



**UNIVERSIDADE PASSO FUNDO**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E**  
**AMBIENTAL**  
**Área de Concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente**

**Isadora Comparin**

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE**  
**GEOMATERIAIS SUBMETIDOS À PERCOLAÇÃO DE**  
**LIXIVIADOS ÁCIDOS**

**Passo Fundo**

**2014**

Isadora Comparin

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE GEOMATERIAIS  
SUBMETIDOS À PERCOLAÇÃO DE LIXIVIADOS ÁCIDOS

Orientador: Prof. Dr. Pedro Domingos Marques Prietto  
Coorientador: Prof. Dr. Francisco Dalla Rosa

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental para obtenção do grau de Mestre em Engenharia na Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo na Área de concentração Infraestrutura e Meio Ambiente.

Passo Fundo  
2014

ISADORA COMPARIN

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE GEOMATERIAIS  
SUBMETIDOS À PERCOLAÇÃO DE LIXIVIADOS ÁCIDOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental na Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo na Área de concentração Infraestrutura e Meio Ambiente.

Doutor Pedro Domingos Marques Prietto  
Orientador

Doutor Francisco Dalla Rosa  
Coorientador

Doutora Karla Heineck  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Doutor Antônio Thomé  
Universidade de Passo Fundo – UPF

Doutor Márcio Felipe Floss  
Universidade de Passo Fundo – UPF

Passo Fundo  
2014

## AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus.

Agradeço à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul pela bolsa de mestrado fornecida.

Agradeço aos professores Pedro e Francisco, pelo auxílio prestado na orientação deste trabalho, bem como por todo valioso conhecimento repassado.

Agradeço aos meus pais Mario João e Maria e aos meus irmãos Igor e Ignara, por tudo que representam pra mim.

Agradeço ao professor Eduardo e aos colegas Valter Caetano, Rafael e Franciele por toda a colaboração com meu trabalho.

Agradeço aos amigos e futuros engenheiros Gabriel e Luana, pela ajuda nos ensaios de permeabilidade e RCD.

Agradeço ao amigo Rodrigo, por estar sempre disposto a ajudar na calibração dos equipamentos eletrônicos e nos ensaios com *bender elements*.

Agradeço ao Leunir, por toda ajuda e presteza na montagem dos equipamentos e moldagem dos corpos de prova.

À Cris, por estar sempre disposta a ajudar.

Agradeço ao meu namorado Aluizio, por todo apoio prestado durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a todos os meus amigos, que de alguma forma ou outra, contribuíram para a realização deste trabalho.

*“... O destino não está programado nem é inevitável. O destino é uma questão de escolha.” (Augusto Cury)*

## RESUMO

COMPARIN, I. Avaliação das propriedades mecânicas de geomateriais submetidos à percolação de lixiviados ácidos. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia, Área de Concentração Infraestrutura e Meio Ambiente) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo.

Lixiviados provenientes de resíduos industriais e de mineração são uma importante fonte de impacto ambiental, em decorrência da sua acidez. Em muitos casos, contudo, a disposição de tais resíduos é inadequada, sem a utilização de técnicas de engenharia que proporcionem a adequada contenção, tais como barreiras de fundo em aterros de resíduos sólidos. Embora muitos estudos encontrados na literatura abordem o comportamento de barreiras compactadas submetidas à ação de contaminantes, poucos tem explorado as variações estruturais dos materiais das barreiras e as modificações nas suas propriedades físicas e mecânicas durante a percolação e/ou difusão do contaminante. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo implementar uma rotina para avaliar os efeitos da percolação ácida no comportamento mecânico de geomateriais, com ênfase nas variações de rigidez e resistência. O programa da pesquisa compreendeu duas etapas: (1) adaptação e validação de um equipamento para medida contínua da rigidez em amostras submetidas à percolação ácida, utilizando a técnica não destrutiva de *bender elements*, e (2) realização de um programa de ensaios para avaliação da resistência à compressão diametral e as variações na condutividade hidráulica em amostras de um solo argiloso compactado, moldadas com diferentes densidades e com adição de cimento Portland (0, 1 e 2%), submetidas à percolação de água destilada e/ou ácido sulfúrico em concentração volumétrica de 2%, em ensaios de média duração. Os ensaios de validação das medidas da rigidez, realizados em amostras de uma areia uniforme cimentada, mostraram-se coerentes tanto em termos da ordem de grandeza dos módulos de deformação obtidos, como em termos da evolução destes módulos com o tempo de cura. Nos ensaios realizados com o solo argiloso compactado, foi notável a redução da condutividade hidráulica com a percolação ácida. Já a degradação da resistência não foi observada. Ao contrário, para todas as amostras ensaiadas, observou-se um aumento da resistência à compressão diametral após a percolação ácida, o que pode ser creditado à redução do índice de vazios e à evidência de que a cimentação não foi, em grande parte, degradada pela ação da solução ácida.

Palavras-chave: Barreiras impermeáveis, rigidez, resistência, ensaios com *bender elements*.

## **ABSTRACT**

COMPARIN, I. Evaluation of mechanical properties of geomaterials subjected to percolation of acids leachate. 2014. Dissertation (Master in Engineering, Concentration Area in Infrastructure and Environment) – Graduate Program in Civil and Environmental Engineering, University of Passo Fundo, Passo Fundo.

Wastewater from industrial wastes and mining are an important source of environmental impact, due to their acidic constitution. In many cases, however, the disposal of such waste is inadequate, without any use of engineering techniques that provide appropriate containment such as compacted barriers in solid waste landfill sites. Although many studies in the literature have addressed the behavior of compacted barriers when subjected to the action of several types of contaminants, a few have explored the structural variations of the component materials of the barriers and the resulting changes in their physical and mechanical properties along the contaminant percolation and/or diffusion. In this context, the present work aims to evaluate the effects of acidic percolation on the mechanical degradation of geomaterials, with emphasis on changes in stiffness and strength. The reaserch program comprised two distinct stages: (1) the development and validation of a device for continuous measurement of stiffness in specimens subjected to acidic percolation, by using a non-destructive technique known as bender elements; and (2) a testing program to evaluation of tensile strength and the variations in hydraulic conductivity in specimens of a compacted clayey soil molded at different specific gravities, with and without the addition of Portland cement (1 and 2%), as they were subjected to the percolation of distilled water and/or sulfuric acid (2% volume concentration) in medium duration percolation tests. The validation tests for the stiffness-measuring device, carried out on specimens of an uniform cemented sand, showed consistent results in terms of the magnitudes of the deformation moduli obtained and the variations of these moduli with curing time. For the tests carried out on the compacted clayey soil, it was observed a remarkable reduction in the hydraulic conductivity with acid leaching. However, a strength degradation was not detected. Instead, for all specific gravities and cement contents investigated, it was noticed an increase in tensile strength after the specimens were subjected to acid leaching, which might be attributed to a reduction in voids ratio and to the evidence that cementation was not largely degraded by the acidic solution.

Keywords: contaminant barriers, stiffness, strength, bender elements.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Curso de água que corta depósito de pirita. ....	25
Figura 2 - Detalhes de um típico sistema de barreiras.....	27
Figura 3 - Curva de degradação da rigidez com o nível de deformação. ....	32
Figura 4 - Transdutor piezocerâmico em repouso e sob tensão.....	33
Figura 5 - Diagrama esquemático dos <i>bender elements</i> . ....	35
Figura 6 - Sistema com <i>bender elements</i> . ....	36
Figura 7 - Ondas sísmicas: (a) Onda P; (b) Onda S no plano vertical; (c) Onda S no plano horizontal.....	38
Figura 8 - Definição da distância percorrida pelas ondas.....	40
Figura 9 - Determinação do tempo de propagação de uma onda S, pelo método da primeira chegada do sinal de resposta.....	42
Figura 10 - Fluxograma geral da pesquisa. ....	45
Figura 11 - Fluxograma da pesquisa (presente trabalho). ....	46
Figura 12 - Representação geométrica do programa experimental da pesquisa.....	48
Figura 13 - Mapa da localização da área de estudo. ....	50
Figura 14 - Campo experimental de geotecnia. ....	51
Figura 15 - Perfil de amostragem de solo.....	51
Figura 16 - Curva granulométrica da argila.....	53
Figura 17 - Município de Osório – RS. ....	54
Figura 18 - Curva granulométrica da areia.....	55
Figura 19 - Materiais utilizados para a preparação da solução contaminante. ....	57
Figura 20 - Equipamento de coluna modificado. ....	59
Figura 21 - Apresentação geral do equipamento de coluna. ....	60
Figura 22 - Visão lateral do equipamento de coluna. ....	60
Figura 23 - Detalhe do sistema de medição de recalques: (a) LVDT; (b) medidor analógico. ....	61
Figura 24 - Esquema do permeâmetro equipado com <i>bender elements</i> . ....	62
Figura 25 - Câmera de ensaio adaptada com <i>bender elements</i> . ....	63
Figura 26 - Equipamentos eletrônicos necessários para medir ondas sísmicas.....	63
Figura 27 - Prensa automática. ....	65
Figura 28 - Curva de compactação - Proctor normal e modificado. ....	66



Figura 29 - Procedimento de preparação das amostras para moldagem dos CPs.....	67
Figura 30 - Procedimento de moldagem dos CPs. ....	67
Figura 31 - Procedimento de montagem do corpo de prova na câmara de ensaio. ....	69
Figura 32 - Exemplo de coleta do lixiviado para leitura de pH.....	70
Figura 33 - Desmontagem da câmara de ensaio contendo o corpo de prova ensaiado. ....	71
Figura 34 - Amostras para medidas de pH. ....	72
Figura 35 - Equipamentos eletrônicos instalados para medir ondas sísmicas.....	73
Figura 36 - Equipamentos instalados para medir ondas sísmicas. ....	74
Figura 37 - Sinal obtido para ondas S na análise do domínio de tempo. ....	74
Figura 38 - Procedimento de moldagem do corpo de prova.....	76
Figura 39 - Sequência de moldagem passo-a-passo. ....	76
Figura 40 - Preparação dos corpos de prova sem parede para os ensaios de rigidez. ....	77
Figura 41 - Corpo de prova moldado diretamente na base cap. ....	77
Figura 42 - Preparo do corpo de prova para o ensaio de resistência ao cisalhamento. ....	79
Figura 43 - Execução do ensaio de resistência ao cisalhamento. (a) Ensaio de RCD; (b) Detalhe da forma de ruptura. ....	79
Figura 44 - Câmara de percolação.....	82
Figura 45 - Peças usinadas para a adaptação do equipamento de coluna com bender elements: a) Top cap; b) base cap; c) disco drenante superior e inferior com sensores bender elements; d) peças câmara de ensaio. ....	83
Figura 46 - Determinação da chegada da onda.....	85
Figura 47 - Módulo de cisalhamento da areia cimentada.....	87
Figura 48 - Módulo de cisalhamento da areia cimentada na câmara de ensaio.....	89
Figura 49 - Módulo de cisalhamento do CPB_01 x recalque.....	90
Figura 50 - Módulo de cisalhamento para o CPB_02 x recalque.....	92
Figura 51 - Características físicas, geométricas e os índices físicos dos corpos de prova brancos.....	94
Figura 52 - Características físicas, geométricas e os índices físicos dos corpos de prova brancos.....	95
Figura 53 - Características físicas, geométricas e os índices físicos dos corpos de prova percolados com solução ácida. ....	97
Figura 54 - Características físicas, geométricas e os índices físicos dos corpos de prova percolados com solução ácida. ....	98

Figura 55 - Resistência à compressão diametral x % de cimento para os diferentes pesos específicos de compactação em amostras percoladas com água destilada. ....	100
Figura 56 - Resistência à compressão diametral x % de cimento para os diferentes pesos específicos de compactação em amostras percoladas com solução ácida. ....	101
Figura 57 - Condutividade hidráulica x pH e recalque para corpos de prova percolados com água destilada. ....	105
Figura 58 - Condutividade hidráulica x pH e recalque para corpos de prova percolados com água destilada. ....	106
Figura 59 - Condutividade hidráulica x pH e recalque para corpos de prova percolados com água destilada. ....	107
Figura 60 - Condutividade hidráulica x pH e recalque para corpos de prova percolados com água destilada. ....	108
Figura 61 - Condutividade hidráulica x pH e recalque para corpos de prova percolados com água destilada. ....	109
Figura 62 - Condutividade hidráulica x pH e recalque para corpos de prova percolados com água destilada. ....	110
Figura 63 - Condutividade hidráulica x pH e recalque para corpos de prova percolados com água destilada. ....	111
Figura 64 - Condutividade hidráulica x pH para o CP1_D. ....	112
Figura 65 - Condutividade hidráulica x recalque para o CP1_D. ....	113
Figura 66 - Condutividade hidráulica x pH para o CP2_D. ....	113
Figura 67 - Condutividade hidráulica x recalque para o CP2_D. ....	113
Figura 68 - Condutividade hidráulica x pH para o CP3_D. ....	114
Figura 69 - Condutividade hidráulica x recalque para o CP3_D. ....	114
Figura 70 - Condutividade hidráulica x pH para o CP4_D. ....	114
Figura 71 - Condutividade hidráulica x recalque para o CP4_D. ....	115
Figura 72 - Condutividade hidráulica x pH para o CP5_B. ....	115
Figura 73 - Condutividade hidráulica x recalque para o CP5_B. ....	115
Figura 74 - Condutividade hidráulica x pH para o CP6_B. ....	116
Figura 75 - Condutividade hidráulica x recalque para o CP6_B. ....	116

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise química básica (KORF, 2011).....	52
Tabela 2 - Caracterização geotécnica e físico-química do solo (REGINATTO et al. 2012)..	53
Tabela 3 - Índices físicos da areia de Osório – RS (DIAZ, 1998).....	55
Tabela 4 - Composição do Cimento Portland CP-V (ABPC, 2002). ....	56
Tabela 5 - Amostras submetidas ao ensaio de rigidez.....	73
Tabela 6 - Módulo de cisalhamento da areia cimentada. ....	86
Tabela 7 - Características e módulo de cisalhamento da areia cimentada na câmara de ensaio. .....	89
Tabela 8 - Variação do módulo de cisalhamento da argila compactada (CPB_01). ....	90
Tabela 9 - Variação do módulo de cisalhamento da argila compactada (CPB_02). ....	91
Tabela 10 - Resultados para os corpos de prova percolados com água destilada. ....	100
Tabela 11 - Valores médios para os corpos de prova percolados com água destilada. ....	101
Tabela 12 - Resultados para os corpos de prova percolados com solução ácida.....	102
Tabela 13 - Resultados de condutividade hidráulica, recalque e pH dos ensaios brancos. ....	104
Tabela 14 - Valores de condutividade hidráulica, recalque e pH em cada fase do ensaio (valor inicial/valor final). ....	117
Tabela 15 - Resultado da Análise de Variância (ANOVA).....	118

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Variáveis de resposta, fatores de controle e de ruído.....	47
Quadro 2 - Variáveis de controle.....	48
Quadro 3 - Combinações executadas e ordem dos ensaios. ....	49
Quadro 4 - Especificação das peças componentes da câmara de ensaio. ....	82
Quadro 5 - Descrição do osciloscópio e gerador arbitrário de funções.....	83

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

$\gamma_{\text{sat}}$	Peso específico saturado
$\gamma_d$	Peso específico seco
“ <i>efrc</i> ”	Função de erro complementar
$\Delta H$	Variação de altura do corpo de prova
A	Área da seção transversal do corpo de prova
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al	Alumínio
$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	Caulinita
$\text{AlO}_4^{5-}$	Tetraedro de Alumínio
ANOVA	Análise de Variância
Apud	Citação de citação
ASE	Área Superficial Específica
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
B	Boro
<i>Bottom liners</i>	Barreira compactada de fundo
C	Concentração de equilíbrio
Cd	Cádmio
CETEC	Centro Tecnológico
CH1	Canal do osciloscópio 1
CH2	Canal do osciloscópio 2
cm	Centímetros
$\text{cm}^2/\text{s}$	Centímetro quadrado/ segundo
$\text{cm}^3$	Centímetros cúbicos
$\text{cmol}/\text{dm}^3$	Centímol/decímetro cúbico
<i>Cover liners</i>	Barreira compactada de cobertura
CP	Corpo de Prova
CPs	Corpos de Prova
CPV – ARI	Cimento Portland
Cr	Cromo
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
Cu	Cobre
D	Distância
DAM	Drenagem Ácida de Mineração
$D_h$	Dispersão Hidrodinâmica
e	Índice de vazios
et al.	Diversos Autores
FAPERGS	Fundação de Apoio a Pesquisa
Fe	Ferro
FEAR	Faculdade de Engenharia e Arquitetura
$\text{FeS}_2$	Pirita

FeS <sub>2</sub>	Sulfeto
g	Gramas
G <sub>max</sub>	Módulo de cisalhamento máximo
G <sub>0</sub>	Módulo de cisalhamento
H <sup>+</sup>	Hidrogênio
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ácido Sulfúrico
H	Altura do corpo de prova
i	Gradiente hidráulico
IPAT	Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas
k	Condutividade Hidráulica
kg	Quilograma
kg/m <sup>3</sup>	Quilograma/ metro cúbico
kHz	Quilohertz
kN	Quilo Newton
kN/m <sup>2</sup>	Kilonewton/metro quadrado
kN/m <sup>3</sup>	Kilonewton/metro cúbico
kPa	Kilopascal
<i>liners</i>	Barreira Compactada
LVDT	<i>Linear Variable Displacement Transducer</i>
m	Metros
m/s	Metros por segundo
m <sup>2</sup> /g	Metro quadrado/grama
mg.kg	Miligrama x quilograma
mg/L	Miligrama/litro
mL	Mililitros
mm	Milímetros
Mn	Manganês
MPa	Megapascal
<i>n</i>	Porosidade
Ni	Níquel
°C	<i>Grau célsius</i>
OH <sup>-</sup>	Hidroxil
P	Ondas de compressão
Pb	Chumbo
pH	Potencial Hidrogeniônico
PM	Proctor Modificado
PN	Proctor Normal
PPGEC	Prgrama de Pós-Graduação em Engenharia Civil
PPGEng	Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade de Passo Fundo
PRONEM	Programa de Apoio a Núcleos Emergentes
<i>p-value</i>	Valor-p

Q	Taxa de descarga através da secção de escoamento
RCD	Resistência a Compressão Diametral
RCD <sub>a</sub>	Resistência a compressão diametral para percolação ácida
RCD <sub>ba</sub>	Resistência a compressão diametral para percolação dos ensaios brancos e ácidos
RCD <sub>b</sub>	Resistência a compressão diametral para os ensaios brancos
RS	Rio Grande do Sul
s	Segundos
S	Ondas de corte
SAD	Sistema de Aquisição de Dados
SASW	Spectral Analysis of Stationary Waves
SiO <sub>4</sub> <sup>4-</sup>	Tetraedro de Silício
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico das Américas
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Sulfato
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
t	Tempo
<i>Time domain</i>	Domínio do tempo
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UNESC	Universidade do Extremo Sul Catarinense
UPF	Universidade de Passo Fundo
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
UTM	<i>Universal Transversa de Mercator</i>
V <sub>s</sub>	Velocidade da onda de cisalhamento
V <sub>R</sub>	Velocidade da onda Raleigh
V <sub>Vperc</sub>	Volume de vazios percolados
w	Teor de umidade
Zn	Zinco
α <sub>L</sub>	Dispersão Longitudinal
α <sub>L</sub>	Dispersão Transversal
μg/L	Micrograma/Litro
μm	Micrometro
ρ <sub>d</sub>	Densidade seca do solo
ρ	Massa específica
ρ <sub>a</sub>	Recalque para percolação ácida
ρ <sub>ba</sub>	Recalque para percolação dos ensaios brancos e ácidos
ρ	Recalque para percolação dos ensaios brancos

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	18
1.1 Problema da pesquisa, questão e hipótese .....	18
1.2 Importância e justificativa.....	20
1.3 Objetivos .....	22
1.3.1 Objetivo geral .....	22
1.3.2 Objetivos específicos .....	22
1.4 Estrutura da dissertação .....	23
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
2.1 Drenagem ácida de mina (DAM).....	24
2.2 Barreiras horizontais impermeáveis para contenção de resíduos .....	25
2.3 Efeitos da cimentação no parâmetro de condutividade hidráulica .....	27
2.4 Efeitos da cimentação nos parâmetros de rigidez e resistência .....	28
2.5 Modificação no comportamento de geomateriais com percolação ácida .....	30
2.6 Medidas de rigidez a pequeníssimas deformações em geomateriais .....	31
2.6.1 Transdutores piezoelétricos .....	32
2.6.1.1 <i>Bender elements</i> .....	34
2.6.1.2 Ondas sísmicas .....	36
2.6.2 Ensaio utilizado para obtenção do módulo cisalhante.....	37
2.6.2.1 Distância de percurso (d).....	40
2.6.2.2 Tempo de propagação (t).....	40
2.6.3 Método da primeira chegada da onda de resposta.....	41
2.6.4 Métodos de calibração .....	42
3. METODOLOGIA.....	43
3.1 Programa experimental .....	43
3.2 Planejamento experimental.....	44

3.3	Local de estudo .....	50
3.4	Materiais .....	50
3.4.1	Solo.....	50
3.4.1.1	Argila.....	50
3.4.1.2	Areia .....	54
3.4.2	Cimento .....	55
3.4.3	Água destilada .....	56
3.4.4	Solução contaminante.....	56
3.5	Equipamentos.....	57
3.5.1	Adaptação do equipamento de coluna com <i>bender elements</i> .....	57
3.5.1.1	Validação do equipamento .....	64
3.5.2	Equipamento de compressão diametral .....	64
3.6	Métodos utilizados .....	64
3.6.1	Moldagem dos corpos de prova e montagem dos ensaios de percolação.....	64
3.6.2	Ensaio de percolação .....	68
3.6.2.1	Saturação dos corpos de prova e percolação com água destilada .....	68
3.6.2.2	Percolação com solução ácida.....	68
3.6.2.3	Determinação da condutividade hidráulica .....	71
3.6.2.3	Análise e monitoramento do percolado.....	72
3.6.3	Ensaio de validação do equipamento para medida da rigidez .....	72
3.6.4	Moldagem dos corpos de prova para os ensaios de validação .....	75
3.6.4.1	Corpos de prova de areia moldados fora da câmara de percolação .....	75
3.6.4.2	Corpos de prova de areia moldados na câmara de percolação.....	77
3.6.4.3	Corpos de prova de argila compactada sem cimentação.....	78
3.6.5	Ensaio de resistência à compressão diametral.....	78
4.	PERMEÂMETRO DE PAREDE RÍGIDA EQUIPADO COM BENDER ELEMENTS	80



4.1	Considerações iniciais.....	80
4.2	Projeto e execução da adaptação do permeâmetro com <i>bender elements</i> .....	80
4.3	Equipamentos eletrônicos necessários para leituras de ondas .....	82
4.4	Validação do equipamento.....	84
4.4.1	Ensaio de Validação.....	84
4.4.1.1	Leituras das ondas sísmicas.....	85
4.4.2	Resultados obtidos .....	86
4.4.2.1	Amostras de areia cimentada moldadas fora da câmara de percolação .....	86
4.4.2.2	Amostra de areia cimentada moldada na câmara de percolação .....	88
4.4.2.3	Amostra de argila compactada moldada na câmara de ensaio .....	89
5.	INFLUÊNCIA DA PERCOLAÇÃO ÁCIDA NA DEGRADAÇÃO DA RESISTÊNCIA E NA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA.....	93
5.1	Características iniciais e finais dos corpos de prova.....	93
5.1.1	Características iniciais e finais para os corpos de prova percolados com água destilada.....	93
5.1.2	Características iniciais e finais para os corpos de prova percolados com solução ácida	96
5.2	Resultados de resistência à compressão diametral.....	99
5.3	Resultados de condutividade hidráulica .....	103
5.3.1	Corpos de prova percolados com água destilada.....	103
5.3.2	Corpos de prova percolados com solução ácida.....	112
5.4	Análise estatística para resistência diametral: Influência do teor de cimento, peso específico seco e da solução percolante .....	118
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	120
6.1	Conclusões .....	120
6.2	Sugestão para trabalhos futuros .....	121
	APÊNDICE A – Matriz para encapsulamento dos <i>Bender Elements</i> . .....	130

APÊNDICE B - Base <i>cap</i> da câmara de ensaio com adaptação para o <i>bender element</i> . .....	131
APÊNDICE C - Disco inferior com adaptação para o <i>bender element</i> .....	132
APÊNDICE D - <i>Top cap</i> da câmara de ensaio com adaptação para o <i>bender element</i> .....	133
APÊNDICE E - Disco superior com adaptação para o <i>bender element</i> .....	134

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Problema da pesquisa, questão e hipótese

Grandes áreas de exploração de minérios enfrentam sérios riscos ambientais, resultantes da escala de atividades e da quantidade de resíduos gerados. Embora tenha havido uma melhoria significativa no projeto e gestão das instalações de armazenagem de resíduos de mineração, existem ainda prejuízos econômicos e técnicos que causam importantes impactos ambientais em áreas de disposição. Nas últimas décadas, o governo criou legislações com propósito de reduzir e/ou controlar a degradação ambiental. Nesses documentos, ênfase é dada à operação, encerramento e recuperação de áreas de armazenagem de resíduos para evitar contaminações por águas tóxicas, lixiviados ácidos e lixiviação de metais (KNOP, 2007; BEDIN, 2010).

No Brasil, a extração de carvão mineral é bastante significativa, principalmente nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Segundo Knop (2007), os problemas resultantes da mineração de carvão estão relacionados às características dos rejeitos gerados. Estes rejeitos contêm um composto denominado pirita, de fórmula molecular  $\text{FeS}_2$ , composto este que gera acidez em exposição ao oxigênio e água, visto a formação de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ).

Uma técnica adotada nos locais de disposição de resíduos com constituintes ácidos para a contenção de plumas de contaminantes no solo é o uso de barreiras impermeáveis horizontais, limitando o escape físico e prevenindo a propagação em subsuperfície (KACZMAREK et al., 1997; SHARMA; REDDY, 2004). Segundo Knop (2007) e Sivrikaya (2008), estas barreiras são geralmente de argila compactada, devido ao baixo custo de execução e abundância de material, muitas no próprio local.

A interação de contaminantes com o solo pode resultar em um comportamento diferenciado no que se refere às suas propriedades físicas e seu desempenho mecânico e hidráulico. Nesse contexto, barreiras impermeáveis podem ter uma condutividade hidráulica muito pequena quando permeadas com água, porém, podem ter condutividades hidráulicas bastante diferentes quando permeadas por compostos químicos presentes em águas residuárias (LEMOS, 2006).

Alterações no pH podem promover mudanças na fase sólida do solo. Segundo Knop (2007), contaminantes ácidos podem alterar as características físicas e químicas da barreira, afetar as reações de cimentação, bem como alterar a condutividade hidráulica, o que pode interferir na eficácia da impermeabilização.

Algumas propriedades dos solos, relacionadas com a retenção de contaminantes, são atribuídas principalmente às frações silte e argila. Sendo assim, a segurança e durabilidade das barreiras impermeáveis podem estar relacionadas com a interação solo-contaminante. Alterações na estrutura do solo e diferentes mecanismos de ruptura podem ocorrer em um solo exposto por muito tempo a líquidos contaminantes (SILVA, 2005).

As barreiras impermeáveis utilizadas no fundo de aterros também podem sofrer alterações no seu comportamento mecânico, isto é, mudanças estruturais devido ao ataque ácido e à ação da sobrecarga exercida pela carga vertical da massa de resíduos sobre a barreira, favorecendo, possivelmente, a migração dos constituintes presentes no contaminante pela camada.

Esforços têm sido realizados no sentido de desenvolver novos materiais que possuam características melhoradas tais como boa trabalhabilidade, baixa condutividade hidráulica, estabilidade e capacidade de absorver recalques diferenciais (HEINECK, 2002). Uma solução seria o melhoramento do solo através do tratamento com materiais reativos, sendo os mais utilizados a cal, o cimento Portland e a bentonita em misturas ou em aplicação individual em solos compactados. Segundo Heineck (2002) e Festugato (2011), estes materiais são conhecidos na geotecnia como materiais compósitos, que são originados da combinação de dois ou mais materiais e que apresentam propriedades que não são encontradas nos materiais que lhes deram origem.

O estudo do comportamento de materiais compósitos, em especial misturas de solo-cimento, tem sido tema de pesquisas em todo o mundo (VENDRUSCULO, 2003; GUTIERREZ, 2007; SILVA et al., 2009; VITALI, 2008; CRUZ, 2008; DALLA ROSA, 2009; AMARAL et al., 2011; CONSOLI, et al., 2011; SASANIAN, 2011; FESTUGATO, 2011; DI EMIDIO e FLORES, 2012). Tais pesquisas têm enfatizado o comportamento mecânico de misturas solo-cimento, através de ensaios de laboratório que vão desde ensaios de resistência à compressão simples e diametral, a ensaios baseados na teoria de propagação de ondas, como por exemplo, a técnica de *bender elements*, buscando a compreensão dos mecanismos envolvidos no melhoramento de solos. No entanto, poucos trabalhos abordam o efeito exercido pela percolação ácida nas características mecânicas deste tipo de material.

Neste contexto, o presente projeto de pesquisa buscou responder às seguintes questões norteadoras da pesquisa: Como é possível caracterizar, em laboratório, eventuais variações na estrutura mecânica de geomateriais utilizados em barreiras impermeáveis, quando submetidos à ação de lixiviados ácidos? Quais as relações de causa e efeito entre as variações nas características mecânicas de geomateriais compactados e a percolação por lixiviados ácidos?

Devido à influência que os contaminantes ácidos podem exercer na estrutura do solo, a hipótese básica adotada nesta pesquisa foi de que a estrutura da barreira sofreria uma degradação devido à percolação ácida, resultando em alterações dos parâmetros de rigidez e resistência do material. Além disso, considerou-se que estas alterações poderiam ser observadas através da medição contínua da rigidez do material durante a percolação ácida e da verificação da resistência à tração ou à compressão antes e após a percolação.

## **1.2 Importância e justificativa**

A disposição inadequada de rejeitos e resíduos apresenta riscos à saúde humana e também acarreta potenciais impactos ao solo, à atmosfera, aos cursos d'água e outros. Estes resíduos contêm, muitas vezes, elementos ou substâncias tóxicas em concentrações elevadas (FERNANDES, 2006). Sabe-se que a mineração é uma das práticas que mais contaminam o solo, porém segundo Knop (2007) e Bedin (2010), trata-se de um setor importante para a economia do país, contribuindo de forma decisiva para o bem estar e a melhoria da qualidade de vida das presentes e futuras gerações.

Resíduos sólidos gerados em processos de extração de minérios incluem os rejeitos de rocha e solo e os resíduos de processos de beneficiamento. Durante os processos de extração dos minérios, vários compostos tóxicos são liberados resultando em um resíduo com pH ácido e com presença de metais como cádmio, chumbo, mercúrio, ferro, entre outros. Os rejeitos líquidos gerados nas operações de mineração são geralmente fruto da drenagem da precipitação atmosférica que lixiviam as substâncias tóxicas presentes nos resíduos sólidos. Esse lixiviado é um grande problema, pois o seu baixo pH favorece a solubilidade e a mobilidade dos metais presentes nos resíduos. Essa solução, denominada drenagem ácida de minas (DAM), põe em risco o ambiente e gera impactos com consequências graves, uma vez que a sua produção persiste por centenas de anos após o fechamento das minas (YOUNG et al., 2001).

Lixiviados ácidos podem ser encontrados em operações de lavra onde o mineral de interesse encontra-se associado a sulfetos (KNOP, 2007). É o caso das atividades de mineração de carvão, onde o mineral associado é a pirita.

Segundo Daniel (1993), LaGrega (1994), Costa (2002) e Knop (2007), o extremo ácido de pH pode influenciar no fluxo de contaminantes, devido à dissolução de materiais presentes no solo. Costa (2002) afirma que soluções percolantes de baixo pH causam um aumento na mobilidade de outros elementos provocada pela redução da precipitação e aumento da solubilidade.

Buscando uma solução para os problemas descritos é que técnicas de disposição de resíduos vêm sendo estudadas e aperfeiçoadas, a fim de incrementar a viabilidade desta prática do ponto de vista tecnológico, ambiental e econômico.

Em locais onde ocorre a disposição de resíduos com características ácidas ou em áreas contaminadas são requeridos sistemas que previnam a propagação de plumas de contaminantes. Uma técnica muito utilizada são as barreiras impermeáveis (*liners*), que segundo Sharma e Reddy (2004) e Nascentes (2006) são constituídas por materiais de baixa permeabilidade e utilizadas para minimizar a infiltração de percolados e conter a migração de contaminantes para o solo e águas subterrâneas.

Um material apropriado para a contenção de resíduos deve assegurar a não ocorrência de trincas devido à influência da carga vertical da massa de resíduos, sejam trincas de tração ou retração, que representam a perda da capacidade de suporte e o aumento da condutividade hidráulica (HEINECK, 2002; KORF, 2011). Para tal, estudos vem sendo desenvolvidos com o objetivo de melhorar as características dos materiais usados no fundo dos aterros de rejeitos. A adição de cimento ao solo pode ser empregada para transformar a barreira em um material mais resistente e reativo, porém com maior rigidez.

A aplicação de misturas de solo-cimento vem sendo empregada com sucesso para proteção de taludes em barragens de terra e canais, na contenção de plumas de contaminação, na construção de bases para pavimentos, ou ainda no encapsulamento de solos contaminados (CRUZ, 2008). Contudo, quando utilizadas na contenção de percolados com características altamente ácidas demandam um estudo prévio do comportamento hidráulico e compressivo da barreira de impermeabilização, sendo este comportamento ainda mais imprevisível no caso de barreiras formadas por materiais compósitos, como é o caso de barreiras tratadas com cimento, por exemplo. As características físicas e químicas da barreira podem ser alteradas

devido à composição do contaminante, afetando as reações de cimentação e podendo interferir na eficácia da impermeabilização (KNOP, 2007).

Esta pesquisa almeja, portanto, contribuir no aperfeiçoamento das técnicas atualmente utilizadas em projeto e execução de barreiras compactadas em contato direto com percolados ácidos. O trabalho contou com a parceria da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, através do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil – PPGEC e fez parte do escopo do projeto de pesquisa aprovado no Edital 003/2011 – PRONEM FAPERGS/CNPq. Esta parceria se insere de um Convênio de cooperação técnica firmado entre as duas instituições há vários anos.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo geral**

O objetivo geral é o de implementar uma metodologia para avaliação dos efeitos da percolação ácida sobre o comportamento mecânico de geomateriais, com ênfase nas variações de rigidez e resistência, para fins de aplicação no projeto e execução de barreiras impermeáveis de fundo de aterros de resíduos sólidos industriais e de mineração.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

A partir do objetivo geral, os seguintes objetivos operacionais da pesquisa foram estabelecidos:

- a) Adaptar e validar um permeâmetro de parede rígida, com características especiais, que permita a realização de ensaios em materiais de baixa condutividade hidráulica submetidos à percolação por líquidos de características agressivas, com medida contínua da rigidez a pequenas deformações e aplicação de carga vertical estática;
- b) Avaliar a influência da percolação ácida no comportamento da resistência e na variação da condutividade hidráulica de uma mistura argilosa compactada, com e sem a adição de cimento.

## 1.4 Estrutura da dissertação

O presente trabalho se encontra dividido em seis capítulos.

Neste primeiro capítulo são apresentadas algumas considerações sobre a temática do trabalho, bem como a justificativa e os objetivos.

A revisão bibliográfica é apresentada no segundo capítulo. Nesta, é desenvolvida a fundamentação teórica, apresentando os conceitos básicos necessários ao entendimento do trabalho. É apresentada, neste capítulo, uma revisão sobre barreiras horizontais impermeáveis, suas definições e propriedades gerais. A utilização de misturas solo-cimento em barreiras hidráulicas e as alterações nas propriedades mecânicas de resistência e rigidez causadas pela adição de cimento ao solo são relatadas. Foram apresentados também, aspectos técnicos sobre os mecanismos de interação entre as misturas solo-cimento e o líquido percolante ácido e as variações nas características mecânicas do material quando submetido à ação deste tipo de contaminante. No final da revisão bibliográfica, a técnica de medida de rigidez do solo a pequeníssimas deformações com o uso de *bender elements* é exposta.

No terceiro capítulo é apresentado o programa da pesquisa, estabelecido com o objetivo principal de consolidar uma metodologia para investigação dos efeitos da percolação ácida nas propriedades mecânicas de geomateriais e, especificamente, investigar possíveis variações da resistência de um solo argiloso compactado, com e sem a adição de cimento, em consequência da percolação ácida. Os materiais utilizados na pesquisa, a preparação das amostras e os detalhes relevantes da execução dos ensaios, também estão descritos neste capítulo.

No quarto capítulo estão apresentados os detalhes técnicos referentes à adaptação de um permeâmetro de parede rígida, visando à medição contínua da rigidez a pequenas deformações, através da técnica dos *bender elements*. Também neste capítulo estão apresentados os resultados e análises dos ensaios de validação do equipamento.

