fibra de Vidro Moída
SB	SRAB-BS	12%	88%			
CPV	SRAB-CPV-BS	12%	63%	25%		
CPIV	SRAB-CPIV-BS	12%	63%	25%		
RFVM _p	SRAB-RFVM-CC-BS	12%	54%		15%	19%
RFVM _a	SRAB-RFVM-CC-NaOH-Na ₂ SiO ₃ -BS	12%	54%		15%	19%

3.1.4 Definição do Teor de Álcalis

Para uma dosagem de álcali ativação otimizada, o teor de álcalis de Na₂O é um parâmetro que oferece uma forte influência no efeito da solução ativadora. Nesta pesquisa, primeiramente foi avaliado o uso do hidróxido de Sódio de forma isolada, porém as amostras não apresentaram resistência até os 7 dias de cura. Posteriormente, foram testadas a inclusão do Silicato de Sódio (Na₂SiO₃), mantendo a mesma porcentagem inicial de álcalis Na₂O advindos do Hidróxido de Sódio (4%) e dois teores de álcalis de Na₂O para o Silicato de Sódio (2% e 6%). Ressalta-se que essa porcentagem de álcalis foram calculadas em relação a massa de CC + RFVM. A figura 3.1 registra os ensaios de resistência à compressão simples (RCS) realizados durante o estudo de dosagem, verificou-se que a amostra com 2% de Na₂O (Na₂SiO₃) apresentou maior consistência e resistência.

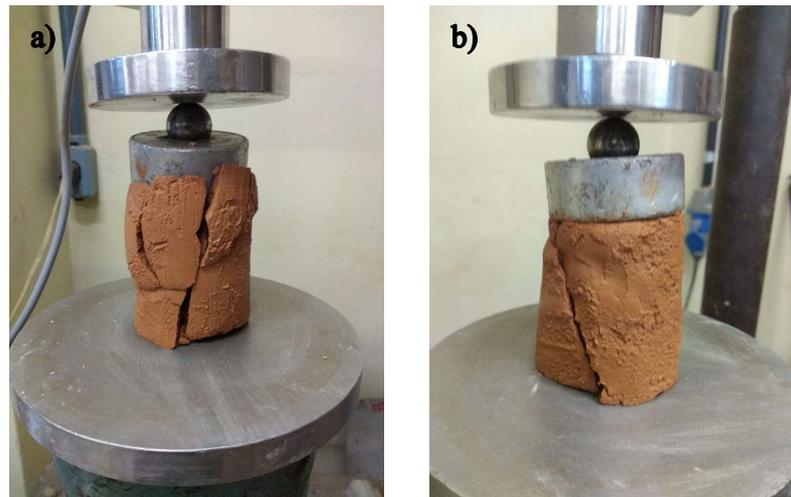


Figura 3.1: RCS para dosagem do teor de álcalis de Na_2O : a) 2% Na_2O (Na_2SiO_3); b) 6% Na_2O (Na_2SiO_3).

A tabela 3.3 apresenta o resultado dos ensaios de RCS para os estudos realizados para escolha do teor de álcalis, através dele, optou-se por utilizar 4% de álcalis Na_2O de Hidróxido de Sódio e 2% de álcalis de Na_2O para o Silicato de Sódio.

Tabela 3.3: Resultados RCS para definição do Teor de Álcalis.

Mistura	Relação a/c	Teor de álcali Na_2O Hidróxido de Sódio (%)	Teor de álcali Na_2O Silicato de Sódio (%)	Idade (dias)	Umidade Inicial (%)	Umidade Final (%)	Peso Especifico Natural (g/cm^3)	Peso Especifico Seco (g/cm^3)	RCS (kPa)
RFVMa	4	4	2	7	94,60	63,05	1,62	0,99	50,48
		4	6	7	96,36	58,18	1,61	1,01	19,66

3.1.5 Planejamento Experimental

No estudo do comportamento mecânico de barreiras hidráulicas verticais preenchidas com solo-cimento-bentonita, a consistência das lamas é um fator importante a considerar, devido a necessidade de uma boa trabalhabilidade no momento da deposição por gravidade no campo. Por outro lado, o ganho de resistência mecânica das lamas cimentadas também deve ser estudado, como uma forma de se garantir a estabilidade e integridade das barreiras após sua construção. Logo, este estudo focou-se tanto na resistência, como na consistência das misturas. Para a mensuração desses fatores, foram realizados ensaios de resistência à compressão não confinada em duplicata, nas idades de 7, 14 e 28 dias, nas misturas contendo CP V, acrescentou-se a idade de 3 dias, totalizando 116 ensaios (Tabela 3.4); e ensaios de mini abatimento de cone, executados em triplicata, totalizando 54 ensaios.

Para o estudo do comportamento hidráulico das misturas, foi realizada uma seleção posterior aos ensaios mecânicos, com base no desempenho das misturas em relação a resistência encontrada por Andromalos e Fisher (2001) e Ryan e Day (2002), e consistência proposta por D'Appolonia (1980). As misturas com potencial para material de preenchimento de barreiras hidráulicas verticais, foram então ensaiadas num permeâmetro de parede rígida, para determinação da condutividade hidráulica a partir da percolação de água, seguido de percolação por soda cáustica. Ainda nessa etapa foi analisado o pH do líquido resultante das percolações por água e contaminante. As quantidades de corpos de prova para cada ensaio de comportamento físico estão resumidas na tabela 3.4.

Tabela 3.4: Número de ensaios realizados

Misturas	Relação a/c	Resistencia à compressão Simples				total	Mini Abatimento de cone	Condutividade Hidráulica
		Idade						
		3	7	14	28			
SB	-	-	-	-	-	-	1	
CP V	4	2	2	2	2	32	3	
	3,5	2	2	2	2		3	
	3	2	2	2	2		3	
	2,5	2	2	2	2		3	
CP IV	4	-	2	2	2	24	3	
	3,5	-	2	2	2		3	
	3	-	2	2	2		3	
	2,5	-	2	2	2		3	
RFVMp	4	-	2	2	2	24	3	
	3,5	-	2	2	2		3	
	3	-	2	2	2		3	
	2,5	-	2	2	2		3	
RFVMa	4	-	2	2	2	36	3	
	3,5	-	2	2	2		3	
	3	-	2	2	2		3	
	2,5	-	2	2	2		3	
	2	-	2	2	2		3	
	1,5	-	2	2	2		3	
Total						116	54	10

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Bentonita Sódica - BS

Comumente a bentonita é originada de rochas geologicamente constituídas por argilominerais montmoriloníticos, porém as bentonitas tradicionalmente comercializadas são compostas por argilas esmectíticas (MENEZES et al., 2009).

O Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2004), adverte que além das características mineralógicas, as bentonitas devem possuir as seguintes características: alto poder de inchamento (até 20 vezes seu volume inicial); capacidade de atingir espaços interplanares de até 100 Å; alta área de superfície; CTC entre 60 e 170 meq/100 g e tixotropia. Na figura 3.2 encontra-se a curva granulométrica da bentonita, utilizada nessa pesquisa, seguida de suas características físicas (Tabela 3.5).

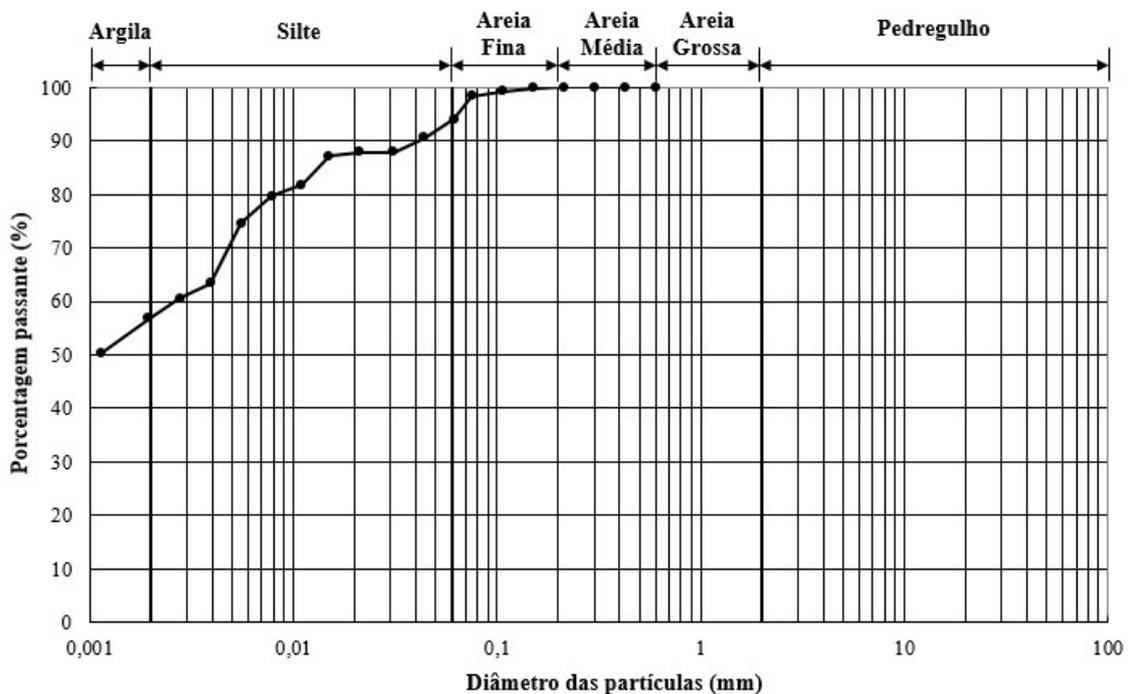


Figura 3.2: Curva granulométrica da BS.

Daniel e Koerner (1995) indicam que a qualidade da bentonita pode ser encontrada a partir do limite de liquidez, sendo que quanto melhor sua qualidade, maior é sua capacidade de expansão. A bentonita sódica utilizada nesta pesquisa considerada de média qualidade (LL: 300 a 500%).

Tabela 3.5: Características físicas da BS.

Característica	Valores
Massa Específica real dos grãos (Gs)	3,08 g/cm ³
Diâmetro a 50% (D ₅₀)	0,0011 mm
Limite de Liquidez (LL)	427,93%
Limite de Plasticidade (LP)	68,9%
Índice de Plasticidade (IP)	359,03%

As composições químicas das bentonitas costumam variar, devido às inúmeras substituições isomórficas nas esmectitas e das impurezas associadas, porém de modo geral, o SiO_2 é um dos componentes principais. A tabela 3.6 apresenta a composição química da bentonita utilizada.

Tabela 3.6: Análise química da BS.

Bentonita									
Óxidos	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	Cr_2O_3
%	56,39	2,58	17,92	11,73	5,42	3,56	0,86	1,49	0,06

3.2.2 Solo Residual Arenito Botucatu - SRAB

O arenito Botucatu é um solo residual de rocha sedimentar, pertencente à formação Botucatu, mostrada na Figura 3.3. Este material foi coletado em um talude localizado nas proximidades da rodovia RS 240, a aproximadamente 41 km ao norte de Porto Alegre, no município de São Leopoldo – RS.

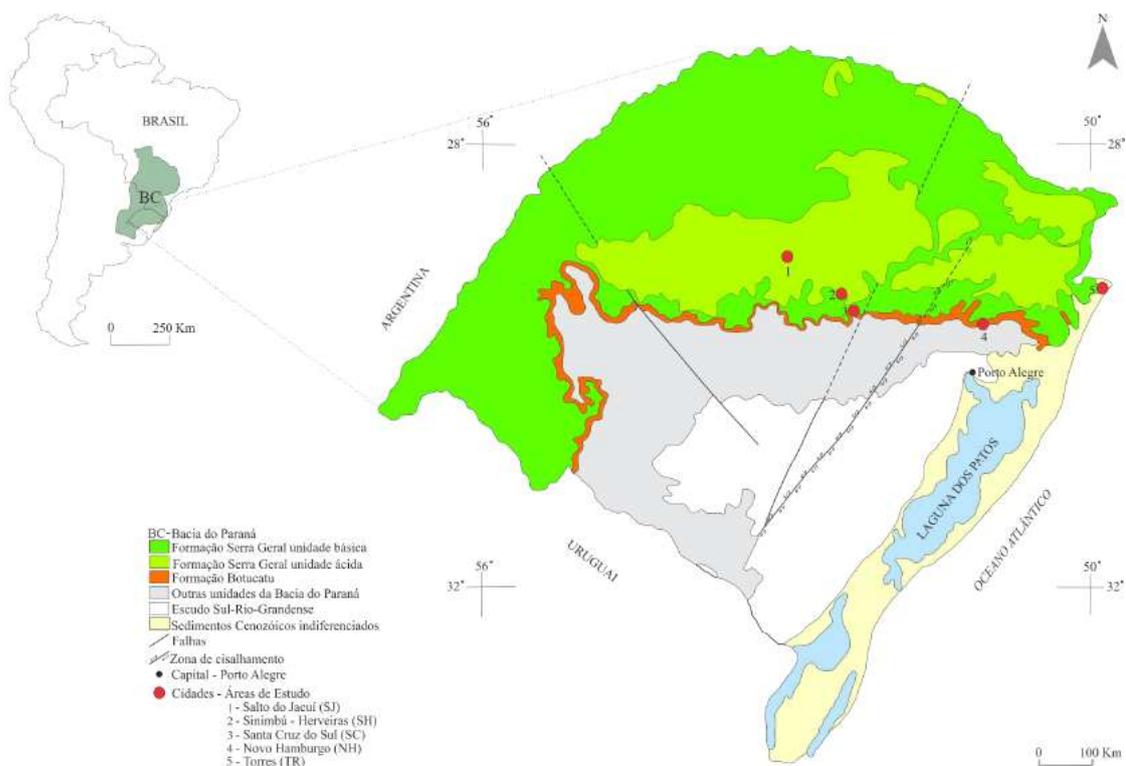


Figura 3.3: Mapa da bacia do Paraná (RIOS, 2017).

Sua caracterização permitiu classifica-lo como uma areia fina siltosa, mal graduada, fracamente plástica. As propriedades físicas médias do solo são apresentadas na Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Características físicas do SRAB.

Propriedades	Valores
Massa Específica real dos grãos (Gs)	2,66 g/cm ³
Diâmetro a 50% (D ₅₀)	0,12 mm
Limite de Liquidez (LL)	23,94%
Limite de Plasticidade (LP)	22,29%
Índice de Plasticidade (IP)	1,65%

A Figura 3.4 apresenta a curva granulométrica obtida para o solo residual. Verifica-se que o material é composto por aproximadamente 7% de argila (<0,002mm), 27% de silte (0,002 a 0,06 mm) e 66% de areia, sendo que desta porcentagem 38% é de areia fina (0,074 a 0,042 mm) e 28% é de areia média (0,042-2,0mm).

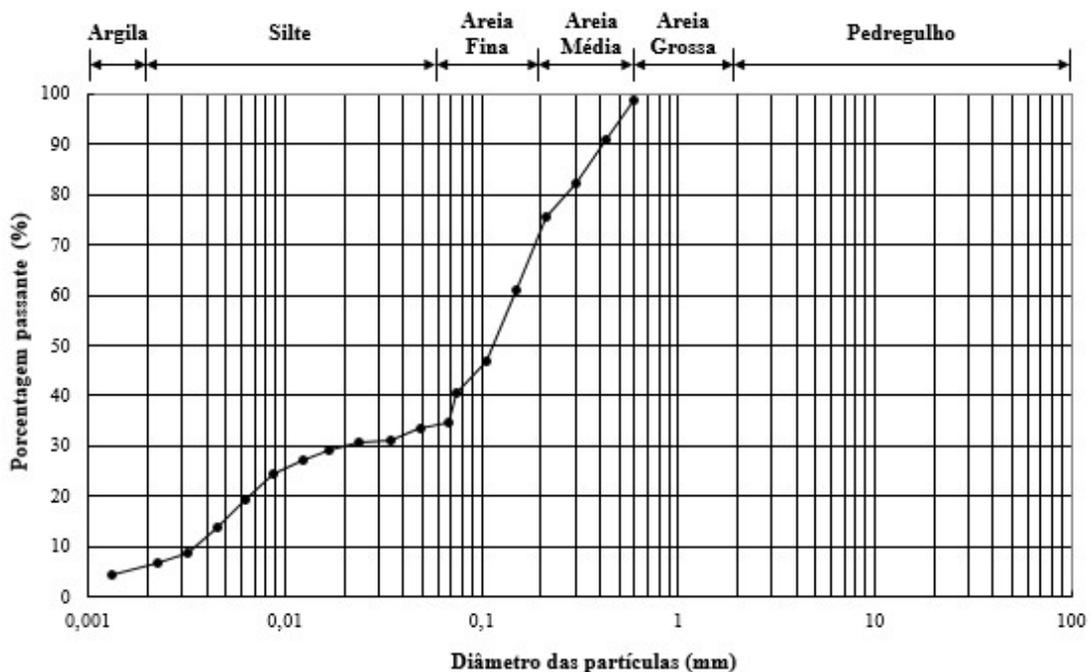


Figura 3.4: Curva granulométrica do SRAB.

3.2.3 Cimento Portland pozolânico - CP IV

A NBR 16697 (2018) preconiza que para o cimento Portland composto por material pozolânico (CPIV), a substituição de clínquer por material pozolânico pode variar entre 15 a 50%, além disso ele deve possuir de 0 a 10% de material carbonático. A propriedade física do cimento pozolânico é apresentada na tabela 3.8. As informações adicionais da composição e características do cimento utilizado estão baseadas nas normas vigentes.

Tabela 3.8: Características físicas do CPIV.

Característica	Valores
Massa Específica real dos grãos (Gs)	2,61 g/cm ³
Superfície Específica (SSA)	6,03 m ² /g
Início da Pega	≥ 1:00 h
Fim da Pega	≤ 12:00 h

3.2.4 Cimento Portland de Alta Resistência Inicial - CP V-ARI

O cimento utilizado neste estudo será o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI), produzido no Brasil. Optou-se pela utilização do cimento Portland de alta resistência inicial (CP V – ARI) normatizado pela NBR 16697/18, pelo fato de ele atingir elevadas resistências em poucos dias de cura.

Segundo a ABCP (2002), a resistência à compressão simples de corpos de prova de CP V – ARI com 3 dias de cura é equivalente à resistência aos 28 dias de cura de corpos de prova moldados com CP IV e aos 7 dias de cura é equivalente aos 28 dias de cura do CP III. A propriedade física do cimento de alta resistência inicial é apresentada na tabela 3.9. As informações adicionais da composição e características do cimento utilizado estão baseadas nas normas vigentes no período de desenvolvimento da pesquisa.

Tabela 3.9: Características físicas do CP V-ARI

Característica	Valores
Massa Específica real dos grãos (Gs)	3,16 g/cm ³
Superfície Específica (SSA)	6,23 m ² /g
Início da Pega	≥ 1:00 h
Fim da Pega	≤ 10:00 h

3.2.5 Cal de Carbureto

A cal de carbureto utilizada é proveniente da unidade da empresa White Martins localizada no município de Esteio a aproximadamente 26,4Km de Porto Alegre. Segundo Saldanha (2014) são geradas aproximadamente 2.160 toneladas ao ano nessa planta de produção.

A análise granulométrica da cal foi realizada por Queiroz (2019), através do ensaio de granulometria a laser utilizando o equipamento *CILAS 1180: ParticleSizeAnalyser*, com faixa

de detecção de partícula de 0.04–2500 μm . A Figura 3.5 apresenta a curva granulométrica da cal onde se é possível notar um comportamento uniforme da material. As demais características físicas da cal estão dispostas na Tabela 3.10.

