



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

**VALTER CAETANO DOS SANTOS**

**EQUIPAMENTO DE COLUNA PARA ENSAIO DE CONDUTIVIDADE  
HIDRÁULICA DE LONGA DURAÇÃO COM APLICAÇÃO DE CARGA  
VERTICAL**

Passo Fundo

2013

VALTER CAETANO DOS SANTOS

EQUIPAMENTO DE COLUNA PARA ENSAIO DE CONDUTIVIDADE  
HIDRÁULICA DE LONGA DURAÇÃO COM APLICAÇÃO DE CARGA  
VERTICAL

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

2013

VALTER CAETANO DOS SANTOS

EQUIPAMENTO DE COLUNA PARA ENSAIO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA  
DE LONGA DURAÇÃO COM APLICAÇÃO DE CARGA VERTICAL

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.

Data de aprovação: Passo Fundo, 26 de abril de 2013.

Doutor Pedro Domingos Marques Prietto  
Orientador

Doutor Francisco Dalla Rosa  
Coorientador

Doutora Rejane Nascentes  
Universidade Federal de Viçosa - UFV

Doutor Lucas Festugato  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Doutor Antônio Thomé  
Universidade de Passo Fundo - UPF

Doutor Maciel Donato  
Universidade de Passo Fundo - UPF

*Dedico este trabalho a minha mãe, Maria,  
de quem sempre tive muito orgulho e  
admiração...*

## AGRADECIMENTOS

À minha mãe Maria, base de tudo, primeira educadora e catequizadora. Com seu apoio incondicional, exemplo de persistência e otimismo, frente aos momentos mais difíceis, me fazendo acreditar que tudo era possível;

Ao meu irmão Vagner, sempre transbordando otimismo e atenção;

Ao meu orientador Pedro Prietto, pela confiança em minha capacidade para o desenvolvimento do equipamento apresentado nesta dissertação;

Ao meu coorientador Francisco Dalla Rosa, pelo auxílio na parte instrumental do equipamento e suas palavras de apoio;

O amigo e colega de pesquisa Eduardo Korf, pelas muitas conversas, troca de idéias e debates acalourados sobre os detalhes construtivos, técnicos, teóricos e operacionais do equipamento, somando uma imensurável contribuição para esta dissertação;

À ex-bolsista de iniciação científica Nicole, pela sua empenhamento em cooperar e realizar, tornando ainda mais envolventes os temas estudados;

Ao amigo Rafael, pelos deslocamentos realizados em Passo Fundo, sempre transportando os materiais, peças e equipamentos componentes da montagem final;

Ao amigo e colega do PPGEng Guilherme, pelas boas conversas na sala de estudos, onde também muito divagamos e acompanhamos de forma detalhada em um regime quase que diário, a surgência da Arena, templo dos tricolores imortais;

Às amigas e colegas do PPGEng (Roberta, Lisi, Isadora, Patrícia e Carol), pelas horas de conversas descontraídas na sala de estudos;

Ao amigo Jean (Sor), com suas frases feitas e muitos provérbios inconclusivos, tornou momentos difíceis, em momentos cômicos;

À secretária do PPGEng Cris, pela cumplicidade e auxílio durante todo o tempo que passei no programa;

À secretária do CETEC Serviços Juliana, pela amizade e prestatividade;

Aos amigos, que mesmo distantes contribuíram de alguma forma para a realização desta.

*“...confie em seu coração  
se os mares explodirem em chamas*

*e viva pelo amor  
mesmo que as estrelas se movam para trás...”*

*(e. e. cummings)*

## RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo projetar, construir e validar um equipamento de coluna modificado, totalmente instrumentado, para aplicação em estudos de condutividade hidráulica em solos compactados percolados por contaminantes ácidos e submetidos à ação de carga vertical estática, simulando, desta forma, o comportamento hidráulico de barreiras impermeáveis de fundo em aterros de resíduos sólidos industriais e barragens de rejeitos de mineração. O desenvolvimento do equipamento seguiu as etapas: dimensionamento, listagem das peças necessárias, elaboração de desenhos técnicos para contratação dos serviços de usinagem, especificação dos sistemas mecânicos, hidráulicos e pneumáticos, programação do software de aquisição de dados, e calibração dos sensores eletrônicos. A validação do equipamento e de sua instrumentação foi feita através da realização de um ensaio piloto com a utilização de um solo argiloso compactado. Durante este ensaio, foi aplicada uma carga estática vertical de 280 kPa, buscando simular uma sobrecarga de resíduos ou rejeitos sobre a barreira. O ensaio compreendeu a percolação de água destilada pelo corpo de prova, até que este atingisse uma condição próxima à saturação, seguida pela percolação de solução contaminante com pH 1. Os resultados obtidos confirmaram a eficiência da aquisição dos dados por parte dos sensores, os quais apresentaram funcionamento adequado, bem como de todas as conexões hidráulicas e pneumáticas, as quais não apresentaram falhas técnica ou vazamentos. O ensaio piloto indicou um coeficiente de condutividade hidráulica relativamente elevado, entre  $1,0 \times 10^{-7}$  m/s e  $4,6 \times 10^{-7}$  m/s. Este valor pode ser explicado por um possível fluxo preferencial na interface entre a parede acrílica da câmara e o corpo de prova.

Palavras-chave: Condutividade hidráulica. Permeâmetro. Instrumentação. Percolação de solução contaminante. Águas residuárias ácidas.

## ABSTRACT

This study aimed to design, build, and validate a fully instrumented modified column apparatus for application in studies of hydraulic conductivity in compacted soils percolated by acidic contaminants and subjected to the action of vertical static loadings, simulating the hydraulic behavior of impermeable bottom barriers in industrial waste landfills and mining tailings dams. The development of the apparatus followed the steps: conceptual design, listing of the needed parts, preparation of technical drawings for contracting machining services, specification of mechanical, hydraulic, and pneumatic systems, software programming for data acquisition, and calibration of electronic sensors. The validation of the apparatus and its instrumentation was performed by conducting a pilot test in a compacted clayey soil. During this test, a vertical static load of 280 kPa was applied to simulate an overload of waste or tailings over the barrier. The test consisted of distilled water percolation through the specimen until it reached a condition close to saturation, followed by leaching a contaminant acidic solution of pH 1. The results confirmed the efficiency of the sensors data acquisition, which showed proper operation, as well as all hydraulic and pneumatic connections, which presented no technical failures or leaks. The pilot study indicated a relatively high coefficient of hydraulic conductivity, ranging between  $1,0 \times 10^{-7}$  m/s and  $4,6 \times 10^{-7}$  m/s. This value might be explained by a possible preferential flow in the interface between the acrylic chamber wall and the soil specimen.

Keywords: Hydraulic conductivity. Permeameter. Instrumentation. Leaching solution contaminant. Acidic wastewater.



## LISTA DE ILUSTRAÇÃO

Figura 1: Coeficiente da condutividade hidráulica em mistura solo-cimento. ....	26
Figura 2: Permeâmetro de parede flexível – câmara triaxial e acumuladores.....	30
Figura 3: Permeâmetros construídos no Laboratório de Geotecnia-DEC/UFV.....	31
Figura 4: Permeâmetro de parede rígida.....	32
Figura 5: Câmara de ensaio utilizada. ....	33
Figura 6: Fluxograma geral da pesquisa.....	35
Figura 7: Equipamento de coluna adaptado. ....	37
Figura 8: Leiaute do equipamento de coluna modificado. ....	39
Figura 9: Resistência do tubo acrílico. ....	41
Figura 10: Célula de adensamento adaptada para ensaio de coluna.....	43
Figura 11: Perfil do solo de estudo.....	44
Figura 12: Campo experimental de geotecnia. ....	44
Figura 13: Mapa da localização da área de estudo. ....	45
Figura 14: (A), (B), (C), (D), (E) e (F) Moldagem do corpo de prova.....	47
Figura 15: Curva de compactação - Proctor normal e modificado.....	48
Figura 16: Preparo de solução contaminante.....	49
Figura 17: Leiaute das conexões hidráulicas pneumáticas e elétricas.....	52
Figura 18: Câmara de ensaio (A) e as peças componentes (B). ....	57
Figura 19: Reservatório montado (A) e suas peças componentes (B).....	57
Figura 20: Câmara de coleta (A) e as peças componentes (B).....	58
Figura 21: Pórtico ou chassi do equipamento.....	58
Figura 22: Equipamento de coluna modificado e seus sistemas. ....	59
Figura 23: Diagrama de funcionamento do SAD. ....	60
Figura 24: Módulo USB de comunicação de dados. ....	60
Figura 25: Transdutor de pressão – K1. ....	61
Figura 26: Transdutor de pressão – SP2.....	61
Figura 27: Transdutor de deslocamento vertical – DG.....	62
Figura 28: Células de carga – PWZL 10. ....	62
Figura 29: Condicionador de Sinal – SG 3016.....	63
Figura 30: Fonte de alimentação. ....	63
Figura 31: Rotina desenvolvida no software. ....	64
Figura 32: Informações de dados complementares. ....	65

Figura 33: Interface IHM instantânea desenvolvida para o pré-ensaio. ....	65
Figura 34: Interface IHM da leitura instantânea e do banco de dados do ensaio. ....	66
Figura 35: Dados elétricos aquisitados pelo SAD. ....	67
Figura 36: Curva de calibração dos transdutor K1 da Ashcroft. ....	68
Figura 37: Curva de calibração dos transdutores SP2 da Sitron. ....	68
Figura 38: Calibração dos transdutores de pressão. ....	69
Figura 39: Curva de calibração do LVDT. ....	69
Figura 40: Calibração do sensor de deslocamento vertical. ....	70
Figura 41: Curva de calibração da célula de carga. ....	70
Figura 42: Calibração da célula de carga. ....	71
Figura 43: Carregamento e leituras realizadas. ....	72
Figura 44: Aplicação de força com o cilindro pneumático. ....	72
Figura 45: Tensão na saída do transdutor - Cilindro pneumático. ....	74
Figura 46: Tensão na saída do transdutor - Reservatório. ....	74
Figura 47: Tensão na saída do transdutor - Câmara de coleta. ....	75
Figura 48: Tensão na saída - LVDT. ....	76
Figura 49: Tensão na saída - Célula de carga. ....	77
Figura 50: Comportamento da permeabilidade ao longo do tempo. ....	78
Figura 51: Comportamento do recalque ao longo do tempo. ....	79
Figura 52: Comportamento da condutividade hidráulica e do recalque ao longo do tempo. ....	79

## LISTA DE TABELA

Tabela 1: Variáveis do experimento no equipamento antigo. ....	36
Tabela 2: Variáveis de controle do equipamento novo. ....	36
Tabela 3: Caracterização geotécnica do solo.....	45
Tabela 4: Análise química do solo. ....	46
Tabela 5: Valores de investigação e diluição da solução contaminante.....	49
Tabela 6: Legenda do leiaute.....	53
Tabela 7: Peças componentes das câmaras de ensaio.....	54
Tabela 8: Peças componentes das câmaras reservatório. ....	54
Tabela 9: Peças componentes das câmaras de coleta. ....	54
Tabela 10: Detalhamento das peças componentes do sistema pneumático.....	55
Tabela 11: Detalhamento das peças componentes do sistema hidráulico. ....	56
Tabela 12: Sistema de aquisição de dados.....	56

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

$\gamma_{\text{sat}}$	Peso específico saturado
$\geq$	Maior igual
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
A	Ampére
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ASE	Área superficial específica
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
B	Boro
BSP	<i>British Standard Pipe</i>
CH	<i>Clay High</i>
Cd	Cádmio
Cr	Cromo
cm	Centímetros
cmolc/dm <sup>3</sup>	Centimol/decímetro cúbico
CTC	Capacidade de troca catiônica
Cu	Cobre
°C	<i>Grau celsius</i>
g	Gramas
Hz	<i>Hertz</i>
i	Gradiente hidráulico
K	Potássio
k	Coefficiente de permeabilidade
kg	Kilogramas
kN/m <sup>3</sup>	Kilonewton/metro cúbico
kPa	Kilopascal
LVDT	<i>Linear Variable Displacement Transducer</i>
MO	Matéria Orgânica
m	Metros
m/s	Metros/segundo
m <sup>2</sup> /g	Metro quadrado/grama
mg.kg	Miligramas x kilograma
mg/L	Miligramas/litro

mL	Mililitros
mm	Milímetros
Mn	Manganês
mV/V	Milivolts/volts
n	Porosidade
Ni	Níquel
NPT	<i>National Pipe Thread</i>
P	Fósforo
pH	Potencial hidrogeniônico
Pb	Chumbo
PM	Proctor Modificado
PN	Proctor Normal
PU	Poliuretano
S	enxofre
s	Segundos
SAD	Sistema de Aquisição de Dados
Sr	Grau de saturação
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico das Américas
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
UPF	Universidade de Passo Fundo
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
UTM	<i>Universal Transversa de Mercator</i>
V	<i>Volts</i>
Vcc	Tensão corrente contínua
W	<i>Watt</i>
w	Teor de umidade
Zn	Zinco
µm	Mícrometro
µg/L	Micrograma/Litro

## SUMÁRIO

1.1	Problema da pesquisa .....	17
1.2	Justificativa.....	18
1.3	Objetivos.....	20
1.3.1	Objetivo geral .....	20
1.3.2	Objetivos específicos .....	20
CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....		21
2.1	Barreiras compactadas impermeáveis e reativas .....	21
2.2	Comportamento hidráulico de longa duração.....	25
2.3	Equipamentos de coluna para ensaios de condutividade hidráulica.....	29
CAPÍTULO 3. METODOLOGIA.....		34
3.1	Projeto experimental.....	34
3.1.1	Fluxograma da pesquisa .....	34
3.1.2	Variáveis do experimento piloto.....	36
3.2	Desenvolvimento do equipamento de coluna modificado.....	37
3.2.1	Especificação e detalhamento do equipamento .....	37
3.2.2	Implementação do sistema de aquisição de dados.....	42
3.3	Construção do equipamento .....	42
3.4	Ensaio piloto de condutividade hidráulica da amostra .....	42
3.4.1	Solo do local de estudo .....	43
3.4.2	Moldagem dos corpos de prova.....	46
3.4.3	Preparo da solução contaminante .....	48
3.4.4	Procedimento do ensaio piloto .....	49
CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....		51
4.1	Projeto e execução do equipamento .....	51
4.2	Execução do sistema de aquisição de dados.....	59
4.2.1	Sistema de aquisição de dados.....	59
4.2.2	Software de processamento dos dados .....	64
4.2.3	Calibração dos sensores.....	67
4.2.3.1	Transdutores de pressão.....	67
4.2.3.2	LVDT .....	69
4.2.3.3	Célula de carga .....	70

4.2.3.4	Cilindro Pneumático .....	71
4.3	Ensaio piloto .....	72
4.3.1	Resultados da implementação dos sensores .....	73
4.3.1.1	Transdutores de pressão.....	73
4.3.1.2	LVDT .....	75
4.3.1.3	Célula de carga .....	76
4.3.2	Resultados do ensaio de permeabilidade da amostra .....	77
CAPÍTULO 5. CONCLUSÃO.....		81
5.1	Comportamento do equipamento.....	81
5.2	Comportamento dos sensores .....	81
5.3	Ensaio piloto .....	82
5.4	Sugestões para trabalhos futuros .....	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		84
APÊNDICE A - Base cap da câmara de ensaio.....		91
APÊNDICE B - Top cap da câmara de ensaio .....		92
APÊNDICE C - Disco drenante inferior da câmara de ensaio .....		93
APÊNDICE D - Disco drenante superior da câmara de ensaio.....		94
APÊNDICE E - Pistão de aplicação de carga vertical.....		95
APÊNDICE F - Haste e porca de fixação dos caps da câmara.....		96
APÊNDICE G - Tubo acrílico da câmara de ensaio .....		97
APÊNDICE H - Base cap da câmara reservatório .....		98
APÊNDICE I - Top cap da câmara reservatório .....		99
APÊNDICE J - Haste e porca de fixação dos caps da câmara reservatório .....		100
APÊNDICE K - Tubo de acrílico da câmara reservatório.....		101
APÊNDICE L - Base cap da câmara de coleta.....		102
APÊNDICE M - Top cap da câmara de coleta.....		103
APÊNDICE N - Haste e porca de fixação da câmara de coleta .....		104
APÊNDICE O - Tubo acrílico da câmara de coleta .....		105
APÊNDICE P - Base das câmaras de ensaio.....		106
APÊNDICE Q - Base das câmaras de ensaio .....		107
APÊNDICE R - Barra roscada/ porca de regulagem.....		108
APÊNDICE S - Suporte das células de carga .....		109
APÊNDICE T - Suporte dos cilindros pneumáticos .....		110
APÊNDICE U - Suporte dos reservatórios.....		111

APÊNDICE V - Disco guia das câmaras de ensaio.....	112
APÊNDICE W - Haste prolongadora do pistão de carga.....	113
APÊNDICE X - Suporte de fixação do LVDT.....	114
APÊNDICE Y - Afastador das câmaras de coleta e célula de carga.....	115
APÊNDICE Z - Conector do pistão ao cabeçote.....	116
APÊNDICE AA – Manual do Operador .....	117



# INTRODUÇÃO

## 1.1 Problema da pesquisa

Em locais de disposição de resíduos com constituintes metálicos ou em áreas contaminadas, para contenção da evolução de plumas de contaminantes, são requeridos sistemas de impermeabilização que atuem como barreiras impermeáveis de contenção da carga de poluentes (*liners*), limitando o escape físico e prevenindo a propagação em subsuperfície (ROWE et al., 1995; SHARMA e REDDY, 2004).

Essas barreiras impermeáveis de solo natural, argiloso e compactado são utilizados para limitar a percolação de contaminantes para camadas mais profundas do solo. Essas barreiras são utilizadas em cobertura de aterros de resíduos para limitar a migração de contaminantes pelo escoamento superficial e aumento da geração de efluentes líquidos contaminados (HEINECK, 2002).

Dentre os principais tipos de resíduos que são normalmente dispostos sobre essas barreiras, destacam-se os resíduos sólidos perigosos de origem industrial ou da mineração. As águas residuárias provenientes da lixiviação deste tipo de resíduos representam uma importante fonte de impacto ambiental, em decorrência da presença de metais tóxicos e de sua constituição ácida (GABAS, 2005).

De acordo com Broderick e Daniel (1990), Favaretti et al. (1994) e Knop (2007), a percolação de fluidos compostos por agentes químicos agressivos, como ácidos, podem afetar a estrutura do solo dessas barreiras, resultando no aumento da condutividade hidráulica em função das mudanças na estrutura e floculação das partículas. Nesse sentido, Grim (1953), relatou que lixiviados com  $\text{pH} < 3$  ou  $\text{pH} > 11$  são os que mais afetam o solo, pois, esses ácidos e bases fortes possuem a capacidade de dissolver os materiais constituintes da fração fina do solo, ocorrendo fissuras que poderão formar canais preferenciais ao fluxo e consequentemente, aumentando a sua condutividade hidráulica.

## 1.2 Justificativa

Considerando os potenciais problemas causados pela estrutura do solo, como a floculação e conseqüente aumento no espaço de vazios, quando em contato com contaminantes ácidos agressivos contendo compostos metálicos, se faz necessário o estudo do comportamento da condutividade hidráulica ao longo do tempo, para avaliar a eficácia em longo prazo da contenção destes líquidos por parte das barreiras compactadas.

Segundo Lemos (2006), o aumento da condutividade hidráulica nestas barreiras compactadas para contenção de percolados é a principal preocupação quanto ao projeto de engenharia, tornando assim, a escolha do material para composição da barreira essencial. Alguns materiais alternativos têm sido estudados para uso em conjunto com o solo, de modo a neutralizar os impactos de contaminantes ácidos agressivos sobre essas barreiras, evitando o aumento da condutividade hidráulica. Um material reativo de caráter básico como o cimento vem sendo estudado para aplicação em misturas ou de forma individual em solos compactados, com a função de neutralizar a acidez provocada pelo contaminante (THAKUR et al. 1992; LEMOS, 2006; KNOP et al., 2008).

A condutividade hidráulica de uma barreira composta por agentes cimentantes é resultado de complexas interações entre os diversos componentes da mistura (LEMOS, 2006). O cimento Portland pode interferir na capacidade de uma mistura compactada para atingir baixos valores de condutividade hidráulica. Alguns autores comentam que a adição de cimento pode ocasionar um aumento dos valores, no entanto, também existem evidências de que, quando o cimento é adicionado em baixo teores, a contínua hidratação do cimento pode provocar a redução da condutividade hidráulica em longo prazo (PEARLMAN, 1999; RYAN e DAY, 2002; UFBA, 2005; LEMOS, 2006).

De acordo com ASTM D 1973 (1991), EPA (1992), CETESB (1993), é necessário que estas barreiras possuam uma condutividade hidráulica que atenda a requisitos como valores inferiores à  $10^{-9}$  m/s, além de proporcionar uma capacidade de durabilidade e manutenção desses valores também à longo prazo, perante ao contato com contaminantes com extremos ácidos oriundo de fluidos ácidos, os quais podem causar a floculação das partículas dos minerais que constituem estas barreiras, fazendo com que aumente o fluxo através das mesmas (AUSTIN, 1992; ROWE et al., 1995; YOUNG et al., 1999; MANASSERO et al., 2000; STAVRIDAKIS, 2005; NASCENTES, 2006; KNOP, 2007; FRANCISCA e GLATSTEIN, 2010).

Diversos estudos encontrados na literatura (por ex. PEIRCE e WITTER, 1986; BRODERIC e DANIEL, 1990; HEINECK, 2002; ZHANG et al., 2004; LEMOS, 2006; KNOP, 2007; FRANCISCA e GLATSTEIN, 2010; AMADI et al., 2011) realizaram ensaios de longa duração em equipamentos de adensamento modificado, alguns contendo parede rígida e outros parede flexível. Na maioria dos estudos, foram conduzidos ensaios desde alguns dias até mais de um ano, o que caracteriza uma variabilidade de tempo bem elevada. De maneira geral, com a permeação de contaminantes líquidos ácidos pelas amostras de solos naturais, os autores relatam sensíveis reduções na condutividade hidráulica para as amostras que continham materiais como: cimento, cal, bentonita e/ou cinzas, observando-se em alguns casos o carreamento dos finos e também a conseguinte desestruturação das amostras.

De acordo com a literatura, percebe-se que não há uma padronização e um consenso sobre o tempo de realização deste tipo de experimento e tipo de equipamento utilizado, constituindo-se este elemento a ser aprofundado em pesquisas que possam executar ensaios de longa duração. Além disso, diversos estudos, observaram que a percolação de contaminantes ácidos agressivos podem alterar a condutividade hidráulica das barreiras, podendo causar um aumento na mesma. Não obstante à diversidade de estudos encontrados na literatura, percebe-se que existe a necessidade de estudos mais aprofundados que possam explicar o real comportamento hidráulico desses materiais, frente à percolação de contaminantes ácidos em longa duração e sob ação de carga estática vertical oriunda da disposição de resíduos, justificando assim o desenvolvimento de um equipamento capaz de avaliar ao longo do tempo o comportamento hidráulico de barreiras compactadas, quando submetidas à percolação de contaminantes ácidos.

Nesse sentido, com o desenvolvimento de um equipamento capaz de determinar a condutividade hidráulica com longa duração em barreiras compactadas, esse trabalho insere-se dentro de uma linha de pesquisa que busca desenvolver novos equipamentos geotécnicos, com o intuito de resolver os problemas relativos à geotecnia ambiental, tratamento e disposição de resíduos sólidos. O conhecimento sobre o ambiente e as técnicas que minimizem os impactos negativos sobre este se faz necessário para que se possa obter um desempenho adequado e o gerenciamento de obras de infraestrutura.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo geral**

Desenvolver, montar e testar um equipamento de coluna modificado para avaliar o comportamento hidráulico de barreiras compactadas com aplicação de carga vertical.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

- a) Desenvolver um equipamento de coluna modificado com aplicação de carga estática vertical, para ensaios de condutividade hidráulica com longo prazo e detecção de deslocamentos verticais da amostra ensaiada;
- b) Implementar instrumentação digital, com a utilização de sensores eletrônicos, para verificar possíveis alterações na amostra com aquisição dos dados adquiridos;
- c) Testar o sistema de aquisição de dados, quanto à imperfeição decorrente da programação e ou falhas técnicas, tais como: corte na alimentação do sistema ou não funcionamento adequado dos sensores;
- d) Realizar ensaio piloto com amostra de solo compactada para determinação do seu comportamento hidráulico, com a finalidade de verificar o funcionamento pleno do equipamento e garantir sua tolerância aos possíveis vazamentos e perdas de pressão perante os futuros ensaios.

## CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Barreiras compactadas impermeáveis e reativas

As barreiras compactadas (*liners*) podem ser definidas como sendo camadas de material argiloso, que servem como barreira horizontal impermeável, utilizadas 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 prevenir a propagação de contaminantes em subsuperfície (SHARMA e REDDY, 2004). Os *liners* devem apresentar características como baixas condutividades hidráulicas, além de agirem como filtro químico, absorvendo ou atenuando certos compostos (KALTEZIOTIS et al., 1994; ROWE et al., 1995).

As barreiras compactadas podem ser utilizadas como forma de contenção física para barragens de rejeitos de mineração, afim de minimizar a propagação destes compostos tóxicos, de um local para o outro, através da limitação do escape físico. Algumas soluções adotadas incluem o uso de *liners* em lagoas, para contenção de resíduos e para proteção em casos de derramamentos em volta de tanques de armazenamento de produtos perigosos (ROWE, 2001).

Dentre os principais tipos de resíduos que são normalmente dispostos sobre essas barreiras, destacam-se os resíduos sólidos perigosos de origem industrial ou da mineração. As águas residuárias provenientes da lixiviação deste tipo de resíduo, representam uma importante fonte de impacto ambiental, em decorrência da presença de metais tóxicos e de sua constituição ácida (GABAS, 2005).

De acordo com Ribeiro et al. (2010), o comportamento reativo das barreiras compactadas submetidas ao contato com lixiviados advindos da mineração (Drenagem ácida da mineração - DAM) é afetado pela alta acidez gerada quando minerais sulfetados (pirita -  $\text{FeS}_2$ ) presentes em resíduos de mineração (rejeito ou estéril) se oxidam devido a presença de água. O percolato produzido é enriquecido com metais tóxicos dissolvidos em ácido sulfúrico, o que confere alto grau de acidez (SOARES e TRINDADE, 2003; GUEVARA, 2007).

Os metais apresentam grande ou baixa mobilidade no ambiente em que estão presentes e, dependendo desta característica local, podem desencadear problemas de toxicidade aos organismos que tiverem expostos, como seres humanos, animais e plantas (REPETTO, 2005;

OGA, 1996). Krishna e Govil (2008) argumentam que a contaminação por metais pode apresentar alta persistência ambiental e alta mobilidade no ambiente, desencadeando bioacumulação e bioconcentração nos organismos devido à sua lipossolubilidade.