No quinto capítulo são apresentados os resultados e análises dos ensaios de percolação, condutividade hidráulica e resistência dos corpos de prova de argila, com e sem cimentação, percolados com água destilada e solução ácida.

Finalmente, no sexto capítulo são estabelecidas conclusões da pesquisa, bem como algumas sugestões para trabalhos futuros.



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Drenagem ácida de mina (DAM)

A drenagem ácida de mina (DAM), segundo Borma e Soares (2002), Taylor et al., (2005) e Simate e Ndlovu (2014), pode ser definida como a solução gerada quando minerais sulfetados presentes em resíduos de mineração são oxidados em presença de água. Esta solução age como agente lixiviante dos minerais presentes no resíduo, produzindo um percolado rico em metais dissolvidos e ácido sulfúrico. Segundo Simate e Ndlovu, (2014), o termo drenagem ácida de mina é geralmente usado porque o processo ocorre principalmente em locais de mineração onde a DAM ocorre tanto na operação, isto é, na retirada dos minerais de interesse, quanto no local de depósito dos resíduos gerados. Segundo os autores, embora as reações químicas da DAM sejam simples, o produto final é função da geologia da região mineira, da presença de microrganismos, da temperatura e também da disponibilidade de oxigênio e água. Esses fatores são altamente variáveis de uma região para outra e, por este motivo, a contenção e tratamento da DAM devem ser projetados com cuidado e com grande especificidade. A geração de DAM não está limitada apenas a indústria da mineração, mas também pode ocorrer em casos onde o material de interesse esteja associado a sulfetos, por exemplo, na construção de túneis e outras atividades que necessitem de escavações profundas.

No caso da mineração de carvão o resíduo gerado é a Pirita ( $\text{FeS}_2$ ), este mineral quando em contato com a água e o oxigênio origina um percolado com valores de pH muito baixos e elevadas concentrações de metais e sulfetos (SINGER; STUMM, 1970; SIMATE; NDLOVU, 2014). Em alguns casos, como é o que ocorre no Estado de Santa Catarina, este resíduo é depositado em pilhas a céu aberto diretamente no solo, gerando assim a lixiviação do percolado para os corpos hídricos comprometendo a qualidade da água. A Figura 1 apresenta uma imagem de um corpo hídrico que corta um depósito de Pirita no estado de Santa Catarina. Segundo IPAT-UNESC (2000), na bacia Carbonífera Catarinense, localizada no sul do estado de Santa Catarina, onde são encontradas cerca de 5.000ha de áreas degradadas pela atividade de mineração de carvão, sendo que 2/3 dos cursos d'água da região estão comprometidos pela drenagem ácida.

Figura 1 - Curso de água que corta depósito de pirita.



Fonte: Próprio autor (2014).

## 2.2 Barreiras horizontais impermeáveis para contenção de resíduos

Segundo Daniel (1993), existem três tipos de *liners*, os *liners* naturais de argila, *liners* de argila compactada (CCL) e *liners* de argila com geossintéticos (GCL).

As barreiras de solo compactado (CCL) podem ser definidas como sendo uma camada de material argiloso, que serve como barreira horizontal impermeável, utilizada com objetivo de reduzir a infiltração de efluentes líquidos (ROWE, 1988). Tais barreiras são tecnologias de retenção de poluentes aplicadas *in-situ* e utilizadas com a finalidade de prevenção da propagação de contaminantes em subsuperfície (SHARMA e REDDY, 2004).

Camadas naturais e compactadas compostas de solos argilosos são utilizadas como barreiras hidráulicas para impedir a percolação de líquidos contaminados derivados de aterros de resíduos doméstico e industrial, rejeitos de mineração e barragens de rejeitos tóxicos. Barreiras de solos argilosos compactados também são utilizadas na cobertura de aterros para limitar a migração de líquidos percolados, através do escoamento superficial, e a geração de efluentes líquidos contaminados, através da minimização da percolação de líquido para o interior do aterro (HEINECK, 2002; KNOP, 2007).

Sistemas de impermeabilização são requeridos devido ao elevado potencial poluente do percolado gerado pelos resíduos, e ao fato de minimizarem a contaminação ambiental

através da contenção e/ou retardamento da pluma de contaminação. Segundo Yong et al. (2001), Sivrikaya (2008); Hamdi e Srasra (2013), estas barreiras são geralmente constituídas de materiais argilosos devido à característica plástica deste tipo de material, apresentando assim, baixa condutividade hidráulica.

Solos argilosos compactados são amplamente utilizados como *liners* de fundo de aterros e tem a finalidade de isolar resíduos perigosos e evitar o contato de substâncias tóxicas ao solo, reduzindo assim a migração de percolados ácidos, comumente encontrados no lixiviado de aterros de rejeitos de mineração, para água subterrânea (RAJASEKARAN, 2005). Segundo Heineck (2002), as argilas compactadas podem ser utilizadas sozinhas ou compostas com geossintéticos em barreiras hidráulicas (*bottom liners*) e sistemas de cobertura de aterros (*cover liners*).

A maioria dos sistemas de barreiras de fundo são compostas por múltiplos componentes, que podem ser agrupados em cinco categorias: camada de solo natural, camada de argila compactada (barreira hidráulica), geomembrana, geotextil e camada drenante. A Figura 2 mostra um sistema completo de barreira de fundo de um aterro.

O projeto de um sistema de barreira de fundo, bem como a utilização ou não de todos os componentes de um sistema de impermeabilização depende do tipo de resíduo a ser aterrado.

A maioria dos parâmetros que reduzem a condutividade hidráulica das argilas compactadas causam também uma diminuição na sua resistência mecânica (HEINECK, 2002). No entanto, um material utilizado como barreira impermeável deve possuir baixa condutividade hidráulica assim como adequada resistência mecânica. Sendo assim, existe a necessidade de se fazer um ajuste entre condutividade hidráulica e resistência mecânica através da dosagem de materiais que tenham capacidade de conferir valores satisfatórios.

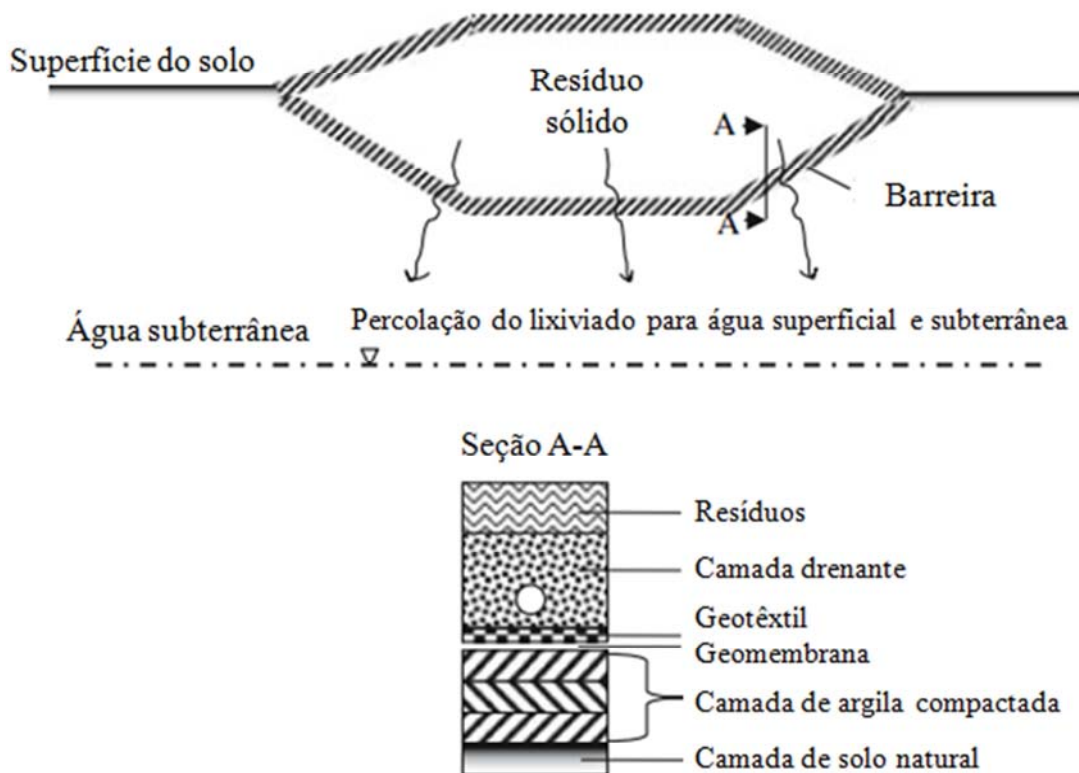
As barreiras de argila natural podem ser barreiras compostas, isto é, associadas a materiais que podem diminuir a condutividade hidráulica e melhorar a resistência a fissuras ao longo da camada. Neste tipo de barreira, são utilizados materiais como bentonita, cimento e fibras, entre outros. Segundo Yoon et al. (2003), os materiais cimentantes preenchem os vazios do solo argiloso, com isto diminuindo a condutividade hidráulica da barreira.

Entre os agentes cimentantes mais comumente utilizados em geomateriais, podemos citar o cimento Portland (DALLA ROSA, 2009).

### 2.3 Efeitos da cimentação no parâmetro de condutividade hidráulica

Segundo Boynton e Daniel (1985), a condutividade hidráulica de uma barreira de solo impermeabilizante é afetada por fatores como o grau de saturação, o método e a força empregados para a compactação, gradiente hidráulico, tamanho dos aglomerados de partículas de solo, a distribuição dos tamanhos dos poros, a composição química do líquido permeante, índice de vazios, entre outros.

Figura 2 - Detalhes de um típico sistema de barreiras.



Fonte: Adaptada de Rowe (2001).

Amostras de areia com e sem cimentação foram estudadas por Knop et al. (2008), onde o autor pode observar que os valores de condutividade hidráulica para as diferentes porcentagens de cimento ficaram entre  $10^{-4}$  cm<sup>2</sup>/s a  $10^{-3}$  cm<sup>2</sup>/s. Nas amostras não cimentadas, a condutividade hidráulica aumentou quando o gradiente hidráulico foi acrescido de 10 para 20 (de  $10^{-4}$  para  $10^{-3}$  cm<sup>2</sup>/s). Amostras do mesmo material, porém com adição de cimento, tiveram um comportamento diferenciado quando aumentado o gradiente hidráulico. Com o

aumento do gradiente de 10 para 20, pode-se observar que ocorreu uma redução na condutividade hidráulica da amostra, principalmente nos corpos de prova com 1% de cimento. Amostras com 2% de cimento tiveram variações na condutividade hidráulica apenas em casos onde o gradiente hidráulico sofreu acréscimo, no entanto, para aumentos na concentração do ácido da solução, não ocorreram mudanças nos valores da condutividade hidráulica.

A adição de pequenas quantidades de cimento (até 2%) modificará as propriedades do solo, enquanto que maiores quantidades irão alterar radicalmente suas propriedades. As propriedades do solo mudam com o aumento da quantidade de cimento, isso pode ser visto na capacidade de carga e a durabilidade a ciclos de molhagem e secagem que aumentam com a adição de cimento, em geral a permeabilidade diminui, porém, a permeabilidade pode aumentar em solos argilosos, a tendência à retração aumenta em solos granulares e a tendência à expansão reduz em solos argilosos (INGLES; METCALF, 1972).

Belleza e Pasqualini (1997) estudaram a influencia da adição de cimento e do tempo de cura na permeabilidade de solos. Os autores mostraram que a adição de cimento pode diminuir a permeabilidade do material original após algum tempo de cura. Segundo os autores, os resultados experimentais demonstram que os valores de permeabilidade obtidos com a adição de cimento dependem do tipo de solo e da umidade em que é feita a mistura e a compactação. Ainda, os autores destacam que a adição de cimento pode provocar valores na condutividade hidráulica maiores ou menores em relação ao solo não tratado.

#### **2.4 Efeitos da cimentação nos parâmetros de rigidez e resistência**

Existem muitos trabalhos na bibliografia, dentre os quais estão Consoli et al. (2007); Cruz (2008); Silva et al. (2009); Consoli et al. (2011); Vitali et al. (2012) que abordam o comportamento de solos cimentados onde são analisados aspectos característicos dos materiais tais como granulometria, propriedades físicas, tensões atuantes, resistência, rigidez e comportamento tensão-deformação.

Na medida em que as propriedades originais do solo mudam com a cimentação, esta mudança depende da quantidade e natureza do agente cimentante incorporado no solo. Pequenas mudanças na estrutura e comportamento de solos reforçados são usualmente alcançadas através de técnicas de melhoria das características do material, enquanto modificações mais intensas demandam de métodos de estabilização de solo (CARRARO; SALGADO, 2004).

A adição de cimento em solos tem o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas do solo argiloso, solução esta que apesar de usual, ainda carece de metodologias racionais de dosagem. O procedimento de dosagem do solo enriquecido com cimento restringe-se à escolha do teor de cimento mínimo necessário indicado em norma e pela execução de uma bateria de ensaios laboratoriais para definição do traço que assegure o comportamento mecânico desejado (VITALI et al., 2012).

O provável motivo desta falta de metodologias racionais, segundo Vitali et al. (2012), é o complexo comportamento mecânico que o solo com cimento apresenta, influenciado por vários fatores, sendo a porosidade, o teor de cimento e o teor de umidade os mais importantes.

As camadas de solo com cimento devem ser devidamente especificadas e cuidadosamente controladas. As propriedades dinâmicas (rigidez e amortecimento) são relevantes deste ponto de vista, porque elas podem ser medidas tanto no campo, quanto em laboratório (AMARAL et al., 2011).

A inclusão de cimento aleatoriamente distribuído ao solo melhora seu comportamento tensão-deformação. A tensão é transferida do solo aos reforços, que mobilizam sua resistência à tração e transmitem essa resistência ao solo, assim levando a uma melhora da capacidade de carga do material (FESTUGATO, 2011).

Em função das características reativas do cimento, surge a necessidade do seu estudo em barreiras impermeáveis, de modo a verificar se a inclusão de um material de caráter reativo na barreira pode causar mudanças nas características de permeabilidade, resistência e rigidez. Estes parâmetros são fundamentais ao correto funcionamento de um material de impermeabilização.

Dalla Rosa (2009) afirma que a adição do agente cimentante em solos proporciona alterações na granulometria da matriz, o que possibilita a mudança do comportamento mecânico do solo analisado. Desta forma, um material que antes da cimentação apresentava um comportamento dúctil e a mesmo tempo compressivo, poderá apresentar um comportamento frágil e dilatante.

Dentre os efeitos causados pela cimentação do solo, o aumento da rigidez inicial é o mais evidente (VENDRUSCULO, 2003; LOPES JUNIOR, 2011). Silva et al. (2009) estudou amostras de solo contendo diferentes teores de cimento. O solo contendo maior teor de cimento apresentou um aumento na rigidez com o aumento da tensão, enquanto, nas amostras com baixo teor de cimento a rigidez diminuiu, neste caso, mostrando que a estrutura formada pelo cimento sofreu um rompimento com o aumento da pressão confinante.

Em relação aos solos convencionais da engenharia geotécnica, os solos cimentados possuem características distintas. As propriedades de rigidez e deformabilidade de um solo são influenciadas pela presença de um agente cimentante. Dessa forma, misturas de solo com cimento apresentam capacidade de suportar estados de tensões superiores ao encontrado em solos sem cimentação quando comparados com materiais que possuem a mesma porosidade (DALLA ROSA, 2009).

Cruz (2008) estudou amostras de solo misturado com agente cimentante e pode observar que com o aumento da quantidade de cimento houve um aumento na resistência à compressão simples, variando conforme o índice de vazios e a porcentagem de cimento, onde para teores de cimento maiores, a resistência à compressão simples também é maior. Quanto maior o índice de vazios, menor a resistência.

Quanto maior a relação de vazios/cimento, menor a resistência à compressão simples, este fato deve-se a maior quantidade de vazios ou menor quantidade de cimento nas amostras (CRUZ, 2008).

## **2.5 Modificação no comportamento de geomateriais com percolação ácida**

Segundo Knop (2007), a compatibilidade dos solos com o líquido permeante também deve ser considerada quando os mesmos são utilizados em barreiras hidráulicas para aplicações ambientais. Compatibilidade significa que a permeabilidade da barreira não é alterada pelo líquido permeante, este podendo provocar várias alterações químicas na barreira.

A percolação com agentes químicos pode afetar a estrutura do solo, resultando no aumento da condutividade hidráulica (BRODERICK; DANIEL, 1990; FAVARETTI et al., 1994; KNOP, 2007).

Korf (2011) estudou o comportamento hidráulico de uma mistura de solo com cimento quando percolada com solução contaminante e observou que em uma mistura de solo com 2% de cimento, a percolação ácida não causou aumento significativo da condutividade hidráulica, indicando inclusive redução ao longo do tempo.

De acordo com Daniel (1993), ácidos fortes podem dissolver materiais no solo, formar canais preferenciais e aumentar a condutividade hidráulica. A condutividade hidráulica e o comportamento mecânico de uma mistura, contendo solo e bentonita sódica, com ou sem adição de cimento, a partir de percolação de água e de contaminante ácido foi estudada por Lemos (2006). O autor constatou que o cimento utilizado na mistura ao ser contaminado por

ácido teve sua constituição alterada, perdendo parte dos minerais, ocorrendo assim, um aumento da condutividade hidráulica.

Knop (2007) observou o comportamento de diferentes combinações de barreiras de um determinado solo com e sem cimentação, submetidos à percolação ácida. Os resultados obtidos pelo autor destacam a desestruturação de amostras naturais do solo e constatou que maiores concentrações de ácido sulfúrico em solução aquosa retornam em aumentos da condutividade hidráulica, bem como um alto efeito defloculante, o que é um importante fator a ser considerado, visando-se manter a eficácia e funcionalidade da camada de impermeabilização.

Di Emidio e Flores (2012), através da percolação de solução de sulfato em um corpo de prova composto por mistura de argila e cimento, puderam observar uma imediata queda na rigidez assim que iniciada a percolação, essa redução no parâmetro de rigidez se deu devido à deterioração das partículas presentes no solo.

## **2.6 Medidas de rigidez a pequeníssimas deformações em geomateriais**

Segundo Clayton (2011), a rigidez de um material é definida como a resistência de um corpo sujeito à deformação sob a aplicação de uma força. A rigidez é resultado da forma, condições de contorno, como por exemplo, o posicionamento de cargas aplicadas e a característica dos materiais que constituem o corpo.

Segundo Leckie e Dal Bello (2009), a rigidez é a capacidade de um sistema resistir à deformação quando submetido a um carregamento.

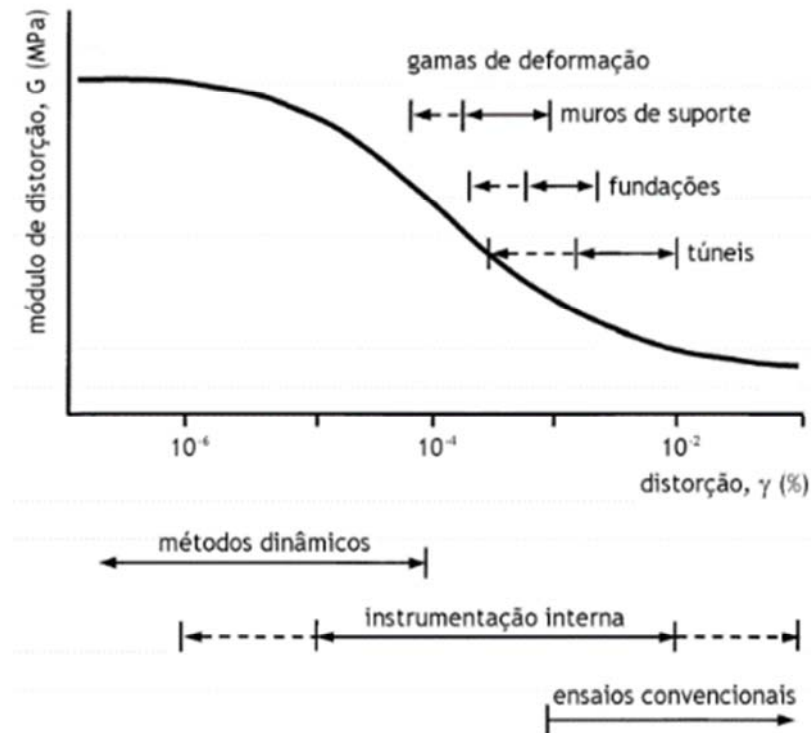
Atkinson (2000) apresenta uma típica curva rigidez-deformação, onde se observa a degradação da rigidez com o aumento da deformação, as faixas de deformações a que o solo está submetido em condições de serviço para diferentes estruturas geotécnicas e as faixas de deformações para as quais a rigidez pode ser determinada em diferentes ensaios laboratoriais, como apresenta a Figura 3. Verifica-se que para pequenas deformações a rigidez é relativamente alta e para deformações próximas da ruptura, o seu valor diminui drasticamente.

Da observação do gráfico, pode-se aferir que para pequeníssimas deformações a rigidez é relativamente alta e para deformações próximas da ruptura a rigidez diminui substancialmente. Esta degradação demonstra a forte dependência da rigidez com o nível de deformação, reflexo do caráter não linear do solo.



No domínio das pequenas deformações, isto é, para valores da deformação da ordem de  $10^{-6}$ , o solo apresenta um comportamento quase elástico e linear, sendo o módulo de distorção correspondente, ou seja, a rigidez do material denominado por módulo de distorção máximo ou inicial e representado por  $G_{\text{máx}}$  ou  $G_0$  (SANTOS, 1999).

Figura 3 - Curva de degradação da rigidez com o nível de deformação.



Fonte: Adaptado de Atkinson (2000).

### 2.6.1 Transdutores piezoelétricos

A piezoelectricidade é uma propriedade que alguns materiais apresentam que permite transformar certa voltagem em um movimento mecânico e vice-versa, além disso, permite que os transdutores piezoelétricos funcionem como atuadores ou sensores (FERREIRA, 2003; GUTIERREZ, 2007). É comum o mesmo transdutor realizar ambas as funções (FESTUGATO, 2011).

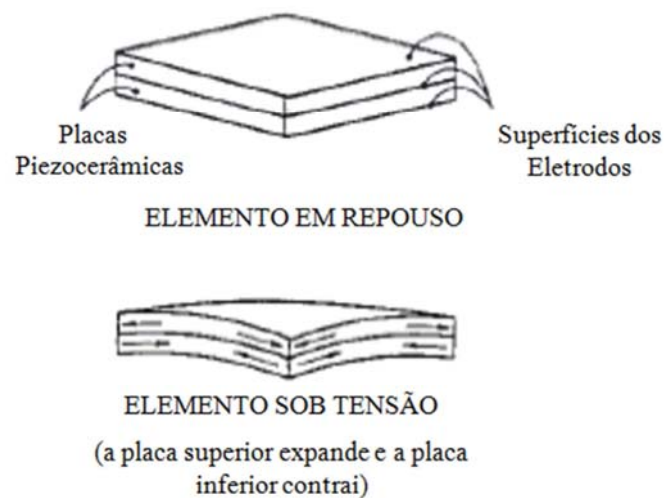
Os elementos piezocerâmicos são constituídos por uma única placa piezocerâmica que através de uma excitação, sofrem deformação longitudinalmente em qualquer uma das três

direções ortogonais, produzindo movimentos de extensão ou compressão do material cerâmico (FESTUGATO, 2011).

Segundo Chan (2012), Lawrence (1963, 1965) foi provavelmente o primeiro a aplicar os transdutores piezoelétricos em testes com ondas de cisalhamento em amostras de solo. Os testes foram realizados em amostras de argila e areia, com placas cisalhantes acopladas no pedestal e no *top cap* de um equipamento triaxial. Mais tarde, Shirley e Anderson (1975) introduziram sistemas cerâmicos no lugar das placas cisalhantes em ensaios com areia seca. Estes foram preferidos devido à geração de sinais fortes com pequenas excitações elétricas.

Os elementos compostos por duas placas finas piezocerâmicas constituem os tipos mais versáteis de transdutores, pois podem desenvolver movimentos de extensão, compressão e de flexão. Essa deformação em curvatura acontece quando uma placa sob tensão se contrai enquanto a outra expande, gerando um movimento conjunto de flexão conforme mostra a Figura 4 (CRUZ, 2008).

Figura 4 - Transdutor piezocerâmico em repouso e sob tensão.



Fonte: Adaptado de Ferreira (2003).

Os transdutores piezoelétricos são equipamentos em contato direto com a amostra, onde são utilizados para efetuar a propagação de ondas sísmicas do tipo S (corte) e P (compressão) (SILVA, 2010; CHAN, 2012).

Dentro dos diferentes tipos de transdutores piezoelétricos há quatro tipos, a saber: *bender elements*, *shear-plates*, *compression transducer* e *extender elements*. Os primeiros são utilizados para a propagação de ondas de corte (S) e os segundos para a propagação das ondas

de compressão (P). Segundo Amaral et al. (2011), as medições da rigidez são frequentemente feitas usando os *bender elements*, isto porque, é uma técnica econômica e facilmente implementada em laboratório.

### 2.6.1.1 *Bender elements*

Um *bender element* (ou transdutor de flexão) é um transdutor piezocerâmico duplo, constituído por duas placas ligadas entre si, localizadas transversalmente. A lâmina central funciona como material de reforço, devido à fragilidade das placas cerâmicas para o manuseio. Esse material encontra-se envolvido por uma resina epóxi rígida, que o isola eletricamente e o protege do contato direto com o solo e o líquido (VIGGIANI; ATKINSON, 1995; HEINECK, 2002; FERREIRA, 2003; LEE; SANTAMARINA, 2005; GUTIERREZ, 2007; CRUZ, 2008).

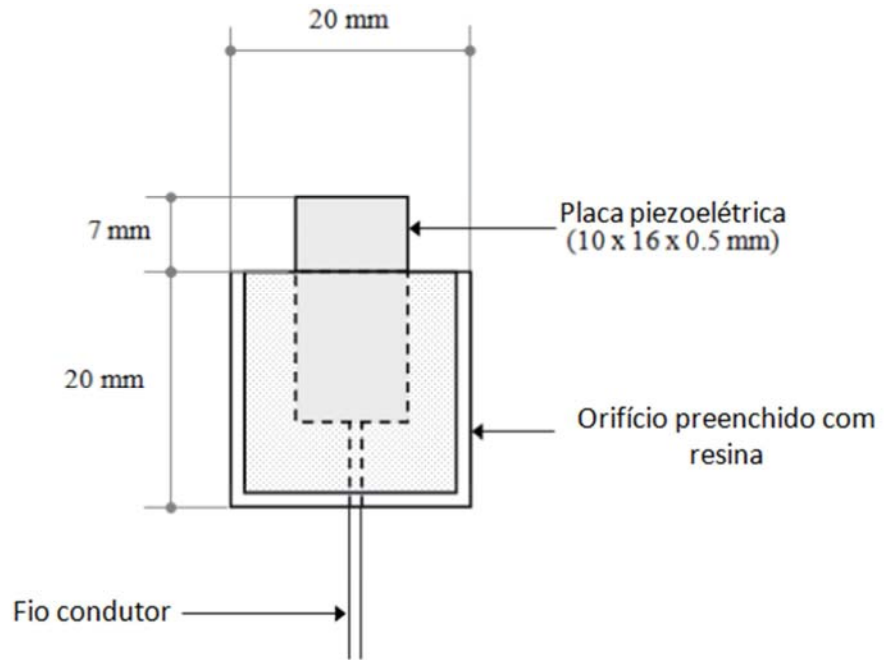
Segundo Cruz (2008), Correia et al. (2010), Piriyaikul (2010), um *bender element* ou transdutor de flexão é um transdutor piezocerâmico constituído por duas placas piezocerâmicas finas, rigidamente ligadas a uma lâmina metálica central e eletrodos nas faces exteriores. A ligação das placas cerâmicas em relação às duas direções de polarização gera um movimento conjunto de flexão longitudinalmente em três direções, de modo a propagar ondas em S durante a sua deformação.

Os *bender elements* são instalados no cabeçote superior da amostra e no pedestal de um permeâmetro e projetam-se para dentro da amostra em aproximadamente 7 mm (Figura 5). Com a aplicação de uma voltagem, o transdutor superior, ou transmissor, é excitado, causando assim, uma vibração normal à face do cabeçote, enviando uma onda através da amostra. O outro transdutor localizado na extremidade oposta recebe a onda, esse funcionando como o receptor. Quando a onda cisalhante atravessa a amostra, o receptor é movido mecanicamente e gera uma pequena voltagem que é exibida em um osciloscópio digital, em conjunto com um sinal transmitido.

A Figura 6 mostra uma representação esquemática de um sistema típico de célula triaxial equipada com *bender elements*. Juntamente com o par de *bender elements*, transmissor e receptor, um gerador de funções é usado a fim de produzir uma voltagem de entrada controlada na qual é transmitida para o *bender element* transmissor e após, a um osciloscópio. A onda propagada é então percebida pelo elemento receptor no qual, esta

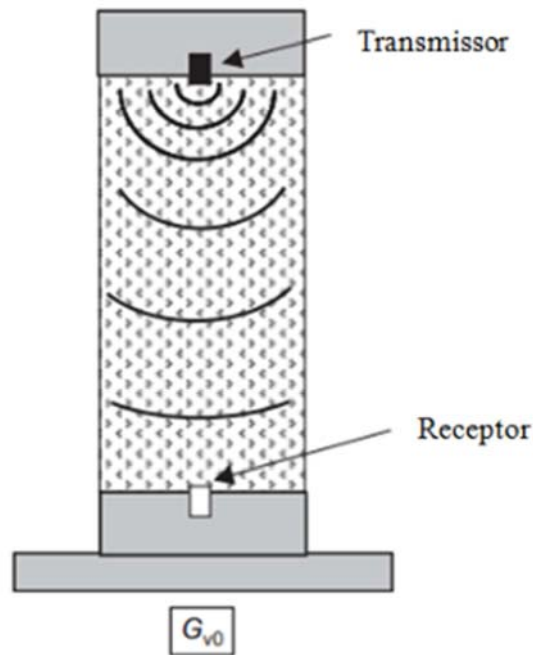
conectado a um amplificador de sinal. O sinal amplificado é então capturado pelo osciloscópio e após, os sinais de entrada e de saída são transferidos a um computador para interpretação. O tempo entre a transmissão e a recepção da onda de viagem, com o qual pode-se calcular a velocidade da onda cisalhante, e por sua vez, o módulo cisalhante elástico.

Figura 5 - Diagrama esquemático dos *bender elements*.



Fonte: Adaptado de Chan (2010).

Figura 6 - Sistema com *bender elements*.



Fonte: Adaptado de Clayton (2011).

### 2.6.1.2 Ondas sísmicas

Ondas de tensão e de deformação geradas em um meio elástico difundem-se em todas as direções com velocidades finitas de propagação. Em pontos suficientemente afastados do centro de perturbação, podem ser consideradas ondas planares, também chamadas de ondas internas ou volumétricas, por envolverem no seu movimento todo o volume do meio, podendo assumir-se dois tipos distintos de movimento das partículas: de dilatação e de cisalhamento. A cada tipo de movimento corresponde um dos dois tipos de ondas volumétricas (FESTUGATO, 2011).

A técnica geofísica de ondas usada na engenharia geotécnica, faz uso de dois tipos de ondas sísmicas: ondas que se propagam através de um corpo sólido, não sendo afetadas pela superfície do corpo, com velocidade e comprimento de onda controlada apenas pela variação da densidade e da rigidez do material, e pelas ondas superficiais, essas em geral são propagadas na interface entre materiais de diferentes densidades e/ou rigidez (CLAYTON,

2011). A Figura 7 apresenta os dois tipos de ondas existentes, e a direção de propagação da onda de cisalhamento.

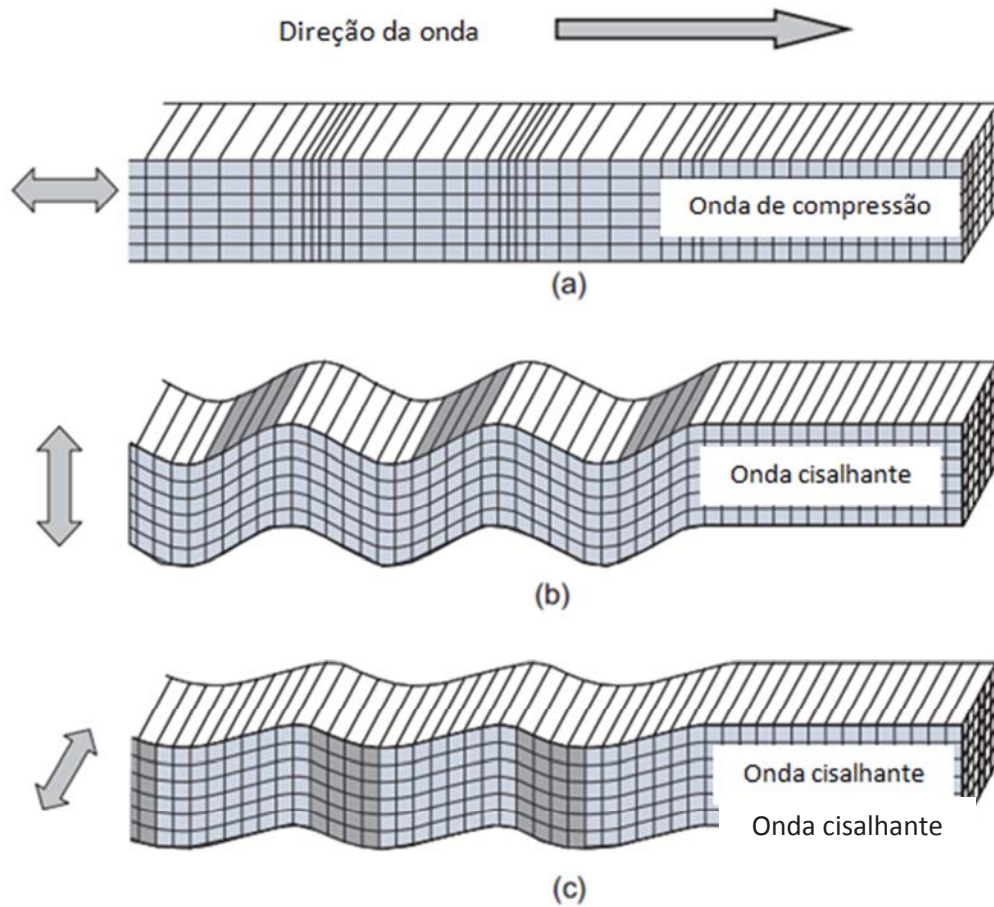
Clayton (2011) e Chan (2012) definem as ondas como de compressão (conhecidas como ondas P), ou ondas cisalhantes (conhecidas como ondas S e/ou ondas transversais). Quando uma onda de compressão (P) é transmitida, pode-se observar uma perturbação temporária paralela a direção do movimento da onda, e perpendicular se for transmitida uma onda cisalhante.

### **2.6.2 Ensaios utilizados para obtenção do módulo cisalhante**

Trata-se de um método simples que permite a determinação do módulo cisalhante de um solo a deformações muito pequenas, uma vez que a máxima deformação cisalhante produzida, sendo inferior a  $10^{-5}$ , em um ensaio com *bender elements* foi estimada por Dyvik e Madshus (1985). Desta forma, o módulo cisalhante estimado é  $G_0$ , relevante a deformações muito pequenas.

Segundo Santos (1999), Piriyaikul (2010) e Clayton (2011) o estudo da caracterização dos solos no domínio das deformações muito pequenas, para valores da deformação da ordem de  $10^{-5}$ , é de grande importância. Nestes casos, o solo apresenta um comportamento quase elástico e linear, sendo o módulo de distorção correspondente, para cálculos de rigidez e deformação, denominado módulo de distorção máximo ou inicial e representado por  $G_{m\acute{a}x}$  ou  $G_0$ .

Figura 7 - Ondas sísmicas: (a) Onda P; (b) Onda S no plano vertical; (c) Onda S no plano horizontal.



Fonte: Adaptado de Clayton (2011).

A determinação de  $G_0$  pode ser feita por duas vias: através da medição das tensões e das deformações sob “pequenos” carregamentos (teoria da elasticidade) ou através da medição da velocidade de propagação da onda de corte (teoria de propagação de ondas) (SANTOS, 1999).

Entre os ensaios que são utilizados para a determinação do módulo cisalhante em laboratório estão: RCT (*resonant column test*) - ensaio de coluna ressonante, MLTST (*monotonic loading torsional shear test*) – ensaio monotônico de torção, TX (*triaxial test*) - ensaio triaxial; BE - técnica dos *bender elements*, OE (*oedometer*) - ensaio edométrico (SANTOS, 1999).

Independente do ensaio utilizado para obtenção das ondas sísmicas, ou do método de interpretação dos dados, o resultado relevante é a determinação do tempo de propagação da onda através do solo. Nesse sentido, a velocidade da onda de cisalhamento ( $v_s$ ) é obtida

através da divisão da distância percorrida pela onda (entre o transmissor e o receptor) com o tempo de chegada, que por sua vez, é elevado ao quadrado e multiplicado pela massa específica aparente da amostra para obter o chamado  $G_0$  (CHAN, 2010; FESTUGATO, 2011).

$$G_0 = \rho V_s^2 = \rho \left( \frac{d^2}{t^2} \right) \quad (1)$$

Em que:

$\rho$  é a massa específica aparente do solo;

$d$  é a distância entre os transdutores; e

$t$  é o tempo de viagem da onda sísmica (VIGGIANI; ATKINSON, 1995; PIRIYAKUL, 2010).