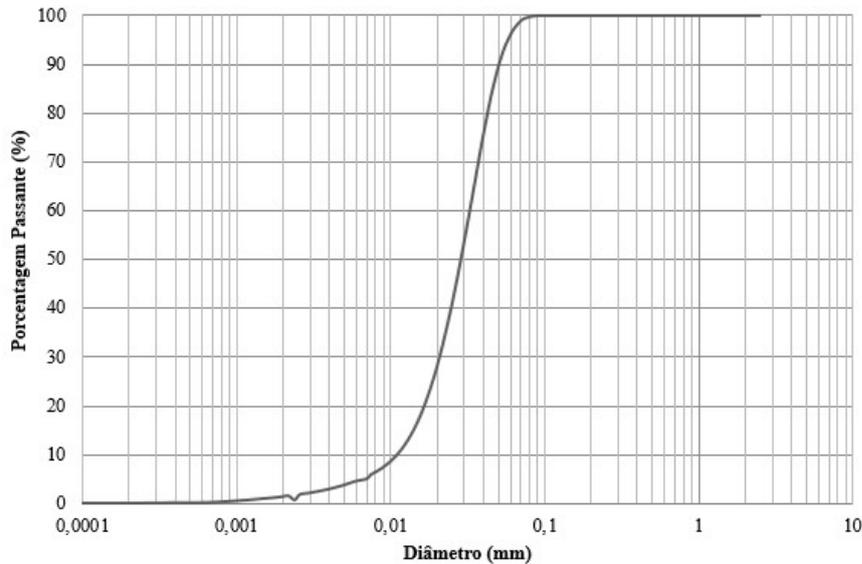


Figura 3.5: Curva granulométrica da CC (QUEIROZ, 2019).

Tabela 3.10: Características físicas da CC.

Característica	Valores
Massa Específica real dos grãos (Gs)	2,12 g/cm ³
Superfície Específica (SSA)	17,28 m ² /g
Diâmetro a 50% (D ₅₀)	28,72 μm

Queiroz (2019) realizou ensaios de Fluorescência de raios X para a obtenção da composição química cujos resultados estão presentes na tabela 3.11. Vale ressaltar que este resíduo foi escolhido como ativador devido ao seu elevado teor de óxido de cálcio.

Tabela 3.11: Análise química da CC. (QUEIROZ, 2019)

Cal de Carbureto (CC)							
Óxidos	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	SrO	CO ₂
%	1,36	80,73	0,46	0,27	0,45	0,14	16,56

A Figura 3.6 apresenta o resultado da difração de raios x da amostra onde é possível identificar a Portlandita [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] como mineral mais representativo, e que apenas próximo aos ângulos de 10° e 72° é que se identifica a presença da Calcita (CaO_3).

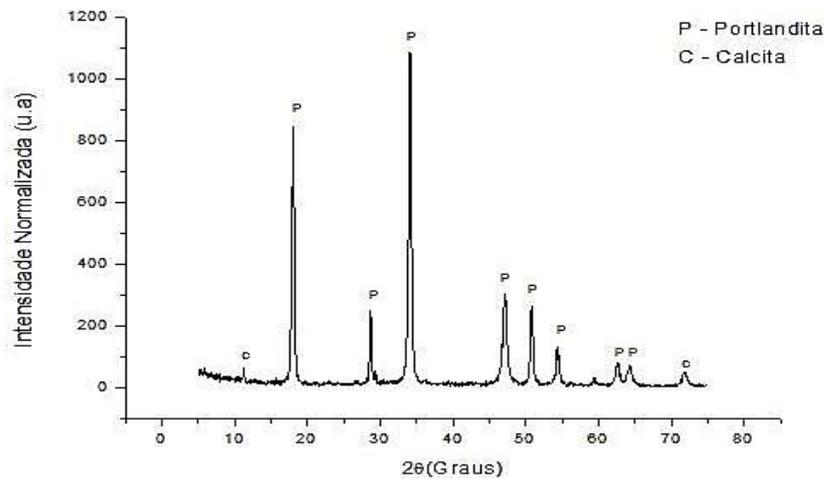


Figura 3.6: Difratometria de raios X da CC. (QUEIROZ, 2019).

A análise térmica da CC (Figura 3.7) apresenta uma redução de massa a partir de 500°C , onde a DTG apresenta dois picos distintos que correspondem a decomposição do hidróxido de cálcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] e do carbonato de cálcio (CaCO_3), Queiroz (2019) aponta que esta última decomposição é resultante do processo de carbonatação que a CC sofreu durante seu processo de armazenamento. Com relação as suas características morfológicas (Figura 3.8), observa-se que os grãos possuem formas regulares, possivelmente decorrentes do processo de moagem.

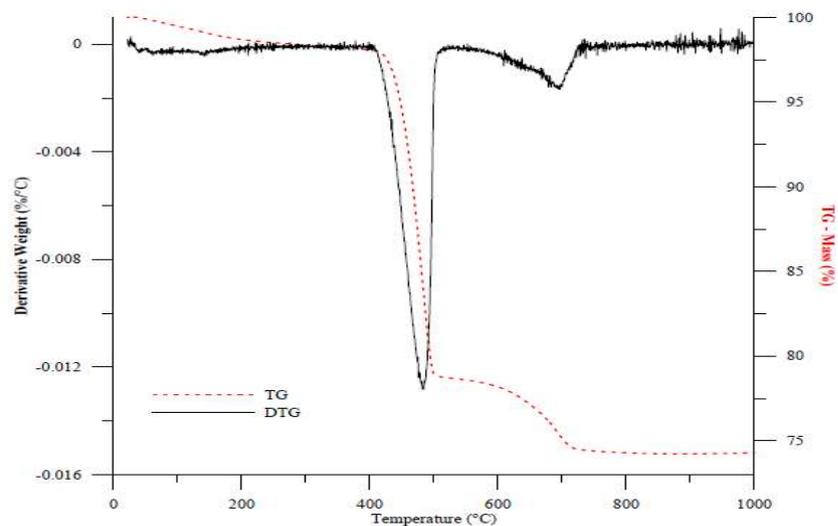


Figura 3.7: análise térmica da CC (SALDANHA, 2018).

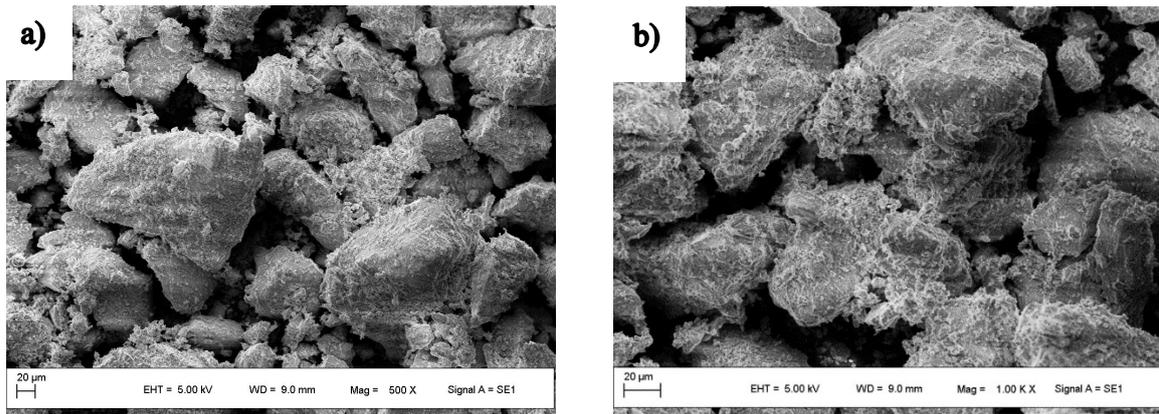


Figura 3.8: MEV da CC: a) 500x; b) 1000x (QUEIROZ, 2019).

3.2.6 Resíduo da Fibra de Vidro Moída – RFVM

O RFVM utilizada nessa pesquisa é um subproduto do processo de controle de fabricação da fibra de vidro. Após o recebimento do mesmo ele passou por um processo de peneiramento em uma peneira com abertura de $75\mu\text{m}$ (#200), para que se utilizasse nas misturas apenas o material passante. A seguir será apresentada a caracterização do material, realizado por Queiroz (2019), tendo em vista que o RFVM integra o mesmo lote utilizado pela autora.

A Figura 3.9 apresenta a curva granulométrica do RFVM onde é possível notar um comportamento geral caracterizado como uniforme, apresentando variação apenas entre os diâmetros 0,001 e 0,01 mm. As demais características físicas da cal estão dispostas na Tabela 3.12.

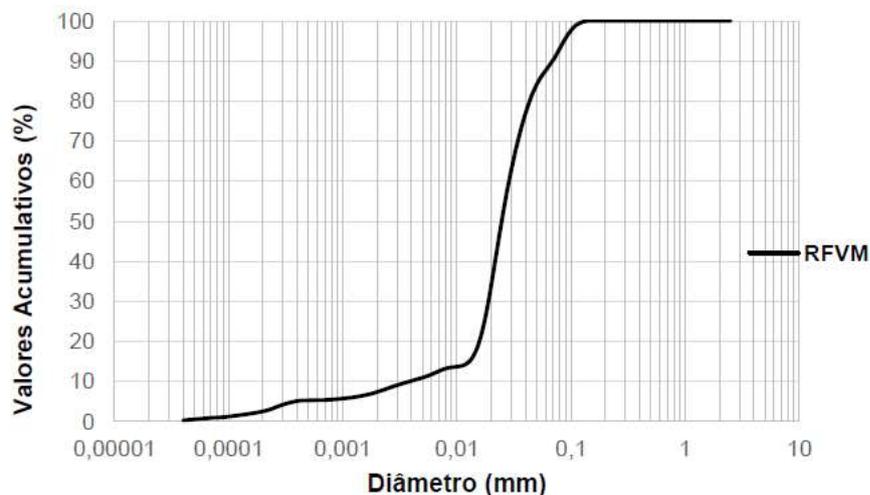


Figura 3.9: Curva granulométrica do RFVM (QUEIROZ, 2019).

Tabela 3.12: Características físicas do RFVM.

Propriedades	Valores
Massa Específica real dos grãos (Gs)	1,44 g/cm ³
Diâmetro a 50% (D50)	0,025 mm
Superfície Específica	3,70 (m ² /g)

Foram realizados também, ensaios de Fluorescência de raios X para a obtenção da composição química cujos resultados estão presentes na tabela 3.13. Ressalta-se que o material apresenta relevantes teores de silicatos e aluminatos.

Tabela 3.13: Análise química da RFVM.

Resíduo da Fibra de Vidro Muído (RFVM)						
Óxidos	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃
%	66,78	24,58	13,54	0,43	0,57	0,282

A Figura 3.10 apresenta o resultado do ensaio de difração de raios x da amostra, onde pode-se observar um comportamento predominantemente amorfo para o material ensaiado. Além disso, observar-se um pico entre os ângulos 20 e 30 que corresponde a uma cadeia de poliéster, proveniente do processo de tratamento da fibra de vidro.

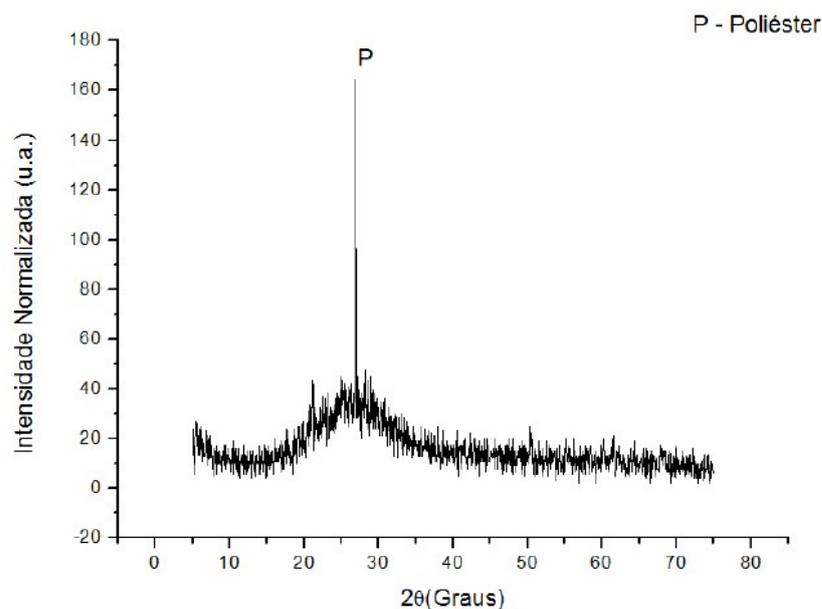


Figura 3.10: Difratometria de raios X da RFVM. (QUEIROZ, 2019).

A análise térmica do RFVM (Figura 3.11) não apresentou uma redução de massa significativa, mas ressalta-se que houve um comportamento exotérmico entre as temperaturas de 100°C e 200°C, o qual é atribuído a decomposição da película de poliéster que reveste o material. Com relação as suas características morfológicas (Figura 3.12), observa-se que o RFVM é formado por fibras de 18,5µm de comprimento, arranjadas de forma desordenada.

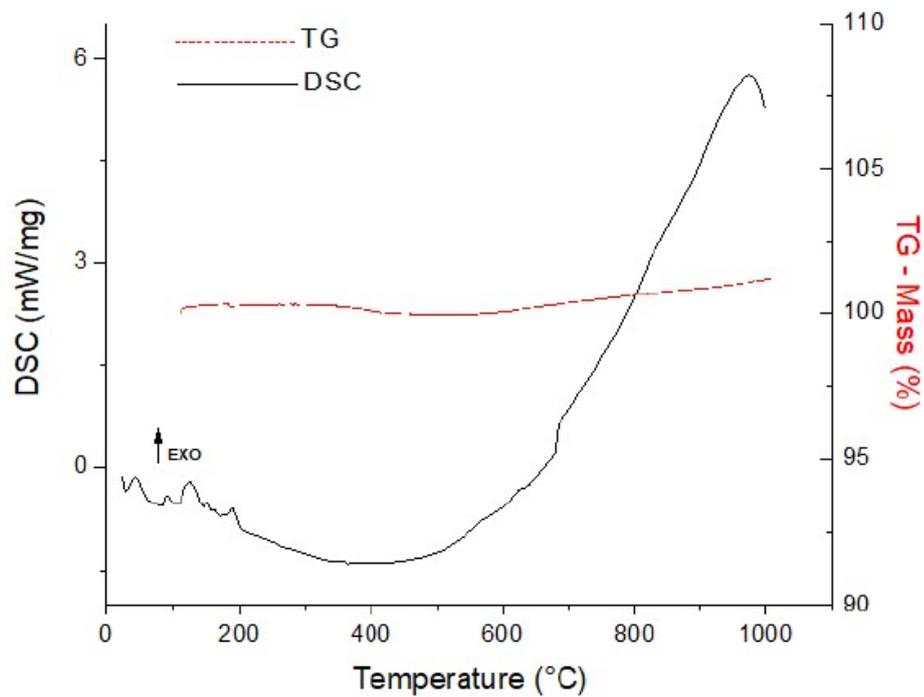


Figura 3.11: análise térmica do RFVM (QUEIROZ, 2019).

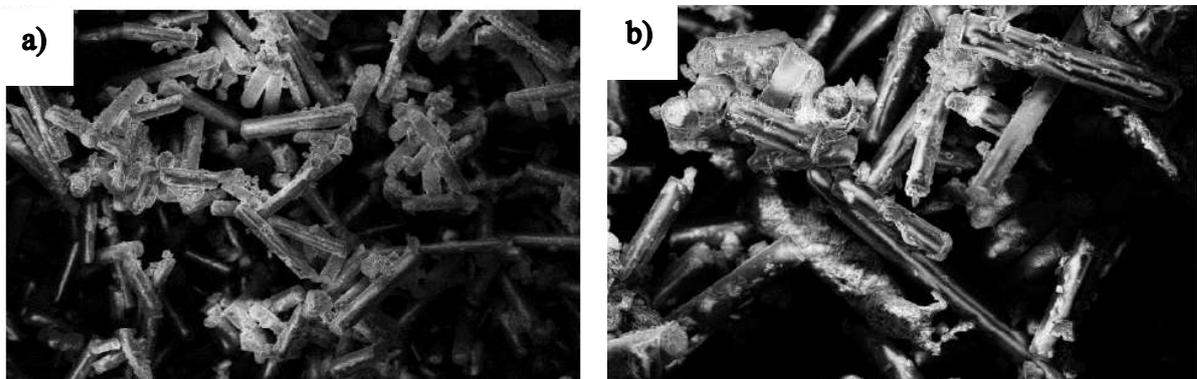


Figura 3.12: MEV do RFVM: a) 500x; b) 1000x (QUEIROZ, 2019).

3.2.7 Hidróxido de Sódio - NaOH

A soda cáustica utilizada nesta pesquisa como contaminante se encontra em estado físico sólido, e foi diluída em água para obtenção da concentração de 5%, que corresponde a um pH de 12,99, buscando trabalhar com valores acima dos limites de tolerância para resíduos poluentes. Para a moldagem dos CP's RFVMa, optou-se pela utilização de Hidróxido de Sódio na forma de microperolas com peso molecular igual a 40, fornecido pela Dinâmica Química Contemporânea Ltda.

3.2.8 Silicato de Sódio - Na_2SiO_3

Nessa pesquisa foi utilizado o Silicato de sódio alcalino, no estado físico aquoso, com peso molecular igual a 122, fornecido pela empresa Alpha química.

3.2.9 Água

A água utilizada para preparação de todas as misturas será a destilada com o objetivo de que a mesma não ofereça nenhuma interferência no que se refere às propriedades físico-químicas das misturas.

3.3 MÉTODOS

3.3.1 Ensaio de Compressão Simples

Os ensaios de resistência à compressão simples foram realizados apenas nas amostras que possuem agentes cimentantes e seguiram as recomendações da NBR 12025/12. A moldagem dos corpos de provas ocorreu em três momentos do programa experimental, primeiramente na definição do teor de álcali e posteriormente, com o objetivo de verificar a resistência das misturas antes e após a percolação com o contaminante.

Durante a moldagem dos corpos de prova, as amostras foram misturadas manualmente, adicionando-se inicialmente os líquidos, o SRAB e a BS. Posteriormente foram adicionados os agentes cimentantes. Nas misturas RFVMa, o Silicato de Sódio era acrescentado apenas ao final. As misturas homogeneizadas, foram então despejadas em moldes de PVC, com dimensões médias iguais a 9,99 x 4,76 cm. Eles tiveram um corte na lateral para facilitar a desmoldagem e, para conter as misturas se adaptou um fundo removível. A figura 3.13 apresenta as imagens dos moldes utilizados.

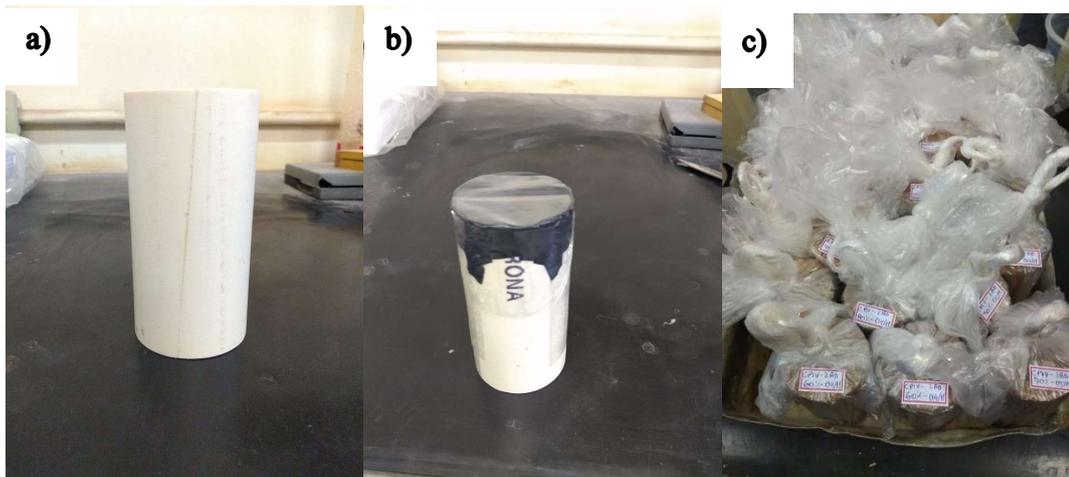


Figura 3.13: RCS: a) molde partido; b) base do molde; c) armazenamento dos CP's.

Os corpos de prova foram guardados na câmara úmida e desmoldados nas seguintes idades: CPV e CPIV: 2º dia; RFVMA e RFVMP: 6º dia. Após desmoldado, os corpos de prova foram condicionados em sacos plásticos e identificados por: mistura - tempo de cura - fator a/c - data da moldagem. Dois dias antes da realização dos ensaios, as extremidades dos corpos de prova foram regularizadas e niveladas. Em seguida, foram medidos e imersos em água, para evitar os efeitos da sucção no momento do ensaio. Cada amostra foi retirada individualmente da imersão e rapidamente pesados antes do ensaio. Após a ruptura, foram retiradas amostras para verificação da umidade ao final do ensaio.