Dentre os principais metais presentes em lixiviados oriundos da disposição de resíduos inorgânicos industriais e de mineração podem ser citados o Cd, Pb, Ni e Cr. Os seus efeitos na mobilidade do solo e impactos ao ambiente e saúde humana são mencionados na sequência (BAIRD, 2002; MEURER, 2010):

- a) Cádmiu: tem mobilidade média quando adsorvido moderadamente em óxidos metálicos e em argilas e, se formar precipitados insolúveis com carbonatos e sulfitos, adere à baixa mobilidade. O Cd e seus compostos contêm uma toxicidade de 2 a 20 vezes maior que muitos outros elementos-traço;
- b) Chumbo: promove diversos problemas ambientais quando na sua forma iônica. Tanto o sulfeto (PbS) quanto carbonato de chumbo (PbCO<sub>3</sub>) são altamente insolúveis em água, contudo, como são bases fortes, consomem facilmente H<sup>+</sup>. Quanto à toxicidade este é considerado perigoso na sua formas catiônica e também quando ligado à cadeias curtas de átomos de carbono. Do ponto de vista bioquímico, o mecanismo de sua ação tóxica deriva da forte afinidade dos cátions pelo enxofre (S);
- c) Cromo: é um elemento químico encontrado naturalmente em solo, na poeira e em gases vulcânicos. A biodisponibilidade, mobilidade e toxicidade deste metal depende do seu estado de oxidação. O Cr<sup>6+</sup> é móvel no solo e fracamente adsorvido em alto pH e seu oxianion é moderadamente adsorvido em óxidos metálicos em pHs baixos, além de ser considerado extremamente tóxico e cancerígeno para os seres humanos. Porém, quando este elemento é reduzido para Cr<sup>3+</sup>, torna sua mobilidade baixa por ser facilmente adsorvido pelas argilas e óxidos metálicos, além de formar precipitados insolúveis;
- d) Níquel: o Ni<sup>2+</sup> forma óxidos metálicos e sulfitos insolúveis, e forma complexos moderadamente solúveis em alto pH.

As águas residuárias ácidas, provenientes da lixiviação de resíduos inorgânicos, levam combinações de enxofre e pH ácido para as águas superficiais e podem infiltrar no solo, transportando os metais presentes e contaminando as águas subterrâneas (KNOP, 2007;

SOARES e TRINDADE, 2003). Deste modo, a prevenção da contaminação por metais é fundamental, pois o processo de descontaminação é financeiramente elevado e difícil.

Em aterros de resíduos e barragens de contenção de rejeitos de mineração, os sistemas de barreiras impermeáveis de fundo têm papel fundamental na impermeabilização e retenção do fluxo desses poluentes e são constituídos geralmente de mantas de geossintéticos impermeáveis, associadas a camadas de solo impermeável (OLIVEIRA e JUCÁ, 2004).

As barreiras impermeáveis de solo compactado apresentam grande vantagem quando utilizadas em aterros de resíduos sólidos, pois, de acordo com Oliveira e Jucá (2004), são alternativas de baixo custo, além de se mostrarem bem eficientes para impermeabilização de fundo, lateral e superior. Segundo Knop (2007), as barreiras de argila compactada para contenção de resíduos são as mais tradicionalmente empregadas, pois, possuem um baixo custo de execução e o material argiloso é abundante e fácil de ser encontrado, muitas vezes no próprio local de aplicação.

As barreiras impermeáveis são tecnologias que podem ser usadas tanto na zona saturada como na zona não-saturada (vadosa) e incluem a combinação ou a utilização individual de um, dos seguintes componentes: barreiras verticais para limitar a propagação lateral de poluentes e barreiras de fundo para limitar o fluxo descendente de poluentes. Juntamente com estas técnicas, pode-se realizar a aplicação de outras técnicas de remediação de poluentes auxiliares (SHARMA e REDDY, 2004).

De acordo com Souza (2009) e Basso (2003), estas camadas impermeabilizantes, de solo compactado, possuem a função de evitar a contaminação do subsolo e de aquíferos subjacentes pela migração de poluentes. Dessa forma, uma barreira impermeável ideal, seria aquela que proporcionasse baixa permeabilidade e um retardamento dos contaminantes. Segundo Sharma e Reddy (2004), tais barreiras devem ser construídas com solo argiloso compactado. O critério de seleção do material argiloso deve prover maior peso específico e baixa permeabilidade. Os autores comentam ainda, que estas barreiras devem apresentar quantidades suficientes de argilominerais (como por ex. a montmorilonita) para garantir baixas permeabilidades e reduzir a migração de contaminantes.

Muitos materiais reativos vêm sendo estudados nos últimos anos a fim de propiciar uma melhor remediação/degradação, para diferentes tipos de compostos inorgânicos, dentre eles os metais, e orgânicos, derivados de solventes de origem industrial e derivados de petróleo. Dentre os principais estudos encontrados na literatura, citam-se o uso de calcário, cimento Portland, bentonita e cinzas em misturas ou em aplicação individual em solos

compactados (THAKUR et al., 1992; JESUS, 2004; NOBRE et al., 2007; KNOP et al., 2008; AMADI et al., 2011).

As barreiras solo + bentonita + cimento ou solo + cimento são uma forma de constituição das barreiras impermeáveis. A adição de cimento nestas barreiras pode ocasionar o aumento da permeabilidade nas mesmas, porém, há um acréscimo na capacidade reativa para a imobilização de contaminantes, funcionando como um material de contenção e remediação ao mesmo tempo (SHARMA e REDDY, 2004).

Segundo Sharma e Reddy (2004), as barreiras solo-bentonita são uma alternativa utilizada para contenção de resíduos industriais. De acordo com os autores, adotando um teor de 1 % até 5 % de massa seca em bentonita nas barreiras impermeáveis, é possível atingir condutividades hidráulicas entre  $10^{-8}$  m/s a  $10^{-10}$  m/s. Essa técnica é amplamente aplicada em solos compactados, que não possuem capacidade de atingir permeabilidades inferiores a  $10^{-9}$  m/s, com a compactação na umidade ótima e com a aplicação de altas energias de compactação.

A umidade do solo, o método de compactação e a energia de compactação têm influência direta sobre a condutividade hidráulica do solo compactado. Estudos em laboratório têm mostrado que quando o solo é compactado na umidade ótima e com altas energias de compactação obtém-se baixa condutividade hidráulica. Para se obter condutividade hidráulica inferior a  $10^{-9}$  m/s, valor requerido pela legislação e órgãos de controle ambiental, os materiais da composição de barreiras devem conter porcentagem de finos  $\geq 20$  % a 30 %, índice de plasticidade  $\geq 7$  % a 10 %, porcentagem de pedregulho  $\leq 30$  % e máximo tamanhos das partículas de 25 mm a 50 mm (DANIEL, 1993; CETESB, 1995, DANIEL e KOERNER, 1995; ROWE et al., 1995, MANASSERO et al., 2000).

No caso, da disposição de resíduos sólidos sobre as barreiras impermeáveis, também há a preocupação em relação à influência da carga vertical da massa de resíduos aplicada sobre a barreira. Neste caso, o fluxo dos contaminantes poderá ser modificado em virtude da adição de uma sobrecarga sobre a barreira, a qual poderá favorecer ou dificultar a migração dos contaminantes, em função de possíveis mudanças estruturais. Segundo Knop (2007), no caso da disposição de resíduos sobre camadas compactadas, as mesmas podem sofrer variação em sua compressibilidade, apresentando recalques mediante ao contato de resíduos químicos agressivos, como os de pH ácido.



## 2.2 Comportamento hidráulico de longa duração

Em barreiras de solo impermeáveis e reativas, quando submetidas a contaminantes ácidos agressivos, estudos mais aplicáveis na literatura (por ex. PEIRCE e WITTER, 1986; BRODERIC e DANIEL, 1990; HEINECK, 2002; ZHANG et al., 2004; LEMOS, 2006; KNOP, 2007; AMADI et al., 2011) para avaliar a condutividade hidráulica são os ensaios de longa duração, porque são capazes de avaliar o comportamento, eficácia e durabilidade ao longo do tempo, perante o contato com contaminantes ácidos agressivos.

A condutividade hidráulica, segundo Souza (2009) e Bedin (2010), é um parâmetro que depende de uma variedade de fatores, teor de umidade na moldagem, grau de saturação, método de compactação, gradiente hidráulico, tamanho das partículas do solo, tamanho dos poros, composição química do fluido permeante e índice de vazios. Ainda, de acordo com (BOSCOV, 1997) a estrutura é o fator que mais influencia na permeabilidade em barreiras de argila compactada, podendo esta, ser afetada pelo tipo de equipamento utilizado, seja em laboratório ou campo.

Em laboratório, a condutividade hidráulica pode ser medida, com a utilização de permeâmetro de parede rígida ou flexível ou mesmo em ensaios triaxiais, procedendo a realização dos ensaios sempre observando o controle do ingresso de fluido na amostra, podendo este ser realizado de diversas formas: testes com carga constante, carga variável ou taxa de fluxo constante (BEDIN, 2010). Ainda, este autor comenta que, a Lei de Darcy, relaciona a taxa de fluxo com o gradiente hidráulico, desde que, a altura e a área transversal da amostra sejam conhecidas. Assim, pode-se determinar a condutividade hidráulica com a medição da taxa de fluxo e da carga hidráulica aplicada na amostra.

Já em campo, para determinação da condutividade hidráulica, destacam-se os ensaios de sondagem de simples reconhecimento, piezômetros, ensaios de infiltração e bombeamento. Porém, essa determinação em campo resulta em valores de grande dispersão, devido ao fato da composição do solo apresentar grande heterogeneidade em um mesmo horizonte. De acordo com Bedin (2010), os ensaios de laboratório podem ser bastante precisos no que se refere as amostras ensaiadas, mas muitas vezes as amostras não representam bem a realidade que se tem em campo.

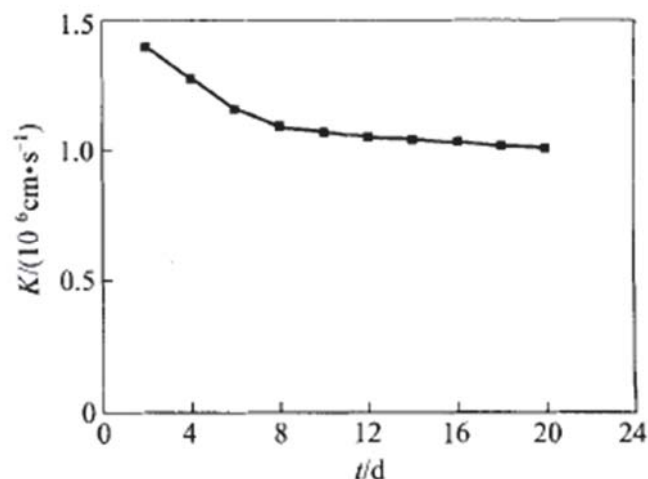
A principal preocupação no projeto das barreiras de contenção é a condutividade hidráulica. O seu desempenho a longo prazo, competente de sistemas de revestimento e de base são uma questão crítica na concepção e construção de depósitos de resíduos, devido as diversas interações associadas ao lixiviado gerado pelos resíduos ou rejeitos (AMADI et al.,

2011). Por mais que existam outros parâmetros de grande importância para projetos de engenharia, como o custo, a resistência dos materiais e os métodos utilizados, é importante avaliar a condutividade hidráulica com contaminante pelo fato de que, com esta, torna-se possível prever o comportamento das barreiras hidráulicas contaminadas por substâncias perigosas (LEMOS, 2006).

A condutividade hidráulica de uma barreira composta por agentes cimentantes é resultado de complexas interações entre os diversos componentes da mistura (LEMOS, 2006). O cimento Portland pode interferir na capacidade de uma mistura compactada para atingir baixos valores de condutividade hidráulica. Alguns autores comentam, que a adição de cimento pode ocasionar um aumento dos valores, no entanto, também existem evidências de que, quando o cimento é adicionado em baixos teores, a contínua hidratação do cimento pode provocar a redução da condutividade hidráulica em longo prazo (PEARLMAN, 1999; RYAN e DAY, 2002; UFBA, 2005; LEMOS, 2006).

De acordo com Zhang et al. (2004), a condutividade hidráulica da barreira compactada solo-cimento diminui gradualmente com o tempo até tornar-se praticamente constante, como mostra a Figura 1. A conquista desta estabilidade é devido à total hidratação da argila e do cimento da barreira, e consequentemente à constante infiltração.

Figura 1: Coeficiente da condutividade hidráulica em mistura solo-cimento.



Fonte: Adaptado de Zhang et al. (2004).

De acordo com Boscov (1997) e Daniel (1993), a permeabilidade pode sofrer alterações significativas, quando estiver expostas por tempos prolongados a ácidos fortes, solventes orgânicos e outros produtos químicos cáusticos, podendo dissolver os materiais do

solo, formando canais preferenciais e resultar em vazamentos elevados através de barreiras de revestimento devido ao aumento na condutividade hidráulica. Por isso, nesse tipo de barreira o estudo mais aplicável é o de condutividade hidráulica de longa duração, porque ele é capaz de avaliar o comportamento perante o contato com contaminantes ácidos agressivos, no que diz respeito à eficácia e durabilidade das barreiras. Quando ácidos concentrados são permeados pelo solo, a condutividade hidráulica apresenta declínio inicial e seguidos aumentos. Com isso, revestimentos com a funcionalidade de reter somente água, podem apresentar percolações bastante superiores àquelas esperadas.

Alguns autores (como por exemplo, Jesus, 2004; Nobre et al., 2007; Knop et al., 2008; Lemos, 2006), comentam a possibilidade da utilização de misturas em pequenas quantidades, de calcário e cimento, com a finalidade de reduzir a condutividade hidráulica em barreiras compactadas.

Estudos como os de Lemos (2006), Knop (2007), Korf (2011) têm revelado que a adição de cimento portland em barreiras de solo contribui na atenuação dos contaminantes ácidos, aumentando o pH e diminuindo a sua mobilidade, além de reduzir a condutividade hidráulica das barreiras quando adicionado em baixos teores, melhorando desta forma a capacidade da barreira em controlar ao mesmo tempo, as componentes física e físico-químicas do transporte de contaminantes. Estudos relacionando a permeabilidade de misturas solo-cimento compactadas, indicam que amostras com diferentes proporções de sólido-líquido ou com a mesma proporção sólido-líquido, mas com proporções de cimento-argila diferenciadas, tem sua condutividade hidráulica alterada (ZHANG et al., 2004).

Neste contexto, os agentes químicos podem atacar os minerais do solo e modificar a estrutura do solo, de acordo com Boscov (1997), os minerais do solo normalmente não são dissolvidos pelo ataque de contaminantes, salvo sob acentuados valores de pH. Segundo Madsen (1994), somente soluções com altas concentrações influenciam a estrutura dos solos.

No entanto, de acordo com Madsen e Mitchell (1989), os efeitos das substâncias químicas inorgânicas são consistentes, sendo que o pH pode causar dissolução de minerais do solo. Os ácidos tendem a causar floculação dos mesmos, modificando assim o espaço dos vazios. Dessa forma, os efeitos dos ácidos em barreiras podem ser significativos quando as partículas não são impedidas de se moverem.

Alguns autores relatam que as variações da condutividade hidráulica em camadas compactadas de argila, podem aumentar quando esta é exposta a percolados químicos oriundos de áreas de disposição de resíduos (por ex. FERNANDEZ e QUIGLEY, 1991; KACZMAREK et al., 1997; NASCENTES, 2003).

Segundo estudos de Bastos et al. (2008), que avaliou a permeabilidade de quatro materiais para utilização como barreiras compactadas para aterros de resíduos, os solos argilosos apresentam-se como os mais apropriados para esta aplicação. Outros estudos desenvolvidos por Silveira et al. (2007) avaliaram a permeabilidade de um Latossolo Amarelo distrófico de Bacarena - PA e obtiveram valores da ordem de  $10^{-10}$  m/s, para o material compactado na energia normal e umidade ótima, o que garante a aplicação do solo como material de impermeabilização de depósito de rejeitos.

Em ensaios de lixiviação em barreiras compactadas, Braga et al. (2007) observaram que a condutividade hidráulica apresentou um sensível aumento quando percolada por solução contaminante ácida, contendo elementos metálicos.

De acordo com Korf (2011), o cimento se constitui um agente com potencial uso em barreiras impermeáveis, pois é capaz de atuar como elemento reativo quando utilizado em barreiras impermeáveis de contenção e, desde que utilizado em pequenas quantidades, poderá agregar poder reativo as barreiras sem que se comprometam suas baixas permeabilidades. Notadamente, este material é largamente utilizado na construção civil, sendo assim de fácil aquisição. Devido ao seu poder reativo, se faz necessário um estudo mais amplo quanto a sua utilização como mistura em pequenas quantidades em barreiras impermeáveis, de modo a verificar se o mesmo possui significativa influência no aumento da permeabilidade e se pode ser empregado como um material integrante na construção dessas barreiras, agregando caráter reativo e não modificando as baixas permeabilidades.

Alguns autores como (por ex. PEIRCE e WITTER, 1986), comentam que em se tratando de ensaios de permeabilidade, não existem consensos em relação a quando os ensaios devem ser encerrados. Isso torna-se ainda mais importante, quando nestes ensaios, os corpos de prova são percolados por líquidos contaminantes, contendo características ácidas, pois devem ser estabelecidos os momentos em que estas substâncias são introduzidas. Frequentemente são adotados, o estado em que supõe-se que o solo tenha atingido a constância de vazão.

De maneira geral, na literatura sabe-se que a percolação de contaminantes ácidos altera a condutividade hidráulica das barreiras que contenham adição de cimento, podendo ocasionar no aumento, dependendo do teor adicionado, e redução, em decorrência das reações de hidratação ao longo do tempo. Diversos estudos encontrados na literatura (por ex. PEIRCE e WITTER, 1986; BRODERIC e DANIEL, 1990; HEINECK, 2002; ZHANG et al., 2004; LEMOS, 2006; KNOP, 2007; FRANCISCA e GLATSTEIN, 2010; AMADI et al., 2011) realizaram ensaios de longa duração em equipamentos tanto de parede rígida como de parede

flexível. Na maioria dos estudos, foram conduzidos ensaios desde alguns dias até mais de 1 ano, o que caracteriza uma variabilidade de tempo elevada. De maneira geral, com a permeação de contaminantes líquidos ácidos pelas amostras, os autores relatam sensíveis reduções na condutividade hidráulica para as amostras que continham material cimentante, cal, bentonita e cinzas e incremento na mesma para as amostras naturais de solo, observando-se em alguns casos o carreamento dos finos e, também a conseguinte desestruturação das amostras.

Existe a necessidade de estudos mais aprofundados que possam explicar o real comportamento desses materiais, frente à percolação de contaminantes ácidos ao longo do tempo. Como não há uma padronização e um consenso sobre o tempo ideal de ensaio, constitui-se este também um elemento a ser aprofundado em pesquisas que possam executar ensaios de longa duração.

### **2.3 Equipamentos de coluna para ensaios de condutividade hidráulica**

Equipamentos de coluna podem ser utilizados para reproduzirem o transporte de um poluente pelo solo e permitem a determinação de parâmetros de transporte de contaminantes e suas relações bio-físico-químicas, além da prévia determinação da condutividade hidráulica para solos. O equipamento de coluna é normatizado de acordo com a norma americana ASTM D4874 (1995). O ensaio consiste em duas etapas, sendo a primeira de saturação do corpo de prova (material que normalmente é composto por solo natural + mistura) com água destilada, para posterior determinação da condutividade hidráulica e a segunda etapa é caracterizada pela percolação de solução ácida enriquecida com metais traço, para determinação dos parâmetros de transporte des no material poroso de interesse. Este ensaio é utilizado para estudar o comportamento quanto à dissipação do contaminante de interesse no meio poroso saturado.

As mais diversas configurações de equipamentos de coluna modificados vêm sendo construídos a partir da norma D4874 da ASTM (1995). Os equipamentos de coluna são projetados de duas maneiras: com parede flexível ou com parede rígida, cada qual tem sua aplicação específica.

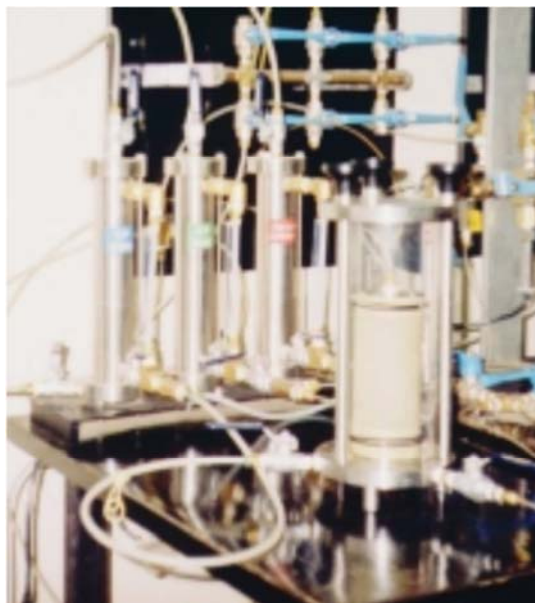
Os equipamentos que possuem parede flexível, baseados na norma D5084 da ASTM (2003), se utilizam de amostras envoltas por uma membrana flexível, tornando possível aplicar tensões horizontais, ou confinantes, no corpo de prova indeformado, a qual tem por objetivo simular as condições reais de campo. É utilizado principalmente para determinação

da condutividade hidráulica e obtenção de parâmetros de transporte de contaminante em que os solutos se movimentam por advecção em solos indeformados e características iguais ao campo, ou seja, não compactado. (DANIEL, 1984; PARK et al., 2002).

Em equipamentos de coluna com parede rígida, são baseados na ASTM D5856 da ASTM (2007), a amostra deformada é moldada diretamente dentro do cilindro de ensaio. Equipamentos configurados nestes moldes também possuem o objetivo de determinar a condutividade hidráulica do solo, onde os corpos de prova são caracterizados por apresentarem maior peso específico e o transporte de contaminante se dá predominantemente por difusão (KNOP, 2007).

Heineck (2002) observou a condutividade hidráulica em *liners* contendo adições de cinzas de fundo, bentonita e fibras de polipropileno. Para isso, construiu um permeâmetro de parede flexível, como pode ser observado na Figura 2. Com os corpos de prova possuindo dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. A autora pode observar uma redução significativa na condutividade hidráulica com a adição de bentonita na areia, o que minimizou o resultado em cinco ordens de magnitude. A adição de bentonita nas cinzas de fundo não apresentou significativa alteração, sendo observada uma redução de apenas uma ordem de magnitude. Amostras de areia enriquecida com 9 % de bentonita tiveram sua condutividade hidráulica reduzida para  $2 \times 10^{-8}$  m/s, concluindo que as amostras poderiam ser utilizadas como *liners* de cobertura. A autora observou que o caulim atingiu a condutividade hidráulica inferior a  $1 \times 10^{-9}$  m/s, podendo ser utilizado como *liner* de fundo ou de cobertura.

Figura 2: Permeâmetro de parede flexível – câmara triaxial e acumuladores.



Fonte: Heineck (2002).

Segundo Heineck (2002), geralmente quanto maior o diâmetro da amostra, mais representativo é o resultado obtido, sendo recomendado a utilização de amostras entre 25 mm até 150 mm de diâmetro. A razão  $L/D$  (altura/ diâmetro) é muito variável, sendo encontrado na literatura valores entre 0,25 a 2. Ainda, a autora comenta que, para permeâmetros de parede flexível, recomenda-se  $L/D = 1$ , de modo a evitar a diferença de tensão efetiva ao longo da amostra, a qual também influenciaria na condutividade hidráulica.

De acordo com Nascentes (2006), ensaios de longa duração em equipamentos de coluna podem trazer alguma semelhança à uma câmara triaxial, conforme mostrado na Figura 3. A autora construiu um equipamento com materiais inertes (PVC e acrílico), afim de evitar reação com solução contaminante. O equipamento tem capacidade de ensaiar, simultaneamente, quatro corpos de prova com dimensões de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, estes recebem fluxo de fluido percolante ascendente. Ainda, os corpos de prova recebem tensão de confinamento para simular as tensões horizontais de campo. Já a coleta dos efluentes percolados através dos corpos de prova em cada coluna foi realizada com uma bureta de 50 mL.

Figura 3: Permeâmetros construídos no Laboratório de Geotecnia-DEC/UFV.



Fonte: Nascentes (2006).

Um modelo de permeâmetro de parede rígida foi projetado por Lemos (2006), do tipo *compaction mold permeameter*, com fluxo ascendente, conforme a Norma Americana ASTM

D5856 (2007). Este, por sua vez, teve o propósito de utilização para todos os tipos de materiais granulares, compactados ou misturados com fluidos de diferentes viscosidades. Sendo ele apropriado para verificar a condutividade hidráulica em solos com baixas permeabilidades, da ordem de  $10^{-9}$  m/s. Os corpos de prova utilizados possuíam dimensões que atendiam as recomendações para razão L/ D igual a 1.

Para a confecção deste equipamento, Lemos (2006) utilizou materiais em aço inoxidável que compunha a câmara de ensaio, com dimensões de 150 mm de diâmetro e 150 mm de altura e a câmara de reservatório de solução contaminante de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, ambas com espessura igual a 7,4 mm, como mostra na Figura 4. Ainda, possuía mangueiras de *nylon* com diâmetro de 1/4", as quais são inertes quando em contato de fluidos agressivos.

Figura 4: Permeâmetro de parede rígida.



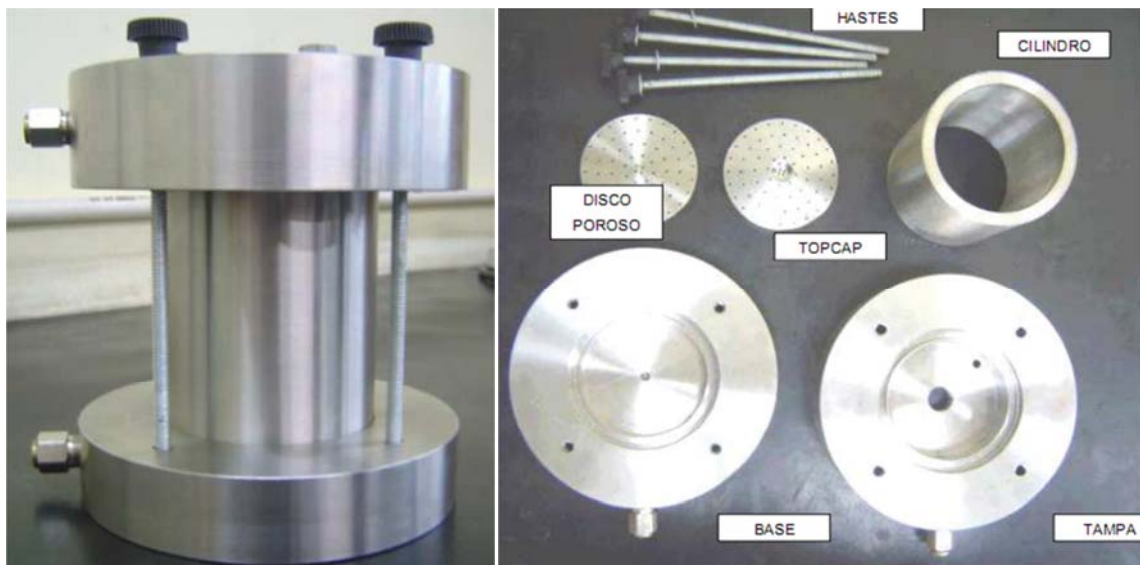
Fonte: Lemos (2006).

Knop (2007) desenvolveu um equipamento de adensamento modificado, em que estudou o comportamento compressivo de amostras de solo natural com adição de cimento compactado, sendo este submetido a percolação de ácidos agressivos. Na Figura 5 é



apresentada a câmara utilizada para moldagem dos corpos de prova e posterior percolação dos líquidos ácidos. A câmara foi usinada em material inoxidável, sendo composta de um base cap (150 mm de diâmetro e 40 mm de espessura), top cap (150 mm de diâmetro e 30 mm de espessura), um disco drenante sob o corpo de prova e outro sobre ele, além de mangueiras de teflon e conexões em aço inox, devido a sua não reatividade com os líquidos utilizados na percolação dos corpos de prova. O ensaio teve duração entre 3 dias, para os corpos de prova sem adição de cimento, até pouco mais de 1 ano, para as amostras contendo 1 % e 2 % de cimento. O autor pode observar a desestruturação da amostra de solo natural quando percolado por rejeitos ácidos, o que tende a proporcionar um efeito de carreamento das partículas finas do solo, ocasionando um aumento na porosidade, fator este, que pode proporcionar a falha operacional de um *liner*.