A técnica baseia-se na mensuração do tempo de chegada da onda de cisalhamento, assumindo uma propagação de onda plana, isto é, a diferença de tempo entre a excitação do transmissor e da excitação do elemento receptor (VIGGIANI; ATKINSON, 1995; FERREIRA, 2003; VILHAR; JOVIĆIĆ, 2009; PIRIYAKUL, 2010; CLAYTON, 2011; CHAN, 2012).

Quando uma extremidade do transdutor sofre uma excitação elétrica, irá fazer esta onda se movimentar para a extremidade oposta, gerando assim uma onda de cisalhamento, como mostra a Figura 4. Após a chegada da onda de cisalhamento na outra extremidade da amostra de solo o transdutor receptor irá mover-se e gerar uma tensão pequena, o que é detectado no eletrôdo e mostrado em um osciloscópio (VIGGIANI; ATKINSON, 1995; HEINECK, 2002; FERREIRA, 2003; CRUZ, 2008).

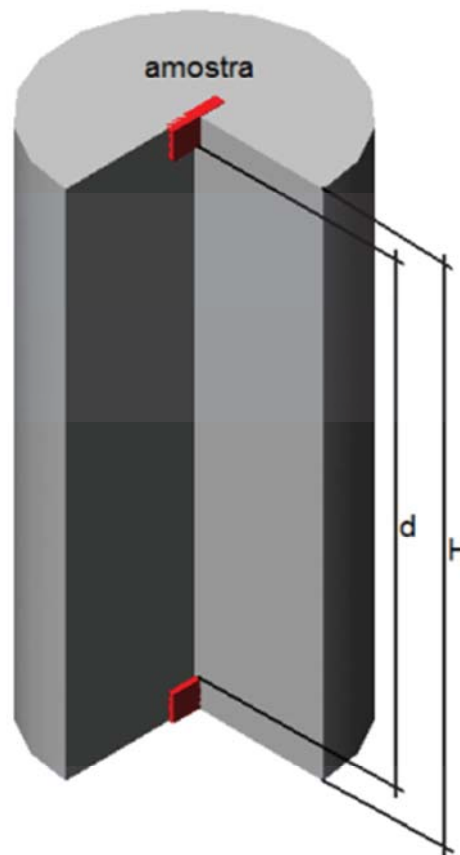
O módulo de cisalhamento determinado por estes métodos de ensaio são influenciados por fatores tais como a pressão confinante, tensão de pré-adensamento, deformação de corte, o número de ciclos de carregamento, o grau de saturação e condições de drenagem. Onde outro fator, duração da pressão confinante, é também de importância fundamental em avaliações laboratoriais do módulo de cisalhamento. Este fator é muitas vezes negligenciado ou mal interpretado, podendo resultar em má interpretação de dados de teste e de falha na obtenção do máximo benefício a partir de um programa de testes (ANDERSON; STOKOE, 1978).



### 2.6.2.1 Distância de percurso (d)

A distância de percurso da onda é utilizada mais comumente como sendo a altura da amostra de solo (H) reduzida do comprimento de penetração dos *bender elements* no corpo de prova, ou seja, a distância entre as extremidades dos transdutores. A Figura 8 ilustra a determinação de d.

Figura 8 - Definição da distância percorrida pelas ondas.



Fonte: Adaptado de Festugato (2011).

### 2.6.2.2 Tempo de propagação (t)

A interpretação das ondas sísmicas traz alguma incerteza na determinação do tempo de propagação da onda de resposta, conforme método utilizado para interpretá-la. Cabe ressaltar que a determinação do tempo de propagação da onda é o passo mais importante de todo o método. Deve-se ter atenção a alguns tipos de interferências na leitura das ondas, tais como,

efeitos de vizinhança ou excesso de ruído no sinal de resposta (FESTUGATO 2011; CRUZ, 2008).

A interpretação dos testes com *bender elements* é relativamente simples, embora possam ocorrer alguns erros na interpretação das curvas geradas. Estudos recentes foram encontrados na literatura internacional sobre a interpretação de ondas sísmicas emitidas através dos testes com *bender elements* (FERREIRA; FONSECA, 2005; VILHAR; JOVIČIĆ, 2009; SILVA, 2010; CLAYTON, 2011; CHAN, 2012).

Em termos de interpretação, os métodos podem ser classificados em dois grupos principais: métodos de domínio de tempo e métodos de domínio de frequência. No domínio de tempo, o usuário determina o tempo de chegada da onda sísmica através de observações dos sinais de voltagens de entrada e saída versus o tempo. No domínio de frequência, os sinais de entrada e saída armazenados são transformados e manipulados no domínio de frequência (VILHAR; JOVIČIĆ, 2009). Os dois métodos de interpretação têm o objetivo de minimizar a influência dos efeitos dispersos.

Uma das formas mais simples e imediatas para a determinação do tempo e propagação da onda no solo é o método da primeira chegada da onda de resposta, que está descrito no item subsequente.

### **2.6.3 Método da primeira chegada da onda de resposta**

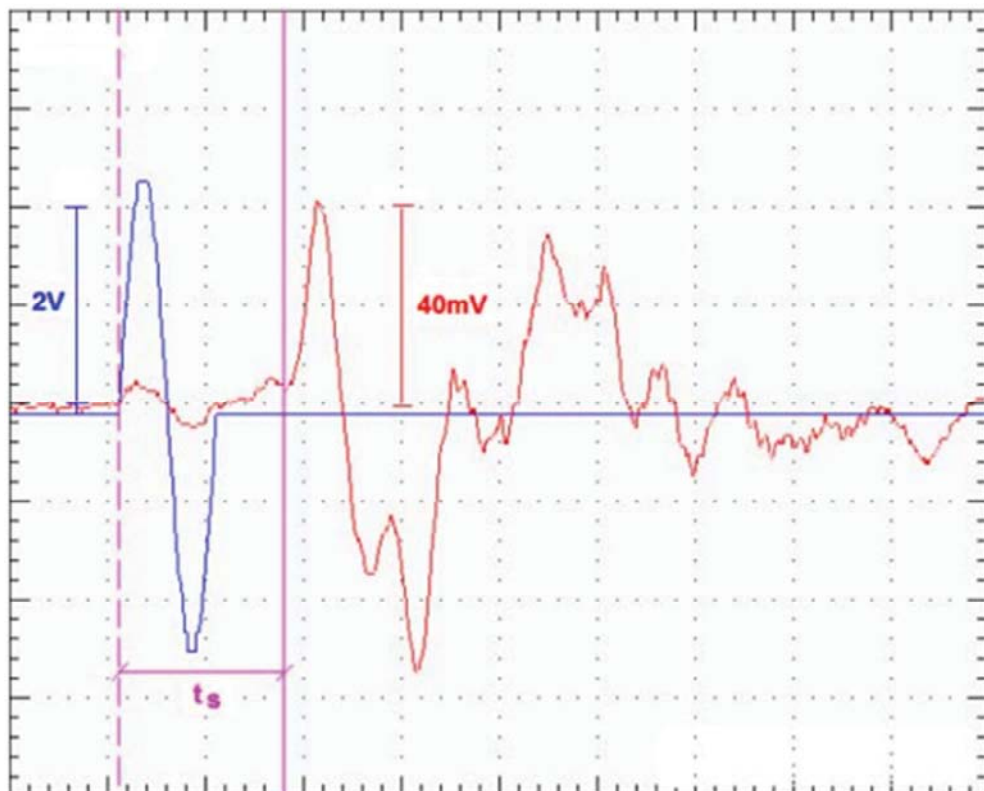
Segundo Cruz (2008) e Festugato (2011) o intervalo de tempo entre a onda gerada e de resposta baseia-se na identificação do primeiro instante de chegada da onda recebida, ou seja, na primeira inflexão do sinal de resposta (Figura 9).

Abbiss (1981) e Dyvik e Madshus (1985), os primeiros a investigar a utilizar ensaio com *bender element*, observaram que a inversão da polaridade do sinal emitido era, conseqüentemente, acompanhada pela inversão, no sinal de resposta, apenas da parte correspondente à onda de cisalhamento, cancelando os efeitos distorcionais e o ruído presente. Este processo simples permitia, em geral, confirmar o ponto de primeira inflexão como o ponto de chegada da onda propagada. Mas trabalhos posteriores demonstraram que tal fato não pode ser generalizado, já que os efeitos de vizinhança também são invertidos na totalidade, acompanhado a onda de cisalhamento (CRUZ, 2008; FESTUGATO, 2011).

### 2.6.4 Métodos de calibração

Antes de realizar os ensaios com os sensores *bender elements*, é necessário a realização de ensaios para a calibração de todo o sistema envolvido. Segundo Piriyakul (2009), existem dois métodos para a calibração de materiais piezocerâmicos. No primeiro método o tempo de deslocamento da onda,  $t$ , é estimado através do contato direto entre um *bender element* e outro, medindo assim, o intervalo de tempo que a onda leva entre o transdutor emissor e o receptor. No segundo método, a câmara de ensaio é montada sem o corpo de prova no seu interior, com os *bender elements* devidamente posicionados com a distância entre o emissor e o receptor conhecida. Segundo o autor, nenhuma onda de resposta pode ser observada quando a câmara de ensaios estiver vazia ou preenchida com água.

Figura 9 - Determinação do tempo de propagação de uma onda S, pelo método da primeira chegada do sinal de resposta.



Fonte: Festugato (2011).

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 Programa experimental

Esta pesquisa está vinculada a um projeto de pesquisa mais abrangente que envolve investigações macroestruturais e microestruturais do comportamento de um solo argiloso, com e sem a adição de cimento Portland, para aplicações em barreiras impermeáveis de fundo em aterros de resíduos sólidos industriais e de mineração. Conforme mencionado anteriormente, este projeto conta com o apoio da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, através do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil – PPGEC e faz parte do escopo do projeto de pesquisa aprovado no Edital 003/2011 – PRONEM FAPERGS/CNPq, do qual também participa a Universidade Federal de Viçosa. Este trabalho mais abrangente foi dividido em duas etapas desenvolvidas de forma simultânea: a primeira etapa refere-se à investigação do comportamento macroscópico das misturas compactadas; a segunda etapa refere-se à aplicação de técnicas de análise microestrutural às amostras utilizadas na primeira etapa. A Figura 10 apresenta o fluxograma geral da pesquisa. No presente trabalho, será abordado apenas o comportamento mecânico das misturas de solo, com e sem adição de cimento, percoladas com água destilada e contaminante ácido. A primeira etapa desta pesquisa refere-se à adaptação de um equipamento de coluna existente com sensores *bender elements*, compreendendo o projeto do equipamento adaptado, a especificação e aquisição de materiais e componentes, a execução do projeto, com a usinagem de peça, instalação e calibração dos sensores e equipamentos de leitura, e a realização de ensaios de validação do equipamento. A segunda etapa refere-se ao programa experimental onde foram realizados ensaios de percolação e de resistência à compressão diametral para investigação das variações mecânicas de um solo argiloso compactado, com e sem a adição de cimento, submetido à ação de um lixiviado ácido. Nesta etapa, foram realizados a coleta de solo, o preparo da solução contaminante, a moldagem e saturação dos corpos de prova e a condução dos ensaios de percolação. As etapas desenvolvidas no presente trabalho estão apresentadas na Figura 11.

### 3.2 Planejamento experimental

O programa experimental referido no item 3.1 teve como objetivo investigar, a partir da realização de ensaios de permeabilidade, o comportamento mecânico de misturas argilosas compactadas, moldadas com diferentes pesos específicos, com e sem a adição de cimento, sob a ação de carga vertical estática, diante da percolação de uma solução ácida. As variáveis de resposta, fatores de controle e de ruído são apresentadas no Quadro 1. Os níveis ou faixas estudados para os fatores de controle são apresentados no Quadro 2.

Para a avaliação da resistência à compressão diametral e da condutividade hidráulica dos corpos de prova, foi planejado um experimento fatorial  $2^k$ , no qual os fatores de controle foram cruzados e todas as combinações testadas com repetições. Além do tipo de líquido percolante, foram dois os fatores de controle investigados: o teor de cimento e o peso específico seco de compactação. Cada fator de controle foi testado em dois níveis. Adicionalmente, algumas combinações adicionais (ponto central e ponto axial) foram testadas, como está definido no Quadro 3. O delineamento fatorial básico utilizado para cada tipo de líquido percolante possui uma representação geométrica espacial de um quadrado referenciado a um sistema de coordenadas cartesianas, onde cada eixo representa um dos fatores de controle e as combinações entre os níveis dos fatores (teor de cimento e peso específico de compactação), denominados pontos fatoriais, correspondem aos vértices do quadrado (Figura 12). No centro do quadrado está representado o ponto central e no ponto mediano da aresta o ponto axial, os quais resultam da combinação entre os níveis médios dos fatores de controle.

Cabe ressaltar que apenas os pontos fatoriais para os ensaios com água destilada foram repetidos ( $n = 3$ ), o que permitiu a quantificação do erro experimental e a análise estatística dos resultados. Todos os demais pontos experimentais foram ensaiados apenas uma vez. Isso resultou em um delineamento com cinco diferentes combinações entre fatores e vinte rodadas experimentais, isto é, ensaios de condutividade hidráulica e de resistência à compressão diametral. Esta forma de delineamento experimental permite a avaliação estatística, através da técnica conhecida como análise de variância (ANOVA), dos efeitos isolados e combinados dos fatores de controle sobre as variáveis de resposta, e torna possível a modelagem, através da técnica da regressão linear múltipla, de uma superfície de resposta de primeira ordem (linear), relacionando as variáveis de resposta aos fatores de controle.

Figura 10 - Fluxograma geral da pesquisa.

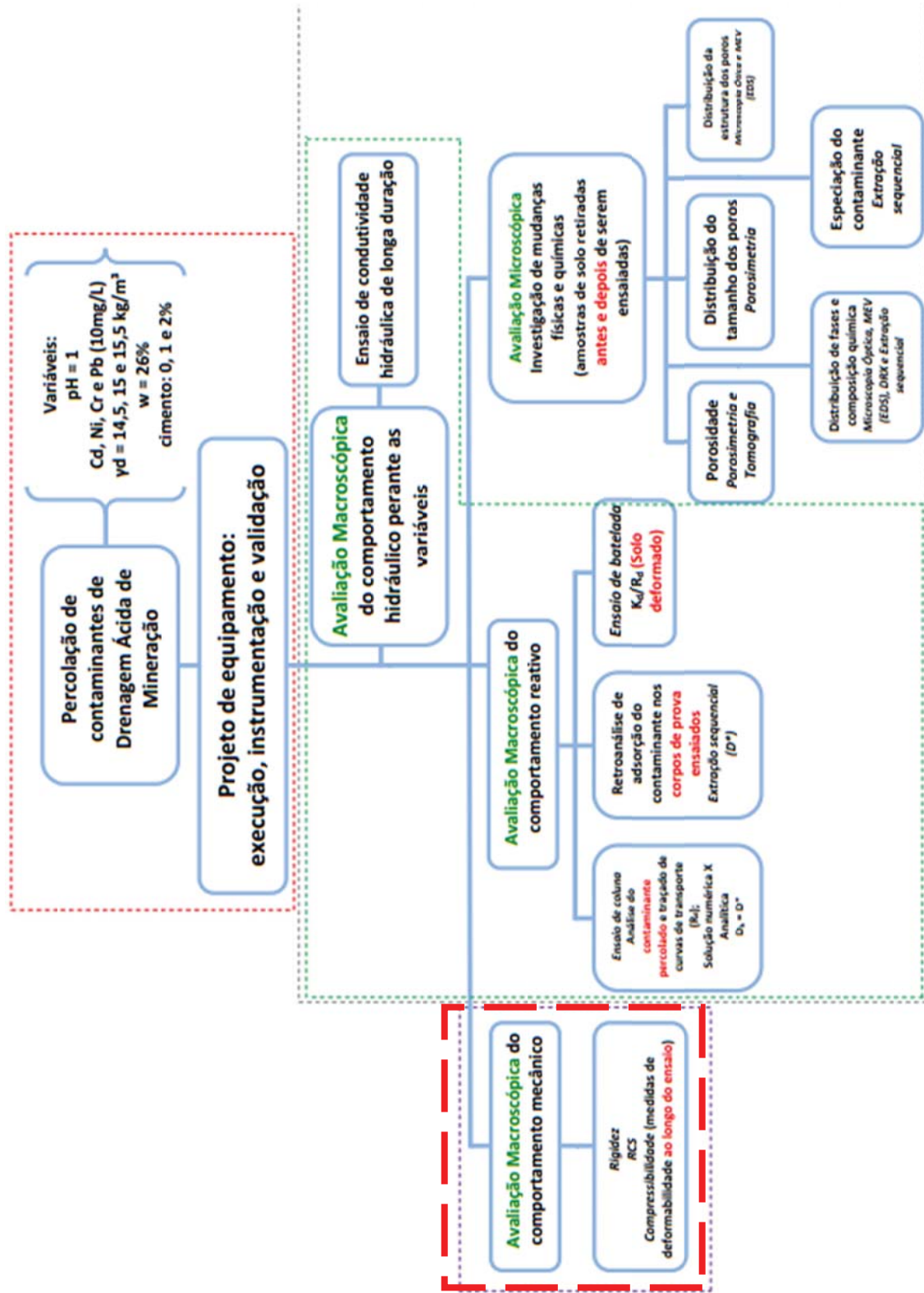
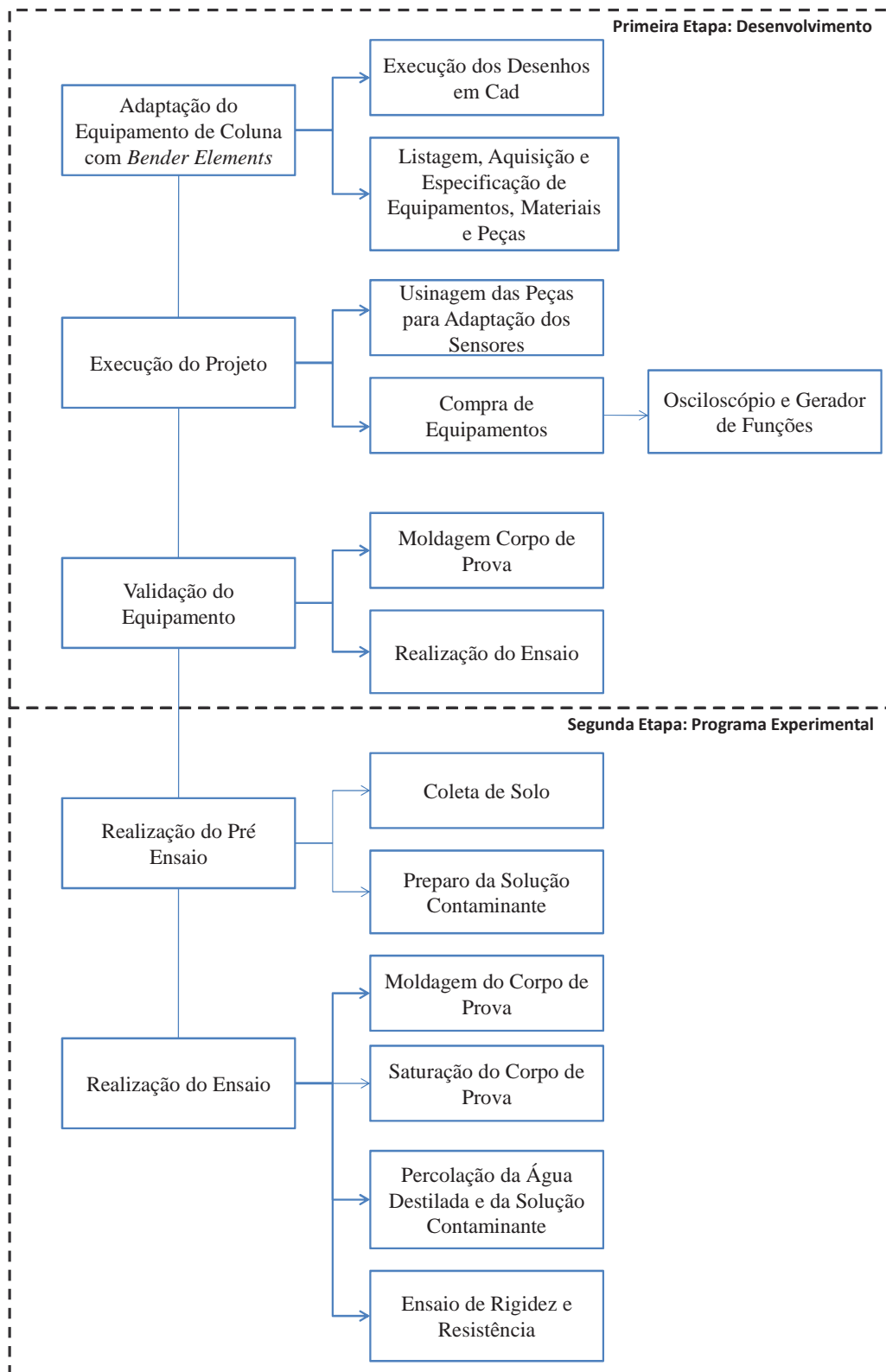


Figura 11 - Fluxograma da pesquisa (presente trabalho).



Fonte: Próprio Autor (2014).

Quadro 1 - Variáveis de resposta, fatores de controle e de ruído.

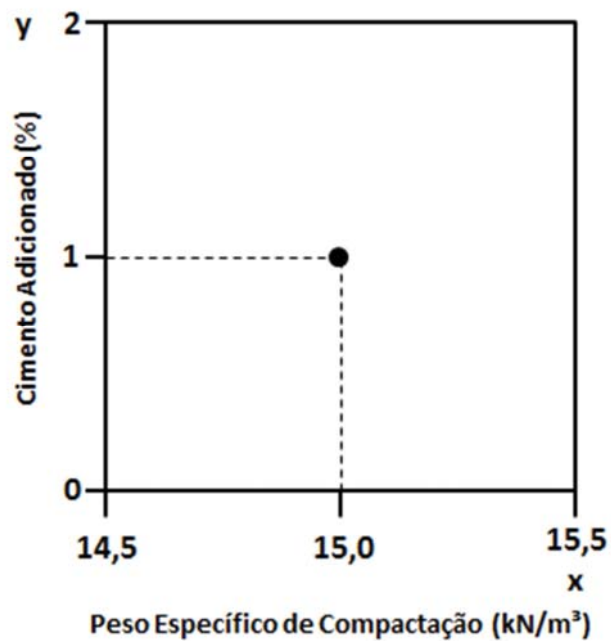
<b>Resposta</b>	<b>Controle (variáveis e fixos)</b>	<b>Ruído</b>
Módulo de cisalhamento dos corpos de prova	Teor de cimento aplicado aos corpos de prova	Erro de leitura e interpretação das ondas sísmicas
Resistência à compressão diametral dos corpos de prova	Carga vertical estática	Contaminação em vidrarias e equipamentos utilizados
Condutividade hidráulica dos corpos de prova	Carga hidráulica para a percolação dos corpos de prova	Efeitos da temperatura sobre os ensaios e sobre a preservação das características químicas dos materiais utilizados
pH da solução percolada	Características físicas dos corpos de prova ensaiados: altura, diâmetro, peso específico, umidade, índice de vazios, porosidade, etc	
Recalque dos corpos de prova	pH inicial da solução contaminante	



Quadro 2 - Variáveis de controle.

Variáveis do Experimento	Valores Fixados/Faixa de Variação		
<b>Variáveis Fixas</b>			
pH da solução contaminante	1,31		
Concentração Solução Contaminante – H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (%)	2		
Gradiente Hidráulico (percolação água destilada e solução ácida)	50		
Carga vertical estática (kN/m <sup>2</sup> )	280		
Umidade de compactação (%)	26,00		
<b>Variáveis de Controle</b>			
Solução Percolante	Água	Ácida	
Teor de cimento adicionado ao solo (%)	0,00	1,00	2,00
Peso específico seco de compactação (kN/m <sup>3</sup> )	14,50	15,00	15,50

Figura 12 - Representação geométrica do programa experimental da pesquisa.



Fonte: Próprio Autor (2014).

O Quadro 3 apresenta o resumo do programa experimental planejado, no qual podem ser observados os tratamentos e repetições previstas, bem como a ordem de coleta de dados.

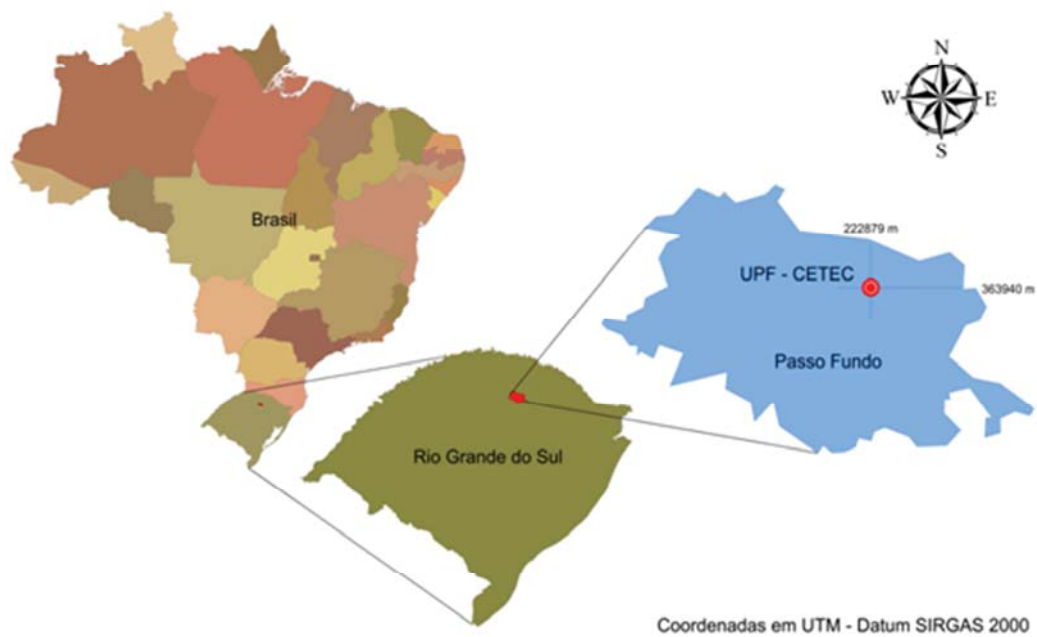
Quadro 3 - Combinações executadas e ordem dos ensaios.

<b>Amostra</b>	<b>Peso específico de compactação (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Líquido percolante</b>	<b>Teor de cimento (%)</b>
CP1_A	15,50	Água destilada	0
CP1_B	15,50	Água destilada	0
CP1_C	15,50	Água destilada	0
CP2_A	15,50	Água destilada	2
CP2_B	15,50	Água destilada	2
CP2_C	15,50	Água destilada	2
CP3_A	14,50	Água destilada	0
CP3_B	14,50	Água destilada	0
CP3_C	14,50	Água destilada	0
CP4_A	14,50	Água destilada	2
CP4_B	14,50	Água destilada	2
CP4_C	14,50	Água destilada	2
CP5_A	15,00	Água destilada	0
CP6_A	15,00	Água destilada	1
CP1_D	15,50	Solução contaminante	0
CP2_D	15,50	Solução contaminante	2
CP3_D	14,50	Solução contaminante	0
CP4_D	14,50	Solução contaminante	2
CP5_B	15,00	Solução contaminante	0
CP6_B	15,00	Solução contaminante	1

### 3.3 Local de estudo

A área de estudo está situada na região norte do estado do Rio Grande do Sul, na cidade de Passo Fundo (Figura 13). O programa experimental foi desenvolvido no Laboratórios de Geotecnia Ambiental da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo.

Figura 13 - Mapa da localização da área de estudo.



Fonte: Adaptado de Dos Santos (2013).

## 3.4 Materiais

### 3.4.1 Solo

#### 3.4.1.1 Argila

O solo de estudo foi coletado no Campo Experimental de Geotecnia da Universidade de Passo Fundo, localizado ao lado do Centro Tecnológico da Universidade de Passo Fundo. As coordenadas geográficas do ponto a ser mostrado são: S 28° 13' 35,7''; W 52° 23' 14,46''.

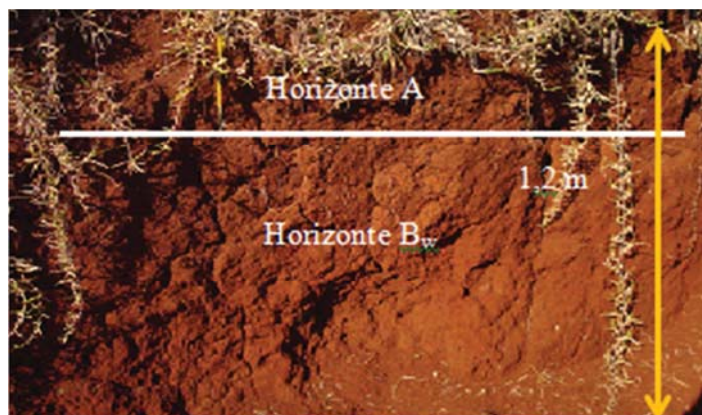
A altitude é 698 m. A Figura 14 apresenta o campo experimental de geotecnia e a Figura 15 o perfil de amostragem de solo.

Figura 14 - Campo experimental de geotecnia.



Fonte: Próprio Autor (2014).

Figura 15 - Perfil de amostragem de solo.



Fonte: Adaptado de Dos Santos (2013).

O solo de estudo é um material residual de basalto e pertence à província geológica do planalto Rio-Grandense, seguindo a geologia do Rio Grande do Sul, e à bacia do Paraná segundo à geologia do Brasil (BERTORELLI; HARALYI, 1998), que recebeu derrames vulcânicos de basalto no período mesozóico sobre um pacote de rochas sedimentares.

A classificação pedológica é de um Latossolo Vermelho Distrófico Húmico (unidade Passo Fundo), segundo Streck et al. (2008). Estes solos são muito profundos, drenados e altamente intemperizados, apresentando uma seqüência de horizontes A-B<sub>w</sub>-C, onde B<sub>w</sub> é do

tipo latossólico. Estes solos têm pouco incremento de argila com a profundidade, transição gradual entre os horizontes e, por serem muito intemperizados, tem predomínio de caulinita e óxidos de ferro, o que lhes proporciona baixa CTC ( $<17 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ ), acentuada acidez, baixo estoque de nutrientes, baixa matéria-orgânica. A coloração vermelha confere baixa saturação por bases ( $<50\%$ ) e elevado teor de Ferro ( $>18\%$ ), o que os caracteriza como distroféricos (STRECK et al., 2008). A classificação geotécnica, baseada em ensaios de caracterização, indica que é uma argila de alta compressibilidade - CH, segundo o sistema unificado - SUCS (ASTM, 1993).

A utilização deste solo na pesquisa se justifica em razão das suas características adequadas ao uso como barreira compactada e da sua predominância na região norte do Rio Grande do Sul. As Tabelas 1 e 2 apresentam respectivamente, as características químicas básicas e a caracterização geotécnica do solo de estudo e a Figura 16 apresenta a curva granulométrica.

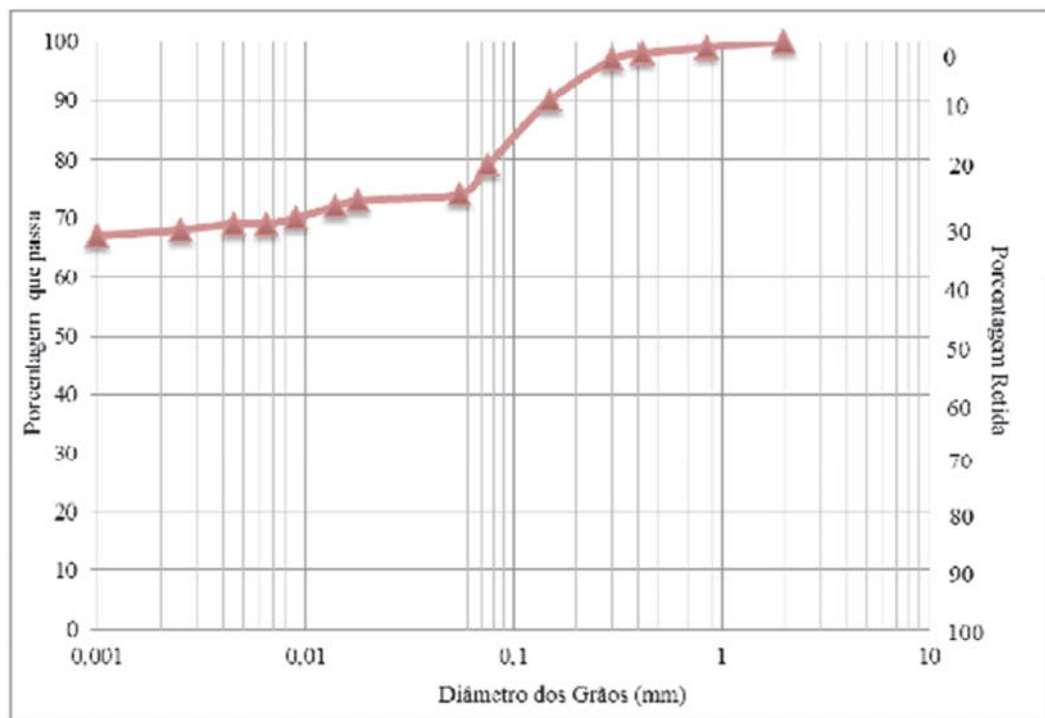
Tabela 1 - Análise química básica (KORF, 2011).

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Índice SMP	5,4
P ( $\text{mg.kg}^{-1}$ )	4,0
K ( $\text{mg.kg}^{-1}$ )	334,0
S ( $\text{mg.kg}^{-1}$ )	33,0
Al ( $\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$ )	1,7
Ca ( $\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$ )	0,5
Mg ( $\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$ )	0,3
H + Al ( $\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$ )	8,7
Saturação por bases (%)	16,0
Saturação por alumínio (%)	51,0
Saturação por potássio (%)	8,3
B ( $\text{mg.kg}^{-1}$ )	0,2
Mn ( $\text{mg.kg}^{-1}$ )	9,0
Zn ( $\text{mg.kg}^{-1}$ )	1,4
Cu ( $\text{mg.kg}^{-1}$ )	2,5
Área superficial específica - ASE ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	33,86

Tabela 2 - Caracterização geotécnica e físico-química do solo (REGINATTO et al. 2012).

Parâmetro	Valor
Argila (%)	68
Silte (%)	5
Areia (%)	27
Limite de Liquidez (%)	53
Limite de Plasticidade (%)	42
Peso específico real dos grãos ((kN/m <sup>3</sup> )	26,7
Umidade Natural (%)	34
Peso específico natural (kN/m <sup>3</sup> )	16,3
Índice de Vazios	1,19
Grau de Saturação (%)	75,7
Porosidade (%)	54
pH	5,4
Matéria Orgânica (%)	< 0,8
Capacidade de Troca Catiônica (cmolc/dm <sup>3</sup> )	8,6
Condutividade hidráulica (cm/s)	1,39x10 <sup>-3</sup>

Figura 16 - Curva granulométrica da argila.



Fonte: Reginatto et al. (2012).

### 3.4.1.2 Areia

Para fins de calibração do equipamento adaptado para medidas contínuas de rigidez, utilizou-se areia extraída de uma jazida localizada no município de Osório – RS (Figura 17). A escolha deste solo para a calibração do equipamento se justifica devido às diversas pesquisas onde a rigidez deste material foi investigada, fornecendo assim, valores para comparação.

Figura 17 - Município de Osório – RS.