A moldagem foi realizada em duplicatas para cada fator a/c das misturas, nas idades de de 7, 14 e 28 dias. Cabe salientar que, como será utilizado cimento de alta resistência inicial (CP V-ARI), a resistência encontrada ao terceiro dia corresponde a de mais de 7 dias para os cimentos pozolânicos comuns, logo, para efeitos de comparação, os corpos de prova que contiverem CP V-ARI foram rompidos ainda após 72 horas.

Além destes, as misturas que apresentaram potencial para preenchimento de barreiras hidráulicas verticais, foram moldadas em cilindro 15x15 para realização do ensaio de condutividade hidráulica. Ao final desses ensaios, outros três corpos de prova 5x10cm foram extraídos do corpo de prova 15x15cm, com a finalidade de determinar a resistência à compressão não confinada do material alterado pós-percolação, baseando-se na NBR 12770/92. As mesmas foram extraídas utilizando um moldador de CPs a partir de blocos indeformados e tomando-se cuidado para não causar qualquer deformação que altere o volume de vazios ou a estrutura determinada pela contaminação. A partir da equação 3.1 é determinada a tensão de

compressão q , suportada pelo corpo de prova a partir da carga aplicada P e da área transversal A do mesmo.

$$q = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

3.3.2 Mini Abatimento de Cone

Para representação da consistência das misturas optou-se por adaptar o ensaio de Abatimento de Cone, utilizando-se um cone vasado de isopor, com altura: 5,88 cm, diâmetro menor: 4,26 cm e diâmetro maior: 6,26 cm (Figura 3.14). Para a realização dos ensaios, inicialmente os cones foram fixados a uma placa de vidro, em seguida tomava-se parte da mistura realizada para os ensaios de RCS, preenchendo o primeiro cone em três camadas, repetindo-se 25 movimentos verticais para expulsar possíveis bolhas de ar em cada camada, aplainando-se ao final a superfície superior.

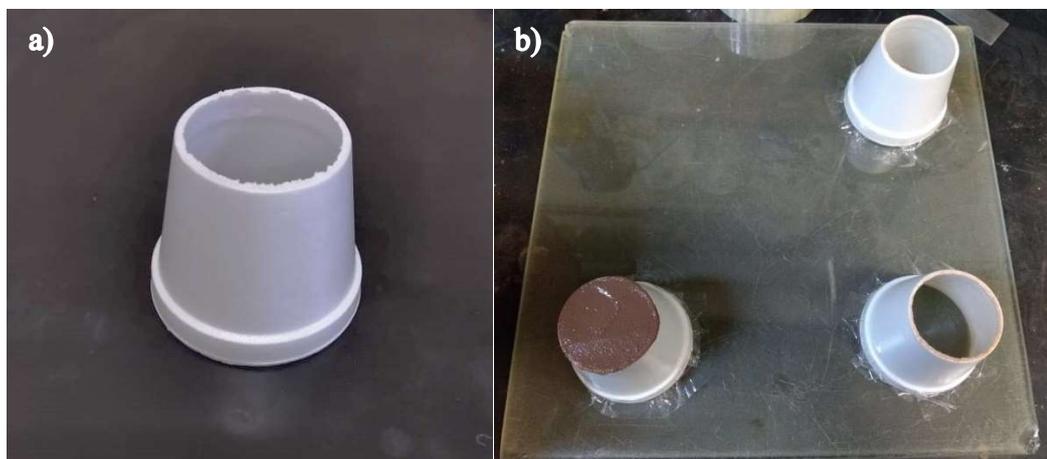


Figura 3.14: Mini Abatimento de Cone: a) molde; b) sistema de ensaio.

Por fim, o cone era retirado, realizando-se as medições de abatimento e espalhamento com o auxílio de régua e paquímetro (Figura 3.15). Em seguida, todo o procedimento foi repetido para outros dois moldes, totalizando três corpos de prova para cada relação a/c das misturas estudadas.

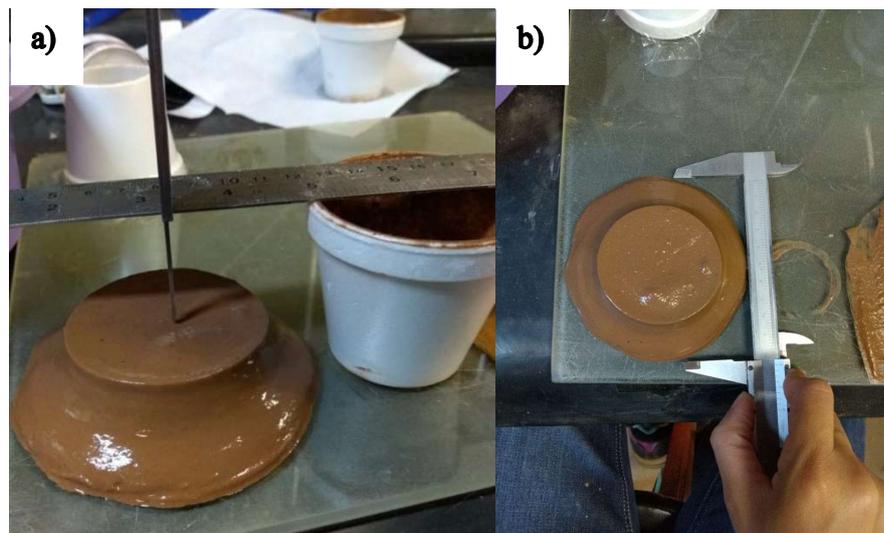


Figura 3.15: Mini Abatimento de Cone: a) medição do abatimento; b) medição do espalhamento das amostras.

3.3.3 Ensaios de condutividade hidráulica

A determinação da condutividade hidráulica foi feita por um permeâmetro de parede rígida, do tipo *compaction mold permeameter*, com fluxo ascendente, desenvolvido conforme a Norma Americana ASTM 5856/15, própria para solos de condutividade hidráulica inferior a 10^{-5} m/s. O equipamento foi projetado pela Dr. Rosemar Gomes Lemos com orientação e auxílio dos Prof. Dr. Nilo César Consoli e Prof^a. Dr. Karla Heineck,

O sistema hidráulico escolhido no ensaio foi o de carga constante. Este sistema é capaz de manter a pressão hidráulica constante dentro de 5% e tem condições de medir esta pressão ou quedas de carga dentro da tolerância prescrita.

3.3.3.1 Montagem do Permeâmetro

O equipamento é constituído de duas câmaras cilíndricas, a primeira para amostra de dimensões 150 x 150 mm (ϕ x h) e a segunda para reservatório do líquido permeante de 150 x 300 mm (ϕ x h). O diâmetro e altura dos cilindros, nos quais ficariam as amostras, foram determinados baseados em Heineck (2002) onde consta que, geralmente, quanto maior o diâmetro da amostra, mais representativo é o resultado obtido, e que devem ser utilizadas amostras entre 25 mm até 150 mm. Para essa pesquisa, os ensaios foram realizados simultaneamente em 2 permeâmetros, cujo sistema está descrito na figura 3.16.

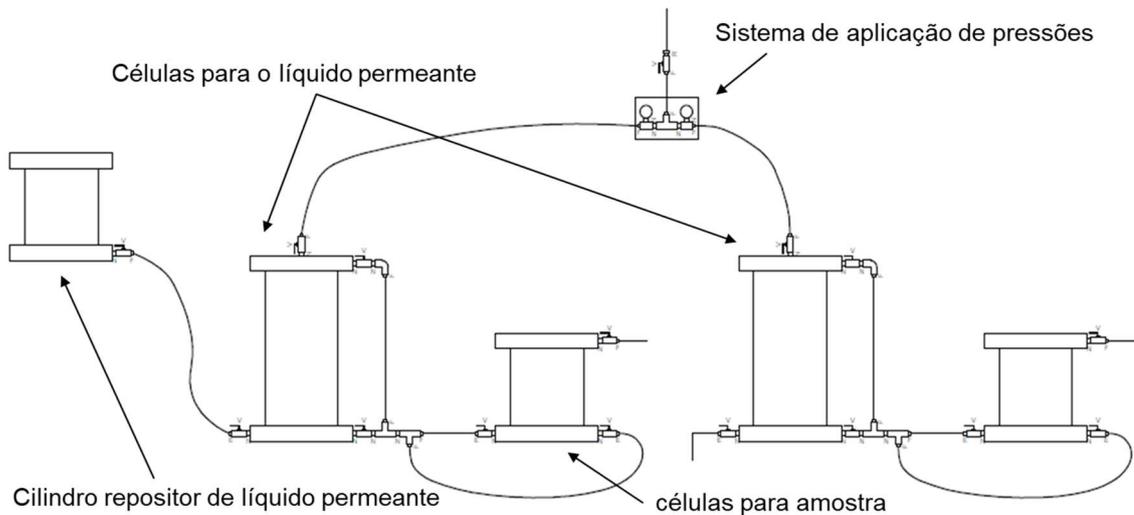


Figura 3.16: Esquema do permeametro de parede rígida.

A matéria-prima utilizada na confecção do aparelho e conexões foi o aço inoxidável, visando produzir um equipamento inerte a uma grande variedade de líquidos contaminantes. A tubulação utilizada em *nylon*, é igualmente inerte à soda cáustica. As conexões de latão foram utilizadas apenas nos locais sem contato com o líquido contaminante. O sistema conta com válvulas de retenção nas saídas de todas as células para evitar a possibilidade de refluxo.

A célula que contém o líquido permeante possui conexão na base superior para entrada de ar e na base inferior traseira para entrada de água e solução contaminante, proveniente diretamente do cilindro repositório, foi incluído ao equipamento nesta pesquisa. Além de saída frontal ligada à célula para amostra.

O cilindro repositório de líquido permeante possui a extremidade superior aberta, possibilitando tanto a preenchimento inicial do líquido no sistema, quanto a reposição do mesmo ao longo do ensaio. Ele possui ainda uma saída inferior frontal ligada aos dois permeômetros, e uma traseira, para retirada do líquido após se completar o volume necessário das células que contém o líquido permeante.

As células para amostra têm em sua base inferior conexão com a célula que contém o líquido permeante e uma saída para os gases que poderiam estar no interior da tubulação. Na base superior, ocorre a saída do líquido permeado, que será coletado para posterior medição.

O sistema de aplicação de pressões foi feito através de um compressor com capacidade de até 1013,25 KPa, diretamente sob o líquido a ser permeado. O nível de pressão adequado é

controlado por manômetros de aço-carbono situados entre o compressor e as células para armazenamento do líquido permeante. A medição da pressão é realizada através de reguladores de pressão, com precisão entre 0 - 1013,25kPa, $\phi = \frac{1}{4}$ ", e manômetros de medição entre 0 e 392,4 kPa.

A vazão do sistema é constante visto que o fluido será armazenado num cilindro de 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura e sobre ele será aplicada pressão. Nesse cilindro foi adaptado um tubo translúcido acoplado a uma régua graduada que permite o controle do volume de líquido contido, através de leituras (h_1 e h_2) em intervalos de tempo iguais. Conhecendo-se a seção do cilindro e este intervalo de tempo entre duas leituras simultâneas ($t - t_0$), é possível determinar o fluxo interno por unidade de tempo. O fluxo externo, definido como o volume de líquido que foi coletado na saída da amostra (lixiviado), será verificado a partir da determinação da medida de sua massa em intervalos de tempo iguais, conhecendo-se a densidade do lixiviado.

3.3.3.2 Preparação dos Corpos de Prova

Primeiramente os materiais foram pesados, misturados em uma bateadeira industrial e colocados na célula para amostra até a borda do cilindro, utilizando uma peça acessória denominada “anel para moldagem” (Figura 3.17).

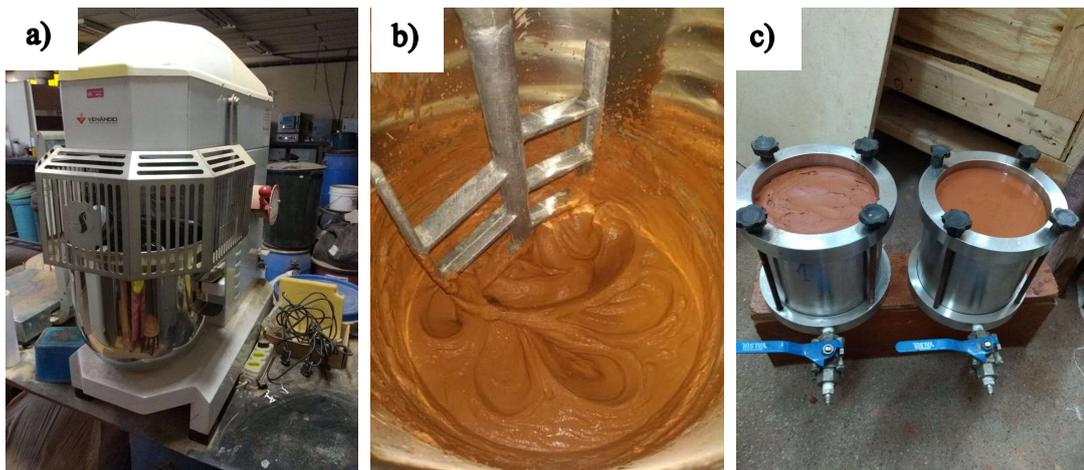


Figura 3.17: Moldagem dos Corpos de Prova: a) bateadeira industrial; b) mistura homogeneizada; c) cilindros com anel de moldagem.

Esta peça continuou por uma hora, na mistura de SB, com a finalidade de permitir que a bentonita sódica hidrate e aumente seu volume, para só então fechá-la com sua base superior. Nas misturas com agentes cimentantes, o permeâmetro permaneceu com o anel de moldagem

por 72 horas, até ser fechado com a base superior para a imediata aplicação de água. Foi ainda reservada uma quantidade de cada mistura, para determinação do teor de umidade.

3.3.3.3 Permeação

Após a calibração e validação dos resultados obtidos no permeômetro montado, foram realizados os ensaios de condutividade hidráulica. Antes de começar o ensaio, o anel de moldagem foi retirado, como necessário, a superfície da amostra foi regularizada. Em seguida, foram colocados o papel filtro, a molha de aço, a pedra porosa de aço e a tampa do cilindro (Figura 3.18). Então a célula da amostra foi fechada e pesada com o conjunto completo, também o recipiente de coleta do lixiviado foi pesado.

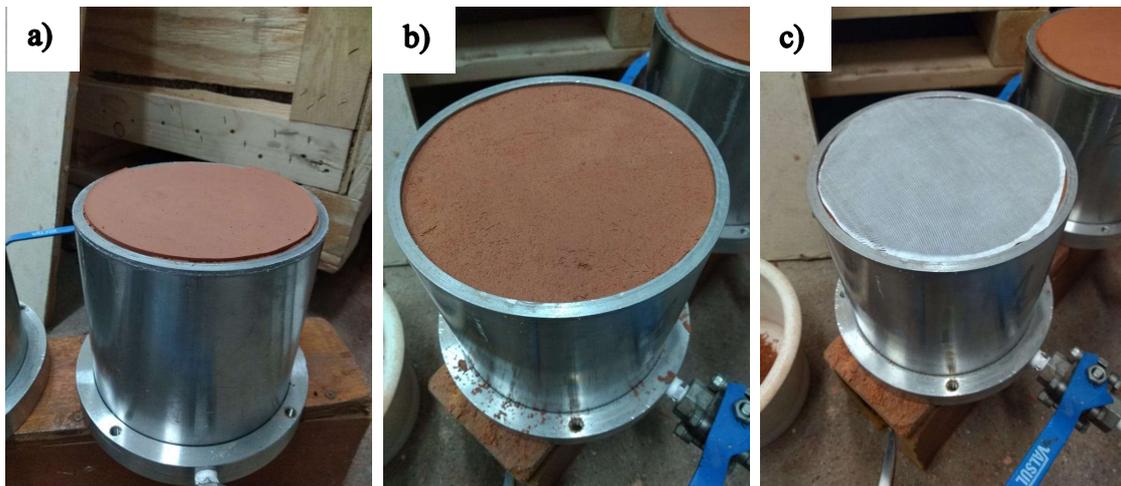


Figura 3.18: Fechamento da célula da amostra: a) retirada do anel de moldagem; b) regularização da superfície; c) papel filtro + malha de aço.

Logo após, a amostra foi conectada ao sistema de ensaio, sendo aplicada uma pressão de $0,12 \text{ kgf/cm}^3$, através da vagarosa abertura da válvula localizada na base superior da célula para líquido. Depois, foi aberta lentamente a válvula de escape do cilindro da amostra e a outra válvula da base inferior do mesmo cilindro, para retirar todos os gases contidos na tubulação, e só depois foi aberta a válvula da base superior, ainda do mesmo cilindro, fechando simultaneamente a válvula de escape. Nesse momento, se deu início ao ensaio, anotando-se o horário e o nível de água do cilindro maior.

Ao aplicar pressão de $0,12 \text{ kgf/m}^2$ na mistura contida no cilindro, de altura igual a 15 cm, obteve-se um gradiente igual a 8 (valor determinado através da Equação 2.6). Este gradiente foi

considerado apropriado ao fenômeno estudado, segunda a Norma ASTM 5856/15. A determinação dos coeficientes de condutividade hidráulica baseou-se na Lei de Darcy, e será corrigido para uma temperatura padrão de 20 °C através da multiplicação de K pela taxa de viscosidade da água na temperatura em que for feita cada leitura durante o ensaio.

As leituras do ensaio foram realizadas de hora em hora, nas primeiras 6 horas, sendo anotados o nível do cilindro que contém água, a massa e o pH do lixiviado. Após esse primeiro momento, foram realizadas ao menos uma leitura por dia até o 7º dia de ensaio.

Na etapa seguinte, a água destilada foi retirada do cilindro e substituída pela solução contendo Hidróxido de Sódio (NaOH). O ensaio de condutividade hidráulica recomeçou, percolando-se o contaminante até no mínimo o instante em que o total do líquido coletado correspondeu ao volume de vazios da amostra. Procurou-se manter os ensaios até o período total de 28 dias de percolação. Terminado este ensaio, dos corpos de prova que permaneceram estruturados, foram extraídas três amostras das misturas para os ensaios de resistência à compressão não confinada.

3.3.4 Medição do pH

O pH é um fator importante a ser verificado, tanto pela natureza alcalina do contaminante, quanto pelos efeitos que uma variação pode causar na natureza das argilas ou no processo de hidratação do cimento. Por isso, o pH no lixiviado foi analisado diariamente durante o ensaio de condutividade hidráulica. A figura 3.19 apresenta o medidor de pH utilizados, que possibilitava ainda a medição da temperatura do líquido percolado.

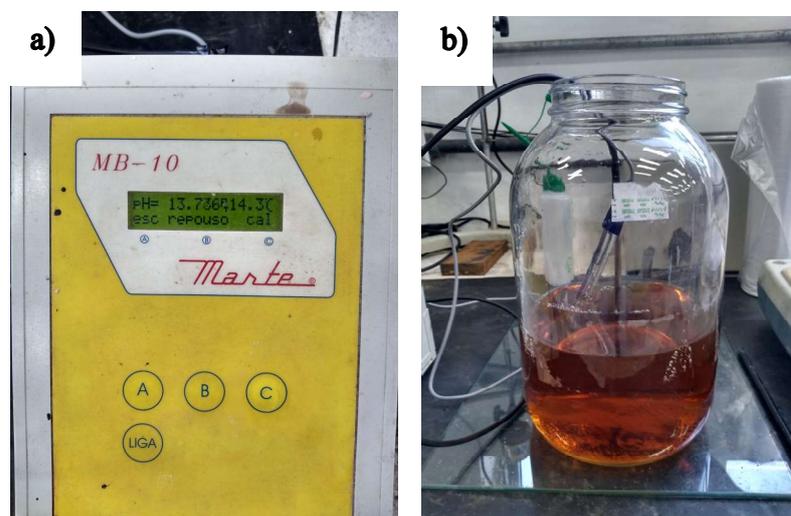


Figura 3.19: Medição de pH: a) pHmetro; b) eletrodo de pH e sensor de temperatura.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo serão apresentadas as variáveis respostas obtidas através dos ensaios de Resistência a Compressão Simples, Slump Test (Abatimento de Cone) e Condutividade Hidráulica. Os resultados dos ensaios serão apresentados em função das variáveis controláveis: Composição das misturas (CPV; CPIV; RFVMp; RFVMa); Relação água-cimento (4; 3,5; 3; 2,5; 2; 1,5); e tempo de cura (3; 7; 14; 28 dias).