Figura 5: Câmara de ensaio utilizada.



Fonte: KNOP (2007).

## **CAPÍTULO 3. METODOLOGIA**

### **3.1 Projeto experimental**

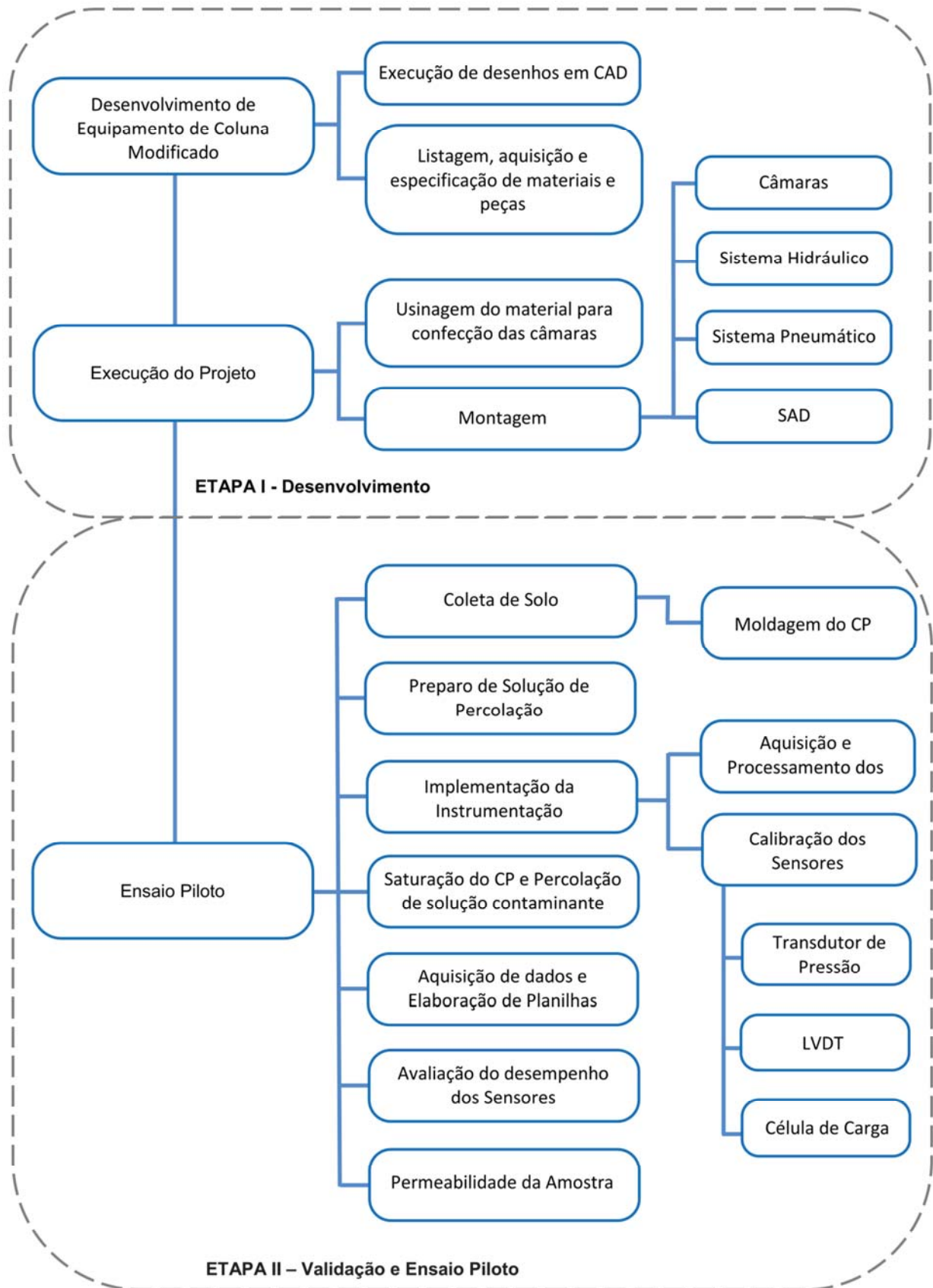
O projeto experimental foi dividido em duas etapas. A etapa 1 refere-se ao desenvolvimento do equipamento, o qual engloba a montagem do equipamento de coluna modificado, listagem e especificação dos materiais e peças adquiridas. Nesta etapa, foi contemplada a execução de desenhos técnicos com o detalhamento necessário e usinagem das peças em aço, as quais foram adquiridas para a confecção das câmaras e do pórtico de suporte ou chassi de base do equipamento.

A etapa 2 contempla a utilização do equipamento, iniciando com a preparação dos materiais: coleta de solo e preparo da solução para percolação. E a realização do ensaio piloto caracterizado pela implementação da instrumentação, tais como: montagem do sistema de aquisição de dados, rotina de programação em software para leitura e gravação dos dados, distribuição dos sensores nas posições adequadas, conexão das ligações elétricas do sistema e calibração dos sensores. Com o sistema montado e aferido, o corpo de prova é permeado com água destilada até atingir ponto próximo à saturação para, então, ser permeado com solução contaminante. Também é verificado o funcionamento dos sensores de aquisição das variáveis físicas da amostra durante o ensaio, através da aquisição dos dados verificados pelos sensores e posterior tabulação e elaboração de planilha e cálculo da permeabilidade e recalques ocorridos na amostra.

#### **3.1.1 Fluxograma da pesquisa**

Na Figura 6 é apresentado o fluxograma geral da pesquisa e as suas respectivas etapas.

Figura 6: Fluxograma geral da pesquisa.



### 3.1.2 Variáveis do experimento piloto

O experimento piloto no equipamento novo foi realizado no laboratório de geotecnia ambiental da UPF e posteriormente comparado com experimento realizado no equipamento antigo. As variáveis do experimento piloto realizado no equipamento antigo estão apresentadas na Tabela 1. Já as variáveis investigadas no experimento piloto, realizado para teste do equipamento novo, estão apresentadas na Tabela 2. A justificativa do uso de cada faixa de variação ou do valor de cada variável será apresentada no item 3.4.2.

Tabela 1: Variáveis do experimento no equipamento antigo.

Variável de controle	Valores Fixados
pH da solução contaminante	1
Carga hidráulica (kPa)	5
Gradiente hidráulico	8,3
Umidade de compactação (%)	26
Teor de cimento adicionado ao solo (%)	2
Peso específico seco de compactação (kN/m <sup>3</sup> )	14,5

Tabela 2: Variáveis de controle do equipamento novo.

Variável de controle	Valores Fixados
pH da solução contaminante	1
Carga hidráulica (kPa)	25
Gradiente hidráulico	40
Carga vertical estática (kPa)	280
Umidade de compactação (%)	26
Teor de cimento adicionado ao solo (%)	2
Peso específico seco de compactação (kN/m <sup>3</sup> )	14,5

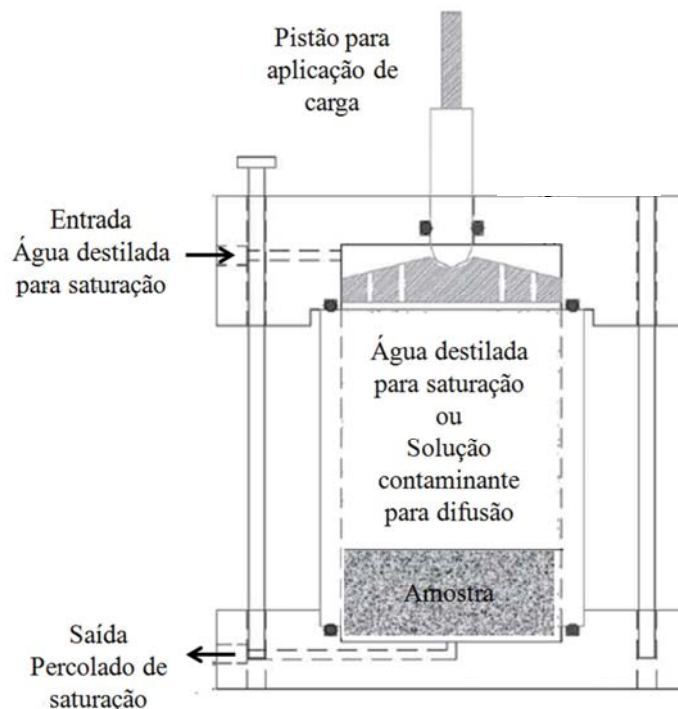
Afim de testar a resistência dos tubos e conexões de forma mais rigorosa aos vazamentos, o ensaio piloto é conduzido com aplicação de pressões hidráulicas, bem acima das quais o equipamento será submetido posteriormente, quando da realização de ensaios que investigarão os comportamentos hidráulicos em solos compactados, com vistas a aplicação em barreiras de fundo de aterro de resíduos, *liners*.

## 3.2 Desenvolvimento do equipamento de coluna modificado

### 3.2.1 Especificação e detalhamento do equipamento

O equipamento de coluna modificado permite ensaiar de forma simultânea, diferentes tipos de amostras com baixa condutividade hidráulica, que necessitem de longo prazo de observação do comportamento hidráulico. O equipamento conta com um sistema de aplicação de carga vertical, com o intuito de simular sobrecargas semelhantes aquelas, sob as quais as barreiras (*liners*) são submetidas, quando integrantes de sistemas de impermeabilização de fundo de aterros de resíduos sólidos. As câmaras utilizadas para ensaiar os corpos de prova, foram adaptadas de um projeto realizado por Knop (2007), o qual está apresentado na Figura 7.

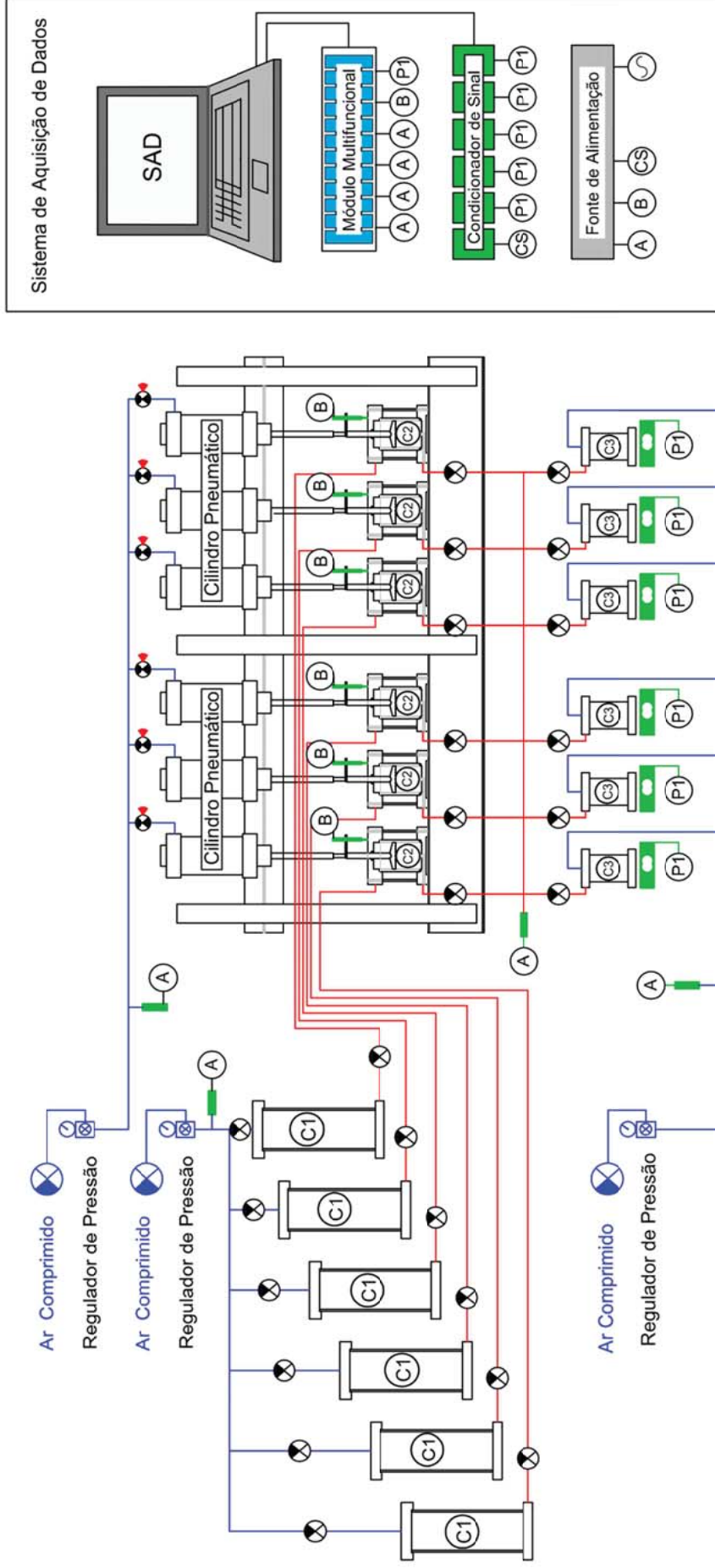
Figura 7: Equipamento de coluna adaptado.



Fonte: Adaptado de Knop (2007).

O equipamento de coluna modificado apresentado nesta dissertação, se constituiu em um pórtico metálico ou chassi, para alocar seis reservatórios de fluidos para percolação, seis câmaras de ensaio, as quais recebem as amostras e seis câmaras para coleta dos líquidos percolados pelas amostras. Todas as câmaras possuem conexões exclusivas por mangueiras que conduzem os fluídos pelas câmaras, conexões pneumáticas para aplicações de pressão, além das conexões elétricas do sistema de aquisição de dados, que realizam as medições necessárias para a determinação das possíveis variações na condutividade hidráulica e recalques na amostra ensaiada. A Figura 8 apresenta um leiaute geral do equipamento, esquematizando as ligações do sistema pneumático, hidráulico e elétrico.

Figura 8: Leiaute do equipamento de coluna modificada.



- Legenda:**
- (A) Transdutor de Pressão
  - (B) LVDT
  - (CS) Condicionador de Sinal
  - (P1) Válvula Tripartida
  - (V) Válvula de Exaustão
  - (C1) Reservatório de fluido de percolação
  - (C2) Câmara de ensaio do Corpo de Prova
  - (C3) Câmara pressurizada para coleta do percolado
  - (A—A) (B—B) (CS—CS) (P1—P1)
  - Representam as ligações elétricas entre sensores e sistema de aquisição de dados

A aplicação da carga vertical nesse ensaio foi de aproximadamente 280 kPa, podendo ser realizada em cada uma das câmaras através do sistema constituído por cilindros pneumáticos, os quais são alimentados por ar comprimido, controlados por reguladores de pressão de precisão, válvulas de exaustão e confirmação das pressões aplicadas com a verificação do transdutor de pressão, dispositivo conectado ao sistema eletrônico de aquisição de dados.

O desenvolvimento e execução das câmaras envolveu a realização de desenhos técnicos no software AutoCAD® com o detalhamento das peças de aço inox ANSI 304 (estáveis ao ataque químico) as quais compõem as câmaras de ensaio, reservatórios de solução contaminante e câmara de coleta. Estas são compostas por: um *base cap* e um *top cap*, um disco drenante de base e um de topo, um cilindro acrílico translúcido, um pistão de aplicação de carga vertical, quatro hastes de fixação dos *caps*, porcas e adaptadores para conexão do pistão de aplicação de carga ao pistão do cilindro pneumático. Ainda, foram executados desenhos do pórtico para alocar ambas as câmaras e fixação dos cilindros pneumáticos.

As interfaces dos *caps* de base e de topo possuem anéis de borrachas do tipo *o'ring*, para proporcionar vedação plena entre a junção de aço inox e acrílico. Ainda, ao interior do centro do *top cap*, por onde entra o pistão de carga vertical para aplicar a carga no corpo de prova, foi acoplado um anel *o'ring* para evitar a perda de pressão interna inserida na câmara de ensaio.

Foi realizado também detalhamento e especificação do sistema pneumático para aplicação de carga vertical e do sistema de aplicação de carga hidráulica para percolação de fluidos pelas amostras de solo, bem como do sistema de aquisição e leitura de dados digitais, obtidos através dos transdutores de pressão, transdutor de deslocamento vertical e célula de carga com condicionador de sinal.

Além disso, nesta fase foi realizada a listagem, o detalhamento e a especificação dos seguintes componentes do equipamento, para posterior aquisição.

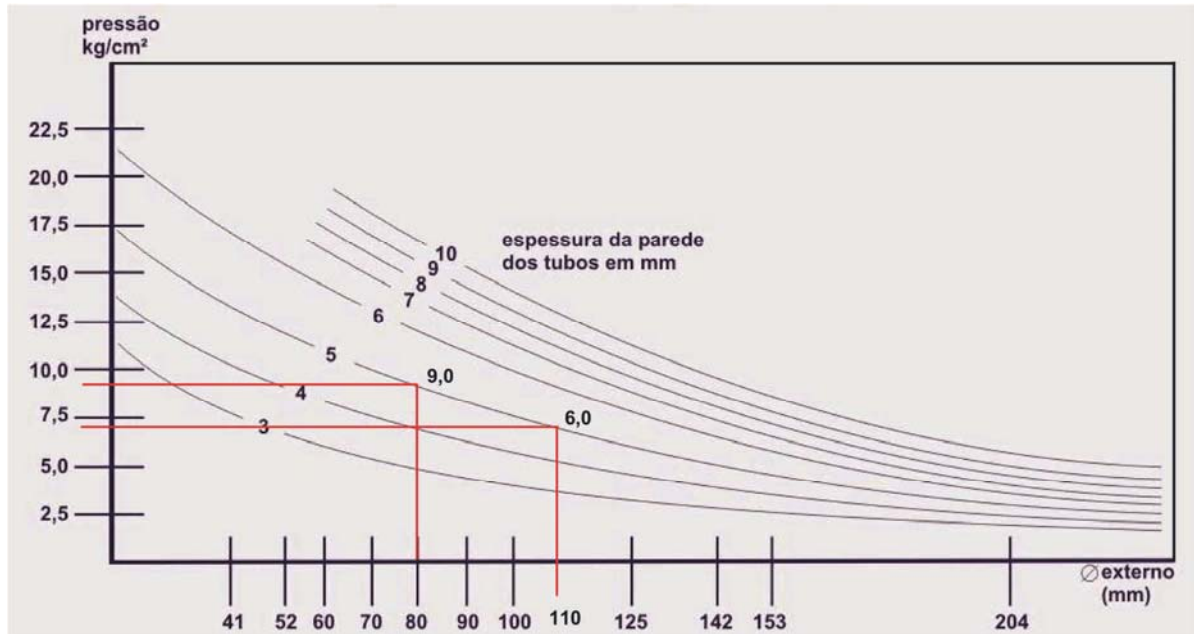
a) Peças de aço inox e galvanizado, utilizadas respectivamente nas conexões hidráulicas e pneumáticas;

b) Tubos em acrílico translúcido para parede das câmaras de ensaio, com resistência mecânica de até 900 kPa, as quais sofrerão pressões mais elevadas do que as demais câmaras, isso devido a aplicação da carga vertical e carga hidráulica para percolação do fluido



contaminante. Para a câmara reservatório, a resistência máxima à pressão interna, para sua utilização fica em torno de 600 kPa. Como mostrado na Figura 9.

Figura 9: Resistência do tuboacrílico.



Fonte: Aciresinas (2012).

Os tubos confeccionados em resinaacrílica produzida através do método de extrusão, podem ser atacados mais facilmente por agentes químicos. No entanto, segundo o fabricante Aciresinas (2012), para 23° C, o comportamento foi satisfatório, comprovando sua resistência, não somente às pressões adotadas para os ensaios, mas quando da utilização de materiais de construção (cimento e cal) e agentes químicos agressivos, tal como ácido nítrico, adotado para redução do pH da solução utilizada para a percolação.

- c) Tubulação de teflon, material inerte à reação dos fluidos utilizados;
- d) Tubulação de polietileno para as conexões pneumáticas.

De posse dos desenhos explicativos de todas as peças necessárias para a composição das câmaras, foi possível a contratação dos serviços de usinagem destes materiais, para posterior montagem e início dos testes.

### **3.2.2 Implementação do sistema de aquisição de dados**

Para realizar o monitoramento das variações físicas durante os ensaios, foi implementado um sistema de aquisição de dados, com sensores acoplados ao módulo USB, como: transdutores de pressão nas diferentes câmaras, sensor de deslocamento vertical (LVDT), conjunto condicionador de sinal e célula de carga, para verificação de volume percolado através de balanço de massa e uma fonte de alimentação para o sistema elétrico.

### **3.3 Construção do equipamento**

Após a aquisição dos discos e tarugos em aço inox 304 em estado bruto, estes foram submetidos ao processo de usinagem mecânica, procedimento necessário para atender o detalhamento técnico do projeto. De posse das peças usinadas, iniciou-se a montagem da parte mecânica – encaixe e fixação das peças que compõem o pórtico, reservatório de solução contaminante, câmara de ensaio dos CPs e câmara de coleta de fluido percolado. Em seguida, os sistema hidráulico e pneumático (conexões, válvulas, reguladores de pressão de precisão manômetros e a tubulação) foram acoplados em suas respectivas posições. O sistema de aquisição de dados foi implementado, com a instalação do módulo multifuncional USB e conexão dos sensores (célula de carga, transdutor de pressão e LVDT). E por fim, foi realizada uma rotina de programação para o software de leitura e gravação dos dados aquisitados pelos sensores e conseguinte gravação dos dados no computador.

### **3.4 Ensaio piloto de condutividade hidráulica da amostra**

Os resultados do ensaio piloto realizado no equipamento novo é comparado com os resultados obtidos para o comportamento da condutividade hidráulica da célula de adensamento que está sendo utilizada atualmente. Na Figura 10 é mostrado o equipamento de coluna antigo que foi utilizado. O solo utilizado, os fluidos percolados pelas amostras e os métodos de compactação são os mesmos para ambos os experimentos.

Figura 10: Célula de adensamento adaptada para ensaio de coluna.



### 3.4.1 Solo do local de estudo

O solo investigado (Figura 11) é proveniente do Campo Experimental de Geotecnia da Universidade de Passo - RS, localizado ao lado do Centro Tecnológico de Engenharia e Arquitetura (Figura 12).

Este solo é um material residual de basalto, que apresenta classificação pedológica, segundo Streck et al. (2008), de um Latossolo Vermelho Distrófico húmico (unidade Passo Fundo). Estes solos são muito profundos, drenados e altamente intemperizados, apresentando uma sequência 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 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>), acentuada acidez, baixa concentração de nutrientes, baixo teor de matéria orgânica. Possui coloração vermelha e baixa saturação por bases (<50%), além de, 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 - MH, segundo o sistema unificado - SUCS (ASTM, 1993).

Figura 11: Perfil do solo de estudo.

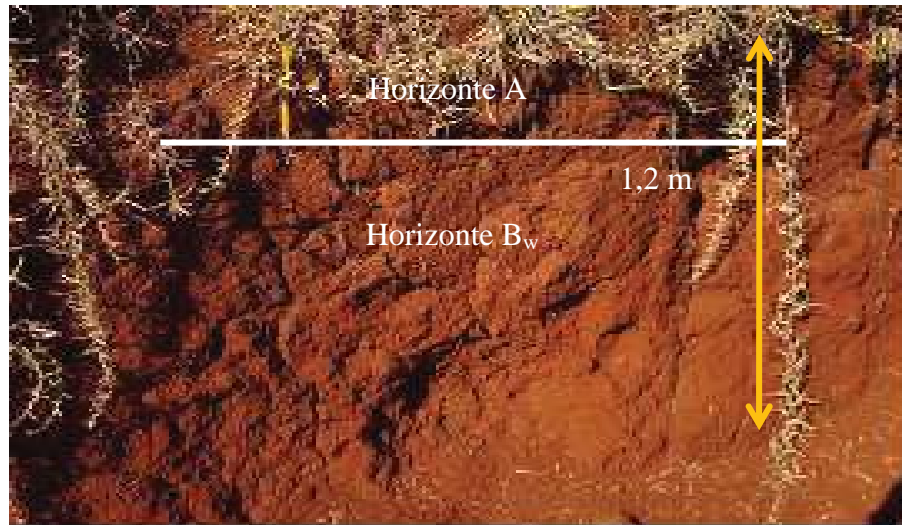


Figura 12: Campo experimental de geotecnia.



A utilização deste solo na pesquisa justifica-se em razão das suas características adequadas ao uso como barreira compactada e da sua predominância na região norte do Rio Grande do Sul, como apresentado na Figura 13. Nas Tabelas 3 e 4 são apresentadas, respectivamente, as características geotécnicas e características químicas do solo de estudo.

Figura 13: Mapa da localização da área de estudo.

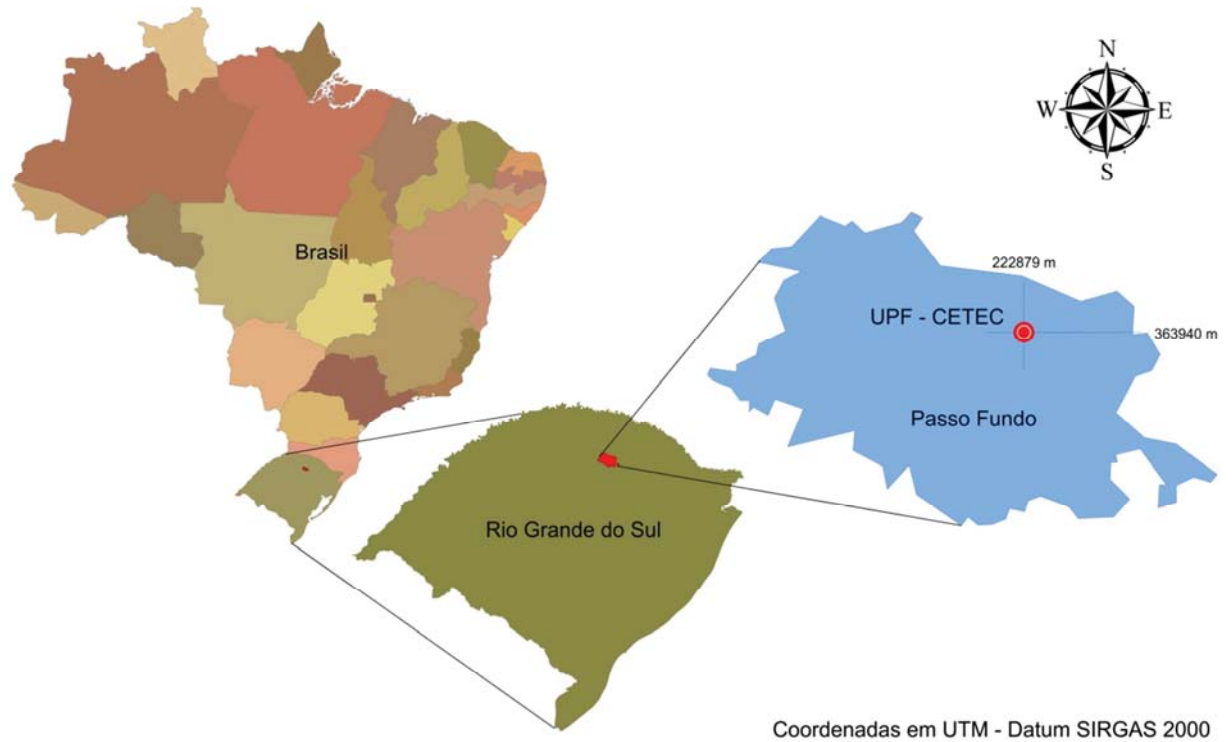


Tabela 3: Caracterização geotécnica do solo.

Parâmetro	Valor
Argila (%)	68
Silte (%)	5
Areia (%)	27
Limite de liquidez (%)	53
Limite de plasticidade (%)	42
Índice de plasticidade (%)	11
Peso específico real dos grãos (kN/m <sup>3</sup> )	26,7
Umidade natural (%)	34,0
Peso específico natural (kN/m <sup>3</sup> )	13,5

Tabela 4: Análise química do solo.