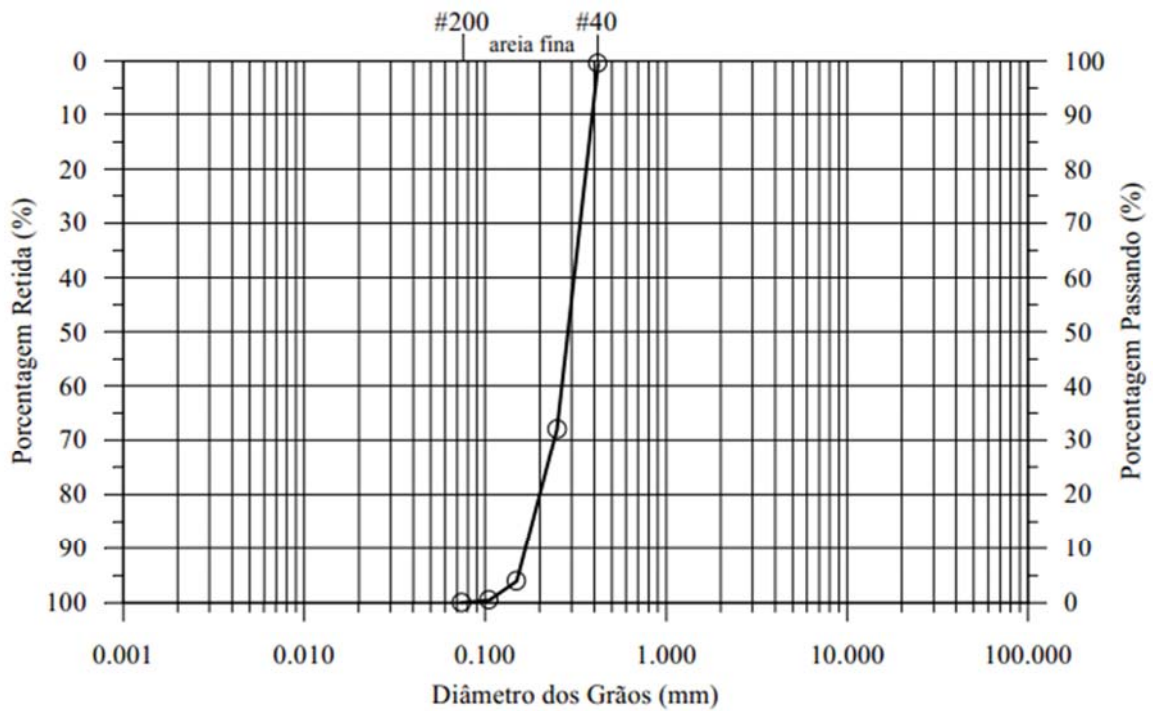


Fonte: Adaptado de Cruz (2008).

Trata-se de uma areia fina (NBR 6502 – ABNT, 1995; ASTM D 2487, 1993), limpa e de granulometria uniforme que, segundo Spinelli (1999), tem o quartzo como material correspondente a 99% da sua composição mineralógica, sendo o restante composto por glauconita, ilmenita, turmalina e magnetita. Não foi observada presença de matéria orgânica.

Este material teve sua curva granulométrica e índices físicos determinados no laboratório Envirogeeo/UFRGS por Díaz (1998), conforme apresentado na Figura 18 e na Tabela 3.

Figura 18 - Curva granulométrica da areia.



Fonte: Díaz (1998).

Tabela 3 - Índices físicos da areia de Osório – RS (DIAZ, 1998).

Índices físicos	Areia de Osório
Massa específica real dos grãos	26,3 KN/m <sup>3</sup>
Diâmetro efetivo, $D_{10}$	0,16 mm
Limite de plasticidade, LP	NP
Índice de vazios, $e_{\min}$	0,57
Índice de vazios, $e_{\max}$	0,85

### 3.4.2 Cimento

Para reduzir o tempo necessário de cura, foi adotado cimento Portland do tipo CP-V (alta resistência inicial), para o melhoramento das condições mecânicas e reativas do solo



argiloso em estudo. A composição do cimento CP-V, segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABPC, 2002), é de clínquer e adições. A Tabela 4 apresenta a sua composição típica.

Tabela 4 - Composição do Cimento Portland CP-V (ABPC, 2002).

<b>Tipo</b>	<b>Clinquer + Gesso (%)</b>	<b>Material Carbonático (%)</b>
CPV - ARI	100 – 95	0 - 5

### 3.4.3 Água destilada

No estudo desenvolvido, todas as amostras foram preparadas utilizando água destilada, com o objetivo de eliminar uma eventual influência na composição das misturas. Além disso, foram realizados ensaios de rigidez a pequenas deformações com água destilada como líquido percolante. A água é proveniente de poço artesiano que abastece todo o campus da Universidade de Passo Fundo.

### 3.4.4 Solução contaminante

O ácido utilizado na preparação da solução foi o ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) da marca Merck® 95 – 97 %, diluído em água destilada, sendo o seu uso nessa pesquisa justificado devido ao objetivo de simular aterros de resíduos gerados nas atividades de mineração de carvão, onde há presença de pirita, que em contato com a água forma o ácido sulfúrico. O preparo da solução foi realizado no Laboratório de Saneamento Ambiental da Universidade de Passo Fundo.

Todos os corpos de prova foram percolados com a mesma concentração de ácido, não sendo esta uma variável do estudo. A solução foi preparada sempre logo antes do início do ensaio para cada corpo de prova. As soluções foram elaboradas sempre em 2 litros, com auxílio de um balão volumétrico de volume 2.000 mL, uma proveta de 100 mL para medição do volume de ácido para a diluição e um litro de ácido sulfúrico (Figura 19).

Para a preparação da solução contaminante a quantidade necessária de ácido foi transferida para a proveta a fim de atingir 2 % de concentração de  $H_2SO_4$  em 2.000 mL de solução contaminante. Após o transbordo, tomou-se o cuidado de lavar com água destilada a proveta e o tubo do balão volumétrico antes de avolumar. Após, a solução foi agitada e

inserida na câmara de reservatório para percolação com auxílio de um funil. O pH médio da solução contaminante utilizada em todos os corpos de prova foi de 1,31.

Figura 19 - Materiais utilizados para a preparação da solução contaminante.



Fonte: Próprio Autor (2014).

### 3.5 Equipamentos

#### 3.5.1 Adaptação do equipamento de coluna com *bender elements*

O equipamento existente utilizado na adaptação foi construído por Santos (2013) no Laboratório de Geotecnia do Centro Tecnológico da Universidade de Passo Fundo, para avaliar o comportamento hidráulico de misturas compactadas destinadas à aplicação em barreiras de contenção.

O equipamento conta com um sistema de aplicação de cargas verticais, com o intuito de simular sobrecargas semelhantes às aquelas as quais as barreiras são submetidas, quando integrantes de sistemas de impermeabilização de fundo de aterros de resíduos sólidos. Além disso, possui reservatórios que armazenam os fluídos de percolação com sistema de ar comprimido a fim de simular possíveis cargas hidráulicas presentes em aterros de mineração. Um esquema do equipamento está apresentado na Figura 20 e uma apresentação geral do equipamento na Figura 21. A Figura 23 apresenta a visão lateral do equipamento. Neste equipamento são utilizados materiais inertes (aço inoxidável e acrílico), para evitar reações entre os componentes da solução contaminante e o equipamento. O equipamento foi montado

em um pórtico metálico e tem a capacidade de ensaiar, simultaneamente, seis corpos de prova com dimensões de 0,06 m de altura e 0,07 m de diâmetro. Porém, apenas a primeira coluna foi utilizada para a adaptação dos *bender elements*. Cada câmara de ensaio possui uma entrada para o fluido percolante e uma saída para a coleta do efluente, sendo que o fluxo através do corpo de prova é descendente. Cada uma das seis entradas e seis saídas possui válvulas de abertura e fechamento utilizadas para facilitar a execução do ensaio.

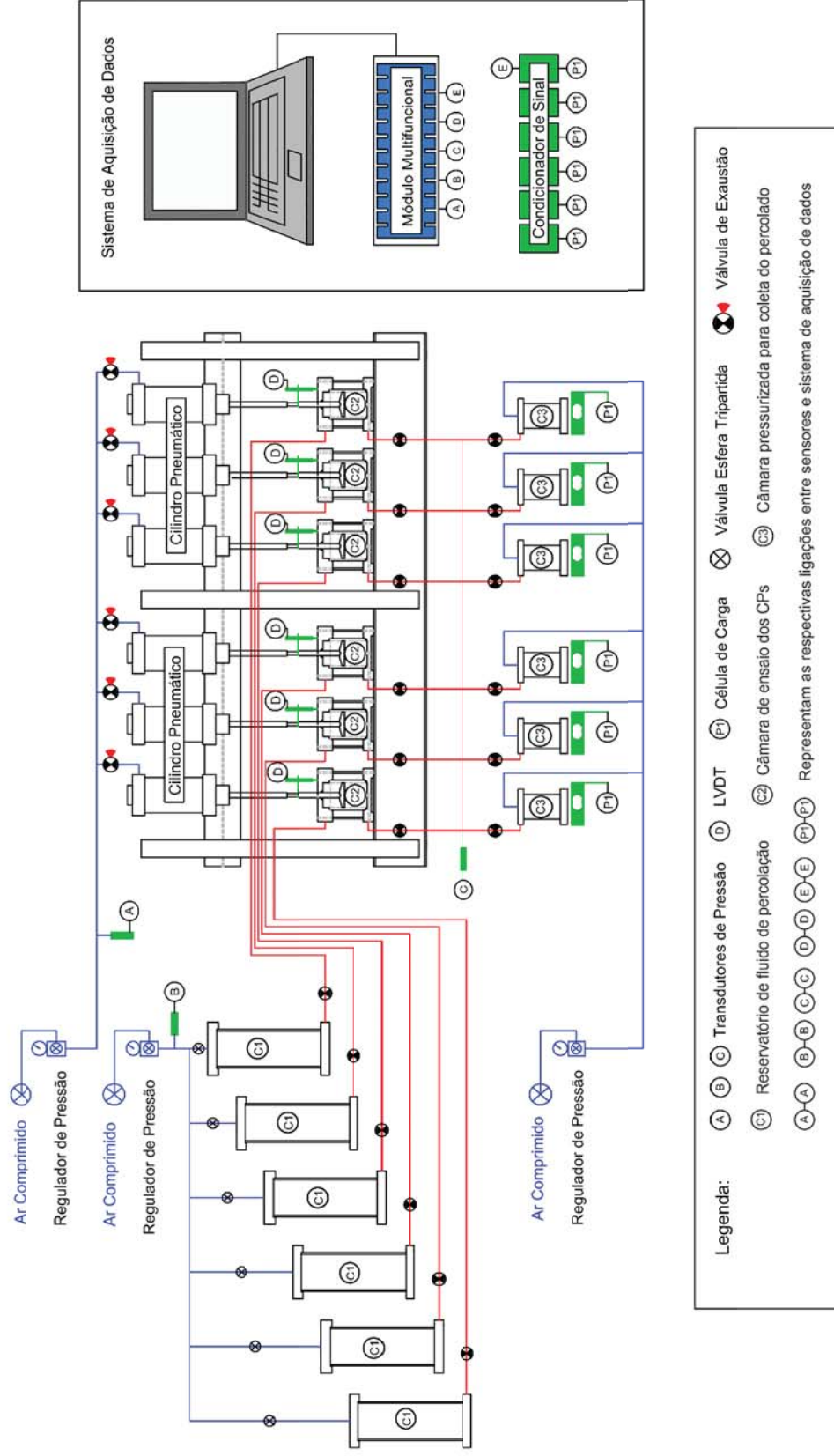
A aplicação da carga vertical é feita de forma independente em cada uma das seis câmaras através de um sistema constituído por cilindros pneumáticos, alimentados por um compressor de ar, controlados por um regulador de pressão e manômetros e monitorados por um transdutor de pressão. A mesma configuração, constituída de compressor, regulador de pressão, manômetros e transdutor, é utilizada na aplicação de pressão hidráulica tanto nos reservatórios de armazenamento da solução percolante (entrada), como nos reservatórios de coleta do percolado (saída).

Os transdutores de pressão utilizados são do modelo K1, fabricados pela ASHCROFT® e SITRON®, com capacidade máxima de pressão igual a 1 MPa e uma precisão mínima de 0,5 % da faixa de operação.

As medidas de deslocamentos verticais (recalques) foram realizadas com o auxílio de medidores de deslocamentos analógicos instalados em cada câmara, da marca Mitutuyo de precisão 0,01 mm ou de LVDTs, modelo DG 2.5, fabricado pela AMETEK Sitron, com curso de  $\pm 2,5$  mm e precisão de até 0,1  $\mu\text{m}$ . Os medidores foram fixados nas hastes que transferem a carga dos pistões pneumáticos, conforme ilustra a Figura 23.

As medições do volume de fluido percolado pelo corpo de prova que chegam até o reservatório de coleta conectado na saída da câmara de ensaio foram realizadas por meio de uma proveta graduada conectada na saída da câmara de coleta.

Figura 20 - Equipamento de coluna modificada.



Fonte: Santos (2013).

Figura 21 - Apresentação geral do equipamento de coluna.



Fonte: Próprio autor (2014).

Figura 22 - Visão lateral do equipamento de coluna.



Fonte: Próprio Autor (2014).

Figura 23 - Detalhe do sistema de medição de recalques: (a) LVDT; (b) medidor analógico.



Fonte: Adaptado de Timbola (2014).

Baseando-se na experiência relatada por vários autores (HEINECK, 2002; CHAN, 2010; CLAYTON, 2011; DI EMIDIO; FLORES, 2012), uma das células do equipamento foi adaptada com os dispositivos *bender elements*. A célula funciona como um permeâmetro de parede rígida de fluxo descendente, permitindo, assim, a determinação e avaliação do parâmetro de rigidez em concomitância com aplicação de sobrecarga e a percolação de líquidos pelo corpo de prova.

O sistema com *bender elements* pode ser instalado na maioria dos equipamentos de laboratório. Tratam-se de transdutores eletro-mecânicos piezoelétricos que são instalados no cabeçote superior da amostra e no pedestal do permeâmetro e que projetam-se para dentro da amostra em aproximadamente 7,4 mm. O transdutor instalado no cabeçote superior, ou o transmissor, é excitado através da aplicação de uma voltagem, causando no mesmo uma vibração normal à face do cabeçote, enviando a onda sísmica através da amostra. A chegada da onda na outra extremidade da amostra é captada por outro transdutor, que funciona como receptor. Quando a onda cisalhante atravessa a amostra, o receptor é movido mecanicamente e gera uma pequena voltagem que é mostrada em um osciloscópio digital, juntamente com o sinal transmitido. O tempo entre a transmissão e a recepção da onda é o tempo de viagem da mesma, com o

qual calculou-se a velocidade da onda cisalhante  $V_s$ , e por sua vez, o módulo cisalhante elástico através da equação apresentada por Viggiani e Atkinson (1995).

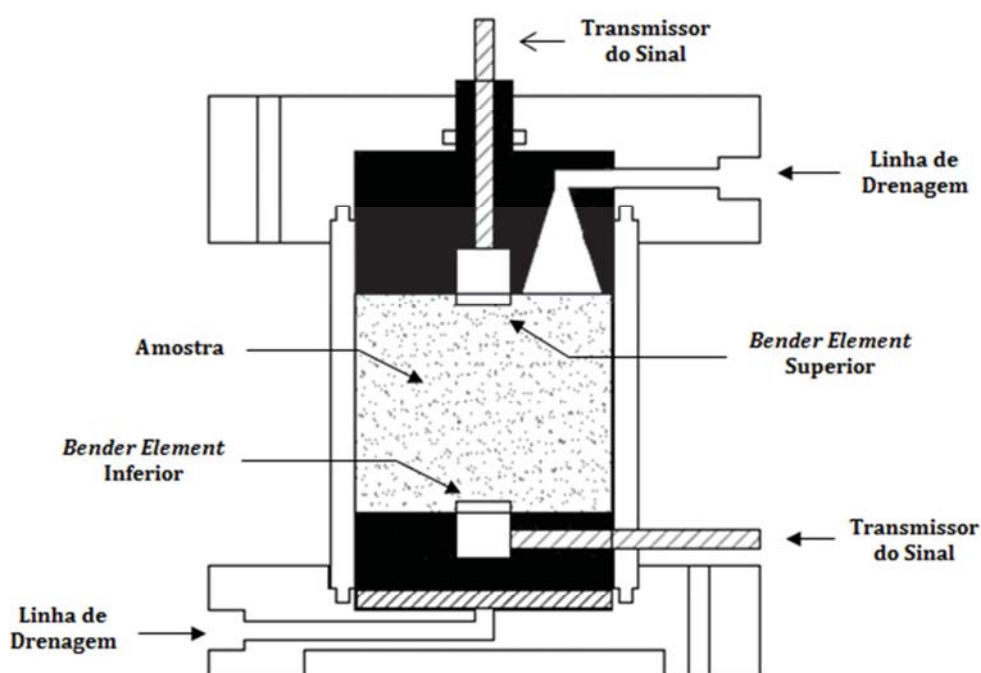
A Figura 24 apresenta um esquema do permeâmetro adaptado com os *bender elements* e a Figura 25 apresenta a câmara adaptada.

No Capítulo 4 estão apresentados todos os procedimentos realizados para a montagem da câmara de ensaio com os *bender elements*, assim como os resultados dos ensaios de validação.

Com o equipamento de ensaio adaptado com *bender elements* podem-se realizar as seguintes funções:

- 1) Aplicar e controlar uma carga vertical estática no topo dos corpos de prova;
- 2) Aplicar e controlar as cargas hidráulicas ao corpo de prova;
- 3) Medir as variações de altura (recalques) do corpo de prova;
- 4) Percolar pelo corpo de prova uma solução agressiva, e garantir a compatibilidade química entre o equipamento e os contaminantes;
- 5) Em concomitância com a percolação da solução agressiva, emitir ondas sísmicas no corpo de prova, através dos *bender elements*, para monitorar, de forma contínua, variações na rigidez.

Figura 24 - Esquema do permeâmetro equipado com *bender elements*.



Fonte: Próprio autor (2014).

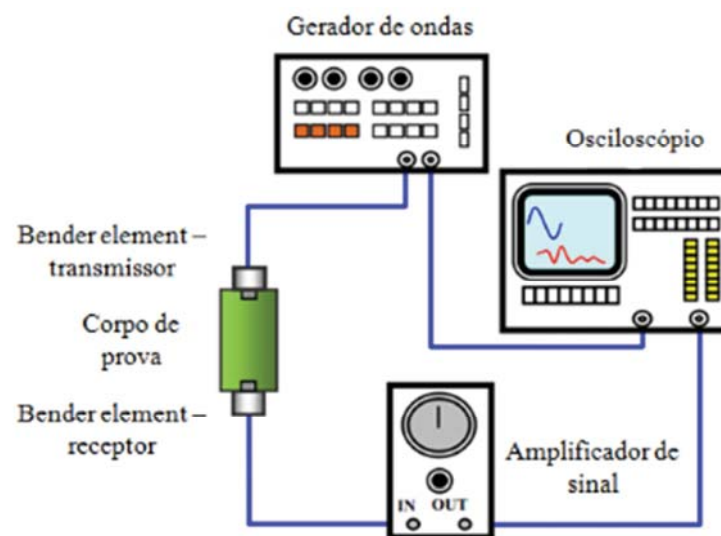
Figura 25 - Câmera de ensaio adaptada com bender elements.



Fonte: Próprio autor (2014).

Os sensores *bender elements* são responsáveis pela geração e detecção de ondas sísmicas, a partir do acoplamento ao equipamento de um gerador de ondas, um amplificador de sinal, um osciloscópio e um sistema de aquisição de dados. A Figura 26 apresenta um esquema dos equipamentos necessários para um ensaio com *bender elements*, conforme Chan (2012).

Figura 26 - Equipamentos eletrônicos necessários para medir ondas sísmicas.



Fonte: Adaptado de Chan (2012).



### 3.5.1.1 Validação do equipamento

Anteriormente à execução de quaisquer ensaios no permeâmetro equipado com *bender elements*, foi feita a calibração e validação dos diferentes dispositivos utilizados: sensores *bender elements*, osciloscópio, gerador de funções e amplificador de sinal.

Para os ensaios de validação, o material utilizado foi uma areia com e sem adição de cimento Portland, devido à rigidez desse material já ter sido investigada por outros autores, permitindo assim, a comparação dos resultados. A preparação das amostras, moldagem dos corpos de prova e a realização dos ensaios obedeceram as mesmas condições de contorno estabelecidas pelos autores que publicaram resultados do módulo de cisalhamento ( $G_0$ ) para a mesma areia utilizada (PIRIYAKUL, 2010; FONINI, 2012).

### 3.5.2 Equipamento de compressão diametral

O ensaio de compressão à resistência diametral foi realizado no Centro Tecnológico de Engenharia e Arquitetura da UPF, em uma prensa automática dotada de célula de carga, com capacidade máxima de 5 toneladas, como mostra a Figura 27.

## 3.6 Métodos utilizados

### 3.6.1 Moldagem dos corpos de prova e montagem dos ensaios de percolação

A moldagem dos corpos de prova para os ensaios de condutividade hidráulica e resistência da compressão diametral foi feita diretamente no interior do cilindro de acrílico do equipamento utilizado.

Os corpos de prova foram moldados com as dimensões nominais de 0,06 m de altura e 0,07 m de diâmetro. Baseando-se na literatura (DI EMIDIO; FLORES, 2012; CHAN, 2012), a dimensão adotada é apropriada para medições com *bender elements*. Os teores de cimento utilizados na moldagem dos corpos de prova foram 0, 1 e 2% em relação à massa seca do solo, conforme planejamento apresentado no item 1.2.

Figura 27 - Prensa automática.

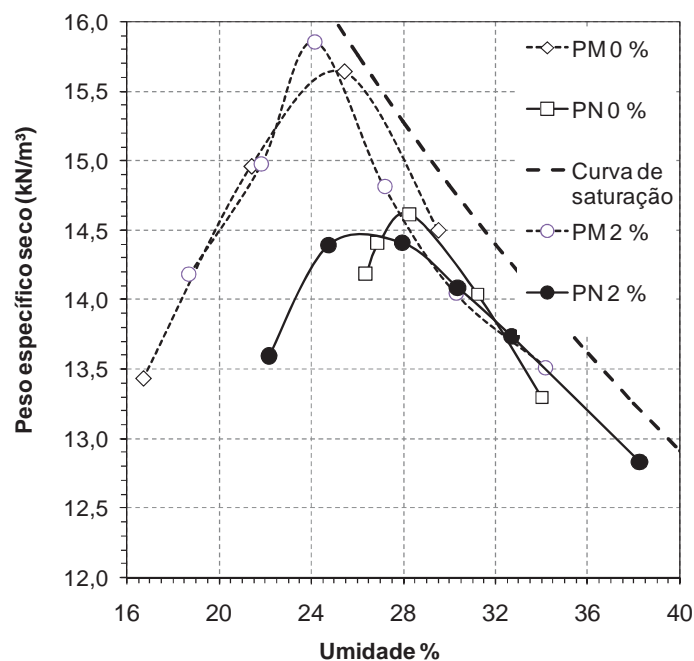


Fonte: Próprio Autor (2014).

Os parâmetros de moldagem foram definidos a partir das curvas de compactação obtidas nas energias proctor normal e modificada, para o solo com e sem cimento, conforme ilustra a Figura 28. Como se pode observar, as curvas de compactação para 0% e 2% pouco diferem entre si, sendo que para efeito deste estudo elas foram consideradas equivalentes. Ainda, foram tomados por base os parâmetros extremos de compactação, considerando um teor de umidade constante de 26%, próximo à umidade ótima na energia normal e à umidade ótima mais 2% na energia modificada, ambas para misturas com 2% de cimento, e os respectivos pesos específicos secos ( $15,5 \text{ kN/m}^3$ ,  $15,0 \text{ kN/m}^3$  e  $14,5 \text{ kN/m}^3$ ). Esta energia foi utilizada em função da necessidade de se atingir permeabilidades inferiores a  $10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$  (ROWE et al., 1995), valores estes difíceis de serem atingidos com a aplicação de energia proctor normal.

Cada corpo de prova foi submetido ao ensaio de percolação seguido do ensaio de compressão diametral.

Figura 28 - Curva de compactação - Proctor normal e modificado.



Fonte: Adaptado de Santos (2013).

Os procedimentos adotados para moldagem dos corpos de prova seguiram a sequência apresentada a seguir:

- 1) Medição da umidade higroscópica do solo para correção da umidade da amostra para confecção do corpo de prova;
- 2) Cálculo dos parâmetros físicos para moldagem do corpo de prova;
- 3) Medição da massa de solo necessária para a moldagem do corpo de prova;
- 4) Medição da massa de cimento necessária para a moldagem do corpo de prova;
- 5) Correção da umidade adotada de 26% de acordo com a umidade higroscópica presente na amostra;
- 6) Homogeneização com espátula da mistura solo+cimento+água;
- 7) Separação de 2 amostras para a verificação da umidade do corpo de prova moldado;
- 8) Compactação da amostra de solo misturada em 3 camadas de iguais alturas dentro do cilindro de acrílico;
- 9) Após a moldagem, medição da massa final do corpo de prova e da altura em 4 diferentes posições;
- 10) Montagem do cilindro de acrílico na câmara de ensaio;

11) Montagem da câmara de ensaio no equipamento de coluna.

Na Figura 29 estão ilustrados os passos 1 a 7 do procedimento de moldagem dos corpos de prova.

Figura 29 - Procedimento de preparação das amostras para moldagem dos CPs.



Fonte: Próprio Autor (2014).

A Figura 30 ilustra o procedimento de moldagem em três camadas da amostra no cilindro de acrílico.

Figura 30 - Procedimento de moldagem dos CPs.



Fonte: Próprio Autor (2014).

Antes da montagem do cilindro de acrílico contendo a amostra compactada na câmara de ensaio, discos de papel filtro eram colocados no topo e na base do corpo de prova, assim como os discos superior (*top cap*) e inferior para a distribuição uniforme do líquido percolante.

O espaço vazio deixado entre o *top cap* e a parte superior da câmara de ensaio foi inundado com água destilada durante o período de cura por 48 horas, para as amostras cimentadas. Decorrido este período era aplicada a carga vertical estática de 280 kN e a percolação iniciada. O valor da carga vertical foi estimado a partir de estudos realizados por Bedin (2010) com resíduos de mineração de ouro em uma barragem de rejeito do estado do Rio Grande do Sul. Para o cálculo da carga vertical foram utilizados valores determinados pelo autor de  $\gamma_{\text{sat}}$  de 18,6 kN/m<sup>3</sup> e altura de disposição de 15 m, na barragem de rejeito, sobre o solo de fundo.

A Figura 31 ilustra o procedimento de montagem do cilindro de acrílico contendo o corpo de prova compactado na câmara de ensaio.

### **3.6.2 Ensaio de percolação**

#### **3.6.2.1 Saturação dos corpos de prova e percolação com água destilada**

Após a moldagem dos corpos de prova e montagem da câmara de ensaio, o reservatório de fluído era conectado à entrada da câmara, a pressão aplicada neste reservatório era ajustada para início da fase de saturação por percolação de água destilada pelos corpos de prova (com graus de saturação iniciais superiores a 90%) até que fosse atingido o regime de fluxo permanente, respeitado o mínimo de 5 volumes de vazios percolados, equivalente a 500 ml. A condutividade hidráulica na fase de percolação com água destilada foi monitorada através da verificação dos volumes percolados ao longo do tempo. O gradiente hidráulico adotado nesta etapa foi de 50, o que corresponde a uma carga hidráulica de 30 kPa.

#### **3.6.2.2 Percolação com solução ácida**

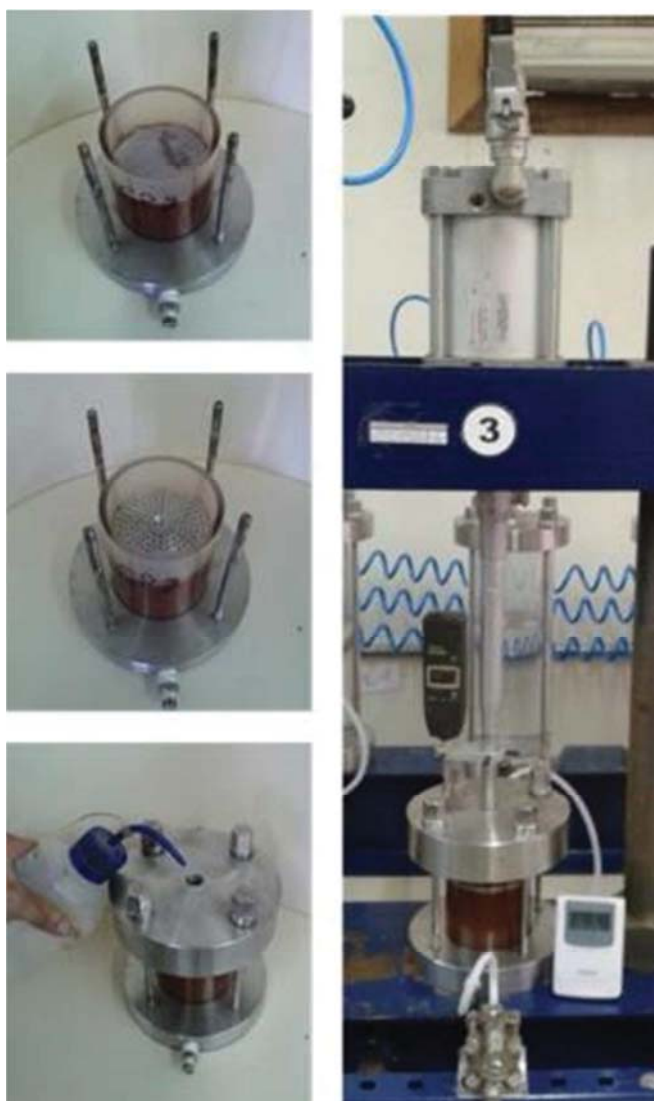
Finalizada a etapa de saturação por percolação, o reservatório de líquido percolante era esvaziado. O líquido restante no interior de câmara de ensaio era então

percolado pelo corpo de prova, até que restasse uma pequena lâmina d'água sobre o corpo de prova, de aproximadamente 5 mm.

Após este procedimento, era inserida no reservatório a solução contaminante, tendo início a fase de percolação ácida. O gradiente hidráulico adotado para esta etapa foi de 50. Esta fase teve a duração necessária para percolar no mínimo 5 volumes de vazios pelo corpo de prova. A condutividade hidráulica foi monitorada através da verificação dos volumes percolados ao longo do tempo.

Durante os ensaios, concomitante com a medição do volume percolado, tanto na fase de percolação com água como na fase de percolação ácida, foram medidos os recalques e retiradas amostras do percolado para a determinação do pH. A Figura 32 ilustra a coleta do lixiviado na coluna da contra-pressão para as análises do pH.

Figura 31 - Procedimento de montagem do corpo de prova na câmara de ensaio.



Fonte: Tímbola (2014).

Figura 32 - Exemplo de coleta do lixiviado para leitura de pH.

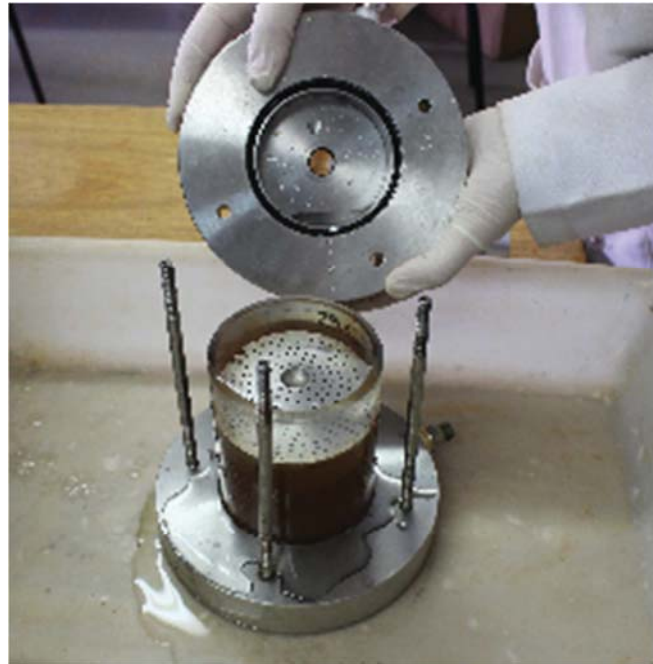


Fonte: Próprio Autor (2014).

Os corpos de prova que demoraram mais tempo para percolar o número de vazios estipulado, foram as amostras submetidas a percolação ácida. O maior tempo que um corpo de prova ficou submetido à percolação ácida, até que se atingisse o número de 10 volume de vazios percolados foi de 30 dias para o CP1\_D. Segundo Daniel (1993), os resultados obtidos em ensaios de condutividade hidráulica em laboratório devem ser vistos com muito cuidado, pois se a camada compactada pode conter defeitos, tais como quebras, fissuras e buracos. Estes defeitos podem prejudicar a real mensuração do parâmetro.

Após o término do ensaio, a pressão dos cilindros pneumáticos era aliviada individualmente através de uma válvula de escape do ar. Em seguida, a câmara de ensaio era retirada do equipamento de coluna e cuidadosamente desmontada para não perturbar a amostra contida no cilindro de moldagem (Figura 33). Após a retirada do cilindro de acrílico, o mesmo era instalado em uma prensa hidráulica para retirada da amostra. Todos os corpos de prova ensaiados foram retirados de forma intacta do cilindro de moldagem, ou seja, a estrutura não foi modificada drasticamente com a percolação ácida e não houve quebras ou fissuras aparentes. Ao final, para cada corpo de prova ensaiado eram determinados a massa final, a altura final e a umidade pós-ensaio.

Figura 33 - Desmontagem da câmara de ensaio contendo o corpo de prova ensaiado.



Fonte: Próprio Autor (2014).

### 3.6.2.3 Determinação da condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica refere-se a facilidade que um determinado líquido tem ao passar pelo solo. A esta propriedade é definida pela Lei de Darcy. A condutividade hidráulica ( $k$ ) depende de fatores como densidade e viscosidade do líquido e área superficial específica, porosidade, tortuosidade e grau de saturação do solo (SHARMA; REDDY, 2004).

O coeficiente de condutividade hidráulica ( $k$ ) será determinado de acordo com a lei de Darcy da Equação 2.

$$Q = \frac{V}{t} = kiA \quad (2)$$

em que:

$Q$  = taxa de descarga através da secção de escoamento (volume/tempo);

$k$  = Coeficiente de condutividade hidráulica do solo/material (distância/tempo);

$i$  = gradiente hidráulico (adimensional), e

$A$  = área perpendicular de direção do fluxo (área).



### 3.6.2.3 Análise e monitoramento do percolado

Durante a realização dos ensaios de condutividade hidráulica foram realizadas amostragens periódicas do percolado para determinação do pH.

A Figura 34 abaixo apresenta as amostras do CP4 ( $\gamma_d$  14,5 kN/m<sup>3</sup> e 0% de cimento) coletadas para a medida do pH. Nota-se que a coloração avermelhada é semelhante a verificada em condições de DAM, ou seja, a presença de ferro oxidado, característica observada em todos os corpos de prova.

Diferente de todas as outras análises realizadas neste estudo, que consideraram o valor de 5 volume de vazios percolados como término dos ensaios, as análises do pH foram realizadas até o final do ensaio para os corpos de prova com mais de 5 volumes percolados.

Figura 34 - Amostras para medidas de pH.



Fonte: Próprio autor (2014).

### 3.6.3 Ensaio de validação do equipamento para medida da rigidez

Os ensaios com *bender elements* tiveram a finalidade de validar o equipamento adaptado para medir continuamente a rigidez de geomateriais submetidos à percolação ácida. Estes ensaios foram realizados em amostras de areia cimentada sem percolação e de argila compactada, sem cimentação, durante a percolação tanto com água destilada como com contaminante ácido. A Tabela 5 apresenta as amostras que foram ensaiadas.

A Figura 35 mostra os equipamentos instalados no laboratório de Geotecnia Ambiental do CETEC para medição da rigidez e a Figura 36 mostra o corpo de prova sendo ensaiado.

Foram verificadas medidas de ondas sísmicas S (cisalhamento) durante os ensaios. A análise foi feita no domínio dos tempos e das frequências. Utilizou-se a técnica da primeira inflexão da onda de resposta (“*Time domain*”) para diferentes frequências de leitura do tempo de propagação das ondas. Utilizando essa técnica, foi possível aferir os resultados obtidos.

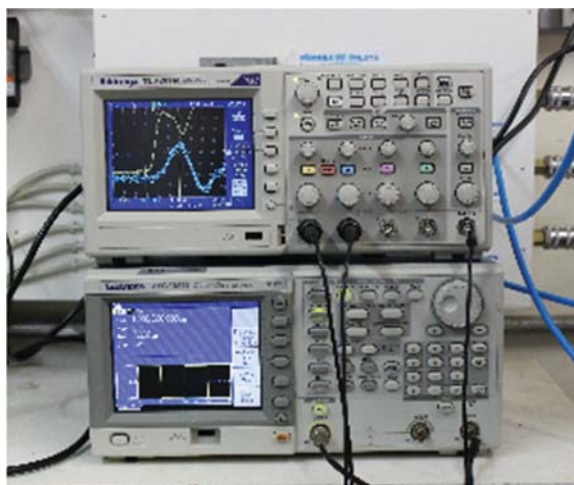
A onda utilizada pode ser do tipo senoidal e a gama de frequência utilizada para geração de onda varia de 2 a 10 kHz (HEINECK, 2002; VENDRUSCOLO, 2003; FERREIRA; FONSECA, 2005; GUTIERREZ, 2007; CRUZ, 2008; PIRIYACUL).

Na Figura 37 esta apresentado um exemplo de sinal obtido para o corpo de prova de areia cimentada.

Tabela 5 - Amostras submetidas ao ensaio de rigidez.

CP	Cimento (%)	Ácido (%)	Densidade (kN/m <sup>3</sup> )	Umidade de moldagem (%)
Argila	0	2	14,5	26
Areia	5	0	16,5	10

Figura 35 - Equipamentos eletrônicos instalados para medir ondas sísmicas.