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)

A tabela 4.1 apresenta as médias das dimensões dos Cp's (5x10), após o tempo de cura, moldados para o ensaio de resistência à compressão não confinada. Inicialmente essas dimensões eram iguais aos dos moldes utilizados, porém durante o tempo de cura observou-se uma diminuição dessas dimensões. Para melhor visualização desse fenômeno, se propôs o cálculo de um índice (IR) que determinasse a porcentagem de retração do cp entre o final da moldagem e a realização do ensaio. Através do índice de retração, foi possível identificar o comportamento diretamente proporcional entre ele e a relação água cimento, que se deve ao fato dos cps com menor relação água cimento apresentar uma matriz cimentícia com uma porcentagem de elementos sólidos. Além disso, observou-se que os cimentos alternativos apresentaram maiores valores de IR, acredita-se que se comportamento se deve ao fato da água presente na mistura não fazer parte da formação do gel polimerizado durante o período de cura, servindo apenas como meio para que o ativador entre em contato com os materiais envolvidos nas reações, sendo expulsa durante esse período. Por outro lado, a água que é adicionada à mistura que contém cimento Portland passa a fazer parte da estrutura do gel cimentício e apenas uma parcela é perdida.

Ressalta-se que o volume de vazios, o índice de vazios e a porosidade foram estimados com base na umidade obtida, após a finalização do ensaio de RCS, considerando-se que os CP's encontravam-se totalmente saturados, pois foram submersos por 24h, antes da realização dos ensaios. Esse fato se deve à impossibilidade de se obter peso ao final de cada CP imediatamente após o término da moldagem, tendo em vista o alto valor de umidade utilizado, que resultava em um material com alta fluidez.

Tabela 4.1: Características Físicas Médias dos Corpos de Prova 5x10

Misturas	Relação a/c	Umidade Inicial (%)	Altura (cm)	Diâmetro (cm ²)	Volume (cm ³)	Índice de Retração (%)	Umidade Final (%)	Volume de Vazios (cm ³)	Índice de Vazios (e)	Porosidade
CP V	4	96,30	9,72	4,69	167,48	5,79	81,11	105,90	1,72	0,63
	3,5	77,48	9,82	4,68	169,22	4,81	66,61	93,05	1,22	0,55
	3	67,77	9,93	4,69	171,16	3,72	59,53	88,13	1,06	0,51
	2,5	59,16	9,95	4,70	171,76	3,38	51,24	82,06	0,91	0,48
CP IV	4	100,71	9,52	4,67	163,09	8,26	84,87	99,65	1,57	0,61
	3,5	79,85	9,68	4,68	166,33	6,44	69,00	92,84	1,26	0,56
	3	69,72	9,74	4,67	166,82	6,16	60,43	86,50	1,08	0,52
	2,5	60,40	9,90	4,69	171,09	3,76	52,07	83,14	0,95	0,49
RFVMp	4	92,15	9,11	4,68	156,56	11,93	75,53	80,98	1,07	0,52
	3,5	74,44	9,44	4,66	160,92	9,48	61,83	73,41	0,84	0,46
	3	65,55	9,55	4,65	162,20	8,76	54,54	68,26	0,73	0,42
	2,5	56,58	9,84	4,63	166,04	6,60	47,40	64,92	0,64	0,39
RFVMa	4	95,07	8,81	4,69	150,03	15,61	70,12	72,02	0,92	0,48
	3,5	75,46	9,22	4,70	157,84	11,21	57,11	65,59	0,71	0,42
	3	66,57	9,50	4,71	164,77	7,32	50,95	62,98	0,62	0,38
	2,5	55,28	9,64	4,69	166,05	6,59	42,81	53,57	0,48	0,32
	2	47,63	9,83	4,67	167,26	5,92	35,99	42,55	0,34	0,25
	1,5	37,20	9,90	4,69	170,37	4,16	29,41	42,32	0,33	0,25

4.1.1 CPV

A tabela 4.2 apresenta os resultados de RCS obtidos para as misturas de CP V nas idades de 3, 7, 14 e 28 dias. Além desses CP's moldados especificamente para a realização do ensaio, a tabela contém o resultado dos CP's moldados a partir da amostra (15x15), após 28 dias de percolação no permeâmetro de parede rígida.

Tabela 4.2: Resultados RCS CP V ARI

Mistura	Relação a/c	Idade (dias)	Umidade Inicial (%)	Umidade Final (%)	Peso Específico Natural (g/cm ³)	Peso Específico Seco (g/cm ³)	RCS (kPa)
CP V	4	3	95,87	81,31	1,40	0,77	202,62
		7	95,94	80,66	1,42	0,79	333,65
		14	96,45	82,19	1,39	0,76	463,28
		28	96,92	80,27	1,44	0,80	605,50
		31 (perc.)	96,82	-	-	-	272,44
	3,5	3	78,40	65,60	1,43	0,86	215,56
		7	76,48	67,14	1,60	0,96	419,88
		14	76,48	66,91	1,54	0,92	549,43
		28	78,56	66,78	1,51	0,90	696,58
	3	3	67,29	61,50	1,57	0,97	297,57
		7	66,06	57,06	1,55	0,99	545,67
		14	68,32	59,61	1,53	0,96	728,80
		28	69,40	59,93	1,59	0,99	779,08
	2,5	3	58,35	51,64	1,62	1,07	746,02
		7	58,21	49,99	1,58	1,05	1064,19
		14	60,32	50,92	1,59	1,05	1153,40
28		59,76	52,40	1,59	1,04	1147,53	

Os resultados demonstraram que para menores relações de água/cimento o material cimentado tem uma maior tendência de estabilizar sua resistência em menores idades, conforme demonstrado na figura 4.1. Em relação à amostra percolada, ocorreu uma diminuição de resistência de aproximadamente 55%, comparando-se com a amostra não percolada na idade de 28 dias. Uma hipótese para este comportamento é de que o contaminante (NaOH) interagiu com a microestrutura da mistura, degradando parte de sua resistência.

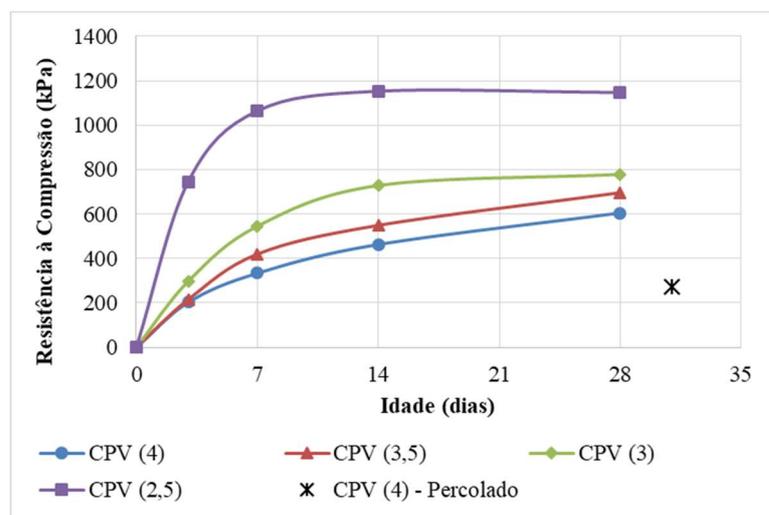


Figura 4.1: Gráfico de Resistência por idade CP V ARI

4.1.2 CPIV

A tabela 4.3 apresenta os resultados de RCS obtidos para as misturas de CP IV nas idades de 7, 14 e 28 dias. Como esperado, os resultados demonstraram que o ganho de resistência é diretamente proporcional ao aumento da idade, devido a maior maturação do gel cimentício durante a hidratação do cimento. Por outro lado, sua resistência é inversamente proporcional à relação água/cimento, tendo em vista que misturas com menores relações água/cimento possuem maiores teores de agentes cimentantes.

Tabela 4.3: Resultados RCS CP IV

Mistura	Relação a/c	Idade (dias)	Umidade Inicial (%)	Umidade Final (%)	Peso Específico Natural (g/cm ³)	Peso Específico Seco (g/cm ³)	RCS (kPa)
CP IV	4	7	97,05	84,80	1,48	0,80	65,00
		14	101,35	85,84	1,47	0,79	109,58
		28	103,75	83,96	1,44	0,78	237,83
	3,5	7	78,84	66,06	1,49	0,89	229,31
		14	80,04	72,01	1,54	0,90	319,33
		28	80,68	68,93	1,52	0,90	526,06
	3	7	68,78	58,35	1,56	0,99	412,34
		14	71,06	62,08	1,56	0,96	496,44
		28	69,32	60,86	1,56	0,97	729,11
	2,5	7	58,73	51,17	1,59	1,05	526,44
		14	61,99	52,86	1,58	1,03	729,59
		28	60,49	52,19	1,57	1,03	1141,39

A figura 4.2 apresenta o gráfico de resistência a compressão simples da mistura com CP IV, para as diferentes relações água/cimento e idades.

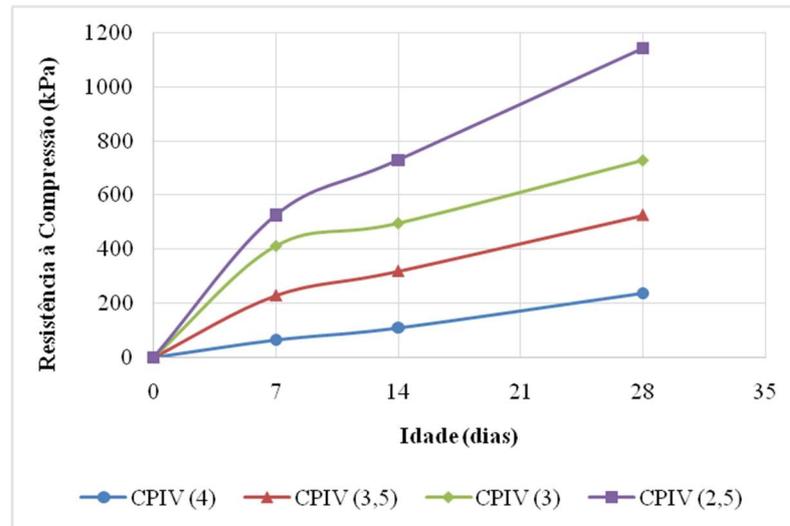


Figura 4.2: Gráfico de Resistência por idade CP IV

4.1.3 RFVMp

O processo de cimentação que ocorre através de reações pozolânicas ativadas unicamente pela cal tem por característica o desenvolvimento tardio da matriz cimentícia. Os resultados dos ensaios, demonstrados na tabela 4.4, evidenciam esse comportamento através da resistência ao longo do tempo.

Tabela 4.4: Resultados RCS RFVMp

Mistura	Relação a/c	Idade (dias)	Umidade Inicial (%)	Umidade Final (%)	Peso Específico Natural (g/cm ³)	Peso Específico Seco (g/cm ³)	RCS (kPa)
RFVMp	4	7	93,38	78,28	1,48	0,83	5,95
		14	90,45	76,63	1,51	0,86	119,13
		28	92,62	71,67	1,50	0,87	301,64
	3,5	7	75,64	67,08	1,54	0,92	13,98
		14	72,43	63,97	1,55	0,95	136,31
		28	75,24	54,43	1,57	1,02	527,45
	3	7	66,05	58,47	1,57	0,99	22,98
		14	65,03	58,44	1,58	1,00	205,62
		28	65,57	46,70	1,59	1,09	840,58
	2,5	7	57,08	51,12	1,59	1,05	22,93
		14	55,94	50,62	1,59	1,05	272,78
		28	56,71	40,46	1,58	1,12	941,42

No gráfico 4.3 é possível observar que até os sete dias de cura a RCS se mantém inferior aos 30 kPa para todas as relações água cimento estudadas, e a partir dessa idade a amostra passa a ter uma maior taxa de ganho de resistência. Além disso, misturas com menores relações de água/cimento tendem a um comportamento de ganho de resistência exponencial, conforme verificado para a curva das misturas RFVMp (3) e RFVMp (2,5).

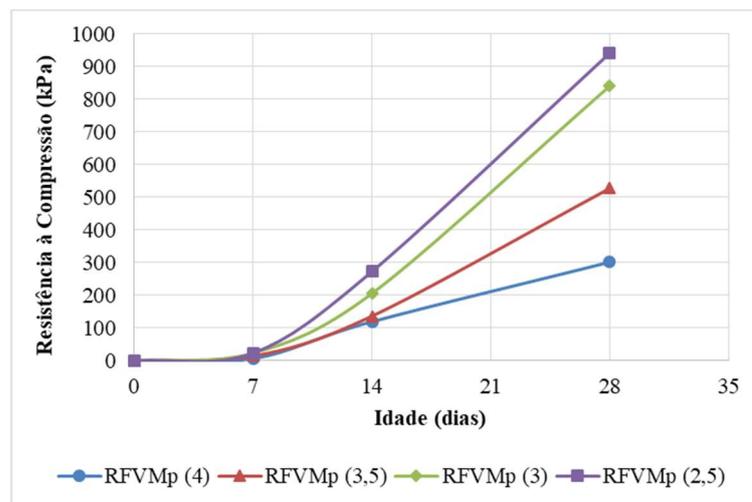


Figura 4.3: Gráfico de Resistência por idade RFVMp

4.1.4 RFVMa

Para as misturas ativadas alcalinamente a partir do silicato de sódio (Na_2SiO_3) e da soda cáustica (NaOH), observou-se que nas relações água/cimento até 3 as resistências se mantiveram abaixo de 90 kPa, porém a partir da relação a/c de 2,5, a resistência na idade de 7 dias foi acima de 300 kPa, valor 3,6x maior que o da relação a/c anterior. A partir dessa relação, as resistências na idade de 7 dias apresentaram melhores resultados, demonstrando uma matriz cimentícia mais desenvolvida nessa idade.

Tabela 4.5: Resultados RCS RFVMa

Mistura	Relação a/c	Idade (dias)	Umidade Inicial (%)	Umidade Final (%)	Peso Específico Natural (g/cm³)	Peso Específico Seco (g/cm³)	RCS (kPa)
RFVMa	4	7	95,46	74,18	1,55	0,89	32,05
		14	95,89	68,10	1,57	0,93	117,98
		28	93,84	68,10	1,54	0,92	424,66
	3,5	7	77,61	60,57	1,59	0,99	49,91
		14	74,80	55,38	1,66	1,07	191,04
		28	73,97	55,38	1,60	1,03	566,58
	3	7	66,69	55,14	1,63	1,05	86,10
		14	63,95	48,86	1,68	1,13	240,33
		28	69,06	48,86	1,64	1,10	733,03
	2,5	7	55,49	42,73	1,71	1,20	308,88
		14	54,66	42,85	1,71	1,20	439,66
		28	55,69	42,85	1,71	1,20	1299,44
		31 (perc.)	57,01	51,67	1,62	1,07	583,27
	2	7	47,91	37,20	1,79	1,31	311,70
		14	47,64	35,39	1,81	1,33	569,32
		28	47,33	35,39	1,77	1,31	2226,31
	1,5	7	36,07	30,88	1,83	1,40	464,01
		14	37,22	28,67	1,83	1,42	913,34
		28	38,30	28,67	1,84	1,43	3276,10
		31 (perc.)	37,98	33,30	1,80	1,35	2917,75

Em relação à amostra percolada, observa-se que para a amostra RFVMa (2,5), percolada por 31 dias, ocorreu uma diminuição de resistência de aproximadamente 55%, em relação à uma amostra da mesma mistura curada por 28 dias e não percolada, porém para a amostra RFVMa (1,5), também percolada por 31 dias, essa perda foi de apenas 11%, em relação a uma amostra da mesma mistura curada por 28 dias e não percolada. Acredita-se que essa diferença se dá devido a amostra RFVMa (1,5) durante os 28 dias de ensaio ter sido percolada apenas 1 vez seu volume de vazios, já a amostra RFVMa (2,5) durante o mesmo período foi percolada 31 vezes seu volume de vazios, gerando uma maior degradação da estrutura cimentícia. Isso ocorreu devido a diferença entre as condutividades hidráulicas das amostras, que serão apresentadas no item 4.3.

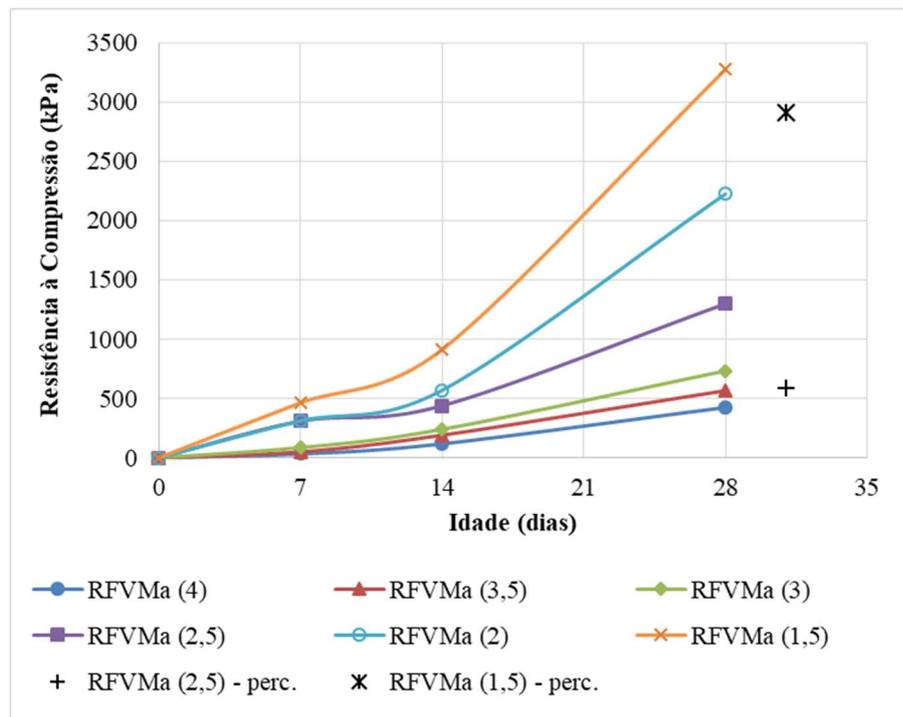


Figura 4.4: Gráfico de Resistência por idade RFVMA

4.1.5 Relação entre a RCS e fator a/c (4)

Para um fator a/c igual a 4, observa-se na figura 4.5 que o comportamento da mistura cimentada com CPV apresentou um melhor desempenho de resistência em comparação as demais misturas. Vale ressaltar, que a resistência dessa mistura aos 7 dias de cura, foi maior do que as resistências das amostras RFVMp e CPIV, aos 28 dias de curas. A amostra RFVMA apresentou uma resistência superior a essa, porém inferior se comparada a resistência do CP V aos 28 dias. Destaca-se que entre as amostras CPIV, RFVMp e RFVMA a primeira apresentou um maior ganho de resistência ao longo dos primeiros 14 dias de cura, momento em que as resistências se igualaram, e a partir dessa idade o CPIV passa a apresentar menor resistência em comparação com todas as demais misturas.

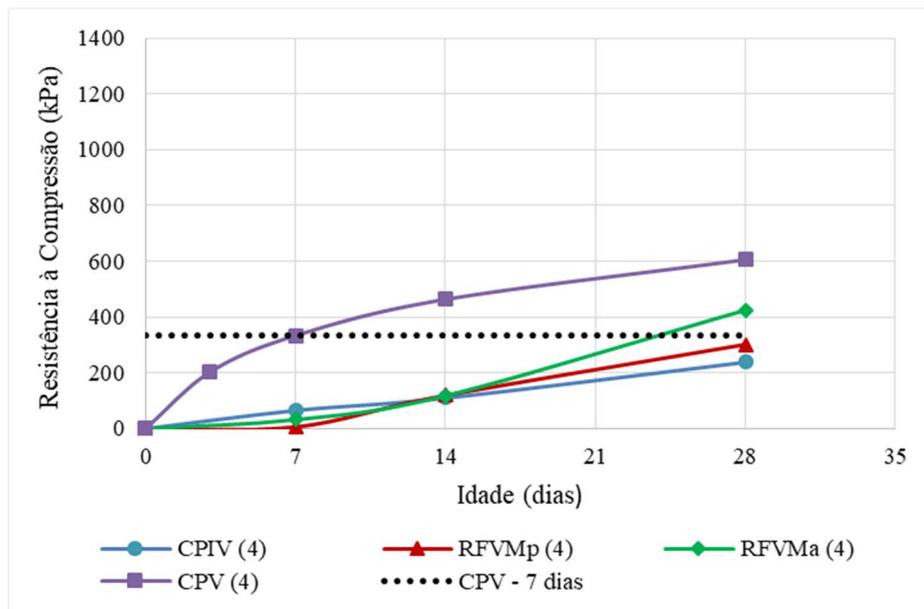


Figura 4.5: Gráfico da Relação entre RCS e fator a/c (4).