Parâmetro	Valor
Argila (%)	68,0
pH H <sub>2</sub> O	5,5
Índice SMP	5,4
MO (%)	0,8
P (mg/kg <sup>1</sup> )	4,0
K (mg/kg <sup>1</sup> )	334,0
S (mg/kg <sup>1</sup> )	33,0
Al (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	1,7
Ca (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	0,5
Mg (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	0,3
H + Al (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	8,7
CTC (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	10,3
Saturação por bases (%)	16,0
Saturação por alumínio (%)	51,0
Saturação por potássio (%)	8,3
B (mg/kg <sup>1</sup> )	0,2
Mn (mg/kg <sup>1</sup> )	9,0
Zn (mg/kg <sup>1</sup> )	1,4
Cu (mg/kg <sup>1</sup> )	2,5
ASE (m <sup>2</sup> /g)	33,86

### 3.4.2 Moldagem dos corpos de prova

A moldagem do corpo de prova para ambos os equipamentos (antigo e o novo) foi realizada diretamente na parede da câmara do equipamento de coluna, com as dimensões nominais de 0,06 m de altura e 0,07 m de diâmetro, como apresentado na Figura 14 . Os parâmetros de moldagem foram utilizados conforme referência das energias de compactação proctor normal (Figura 15). Foi utilizado 2 % de cimento Portland CP-V em relação a massa seca de solo. A utilização de cimento tem a função de neutralizar a acidez provocada pelo

contaminante, devido que serão conduzidos experimentos de outras dissertações de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental - UPF e doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFRGS que serão realizados ensaios para avaliar o comportamento reativo deste material. Thakur et al. (1992) destacam que uma forma de neutralizar o potencial ácido de uma camada de rejeitos é a partir da adição de cal ou cimento ou calcário.

Ainda, foi fixado o valor de 26 % de umidade e  $14,5 \text{ kN/m}^3$  para o peso específico seco, observando-se como referência o peso específico seco máximo e a umidade ótima de compactação para a energia proctor normal, sendo considerado como equivalente à curva com 2 % de cimento, como pode ser observado na Figura 15.

Figura 14: (A), (B), (C), (D), (E) e (F) Moldagem do corpo de prova.

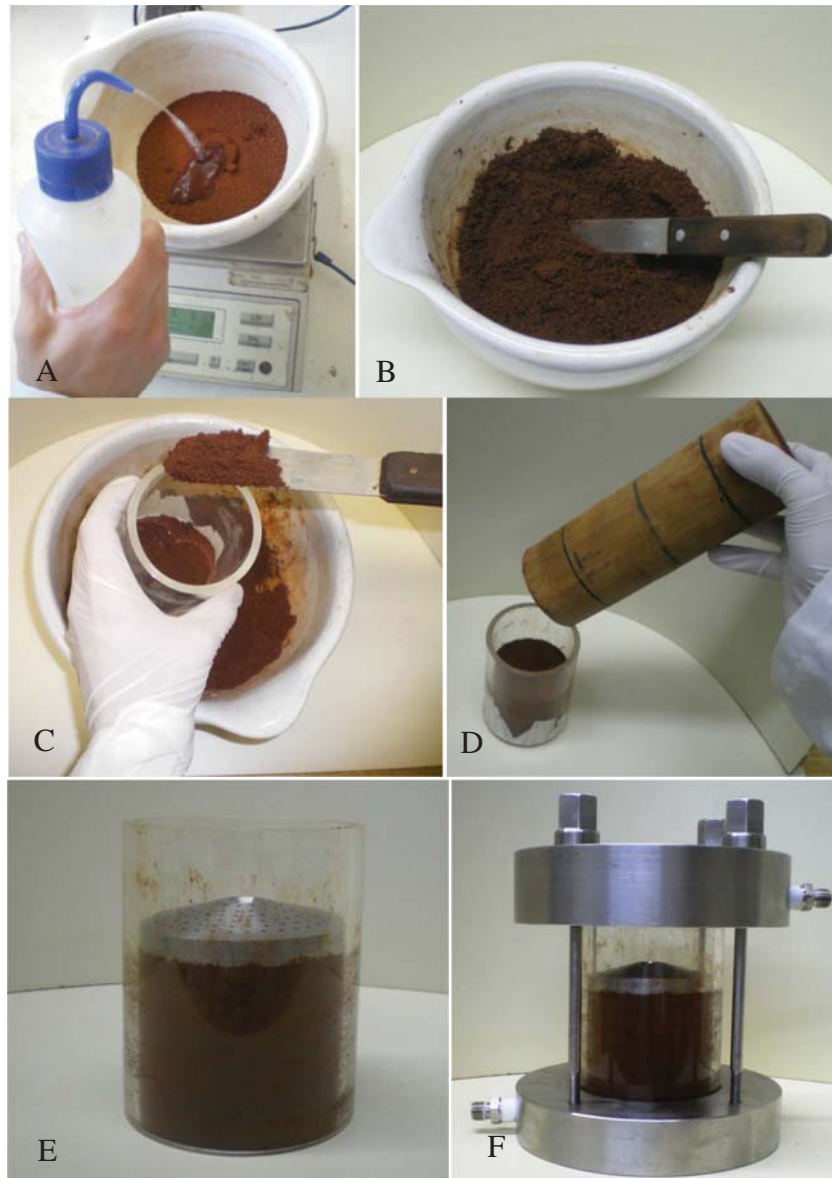
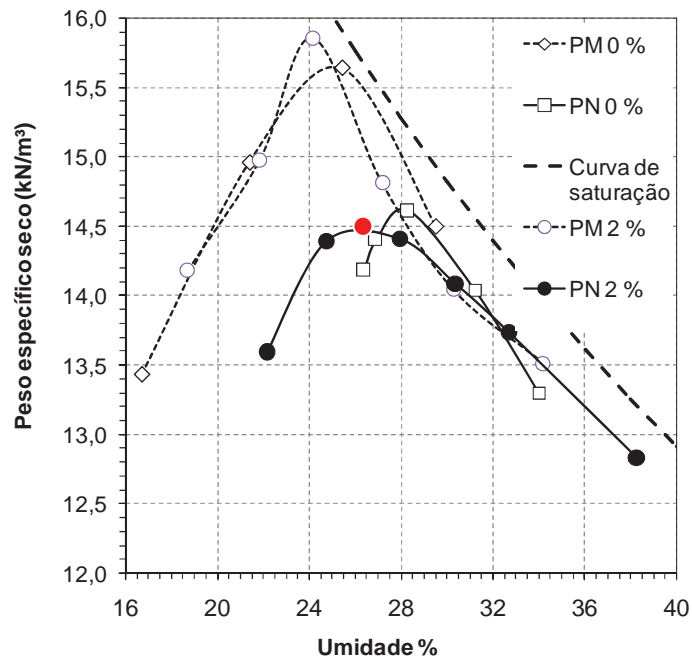


Figura 15: Curva de compactação - Proctor normal e modificado.



### 3.4.3 Preparo da solução contaminante

A solução contaminante utilizada foi produzida a partir da diluição de solução padrão de Cd, Pb, Ni e Cr de 1000 mg/L. A diluição será adotada para uma solução de 10 mg/L para cada metal, o que equivale a um incremento de 1000, 2000, 200 e 500 vezes, os valores de investigação estabelecidos pela CETESB (2005), para  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  e  $\text{Cr}^{3+}$ , respectivamente, apresentados na Tabela 5. A solução contaminante recebeu adição de ácido nítrico até atingir o pH igual a 1, com finalidade de simular a drenagem ácida de mineração com todos os metais em solução (multiespécie). O preparo das soluções foi realizado no Laboratório de Saneamento Ambiental da Universidade de Passo Fundo, como mostra a Figura 16.



Tabela 5: Valores de investigação e diluição da solução contaminante.

Metal	Valor de investigação para água subterrânea ( $\mu\text{g/L}$ ) CETESB 2005	Incremento	Concentração da solução (mg/L)
Pb	10	1000	10
Cd	5	2000	10
Cr	50	200	10
Ni	20	500	10

Figura 16: Preparo de solução contaminante.



### 3.4.4 Procedimento do ensaio piloto

Após a moldagem dos corpos de prova, diretamente na parede acrílica da câmara de ensaio, posterior montagem do reservatório de fluido e câmara de coleta, foi inicializado o programa de aquisição de dados, identificação do ensaio teste na interface inicial do programa desenvolvido e por seguinte as constantes de calibração de cada sensor.

O ajuste das pressões foi realizado com a manipulação dos reguladores de pressão (pressão hidráulica no reservatório, pressão no cilindro pneumático e pressão na câmara de coleta). Apartir disto foi dado inicio no sistema de aquisição de dados e as variações físicas ocorrentes na amostra ensaiada começaram a ser monitoradas. No instante seguinte, foram acionadas as válvulas de entrada do reservatório e o fluido preencheu a câmara de ensaio, entrando em contato com o corpo de prova, iniciando sua percolação pelo mesmo.

Na primeira etapa de saturação, foi percolada água destilada pela amostra, adotando pressão de 100 kPa no reservatório, forçando o fluido a percolar pela amostra contida na

câmara de ensaio, até a observação da proximidade de saturação. Para tanto, foram observadas as respostas no transdutor de saída, decorrentes de incrementos de pressões aplicadas no reservatório de entrada (100 kPa). A relação entre a resposta observada e o incremento de pressão próximo de 1, leva a concluir que a amostra pode estar parcialmente saturada. Na segunda etapa foi então inserida a solução ácida no reservatório. A carga hidráulica de percolação esteve próximo a 25 kPa, sendo aplicada no topo do reservatório 100 kPa e na câmara de coleta de percolado 75 kPa, resultando em um gradiente hidráulico em torno de 40. A medição da carga hidráulica foi realizada com auxílio de transdutores de pressão. Os volumes percolados ao longo do tempo foram medidos através de células de carga.

Durante a percolação da solução contaminante, foi aplicada uma carga estática vertical de aproximadamente 141 kPa, verificada através do transdutor de pressão conectado a este, pressão que foi estimada de acordo com estudo realizado por Bedin (2010), em 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, resultando em 280 kPa.

Para aplicação desta carga estática vertical, a alimentação deste componente com ar comprimido foi observada através de um transdutor de pressão, até o alcance da pressão previamente determinada para seu uso. Os cilindros pneumáticos se conectam aos pistões de carga, os quais transferem a pressão vertical para os corpos de prova, simulando sua posição de fundo em um aterro.

A condutividade hidráulica foi monitorada através da verificação dos volumes percolados ao longo do tempo, por balanço de massa com auxílio de uma célula de carga, logo após o ensaio de saturação e durante a percolação de contaminante, buscando verificar a mudança da condutividade hidráulica frente à percolação de água destilada e diante da percolação de solução contaminante. Os deslocamentos verticais sofridos ao longo do ensaio por adensamento da barreira foram monitorados com auxílio de um transdutor de deslocamento vertical (LVDT) acoplado ao lado do pistão de carga e apoiado sobre o cap da câmara de ensaio.

## **CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1 Projeto e execução do equipamento**

Os consecutivos avanços nas áreas da eletrônica e microcomputação tem possibilitado o desenvolvimento de equipamentos cada vez mais interativos e capazes de realizar rotinas complexas de programação. O aprimoramento na aquisição de dados para equipamentos de coluna torna o trabalho facilitado, após sua implementação, além de permitir a aquisição de valores precisos e com intervalos de tempo desejados.

O leiaute geral da montagem de uma linha de ensaio do equipamento de coluna modificado, composto pelas câmaras (reservatório, de ensaio e de coleta), reguladores de pressão (reservatório e câmara de coleta), transdutores de pressão (entrada do reservatório, saída da câmara de ensaio, entrada da câmara de coleta de percolado e entrada do cilindro pneumático), conexões hidráulicas (por onde circula a solução ácida), conexões pneumáticas (condução do ar para alimentação do cilindro pneumático, câmara de coleta e geração de pressão hidráulica no reservatório) e disposição dos sensores elétricos e alimentação do sistema (transdutores de pressão, LVDT, condicionador de sinal, célula de carga, módulo USB), pode ser observado na Figura 17 e na Tabela 6, a qual apresenta uma legenda com o detalhamento das peças e suas respectivas conexões.

Figura 17: Leiaute das conexões hidráulicas e elétricas.

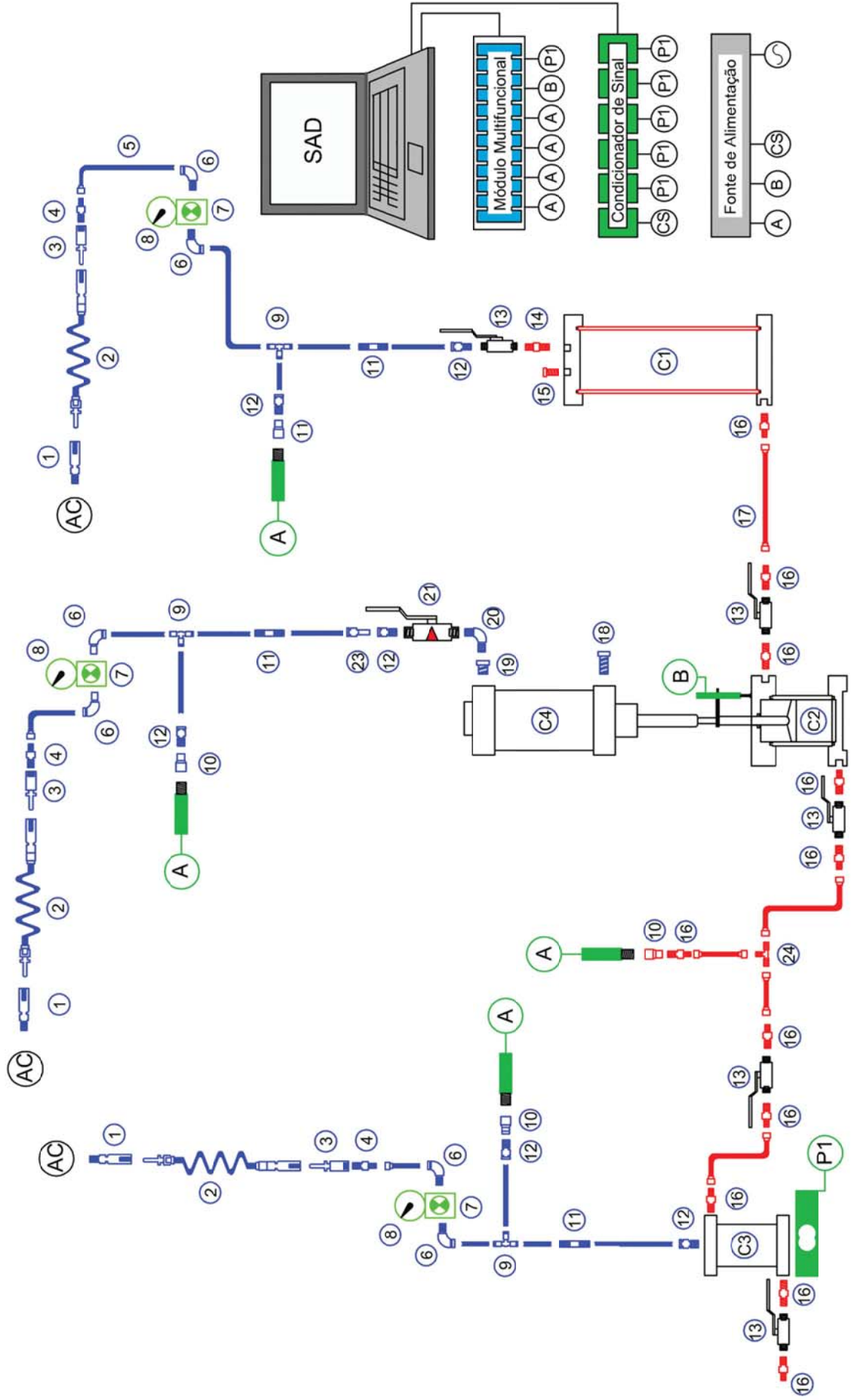


Tabela 6: Legenda do leiaute.

<b>Identificação</b>	<b>Descrição da peça componente</b>
1	Engate rápido com rosca macho 1/4"
2	Mangueira espiralada com engate rápido macho/ fêmea nas extremidades
3	Plug engate rápido com rosca fêmea 1/4"
4	Niple 1/4" x 7/16" NPT
5	Tubo PU 6 mm
6	Cotovelo tipo pneufit 1/4" NPT
7	Regulador de precisão – (baixa pressão - 0,7 a 4 bar) entrada/saída 1/4"
8	Manômetro com visor 50 mm
9	Tee tipo pneufit para tubo 6 mm
10	Luva 1/2" NPT x 1/4" NPT
11	União painel tipo pneufit para tubo 1/4"
12	Conexão reta 1/4" NPT tipo pneufit para tubo 6 mm
13	Válvula esfera tripartida 1/4" NPT
14	Niple 1/4" NPT x 1/4" NPT – aço inox 304
15	Plug 1/4" NPT – Aço Inox 304
16	Niple 1/4" NPT x 7/16" NPT - aço inox 304
17	Tubo teflon 6 mm
18	Plug 1/2" BSP – aço inox 304
19	Niple macho 1/2" BSP
20	Cotovelo 1/2" BSP macho/ macho
21	Válvula esfera com exaustão 1/2" BSP macho/ macho
22	Conexão reta macho 10 mm x 1/2" BSP
23	Adaptador redutor 10 mm x 6 mm
24	Tee 7/16" NPT com porca e anilha para tubo 6 mm
A	Transdutor de pressão Ashcroft K1 e Sitron SP2 (0 – 10 bar)
B	Transdutor de Deslocamento Vertical – LVDT DG 2.5
C1	Câmara reservatório do fluído
C2	Câmara de ensaio da amostra
C3	Câmara de coleta do percolado
C4	Cilindro pneumático RA 8100/M/50/G (1 – 16 bar)
AC	Rede de Ar comprimido
CS	Condicionador de sinal
P1	Célula de carga MK PW-ZL 10

As peças necessárias para a montagem das câmaras de ensaio, câmaras de reservatório, câmaras de coleta e suas descrições podem ser observadas na Tabela 7, 8 e 9, respectivamente.

Tabela 7: Peças componentes das câmaras de ensaio.

Descrição da peça	Dimensões (mm)	Quantidade	Material
<i>Base cap</i>	*150 x 30	6	Aço inox
<i>Top cap</i>	*150 x 40	6	
Disco drenante superior	*69,5 x 15	6	
Disco drenante da base	*69,5 x 15	6	
Pistão de aplicação da carga	*14,5 x 171	6	
Haste fixação dos caps	*6,0 x 178	24	
Tubo estrudado	**70 x 100 x 5	6	Acrílico

\*Diâmetro x espessura, \*\*Diâmetro x altura x espessura.

Tabela 8: Peças componentes das câmaras reservatório.

Descrição da peça	Dimensões (mm)	Quantidade	Material
<i>Base cap</i>	*150 x 30	6	Aço inox
<i>Top cap</i>	*150 x 40	6	
Haste fixação dos caps	*6 x 178	24	
Porca de fixação	*22 x 25	48	
Tubo extrudado	**100 x 300 x 5	6	Acrílico

\*Diâmetro x espessura, \*\*Diâmetro x altura x espessura.

Tabela 9: Peças componentes das câmaras de coleta.

Descrição da peça	Dimensões (mm)	Quantidade	Material
<i>Base cap</i>	*113 x 20	6	Aço inox
<i>Top cap</i>	*113 x 20	6	
Haste fixação dos caps	*6 x 147	24	
Porca de fixação	*18 x 20	48	
Tubo extrudado	**100 x 300 x 5	6	Acrílico

\*Diâmetro x espessura, \*\*Diâmetro x altura x espessura.

A listagem e descrição das peças componentes de uma linha de ensaio, para os diferentes sistemas, tais como: sistema pneumático, sistema hidráulico, sistema de aquisição de dados SAD, podem ser observadas nas Tabelas 10, 11 e 12, respectivamente.

Tabela 10: Detalhamento das peças componentes do sistema pneumático.

<b>Unidade</b>	<b>Descrição da peça</b>	<b>Material</b>	<b>Legenda</b>
03	Engate rápido c/ rosca macho ¼” NPT	Aço carbono	1
03	Mangueira espiralada c/ engate rápido	Poliuretano e aço carbono	2
03	Plug engate c/ rosca fêmea ¼” NPT	Aço carbono	3
03	Niple redução ¼” x 7/16” NPT	Galvanizado	4
20 m	Tubo PU 6 mm	Poliuretano	5
06	Cotovelo tipo pneufit ¼” x ¼” NPT	Plástico	6
03	Regulador de pressão ¼” NPT	Plástico	7
03	Manômetro com visor 50 mm	Metal/ polietileno	8
03	Tee tipo pneufit para tubo 6 mm	Plástico	9
04	Luva redução ½” x ¼” NPT	Aço inox	10
03	União painel pneufit p/ tubo 6 mm	Plástico	11
05	Niple Redução ¼” x 7/16” NPT	Latão	12
01	Niple ¼” NPT x ¼” NPT	Latão	14
01	Cilindro pneumático	Aço carbono/ alumínio	15
01	Plug ½” BSP	Aço galvanizado	18
01	Adaptador ½” x ¼” BSP	Aço galvanizado	19
01	Cotovelo ½ ” x ½” BSP	Aço galvanizado	20
01	Válvula esfera c/ exaustão ¼”BSP	Galvanizado	21
01	Conexão reta 10 mm x ½” BSP	Polietileno	22
01	Adaptador redutor 10 mm x 6 mm	Polietileno	23

Tabela 11: Detalhamento das peças componentes do sistema hidráulico.

<b>Unidade</b>	<b>Descrição da peça</b>	<b>Material</b>	<b>Legenda</b>
05	Válvula esfera tripartida ¼” NPT	Aço inox/ teflon	13
01	Plug ¼” NPT	Aço inox	15
10	Niple redução ¼” x 7/16 NPT	Aço inox	16
02	Niple ¼” x ¼” NPT	Aço inox	17
01	Tee c/ porca e anilha para tubo 6 mm	Aço inox	24
20 m	Tubo teflon 6 mm	Teflon	25

Tabela 12: Sistema de aquisição de dados.

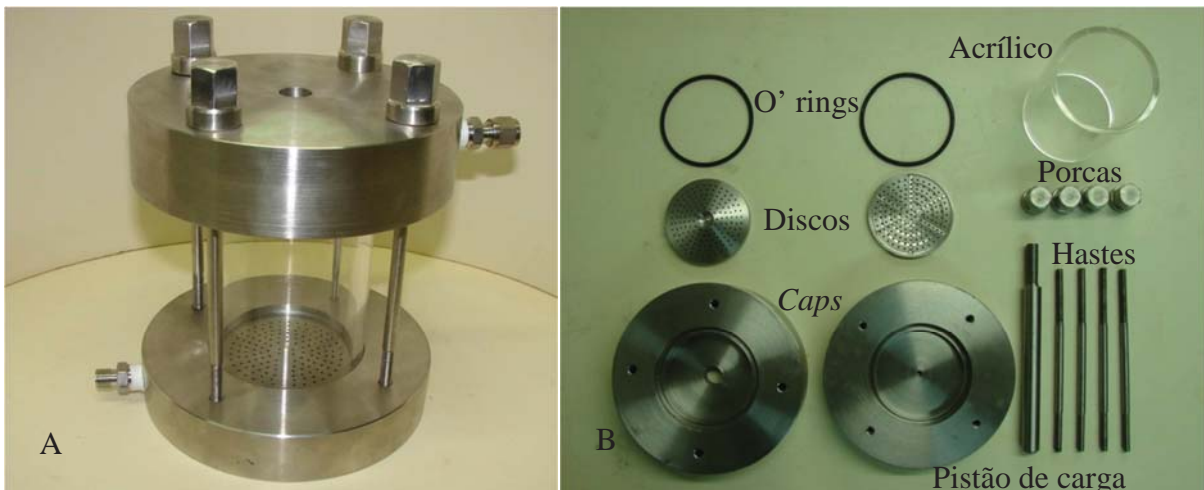
<b>Unidade</b>	<b>Descrição da peça</b>	<b>Legenda</b>
01	Módulo multifuncional - modelo USB-2416-4AO	M1
02 - 02	Trandutor de pressão Aschcroft - K1/ Sitron - SP2	A
01	Transdutor de deslocamento vertical - LVDT	B
01	Célula de carga MK modelo MKPW-ZL	C1
01	Condicionador de sinal SG 3016	Verde
01	Fonte de alimentação – 12 V	Cinza

Os desenhos explicativos foram executados para contratação dos serviços de usinagem, os quais representam uma câmara de ensaio e estão com as medidas em milímetros, estão apresentados nos Apêndices A, B, C, D, E, F e G, os quais detalham respectivamente, o base cap e top cap das câmaras de ensaio, o disco drenante inferior, disco drenante superior, pistão de aplicação de carga vertical, haste e porca de fixação dos caps e o tubo em acrílico extrudado.

Na Figura 18 pode ser observada uma câmara de ensaio montada, bem como as peças em aço inox, devidamente usinadas para montagem de uma unidade.

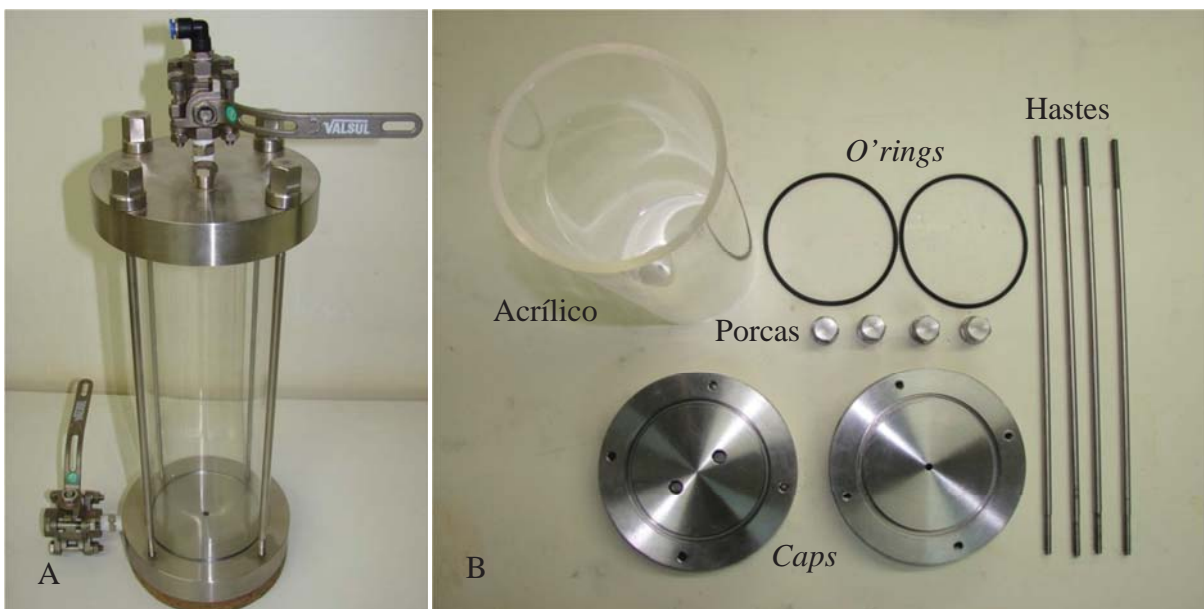


Figura 18: Câmara de ensaio (A) e as peças componentes (B).