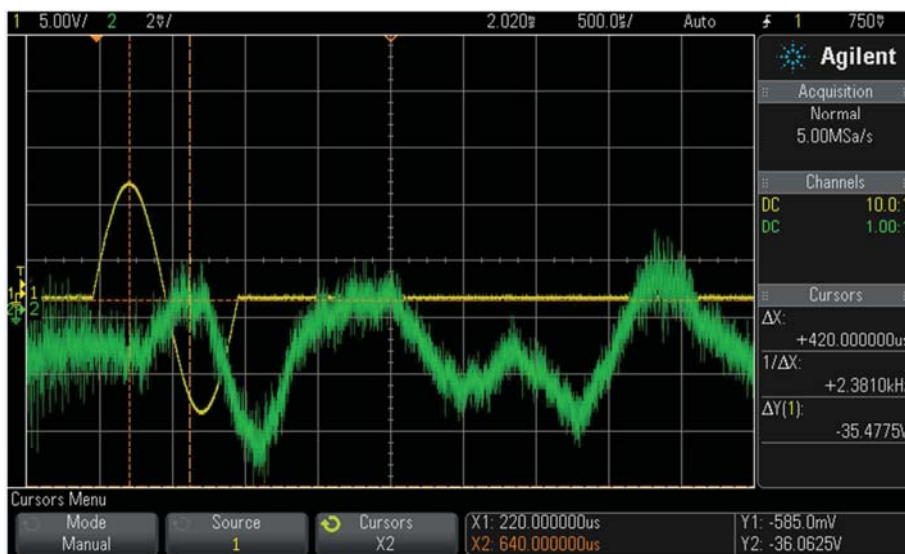
Fonte: Próprio Autor (2014).

Figura 36 - Equipamentos instalados para medir ondas sísmicas.



Fonte: Próprio Autor (2014).

Figura 37 - Sinal obtido para ondas S na análise do domínio de tempo.



Fonte: Próprio Autor (2014).

Uma das vantagens deste tipo de teste é que trata-se de um ensaio não destrutivo, que permite qualquer número de medições de  $G_0$  durante o ensaio de percolação.

### 3.6.4 Moldagem dos corpos de prova para os ensaios de validação

#### 3.6.4.1 Corpos de prova de areia moldados fora da câmara de percolação

Para a realização dos ensaios de validação do equipamento foram inicialmente usadas amostras cimentadas 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro, moldadas fora da câmara de percolação. Essas características, material e dimensões, foram utilizadas com a finalidade de comparar os resultados com os ensaios feitos por Fonini (2012).

Para todos os corpos de prova foi adotada a mesma sequência de moldagem: pesagem e mistura dos materiais secos (areia e cimento), homogeneização da mistura, adição de água destilada (teor de umidade igual a 10%) e nova homogeneização. Com a mistura pronta, foram separadas três porções para compactação em três camadas de iguais alturas, de acordo com o peso específico seco requerido ( $16,5 \text{ kN/m}^3$ ).

A moldagem foi realizada em um molde bi-partido de PVC, observando os seguintes passos:

- 1) Posicionamento do molde sobre uma base metálica;
- 2) Colocação da massa de solo correspondente a 1/3 do volume do CP, de acordo com a densidade requerida;
- 3) Compactação dinâmica com auxílio de um soquete da camada até a altura pré-determinada;
- 4) Escarificação do topo da camada;
- 5) Repetição dos passos 2, 3 e 4 e para a segunda camada;
- 6) Repetição dos passos 2 e 3 para a terceira camada;
- 7) Retificação da face de topo da amostra.

Finalizadas a moldagem, os corpos de prova ainda nos respectivos moldes eram acondicionados em sacos plásticos, identificados e armazenados em câmara úmida. Após 24 horas, os corpos de prova eram retirados dos moldes para realização das medidas de rigidez. A Figura 38 ilustra o processo de moldagem dos corpos de prova e a Figura 39 mostra a sequência passo-a-passo.

Figura 38 - Procedimento de moldagem do corpo de prova.



Fonte: Próprio Autor (2014).

Figura 39 - Sequência de moldagem passo-a-passo.



Fonte: Próprio Autor (2014).

Após a desmoldagem, os corpos de prova receberam um sulco na base e no topo de modo que os *bender elements* emissor e receptor pudesse ser embutidos. A Figura 40 ilustra este procedimento.

Figura 40 - Preparação dos corpos de prova sem parede para os ensaios de rigidez.

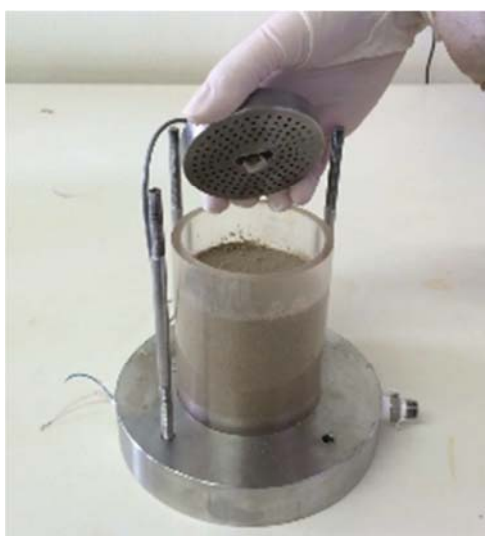


Fonte: Próprio Autor (2014).

### 3.6.4.2 Corpos de prova de areia moldados na câmara de percolação

Para a realização do ensaio de rigidez na câmara de percolção foi moldada uma amostra de areia cimentada com 6 cm de altura e 7 cm de diâmetro. A moldagem do corpo de prova foi realizada diretamente sobre o *base cap* da câmara de ensaio, ao qual está adaptado o *bender element* receptor, observando a mesma sequência descrita no item 3.6.4.1. A Figura 41 ilustra este procedimento.

Figura 41 - Corpo de prova moldado diretamente na base cap.



Fonte: Próprio Autor (2014).

Após a moldagem, foi necessário a abertura de um sulco no topo do corpo de prova para que o *bender element* emissor fosse introduzido na amostra. Para que o sensor ficasse em contato com o corpo de prova, uma pasta de areia e água foi utilizada para fixar os *bender elements* na amostra.

### **3.6.4.3 Corpos de prova de argila compactada sem cimentação**

A moldagem dos corpos de prova de argila para os ensaios de rigidez foi feita diretamente no cilindro de acrílico do equipamento e sobre o *base cap* ao qual está adaptado o sensor *bender element* receptor, de acordo como o procedimento descrito no item 3.6.1.

Após a moldagem, assim como para o corpo de prova de areia cimentada, foi necessário a abertura de um sulco no topo do corpo de prova para que o *bender element* emissor fosse introduzido na amostra. Para que o sensor ficasse em contato com o corpo de prova, uma pasta composta de argila e água foi utilizada para fixar os *bender elements* na amostra.

### **3.6.5 Ensaio de resistência à compressão diametral**

O ensaio de resistência à compressão diametral ou também conhecido como ensaio brasileiro, foi realizado de acordo com os procedimentos gerais estabelecidos na Norma Brasileira ABNT (1994). Este método consiste em comprimir um corpo de prova cilíndrico ao longo de duas linhas axiais diametralmente opostas. Para a realização destes ensaios, não foi necessária a submersão prévia dos corpos de prova em água destilada e/ou contaminante, devido ao fato de os corpos de prova estarem supostamente saturados.

Esses ensaios foram realizados com intuito de avaliar as variações da resistência a tração do solo compactado, com e sem a adição de cimento, após ter sido submetido à percolação ácida. Os ensaios também foram realizados nos corpos de prova submetidos à percolação de água destilada somente (brancos). Antes de serem ensaiados, os corpos de prova foram extrudados dos cilindros de acrílico com a ajuda de uma prensa hidráulica. O procedimento adotado antes da execução do ensaio de resistência a

compressão diametral esta ilustrado na Figura 42. A execução desses ensaios juntamente com a forma de ruptura são mostradas na Figura 43.

Figura 42 - Preparo do corpo de prova para o ensaio de resistência ao cisalhamento.



Fonte: Próprio Autor (2014).

Figura 43 - Execução do ensaio de resistência ao cisalhamento. (a) Ensaio de RCD; (b) Detalhe da forma de ruptura.



Fonte: Próprio Autor (2014).



## 4. PERMEÂMETRO DE PAREDE RÍGIDA EQUIPADO COM BENDER ELEMENTS

### 4.1 Considerações iniciais

O rápido desenvolvimento nas áreas de eletrônica e de micro-computação permite uma maior investigação dos problemas geotécnicos existentes nas práticas de engenharia. Para estruturas de solo onde existe a necessidade de baixos valores de permeabilidade ( $<10^{-9}$  m/s), em barreiras impermeáveis de fundo de aterros, deformações no solo podem alterar a estrutura do material causando um aumento da velocidade de percolação dos líquidos contidos.

Assim, no estudo desenvolvido nesta dissertação de mestrado houve a necessidade da adaptação de sensores *bender elements* em uma célula de um equipamento projetado por Santos (2013) para realizar ensaios de condutividade hidráulica. Os sensores foram adaptados na câmara para que a rigidez do solo possa ser medida ao mesmo tempo em que ocorre a percolação de líquidos agressivos pela amostra de solo. A seguir são descritos quais foram os procedimentos adotados no projeto e na execução da adaptação do permeâmetro.

### 4.2 Projeto e execução da adaptação do permeâmetro com *bender elements*

A coluna utilizada na presente pesquisa é uma adaptação do equipamento descrito por Knop (2007) e foi desenvolvido por Santos (2013) para avaliar o comportamento hidráulico de longo prazo de misturas compactadas destinadas à aplicação em barreiras de contenção. A Figura 44 apresenta um esquema do permeâmetro sem as modificações propostas neste estudo.

Para a adaptação dos *bender elements* na câmara de ensaio, foi necessária a aquisição de peças de aço inoxidável e a contratação de serviços de usinagem, de forma a preparar os discos drenantes superior (*top cap*) e inferior (*base cap*) para o acoplamento dos sensores piezocerâmicos e a colocação da fiação elétrica que conecta cada um dos sensores aos equipamentos eletrônicos responsáveis pela geração e leitura da onda sísmica. Em vista das pressões que são aplicadas à câmara de ensaio (carga hidráulica e carga estática vertical), um aspecto importante da adaptação dos sensores

foi a necessidade de uma vedação eficiente nos orifícios que dão passagem à fiação. Para isso, silicone industrial foi utilizado.

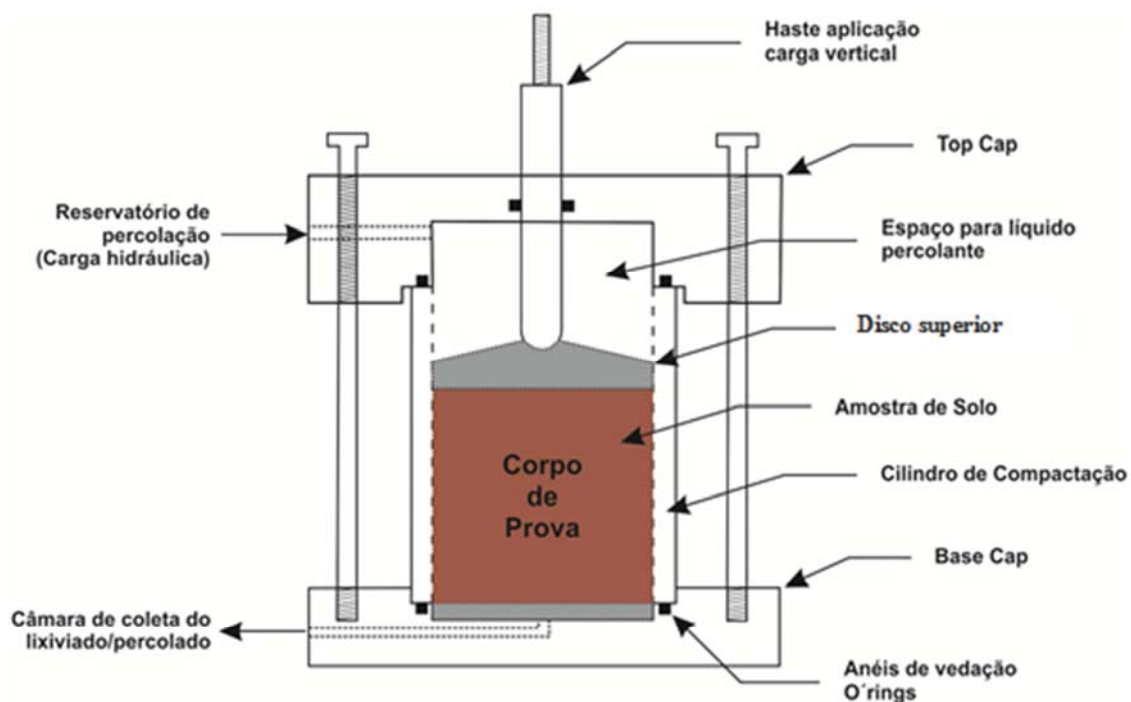
Como os sensores irão medir a rigidez em corpos de prova onde o líquido percolante pode ser muitas vezes agressivo, como é o caso do presente estudo em que a solução percolada é ácida, houve um cuidado especial no encapsulamento dos *bender elements*, que são constituídos por placas piezocerâmicas, as quais poderiam ser danificadas se em contato com a solução ácida. Segundo Chan (2010), a resina epóxi é o material comumente utilizado para encapsular sensores *bender elements*. Para verificar a eficácia e a durabilidade da resina epóxi na condição de ensaio, um cubo de resina catalisada foi imersa em solução ácida por 30 dias para que possíveis alterações na estrutura do material pudessem ser observadas. Após o tempo de imersão, o cubo foi retirado da solução sem que nenhuma alteração visível em sua estrutura fosse observada.

Para realizar o encapsulamento dos *bender elements* com a resina epóxi, foi necessário o uso de uma peça matriz para que a resina líquida fosse moldada no formato dos sensores. A peça matriz foi feita em nylon e seu projeto pode ser visto no Apêndice A. Para o encapsulamento foi observada a seguinte sequência: injeção de uma primeira camada de resina líquida na matriz com o auxílio de uma seringa; posicionamento do sensor com a fiação já soldada sobre a primeira camada de resina; introdução de uma segunda camada de resina líquida com o auxílio da seringa. Após 24 horas de secagem, o sensor era retirado do molde, inserido na abertura usinada no disco de drenagem e fixado com resina epóxi adicional. Uma imagem dos discos drenantes superior e inferior pode ser vista na Figura 45c.

As especificações da peça matriz utilizada para encapsular os *bender elements* com a resina epóxi e das peças necessárias à adaptação da câmara com os sensores estão apresentadas no Quadro 4.

As peças em aço inoxidável usinadas para a adaptação da câmara estão apresentadas na Figura 45, na qual se pode observar os *bender elements* acoplados aos discos drenante superior e inferior. Nos Apêndices B, C, D e E estão apresentados os detalhamentos necessários à usinagem das peças mostradas na Figura 45, com as medidas em milímetros.

Figura 44 - Câmara de percolação.



Fonte: Adaptado de Knop (2007).

Quadro 4 - Especificação das peças componentes da câmara de ensaio.

	Descrição da peça	Dimensões (mm)	Quantidade	Material
Matriz	Encapsulamento dos <i>bender elements</i>	25 x 18	1	Nylon
Câmara	<i>Base cap</i>	150 x 30	1	Aço Inoxidável
	<i>Top cap</i>	150 x 40	1	
	Disco drenante superior	69,5 x 20	1	
	Disco drenante da base	69,5 x 20	1	

### 4.3 Equipamentos eletrônicos necessários para leituras de ondas

Para medir a rigidez são necessários equipamentos eletrônicos para a emissão e leitura de ondas sísmicas por meio dos sensores *bender elements*. Segundo Chan (2012), são necessários para a emissão e leitura das ondas um gerador de ondas, um

amplificador de sinal e um osciloscópio. O Quadro 5 apresenta uma descrição dos equipamentos utilizados nesta pesquisa.

Figura 45 - Peças usinadas para a adaptação do equipamento de coluna com bender elements: a) Top cap; b) base cap; c) disco drenante superior e inferior com sensores bender elements; d) peças câmara de ensaio.



Fonte: Próprio autor (2014).

Quadro 5 - Descrição do osciloscópio e gerador arbitrário de funções.

<b>Equipamento</b>	<b>Descrição</b>
Gerador arbitrário de funções (AFG 3021 C) Tektronix®	Função – 10 MHz – 240 MHz Pulso – 2 MHz – 120 MHz Onda – 14 bits
Osciloscópio (TDS2000C) Tektronix®	Largura banda – 50 MHz – 200 MHz Taxa de amostragem – 500 MS/s – 2 Gs/s Comprimento max. De registro – 2,5 k pontos
Amplificador de sinal	Resposta frequência – 20 Hz – 100 Hz Ganho – 10, 100 e 1000

#### 4.4 Validação do equipamento

A construção de um equipamento envolve também a fase de validação, onde testes devem ser realizados para a confirmação do seu funcionamento. Nesta pesquisa foram realizados ensaios em areia para verificar a consistência dos resultados com àqueles obtidos com sensores *bender elements* instalados em câmeras convencionais. Em primeiro plano, foram realizados testes em amostras de areia cimentada, sem qualquer percolação. O comportamento deste material já é conhecido através de estudos realizados na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (e.g. FONINI, 2012). Complementarmente, foram ensaiadas duas amostras do solo argiloso utilizado na presente pesquisa, sem cimentação, uma percolada apenas com água destilada e a outra, percolada água destilada e com solução ácida. A rigidez foi medida de forma concomitante à percolação em diferentes tempos de ensaio. Os resultados obtidos foram comparados a valores relatados por outros autores para materiais semelhantes.

##### 4.4.1 Ensaios de Validação

Devido aos sensores utilizados (*bender elements*) operarem na faixa de milivolts e os equipamentos eletrônicos adquiridos (gerador de ondas e osciloscópio) serem capazes de medir grandezas da ordem de microvolts, primeiramente acreditou-se que não haveria a necessidade de amplificar os sinais. No entanto, após a realização de vários ensaios, tanto em argila como em areia, observou-se que o osciloscópio não captava claramente o tempo de propagação da onda de resposta. Por isso, foi projetado e construído um amplificador de sinal para o prosseguimento do trabalho. Para melhorar ainda mais o sinal, com a redução de ruídos externos, o aterramento do equipamento foi melhorado.

Para as medidas do módulo cisalhante foram utilizadas ondas do tipo senoidal, em razão desta produzir, após uma série de testes preliminares, uma resposta mais clara para as frequências utilizadas. Além disso, segundo Fonini (2012) e Heineck (2002), é o formato de onda mais comumente utilizado para ensaios com *bender elements*.

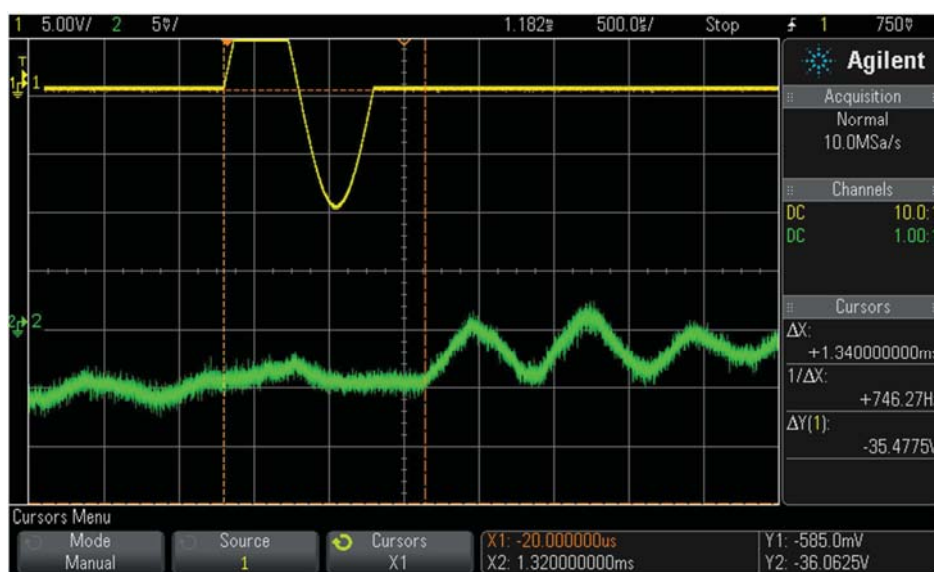
Em virtude do ensaio de rigidez ser não destrutivo, realizou-se as leituras dos parâmetros para diferentes dias da amostra, para um mesmo corpo de prova. A distância

vertical entre os sensores emissor e receptor foi corrigida em função de eventuais variações de altura do corpo de prova.

#### 4.4.1.1 Leituras das ondas sísmicas

O método adotado para a interpretação da velocidade da onda de chegada através do uso de transdutores piezoelétricos é baseado na identificação do primeiro instante de chegada da onda. O intervalo de tempo entre a emissão da onda pelo osciloscópio e a primeira deformação do sinal recebido é considerado como o tempo de viagem da onda. A Figura 46 apresenta o resultado da propagação de onda S através de uma das amostras de areia cimentada. Na imagem, podem ser vistas a onda emitida pelo canal CH1 e a onda recebida no canal CH2, os cursores posicionados delimitam o início de partida da onda no *bender element* transmissor e a primeira deformação de chegada da onda no *bender element* receptor.

Figura 46 - Determinação da chegada da onda.



Fonte: Próprio Autor (2014).

A interpretação das ondas sísmicas traz alguma incerteza na determinação do tempo de propagação da onda de resposta. Segundo Cruz (2008), é importante ressaltar que a determinação do tempo de propagação da onda é o passo mais importante de todo o método. Atenção deve ser dada a alguns tipos de interferências na leitura das ondas, tais como, efeitos de vizinhança ou excesso de ruído no sinal de resposta da onda.

## 4.4.2 Resultados obtidos

### 4.4.2.1 Amostras de areia cimentada moldadas fora da câmara de percolação

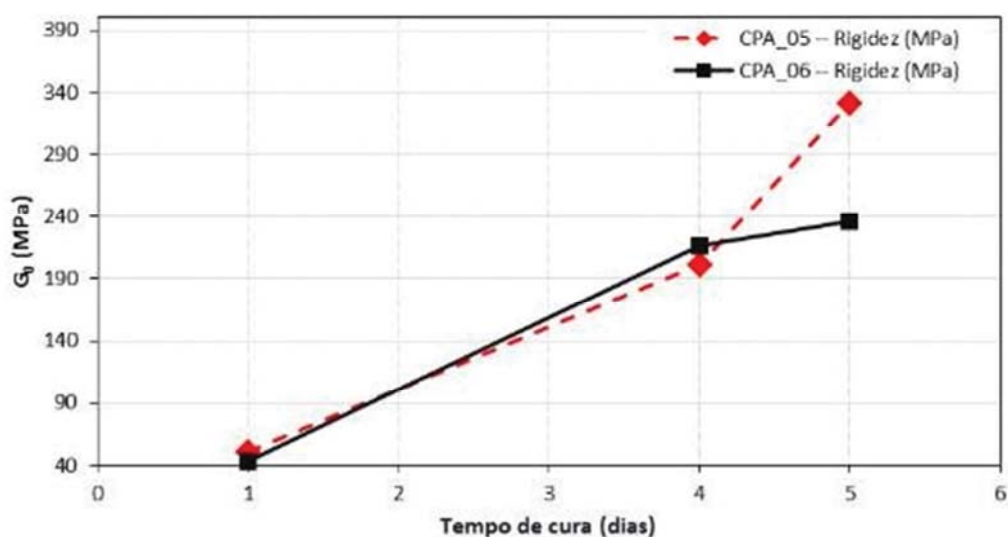
Os resultados dos ensaios de rigidez para as amostras de areia cimentada moldadas fora da câmara de percolação estão apresentados em função do tempo de cura do cimento. Os tempos de cura adotados para a medição da rigidez foram 1, 3, 5 e 7 dias. A Tabela 7 apresenta as características de moldagem dos corpos de prova ensaiados e os valores do módulo de cisalhamento  $G_0$ .

Tabela 6 - Módulo de cisalhamento da areia cimentada.

CP	Tempo de Cura(dias)	Altura CP (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$G_0$ (MPa)
CPA_01	1	0,1	1,65	125292
	3	0,1	1,65	121382
	5	0,1	1,65	121861
	7	0,1	1,65	121621
CPA_02	1	0,1	1,65	120668
	3	0,1	1,65	120906
	5	0,1	1,65	121621
	7	0,1	1,65	121861
CPA_03	1	0,1	1,65	122780
	3	0,1	1,65	123504
	5	0,1	1,65	124972
	7	0,1	1,65	124972
CPA_04	1	0,1	1,65	121367
	3	0,1	1,65	122804
	5	0,1	1,65	123533
	7	0,1	1,65	123046
CPA_05	1	0,1	1,65	50
	4	0,1	1,65	201
	5	0,1	1,65	331
CPA_06	1	0,1	1,65	44
	4	0,1	1,65	216
	5	0,1	1,65	236

Os ensaios referentes aos corpos de prova CPA\_01 ao CPA\_04, com medições da rigidez até 7 dias de cura e sem aplicação de carga vertical, foram realizados sem a utilização do amplificador de sinal. A análise dos resultados obtidos nestes ensaios mostra que a rigidez média foi aproximadamente 10 mil vezes maior do que as faixas de valores de  $G_0$  encontradas por Fonini (2012), para o mesmo material. A partir deste resultado, pode-se sentir a necessidade do amplificador de sinal, o qual foi desenvolvido e construído por Tozetto (2014) especificamente para utilização no presente trabalho. Trata-se de um pré-amplificador com filtro ativo passa-faixa com fase aproximadamente nula. Desta forma, outros dois ensaios em areia cimentada foram realizados com a onda recebida amplificada. Os resultados destes ensaios também estão apresentados na Tabela 9 (CPA\_05 e CPA\_06). A Figura 47 apresenta a variação do módulo de cisalhamento como o tempo de cura para os dois ensaios com sinal amplificado.

Figura 47 - Módulo de cisalhamento da areia cimentada.



A dispersão nos resultados do módulo cisalhante observada para as duas amostras ensaiadas foi inferior a 14 %, e pode ser creditada, além do inerente erro experimental, a pequenas variações nas características físicas dos corpos de prova. Estes resultados indicam uma boa precisão na determinação do módulo cisalhante com o equipamento desenvolvido.



O comportamento observado ao longo do tempo mostrou-se coerente, uma vez que, como esperado, o módulo aumentou com o tempo de cura para todas as amostras ensaiadas. Contudo, a taxa de evolução do módulo com o tempo de cura ficou abaixo do esperado. Para avaliar a acurácia dos resultados obtidos, foi feita uma comparação com os resultados reportados por Fonini (2012), que obteve para o mesmo material e os mesmos tempos de cura, módulos cisalhantes na faixa de 250 a 700 MPa, enquanto que no presente trabalho os valores situaram-se na faixa de 50 a 331 MPa. Embora uma diferença significativa quanto à taxa de evolução do módulo com o tempo, pode-se concluir que todos estes valores apresentam a mesma ordem de grandeza. Essa pequena discordância pode estar ligada ao processo de moldagem, ao mesmo tempo que pequenas alterações na granulometria podem ter influenciando no resultado final do ensaio realizado no equipamento construído.

O módulo de cisalhamento é um dos parâmetros de rigidez que reflete uma medida exclusivamente dependente das solicitações de cisalhamento. No entanto, algumas dificuldades são enfrentadas na sua adequada quantificação devido a que, para uma mesma estrutura geotécnica, a rigidez do solo varia conforme a posição e as cargas aplicadas (BEDIN, 2010).

#### **4.4.2.2 Amostra de areia cimentada moldada na câmara de percolação**

Uma amostra de areia com 5% de cimento moldada na câmara de ensaio adaptada com os sensores *bender elements*, foi submetida a passagens de ondas S ao longo de 24 horas. A Tabela 7 apresenta as características de moldagem do corpo de prova ensaiado e os resultados referentes a cada tempo de cura para o módulo de cisalhamento para esse ensaio preliminar. A Figura 48 apresenta os resultados obtidos ao longo do tempo de cura.

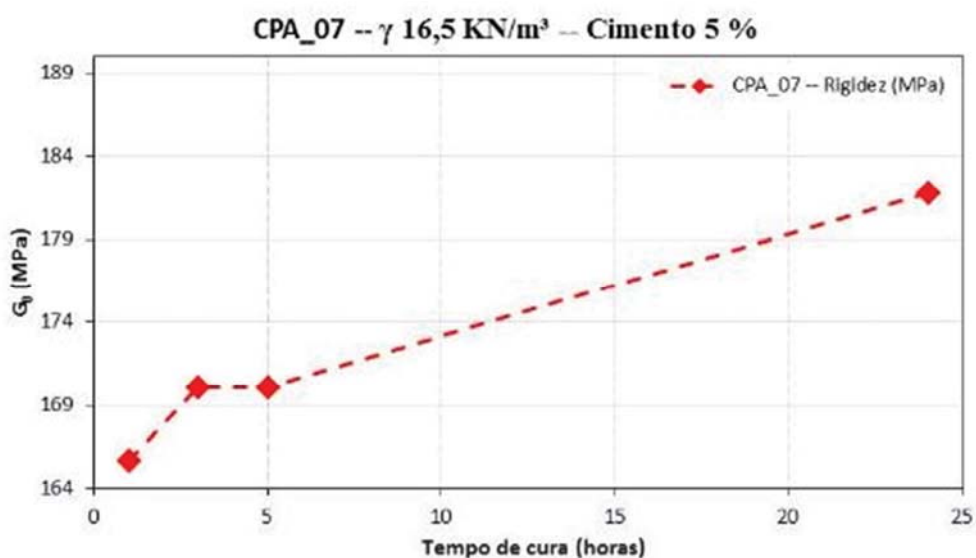
Para o ensaio de rigidez na câmara de ensaio, foram utilizadas frequências na faixa de 1 a 10 kHz. Uma onda de resposta mais clara pode ser observada para a faixa de frequências de 3 kHz a 10 kHz. Frequências utilizadas abaixo dessa faixa resultaram em ondas de respostas pouco claras.

O valor do módulo de cisalhamento medido no permeâmetro para areia cimentada teve um aumento considerável entre o tempo de cura de 5 horas até 24 horas. Isso mostra o aumento da rigidez com a cura do cimento, como esperado.

Tabela 7 - Características e módulo de cisalhamento da areia cimentada na câmara de ensaio.

CP	TC (hora)	Altura CP (m)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$G_0$ (Mpa)
CPA_07	3	0,06	1,65	166
	4	0,06	1,65	170
	5	0,06	1,65	170
	24	0,06	1,65	182

Figura 48 - Módulo de cisalhamento da areia cimentada na câmara de ensaio.



Comparando os valores de módulo obtidos para as amostras ensaiadas fora da câmara de ensaio (CPA\_05 e CPA\_06) e dentro da câmara de ensaio (CPA\_07), para o tempo de cura de 1 dia (24 horas), observa-se uma diferença significativa a qual, possivelmente, reflete o efeito do confinamento da amostra.

#### 4.4.2.3 Amostra de argila compactada moldada na câmara de ensaio

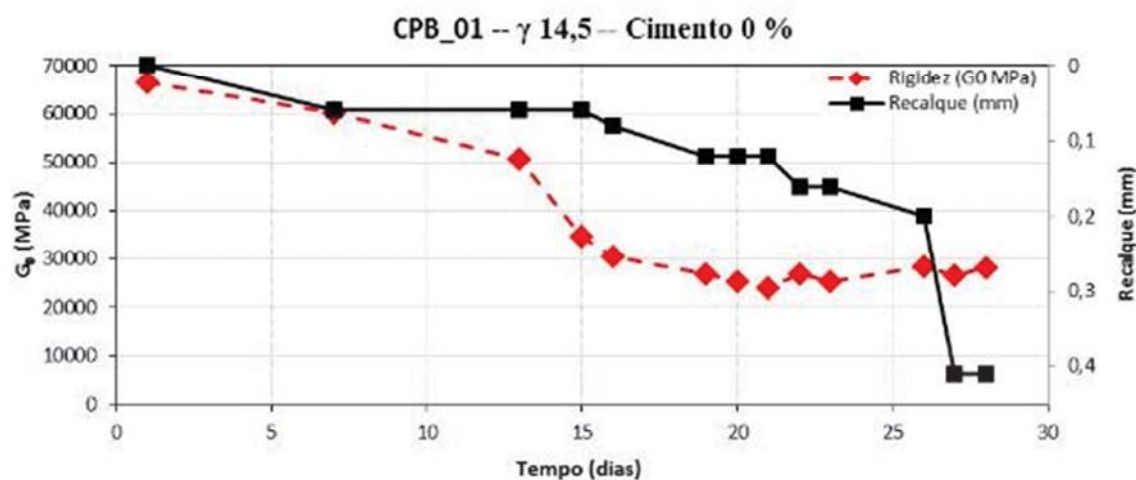
Foram realizados dois ensaios, um com percolação de água destilada somente (CPB\_01) e outro com percolação combina de água destilada e solução ácida (CPB\_02), ambos com aplicação de carga vertical estática, seguindo o procedimento descrito anteriormente no item 3.6.2.

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos para o corpo de prova CPB\_01 percolação com água destilada somente. A Figura 49 apresenta as variações do módulo de cisalhamento e do recalque com o tempo de ensaio até 28 dias.

Tabela 8 - Variação do módulo de cisalhamento da argila compactada (CPB\_01).

CP	Tempo (dias)	Altura CP (mm)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Ácido (%)	G <sub>0</sub> (MPa)
CPB_01	1	60,48	1,44	0	66358
CPB_01	7	60,42	1,44	0	60301
CPB_01	13	60,42	1,44	0	50670
CPB_01	15	60,42	1,44	0	34704
CPB_01	16	60,40	1,45	0	30554
CPB_01	19	60,36	1,45	0	26915
CPB_01	20	60,36	1,45	0	25355
CPB_01	21	60,36	1,45	0	23927
CPB_01	22	60,32	1,45	0	26867
CPB_01	23	60,32	1,45	0	25310
CPB_01	26	60,28	1,45	0	28522
CPB_01	27	60,07	1,45	0	26569
CPB_01	28	60,07	1,45	0	28255

Figura 49 - Módulo de cisalhamento do CPB\_01 x recalque.



Os valores de rigidez para este ensaio ficaram cerca de 10 mil vezes maiores do que valores de rigidez encontrados na literatura para diferentes argilas sem cimentação (VARDANEGA et al. 2013), os quais ficam na faixa de 20 a 180 MPa. É importante frisar que esse ensaio foi realizado sem o amplificador de sinal.

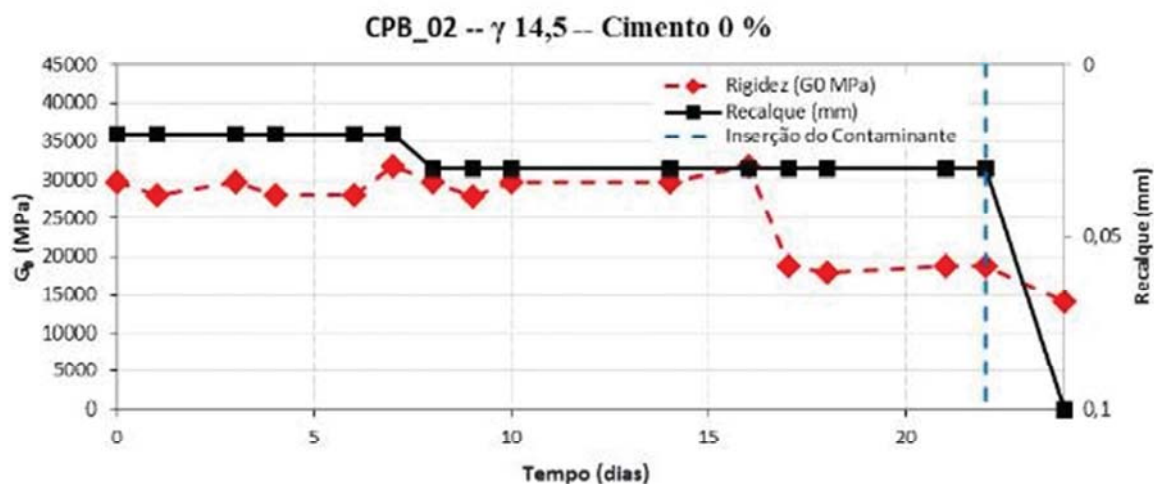
Contudo, numa análise de caráter qualitativo, pode-se observar na Figura 49 uma queda inicial na rigidez seguida de uma aparente estabilização ao longo do ensaio. Essa queda inicial nos valores de rigidez pode ter ocorrido devido a possíveis ruídos presentes na onda de resposta.

Na Tabela 9 estão apresentadas os resultados obtidos para o corpo de prova CPB\_02 (percolação com água destilada seguida de percolação com solução ácida). A Figura 50 apresenta a variação do módulo de cisalhamento e do recalque com o tempo de ensaio.

Tabela 9 - Variação do módulo de cisalhamento da argila compactada (CPB\_02).