4.1.6 Relação entre a RCS e fator a/c (3,5)

Para as amostras com o fator a/c igual a 3,5, observa-se na figura 4.6 que o comportamento da mistura cimentada com CPV continuou apresentando um melhor desempenho de resistência em comparação as demais misturas. A curva do CPIV passou a ter um comportamento similar ao comportamento da curva do CPV, já as amostras RFVMp e RFVMA continuaram apresentando baixas resistências até os 7 dias de cura. Ressalta-se que por volta dos 25 dias de cura a amostra de RFVMA passou a ter resistências maiores que as da CPIV. As amostras CPV, RFVMp e RFVMA convergiram aos 28 dias para valores de RCS próximos, que são superiores a RCS do CPV aos 7 dias, porém inferiores a dos 28 dias.

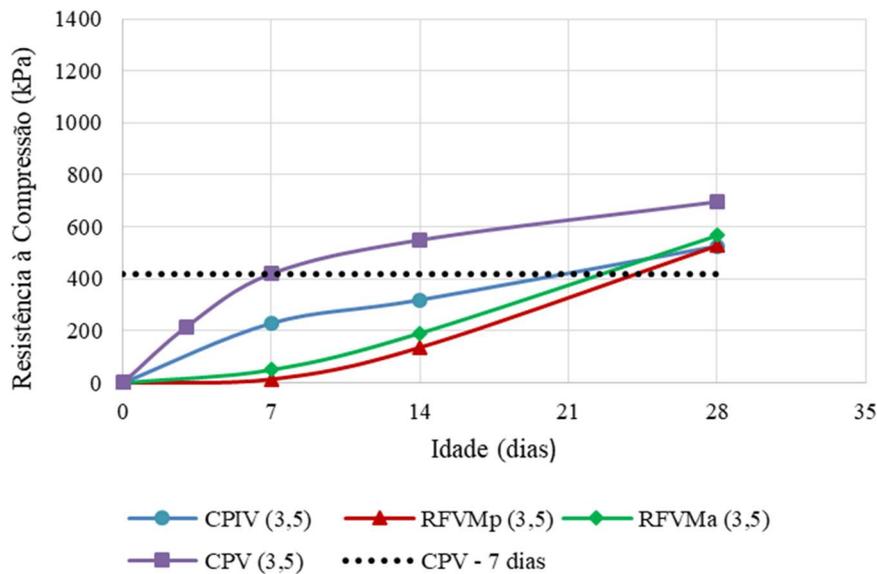


Figura 4.6: Gráfico da Relação entre RCS e fator a/c (3,5).

4.1.7 Relação entre a RCS e fator a/c (3)

Para as amostras com o fator a/c igual a 3, observa-se na figura 4.7 que o comportamento da mistura com CPV apresentou um desempenho de resistência superior as demais amostras até aproximadamente 26 dias de cura, momento no qual a amostra RFVMP, que teve o menor ganho de resistência até os 17 dias, passou a ter uma maior resistência para as mesmas idades das demais misturas. Aos 28 dias todas as amostras passaram a ter valores de resistência próximos a 800 kPa. Seguindo a mesma tendência vista anteriormente, com a diminuição do fator a/c, a curva de resistência da amostra de CPIV passaram a apresentar um comportamento mais similar a curva da amostra de CPV.

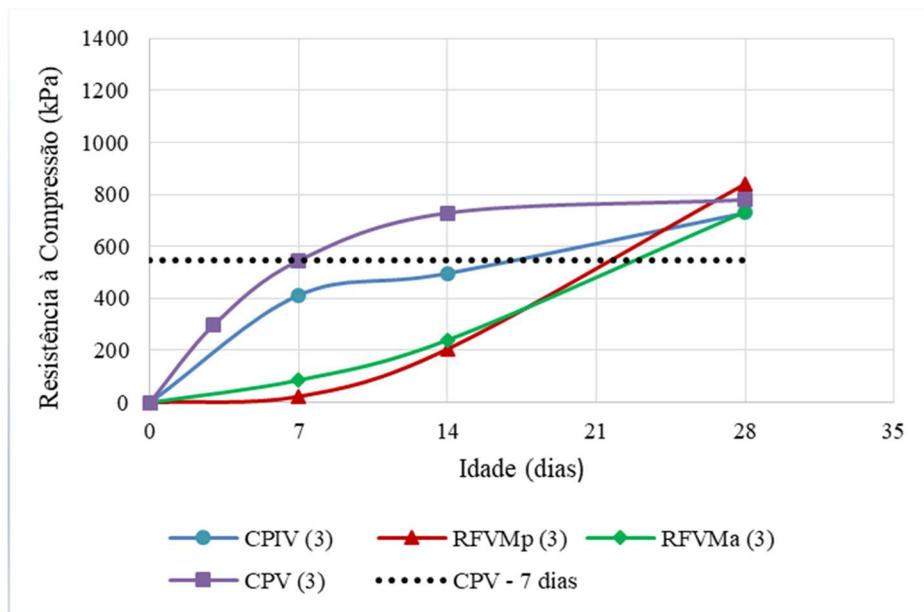


Figura 4.7: Gráfico da Relação entre RCS e fator a/c (3).

4.1.8 Relação entre a RCS e fator a/c (2,5)

Por último, para as amostras com o fator a/c igual a 2,5, observa-se que o comportamento da mistura cimentada com CPV apresentou um desempenho de resistência superior as demais amostras até aproximadamente 23 dias de cura, momento no qual a amostra RFVMA passou a ter uma maior resistência para as mesmas idades das outras misturas. A proximidade entre as curvas de resistência da amostra de CPIV e CPV diminuiu, porém aos 28 dias a resistência das duas amostras foi praticamente a mesma. Vale destacar que para o teor a/c igual a 2,5, a amostra RFVMA passou a apresentar uma resistência inicial maior que a amostra CPIV (4) aos 7 e 14 dias e maior que as de CPIV (3,5) aos 14 dias.

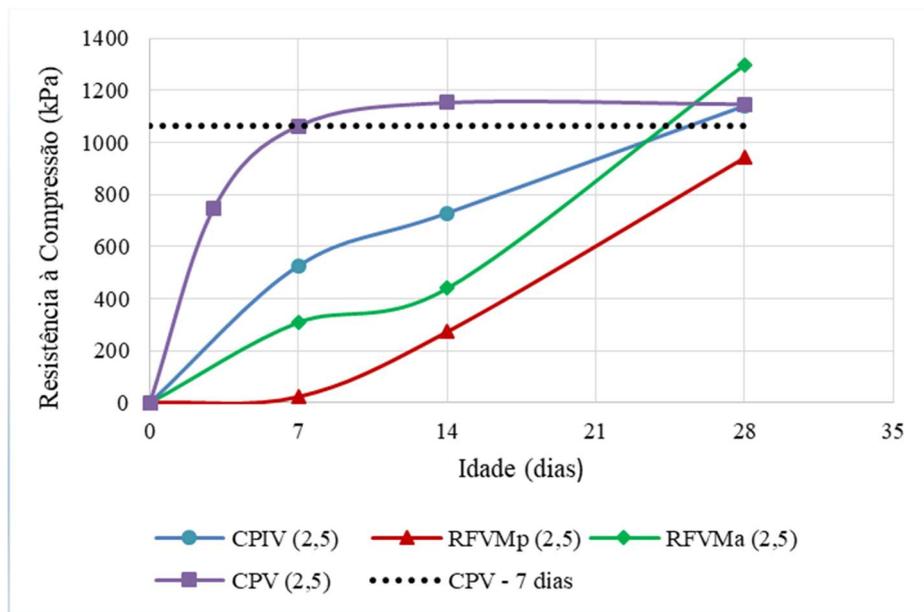


Figura 4.8: Gráfico da Relação entre RCS e fator a/c (2,5).

4.2 MINI ABATIMENTO DE CONE

Para a determinação e comparação da consistência das misturas foram realizados mini abatimento de cone, de acordo com os valores propostos para a variável controlável a/c (4; 3,5; 3; 2,5; 2; 1,5). Porém, para as amostras CPV, CPIV e RFVMP, com fator a/c de 2,5 e 2, os ensaios não foram realizados tendo em vista que essas misturas foram desconsideradas nos demais ensaios devido à falta de trabalhabilidade das misturas, que afetariam as moldagens dos CP's. Devido à alta variabilidade das consistências estudadas, foi realizada ainda a medição do espalhamento das misturas a partir do diâmetro da base das amostras ensaiadas. A tabela 4.6 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de mini abatimento de cone e espalhamento.

Tabela 4.6: Abatimento e Espalhamento das Misturas

Misturas	CP V				CP IV				RFVMP				RFVMA					
	4	3,5	3	2,5	4	3,5	3	2,5	4	3,5	3	2,5	4	3,5	3	2,5	2	1,5
Abatimento (cm)	3,74	1,92	1,84	1,06	3,77	2,36	1,58	0,85	2,87	1,41	1,20	0,00	5,60	5,48	5,46	3,08	2,23	0,78
Espalhamento (cm)	10,11	6,78	6,63	6,48	10,37	6,91	6,61	6,34	8,01	6,67	6,54	6,22	24,00	18,30	16,33	8,26	7,00	6,34

A figura 4,9 apresenta de forma esquemática as alturas de cone obtidas no ensaio de abatimento. Através dele é possível observar que com a diminuição do fator a/c, as misturas passam a apresentar uma maior consistência.

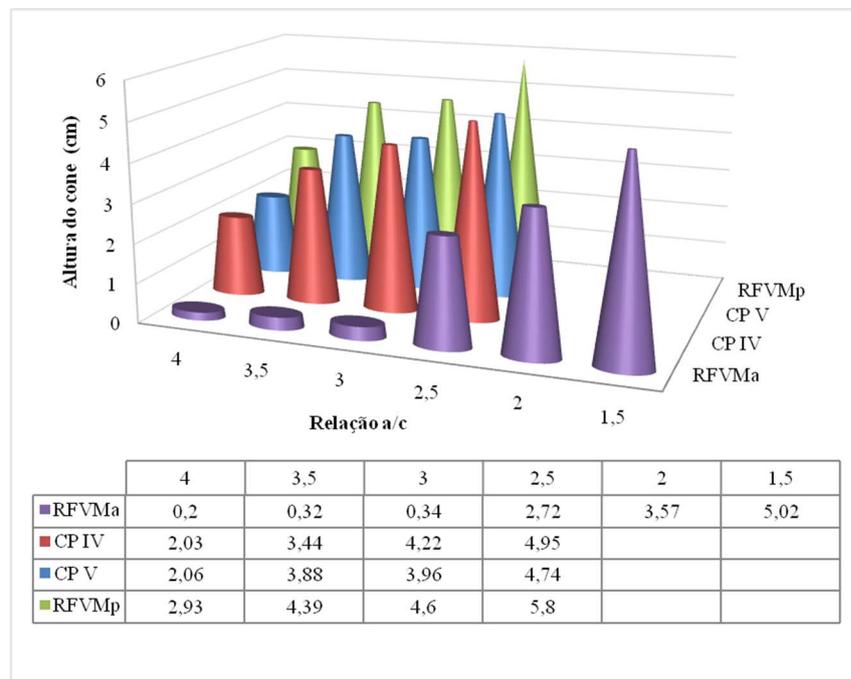


Figura 4.9: Gráfico das Alturas de Cone das Misturas

De modo geral, a mistura RFVMP obteve maior consistência, seguida das misturas CPV e CPIV, que tiveram consistências próximas, e por fim, a mistura RFVMa, que apresentou alta fluidez até o fator a/c igual a 3 (figura 4.10 - a). A partir do fator a/c de 2,5, a mistura RFVMa teve um ganho expressivo de consistência (figura 4.10 - b), que pode ser relacionado ao ganho de resistência em idades iniciais até os 7 dias de cura, como observado no item 4.1.4.

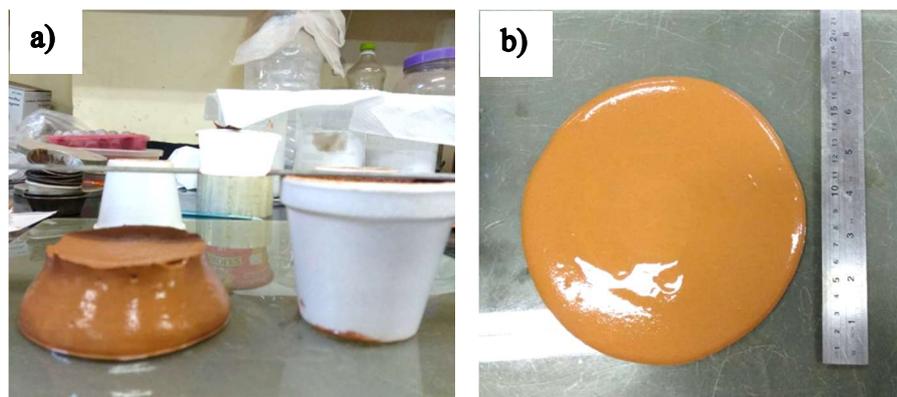


Figura 4.10: Ensaio Mini Abatimento de Cone: a) RFVMa (3); b) RFVMa (2,5).

4.3 ENSAIOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

A tabela 4.7 apresenta as características físicas dos CP's que foram percolados, inicialmente com água e posteriormente com o contaminante. Observa-se que, quanto maior o fator a/c menor foi o índice de vazios, o volume de vazios e a porosidade, pois a amostra passa a ter maior quantidade de material cimentante e menor quantidade de água.

Tabela 4.7: Propriedades das misturas (Corpo de Prova 15x15)

Misturas	Relação a/c	Umidade (%)	Peso Específico Natural (g/cm ³)	Peso Específico Seco (g/cm ³)	Índice de Vazios	Porosidade	Volume de Vazios (cm ³)
CP V	4	96,99	1,28	0,65	2,12	0,68	1979,64
CP IV	4	95,90	1,34	0,68	1,98	0,66	1873,00
	3,5	79,02	1,44	0,80	1,54	0,61	1700,64
	2,5	60,55	1,43	0,89	1,28	0,56	1576,30
RFVMp	4	98,42	1,38	0,70	1,93	0,66	1848,65
	3,5	75,77	1,37	0,78	1,60	0,62	1734,02
RFVMa	4	92,40	1,46	0,76	2,58	0,72	2023,36
	2,5	57,01	1,53	0,97	1,09	0,52	1469,87
	1,5	37,98	1,72	1,25	0,63	0,39	1085,98
SB	-	91,38	1,35	0,70	2,87	0,74	2082,49

Para os ensaios de condutividade hidráulica primeiramente foram testadas as amostras CPV, CPIV, RFVMp e RFVMa com relação a/c igual a 4. Além dessas, também foi testada a amostra SB, com o objetivo de verificar o comportamento hidráulico na ausência de agente cimentante. Porém, o ensaio só pode ser concluído na amostra de CPV (4), que foi percolado 7 dias com água e 21 dias com o contaminante (NaOH). Após este período, o ensaio foi interrompido, verificou-se que o CP permaneceu íntegro, sem notáveis variações de volume. Logo, a partir do CP 15x15, foi possível realizar a moldagem de três CP's 5x10, para posterior comparação da RCS com os CP's curados sem percolação (Figura 4.11).

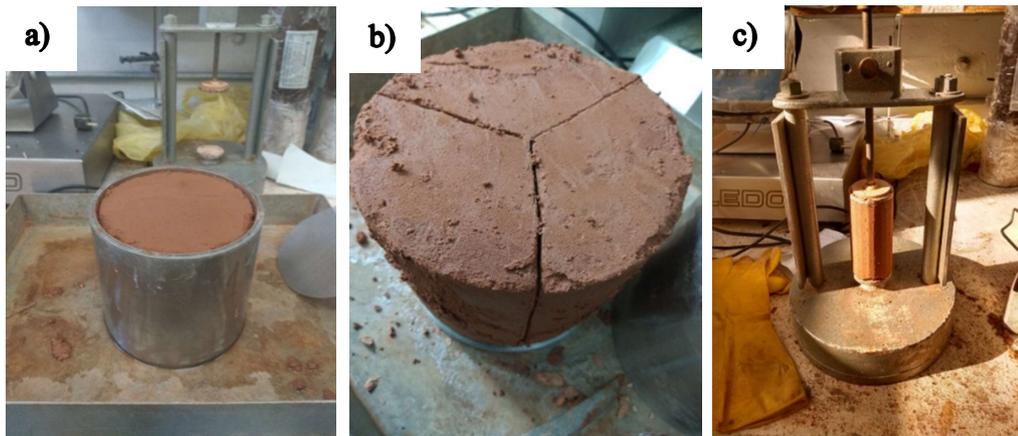


Figura 4.11: Condutividade hidráulica CPV (4): a) Corpo de prova após percolação; b) divisão do CP; c) Moldagem CP's 5x10.

Já a amostra CPIV (4) apresentou uma alta condutividade hidráulica, sendo necessário repor o conteúdo do cilindro de líquido percolante diversas vezes no dia, o que impossibilitou manter o ensaio por muito tempo. A amostra RFVMP (4), por sua vez, foi percolada por 6 dias com água, após esse período ele rompeu por carreamento de finos (figura 4.12), tendo em vista que o líquido percolado apresentava coloração distinta e partículas sólidas, o que indicavam esse fenômeno. Ao de retirar a amostra do ensaio, verificou-se um adensamento a amostra e uma baixa consistência, que impossibilitou a moldagem de CP's 5x10.



Figura 4.12: Condutividade hidráulica RFVMP (4): a) Ruptura Hidráulica; b) Perda de Volume; c) Líquido Percolado.

A amostra RFVMA (4) foi percolada por 7 dias com água, no 8º dia o líquido foi trocado pelo contaminante (NaOH) e então a amostra sofreu uma ruptura hidráulica. A figura 4.13 apresenta

a amostra antes e após a percolação, foi observado um adensamento da amostra e fissuras ao longo do corpo de prova, que impossibilitaram a moldagem dos CP's 5x10.

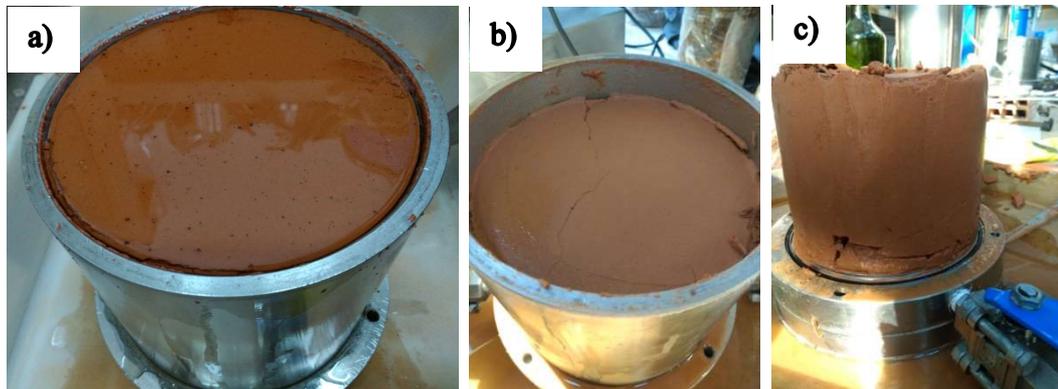


Figura 4.13: Condutividade hidráulica RFVMA (4): a) CP antes da Percolação; b) CP após Percolação; c) CP desmoldado.