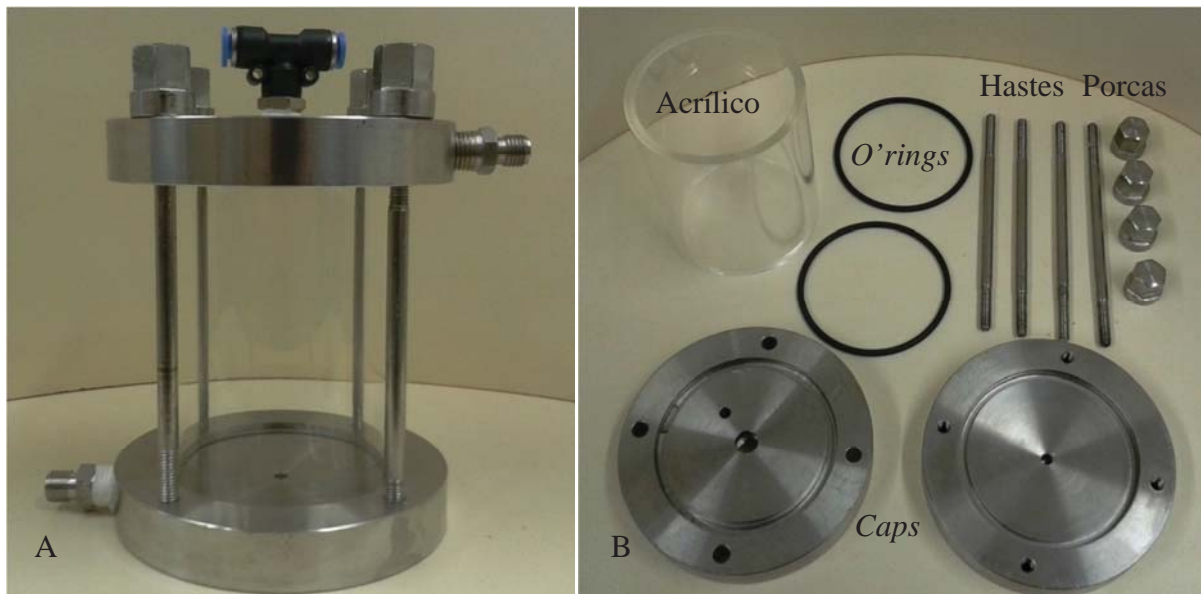
Os desenhos explicativos executados que configuram uma câmara reservatório de solução para percolação, estão apresentados nos Apêndices H, I, J e K, os quais detalham respectivamente, a base cap e top cap, haste e porca de fixação dos caps, além do tubo em acrílico extrudado. A Figura 19 mostra um reservatório de solução para percolação montado e as peças componentes usinadas em aço inox.

Figura 19: Reservatório montado (A) e suas peças componentes (B).



Os reservatórios de coleta dos líquidos percolados através dos corpos de prova que se encontram alocados na câmara de ensaio são coletados em uma câmara pressurizada. Para isso, foi desenvolvida uma câmara, como mostra a Figura 20. Os Apêndices L, M, N e O apresentam os desenhos detalhados das peças que configuram a câmara de coleta.

Figura 20: Câmara de coleta (A) e as peças componentes (B).



Os Apêndices P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y e Z apresentam, respectivamente, o detalhamento do chassi para montagem do equipamento, ou seja, vista inferior e superior da base de apoio das câmaras de ensaio, vista transversal, frontal e posterior da base de apoio das câmaras de ensaio, barra roscada e porca de fixação e regulagem da altura dos cilindros pneumáticos, suporte das células de carga, utilizadas nas câmaras de coleta do percolado, suporte dos cilindros penumáticos, suporte dos reservatórios de solução de percolação e disco guia para posicionamento das câmaras de ensaio, haste prolongadora do pistão, suporte de fixação do LVDT, afastador das câmaras de coleta e célula de carga e conector do pistão ao cabeçote. Na Figura 21 pode ser observado o pórtico ou chassi desenvolvido para montagem dos sistemas e sensores componentes do equipamento de coluna modificado.

Figura 21: Pórtico ou chassi do equipamento.



Após a usinagem de todas as peças em aço carbono e inox, foi possível a montagem do pórtico, das câmaras, e conseguinte conexão das peças hidráulicas e pneumáticas que compõem todo o sistema de ensaio, como apresentado na Figura 22.

Figura 22: Equipamento de coluna modificado e seus sistemas.



## 4.2 Execução do sistema de aquisição de dados

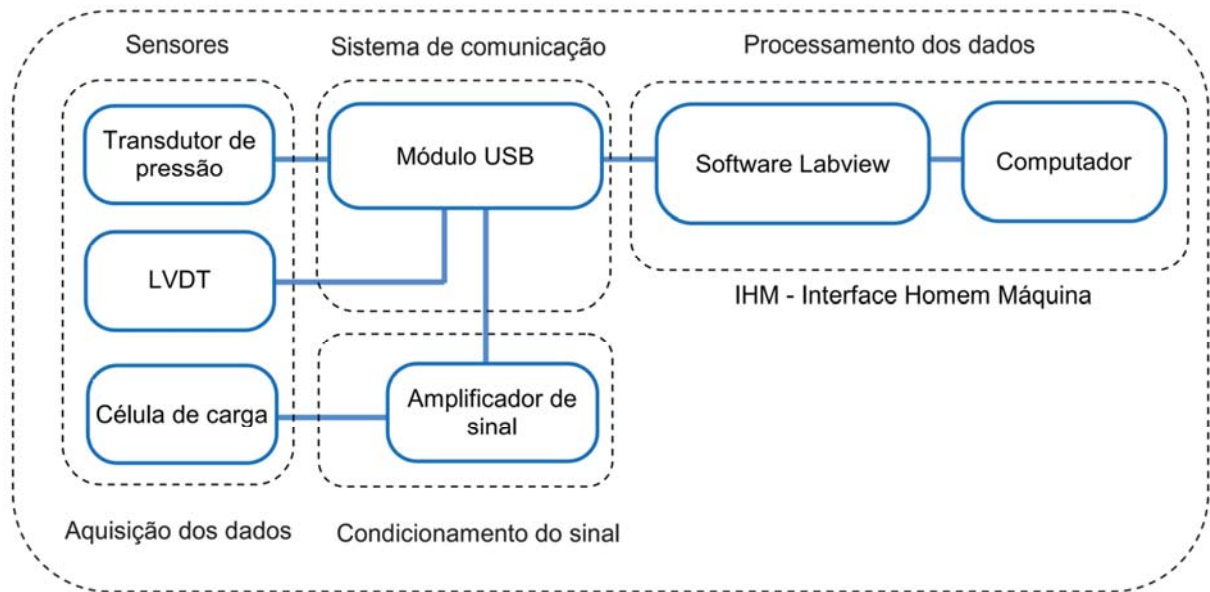
### 4.2.1 Sistema de aquisição de dados

Para realizar o monitoramento das variáveis físicas, as quais sofrem variações durante os ensaios, foi implementado um sistema de visualização e armazenamento de dados.

Esse sistema de aquisição de dados (SAD) é composto por sensores que aquisitam os dados, condicionador de sinal que amplifica o sinal da célula de carga, modelo SG 3016, módulo USB modelo 2416-4A que faz o condicionamento do sinal, o software Labview faz o processamento do sinal e por seguinte, o computador realiza a interface IHM (Interface Homem Máquina), juntamente com o software Labview. Estes estão melhor especificados na sequência do texto, bem como o fluxograma de funcionamento do sistema de aquisição, podem ser observados na Figura 23.

Ao módulo USB estão acoplados os sensores que aquisitam os dados, tais como: transdutor de pressão da carga hidráulica, transdutor de pressão na saída da câmara de ensaio, transdutor de pressão na câmara de coleta do líquido percolado, sensor de deslocamento vertical (LVDT) e célula de carga.

Figura 23: Diagrama de funcionamento do SAD.



a) **Módulo USB:** modelo 2416-4A produzido pela Computer Measurement®, como pode ser observado na Figura 24. Este módulo realiza a comunicação entre os sensores e o computador, dos dados adquiridos pelos sensores. É composto por 16 canais diferenciais de entrada analógica com resolução de 24 bits e 4 saídas analógicas de 16-bits e alimentado com uma tensão de 12 volts. Esse sistema possui erro máximo de 0,0008 % da faixa de trabalho adotada, considerando uma taxa de aquisição de até 2,5 amostras por segundo.

Figura 24: Módulo USB de comunicação de dados.



*b) Transdutores de pressão:* foram utilizados, na entrada e saída da câmara de coleta e da câmara de ensaio, afim de verificar, respectivamente, a contra-pressão aplicada na câmara de coleta e a carga hidráulica exercida sobre o fluido percolante. Os transdutores utilizados são do modelo K1, fabricados pela ASHCROFT®, como mostra a Figura 24, e SP2 da SITRON®, apresentado na Figura 25. Ambos com capacidade máxima de pressão igual a 1 MPa e uma precisão mínima de 5 kPa.

Figura 25: Transdutor de pressão – K1.



Figura 26: Transdutor de pressão – SP2.



*c) Linear variable differential transformer (LVDT):* para a medição dos deslocamentos verticais foi utilizado um sensor de deslocamento vertical, modelo DG 2.5, fabricado pela AMETEK Sitron, como apresenta a Figura 27. O sensor possui um curso de 5 mm, permitindo precisão de até 0,1  $\mu\text{m}$  nas medidas, adequado para verificações nas mudanças ocorrentes na compressibilidade da amostra e conseguintes recalques.

Figura 27: Transdutor de deslocamento vertical – DG.



*d) Célula de carga:* as medições referentes aos volumes de fluido percolado pelo corpo de prova que chegam até a câmara de coleta foram verificados com a utilização de uma célula de carga, modelo PW-ZL10, fabricada pela MK Controle e Instrumentação, como mostra a Figura 27. A célula de carga é alimentada com 12 volts, possui uma sensibilidade nominal de 2 mV/v, capacidade de até 10 kg e precisão de 1 g. Este sensor foi utilizado para calcular a permeabilidade do CP ao longo do tempo do ensaio piloto.

Figura 28: Células de carga – PWZL 10.



e) **Condicionador de sinal:** este dispositivo, que foi utilizado para amplificar o sinal de saída da célula de carga, está apresentado na Figura 28. Este dispositivo é fabricado pela LR Informática Industrial, modelo SG 3016, e é alimentado com 24 volts, possuindo um sinal de entrada de 0 - 2 mV/v e saída de 0 – 10 Vcc.

Figura 29: Condicionador de Sinal – SG 3016.



f) **Fonte de alimentação:** o sistema periférico (sensores e condicionador de sinal) foi alimentado com uma fonte regulada com tensão de 12 V e corrente de até 0,2 A. A Figura 30 apresenta a fonte de alimentação adotada para alimentação dos componentes eletrônicos do sistema.

Figura 30: Fonte de alimentação.

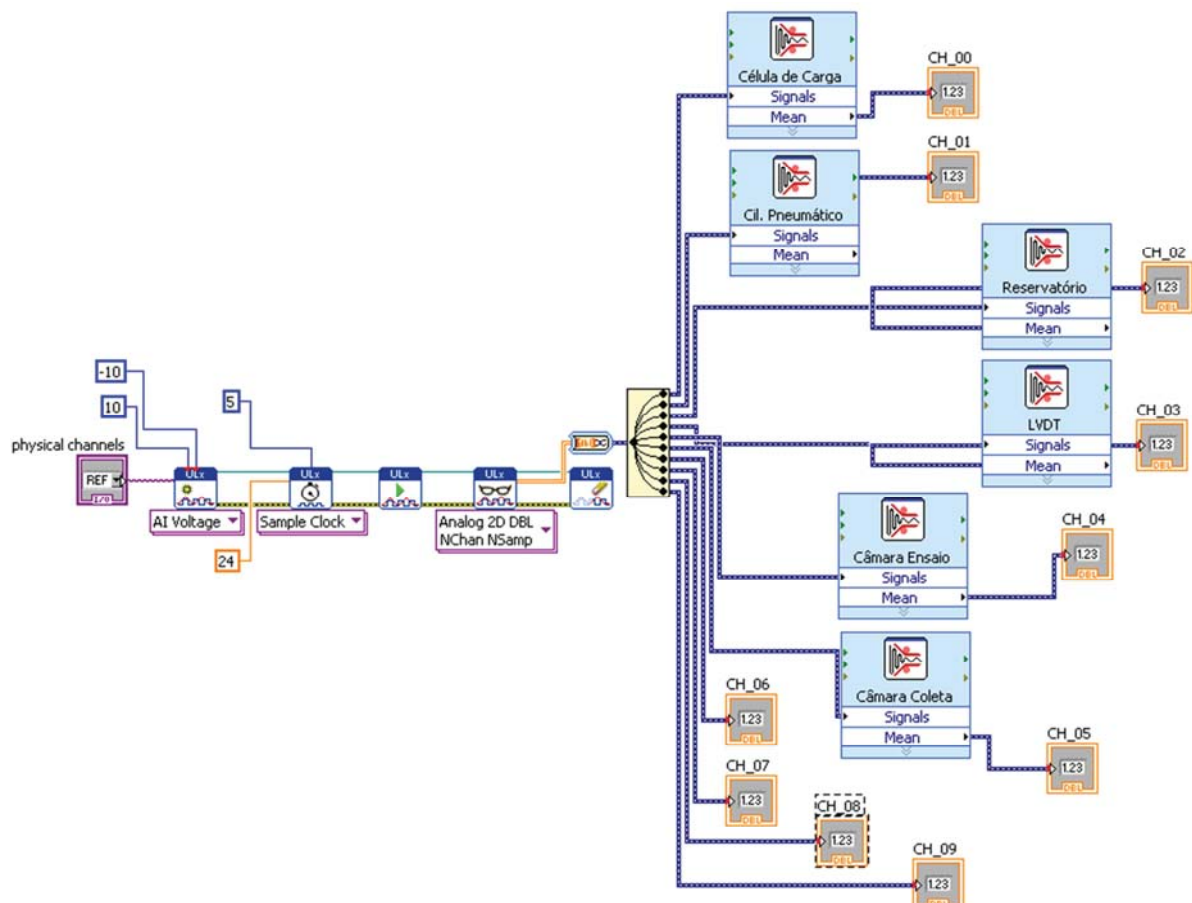


#### 4.2.2 Software de processamento dos dados

O equipamento de coluna modificado desenvolvido nesta dissertação demandou uma programação em software capaz de realizar as tarefas de processamento e Interface IHM para os dados adquiridos pelos sensores acoplados ao módulo USB. Dessa forma, foi realizada uma programação no software LabVIEW™, por ser uma linguagem de programação gráfica e dotada de interface orientada por ícones, em vez de linhas de texto, para criar aplicações. Em contraste às linguagens de programação baseadas em texto, em que instruções determinam a execução do programa, o LabVIEW™ utiliza programação baseada em fluxo de dados, onde o fluxo dos dados determina a execução.

O LabVIEW™ é um compilador real de 32 bits, onde foi construído uma interface de usuário, utilizando um conjunto de ferramentas e objetos. A interface de usuário é conhecida como painel frontal. Então, pode-se adicionar o código utilizando representações gráficas de funções para controlar os objetos do painel frontal. O diagrama de bloco contém esse código e sob certos aspectos, se assemelha a um fluxograma, como mostra a Figura 31.

Figura 31: Rotina desenvolvida no software.





A Figura 32 apresenta a interface desenvolvida no software para inserção das informações de dados complementares para o processamento adequado dos sinais elétricos adquiridos pelos sensores. Nesta interface, são adicionados os valores dos intervalos de coleta e gravação dos dados, inserção dos valores das constantes das curvas de calibração, identificação do ensaio e informações do operador.

Figura 32: Informações de dados complementares.

The screenshot shows a software interface with the following fields and values:

- Identificação do ensaio:** Enasio Piloto I
- Identificação do usuário:** valter
- Diâmetro da amostra (mm):** 70
- Altura inicial da amostra (mm):** 60
- Intervalo de gravação de dados (s):** 300
- CONSTANTES DE CALIBRAÇÃO:**
  - Célula de carga: 1058,84
  - Transdutor Reservatório: 250
  - Transdutor Cilindro Pneumático: 250,53
  - LVDT: 0,682707
  - Transdutor Câmara de Ensaio: 250,53
  - Transdutor Câmara de Coleta: 250,53
- Data/Hora:** 19/3/2013 09:44:55
- Buttons:** OK

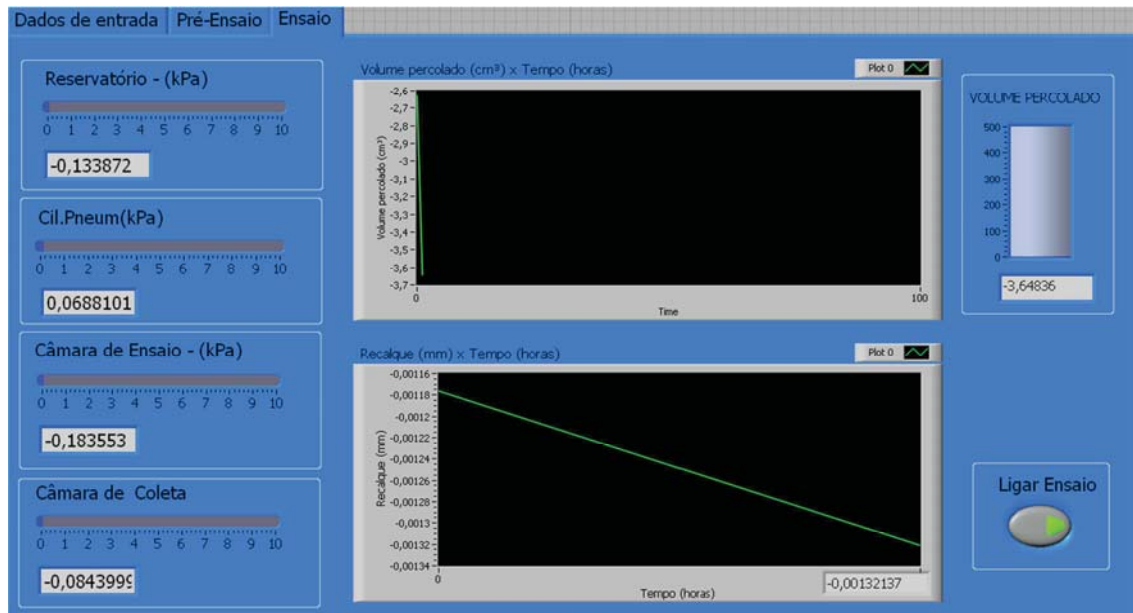
Na Figura 33 pode ser observada a interface IHM desenvolvida para acompanhamento visual durante a regulação e aplicação das pressões no sistema e o posicionamento do LVDT.

Figura 33: Interface IHM instantânea desenvolvida para o pré-ensaio.



A Figura 34 apresenta a interface IHM onde o operador pode visualizar os valores lidos pelos sensores no equipamento. Essa interface mostra os valores das pressões aquisitadas pelos transdutores de pressão nas câmaras reservatório, saída da câmara de ensaio, câmara de coleta do fluido percolado e os deslocamentos verticais, verificados pelo sensor (LVDT).

Figura 34: Interface IHM da leitura instantânea e do banco de dados do ensaio.



Durante o ensaio, é gerado um banco de dados sem processamento (dados elétricos) em um arquivo com extensão lvm (arquivo LabVIEW™), o qual é convertido em txt para sua tabulação. Os dados referentes à aquisição de cada sensor são dispostos lado a lado em colunas, as quais representam a sequência das conexões dos sensores nos respectivos canais do módulo USB (Figura 35).

Figura 35: Dados elétricos adquiridos pelo SAD.

08_02_2013_contaminação - Bloco de notas							
Arquivo	Editar	Formatar	Exibir	Ajudar			
1,380068		0,999638		1,000108	-1,422019	2,247860	1,955243
1,379619		1,564410		1,082803	-1,421379	2,369591	1,955920
1,378975		1,564362		1,082370	-1,421259	2,370258	1,955686
1,378352		1,564322		1,082718	-1,421344	2,370349	1,955585
1,378267		1,564387		1,082425	-1,420824	2,370307	1,955370
1,378150		1,564394		1,082439	-1,420697	2,370201	1,955297
1,378572		1,564330		1,082599	-1,420404	2,370179	1,955001
1,378026		1,564198		1,082424	-1,420297	2,370027	1,954964
1,378409		1,564113		1,082219	-1,420381	2,369542	1,954544
1,378177		1,563933		1,081436	-1,420673	2,369792	1,954452
1,378967		1,565903		1,084601	-1,419959	2,374454	1,959518
1,377955		1,565634		1,084403	-1,419941	2,374738	1,959234
1,378095		1,565607		1,084387	-1,419811	2,374741	1,958997
1,378208		1,565398		1,084090	-1,420084	2,374455	1,958759
1,379076		1,565364		1,084203	-1,419554	2,374137	1,958511
1,378941		1,565348		1,084242	-1,418943	2,374252	1,958424
1,379568		1,565054		1,083966	-1,419085	2,374093	1,958109
1,382028		1,565113		1,083623	-1,419196	2,374027	1,958050
1,381163		1,565063		1,083804	-1,418772	2,374617	1,957772
1,380787		1,565073		1,083653	-1,417279	2,374688	1,957596
1,380160		1,564893		1,083049	-1,417175	2,375003	1,957281
1,381946		1,564962		1,083435	-1,417120	2,374649	1,957141
1,376121		1,564749		1,083062	-1,417123	2,373873	1,956984
1,376426		1,564704		1,082802	-1,416770	2,374010	1,956790
1,376857		1,564611		1,082863	-1,417253	2,373323	1,956577
1,377365		1,564643		1,082863	-1,417037	2,373370	1,956379
1,376776		1,564609		1,082905	-1,417230	2,373907	1,956217
1,377644		1,564636		1,082397	-1,416685	2,373280	1,956029
1,378134		1,564519		1,082859	-1,417120	2,372854	1,955818
1,377287		1,564433		1,082867	-1,416984	2,373172	1,955615
1,377549		1,564382		1,082649	-1,416787	2,372969	1,955476
1,377942		1,564343		1,083035	-1,416917	2,372359	1,955293
1,377545		1,564125		1,082244	-1,416874	2,372440	1,955104
1,378374		1,564257		1,082382	-1,416469	2,372321	1,954950
1,378729		1,564063		1,082563	-1,416875	2,371700	1,954945
1,380047		1,564095		1,082584	-1,416515	2,371542	1,954823
1,379679		1,564100		1,082280	-1,416677	2,371852	1,954690
1,380261		1,563966		1,082107	-1,416701	2,371446	1,954467
1,381040		1,564569		1,082698	-1,416359	2,371413	1,956094
1,381289		1,565537		1,084082	-1,416528	2,374900	1,959191

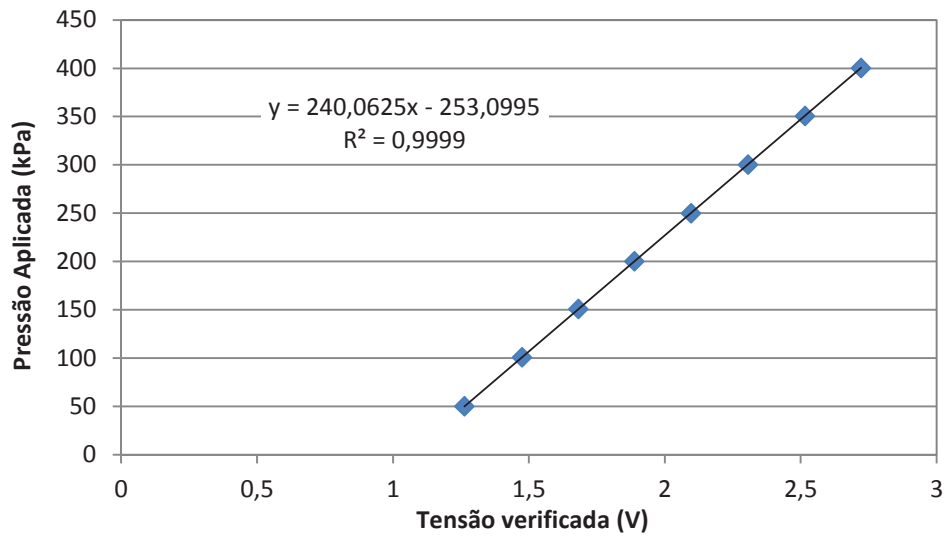
### 4.2.3 Calibração dos sensores

Para a calibração dos sensores, foram aplicadas diferentes pressões conhecidas nos transdutores de pressão, enquanto o LVDT recebeu incrementos de deslocamentos verticais e a célula de carga recebeu carregamentos, com a utilização de volumes de água conhecidos. Dessa forma, em cada sensor foi possível verificar as variações de tensão nas suas respectivas saídas, permitindo plotar um gráfico contendo as curvas de calibração. O que possibilitou adquirir as constantes das curvas de calibração, para cada um destes sensores, aplicá-los sobre os valores gravados no banco de dados, e conseguinte converção destes para as unidades desejadas. Na sequência do texto, está apresentado o detalhamento das calibrações realizadas.

#### 4.2.3.1 Transdutores de pressão

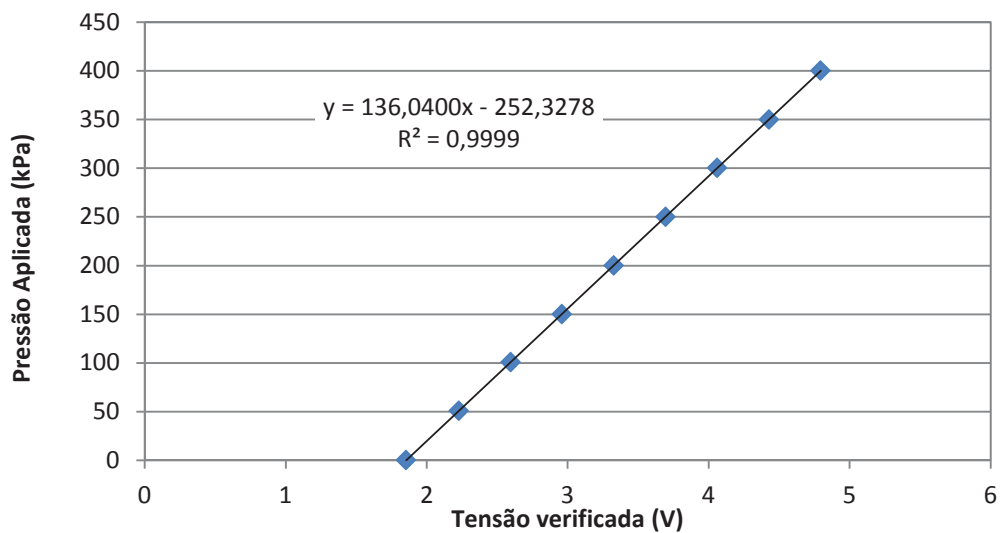
A aferição dos transdutores de pressão foi realizada em duas etapas, por apresentarem diferentes fabricantes. Assim, foram aplicadas diferentes pressões conhecidas, para a leitura das variações das tensões (V) na saída de cada sensor, com auxílio de um multímetro, esse procedimento foi realizado para ambos os transdutores de pressão. Na Figura 36, podem ser observados os valores das pressões aplicadas e os valores das tensões verificadas na saída do sensor, bem como a curva de calibração obtida para o modelo K1 da Ashcroft.

Figura 36: Curva de calibração dos transdutor K1 da Ashcroft.



Para os sensores do modelo SP2, fabricados pela Sitron, utilizados para as verificações da pressão na saída da câmara de ensaio e na câmara de coleta. A Figura 37 apresenta a constante da curva de calibração obtida, a partir dos valores de pressão aplicados e dos valores de tensão (V) verificados em sua saída.

Figura 37: Curva de calibração dos transdutores SP2 da Sitron.



Na Figura 37, pode ser observado o momento em que foram realizadas as observações das variações da tensão (V), ocorrida nos diferentes transdutores de pressão, devido aos sucessivos incrementos de pressão aplicados. O procedimento foi realizado com o auxílio de um multímetro digital Fluke 114 e a devida alimentação dos sensores com a tensão requerida.