CP	Tempo (dias)	Altura CP (mm)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Ácido (%)	G <sub>0</sub> (MPa)
CPB_02	0	60,25	1,44	0	29846
CPB_02	1	60,23	1,44	0	28010
CPB_02	3	60,23	1,44	0	29846
CPB_02	4	60,23	1,44	0	28010
CPB_02	6	60,23	1,44	0	28010
CPB_02	7	60,23	1,44	0	31869
CPB_02	8	60,22	1,44	0	29833
CPB_02	9	60,22	1,44	0	27998
CPB_02	10	60,22	1,44	0	29833
CPB_02	14	60,22	1,44	0	29833
CPB_02	16	60,22	1,44	0	31855
CPB_02	17	60,22	1,44	0	18849
CPB_02	18	60,22	1,44	0	17918
CPB_02	21	60,22	1,44	2	18849
CPB_02	24	60,15	1,44	2	18849

Figura 50 - Módulo de cisalhamento para o CPB\_02 x recalque.



Os valores do módulo do cisalhamento para este ensaio, assim como o ensaio branco, ficaram cerca de 10 mil vezes maiores do que valores de rigidez encontrados para argila sem cimentação, devido à não utilização do amplificador de sinal.

Embora os valores de rigidez não tenha a acurácia desejada, o comportamento ao longo do tempo do módulo de cisalhamento para o ensaio CPB\_02 se mostrou dentro do esperado quando percolada água destilada e solução ácida. Como pode-se verificar na Figura 50, o módulo de cisalhamento para o CPB\_02 manteve-se constante até o décimo sétimo dia do ensaio, a partir desse ponto ocorreu uma pequena queda na rigidez, isso se justifica devido a mudanças na configuração do osciloscópio, com a redução dos ruídos e melhora o sinal de chegada. Após o ajuste no osciloscópio, a rigidez manteve-se constante novamente. No 22º dia, quando foi iniciada a percolação ácida, pode-se observar mais uma queda na rigidez, possivelmente em razão do ataque ácido ao solo.

## **5. INFLUÊNCIA DA PERCOLAÇÃO ÁCIDA NA DEGRADAÇÃO DA RESISTÊNCIA E NA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA**

Nos itens subsequentes são apresentados e discutidos os resultados do programa experimental realizado no presente trabalho, o qual teve como objetivo avaliar os efeitos da percolação ácida na resistência mecânica e, complementarmente, sobre as variações da condutividade hidráulica, de um solo argiloso compactado, com e sem a adição de cimento, para fins de aplicação em barreiras de contenção de contaminantes.

Os resultados de resistência à compressão diametral apresentados, serão comparados com aqueles relatados por Floss (2012), que realizou ensaios de compressão diametral em solo cimentado com diferentes pesos específicos de compactação. A fim de enriquecer as discussões a respeito da condutividade hidráulica, serão incluídos na discussão os resultados obtidos por Timbola (2014), que realizou ensaios com o mesmo solo argiloso compactado, com e sem cimentação e percolação de água destilada e solução ácida.

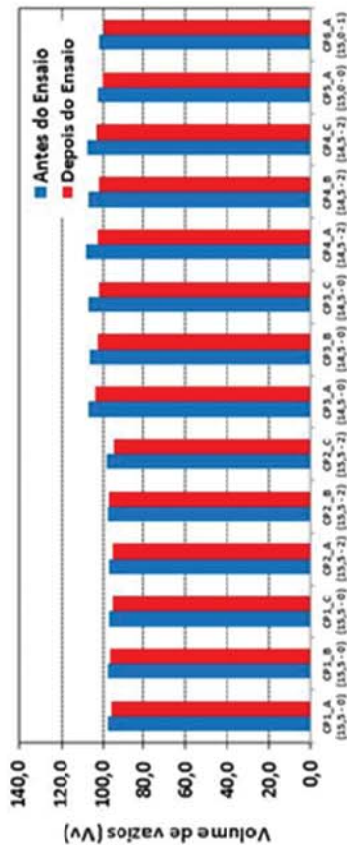
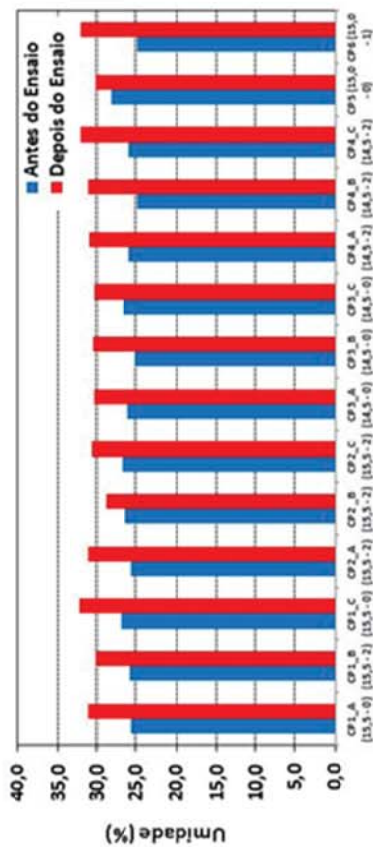
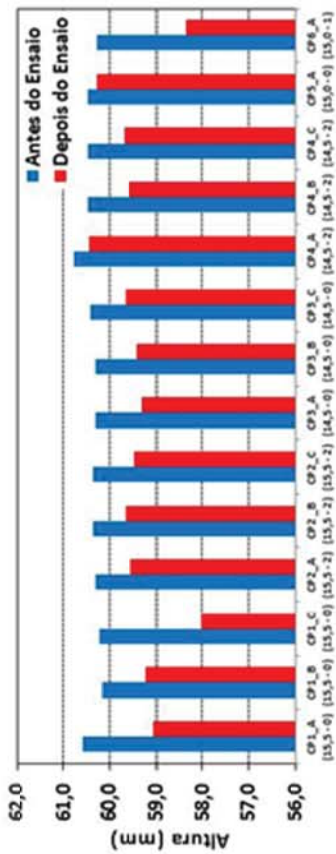
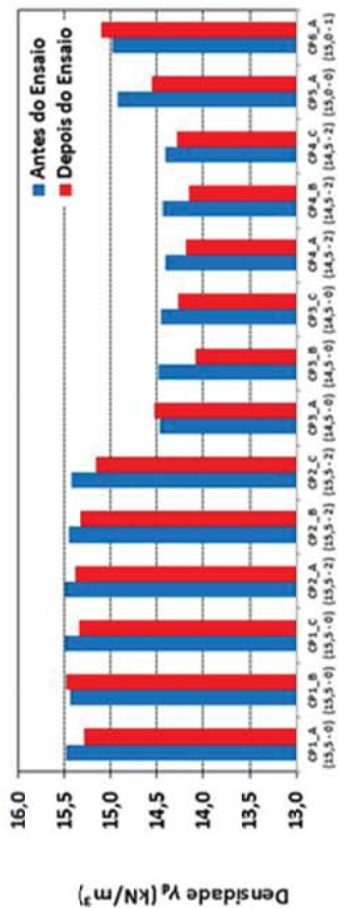
### **5.1 Características iniciais e finais dos corpos de prova**

Para todos os corpos de prova ensaiados foram verificadas as características físicas e geométricas antes e após o ensaio de percolação, cuja comparação é apresentada nos itens subsequentes. Primeiramente serão apresentadas as características observadas para os corpos de prova percolados somente com água (brancos) e após para os corpos de prova percolados com solução ácida. Vale ressaltar que os mesmos corpos de prova submetidos ao ensaio de percolação, foram ensaiados na compressão diametral.

#### **5.1.1 Características iniciais e finais para os corpos de prova percolados com água destilada**

As Figuras 51 e 52 apresentam as características físicas, geométricas e os índices físicos dos quatorze corpos de prova submetidos à percolação de água deslitada somente (brancos).

Figura 51 - Características físicas, geométricas e os índices físicos dos corpos de prova brancos.







Observa-se que houve uma pequena diminuição na altura e no volume de todos os corpos de prova depois de serem ensaiados, da ordem de 1%. O peso específico seco não variou mais do que 3% entre o início e o fim dos ensaios percolados com água destilada. Consequentemente, houve uma pequena redução de vazios em todos os corpos de prova. Em média o volume de vazios reduziu 2% em relação ao volume inicial. A variação de altura dos corpos de prova foi obtida a partir da medição dos recalques das amostras submetidas a carga vertical estática de  $280 \text{ kN/m}^2$ .

Os corpos de prova com menor peso específico de compactação foram os que mais reduziram vazios, em média 7% de redução. Os corpos de prova com maior peso específico variaram próximo a 6%. De forma geral, estes dados indicam uma boa manutenção da estrutura do solo durante a aplicação da carga vertical e a percolação de água destilada.

### **5.1.2 Características iniciais e finais para os corpos de prova percolados com solução ácida**

As Figuras 53 e 54 apresentam as características físicas, geométricas e os índices físicos dos seis corpos de prova percolados com água destilada e solução ácida.

A partir da análise das figuras apresentadas, pode-se observar que houve uma diminuição na altura e no volume de todos os corpos de prova depois de serem ensaiados. Diferentemente dos ensaios brancos, em que a altura de todos os corpos de prova reduziu em torno de 1%, os corpos de prova percolados com solução ácida reduziram a altura ao fim dos ensaios em 4%. Da mesma forma que para os ensaios brancos, a variação de altura dos corpos de prova foi obtida a partir da medição dos recalques das amostras submetidas à carga vertical estática de  $280 \text{ kN/m}^2$ . Pode-se atribuir essa redução da altura dos corpos de prova devido à carga estática aplicada sobre o corpo de prova e ao ataque ácido a estrutura do solo.

A redução do volume de vazios foi relativamente alta em comparação com os ensaios brancos, de 5% enquanto para os ensaios com água destilada foi de 2%. Os corpos de prova com menor peso específico de compactação foram os que mais reduziram vazios, em média 6% de redução. Os corpos de prova com maior peso específico variaram próximo a 4%. A mesma tendência ocorreu com os ensaios brancos.

Figura 53 - Características físicas, geométricas e os índices físicos dos corpos de prova percolados com solução ácida.

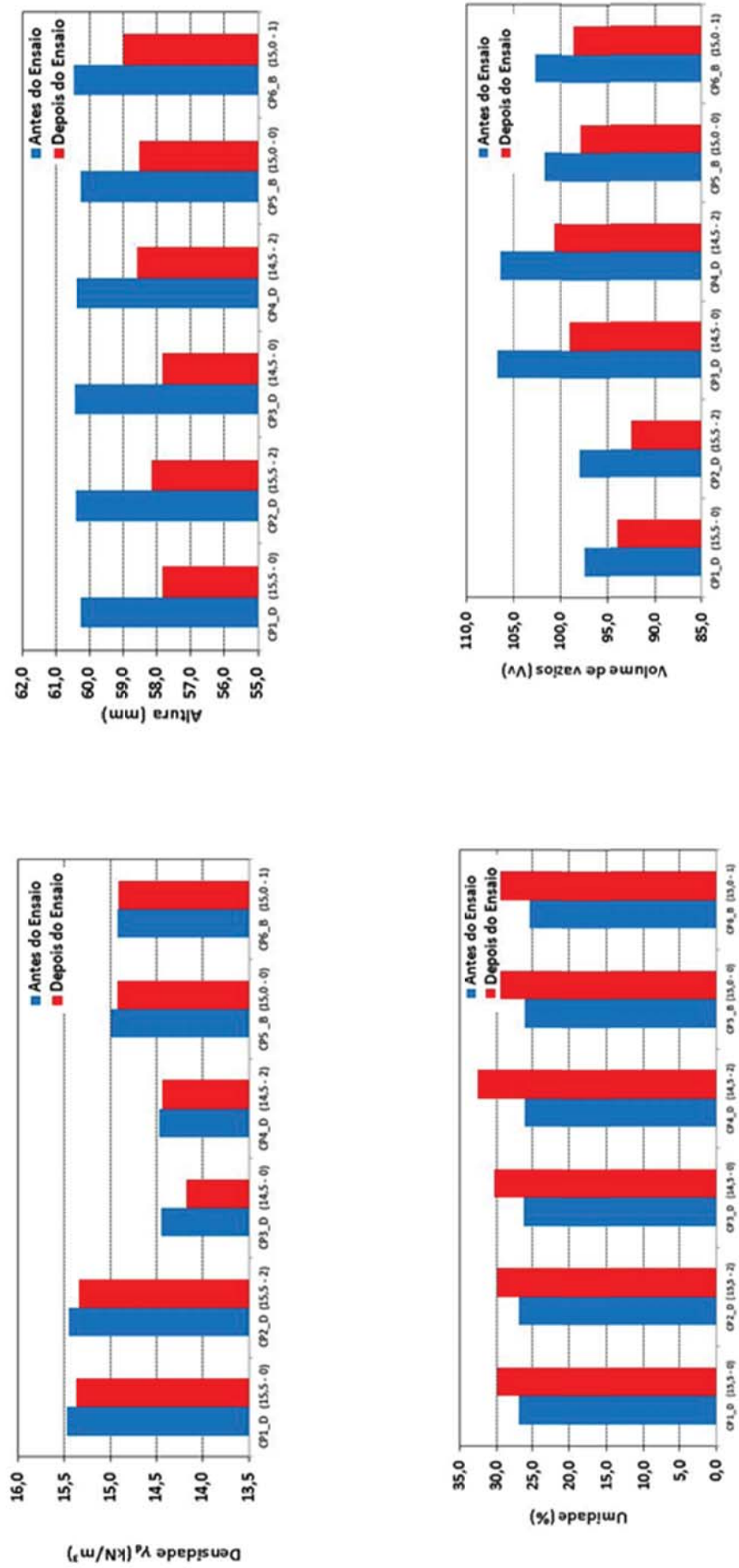
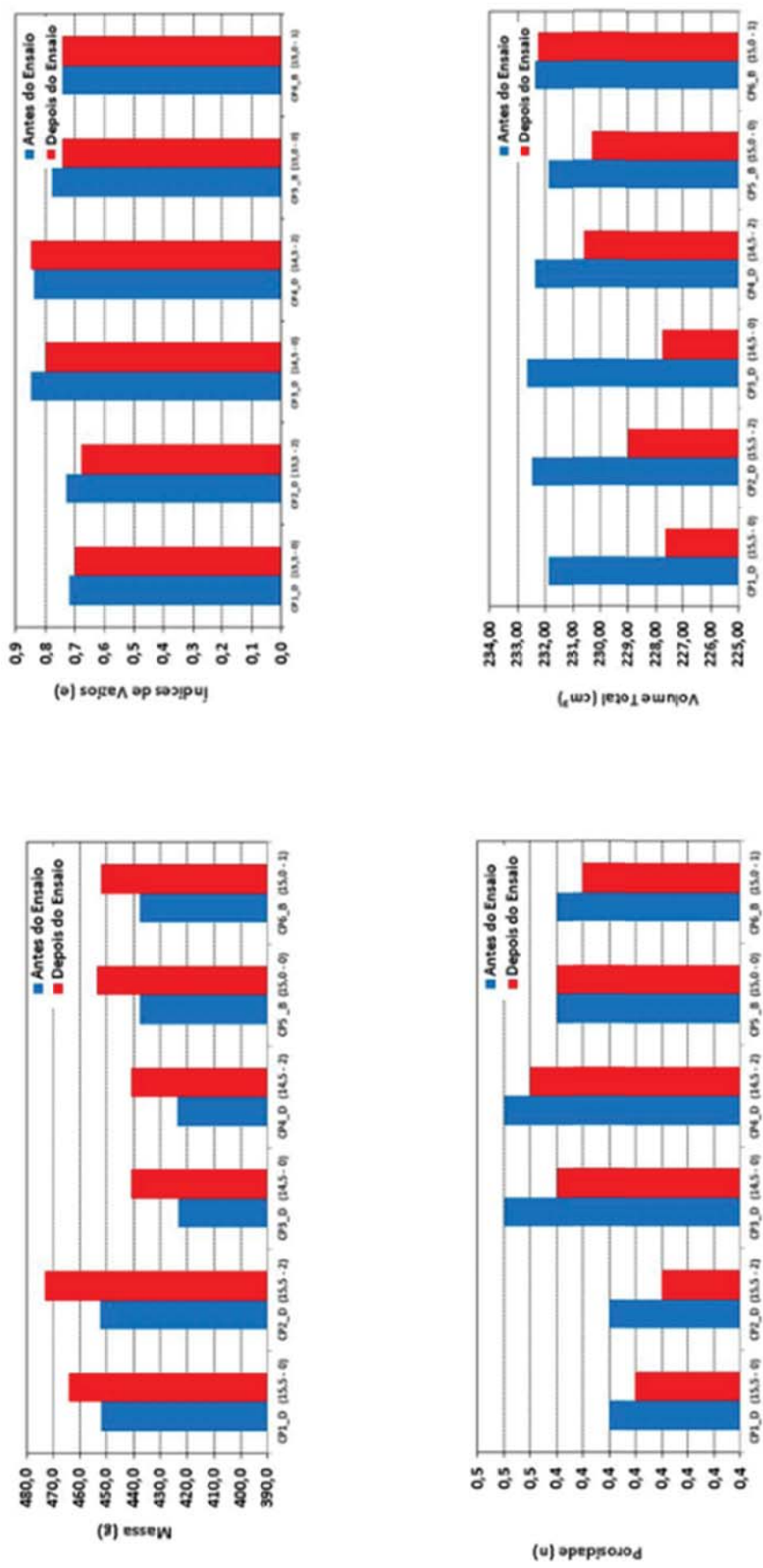


Figura 54 - Características físicas, geométricas e os índices físicos dos corpos de prova percolados com solução ácida.



Comportamento semelhante foi relatado por Tímbola (2014), que realizou uma série de ensaios de condutividade hidráulica de longa duração no mesmo solo utilizado nesta pesquisa. O autor observou a redução tanto do índice de vazios como da condutividade hidráulica desde o começo dos ensaios até o fim da percolação ácida.

## 5.2 Resultados de resistência à compressão diametral

Os ensaios de compressão diametral ( $\sigma_R$ ) foram realizados de acordo com a metodologia apresentada no Capítulo 3. Na Figura 55 estão apresentados os resultados de compressão diametral para os corpos de prova moldados com diferentes pesos específicos (14,50 kN/m<sup>3</sup>, 15,00 kN/m<sup>3</sup> e 15,50 kN/m<sup>3</sup>) e teores de cimento (0%, 1% e 2%), submetidos à percolação de água destilada somente. Foram realizadas três repetições para os corpos de prova com pesos específicos 14,50 kN/m<sup>3</sup> e 15,50 kN/m<sup>3</sup>. Para os corpos de prova com peso específico 15,00 kN/m<sup>3</sup>, foi realizada apenas uma repetição. No total foram realizados 14 ensaios. Na Tabela 10 estão apresentados os resultados para todos os corpos de prova e na Tabela 11 são apresentados os valores médios.

Para o cálculo da resistência diametral, foi utilizada a fórmula apresentada na norma brasileira NBR 7222 (1983) (ABNT, 1983), a qual é apresentada na equação 3, em que  $\sigma_R$  é a resistência a tração em (kgf/cm<sup>2</sup>), F é a carga de ruptura em (kgf), D é o diâmetro do corpo de prova em (cm) e H é a altura do corpo de prova em (cm).

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi DH} \quad (3)$$

Na Figura 55, pode-se observar que a resistência à tração aumenta conforme o acréscimo do teor de cimento e o peso específico de compactação do material, como era esperado. Para as amostras com peso específico de compactação 14,50 kN/m<sup>3</sup> e 2% de cimento, o aumento de resistência foi de aproximadamente 29 % em comparação com amostras de mesmo peso específico e 0% de cimento. Para amostras com peso específico seco igual a 15,50 kN/m<sup>3</sup> e 2% de cimento, o aumento de resistência foi de 55% em relação às amostras com mesmo peso específico e 0% de cimento. Já o acréscimo de 1% de cimento nas amostras com 15,0 kN/m<sup>3</sup> não resultou em mudança significativa da resistência, contrariando a expectativa. No entanto, isto pode ser

atribuído ao erro experimental (somente um corpo de prova foi testado para a combinação com adição de 1% de cimento).

Figura 55 - Resistência à compressão diametral x % de cimento para os diferentes pesos específicos de compactação em amostras percoladas com água destilada.

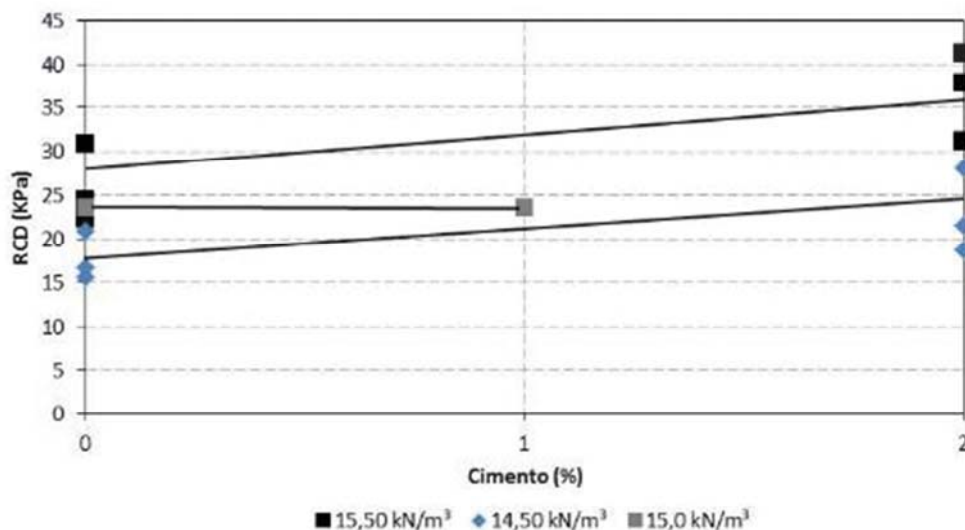


Tabela 10 - Resultados para os corpos de prova percolados com água destilada.

Amostra	Resistência diametral (kPa)	$\Delta H/H$ (mm)	Cimento (%)	Peso específico de compactação (kN/m³)
CP1_A	24,4	1,50	0	15,50
CP1_B	22,3	0,11	0	15,50
CP1_C	30,9	2,19	0	15,50
CP2_A	31,2	0,72	2	15,50
CP2_B	41,2	0,68	2	15,50
CP2_C	37,8	0,82	2	15,50
CP3_A	15,7	0,89	0	14,50
CP3_B	20,9	0,89	0	14,50
CP3_C	16,7	0,74	0	14,50
CP4_A	18,8	0,35	2	14,50
CP4_B	28,1	0,87	2	14,50
CP4_C	21,5	0,78	2	14,50
CP5_A	23,5	0,19	0	15,0
CP6_A	23,5	1,91	1	15,0

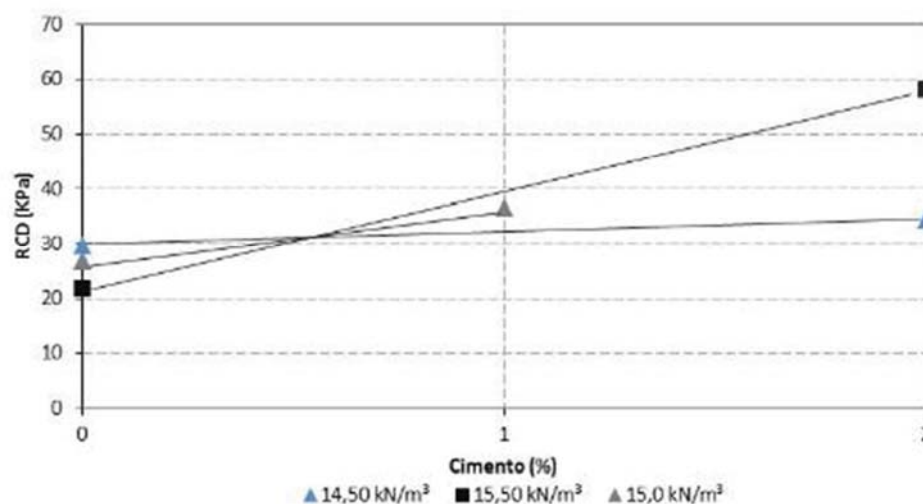
Tabela 11 - Valores médios para os corpos de prova percolados com água destilada.

Amostra	Resistência diametral (kPa)	$\Delta H/H$ (mm)	Cimento (%)	Peso específico de compactação (kN/m <sup>3</sup> )
CP1	24,4	1,50	0	15,50
CP2	37,8	0,72	2	15,50
CP3	16,7	0,89	0	14,50
CP4	21,6	0,78	2	14,50
CP5	23,5	0,19	0	15,0
CP6	23,5	1,91	1	15,0

O mesmo comportamento foi observado por Floss (2013) para amostras de areia com diferentes densidades de compactação e porcentagens de cimento (1% a 7%). O autor observou que com o acréscimo do grau de compactação e da % de cimentação a resistência à compressão diametral chegou a aumentar 70 vezes.

Na Figura 56 e na Tabela 12 estão apresentados os resultados para os corpos de prova percolados com água destilada e com solução ácida.

Figura 56 - Resistência à compressão diametral x % de cimento para os diferentes pesos específicos de compactação em amostras percoladas com solução ácida.



Pela análise da Figura 56, pode-se verificar que todos os corpos de prova cimentados apresentaram uma maior resistência à tração em comparação aos sem cimentação quando percolados pela solução agressiva. O corpo de prova de peso

específico 14,50 kN/m<sup>3</sup> com cimento teve uma resistência 17% maior em relação ao corpo de prova com mesmo peso específico, porém sem cimentação. O mesmo ocorreu com o corpo de prova de peso específico 15,50 kN/m<sup>3</sup> com cimento, onde o aumento da resistência foi de 168%. Para o corpo de prova de 15,0 kN/m<sup>3</sup> e 1% de cimento, a resistência à tração foi 36% maior quando comparado com o mesmo peso específico seco e 0% de cimento.

Tabela 12 - Resultados para os corpos de prova percolados com solução ácida.

<b>Amostra</b>	<b>Resistência diametral (kPa)</b>	<b><math>\Delta H/H</math> (mm)</b>	<b>Cimento (%)</b>	<b>Peso específico de compactação (kN/m<sup>3</sup>)</b>
CP1_D	21,7	2,42	0	15,50
CP2_D	58,1	2,24	2	15,50
CP3_D	29,6	2,60	0	14,50
CP4_D	34,6	1,81	2	14,50
CP5_B	26,8	1,75	0	15,0
CP6_B	36,5	1,49	1	15,0

Verifica-se que para quase todos os corpos de prova houve um aumento na resistência à compressão diametral quando percolados com solução ácida em relação aos corpos de prova percolados apenas com água destilada. O único corpo de prova percolado com solução ácida em que o valor de resistência diametral foi menor foi o de peso específico de compactação de 15,50 kN/m<sup>3</sup> e 0% de cimento, onde a resistência foi 12% menor em relação ao corpo de prova similar, mas percolado com água destilada. O corpo de prova de 14,50 kN/m<sup>3</sup>, sem cimentação, apresentou um aumento da resistência de 77% em relação ao corpo de prova percolado com água destilada. Já o corpo de prova com o mesmo peso específico, porém com 2% de cimento, teve um aumento da resistência de 60% em relação ao corpo de prova percolado com água destilada. O corpo de prova com peso específico de compactação de 15,50 kN/m<sup>3</sup> e 2% de cimento apresentou um aumento de 54% em comparação com o corpo de prova percolado com água destilada. Os corpos de prova com peso específico de compactação de 15,0 kN/m<sup>3</sup>, com 0% e 2% de cimento, tiveram um aumento de respectivamente 14% e 55% na resistência quando comparados aos corpos de prova brancos.

O efeito combinado da carga estática e da percolação ácida provavelmente tenha sido a causa do aumento da resistência observado para os corpos de prova submetidos à

percolação ácida. Ao mesmo tempo, os resultados evidenciam que a percolação ácida não degradou, em grande parte, a cimentação. Para o corpo de prova com peso específico  $14,50 \text{ kN/m}^3$  e sem cimentação, o recalque quando percolado com a solução ácida foi 2 vezes maior quando comparado com a mesma condição, porém com percolação de água destilada somente. Para os corpos de prova com pesos específicos de  $14,50 \text{ kN/m}^3$  e  $15,50 \text{ kN/m}^3$  com 2% de cimento, o recalque para a percolação ácida chegou a ser 3 vezes maior do que para os corpos de prova semelhantes, porém percolados com água destilada somente. Para o corpo de prova de peso específico  $15,50 \text{ kN/m}^3$  e 0% de cimento, o recalque foi 1,9 vezes maior.

### **5.3 Resultados de condutividade hidráulica**

A seguir são apresentados os resultados de condutividade hidráulica e a sua relação com o pH e o recalque para as amostras percoladas apenas com água destilada (brancos), e para as amostras percoladas por água destilada e solução ácida. Também são apresentados os valores destes parâmetros ao fim da percolação com água destilada e ao fim da percolação ácida. Para tanto, foi considerado o número de 5 volumes de vazios percolados para água e de 5 volume de vazios percolados para a solução ácida.

#### **5.3.1 Corpos de prova percolados com água destilada**

Alguns corpos de prova atingiram o limite mínimo de 5 volume de vazios percolados antes que outros, determinando um maior fluxo e maior condutividade hidráulica, conseqüentemente. Todos os corpos de prova apresentaram redução da condutividade hidráulica com o maior peso específico de compactação e com a adição de cimento. Para os corpos de prova brancos, o maior tempo de percolação foi de 14 dias, com 5 volumes de vazios percolados, e o menor foi de 3 dias, com 6 volumes de vazios percolados.

Nas Figuras 57 a 63 são apresentados os resultados obtidos para percolação com água destilada somente. São 14 corpos de prova com variações no peso específico de compactação ( $14,50 \text{ kN/m}^3$ ,  $15,0 \text{ kN/m}^3$  e  $15,50 \text{ kN/m}^3$ ) e no teor de cimento (0%, 1% e 2%). As combinações entre os níveis extremos dos fatores de controle foram repetidas 3 vezes. Dois ensaios adicionais, com uma repetição cada, complementam o programa de



ensaios. No sentido de facilitar a compreensão do leitor, as Figuras 57 a 63 apresentam, de forma alternada, os gráficos de variação conjunta da condutividade hidráulica com o pH do percolado e o recalque, respectivamente. A Tabela 13 apresenta os valores médios dos parâmetros medidos durante os ensaios, calculados considerando a percolação de aproximadamente 5 volumes de vazios para a percolação com água.

Tabela 13 – Resultados de condutividade hidráulica, recalque e pH dos ensaios brancos.

<b>Corpo de Prova</b>	<b>Peso Específico (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Cimento (%)</b>	<b>k (m/s)</b>	<b><math>\Delta H/H</math> (mm)</b>	<b>pH</b>
CP1_A	15,50	0	3,76E-09	1,50	6,59
CP1_B	15,50	0	2,75E-09	0,11	6,54
CP1_C	15,50	0	6,63E-09	2,19	7,32
CP2_A	15,50	2	2,51E-09	0,63	7,28
CP2_B	15,50	2	3,19E-09	0,59	8,79
CP2_C	15,50	2	5,49E-09	0,82	8,79
CP3_A	14,50	0	2,39E-08	0,96	5,09
CP3_B	14,50	0	1,25E-08	0,89	7,6
CP3_C	14,50	0	7,48E-09	0,70	6,30
CP4_A	14,50	2	1,36E-07	0,31	9,24
CP4_B	14,50	2	3,66E-08	0,87	10,95
CP4_C	14,50	2	2,85E-08	0,65	7,22
CP5_A	15,00	0	6,62E-09	0,18	6,60
CP6_A	15,00	1	2,17E-08	1,91	7,43

Pode-se observar nas Figuras 57 a 63 e na Tabela 13 que para todos os corpos de prova, a condutividade hidráulica com a percolação de água não variou muito. Os valores mais elevados de condutividade hidráulica, da ordem de  $1,0E-07$  m/s, foram observados para os corpos de prova com peso específico seco  $14,50$  kN/m<sup>3</sup>, com 0% e 2% de cimento (CP3\_A e CP4\_A). Já os corpos de prova com peso específico de compactação de  $15,5$  kN/m<sup>3</sup>, com 0% e 2% de cimento, apresentaram valores médios de condutividade hidráulica da ordem de  $1,0E-09$  m/s. Isso demonstra que o fator que mais influenciou a condutividade hidráulica foi o peso específico de compactação.

Figura 57 - Condutividade hidráulica x pH e recalque para corpos de prova percolados com água destilada.

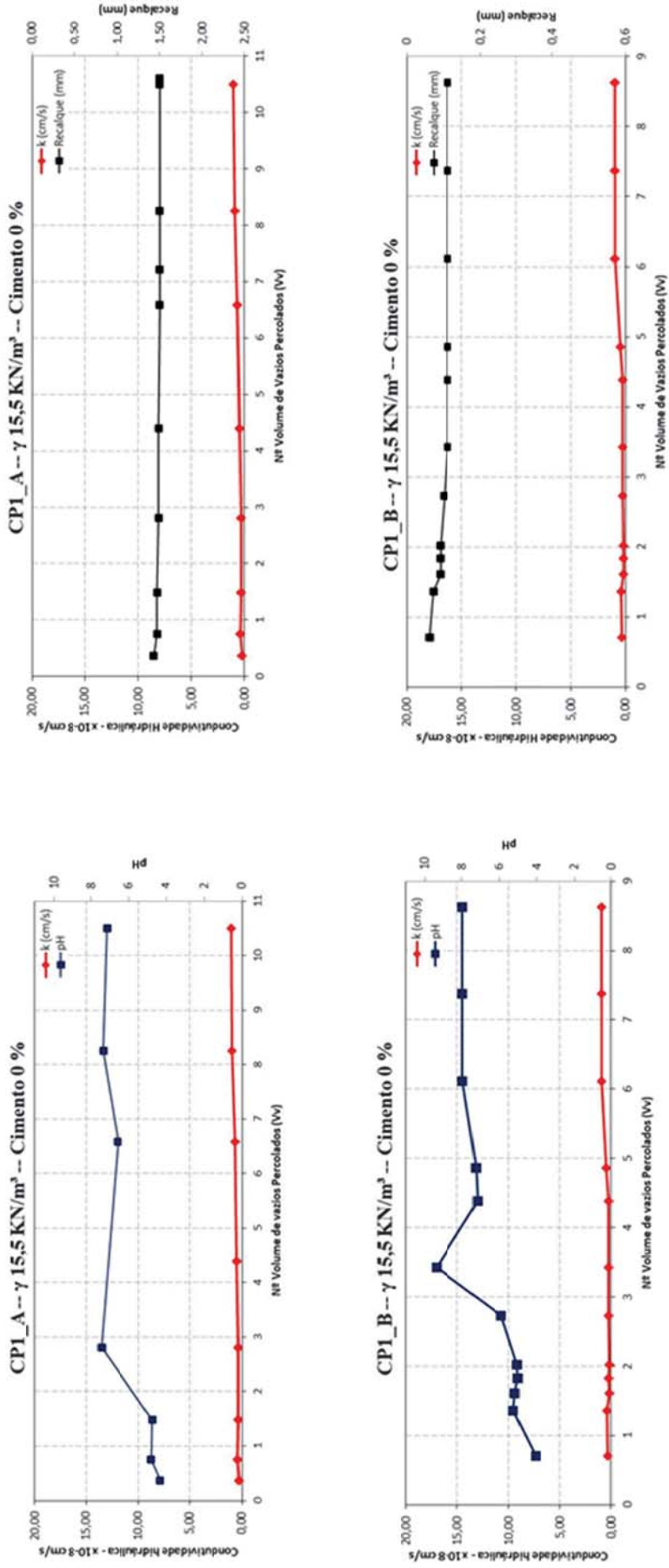


Figura 58 - Condutividade hidráulica x pH e recalque para corpos de prova percolados com água destilada.