No segundo momento, tendo em vista que a proposta da dissertação é testar materiais alternativos ao cimento Portland e realizar ensaios condutividade hidráulica de longa duração, optou-se por não realizar o ensaio nos demais fatores a/c (3,5; 3; 2,5) de CPV. Além delas, a amostra RFVMA (3,5) também não foi testada, pois os estudos da consistência demonstraram que pra essa mistura o abatimento era elevado, semelhante ao abatimento encontrado para a amostra RFVMA (4). As amostras testadas nessa segunda etapa foram RFVMp (3,5) e CPIV (3,5), que sofreram ruptura hidráulica no primeiro e quinto dia de percolação, respectivamente. A figura 4.14 apresenta a comparação da condutividade hidráulica das amostras SB, RFVMp (4), CPV (4) e CPIV (3,5). A mistura composta apenas por Solo-Bentonita apresentou uma diminuição da condutividade hidráulica durante os 7 dias sendo percolada com água, porém sofreu ruptura ao entrar em contato com o contaminante. A amostra CPV (4) se manteve sua condutividade hidráulica estável durante a percolação com água, e com uma leve tendência de queda quando percolada com o contaminante. Já para as misturas RFVMp (4) e CPIV (3,5), a condutividade hidráulica sofreu um crescimento abrupto, que levou a interrupção dos ensaios antes da troca do líquido percolado.

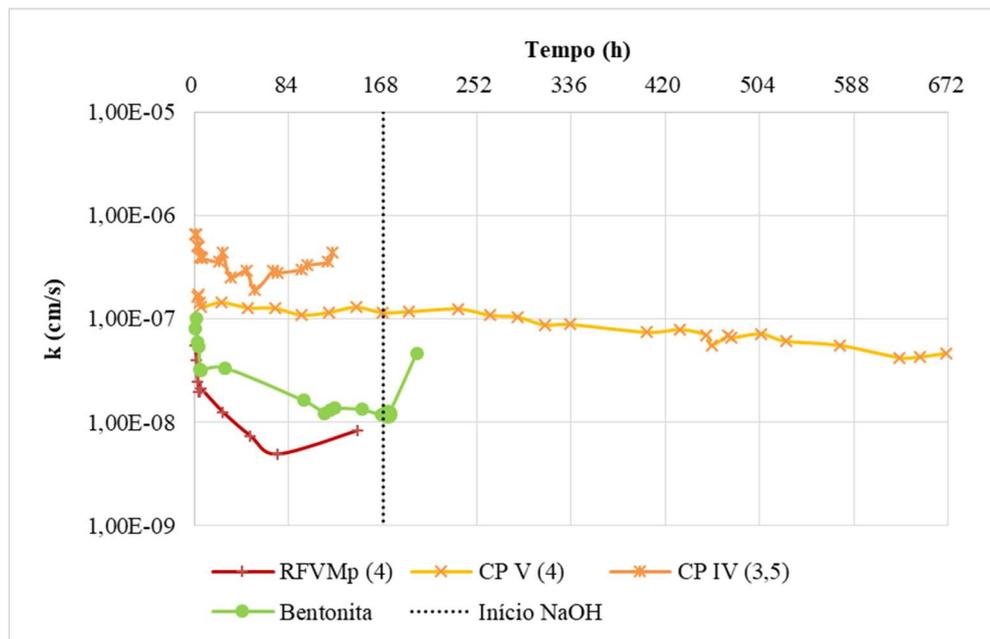


Figura 4.14: Condutividade hidráulica RFVMp x CPIV.

No terceiro momento, foram priorizadas as misturas com fatores a/c de 2,5 e 1,5. A amostra RFVMA (3) foi descartada devido à sua baixa consistência e RCS, conforme demonstrado no item 4.2. Nesta etapa, foram testados inicialmente as amostras de CPIV (2,5) e RFVMA (2,5), a primeira, foi interrompida no 1º dia de percolação por ter apresentado uma condutividade hidráulica acima do volume projetado para o cilindro utilizado como reservatório. Já a estrutura da amostra RFVMA (2,5) permaneceu íntegra durante os 28 dias de percolação, sendo possível realizar após esse período a moldagem de três CP's 5x10 (figura 4.15), para posterior comparação da RCS com os CP's curados sem percolação.

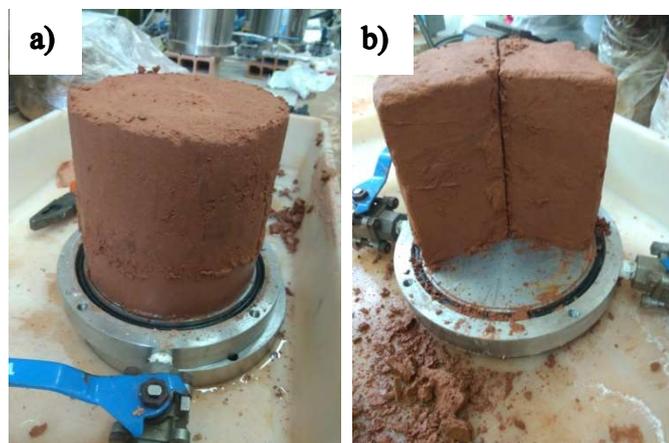


Figura 4.15: Condutividade hidráulica RFVMA (2,5): a) CP desmoldado; b) Divisão do CP 15x15.

Posteriormente, foi testada a amostra RFVMa (1,5), que apresenta uma consistência próxima ao da mistura CPIV (2,5). Esta amostra também permaneceu íntegra durante os 28 dias de percolação, sendo posteriormente moldados de três CP's 5x10 a partir da amostra percolada. Para a desmoldagem, houve a necessidade de se adaptar um equipamento de extração, devido à alta rigidez da amostra, que acarretou numa dificuldade de se escavar as bordas do CP. A figura 4.16 apresenta o CP após a percolação e o equipamento para extração utilizado.

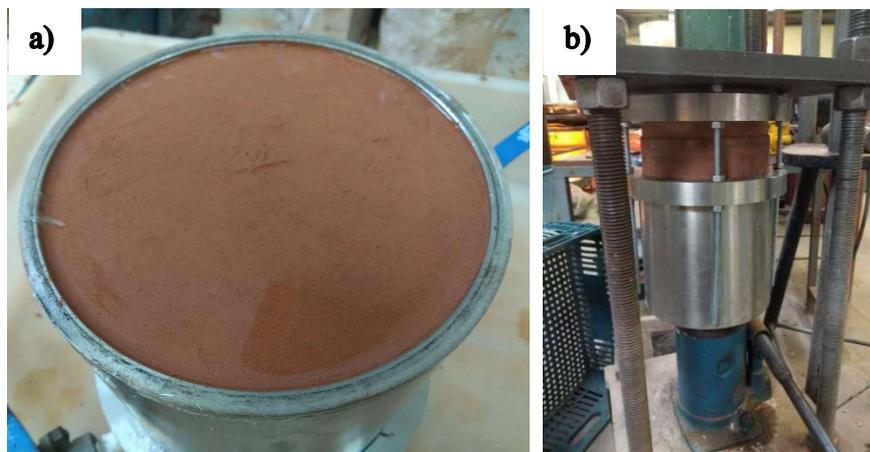


Figura 4.16: Condutividade hidráulica RFVMa (1,5): a) CP após percolação; b) Equipamento de Extração.

A figura 4.17 apresenta a comparação dos ensaios de condutividade hidráulica das amostras CPV (4) e RFVMa (4; 2,5; 1,5). Conforme demonstrado na figura 4.12, a mistura RFVMa (4) sofreu ruptura hidráulica após contato com o contaminante, apesar da diminuição da condutividade hidráulica, principalmente até o quarto dia de percolação. Este comportamento pode ter ocorrido devido ao alto adensamento sofrido pela amostra. Já a Mistura RFVMa (2,5), sofreu um leve aumento na condutividade hidráulica até o início da percolação com o contaminante, ficando acima dos resultados encontrados para a mistura CPV (4). Contudo, o início da percolação com a NaOH gerou uma diminuição de sua condutividade hidráulica, que após uma semana em contato com o contaminante passou a apresentar menores valores, em comparação ao CPV (4). Por fim, a mistura RFVMa (1,5), foi a que obteve menores resultados de condutividade hidráulica, em comparação a todas as demais misturas estudadas, permanecendo numa média de $k = 3,1 \times 10^{-9}$ para ambos os líquidos percolados. A figura 4.18 expõe os resultados dos ensaios realizados que tiveram duração maior ou igual a cinco dias de percolação.

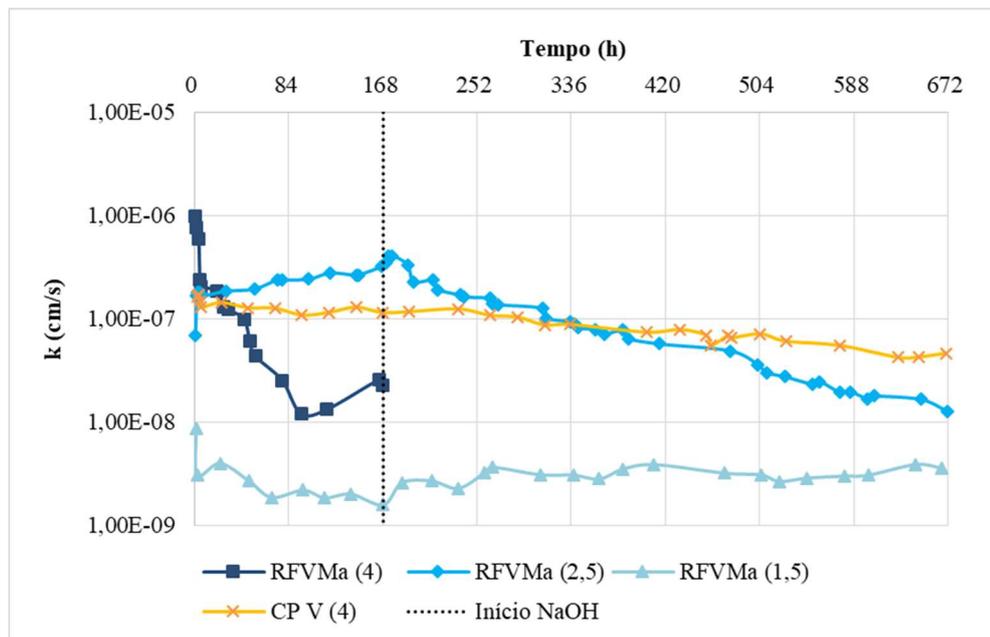


Figura 4.17: Condutividade hidráulica RFVMA x CPV.

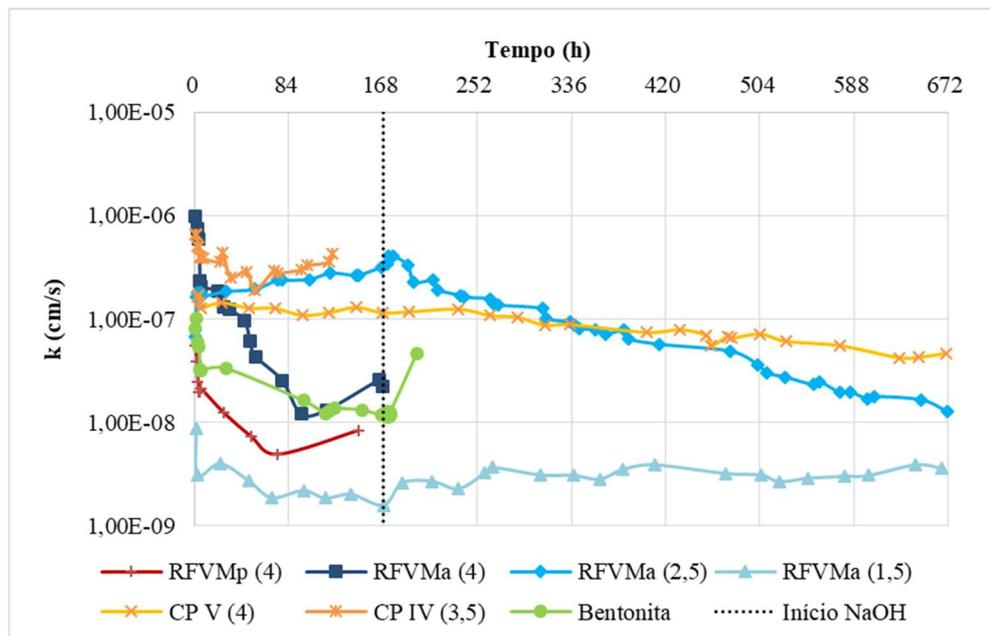


Figura 4.18: Condutividade hidráulica RFVMP x CP IV.

Partindo para uma análise do volume de vazios percolados durante os ensaios, observa-se na figura 4.19 que quanto menor a condutividade hidráulica, menor será o volume de vazios percolados para um mesmo intervalo de tempo. Um exemplo desse comportamento são as misturas RFVMA (2,5) e RFVMA (1,5), que tiveram diferentes condutividades hidráulicas durante os 28 dias de percolação, sendo a primeira percolada 31x seu volume de vazios,

enquanto que a segunda, com menor condutividade hidráulica, foi percolada apenas 1x seu volume de vazios.

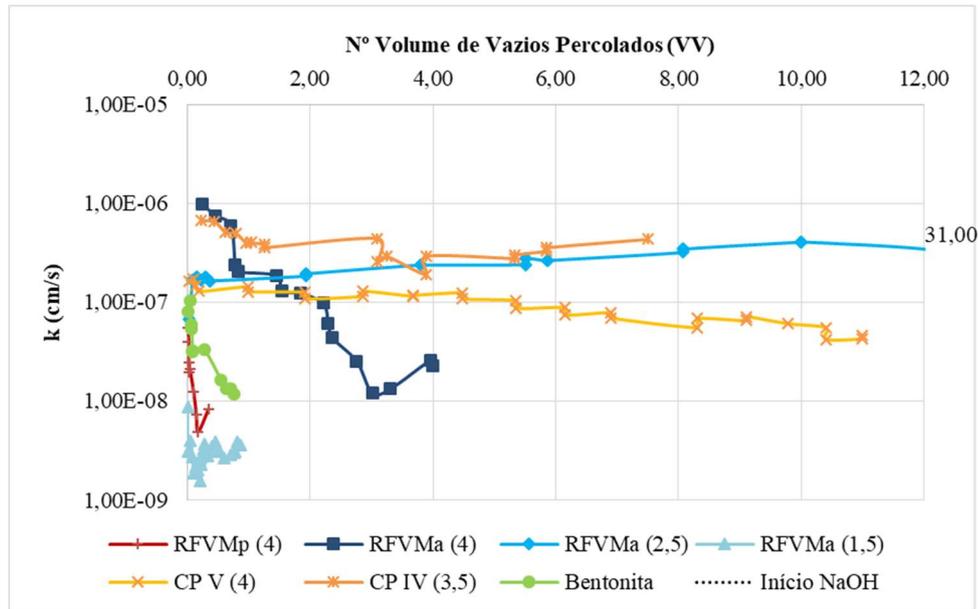


Figura 4.19: Condutividade hidráulica x volume de vazios.

4.3.1 Análise de pH ao longo da percolação

As medições de pH do líquido percolado durante o andamento dos ensaios de condutividade hidráulica evidenciaram que apenas as misturas SB e RFVMP permaneceram com $\text{pH} = 9$ durante a percolação com água, vale ressaltar que o pH da água destilada utilizada era igual a 9,9. A mistura SB, em contato com o contaminante teve um aumento abrupto de pH (13,5) a partir da primeira medição. As amostras de CPV e CPIV exibiram um aumento de pH desde a percolação com água, devido a alcalinidade cimento Portland. Após o início da percolação com a NaOH, a mistura CPV elevou ainda mais seu pH, aproximando-se do $\text{pH} = 14$. A figura 4.20 apresenta o gráfico do comportamento do potencial hidrogeniônico (pH) a longo prazo das misturas acima citadas.

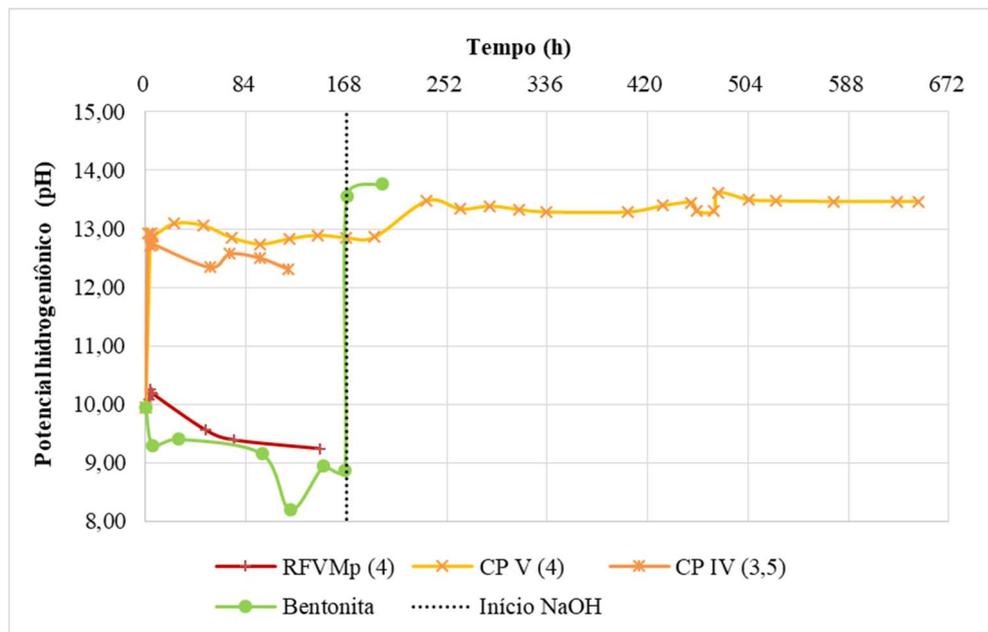


Figura 4.20: pH: CP V x CP IV x RFVMp.

As amostras compostas por RFVMA, de modo geral, iniciaram com elevado pH a percolação com água, devido a alcalinidade da soda cáustica, e com o passar dos dias as amostras RFVMA com relação a/c igual a 4 e 2,5 começaram a diminuir seu pH, enquanto que a amostra RFVMA (1,5), no mesmo período, permaneceu com pH inalterado, conforme figura 4.21. A justificativa para esse fenômeno está no volume percolado, pois a baixa condutividade hidráulica da RFVMA (1,5) impediu a diluição da NaOH. Com a introdução do contaminante, as amostras RFVMA com relação a/c 2,5 e 1,5 aproximaram seu pH, permanecendo em torno de 13,5 até o final do ensaio.

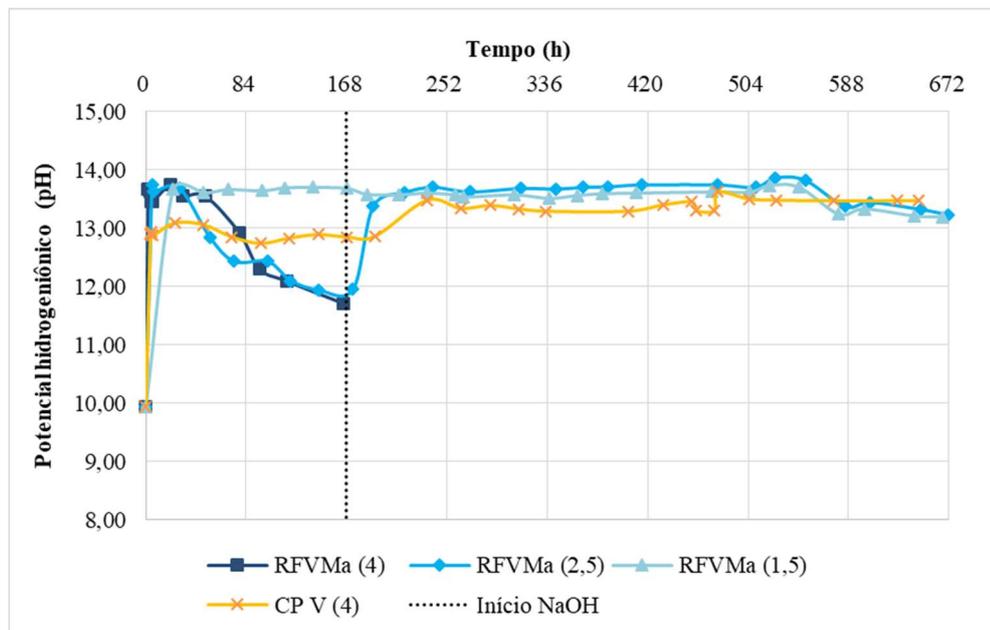


Figura 4.21: pH: CP V x RFVMa.