Figura 38: Calibração dos transdutores de pressão.



#### 4.2.3.2 LVDT

A calibração deste sensor foi realizada com a utilização de um micrômetro de profundidade, fabricado pela Mitutoyo. Ao girar o tambor de medição do micrômetro, uma haste intercambiável se projeta a frente, deslocando o eixo do sensor, o qual registra essas variações, na forma de tensão de saída. De posse dos valores das variações de tensão verificados na saída, foi possível plotar o gráfico e obter a constante da curva de calibração, como apresenta a Figura 39. Na Figura 40 pode ser observado o momento que foi realizada a calibração do sensor.

Figura 39: Curva de calibração do LVDT.

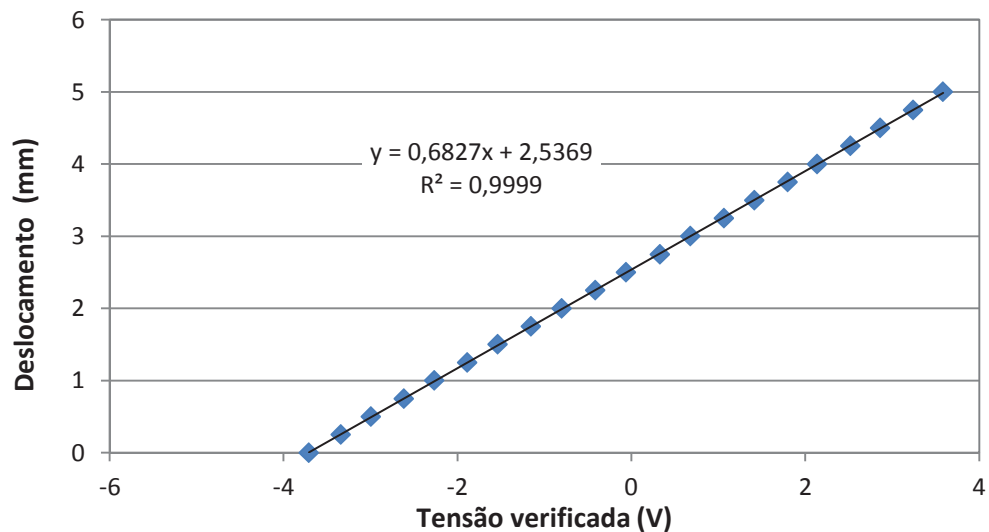
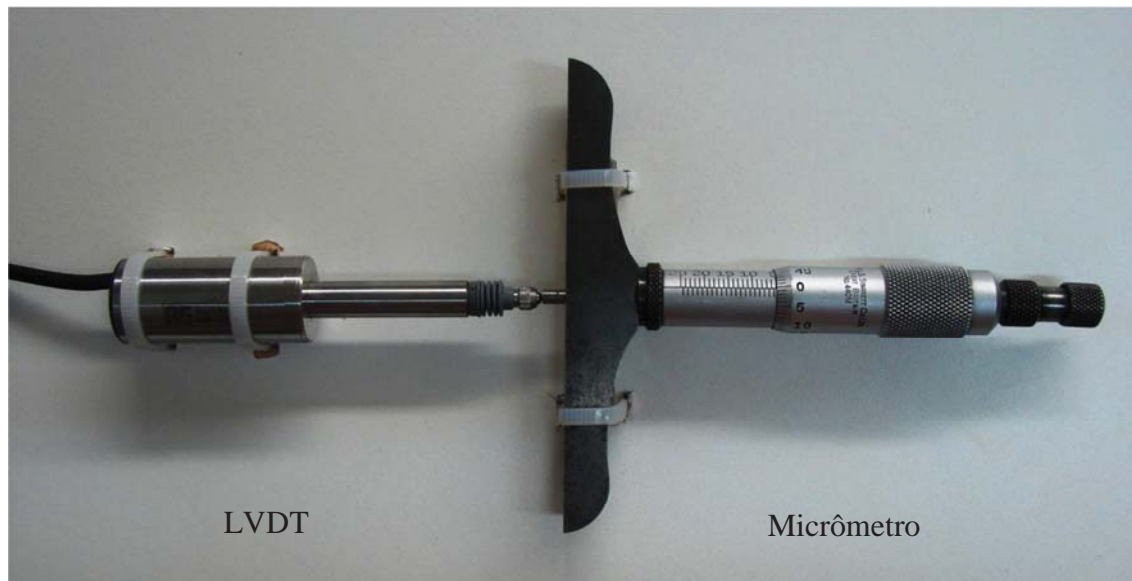


Figura 40: Calibração do sensor de deslocamento vertical.



#### 4.2.3.3 Célula de carga

A calibração deste sensor foi realizada com o posicionamento de uma proveta, sobre a célula de carga e seguidos incrementos de volume de água foram adicionados, com o auxílio de uma pipeta de 10 mL para melhor precisão. Com a adição de volumes conhecidos e respectivas verificações das variações de tensão (V) na saída deste sensor, foi possível obter valores necessários para plotar uma curva de calibração, como pode ser observada na Figura 41. Na Figura 42 pode ser observado, o momento em que foi realizado o procedimento descrito.

Figura 41: Curva de calibração da célula de carga.

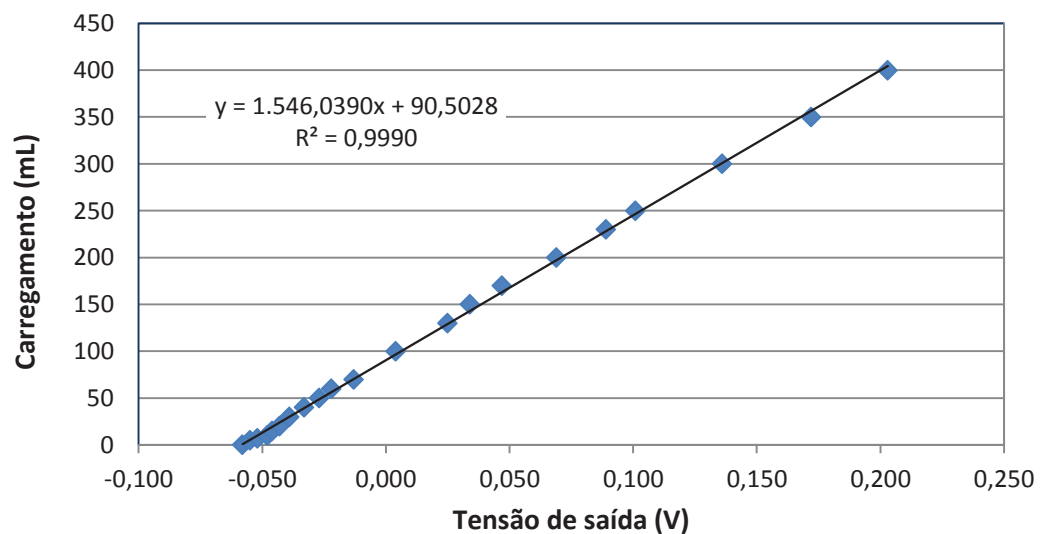


Figura 42: Calibração da célula de carga.



#### 4.2.3.4 Cilindro Pneumático

A calibração do cilindro pneumático foi realizada com a utilização de uma leitora digital da Solotest, devidamente aferida pelo INMETRO®. A carga máxima de verificação deste dispositivo não ultrapassa os 500 kg e sua resolução fica em torno dos 100 g. Através dos sucessivos incrementos de pressão aplicados na alimentação do cilindro pneumático e momentâneas verificações de força resultante sob a leitora digital, foi possível plotar uma curva de calibração para o dispositivo, como apresenta a Figura 43. Já a Figura 44 mostra o momento em que foram realizados os carregamentos e as consecutivas leituras das forças aplicadas pelo cilindro pneumático.

Figura 43: Carregamento e leituras realizadas.

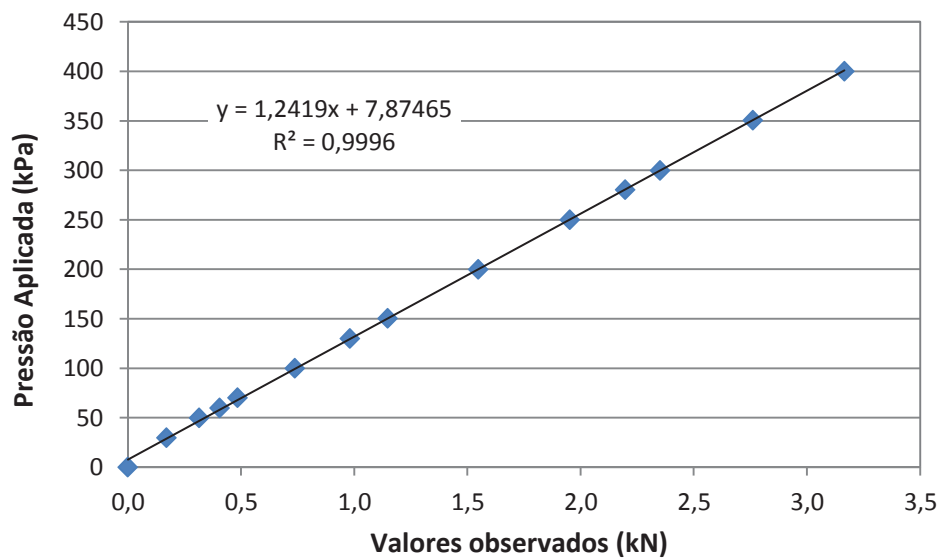


Figura 44: Aplicação de força com o cilindro pneumático.



### 4.3 Ensaio piloto

O ensaio piloto foi realizado com aplicação de pressões hidráulicas, mais elevadas as quais o equipamento será submetido posteriormente, quando da realização de ensaios que investigarão os comportamentos hidráulicos dos solos compactados. A utilização de tais pressões se deve ao fato de se utilizar valores mais extremos, a fim de verificar o desempenho do sistema e apontar possíveis falhas. Assim, foi possível verificar possíveis junções



irregulares nas câmaras, perdas de pressão no sistema hidráulico e pneumático decorrentes de vazamentos. Ainda, foi possível verificar a consistência do sistema eletrônico ao utilizá-lo para aquisição de dados durante 17 dias consecutivos.

#### **4.3.1 Resultados da implementação dos sensores**

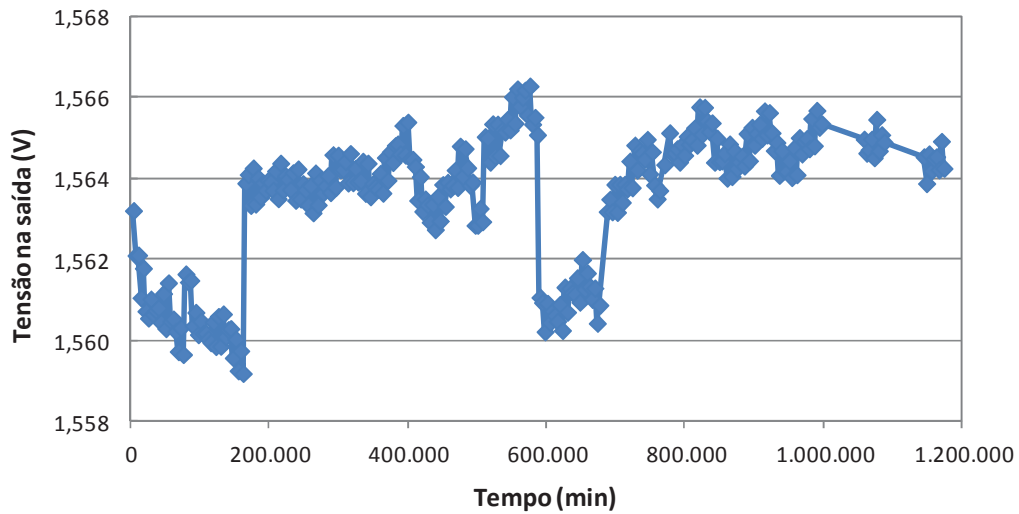
##### **4.3.1.1 Transdutores de pressão**

As pressões monitoradas pelo sistema de aquisição de dados foram obtidas com o auxílio de transdutores de pressões, os quais, configuram de modelos e fabricantes diferentes, por isso receberam tratamentos diferenciados. Dessa forma, estão apresentados no decorrer do texto os resultados das variações de tensão verificada para cada um dos sensores.

**a) Cilindro pneumático:** o transdutor de pressão utilizado para realizar as medições da alimentação deste componente pneumático foi do modelo K1, fabricado pela Ashcroft. A Figura 45 apresenta as variações de tensão na saída, aquisitadas por este sensor que realizou o monitoramento ao longo do tempo de ensaio. Foi observado uma faixa máxima de variação de até 0,0052 V. Dessa forma, a variação nas leituras ficaram em até 0,3 %, correspondendo a precisão (erro aleatório) requerida, de 5 %.

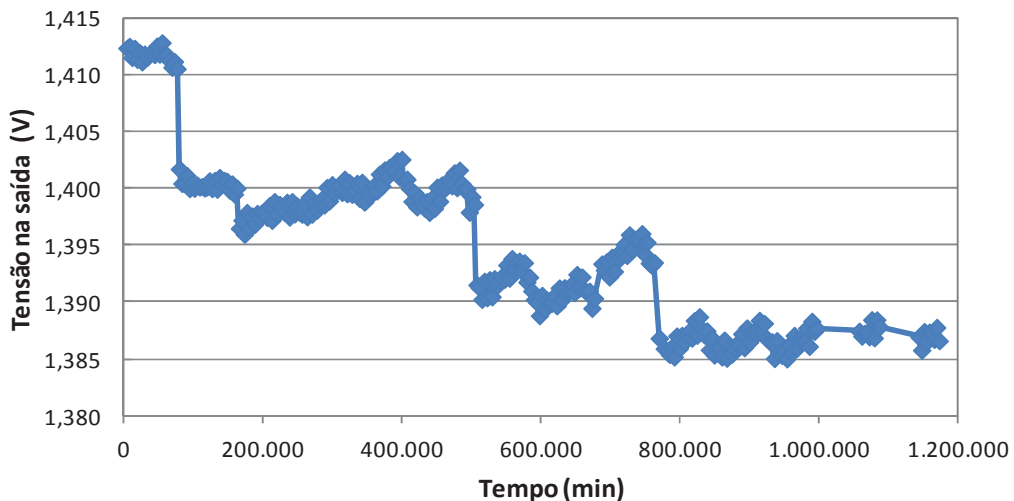
Este sensor apresentou desempenho satisfatório, acusando pequenas variações na pressão que alimenta este sistema. Estas podem ser atribuídas às pequenas variações do sistema de ar do laboratório, mas principalmente, às paradas do ensaio para inserção da solução contaminante no reservatório e exaustão da solução percolada pelo CP até a câmara de coleta. O sensor apresentou-se viável para utilização na aquisição dos dados, servindo de referência no registro destas variações ocorrentes na alimentação do cilindro pneumático que aplica a carga vertical sobre o CP.

Figura 45: Tensão na saída do transdutor - Cilindro pneumático.



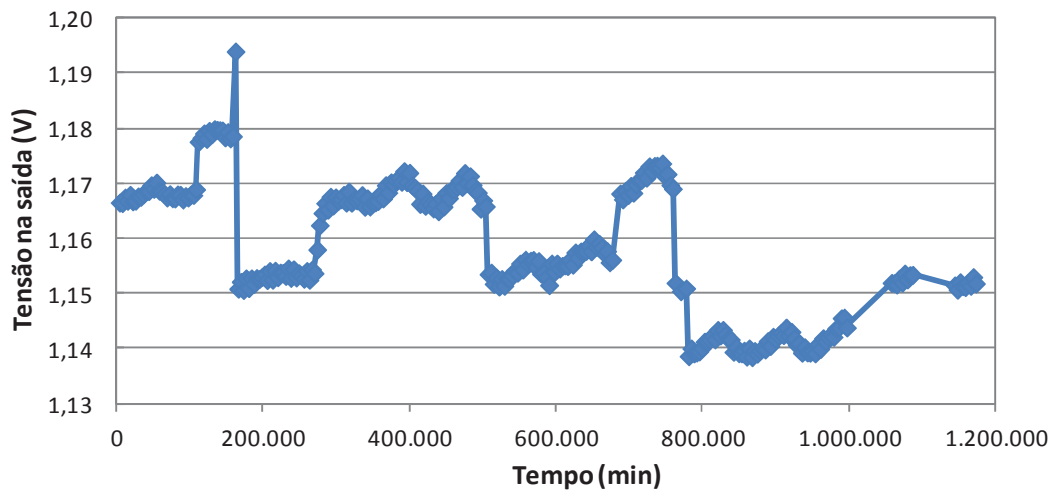
- b) Reservatório:* As leituras realizadas por este sensor da Ashcroft - K1, instalado para verificar a pressão aplicada no reservatório de solução contaminante também apresentou pequena variabilidade. A pressão é aplicada na câmara reservatório, permitindo a transmissão de pressão hidráulica para a solução contaminante, a qual é forçada a permear através do CP. O sensor adquiriu os valores referentes a variação ocorrente neste sistema, como podem ser observados na Figura 46. Este sensor demonstrou bom desempenho durante o seu período de trabalho, apresentando uma faixa de variação na tensão de sua saída, de até 0,0278 V. Assim, foi observado que este transdutor de pressão atingiu precisão próxima aos 2 % de sua faixa de operação, ficando dentro dos 5 % requerido, demonstrando sensibilidade adequada a sua plena utilização neste equipamento.

Figura 46: Tensão na saída do transdutor - Reservatório.



c) **Câmara de coleta:** As variações ocorridas na pressurização desta câmara foram monitoradas pelo transdutor de pressão da Sitron, modelo SP2. Este sensor também apresentou desempenho pouco inferior aos demais, no entanto, ainda satisfatório, atingindo precisão abaixo dos 5% da faixa de operação requeridos, como pode ser observado na Figura 47. Foi verificado valor máximo de variação na saída deste de 0,5555 V ao longo dos dias monitorados. A precisão ficou em 4,6 % da faixa de operação requerida. Podem ser observadas algumas variações abruptas, claramente atribuídas às interrupções realizadas durante o ensaio, para reposição de solução contaminante e consequentes exaustão da solução acumulada na câmara de coleta.

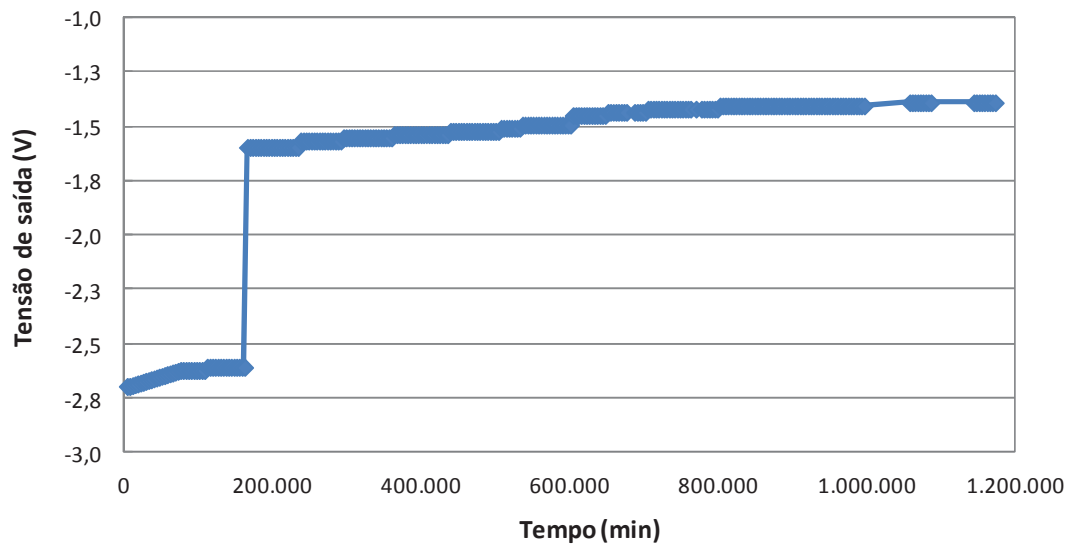
Figura 47: Tensão na saída do transdutor - Câmara de coleta.



#### 4.3.1.2 LVDT

As variações verificadas na saída do LVDT podem ser observadas na Figura 48. As quais são atribuídas aos deslocamentos verticais sofridos pela amostra, devido ao carregamento aplicado por parte do cilindro pneumático. Essa observação apresenta a deformação ocorrida na amostra, análoga às variações na tensão de saída deste sensor. Desta forma, observa-se um deslocamento maior após o quarto dia de ensaio, seguido de pequenos deslocamentos ao decorrer dos dias posteriores. Apesar deste sensor caracterizar-se por sua boa acurácia, não foi possível determinar seu desempenho quanto a precisão, pois ele verifica valores referentes as variáveis de resposta, os quais não podem ser fixados.

Figura 48: Tensão na saída - LVDT.

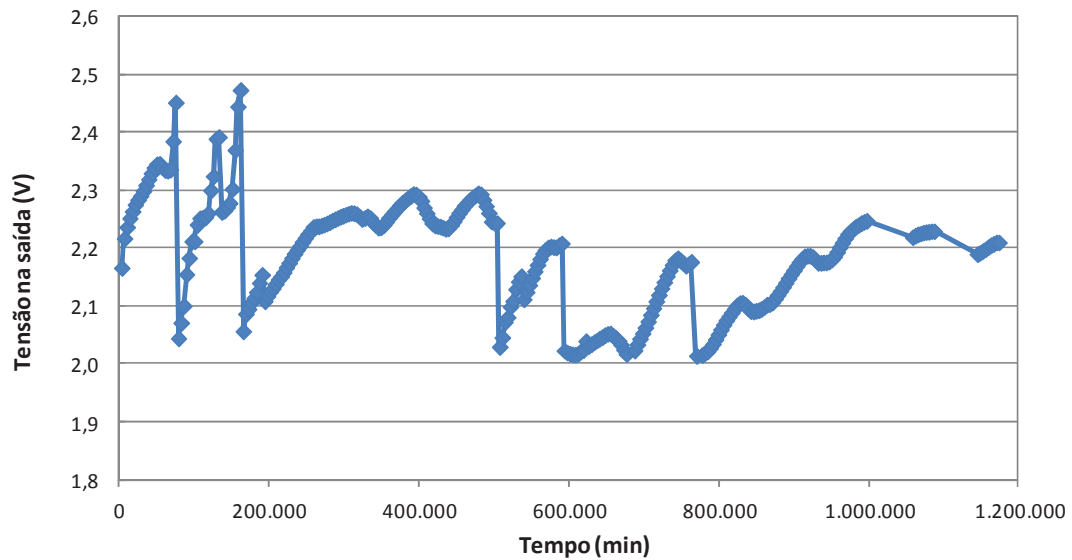


#### 4.3.1.3 Célula de carga

Na Figura 49 podem ser observadas as variações de tensão na saída da célula de carga, este sensor foi o que apresentou as maiores variações dentre todos utilizados. Podem ser observadas quedas abruptas, as quais indicam os momentos em que a câmara de coleta foi exaurida. Alguma variabilidade foi observada nos valores adquiridos, devido a flutuabilidade na tensão de saída deste sensor. Estas variações podem ser causadas por uma variação na fonte de alimentação do sensor. O sinal de saída deste componente é amplificado pelo condicionador de sinal, antes de ser enviado ao módulo de leitura, o que torna mais visível suas pequenas variações as interferências externas sofridas pelo mesmo. Dessa forma, será necessário a adição de um filtro analógico na saída deste sensor para equalizar os ruídos existentes em suas leituras, bem como refinar tais valores adquiridos.

As variações das massas monitoradas pela célula de carga, constitui-se em incrementos de volumes de solução permeada até a câmara de coleta, caracterizando-se como variável de resposta, não fixada. O critério para verificar a precisão desta célula de carga foi estimado através da observação das maiores variações ocorridas, quando as leituras apresentaram declínio, ou seja, uma variação negativa sugerindo visíveis interferências ou erros nas leituras realizadas pela célula de carga. Pode ser observado valores máximos de até 2,8887 V, o que apresenta uma variação em torno de 2,4 % da faixa de operação.

Figura 49: Tensão na saída - Célula de carga.



#### 4.3.2 Resultados do ensaio de permeabilidade da amostra

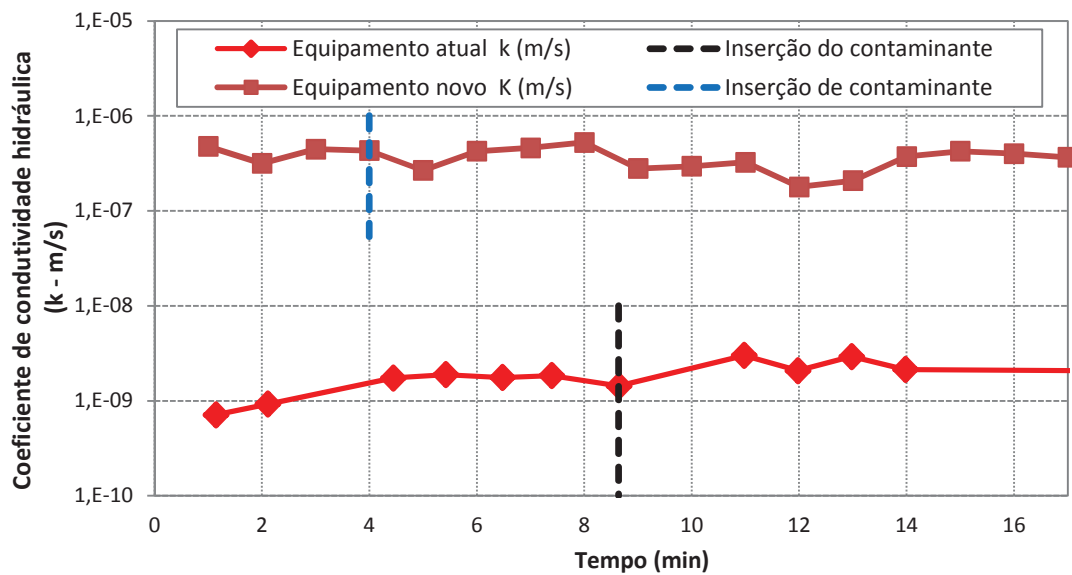
O corpo de prova foi percolado por água destilada, a fim de obter um estádio próximo ao de saturação, ou seja, percolar e preencher de água a maior parte dos espaços vazios de ar contidos dentro da amostra. Dessa forma, foi considerado apto para ensaio o momento em que o corpo de prova atingiu relação próxima a 0,9 (leitura realizada com transdutor de pressão na entrada/ transdutor de pressão na saída) de modo a otimizar a realização desta fase do ensaio, uma vez que, o objetivo primordial foi o teste do funcionamento do equipamento e seu sistema de aquisição de dados.

Os valores utilizados para os cálculos da condutividade hidráulica da amostra foram adquiridos com leituras a cada 300 s. O software gera uma planilha com os dados adquiridos, distribuídos em colunas alinhadas, uma para cada sensor.

Os dados brutos foram multiplicados pela constante de calibração de cada sensor para obtenção dos valores reais de amostragem. Então foram extraídas as médias horárias para os valores das pressões com finalidade de diminuir o volume de dados. A seguir, os valores foram utilizados para o cálculo do comportamento da permeabilidade e puderam ser gerados os gráficos que indicam as variações da condutividade hidráulica e conseguintes recalques.

A Figura 50 é apresentado o resultado do ensaio piloto e do ensaio de adensamento modificado. Foi realizado ensaio com amostra contendo 2 % de cimento e peso específico de  $14,5 \text{ kN/m}^3$ . Neste ensaio foi moldado uma amostra de solo e permeada por água destilada para atingir-se proximidade na saturação e posterior permeação da solução ácida.