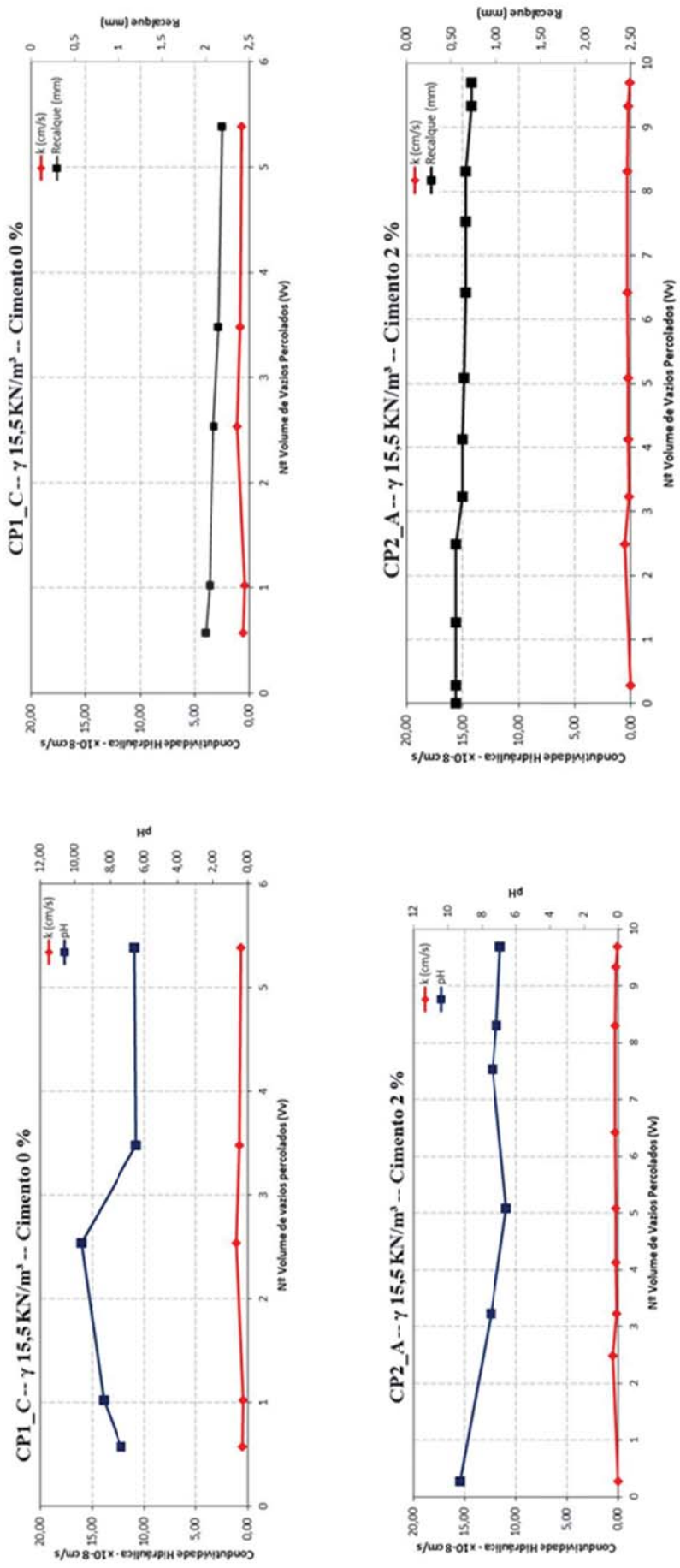


Figura 59 - Condutividade hidráulica x pH e recalque para corpos de prova percolados com água destilada.

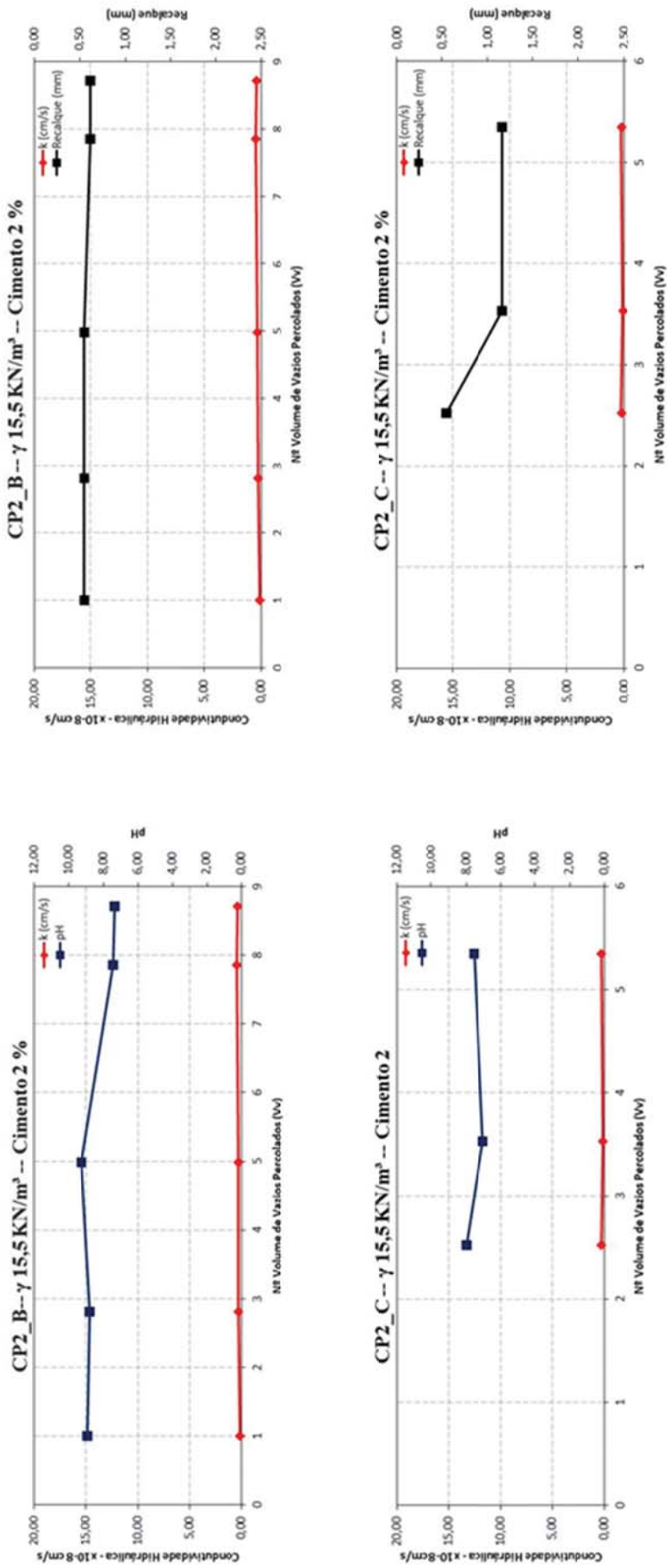


Figura 60 - Condutividade hidráulica x pH e recalque para corpos de prova percolados com água destilada.

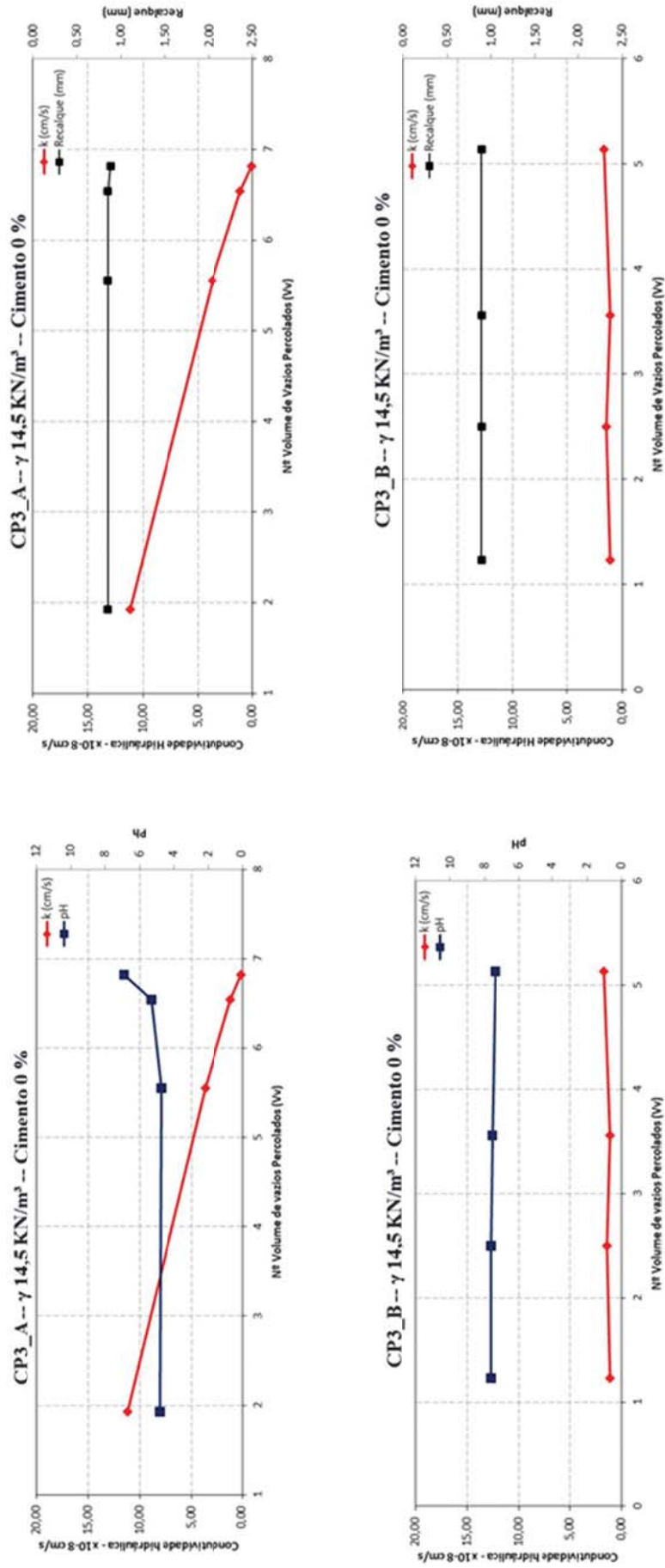




Figura 62 - Condutividade hidráulica x pH e recalque para corpos de prova percolados com água destilada.

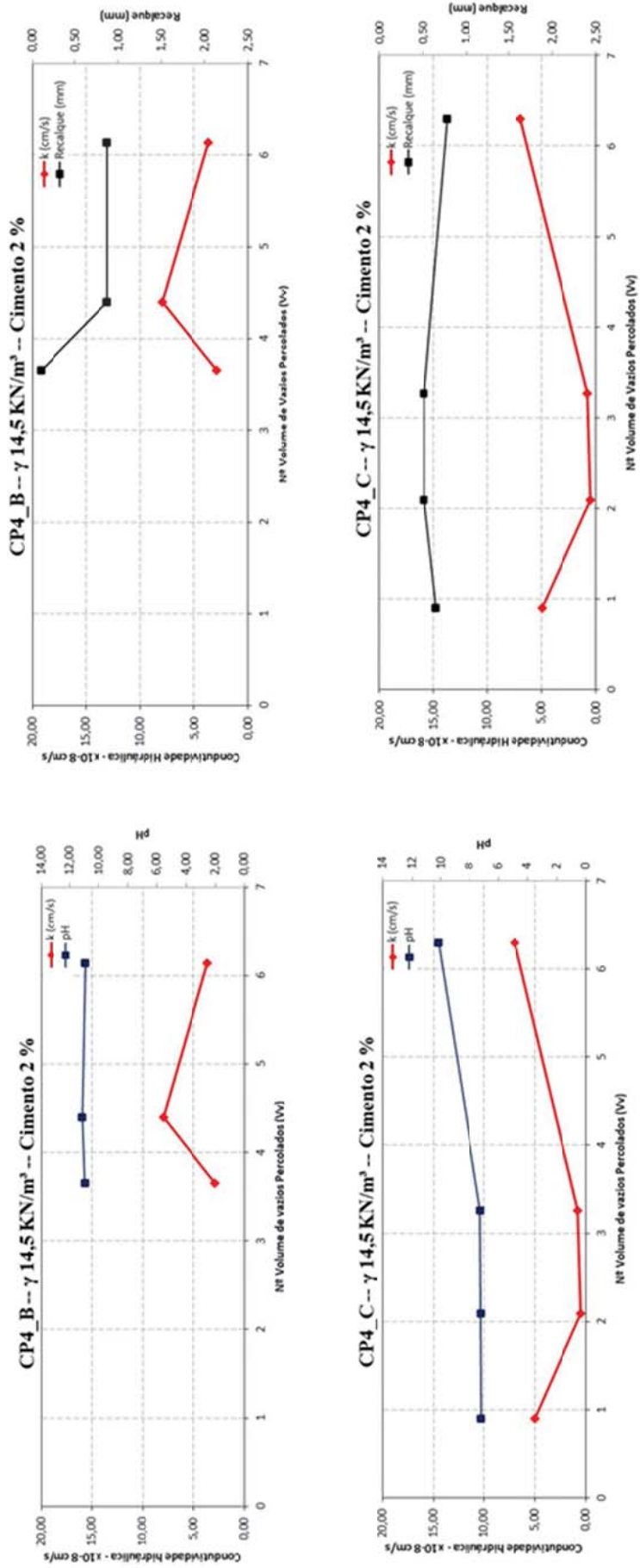
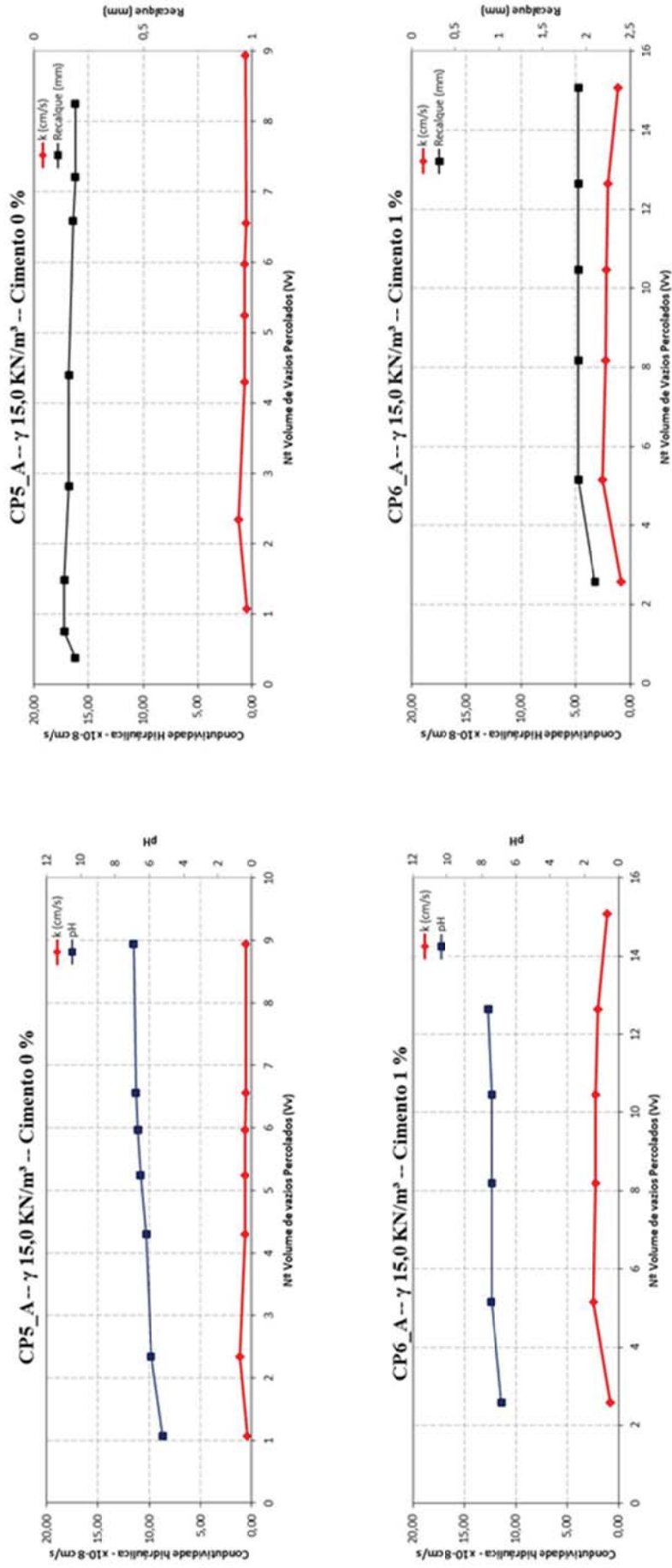


Figura 63 - Condutividade hidráulica x pH e recalque para corpos de prova percolados com água destilada.





O maior valor de pH observado foi de 11,30 para o corpo de prova cimentado e o menor valor foi 5,02 para o CP3\_A, sem cimentação. Os recalques observados ao longo da percolação com água destilada não variaram muito com o tempo. Os corpos de prova (CP1\_A, CP2\_A e CP6\_A) que apresentaram os maiores valores de recalque foram os com menor peso de compactação (14,50 kN/m<sup>3</sup> e 15,0 kN/m<sup>3</sup>). Além disso, uma parcela dos recalques pode ser atribuída ao ajuste do *top cap* à amostra. Isso porque a maior redução de altura ocorreu no momento em que foi aplicada a carga vertical.

### 5.3.2 Corpos de prova percolados com solução ácida

Nas Figuras 64 a 75 são apresentados os resultados obtidos para percolação com água destilada e solução ácida. São 6 corpos de prova com variações no peso específico de compactação (14,50 kN/m<sup>3</sup>, 15,0 kN/m<sup>3</sup> e 15,50 kN/m<sup>3</sup>) e no teor de cimento (0%, 1% e 2%). Alguns corpos de prova atingiram o limite mínimo de 10 volumes de vazios percolados antes que outros, determinando um maior fluxo e maior condutividade hidráulica consequentemente. Todos os corpos de prova apresentaram redução da condutividade hidráulica quando percolados com solução ácida. O corpo de prova com maior tempo de percolação foi de 37 dias e 10 volumes de vazios percolados, o de menor foi de 15 dias com 12 volumes de vazios percolados. Juntamente com condutividade hidráulica, foram monitorados o recalque dos corpos de prova e o pH da solução percolada. Todas as medições foram realizadas durante as fases de percolação com água e com solução ácida.

Figura 64 - Condutividade hidráulica x pH para o CP1\_D.

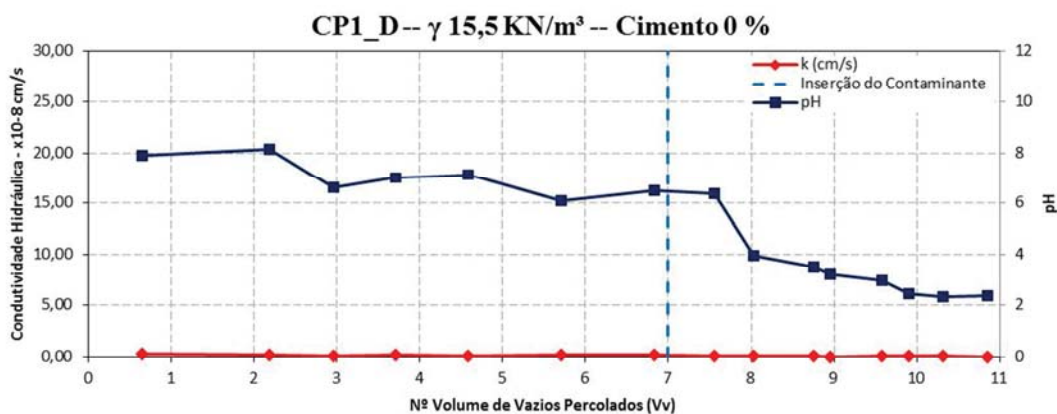


Figura 65 - Condutividade hidráulica x recalque para o CP1\_D.

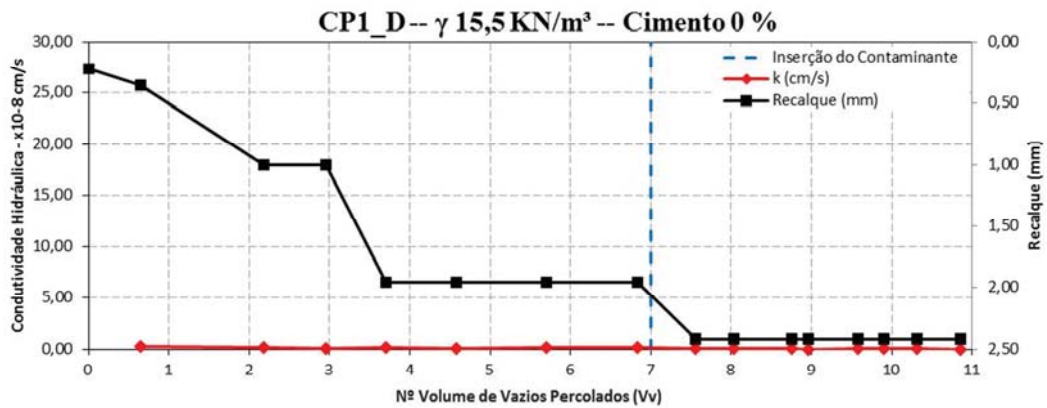


Figura 66 - Condutividade hidráulica x pH para o CP2\_D.

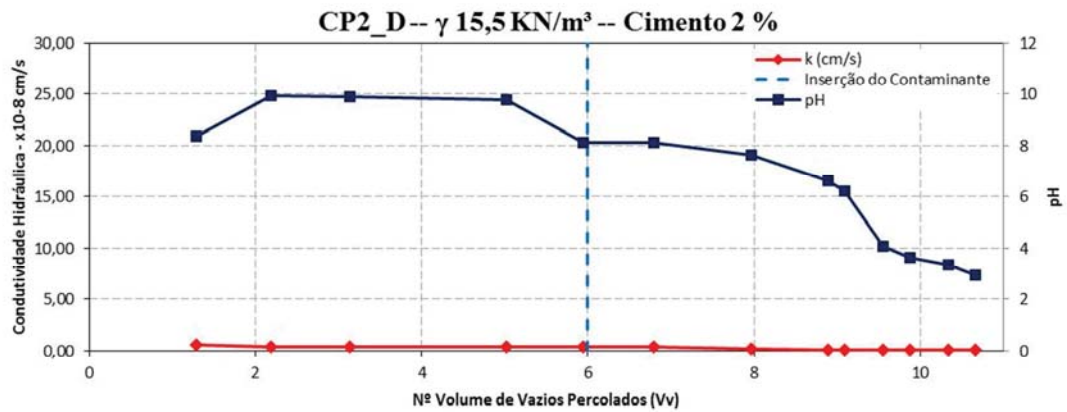


Figura 67 - Condutividade hidráulica x recalque para o CP2\_D.

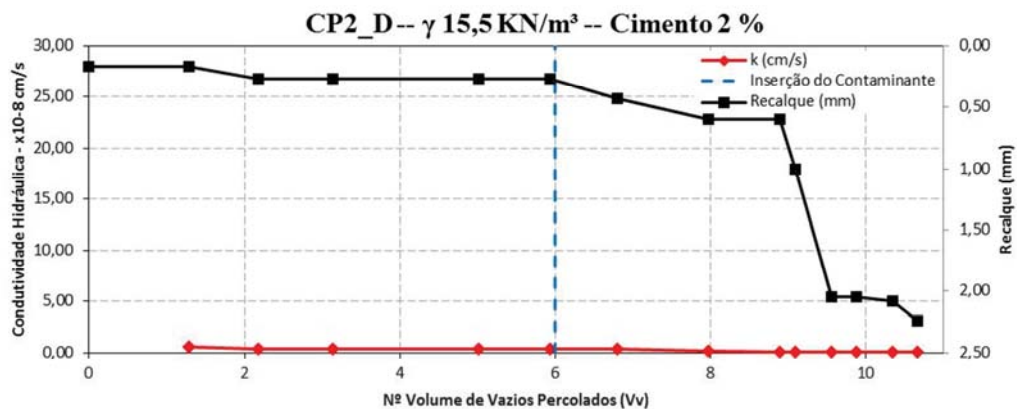


Figura 68 - Condutividade hidráulica x pH para o CP3\_D.

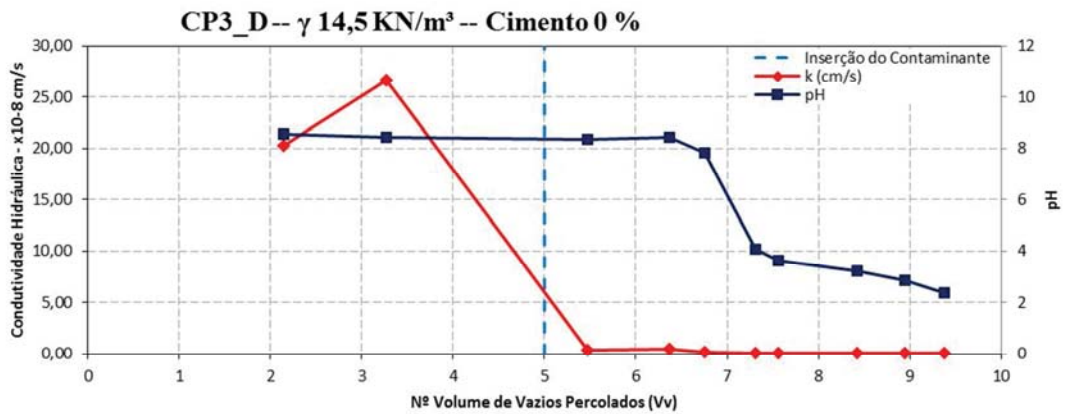


Figura 69 - Condutividade hidráulica x recalque para o CP3\_D.

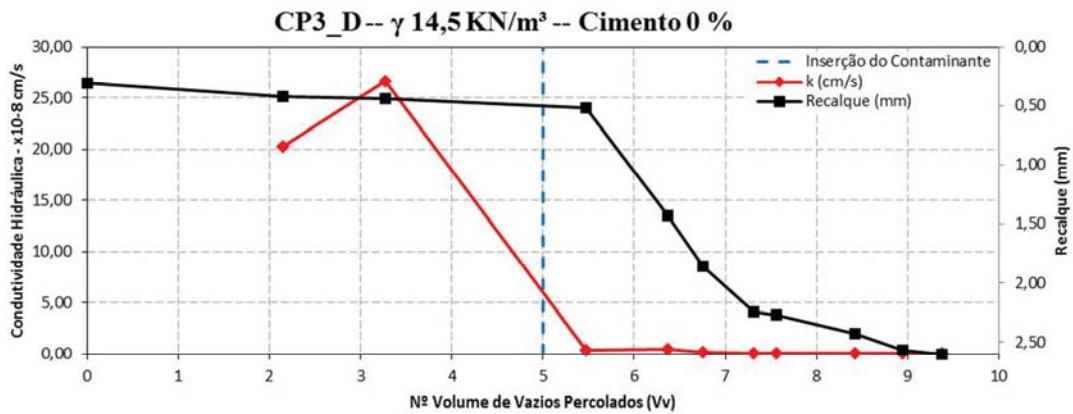


Figura 70 - Condutividade hidráulica x pH para o CP4\_D.

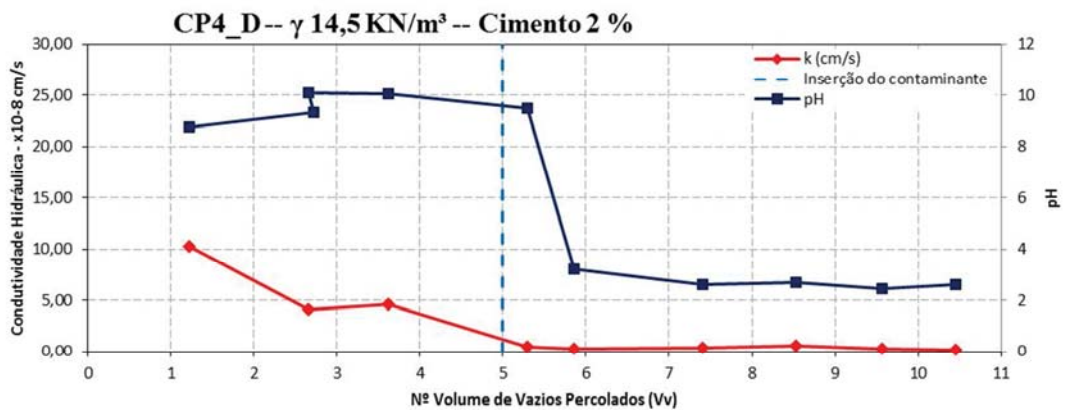


Figura 71 - Condutividade hidráulica x recalque para o CP4\_D.

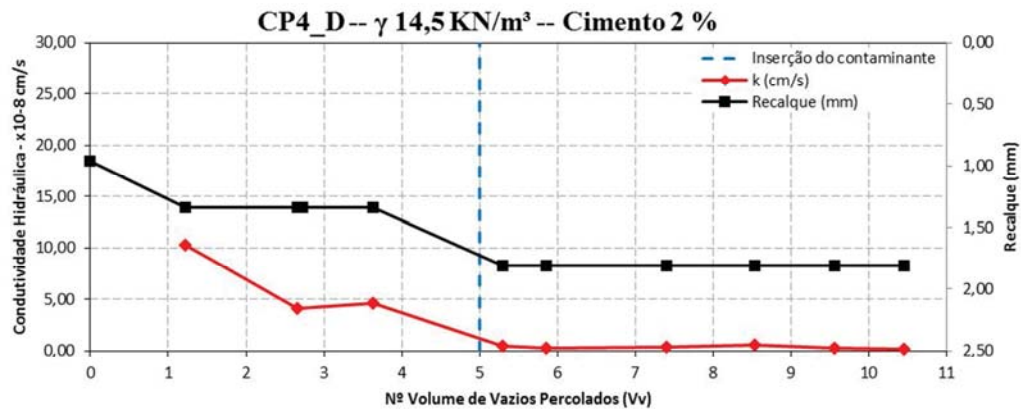


Figura 72 - Condutividade hidráulica x pH para o CP5\_B.

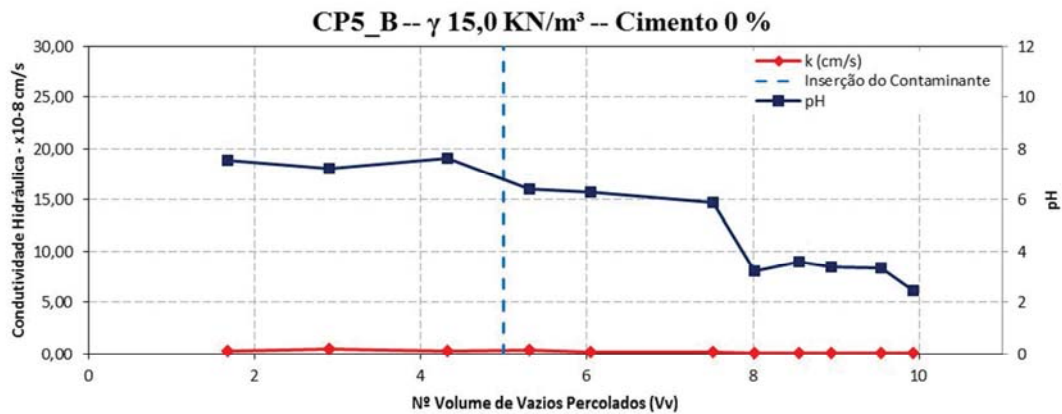


Figura 73 - Condutividade hidráulica x recalque para o CP5\_B.

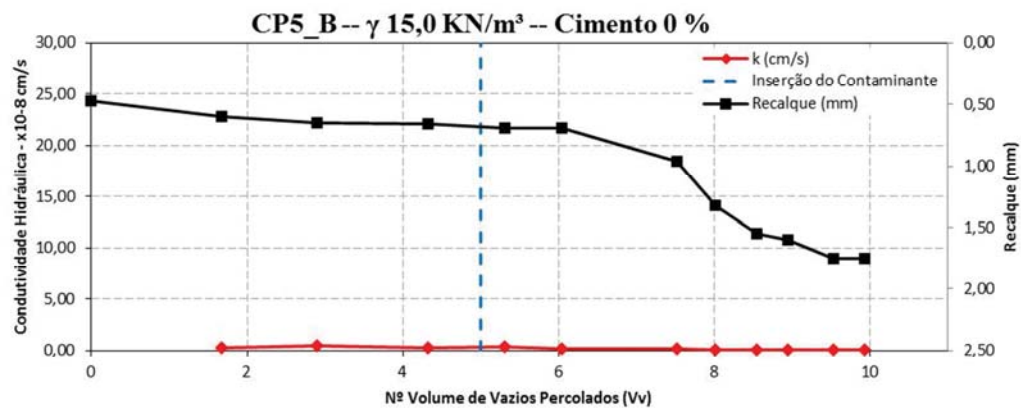


Figura 74 - Condutividade hidráulica x pH para o CP6\_B.

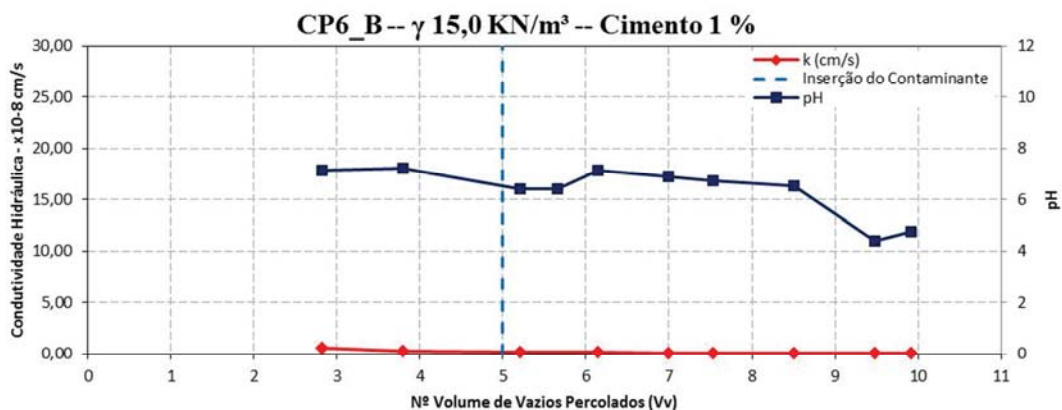
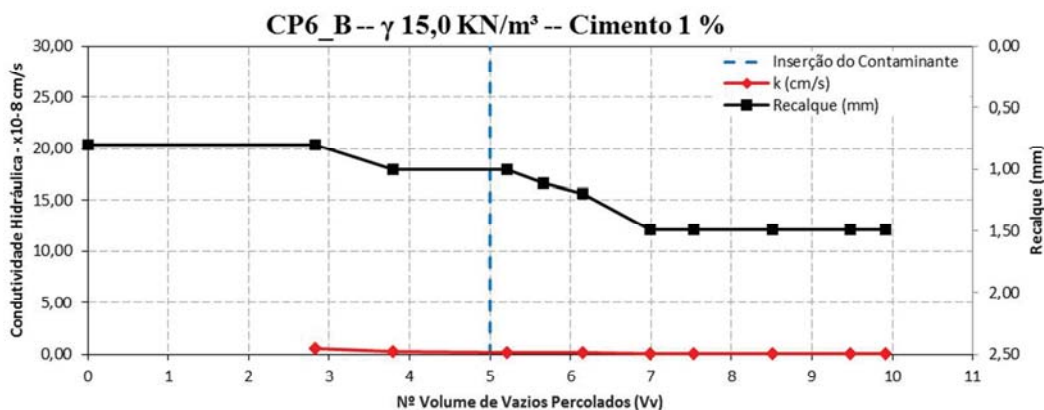


Figura 75 - Condutividade hidráulica x recalque para o CP6\_B.



A Tabela 14 apresenta os valores de condutividade hidráulica ( $k$ ), recalque ( $\Delta H/H$ ) e pH medidos durante os ensaios, determinados ao final da fase de percolação com água destilada e ao final da fase de percolação ácida. Os valores apresentados nesta tabela foram referem-se a um volume de 5 volume de vazios para a fase ácida e de aproximadamente 5 volumes de vazios para a fase de percolação com água.

Pode-se observar que, de forma consistente, todos os corpos de prova apresentaram redução da condutividade hidráulica com a percolação da solução ácida. O recalque e o pH também seguiram esta tendência, o primeiro aumentando conforme a percolação ácida prosseguia e o segundo reduzindo drasticamente a partir da introdução do contaminante ácido.

Tabela 14 - Valores de condutividade hidráulica, recalque e pH em cada fase do ensaio (valor inicial/valor final).

Corpo de Prova	Peso Específico (kN/m <sup>3</sup> )	Cimento (%)	k (m/s)		$\Delta H/H$ (mm)		pH	
			Água	Ácido	Água	Ácido	Água	Ácido
CP1_D	15,50	0	1,06E-09	3,43E-10	1,95	2,42	6,50	2,36
CP2_D	15,50	2	4,08E-09	4,83E-10	0,43	2,24	8,10	2,95
CP3_D	14,50	0	2,67E-07	5,22E-10	0,50	2,60	8,38	2,36
CP4_D	14,50	2	4,67E-08	3,75E-09	1,34	1,81	10,06	3,24
CP5_B	15,00	0	4,16E-09	6,09E-10	0,69	1,75	7,62	2,47
CP6_B	15,00	1	2,08E-09	5,12E-10	1,00	1,49	6,43	4,42

Com relação aos corpos de prova percolados apenas com água destilada, as amostras submetidas à ação da solução ácida apresentaram recalques muito maiores. Pode-se verificar através da observação das Figuras 64 a 75, que após a percolação da solução agressiva o recalque aumentou abruptamente. O mesmo aconteceu com o pH, porém a variação não foi tão acentuada, em razão de que quando a solução ácida é introduzida na câmara de ensaio, a amostra esta com todos os seus vazios preenchidos por água, ocorrendo uma pequena diluição do ácido na água destilada.