4.3.2 Relação entre a condutividade hidráulica e o abatimento

Uma das propostas desta pesquisa é analisar a relação entre a condutividade hidráulica e a consistência das misturas. A tabela 4.8 apresenta um resumo com dos resultados finais de condutividade hidráulica das amostras ensaiadas, ao lado do tempo de duração de cada ensaio e do abatimento para cada composição de mistura e fator a/c.

Tabela 4.8: Resultados de condutividade hidráulica

Misturas	a/c	Percolação				Abatimento (cm)
		H ₂ O		NaOH		
		k (cm/s)	Tempo (Dias)	k (cm/s)	Tempo (Dias)	
CP V	4	1,2E-07	7	4,7E-08	21	3,74
CP IV	4	2,3E-06	1	-	-	3,77
	3,5	4,3E-07	5	-	-	2,36
	2,5	7,5E-06	1	-	-	0,85
RFVMP	4	8,4E-09	6	-	-	2,87
	3,5	6,7E-06	1	-	-	1,41
RFVMa	4	2,6E-08	7	2,3E-08	1	5,60
	2,5	4,1E-07	7	1,3E-08	21	3,08
	1,5	1,6E-09	7	3,6E-09	21	0,78
SB	-	1,2E-08	7	4,6E-08	1	-

Plotando a relação entre o abatimento e a condutividade hidráulica das misturas durante a percolação com água (figura 4.22), notou-se que neste estudo inicial, as variáveis se mostraram independentes, porém é possível notar que para abatimentos no intervalo de 2 a 4, as amostras apresentaram um valor de condutividade hidráulica entre 10^{-6} a 10^{-7} .

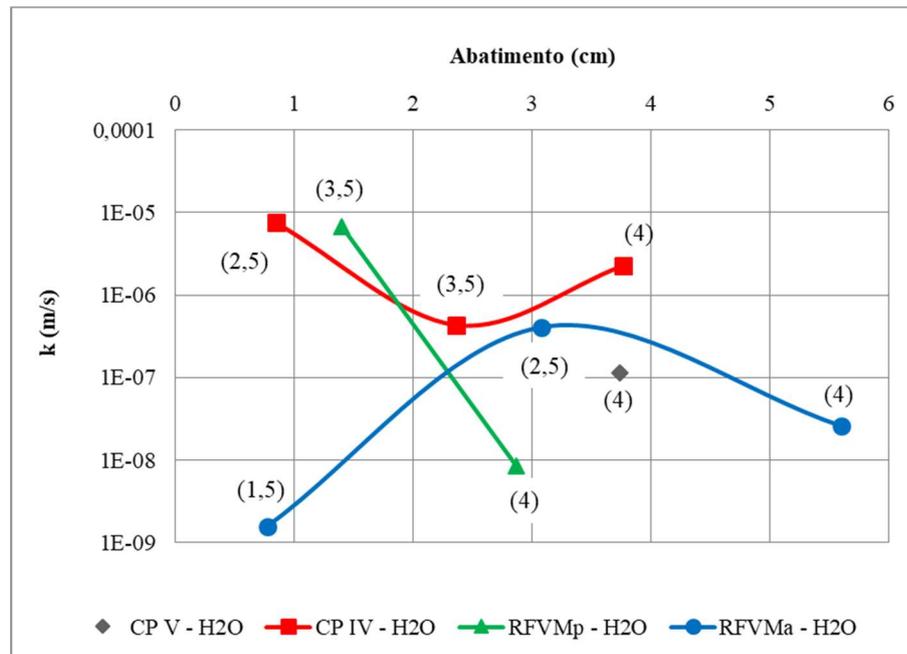


Figura 4.22: Abatimento x Condutividade Hidráulica.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados do programa experimental realizados, é apresentada a seguir uma análise concisa e comparada do comportamento das misturas, buscando resposta na literatura. Por fim, são sugeridas pesquisas complementares, que ampliariam o estudo de materiais alternativos para revestimento de barreiras hidráulicas verticais, iniciado nessa dissertação.

5.1 MICROESTRUTURA DAS MATÉRIAS-PRIMAS (LEMOS, 2006)

Este trabalho foi idealizado como complementariedade aos estudos de materiais de preenchimento de barreiras hidráulicas verticais desenvolvidos no LEGG da UFRGS, dando continuidade aos trabalhos de Heineck (2002), Azambuja (2004), Lemos (2006) e Pagani (2007). Como foco principal, buscou-se substituir o cimento por um agente cimentante mais eficiente e com maior ganho ambiental, porém a pandemia atual impossibilitou a realização de ensaios microestruturais, previstos para um melhor conhecimento das reações e morfologia das misturas em contato com o agente contaminante. Para esclarecer alguns resultados desta pesquisa, encontra-se abaixo um resumo dos principais resultados dos ensaios microestruturais de Lemos (2006), que utilizou as matérias-primas desta pesquisa:

- a) O contato do cimento CPV com a solução de NaOH, gerou perda de minerais (Mg, Al, Fe, Na, K). Pôde-se comprovar esse fenômeno partir do cruzamento das informações obtidas por microscopia eletrônica de varredura e difração de raios-x.
- b) A bentonita Sódica teve comportamento estável quando misturada à solução com soda cáustica, não apresentando significativas variações de volume mesmo após 12 dias de contaminação. As análises de difração de raio X demonstraram que, em contato com o hidróxido de sódio, as fases beidelita e trióxido de alumínio foram decompostas. Por outro lado, houve a formação do carbonato de sódio hidratado, ilita e bioxilato de sódio. Segundo Gomes (1988), a formação da ilita um indicativo da presença do grupo montmorilonita.
- c) Através da microscopia eletrônica da fração argila do solo residual arenito Botucatu, observou-se que as partículas ainda formam pacotes laminares, porém com maior espaço intercadas. No entanto, o contato prolongado com o

hidróxido de sódio gerou uma fragmentação da estrutura, corroborando com Favaretti, Moraci e Previatello (1994) que indicam a redução do teor de sílica tetraédrica em solos contaminados com pHs altos.

- d) A microscopia eletrônica das amostras de solo cimento bentonita, demonstrou a boa interação entre as matérias-primas e sinais da hidratação do cimento CPV (agulhas), destaca-se ainda que em seu estudo, Lemos (2006) analisou três amostras em diferentes alturas do corpo de prova, podendo assim verificar que quando maior o contato com o hidróxido de sódio, maior a fragmentação dos materiais.
- e) A espectrofotometria de absorção atômica do líquido lixiviado, demonstrou que a mistura com CPV foi ineficiente no que se refere à fixação do sódio, pois esta reteve muito pouco do teor contido no hidróxido de sódio utilizado.

5.2 SÍNTESE DOS RESULTADOS

Esta dissertação concentrou seus ensaios na análise do comportamento mecânico e hidráulico das misturas. A seguir são apresentados uma breve descrição dos resultados encontrados, divididos com base nos quatro ensaios realizados.

5.2.1 Resistência a Compressão Simples

Considerando-se todas as misturas com fator a/c igual a 4, a amostra CPV(4) apresentou maiores resistências ao longo de todas as idades. A média da resistência aos 14 dias foi de 463,28 kPa, condizente com o 515 kPa dos ensaios de Lemos (2006), na mesma idade. Já os demais materiais (RFV_{Ma} (4), RFV_{Mp} (4) e CPIV (4)) apresentaram uma baixa RCS até os 7 dias, quando começaram a desenvolver maiores resistências. Aos 14 dias essas amostras tiveram suas RCS igualadas e a partir desse momento as amostras RFV_{Ma} (4) e RFV_{Mp} (4) passaram a ter um ganho de resistência maior ultrapassando os ganhos da CPIV (4).

Para o fator igual a 3,5, a amostra CPV (3,5) manteve os melhores resultados de RCS, até o 25º dia quando foi ultrapassado pela amostra RFV_{Ma} (3,5), porém ao 28º dia todas as amostras possuíam valores de RCS próximos.

Quando se utilizou um fator igual a 3, observou-se que a amostra CPV (3) apresentou o melhor desempenho ao longo de todas as idades até o 26º dia, quando o RFVMp, que apresentava a menor RCS até o 17º dia, passou a ter uma maior RCS de todas as amostras.

Já para o fator igual a 2,5 novamente a amostra CPV (2,5) teve sua RCS superada ao longo do tempo, pois aos 23 dias de cura a amostra RFVMa (2,5) passou a ter um melhor desempenho de resistência se comparada com as demais amostras.

5.2.2 Mini abatimento de cone

A partir medição do mini batimento de cone, verificou-se que a mistura RFVMp obteve maior consistência, seguida das misturas CPV e CPIV, que tiveram consistências próximas, e por fim, a mistura RFVMa, que apresentou alta fluidez até o fator a/c igual a 3. A partir do fator a/c de 2,5, a mistura RFVMa teve um ganho expressivo de consistência, que pode ser relacionado ao ganho de resistência em idades iniciais até os 7 dias de cura.

A execução desse ensaio se demonstrou um bom parâmetro de comparação da consistência entre as misturas ensaiadas, porém devido as dimensões do molde não apresentarem proporcionalidade ao ensaio de abatimento de cone tradicional, não é possível determinar qual misturas atendem aos critérios de consistência propostos na literatura.

Sabe-se que a consistência ideal do material de preenchimento é uma pasta saturada tendo baixa resistência ao cisalhamento para ser capaz de escoar facilmente, mas ao mesmo tempo ter rigidez suficiente para permanecer estável durante o preenchimento da barreira. Neste sentido, durante os ensaios de mini abatimento de cone, observou-se que as misturas RFVMa (4), RFVMa (3,5) e RFVMa (3), por sua alta fluidez, não são adequadas para materiais de preenchimento. A trabalhabilidade das misturas também se mostrou um ponto prejudicial na moldagem dos corpos de prova nas misturas RFVMp (3); RFVMp (2,5); RFVMa (1,5); CPV (2,5) e CPIV (2,5).

5.2.3 Condutividade hidráulica

Em relação aos resultados de condutividade hidráulica, observou-se que, conforme o esperado, quanto maior o fator a/c menor foi o índice de vazios, o volume de vazios e a porosidade, pois a amostra passa a ter maior quantidade de material cimentante e menor quantidade de água.

Inicialmente foram realizados ensaios de condutividade hidráulica nas amostras de fator a/c igual a 4, e a única que se mostrou satisfatória foi a amostra CP V (4), que foi percolada 7 dias

com água e 21 dias com o contaminante (NaOH). Analisado os resultados do ensaio, houve uma tendência de queda da condutividade, alcançando 10^{-8} cm/s. Esse resultado se difere do encontrado por Lemos (2006), que teve uma tendência de aumento da condutividade hidráulica, chegando a 10^{-6} cm/s. Essa discrepância pode ser justificada por possíveis dois fatores: a mudança do equipamento que realizou a mistura das matérias-primas; e o método de execução do ensaio, que nesta dissertação foi com medições constantes durante os 28 dias de ensaio, sem interrupções prolongadas.

Já a amostra CPIV (4) apresentou uma alta condutividade hidráulica, o que impossibilitou manter o ensaio por muito tempo. A amostra RFVMp (4) rompeu no 6º dia de percolação com água, devido ao carreamento de finos, que possivelmente ocorreu devido à falta de uma maior estruturação cimentícia. Já a amostra RFVMa (4) rompeu hidráulicamente 24 horas após ser percolado pelo contaminante, demonstrando que a amostra já apresentava uma estruturação melhor que a da amostra anterior, porém insuficiente para resistir a interação com o contaminante, o que gerou o colapso da estrutura. Esse fato pode ser relacionado ao Gráfico de RCS das amostras com fator a/c igual a 4, no qual é possível identificar que a amostra RFVMa já apresentava uma resistência superior a RFVMp, aos 7 dias de cura. Vale ressaltar ainda, que a mistura composta apenas por Solo-Bentonita (SB) apresentou uma diminuição da condutividade hidráulica durante os 7 dias de percolação com água, porém sofreu ruptura ao entrar em contato com o contaminante, demonstrando que a microestrutura do SRAB e da bentonita é afetada pelo contaminante.

Foram testadas, também, as amostras de CPIV (2,5) e RFVMa (2,5), a primeira, foi interrompida no 1º dia, por apresentar uma condutividade hidráulica acima do volume projetado para o cilindro utilizado como reservatório. Já a estrutura da amostra RFVMa (2,5) permaneceu íntegra durante os 28 dias de percolação. Posteriormente, foi testada a amostra RFVMa (1,5), que permaneceu íntegra durante os 28 dias de percolação. Destaca-se que esse resultado é interessante ao se levar em consideração que as amostras de RFVMa apresentaram os menores abatimentos, que se traduz em materiais mais fluidos, se comparadas com as outras amostras em um mesmo fator a/c, o que é importante para aplicações em barreiras verticais, pois o material necessita apresentar um adequado nível de fluidez. Para se ter um comparativo, o abatimento da amostra RFVMa (2,5) se equipara aos das amostras CPIV (3,5) e CPV (3,5). Já o abatimento da amostra RFVMa (1,5) equivale aos do CPIV (2,5) e CPV (2,5).

Ao compararmos todas as amostras, observa-se que a amostra RFV_{Ma} (2,5) demonstrou maior resultado final de RCS e menor condutividade hidráulica, se comparada com a amostra CPIV (2,5), que inclusive precisou ter o ensaio de condutividade hidráulica interrompido. Além disso, as misturas RFV_{Ma} (2,5) e RFV_{Ma} (1,5) apresentaram maiores resultados de RCS e menores condutividades hidráulicas se comparados com o CPV (4), porém ressalta-se que o cimento Portland está dosado em um fator a/c maior, dando indícios de que para menores valores de a/c a condutividade hidráulica do mesmo pode ser ainda menor que as das amostras RFV_{Ma}. Destaca-se ainda, que a amostra RFV_{Ma} (2,5), ao entrar em contato com o contaminante, apresentou uma tendência de queda acentuada na condutividade hidráulica, e ao se finalizar o ensaio esse comportamento ainda é visível no gráfico da figura 4.16. Logo, um estudo com tempos de percolação mais longos é necessário para entender esse comportamento, além de uma análise microestrutural da amostra após a percolação.

Ao se analisar as amostras cimentadas com CPIV, observamos que não se obteve resultados de condutividade hidráulica relevantes para nenhum fator a/c testado, dessa forma recomenda-se analisar o material para menores valores de relações a/c.

A comparação entre as amostras RFV_{Ma} (2,5) e RFV_{Ma} (1,5), demonstra um comportamento coerente com os fatores a/c utilizados, pois um menor fator gera uma matriz menos porosa, porém com a variação de 1 no valor do fator a condutividade hidráulica demonstrou uma grande variação, tendo em vista que a primeira amostra foi percolada por um volume de líquido igual a 31 vezes o volume de vazios, já a segunda amostra apenas 1 vez o volume de vazios.

5.2.4 Medição do pH

As medições do pH ao longo do ensaio de condutividade hidráulica, ajudaram a avaliar o grau de retenção do contaminante pelas misturas, a partir do lixiviado. O hidróxido de sódio apresenta elevado pH, logo foi possível identificar um aumento do pH em todas as misturas ensaiadas, exceto a RFV_{Ma} (1,5), que permaneceu com pH inalterado, possivelmente devido à baixa condutividade hidráulica, que impediu a diluição da solução alcalina.

Com base nos ensaios de espectrofotometria de absorção atômica realizados por Lemos (2006) no líquido lixiviado de uma amostra contendo SRAB, BS, e CPV, observa-se que uma mistura contendo CPV não reteve de modo satisfatório o hidróxido de sódio percolado. Os ensaios de medição de pH realizados nesta dissertação confirmam que durante os 21 dias de percolação com NaOH, o pH do lixiviado permaneceu alto.

Por outro lado, nas amostras RFV_{Ma} (2,5) e RFV_{Ma} (1,5), a percolação com o hidróxido de sódio manteve-se alto durante 17 dias de ensaio, após esse período houve uma tendência de queda. Vale ressaltar a necessidade de ensaios mais longos, para comprovação desta tendência.

5.3 CONCLUSÕES

Os resultados demonstram que para considerar a aplicação dos materiais alternativos em barreiras hidráulicas deve-se atentar para a retração que o material sofre, principalmente quando se utiliza grandes fatores a/c, tendo em vista que durante a geopolimerização desse material a água presente na mistura não é consumida, mas sim perdida. Logo, deve-se buscar um equilíbrio entre o fator a/c e a consistência, pois baixos fatores geram misturas mais consistentes, o que dificultaria a aplicação das barreiras verticais em campo.

Outro fato que deve ser observado é a diminuição da resistência do material após ser percolado com o contaminante, por conta da provável interação com a microestrutura. As amostras CPV(4) experimentaram uma diminuição de 55% em relação às amostras não percoladas de mesma idade, essa mesma porcentagem de perda ocorreu para a amostra RFV_{Ma} (2,5). Já para a amostra RFV_{Ma} (1,5), a diminuição de resistência foi de apenas 11%, esse fato ocorreu devido a amostra ser menos permeável, pois a RFV_{Ma} (2,5) foi percolada por um volume de líquido correspondente a 31 vezes seu volume de vazios e a RFV_{Ma} (1,5) apenas 1 vez seu volume de vazios, o que proporcionou à matriz cimentícia uma interação menos expressiva com o contaminante.

Com base em Ryan e Day (2002), que recomendam uma resistência mínima de 200 kPa aos 28 dias, todas as misturas ensaiadas tiveram um resultado satisfatório. De um ponto de vista geral, conclui-se que se o desempenho final requerido dos materiais álcali ativados for a RCS, existem fatores a/c ótimos a serem seguidos, que para a RFV_{Mp} é igual a 3 e para a amostra RFV_{Ma} é 2,5. Além disso, é interessante notar que materiais álcali ativados com baixos fatores a/c alcançam resistências maiores que as desenvolvidas por cimentos Portland. Porém para utilização desses materiais como barreiras, recomenda-se ainda proceder um estudo de durabilidade e estabilidade química frente ao contaminante que será contido.

Os resultados demonstram que, para cimentos alternativos, a utilização de ativadores com alta alcalinidade inicial, aumentam a resistência e melhoram o desempenho da estrutura cimentada quando submetidas ao contaminante. Além disso, tais amostras apresentaram valores de

condutividade hidráulica a longo prazo entre 10^{-8} e 10^{-9} cm/s, valores condizentes com os comumente utilizados para barreiras hidráulicas verticais (RYAN E DAY, 2002). Vale salientar que, para uma análise mais precisa da viabilidade de substituição do cimento Portland por cimentos com alta alcalinidade inicial, se faz necessário ensaios mais prolongados de condutividade hidráulica e um estudo complementar com a análise dos efeitos desta alcalinidade no *filter cake* das barreiras.

5.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para a realização de trabalhos futuros, propõem-se os seguintes estudos complementares:

- a) Realizar um estudo da microestrutura das misturas, com ensaios de MEV/EDS e DRX;
- b) Ampliar os ensaios de condutividade hidráulica para as demais relações a/c;
- c) Utilizar outros ativadores, buscando um agente cimentante com menor alcalinidade inicial;
- d) Testar o desempenho dos cimentos alternativos para outros agentes contaminantes, como o ácido Sulfúrico;
- e) Diminuir o gradiente hidráulico no permeametro para as misturas de CPIV, que apresentaram alta condutividade hidráulica;
- f) Realizar um estudo estatístico ampliado, com um projeto fatorial que proporcione uma melhor comparação dos resultados;
- g) Comparar os resultados encontrados com o Porosidade/Teor volumétrico de agente cimentante (η /Biv).

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **Standard test method of measurment of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a rigid-wall, compaction-mold permeameter: D5856**, Philadelphia, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland**. 7. ed. São Paulo, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland – Requisitos**. NBR 16697, Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo Coesivo – Determinação da Resistência à compressão simples não confinada**. NBR 12770. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos**. NBR 12.025. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais Pozolânicos – Especificações**. NBR 12.653. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. NBR 6457. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - determinação da massa específica**. NBR 6508. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – determinação do limite de liquidez**. NBR 6459. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – determinação do limite de plasticidade**. NBR 7180. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **Solo – Análise granulométrica**. NBR 7181. Rio de Janeiro, 2018.
- ALMEIDA, B. **Em Cataguases, barragem rompida foi desativada após acidente em 2003**. Globo, Minas Gerais, 2015. Disponível em: <<http://g1.globo.com/mg/zona-da-mata/noticia/2015/11/em-cataguases-barragem-rompida-foi-desativada-apos-acidente-em-2003.html>>. Acesso em: 07 jul. 2019.
- ANANDARAJAH, A.; ZHAO, D. **Triaxial behavior of kaolinite in different pore fluids**. Journal of the Geotechnical Engineering Division, v. 126, n. 2, p.148-155, 2000.