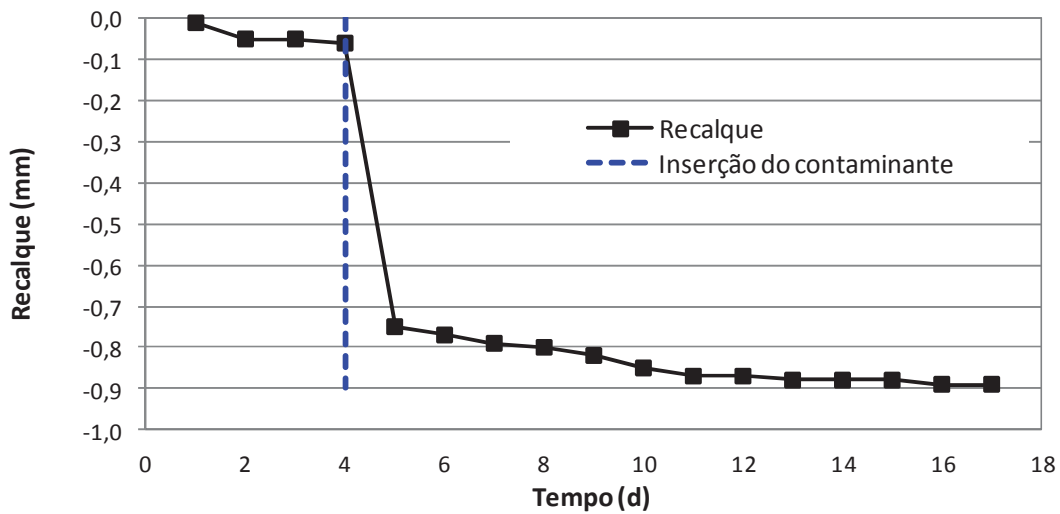
Figura 50: Comportamento da permeabilidade ao longo do tempo.



Na Figura 51 pode ser observado o comportamento quanto a permeabilidade da amostra, realizado no equipamento antigo e no novo. No ensaio piloto realizado no equipamento novo, o qual está apresentado neste trabalho, podem ser observados valores mais elevados (magnitude de  $10^{-7}$  m/s), quando comparados com os resultados obtidos pelo ensaio comparativo em equipamento antigo (magnitude de  $10^{-9}$  m/s e  $10^{-10}$  m/s), o qual tem constituída a parede da câmara em aço inox, material este, que possui maior rugosidade. Dessa forma, isso nos leva a acreditar que os valores para o ensaio piloto tenham sido maiores devido ao fluxo mais elevado na interface entre o corpo de prova e a parede acrílica da câmara, devido a menor rugosidade apresentada por este material quando comparado ao aço inox constituínte da câmara do equipamento antigo, bem como, possíveis deformações no tubo acrílico decorrentes da moldagem do corpo de prova na prensa CBR, acarretando deformidades entre o corpo de prova e o tubo.

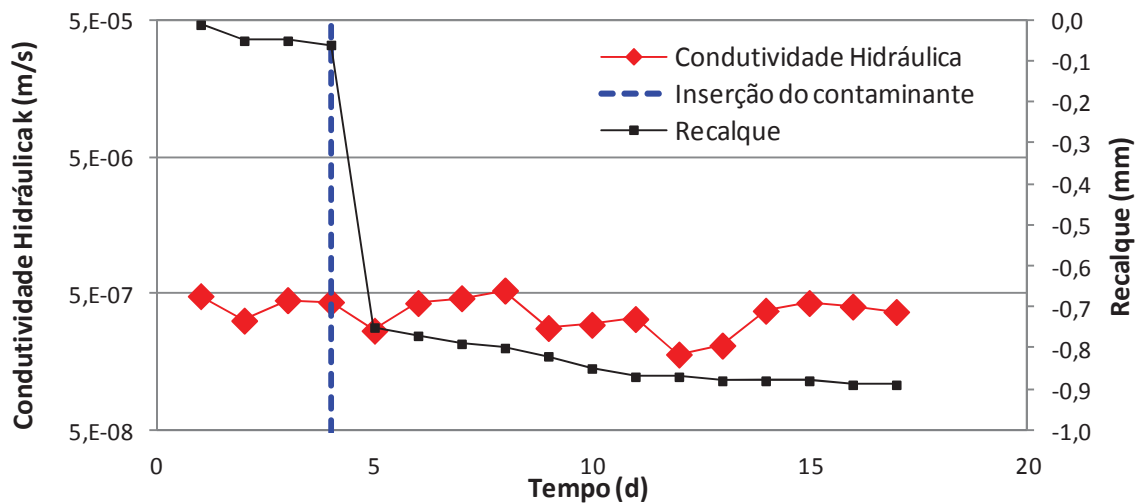
Na Figura 52 pode ser observado o monitoramento do ensaio da deformabilidade mecânica por meio dos recalques observados ao longo do ensaio, devido a aplicação da carga estática vertical, a qual visou simular a carga de resíduos sobre o *liner*. O ensaio realizado foi em modo piloto, contando com 17 dias de monitoramento. Os recalques foram observados logo ao início do monitoramento e se mostraram mais significativos a partir da inserção da solução ácida. Pôde ser observado que o recalque atingiu valor próximo a 0,9 mm.

Figura 51: Comportamento do recalque ao longo do tempo.



Os resultados obtidos nesta pesquisa foram corroborados por Knop (2007) que também obteve recalques de até 0,9 mm no início da percolação da solução ácida, utilizando-se de uma prensa de adensamento. Uma das explicações do autor é que as camadas compactadas podem sofrer alterações na sua compressibilidade, apresentando recalques mediante ao contato de resíduos agressivos quimicamente, como os de pH ácido.

Figura 52: Comportamento da condutividade hidráulica e do recalque ao longo do tempo.



Os resultados para o comportamento da permeação da solução ácida pela amostra não apresentaram tendência de redução de permeabilidade, quando comparado com o ensaio piloto do equipamento antigo, possivelmente porque o tempo de ensaio piloto realizado foi em menor prazo. Alguns autores relataram que, com a permeação de fluidos contaminantes ácidos por amostras de solo compactado, ocorreram sensíveis reduções na condutividade hidráulica para as amostras que continham material cimentante, devido à contínua hidratação

do cimento (HEINECK, 2002; ZHANG et al., 2004; UFBA, 2005) e incremento na mesma para as amostras naturais de solo (GRIM, 1953; FERNANDEZ e QUIGLEY, 1991; MADSEN, 1994; BOSCOV, 1997; KACZMAREK et al., 1997; NASCENTES, 2003; SHARMA e REDDY, 2004).

O ensaio de permeabilidade em barreiras compactadas deve apresentar valores inferiores a  $10^{-9}$  m/s para que possam ser utilizadas como *liners* (por ex. KALTEZIOTIS et al., 1994; ROWE et al, 1995; MANASSERO et al., 2000). Isso não foi verificado no ensaio piloto realizado no equipamento novo que apresentou magnitude de  $10^{-7}$  m/s, sendo creditado isso à vazão mais elevada na interface do corpo de prova e a parede da câmara de ensaio. Logo, é necessário que esta seja substituída por outro material, como por exemplo, acrílico com maior rugosidade ou aço inox, o qual possui maior rugosidade.

Cabe salientar que este ensaio teve como objetivo o teste piloto da instrumentação para melhor entendimento do comportamento inicial das variáveis de resposta frente às de controle.



## **CAPÍTULO 5. CONCLUSÃO**

### **5.1 Comportamento do equipamento**

O equipamento desenvolvido nesta dissertação demonstrou ser uma ferramenta útil para determinação do comportamento mecânico (recalques) da amostra ensaiada. Quanto ao comportamento hidráulico e à condutividade hidráulica observada na amostra foi possível verificar a disparidade em relação à magnitude dos valores apresentados por outros autores, quando realizados ensaios de percolação de solução de pH ácido, o que é creditado possivelmente a uma vazão mais elevada pela interface da parede de acrílico, adotada para a câmara de ensaio.

O dimensionamento dos componentes mecânicos permitiram estabelecer as condições extremas de funcionamento do equipamento, perante as pressões mais elevadas utilizadas no ensaio piloto. O dimensionamento do equipamento de coluna modificado demonstra que este possui uma capacidade máxima de operação de até 500 kPa ou 0,5 MPa, limites estabelecidos pelos reguladores de pressão de precisão instalados.

### **5.2 Comportamento dos sensores**

Os sensores componentes do sistema de aquisição de dados tiveram eficiente comportamento durante o período de monitoramento do ensaio de validação, contando com pequenas variações de tensão, somando-se, possivelmente as pequenas instabilidades na fonte de alimentação, interrupções do ensaio e instabilidade na rede de ar instalada no laboratório de geotecnia ambiental – UPF, pois, a mesma não é utilizada exclusivamente para os ensaios. No entanto, os sensores apresentaram um desempenho satisfatório, atendendo a faixa de precisão de 5 % da faixa de operação.

A célula de carga acusou as maiores variações de tensão na saída. Essa flutuabilidade na tensão de saída deste sensor pode ser atribuída às interferências causadas pela rede elétrica (interferências eletromagnéticas) ou variações na fonte de alimentação do sensor. Como o sinal de saída é amplificado pelo condicionador de sinal, antes de ser enviado ao módulo de leitura, as interferências externas e pequenas variações do próprio sensor tornam-se mais visíveis. No entanto, este cumpriu sua função de trabalho, registrando incrementos de fluido adicionados na câmara de coleta, com precisão adequada aos cálculos para determinação da condutividade hidráulica da amostra.

O sensor de deslocamento vertical (LVDT), apresentou excelente desempenho ao verificar as pequenas deformações ocorridas na amostra ensaiada.

O módulo USB utilizado para realizar a comunicação entre os sensores que aquisitam os dados e o software que processa os mesmos, mostrou-se eficiente e sem falhas ao transmitir as informações para o computador a ele conectado.

Ainda, a programação implementada no software correspondeu de forma bastante satisfatória, com o perfeito funcionamento das interfaces elaboradas para inserção das informações de dados complementares para o processamento dos sinais aquisitados pelos sensores. A interface IHM desenvolvida para acompanhamento visual e momentâneo dos valores aquisitados, por parte do operador, durante a regulagem e aplicação das pressões no reservatório, saída da câmara de ensaio e o posicionamento do LVDT, mostrou boa aplicabilidade e segurança, ao facilitar a operação do equipamento para a realização dos ensaios.

Por fim, o sistema de aquisição de dados, mostrou-se confiável e preciso na aquisição, processamento e gravação dos dados, sem comprometer as informações aquisitadas durante o ensaio. Assim, agregou maior facilidade na condução dos ensaios, além de aumentar a precisão dos valores medidos, quando comparado com as leituras realizadas manualmente devido a variabilidade e inconstâncias nas anotações.

### **5.3 Ensaio piloto**

A amostra de solo compactado artificialmente cimentado teve uma condutividade hidráulica em torno de  $<10^{-7}$  m/s, indicando que pode ter ocorrido fluxo mais elevado pela parede da câmara, a qual é constituída em acrílico translúcido. Sendo assim, deve ser aumentada a rugosidade desta, com o lixamento da parede interna ou a confecção de ranhuras. Ainda, caso este procedimento não tenha o efeito esperado, esta deve ser substituída por um cilindro em aço inoxidável.

### **5.4 Sugestões para trabalhos futuros**

Dado o desenvolvimento do equipamento que compreendeu esta dissertação, algumas sugestões para trabalhos futuros estão apresentados na sequência. O equipamento desenvolvido tornará possível a continuidade das pesquisas do grupo de geotecnia da UPF/UFRGS, para a utilização tanto de amostras de solo compactado com e sem adição de

materiais cimentantes, bem como, o surgimento de novas linhas de pesquisas com diferentes configurações de materiais, uma vez que, este poderá ser utilizado amplamente em outras pesquisas e áreas afins.

São apresentadas as sugestões:

- a) Quanto a programação, recomenda-se adequar a possibilidade de enviar comandos de gravação dos dados, individualizados para cada sensor. Isso tornará possível a verificação e gravação de determinado sensor em intervalos mais curtos ou mais longos de tempo, individualizando assim, cada sensor no que diz respeito aos intervalos de gravação;
- b) Adicionar na interface da tela de ensaio um *display* indicativo dos valores sendo medidos instantaneamente, para cada sensor, independente do tempo de gravação de cada um deles. Isso tornará possível verificar as leituras instantâneas na tela e melhorará a visualização do andamento do ensaio;
- c) Realizar programação no software de modo que o mesmo faça a gravação dos dados já processados, multiplicando pelas constantes das curvas de calibração inseridas na tela inicial desenvolvida, ganhando tempo na tabulação e interpretação dos dados finais;
- d) Adequar a haste prolongadora do pistão, adicionando roscas contrárias nas suas extremidades para otimizar a montagem e desmontagem de cada ensaio. Além disso, possibilitará maior facilidade ao posicionamento adequado do pistão de aplicação de carga sob o disco drenante superior, o qual fica posicionado sobre o corpo de prova para distribuir as pressões aplicadas. Assim, as verificações do sensor de deslocamento vertical poderão ser ainda mais precisas, uma vez que, ao aplicar a carga vertical, o pistão irá partir junto ao disco superior e este junto ao corpo de prova, reduzindo ainda mais o erro nas verificações do deslocamento vertical.
- e) Adição de um filtro analógico na saída deste sensor, pode cumprir a função de equalizar estes ruídos existentes em suas leituras, bem como, refinar tais valores adquiridos pelo sensor.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACRIRESINAS. **Produção Standard dos Polímeros.** Disponível em: <http://www.acriresinas.com.br/paginaprincipal.htm/>. Acesso em: 05 Jun. 2012.

AMADI, A. A. Hydraulic Conductivity Tests for Evaluating Compatibility of Lateritic Soil—Fly Ash Mixtures with Municipal Waste Leachate. **Geotech Geol Eng**, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **Standard Guide for Liners System for Containment of Wastes: D1973.** Philadelphia. 1991. 13 p.

\_\_\_\_\_. **Standard Classification of Soils for Engineering Purposes: D2487.** Philadelphia. 1993. 11 p.

\_\_\_\_\_. **Standard Test Method for leaching solid material in a Column: D4874.** Apparatus. Philadelphia. 1995. 7 p.

\_\_\_\_\_. **Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter: D5084.** Philadelphia. 2003. 23 p.

\_\_\_\_\_. **Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-Wall, Compaction-Mold Permeameter: D5856.** Philadelphia. 2007. 8 p.

AUSTIN, T. **Landfill-cover conflict.** Civil Engineering, New York, v. 62, n. 12, p. 70-71, 1992.

BAIRD, C. **Química Ambiental.** Traduzido por Maria A. L. R., Luiz C. M. C. 2 ed. Bookman, Porto Alegre, RS. p. 622, 2002.

BASSO, J. B. **Transporte e retenção K, Cu e Cl em uma mistura compactada de solos lateríticos para uso em barreiras selantes: Procedimentos de homogeneização da mistura e adaptações em equipamento de percolação em colunas.** 2003. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de São Carlos, São Paulo - SP, 2003.

BASTOS, C. A. B.; SOUZA, E. W.; CAMARGO, K. R. Avaliação da permeabilidade de solos compactados do litoral sul do rio grande do sul e adjacências para o uso como barreiras impermeáveis em obras de aterro de resíduos. In: 12<sup>o</sup> CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA D ENGENHARIA E AMBIENTAL, 2008, Pernambuco. **Anais...** Pernambuco: ABGE, 2008. CD-ROM.

BEDIN, J. Estudo do comportamento geomecânico de resíduos de mineração. 2010. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

BOSCOV, M. E. G. **Contribuição ao projeto de sistemas de contenção de resíduos perigosos utilizando solos lateríticos**. 1997. Tese (Doutorado – Escola Politécnica de São Paulo), Universidade de São Paulo, 1997.

BRAGA, R. M. Q. L.; COSTA, M. L.; BOSCOV, M. E. G. Avaliação da Compatibilidade entre uma Camada de Solo Compactado e uma Solução de Hidróxido de Sódio. 2007. In: VI Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental – REGEO 2007. Recife. **Anais...** Recife: ABMS/ IGS-Brasil, 2007. CD-ROM.

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

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (1993). Resíduos sólidos industriais, 2 ed. Rev. Ampl., São Paulo.

\_\_\_\_\_. **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 28. junho. 2006.

DANIEL, D. E.; TRAUTWEIN, S. J.; BOYNTON, S. S.; FOREMAN D. E. Permeability testing with flexible-wall permeameters. *Geotechnical Testing Journal*, Philadelphia, v. 7, n.3, 1984, p. 113-112.

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

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

EPA – U. S. Environmental PROTECTION AGENCY (1992). Code of Federal Regulations, Title 40, Chapter I, Part 264-221 – Design and operation requirements. 57 FR 3487, 29/01. Disponível em < <http://www.access.gpo.gov/ecfr> > Acesso em 10 de janeiro de 2005.

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, 1994. p. 221-226.

FERNANDEZ, F. e QUIGLEY, R. M. Interactions by Application of Effective Stresses. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 28, n. 3, 1991. p. 388-398.

FRANCISCA, F. M. e GLATSTEIN, D. A. Long term hydraulic conductivity of compacted soils permeated with landfill leachate. **Applied Clay Science**, v. 49, 2010. p. 187-193.

GABAS, S. **Avaliação da adsorção de cádmio e chumbo em solo laterítico compactado por meio de extração seqüencial.** Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de estruturas e fundações, Universidade de São Paulo. São Paulo – SP: USP, 2005. p. 240.

GRIM, R. E. Clay Mineralogy. New York, **Macmillan Publishing Company**. 1953. p. 348.

GUEVARA, L. R. Z. **Predição do potencial de drenagem ácida de minas utilizando o método cinético da coluna de lixiviação.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) Programa de Pós-Graduação do Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2007.

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

JESUS, S. C. **Difusão De Zinco Em Camada Compactada De Solo Residual De Gnaisse.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia – Departamento de Engenharia Civil): Universidade Federal de Viçosa, Viçosa MG, 2004.

KACZMAREK, M.; HUECKEL, T.; CHAWLA, V.; IMPERIALI, P. Transport Through a Clay Barrier with the Contaminant Concentration Dependent Permeability. *Transport in Porous Media* 29: 1997. p. 159-178.

KALTEZIOTIS, N.; SARSBY, R. W.; ZERVOGIANNIS, H. Compacted clay for landfill liners. In: **XII International Conference on soil mechanics and foundation engineering**, New Delhi. *Proceedings...*v. 4, 1994. p. 1591-1594.

KNOP, A. Estudo **do comportamento de liners atacados por ácido sulfúrico**. 2007. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Departamento de 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: Breakthrough curves and transport parameters. **Journal of Hazardous Materials**. v.155, 2008. p. 269-276.

KORF, E. P. Comportamento hidráulico e reativo de uma mistura solo-cimento para aplicação em barreiras impermeáveis de contenção de resíduos ácidos contendo chumbo e cádmio. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Meio Ambiente – Departamento de 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 area, Chennai, Southern India. **Environment Geology**. v. 54. 2008. p. 1465-1472.

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

LO, I. M. C. et al. Effect of soil stress on cadmium transport in saturated soils. **Practice periodical of hazardous, toxic and radioactive waste management**, v.7, n.3, 2003.

MADSEN, F. T.; MITCHELL, J. K. Chemical effects on clay hydraulic conductivity and their determination. **Mitteilungen des Institutes fur Grundbau und Bodenmechanik**, Eidgenossische Technische Hochschule Zurich, Zurich, 1989. p. 135.

MADSEN, F. T. Clay and synthetic liners – Durability against pollutants attack. XIII ICSMFE, **Anais...**, New Dalhi, Índia, 1994. p. 287-288.

MANASSERO, M.; BENSON, C. H.; BOUAZZA, A. Solid Waste Containment Systems. International Conference on Geotechnical & Geological Engineering-GeoEng 2000. November Melbourne, Australia. 2000. p. 19-24.

MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo**. Evangraf, Porto Alegre, 4.ed, 2010.

NASCENTES, C.R. **Coefficiente de dispersão hidrodinâmica e fator de retardamento de metais pesados em solo residual compactado**. 2003. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003. p. 117.

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

NOBRE, M. M. M. et al. Ensaio de Laboratório para Garantia de Qualidade da Execução de uma Barreira Reativa Permeável. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 6., 2007, Recife. **Anais...** Recife: ABMS, 2007. CD-ROM.

OGA, Seizi. **Fundamentos de toxicologia**. São Paulo: Atheneu., 1996. p. 515.

OLIVEIRA, F. J. S.; JUCÁ, J. F. T. Acúmulo de metais pesados e capacidade de impermeabilização do solo imediatamente abaixo de uma célula de um aterro de resíduos sólidos. Engenharia sanitária e ambiental, v.9, n.3, p. 211-217, jul/set. 2004. Disponível em: <[www.scielo.br/pdf/esa/v9n3/v9n3a07.pdf](http://www.scielo.br/pdf/esa/v9n3/v9n3a07.pdf)>. Acesso em: 12 setembro 2011.

PARK, J. B.; LEE, S. H.; -LEE, J. W. LEE, C. Y. Lab scale experiments for permeable reactive barriers against contaminated groundwater with ammonium and heavy metals using clinoptilolite (01-29B). Journal Hazardous Materials, v. 95, 2002. p. 65-79.

PEARLMAN, L. Subsurface Containment and Monitoring Systems: Barriers and Beyond, 1999. Disponível em<[www.slurrywall.com/articles/4.pdf](http://www.slurrywall.com/articles/4.pdf)> Acesso em: 15 outubro 2011.

PIERCE, J. J.; WITTER, K. A. Termination criteria for clay permeability testing. ASCE, **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 112, n. 9, 1986. p. 841-854.

REPETTO, M. Toxicología avanzada. Madrid: Díaz de Santos, 1995. p. 621.

RIBEIRO, A. G. C.; AZEVEDO, R. F.; AMORIN, N. R.; HELENO, A. F. Análise numérica de sistemas de cobertura na mina Rio Paracatu Mineração (RPM). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2010, Gramado. **Anais...** Gramado: ABMS, 2010. CD-ROM.

ROWE, R. K. Contaminant migration through groundwater – the role of modeling I the desing of barriers. Eleventh Canadian Geotechnical Colloquium. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 25, 1988. p. 778-798.

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



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

RYAN, C. R.; DAY, S. R. Soil-cement-bentonite slurry walls. Disponível em < [www.geosolutions.com/pdfs/TP-ASCE-scb2002.pdf](http://www.geosolutions.com/pdfs/TP-ASCE-scb2002.pdf).> Acesso em 23 de outubro de 2011.

SILVEIRA, R. N. P. O.; SOUZA, R. F. C.; BRAGA, R. M. Q. L.; BOSCOV, M. E. G.; COSTA, M. L. Estudo da Permeabilidade de uma Camada de Solo Compactado como Impermeabilização de Fundo de Bacias de Disposição da Lama Vermelha em Bacarena - PA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DO SOLO E ENGENHARIA GEOTÉCNICA - COBRAMSEG, 6., 2007, Vale do Itajaí. **Anais...** Vale do Itajaí: ABMS, 2008. CD-ROM.

SOARES, P. S. M.; TRINDADE, R. de B. E. Sistema passivos abióticos para o tratamento de drenagens ácidas de mina (DAM). In: Seminário Brasil-Canadá de Recuperação Ambiental de Áreas Mineradas, 1.. **Anais...** Seminário Brasil: Florianópolis – SC, 2003.

SOUZA, R. F. C. **Migração de poluentes inorgânicos em Liners Compostos**. 2009. Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação/Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2009.

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

STAVRIDAKIS, E. Preservation and Assessment of Clay Influence on Engineering Parameters of Cement – Treated Clayey Mixtures. EJDE vol. 10, Bundle A, 2005. Disponível em: <http://ejde.com/2005/Ppr0508/Ppr0508.htm>. Acesso em: 10 de outubro de 2011.

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

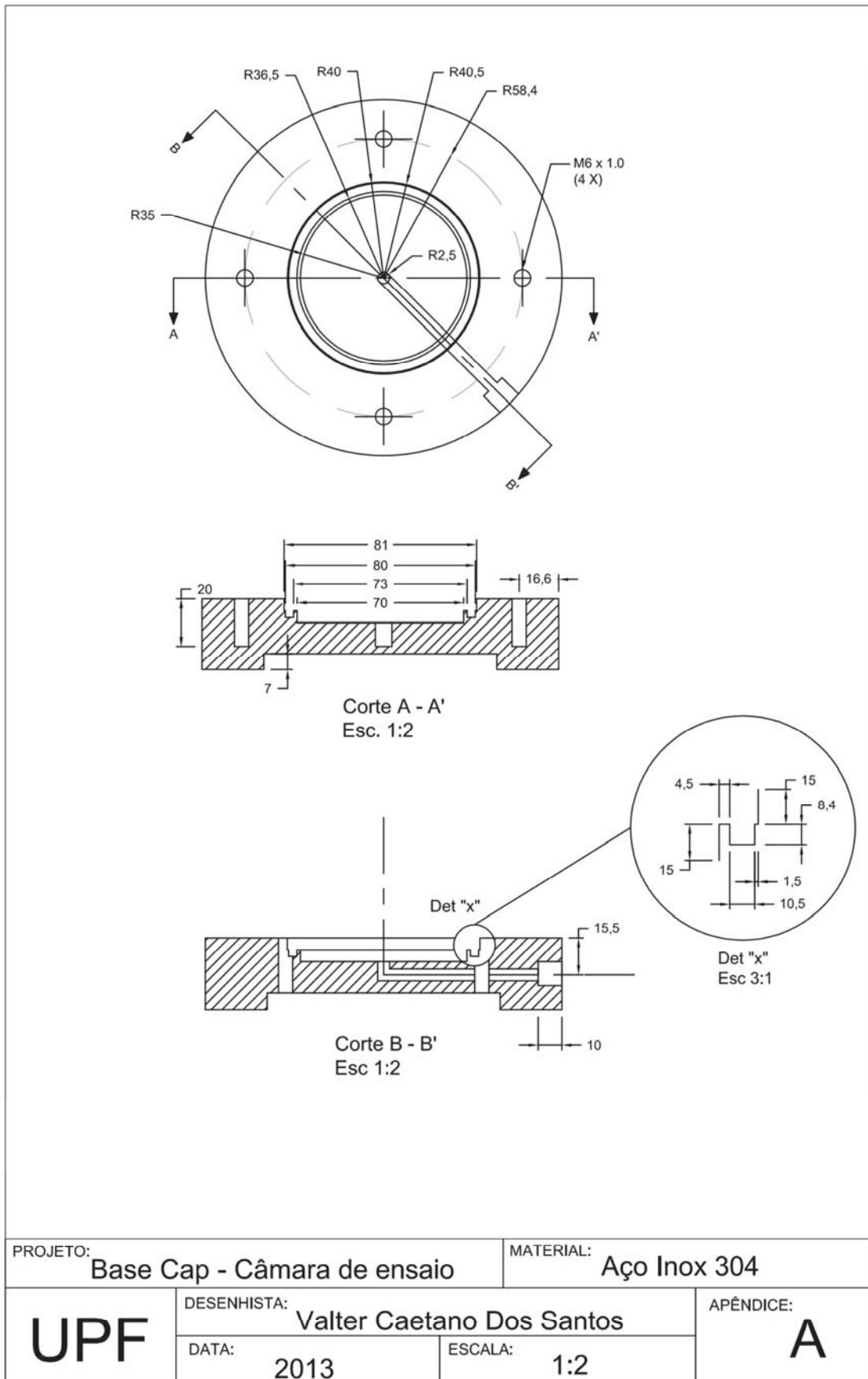
THAKUR, D. N.; TEWARY, B. K.; BIRENDRA, K.; SINGH, R. K. Reclamation of pyretic dumps using phosphatic wastes as an ameliorant: A case study. In.: **Environmental issues and management of wastes in energy and mineral production**. V.2, Rotterdam, p. 831-846, 1992.