Tímbola (2014) realizou ensaios de condutividade hidráulica em corpos de prova com mesmo material e com as mesmas características de moldagem que os ensaiados nesta dissertação. Os ensaios foram realizados entre o período de 05 de fevereiro a 29 de maio de 2014. O autor observou que para os corpos de prova com menor peso específico de compactação (14,50 kN/m<sup>3</sup>), com e sem cimento (0% e 2%), a condutividade hidráulica, para a percolação com água destilada, até o número de 5 volumes de vazios, manteve-se na ordem de 5,0E-08 m/s. Quando percoladas com a solução ácida, condutividade hidráulica das amostras foi da ordem de 3,0E-09 m/s para o corpo de prova sem cimento e 1,0E-10 m/s para o corpo de prova com cimento. Para os corpos de prova com peso específico de compactação de 15,50 kN/m<sup>3</sup>, com e sem cimento, Tímbola (2014) obteve valores de k para percolação com água destilada de 9,8E-09 m/s e 9,5EE-10 m/s na percolação ácida, quando atingidos o número de 5 volumes de vazios percolados. Nesta pesquisa, os valores de condutividade hidráulica ficaram muito semelhantes aos encontrados pelo autor para as duas fases de percolação.

#### 5.4 Análise estatística para resistência diametral: Influência do teor de cimento, peso específico seco e da solução percolante

Os resultados da Análise de Variância (ANOVA), realizada a partir dos dados apresentados nas Tabelas 13, 14 e 15, estão apresentados na Tabela 16. Esta análise teve como objetivo verificar a significância estatística dos efeitos dos fatores de controle (teor de cimento, peso específico seco e solução percolante) sobre as variáveis de resposta obtidas nos ensaios de resistência diametral. Na Tabela 15, os resultados da análise são representados pelo *valor-p*.

As variáveis de resposta analisadas são: relação entre as resistências à compressão diametral dos ensaios brancos e ácidos ( $RCD_{ba}$ ); relação entre os recalques medidos nos ensaios brancos e ácidos ( $\rho_{ba}$ ); resistência à compressão diametral dos ensaios brancos ( $RCD_b$ ); resistência à compressão diametral dos ensaios ácidos ( $RCD_a$ ); recalques medidos nos corpos de prova brancos ( $\rho_b$ ); recalques medidos nos corpos de prova ácidos ( $\rho_a$ ).

Tabela 15 - Resultado da Análise de Variância (ANOVA).

Efeito	$RCD_{ba}$	$\rho_{ba}$	$RCD_b$	$\rho_b$	$RCD_a$	$\rho_a$
	<i>valor-p</i>					
A = Peso Específico	0,271	0,196	<b>0,070</b>	0,279	0,894	0,434
B = % Cimento	<b>0,085</b>	0,234	<b>0,038</b>	<b>0,084</b>	0,584	0,507
C = Solução Percolante	<b>0,070</b>	<b>0,011</b>	-	-	-	-
Interação A e B	0,142	0,147	0,281	0,594	0,669	0,432

A análise de variância (ANOVA) identificou como significativos, para um nível de significância da ordem de 10%, os efeitos principais da solução percolante tanto sobre a relação das resistências à compressão diametral ( $RCD_{ba}$ ) como sobre a variação dos recalques ( $\rho_{ba}$ ) medidos entre os corpos de prova brancos e ácidos.

Também foram identificados como estatisticamente significativos os efeitos principais do peso específico de moldagem sobre a resistência diametral dos ensaios brancos ( $RCD_b$ ), para um nível de significância de 7%, e do teor de cimento sobre as

respostas  $RCD_{ba}$  a  $RCD_b$  e  $\rho_b$ , para níveis de significância de 8,5%, 3,8% e 8,4%, respectivamente.

As demais variáveis de resposta apresentadas na Tabela 17 ( $RCD_a$  e  $\rho_a$ ) não foram afetadas por efeitos principais ou de interação entre os fatores de controle.

Deve-se ressaltar, no entanto, que a análise estatística realizada para as respostas  $RCD_{ba}$ ,  $RCD_b$  e  $\rho_b$  pode ter sido distorcida pelo baixo valor de resistência medido para o ensaio CP1\_D (ver Tabela 13), conforme mencionado anteriormente. Portanto, os *valores-p* reais para esta análise são possivelmente inferiores aos valores apresentados na Tabela 15.



## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na sequência estão apresentadas as conclusões acerca do desenvolvimento do permeâmetro adaptado com os sensores *bender elements* para medidas contínuas de rigidez, bem como da avaliação dos efeitos da percolação ácida na degradação da resistência e nas variações da condutividade hidráulica de um solo argiloso compactado, com e sem a adição de cimento, para fins de aplicação em barreiras de contenção de resíduos industriais e de mineração.

### 6.1 Conclusões

- a) Em função da influência exercida pelos ruídos externos, a utilização de um amplificador de sinal é essencial à correta utilização da técnica de *bender elements* na avaliação das variações da rigidez de geomateriais;
- b) Os valores de rigidez (obtidos com o amplificador de sinal) mostraram-se coerentes em relação aos valores encontrados na literatura para o mesmo material;
- c) Os valores de rigidez para a amostra de argila sem cimentação ficaram distantes dos valores encontrados para o mesmo material na literatura (em razão da não utilização do amplificador de sinal), porém a variação da rigidez ao longo dos ensaios foi consistente, mostrando uma redução do módulo cisalhante com a introdução da percolação ácida;
- d) A percolação ácida produziu um aumento na resistência à compressão diametral, quando comparada a percolação com água destilada;
- e) A adição de cimento Portland e o peso específico apresentaram influência na resistência diametral medida para os corpos de prova percolados com água destilada e para os corpos de prova percolados com solução ácida;
- f) A percolação ácida produziu a redução da condutividade hidráulica e o aumento na taxa de recalque, quando comparada com a percolação com água destilada;
- g) A variação do pH acompanhou a redução da condutividade hidráulica indicando a presença de reações físico-químicas;

- h) A adição de cimento Portland e o peso específico apresentaram influencia na condutividade hidráulica medida ao final da fase de percolação ácida.

## **6.2 Sugestão para trabalhos futuros**

- a) Realizar ensaios de rigidez em amostras de argila com e sem cimentação com percolação de água destilada e solução ácida;
- b) Repetir o programa experimental para as amostras percoladas com solução ácida, com repetição nos pontos fatoriais e adição de outros pontos a fim de corroborar algumas das evidências produzidas no presente trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBISS, C. P. Shear wave measurements of the elasticity of the ground. **Géotechnique**. v. 31, n. 1, p. 721-726, 1981.

AMARAL, M. F. et al. Compression and shear wave propagation in cemented-sand specimens. **Géotechnique Letters** **1**, 79-84, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **Standard Classification of Soils for Engineering Purposes: D2487**. Philadelphia. 11 p., 1993.

ANDERSON, D. G.; STOKOE, K. H. Shear Modulus: a time-dependent soil property. **Dynamic Geotechnical Testing**. ASTM STP 654. American Society for testing and Materials, p. 66-90, 1978.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rochas e solos – **Terminologia: NBR 6502**. Rio de Janeiro, 1995, 18p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **Guia Prático de Utilização do cimento Portland: Boletim técnico**. 7. Ed. São Paulo: ABCP. 2002. 28. P Disponível em: <[http://www.abcp.org.br/downloads/arquivos\\_pdf/BT106\\_2003.pdf](http://www.abcp.org.br/downloads/arquivos_pdf/BT106_2003.pdf)>. Acesso em: 29. Out. 2012.

ATKINSON, J. H. Non-linear soil stiffness in routine design. **Geotechnique**, Vol. 50, n. 5, pp. 487-508. 2000.

BEDIN, J. **Estudo do comportamento geomecânico de resíduos de mineração**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Rio Grande do Sul). Porto Alegre-RS. 2010.

BELLEZA, I.; PASQUALINI, E. **Hydraulic performance of soil-cement liners**. *GeoEnvironmental* 97. Rotterdam. A. A. Balkema. p. 271- 276. 1997.

BERTORELLI, A.; HARALYI, N. **Geologia do Brasil**. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Coord.) *Geologia de engenharia*. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 584 p., 1998.

BRODERICK, G. P.; DANIEL, D. Stabilizing compacted clay against chemical attack. **Journal of Geotechnical Engineering**, New York, ASCE, 116, n. 10, p. 1549-1567, 1990.

BOYNTON, S. S.; DANIEL, D. E. **Hydraulic conductivity tests on compacted clay**. 1985.

BORMA, L. D. S.; SOARES, P. S. M. **Drenagem ácida e gestão de resíduos sólidos de mineração**. (Coleção Extração de Ouro – Princípios, Tecnologia e Meio Ambiente, 10) Rio de Janeiro. RJ. 2002.

CARRARO, J. A.; SALGADO, R. Mechanical behavior of non-textbook soils. FHWA/IN/JTRP-2004/05. Joint Transportation Research Program, Indiana, 2004.

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA EM SANEAMENTO AMBIENTAL. **Decisão de diretoria nº 195-2005-E.** 2005. Disponível em: <[http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/relatorios/Tabela\\_valores\\_2005.pdf](http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/relatorios/Tabela_valores_2005.pdf)>. Acesso em 13. set. 2012.

CHAN, C. Bender element test in soil specimens: identifying the shear wave arrival time. **EJGE – Electronic Journal of Geotechnical Engineering**. Vol. 15, 2010.

CHAN, C. On the interpretation of shear wave velocity from bender element tests. Universiti Tun Hussein Onn Malaysia, Research Centre for Soft Soils (RECESS). **Acta Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering. Fascicule 1.** Johor, Malaysia, 2012.

CLAYTON, C. R. I. Stiffness at small strain: research and practice. **Géotechnique** 61, n. 1, 5-37, 2011.

CARRARO, J. A.; SALGADO, R. Mechanical behavior of non – textbook soils (Literature Review). Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana. 2004.

CONSOLI, N. C.; FONSECA, A. V.; SILVA, S. R.; CRUZ, R. C.; FONINI, A. Parameters controlling stiffness and strength of artificially cemented soils. **Géotechnique**, 2011.

CONSOLI, N. C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. S. Key parameters for strength control of artificially cemented soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Vol. 133, No. 2, 2007.

CORREIA, A. G.; FERREIRA, M. R.; ARAÚJO, N. F. Triaxiais de precisão para determinação das características de deformabilidade. Universidade do Minho, Guimarães, Portugal. **Congresso Nacional de Geotecnia**, Guimarães, 2010.

COSTA, P. O. S. **Avaliação em laboratório, do transporte de contaminantes no solo do aterro sanitário de Suípe/Ba.** Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Geotecnia) Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

CRUZ, R. C. **Influência de parâmetros fundamentais na rigidez, resistência e dilatância de uma areia artificialmente cimentada.** Tese (Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

DALLA ROSA, F. Efeito do estado de tensões de cura no comportamento de uma areia artificialmente cimentada. Tese (Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul). Porto Alegre-RS, 2009.

DANIEL, D. E. Clay liners. In: DANIEL, D. E. **Geotechnical practice for waste disposal.** London: Chapman & Hall, p. 33-65, 1993.

DI EMIDIO, G.; FLORES, R. D. V. Monitoring the impact of sulfate attack on a cement-clay mix. **GeoCongress 2012**, 2012.

DÍAZ, J. G. **Estudo do comportamento de fundações superficiais em solos cimentados**. 137 p. Dissertação (mestrado em engenharia) CPGEC/Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

DYVIK, R.; MADSHUS, C. **Lab measurements of  $G_{max}$  using bender elements**. **Proc. Advances in the Art of Testing Soils under Cyclic Conditions**. American Society of Civil Engineers, New York. 1985.

DYVIK, R.; MADSHUS, C. Laboratory measurements of  $G_{max}$  using bender elements In: ASCE ANNUAL CONVENTION: ADVANCES IN THE ART OF TESTING SOILS UNDER CYCLIC CONDITIONS, 1985, Detroit. **Proceedings...** New York: American Society of Civil Engineers, 1985.

FAVARETTI, M.; MORACI, N.; PREVIATELLO, P. Effects of Leachate on the hydraulic and Mechanical Behavior of Clay Liners In 1 st Congress on Environmental Geotechnics. **Proceedings...**Edmonton, Alberta, Canadá. p. 221-226, 1994.

FERNANDES, J. D. **Adsorção e mobilidade de chumbo em solos influenciadas pela adição de composto orgânico e carbonato de cálcio**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal da Paraíba). Areia-PB, 2006.

FERREIRA, C. M. F. **Implementação e aplicação de transdutores piezoelétrico na determinação de velocidades de ondas sísmicas em provetes. Avaliação da qualidade de amostragem em solos residuais**. Dissertação de mestrado. FEUP-Universidade do Porto, Portugal, 2003.

FERREIRA, C.; FONSECA, A. V. **International parallel tests on bender elements at the university of Porto, Portugal**. FEUP – Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto, 2005.

FERREIRA, C.; MENDONÇA, A. A.; VIANA DA FONSECA, A. **Assessment of sampling quality in experimental sites on residual soil from granite in Porto**. Proceedings of the 9<sup>th</sup> Portuguese Geotechnical Congress, Aveiro, Portugal, SPG, Lisboa, Vol. 1, PP. 27-38, 2004.

FESTUGATO, L. **Comportamento de hidratação e resposta cisalhante cíclica de resíduo de mineração cimentado reforçado com fibras**. Tese (Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul) Porto Alegre-RS. 2011.

FLOSS, M. F. **Parâmetros de controle da resistência e rigidez de solos granulares artificialmente cimentados**. Tese (Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS) Porto Alegre. 2012.

FONINI, A. **Comportamento mecânico de uma areia cimentada: análise experimental e micromecânica**. Tese (Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul) Porto Alegre-RS. 2012.

GUTIERREZ, G. A. **Influence of late cementation on the behaviour of reservoir sands**. Thesis (Philosophy in the Faculty of Engineering) University of London. 2007.

HAMDI, N. SRASRA, E. **Hydraulic conductivity study os compacted clay used as landfill liners for an acidic waste**. Waste Management 33, p. 60 – 66. 2013.

HEINECK, K. S. **Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais impermeáveis**. Tese (Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.

INGLES, O. G.; METCALF, I. B. **Soil Stabilization – Principles and Practice**. Australia: Butterworths Pty. Limited. P. 366. 1972.

IPAT – UNESC. Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas – Universidade do Extremo Sul Catarinense. **Pesquisa e desenvolvimento de metodologias para o controle de drenagem ácida e tratamento de efluentes da indústria carbonífera**. Instituto de Tecnologias Ambientais e Tecnológicas – IPAT. Relatório Técnico. Criciúma, 184 p. 2000.

JOVIČIĆ, V.; COOP, M. R.; SIMIC, M. Objective criteria for determining Gmax from bender elements tests. **Géotechnique**: 46: 2: 357-362, 1996.

KACZMAREK, M.; HUECKEL, T.; CHAWLA, V.; IMPERIALI, P. Transport through a clay barrier with the contaminant concentration dependent permeability. **Transport in Porous Media** 29: 159-178, 1997.

KNOP, A. **Estudo do comportamento de liners atacados por ácido sulfúrico**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

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

KORF, E. P. **Comportamento hidráulico e reativo de uma mistura solo-cimento para aplicação em barreiras de contenção de resíduos ácidos contendo chumbo e cádmio**. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

KRISHNA, A. K. & GOVIL, P. K. Assessment of heavy metal contamination in soils around Manali industrial área, Chennai, Southern India. **Environ Geol** 54:1465-1472, 2008.

LAGREGA, M. D. BUCKINGHAM, P. L. & EVANS, J. C. **Hazardous Waste Management**. McGraw-Hill, Inc., Singapore. p. 1146, 1994.

LEE, J.; SANTAMARINA, J. C. Bender elements: Performance and signal interpretation. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. ASCE. 2005.

LECKIE, F. A.; DAL BELLO, D. J. *Strength and stiffness of engineering systems*. Springer Science+Business Media, 2009.

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**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.

LOPES JUNIOR, L. S. **Metodologia de previsão do comportamento mecânico de solos tratados com cal**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Rio Grande do Sul), Porto Alegre, 2011.

NASCENTES, R. **Estudo da mobilidade de metais pesados em um solo residual compactado**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2006.

PIRIYAKUL, K. A development of a bender element apparatus. *The Journal of KMUTNB*, v. 20, n. 20., 2010.

PRIETTO, P. D. M. **Resistência e dilatação de solos cimentados: uma abordagem teórico-experimental**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Rio Grande do Sul), Porto Alegre, 2004.

RAJASEKARAN, G.; MURALI, K.; NAGAN, S.; AMOUDHAVALLY, V.; SANTHASWARUBAN, V. Contaminant transport modeling in marine clays. *Ocean Engineering* **32**, 2005.

REGINATTO, C.; THOMÉ, A.; COLLA, L. M.; MENEGHETTI, L. R.; CECCHIN, I. Biorremediação de um solo argiloso contaminado com uma mistura de diesel e biodiesel através da bioventilação. *Ciências Exatas e Naturais*, Vol. 14, nº 1. 2012.

ROWE, R.K. (Coord.) **Geotechnical and geoenvironmental engineering handbook**. Boston: Kluwer Academic, 2001. p. 1088.

ROWE, R. K.; QUIGLEY, R.M.; BOOKER, J.R. **Clayey barrier systems for waste disposal facilities**. E&FN Spon: London –EUA. p. 390. 1995.

ROWE, R. K. *Geotechnical and geoenvironmental engineering handbook*. Kluwer, USA. 2001.

SANTOS, V. C. **Desenvolvimento de equipamento de coluna para ensaio de condutividade hidráulica de longa duração em barreiras compactadas**. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Engenharia da Universidade de Passo Fundo). Passo Fundo-RS, 2013.

SANTOS, J. A soil characterization by dynamic and cyclic torsional shear test. Application to study of piles under static and dynamic horizontal loading. Universidade do Porto, Portugal, 1999.

SASANIAN, S. **The behavior of cement stabilized clay at high water contents.** Thesis (Department of Civil and Environmental Faculty of Engineering Science) The University of Western Ontario London, Canada. 2011.

SHARMA, H. D.; REDDY, K. R. **Geoenvironmental engineering: site remediation, waste containment, and emerging waste management technologies.** New Jersey: John Wiley & Sons, 992 p., 2004.

SILVA, D. P. **Influência da contaminação por cloreto de cobre na resistência ao cisalhamento de solos utilizados em liners.** Dissertação (Mestre em Engenharia Civil – Especialização em Geotecnia) Escola de Engenharia de São Paulo. São Carlos-SP. 2005.

SILVA, J. M. **Estudo de liquefação estática e cíclica de um silte com recurso a ensaios triaxiais com bender elements.** Dissertação (Mestre em Engenharia Civil – Especialização em Geotecnia). Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. Portugal, 2010.

SILVA, S.; FONSECA, A. V.; CONSOLI, N. C. Strength and stiffness properties of mixtures of granitic soil-cement. **ICSMGE - 17<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2009.

SIMATE, S. G.; NDLOVU, S. **Acid mine drainage: Challenges and opportunities.** School of Chemical and Metallurgical Engineering, University of Witwatersrand, Johannesburg, South Africa. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2014.

SINGER, P. E.; STUMM, W. **Acid mine drainage: the rate determining step.** *Science*, v. 167, p. 1121-1123. 1970.

SIVRIKAYA, O. Models of compacted fine-grained soils used as mineral liner for solid waste. *Environmental Geology* 53:1585-1595, 2008.

SPINELLI, L. Comportamento de fundações superficiais em solos cimentados. Dissertação (Mestrado em engenharia) – CPGE/UFRGS. Porto Alegre – RS. 1999.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul.** 2. ed. Porto Alegre - RS: EMATER/RS, p. 222, 2008.

TAYLOR, J., PAPE, S., MURPHY, N. **A summary of passive and active treatment technologies for acid and metalliferous drainage (AMD).** In: 5th Australian workshop on Acid Mine Drainage, Fremantle, Australia. 2005.

TAVARES, M. T. M.; CARVALHO, F. M. Atividade Catalítica de Íons Metálicos e Atuação de Antioxidantes em Reações de Oxidação. **Quim. Nova**, 15, 147, 1992.



TÍMBOLA, R. **Condutividade hidráulica de misturas solo-cimento compactadas submetidas à ação de lixiviados ácidos em ensaios de longa duração**. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Engenharia) Universidade de Passo Fundo. 2014.

TOZETTO, R. **Desenvolvimento de um amplificador com filtro ativo para ensaios com *bender elements***. Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo. 2014.

USEPA, U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 2004. Cleaning up the Nation's waste sites: markets and technology trends. Disponível em: < <http://www.clu-in.org/download/market/2004market.pdf>>. Acesso em: 27 ago. 2012.

VARDANEGA, P. J.; BOLTON, M. D. Stiffness of clays and silts: Normalizing shear modulus and shear strain. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. 2013.

VENDRUSCULO, M. A. **Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para aplicação como reforço de base de fundações superficiais**. Tese (Doutorado em engenharia) – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre. 2003.

VIGGIANI, G. e ATKINSON, J. H. Interpretation of bender elements tests. **Geotechnique** 45, n. 1, 149-154, 1995.

VILHAR, G.; JOVIČIĆ, V. **Measurement and interpretation of the small strain stiffness of BoštanJ silty sand**. Acta geotechnica Slovenica. Slovenia, 2009.

VITALI, O. P. **Efeito da composição de misturas de solo-cimento nos parâmetros de rigidez e de resistência**. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil - Especialização em Geotecnia). Universidade do Porto, 2008.

VITALI, O. P.; RIOS, S.; FONSECA, A. V. Efeito da composição nos parâmetros de resistência e de rigidez de misturas de solo-cimento. **Cobramseg 2012 – XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**. Porto de Galinhas, PE, 2012.

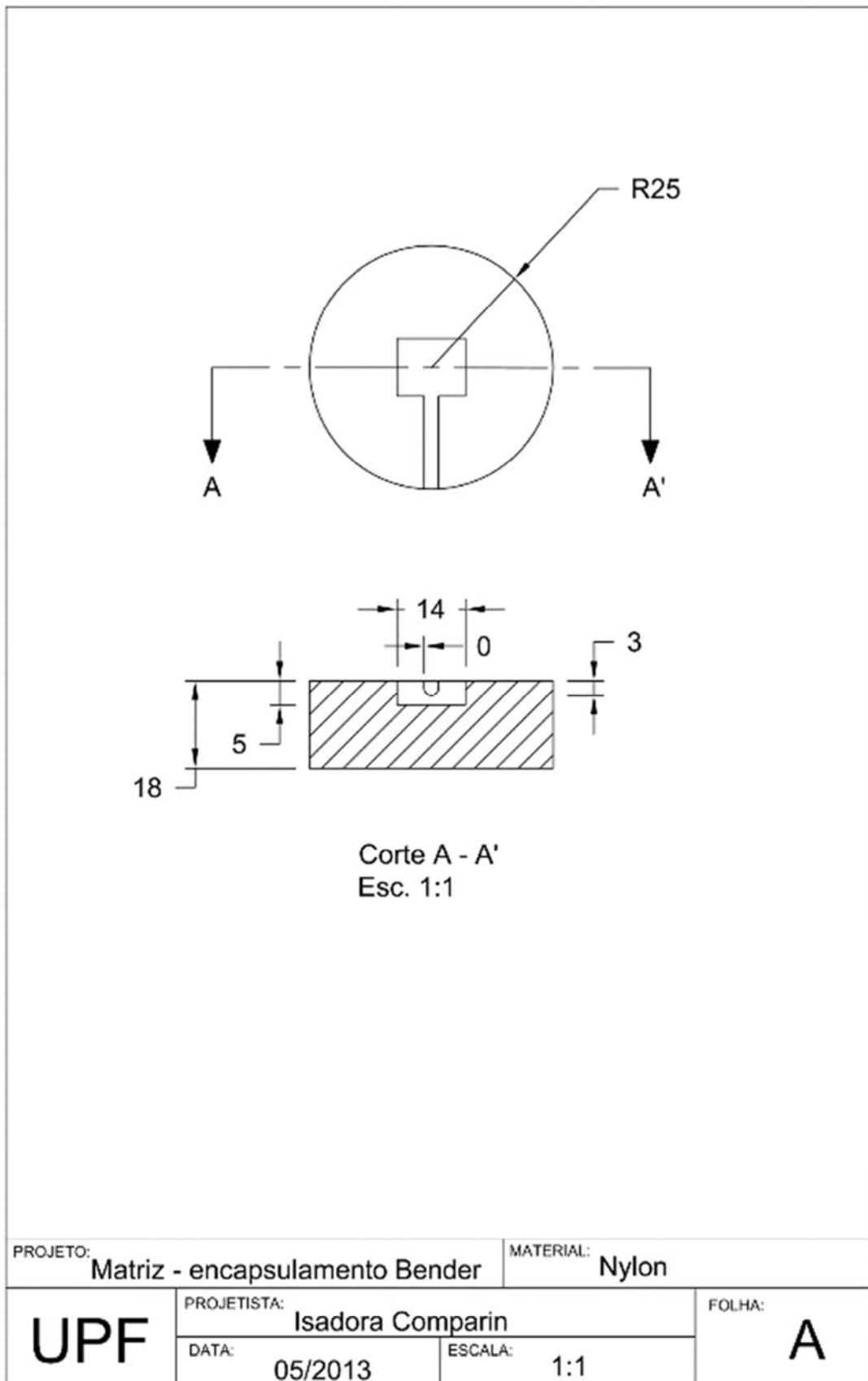
YOON, J. S.; MOON, S.; NAM, J. Y. K.; CHUNG, M. Mass transport of organic contaminants through a self-sealing/self-healing mineral landfill liner. *J Master Cycles Waste Manag* 5: 130-136, 2003.

YONG, R. N.; YAACOB, W. Z. W.; BENTLEY, S. P.; HARRIS, C.; TAN, B. K. Partitioning of heavy metals on soil samples from column tests. *Engineering Geology* 60, 307-322. 2001.

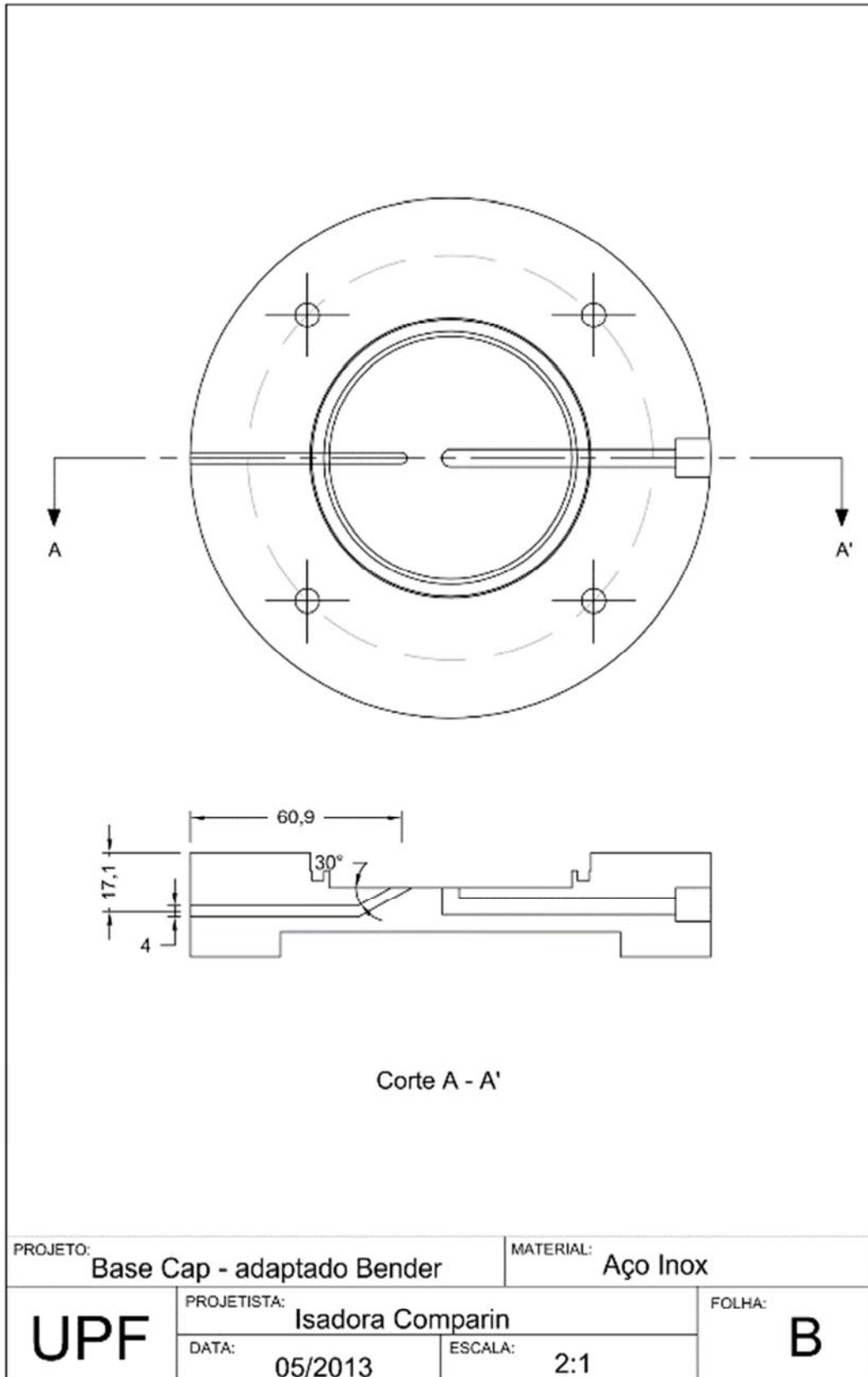
YONG, R.N. **Geoenvironmental engineering: contaminated soils, pollutant fate and mitigation**. Boca Raton: CRC, 2001. 307 p.



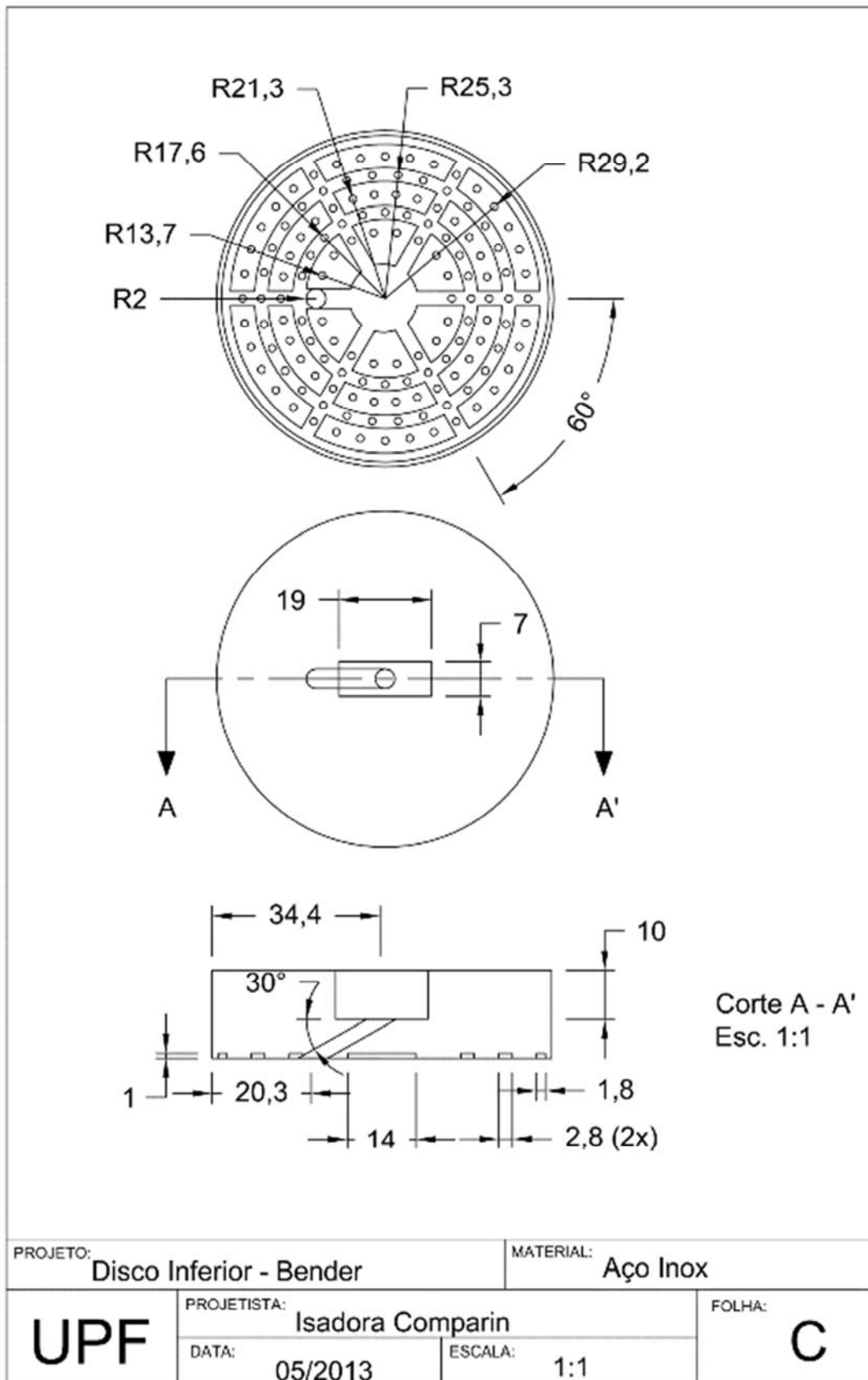
**APÊNDICE A** – Matriz para encapsulamento dos *Bender Elements*.



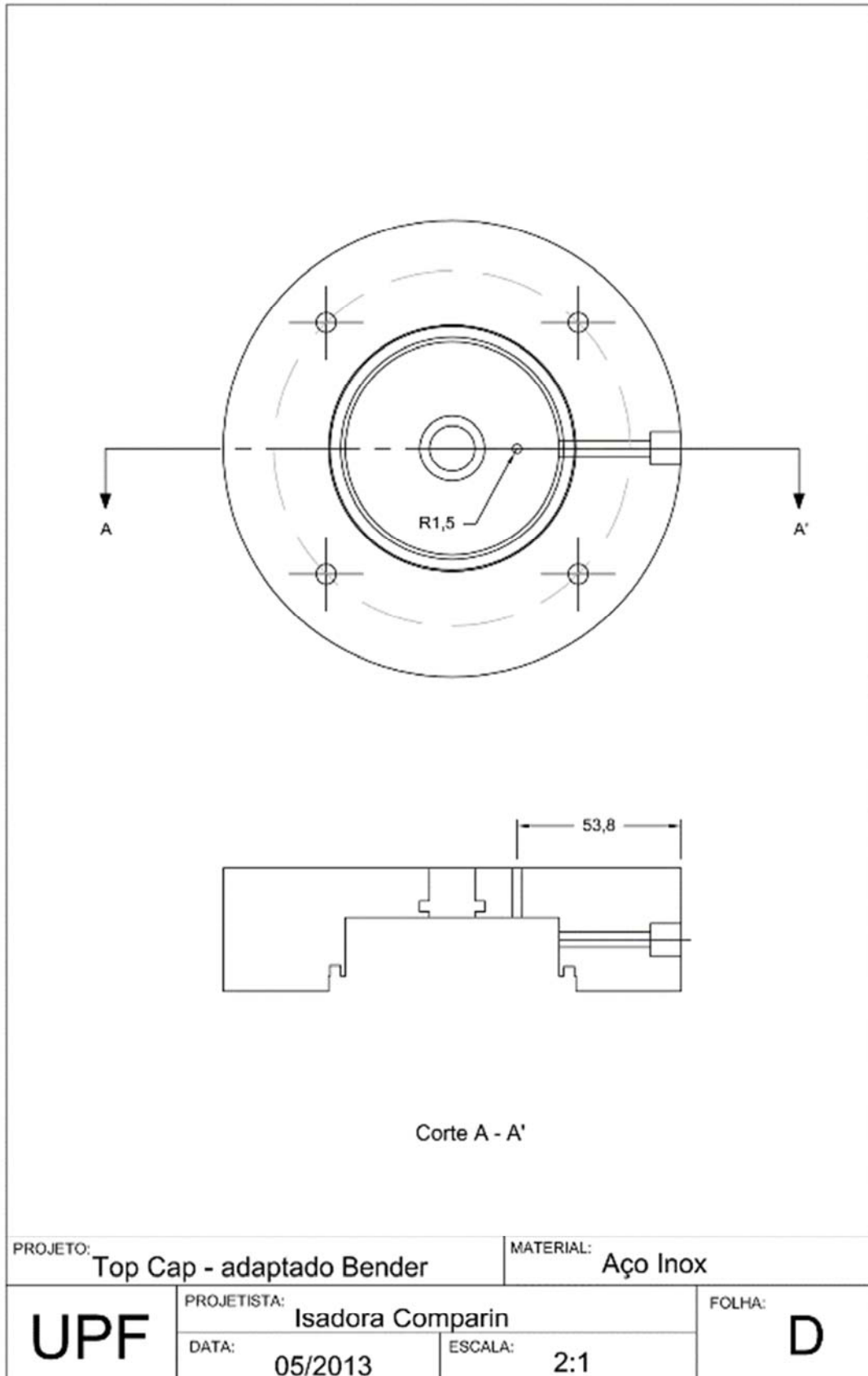
**APÊNDICE B** - Base *cap* da câmara de ensaio com adaptação para o *bender element*.



APÊNDICE C - Disco inferior com adaptação para o *bender element*.



**APÊNDICE D** - *Top cap* da câmara de ensaio com adaptação para o *bender element*.



**APÊNDICE E** - Disco superior com adaptação para o *bender element*.