ANDROMALOS, K. B.; FISHER, M. J. **Design and control of slurry wall backfill mixes for groundwater containment.** International Containment and Remediation Conference. Orlando, 2001.

AZAMBUJA, E.; CANCELIER, D. B.; NANNI, A. S. **Contaminação de solos por LNAPL: discussão sobre diagnósticos e remediação.** II Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul, p. 185-202, Porto Alegre, 2000.

AZAMBUJA, R.M.B. **Estudo do Comportamento Mecânico e Hidráulico de Misturas de Solo-Cimento-Bentonita para a Aplicação em Barreiras Verticais de Contenção de Contaminantes.** 2004. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

BAXTER, D. Y. **Mechanical Behavior of Soil-Bentonite Cutoff Walls.** 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, USA.

BEAR, J. **Hydraulics of groundwater,** McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering. McGraw-Hill, New York, 1979.

BELLEZZA, I., PASQUALINI, E. **Hydraulic performance of soil-cement liners.** Geoenvironment 97. Bouazza, Kadikara & Parker ed, p.271-276, Balkema, Rotterdam, 1997.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros.** Abeda, p. 504, Rio de Janeiro, Petrobrás, 2008.

BHATIA, S. K.; EL-DIN, K. **In Situ Measurement of Permeability of Slurry Walls.** International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. n. 12, v. 3, p. 1475-1478, Rotterdam, 1989.

BRASIL. **RESOLUÇÃO Nº 5.232:** Instruções Complementares ao Regulamento do Transporte Terrestre de Produtos Perigosos. 2016. Disponível em: <<https://anttlegis.datalegis.inf.br>>. Acesso em: 15 mai. 2019.

BRASIL. CONAMA. **Resolução Nº 357:** Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegI=459>>. Acesso em: abr. 2014.

BRASIL. **Portaria Nº 2.914:** Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. 2011. Disponível em: <http://bvsmis.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html>. Acesso em: 22 jul. 2019.

BORJA, K.; MERCADO, J.; COMBATT, E. **Methods of mechanical dispersion for determining granulometric fractions in soils using four dispersant solutions.** *Agronomia Colombiana*, v. 33, n. 2, p.253-260, 2015.

CASTRO GOMES, J. P. **Alguns Aspectos da Microestrutura do Cimento.** Engenho - Boletim Informativo. Universidade da Beira Interior, Necubi, 1996.

CERATTI, J. A. P. **Efeitos da adição de cal e cinza volante nas propriedades de um solo residual compactado.** 1979. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - CPGEC/UFRGS. Porto Alegre,

CETESB. **Ficha de Informação de Produto Químico.** 2014. Disponível em: <https://licenciamento.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=HIDR%D3XIDO%20DE%20S%D3DIO>. Acesso em: 26 nov. 2018.

CHARDON, W. J.; SCHOUMANS, O. F. **Models describing phosphorus losses by subsurface transport used in Europe.** Quantifying the agricultural contribution to eutrophication, p. 102-110. Gumpenstein, Irdning, Austria. 2002.

CLOUGH, G. W.; SITAR, N.; BACHUS, R. C.; RAD, N. S. **Cemented Sands Under Static Loading.** *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, v. 107, n. GT6, p. 799-817, New York, 1981.

COLLARES, A. C. Z. B.; VILAR, O. M. **A Influência do pH do Fluido de Saturação no Colapso dos Solos.** *Anais do XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, v. 1, p. 123-129, 1998.

COSTA, G. **Cerca de 40 mil litros de soda caustica vazam no Rio Gramame em João Pessoa.** *Globo*, Paraíba, 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/pb/paraiba/noticia/cerca-de-40-mil-litros-de-soda-caustica-vazam-no-rio-gramame-em-joao-pessoa.html>>. Acesso em: 07 jul. 2019.

COUTINHO, A. de S. **Fabrico e Propriedades do Betão.** LNEC, Lisboa, 1973.

COUTINHO, J. de S. **Materiais de Construção 2 – 1ª Parte.** Universidade do Porto, 2002.

CRISTELO, N. **Deep Soft Soil Improvement by Alkaline Activation.** 2009. Tese (Doutorado em Geotecnia) University of Newcastle Upon Tyne.

CROFT, J. B. **The influence of soil mineralogical composition on cement stabilization.** *Géotechnique* 17, 1967.

CRUZ, R. C. **Condutividade Hidráulica em Solos Contaminados Encapsulados.** 2004. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

D'APPOLONIA, D. J.; RYAN, C. R. **Soil Bentonite Slurry Cut-off Walls**. Geotechnical Technical Conference, Chicago, 1979.

D'APPOLONIA, D. J. **Soil-Bentonite Slurry Trench Cutoff**. Journal of the Geotechnical Engineering Division, v.107, n. 4, p. 393-409. New York, 1980.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições minerais**. Concreto: ciência e tecnologia, v. 1, p. 261-309. São Paulo, 2011.

DANIEL, D. E. **Hydraulic Conductivity Tests for Clay Liners**. Geotechnical and Geohydrological Aspects of Waste Management, 1987.

DANIEL, D. E. **State of the art: Laboratory hydraulic conductivity tests for saturated soils**. Hydraulic Conductivity and waste contaminant transport in soil. ASTM STP 1142, p. 30-78, Philadelphia, 1994.

DANIEL, D. E.; KOERNER, R. M. **Waste Containment Facilities: Guidance for construction, quality assurance and quality control of liner and cover systems**. ASCE, 354 p. New York, 1995.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymers of the first generation: Siliface Process**, Geopolymer 88, First International Conference on Soft Mineralurgy, p. 49-67, 1988.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymers: Inorganic polymeric new materials**. Journal of Thermal Analysis, v. 37, p. 1633-1656, 1991.

DAVIDOVITS, F. **Les Mortiers de Pouzzolanes Artificielles Chez Vitruve: Évolution et Historique Architecturale**. 1993. Tese (Doutorado) Université Paris X-Nanterre, França.

DE JOSSELIN DE JONG, G. **Longitudinal and transverse diffusion in granular deposits**. Trans., Am. Geoph. Union, n. 39, v. 1, p. 67, 1958.

DELGADO, C. W. C. **Mecanismos de Transporte e Metais Pesados**. Congresso Nacional de Meio Ambiente. 2002.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). **Anuário Mineral Brasileiro**, Bentonita, 2004.

DUXSON, P.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; PALOMO, A. AND DEVENTER, J. S. J. **Geopolymer technology: the current state of the art**. Journal of Materials Science, Advances in Geopolymer Science and Technology. n. 42, p. 2917–2933, 2007.

EDUOK, E. I. **Thermal properties of geopolymer materials**. 2016. Dissertação (mestrado em matemática e física) – Institutt for matematikk og naturvitskap - Universitet i Stavanger, Norway.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY(EPA). **Evaluation of Subsurface Engineered Barriers at Waste Sites**, 1998. Disponível em: <www.epa.gov>. Acesso em: 18 abr. de 2019.

EUROPEAN INDUSTRIAL GASES ASSOCIATION (EIGA). **Guide to Carbide lime applications**. DOC 143/17. Brussels, 2017.

EVANS, J. C. **Geotechnics of Hazardous Waste Control Ssystems**. Foundation Engineering Handbook, p. 765-777, New York, 1991.

EVANS, J. C.; DAWSON, A. R. **Slurry Walls for Control of Contaminant Migration a Comparison of UK and US Practises**. Geo-Engineering for Underground Facilities (Geotechnical Special Publication). n. 90. p. 105-120. New York, 1999.

FAVARETTI, M.; MORACI, N.; PREVIATELLO, P. **Effects of Leachate on the Hydraulic and Mechanical Behaviour of Clay Liners**. 1st Congress on Environmental Geotechnics, v. 1, p. 221-226. Alberta, Canada, 1994.

FELIX, E. F.; POSSAN, E. **Balanco das emissões e da captura de CO₂ em estruturas de concreto: simulação em função do consumo e tipo de cimento**. IBRACON Structures and Materials Journal. v. 11, n. 1, 2018.

FERNANDES, E.; GLÓRIA, A. M. da S.; GUIMARÃES, B. de A. **O Setor De Soda-Cloro No Brasil E No Mundo**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 29, p. 279-320, 2009.

FERREIRA, L.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; LIMA, J. M.; SILVA, M. L. N.; VITORINO, A. C. T. **Tipos de dispersantes, formas de agitação e sua relações com a erodibilidade de solos com altos teores de óxidos de ferro**, Ciênc. agrotec., Lavras, v. 26, n. 2, 2002.

FILZ, G. M.; BOYER, R. D.; DAVIDSON, R. R. **Bentonite-Water Slurry Rheology and Cutoff Wall Trench Stability**. In situ Remediation of the Geoenviroment. ASCE. n. 71, p. 139-153. New York, 1997.

FILZ, G. M.; HENRY, L. B.; DAVIDSON, R. R. **Formation and Properties of Bentonite Filter Cakes**. Filtration and Drainage in Geotechnical Geoenvironmental Engineering. ASCE. n. 78, p. 69-88, New York, 1998.

FOPPA, D. **Análise de Variáveis-chave no Controle da Resistência Mecânica de Solos Artificialmente Cimentados**. 2005. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

FRENKEL, H.; FEY, M. V.; LEVY, G. J. **Critical flocculation concentration of reference and soil clays in the absence or presence of organic and inorganic anions.** Soil Sci. Soc. Amer. J. v.56, 1992.

GARCIA-LODEIRO, I.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. **An Overview of the Chemistry of Alkali-Activated Cement-Based Binders.** Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes. p. 19-47. 2015.

GLEASON, M. H.; DANIEL, D. E.; EYKHOLT, G. R. **Calcium and sodium bentonite for hydraulic containment applications.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, v.123, n. 5, p.438-445. New York, 1997.

GLUKHOVSKY, V. D., ROSTOVSKAJA, G. S., RUMYNA, G. V. **High strength slag-alkaline cements.** 7th International Congress Chemical Cement, v.3, n. 5, p. 164-168, Paris, 1980.

HEINECK, K. S. **Estudo do Comportamento Hidráulico e Mecânico de Materiais Geotécnicos para Barreiras Horizontais Impermeáveis.** 2002. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

IANNACCONE, F. M. **Implications Of Construction Techniques On The Performance Of Slurry Walls.** 1998. Tese (Doutorado) Civil and Environmental Engineering University of California, Berkeley.

IGNATIUS, S. G.; SOUZA PINTO, C. - **Aspectos do comportamento de um solo em presença de efluente químico a base de soda cáustica.** II Simpósio sobre barragens de rejeitos e disposição de resíduos. p. 233-241. Rio de Janeiro, 1991.

JEFFERIS, S. A. **Bentonite-Cement Slurries for Hydraulic Cut-offs.** International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. v. 1. p. 435-440. Balkema, 1981.

JEFFERIS, S. A. **Permeability:** a Dynamic Property of Barrier Materials. International Containment and Remediation Technology Conference. p. 427-429. Orlando, 2001.

KENNEY, T. C.; VAN VEEN, W. A.; SWALLOW, M. A.; SUNGAILA, M. A. **Hydraulic Conductivity of Compacted Bentonite-Sand Mixtures.** Canadian Geotechnical Journal. v. 29. n. 3, p. 364-374, 1992.

KIRKHAM, D.; POWERS, W. L. **Advanced soil physics.** Wiley-interscience, New York, 1972.

KNOP, A. **Estudo do comportamento de Liners atacado por ácido sulfúrico.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

KNOP, A.; VANGULCK, J.; HEINECK, K. S.; CONSOLI, N. C. **Compacted artificially cemented soil-acid leachate contaminant interactions: Breakthrough curves and transport parameters.** Journal of Hazardous Materials. v. 155, p. 269-276, 2008.

KOHLRAUCHS, D. N. **Estabilização de Areia Fina com Bentonita, Vidro Moído e Agente Cimentante (Cal de Carbureto ou Cimento).** 2018. TCC (Graduação em Engenharia Civil), UFRGS, Porto Alegre.

KOCH, P.L; PHILLIPS, D.L. **Incorporating concentration dependence in stable isotope mixing models: a reply to Robbins, Hilderbrand and Farley,** 2002.

KUMAPLEY, N. K.; ISHOLA, A. **The effect of chemical contamination on soil strength.** Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, v. 3, p. 1199-1201. San Francisco, 1985.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R.V. **Soil Mechanis,** SI version.: John Wiley & Sons, New York, 1979.

LEMOS, R. G. **Estudo do comportamento hidráulico, mecânico e químico de barreiras hidráulicas verticais, compostas por solo residual, bentonita e cimento sob ação de substâncias agressivas.** 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LIU, S.; LI, Z.; LI, Y.; CAO, W. **Strength properties of Bayer red mud stabilized by lime-fly ash using orthogonal experiments.** Construction and Building Materials, v. 166, p. 544 – 563, 2018.

LIVI, C. N. **Desenvolvimento de pasta de geopolímeros a base de cinzavolante e hidróxido de sódio.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

LUKIANCHUKI, J. A. **Influência do Teor de Bentonita na Condutividade Hidráulica e na Resistência ao Cisalhamento de um Solo Arenoso Utilizada como Barreira Impermeabilizante.** 2007. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos.

MASSAZA, F. **Microstructure of hydrated pozzolanic cements.** International Rilem Workshop on Hydration and Setting of Cements, E and FN Spon, p. 393 – 412, New York, 1992.

MEHTA, P.K.; PITT, N. **A new process of rice utilization.** International conference on the utilization of rice by-products. IATA, p. 45-58, Valencia, 1977.

MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; SOUZA, J.; MELO, W. A.; FERREIRA, H. S.; FERREIRA, H. C. **Atividade pozolânica dos resíduos do beneficiamento do caulim para uso em argamassas para alvenaria.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.13, p.795-801, 2009.

MILLER, D. P.; MOSLEMI, A. A. **Wood-cement composites: species and heartwood-sapwood effects on hydration and tensile strength.** Forest Prod. J., 1992.

MONCADA, M. P. H. **Estudos em laboratório de características de colapso e transporte de solutos associados à infiltração de licor cáustico em um solo lateríticos.** 2004. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação de Engenharia

MONTARDO, J.P. **Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: Estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes.** 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS. Porto Alegre.

MURTA, F. L. **Produção de Argamassas a Partir da Ativação Alcalina de Metacaulim e de Resíduo de Tijolo Moído por Cales Virgem e Hidratada.** 2008. Dissertação (mestrado). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF.

MUSKAT, M. **The flow of homogeneous fluids through porous media.** Ann Arbor, J.W. Edwards, Inc. Michigan, 1937.

NÚÑEZ, W.P. **Estabilização físico-química de um solo residual de arenito Botucatu, visando seu emprego na pavimentação.** 1991. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS, Porto Alegre.

ODLER I. **Hydration, Setting and Hardening of Portland Cement,** Chapt 6 Lea's Chemistry of Cement and Concrete, 4 ed. 1998.

OLIVEIRA, B. S. S. de; CUNHA, A. C. da. **Correlação ente qualidade da água e variabilidade da precipitação no sul do Estado do Amapá.** Ambiente e água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science, v.9, n. 2, p. 261-275, Taubaté, 2014.

PAGANI, B. R. **Estudo de Misturas Solo-Cimento-Bentonita-Fibra para Uso em Barreiras Verticais de Contenção de Contaminantes.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; CRIADO, M.; ALONSO, M. M. **The alkali activation of fly ashes: from macro to nanoscale,** 2nd International Symposium on Nanotechnology in Construction, Bilbao, Spain, 2005.

PAVILONSKY, V. M. **Varying permeability of clayey soils linings.** Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, v. 3, p. 1213-1216. San Francisco, 1985.

PEARLMAN, L. **Subsurface Containment and Monitoring Systems: Barriers and Beyond**, Slurrywall articles, 1999.

PRIETTO, P. D. M. **Estudo do Comportamento Mecânico de um Solo Artificialmente Cimentado**. 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande de Sul, Porto Alegre.

QUEIROZ, L. C. **Cimentação de Areia a Partir de Sistemas Ligantes álcali –Ativados**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre.

RAO, A. V. N.; CHITTARANJAN, M. **Influence of soil-industrial effluents interaction on subgrade strength of an expansive soil-a comparative study**. International Journal of Advances in Engineering & Technology v.5, n. 1, p. 326-335, 2012.

RIOS, F. R. **Feições De Interação Vulcano-Sedimentares – Exemplos Na Bacia Do Paraná (RS)**. 2017. Dissertação (Mestrado em Geociências) UFRGS, Porto Alegre.

ROWE, R.K. **Barrier Systems**. Geotechnical and geoenvironmental engineering handbook. Kluwer academic publishers, v. 25, p. 739 – 788, Ontario, 2000,

RYAN, C.R.; DAY, S.R. **Soil–Cement–Bentonite Slurry Walls**. Geosolutions, ASCE, 2002.

SAFFMAN, P. G. **A theory of dispersion in a porous medium**. Journal of Fluid Mechanics, v. 6, n. 3, p. 321-349, 1959.

SALDANHA, R. B. **Misturas cinza volante, cal de carbureto e cloreto de sódio: comportamento da resistência à compressão simples, durabilidade e lixiviação em coluna**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia, Geotecnia e Meio Ambiente) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SALDANHA, R. B.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; MALLMANN, J. E. C.; CONSOLI, N. C.; REDDY, K. R. **Physical-mineralogical-chemical characterization of carbide lime: an environment-friendly chemical additive for soil stabilization**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 30, n. 6, p. 1 – 7, 2018.

SAVAGE, D.; NOY, D.; MIHARA, M. **Modelling the interaction of bentonita with hyperalkaline fluids**. Applied Geochemistry, n. 17, p. 207-223, 2002.

SCHEIDEGGER, A. E. **Statistical hydrodynamics in porous media**. Journal of Applied Physics, v. 25, n. 8, p. 994-1001, 1954.

SCHEIDEGGER, A. E. **The physics of flow through porous media**, University of Toronto Press, 3rd Edition, 1974.

SENRA, R. **Mineradora norueguesa tinha 'duto clandestino' para lançar rejeitos em nascentes amazônicas**. BBC Brasil, Washington, 2018. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/brasil-43162472>>. Acesso em: 07 jul. 2019.

SHACKELFORD, C. D. **Contaminant transport**. Geotechnical practice for waste disposal. Chapman & Hall, p. 33-65, London, 1993.

SHARMA, H. D.; REDDY, K. R. **Geoenvironmental engineering: site remediation, waste containment, and emerging waste management technologies**. John Wiley & Sons, New Jersey, 2004.

SILVA, I. M. C. B. da. **Métodos de Preparação Industrial de Solventes e Reagentes Químicos**. Revista Virtual de Química v.4, n. 1 – Universidade Federal Fluminense, UFF, Rio de Janeiro, 2012.

SILVA, M. C. A. da. **Melhoramento de um solo argiloso com recurso à ativação alcalina de resíduos para aplicação em infraestruturas de transporte**. 2016 Dissertação (mestrado) – Universidade do Minho, Portugal.

SLICHTER, C. S. **Theoretical investigation of the motion of ground waters**. U.S. Geology Survey, 19th, Ann. Rept, pt.2, 1899.

TONIOLO, G. **Caracterização geotécnica e ambiental de solo contaminado por soda cáustica em unidade industrial do norte de Minas Gerais**. 2016. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geociências, UFRGS, Porto Alegre.

WINTER, D. **Resistência, Rigidez e Durabilidade de Solos Arenosos Estabilizados com Materiais Mais Sustentáveis**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

XANTHAKOS, P. P. **Slurry Walls**. McGraw Hill, New York, 1979.

XANTHAKOS, P.P. **Slurry Walls as Structural Systems**. McGraw Hill, New York, 1994.

YONG, R.N.; MOHAMED, A. M O.; WARKENTIN, B. P. **Principles of contaminant transport in soils**. Elsevier, Amsterdam, 1992.

YUN-MING, L.; CHENG-YONG, H.; AL BAKRI, M. M.; HUSSIN, K. **Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review**. Progress in Materials Science, n. 83, p. 595-629, 2016.

ZHANG, F.; ZHANG, L.; LIU, M.; MU, C.; LIANG, Y. N.; HU, X. **Role of alkali cation in compressive strength of metakaolin based geopolymers**. Ceramics International, v. 43, p. 3811-3817, 2017.