UFBA. Técnicas de Remediação. Disponível em [www.geoamb.eng.ufpa.br/ftp/arquivos/CDmeplim/contamina\\_html/pag23e.htm](http://www.geoamb.eng.ufpa.br/ftp/arquivos/CDmeplim/contamina_html/pag23e.htm)> Acesso em: 5 outubro 2011.

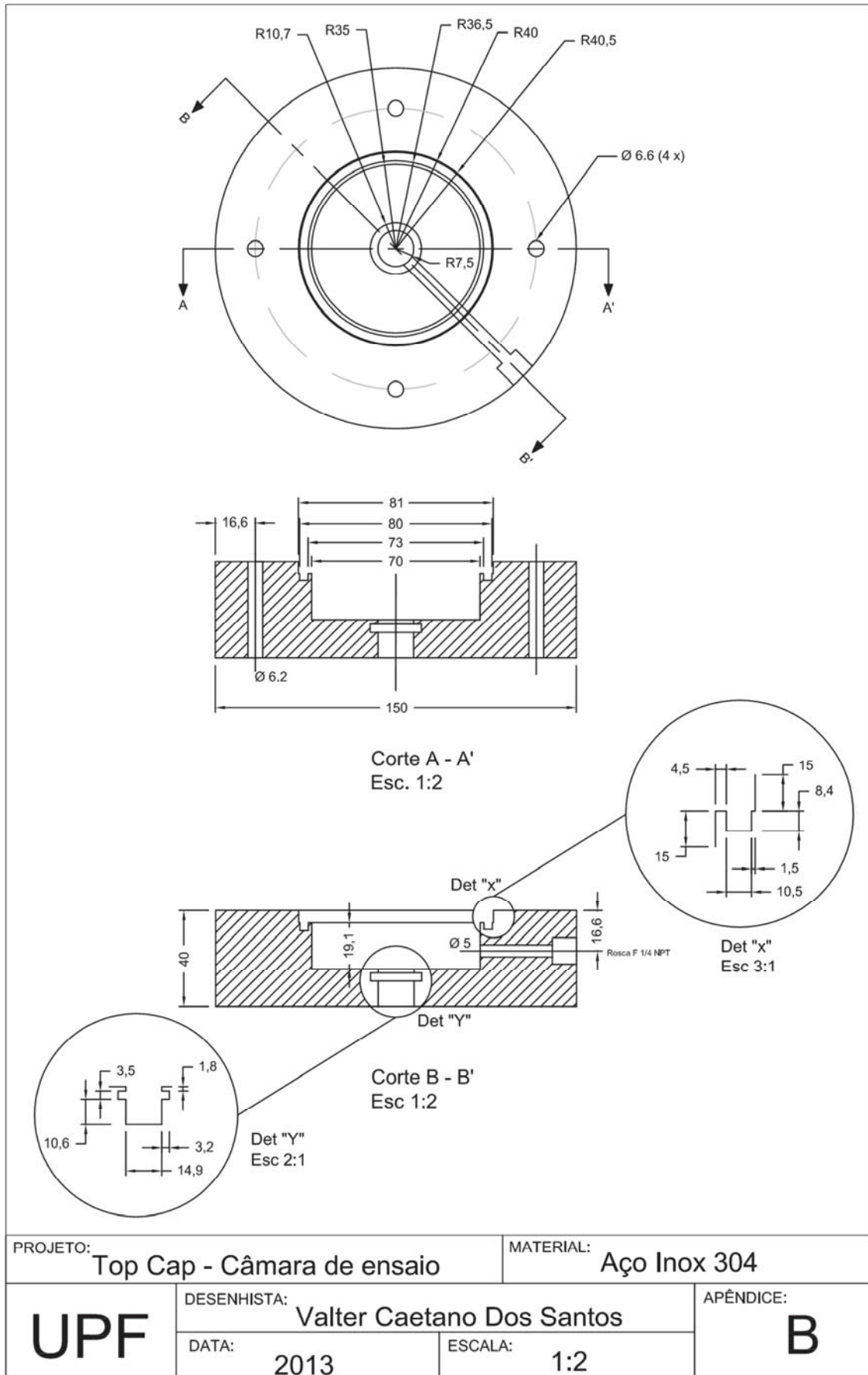
YOUNG, R. N.; TAN, B. K.; BENTLEY, S. P.; THOMAS, H. R. (1999) Competency assessment of two clay soil from South Wales for Landfill liner contaminant attenuation. **Quarterly Journal of Engineering Geology**, vol. 32, p. 261-270, 1999.

ZHANG, K.; CHEN, Y.; DENG, F.; TIAN, Q. Retention of clay-solidified grouting curtain to  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  and  $\text{Hg}^{2+}$  in landfill of municipal solid waste. **Journal Century South University Technology**, v. 11, n. 4, 2004.

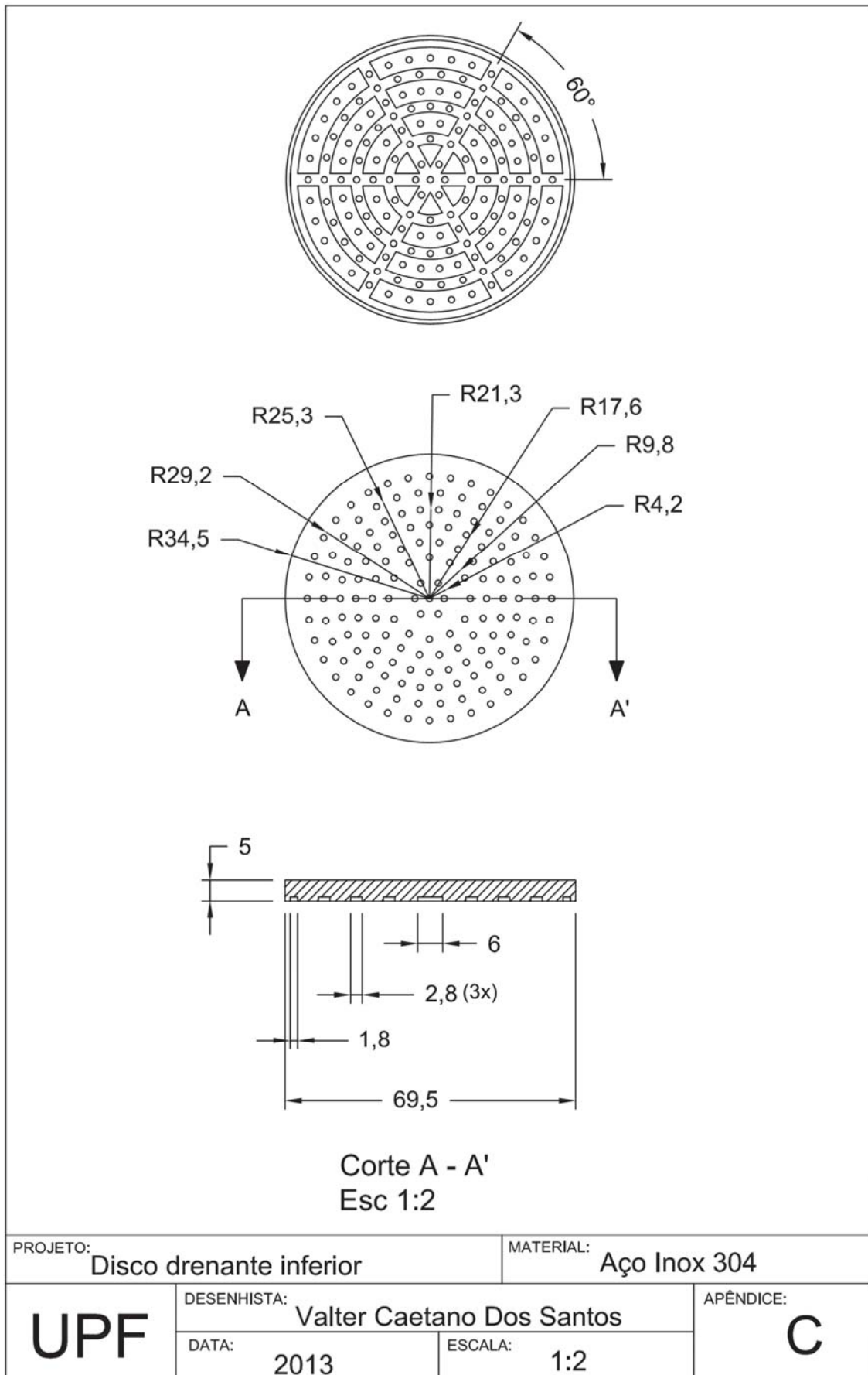
### APÊNDICE A - Base cap da câmara de ensaio



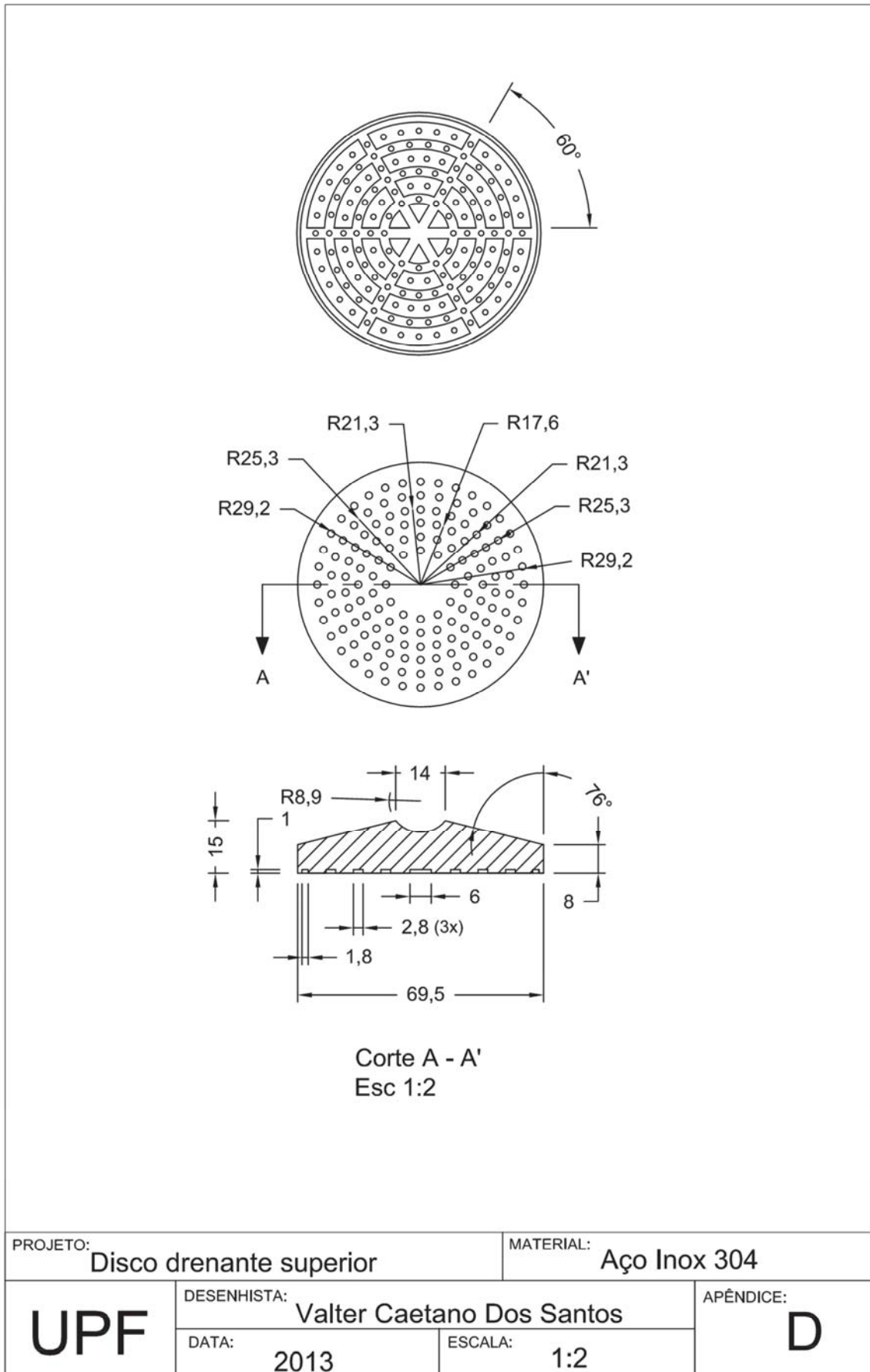
### APÊNDICE B - Top cap da câmara de ensaio



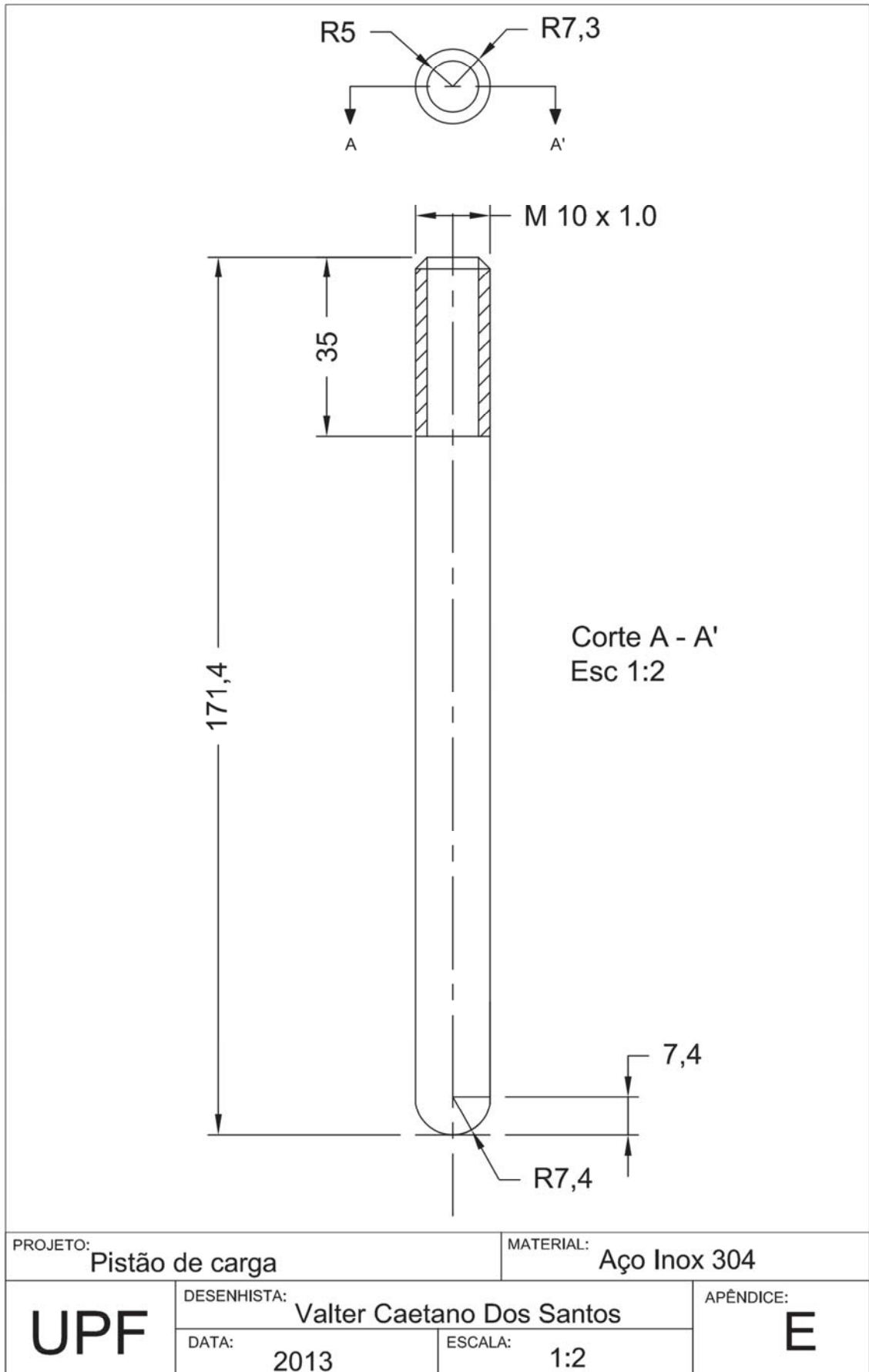
## APÊNDICE C - Disco drenante inferior da câmara de ensaio



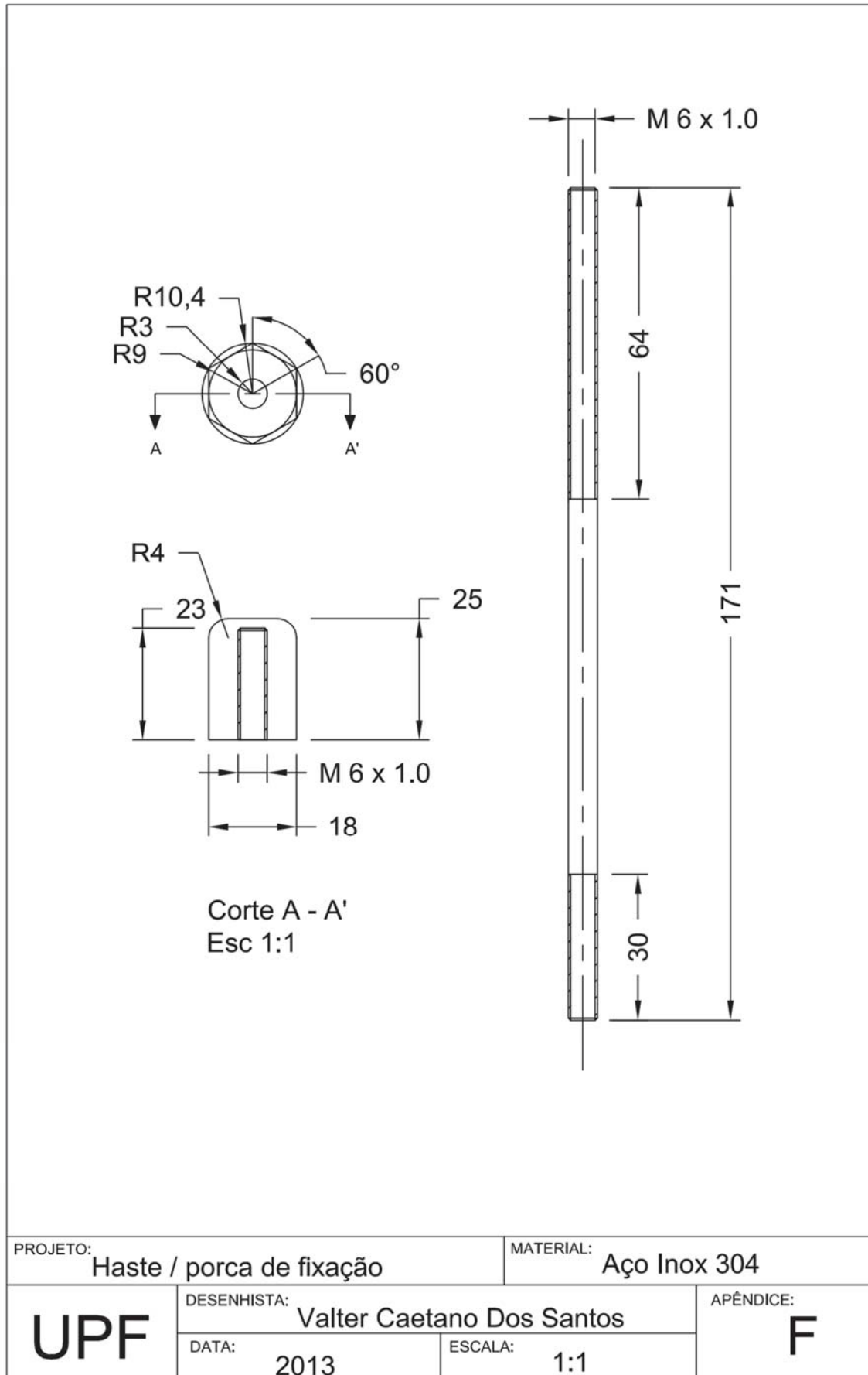
## APÊNDICE D - Disco drenante superior da câmara de ensaio



## APÊNDICE E - Pistão de aplicação de carga vertical

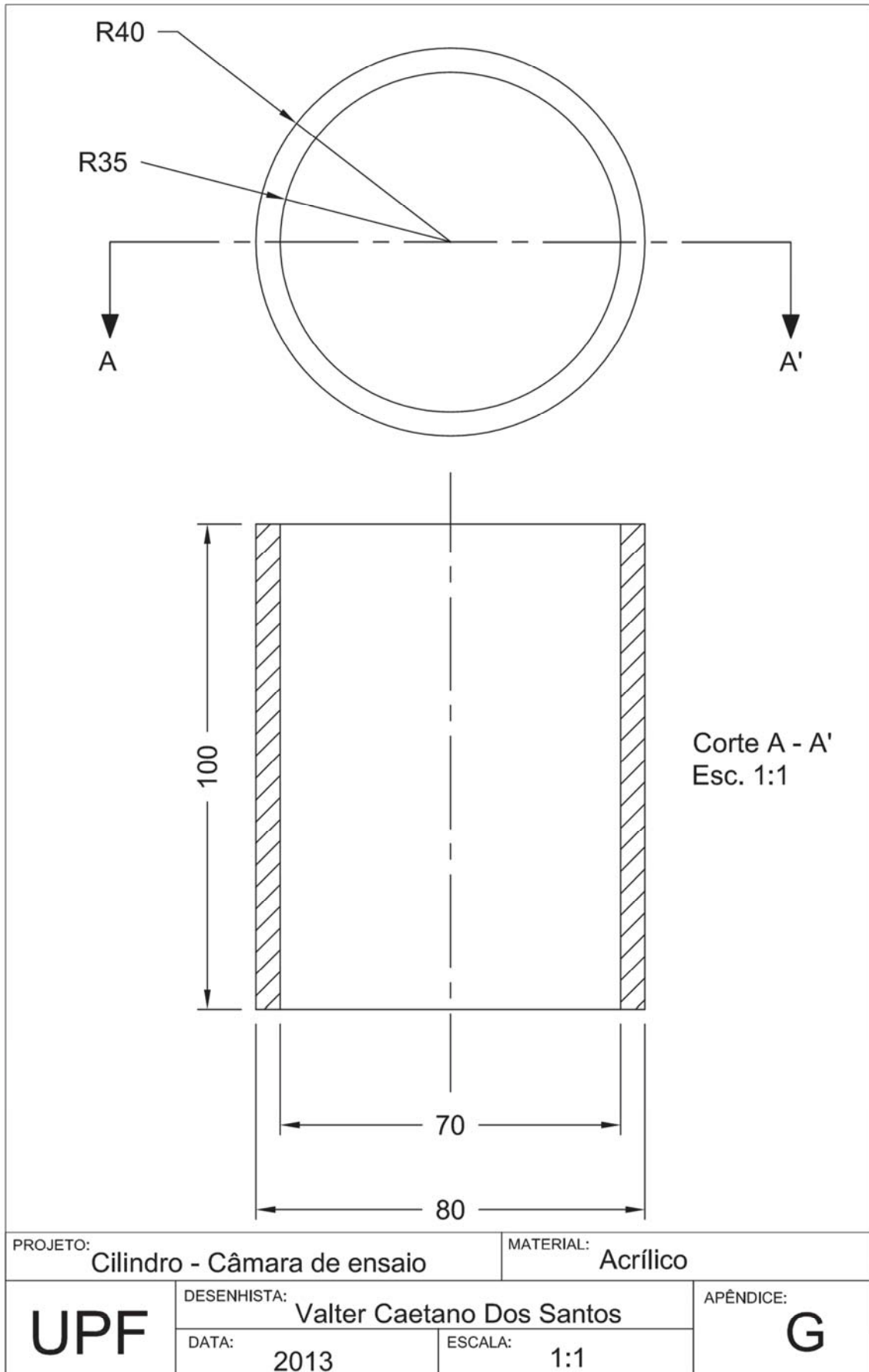


## APÊNDICE F - Haste e porca de fixação dos caps da câmara

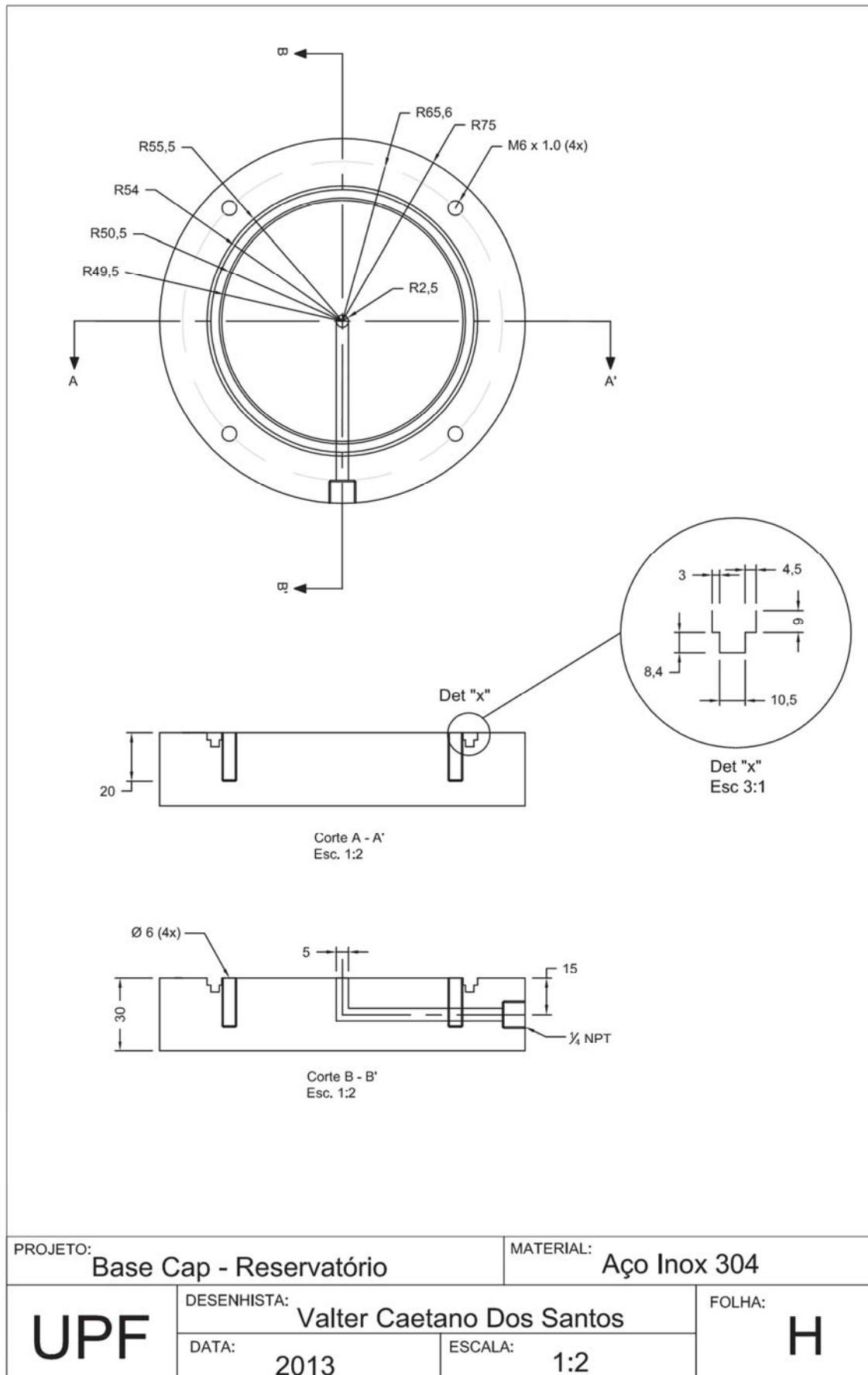




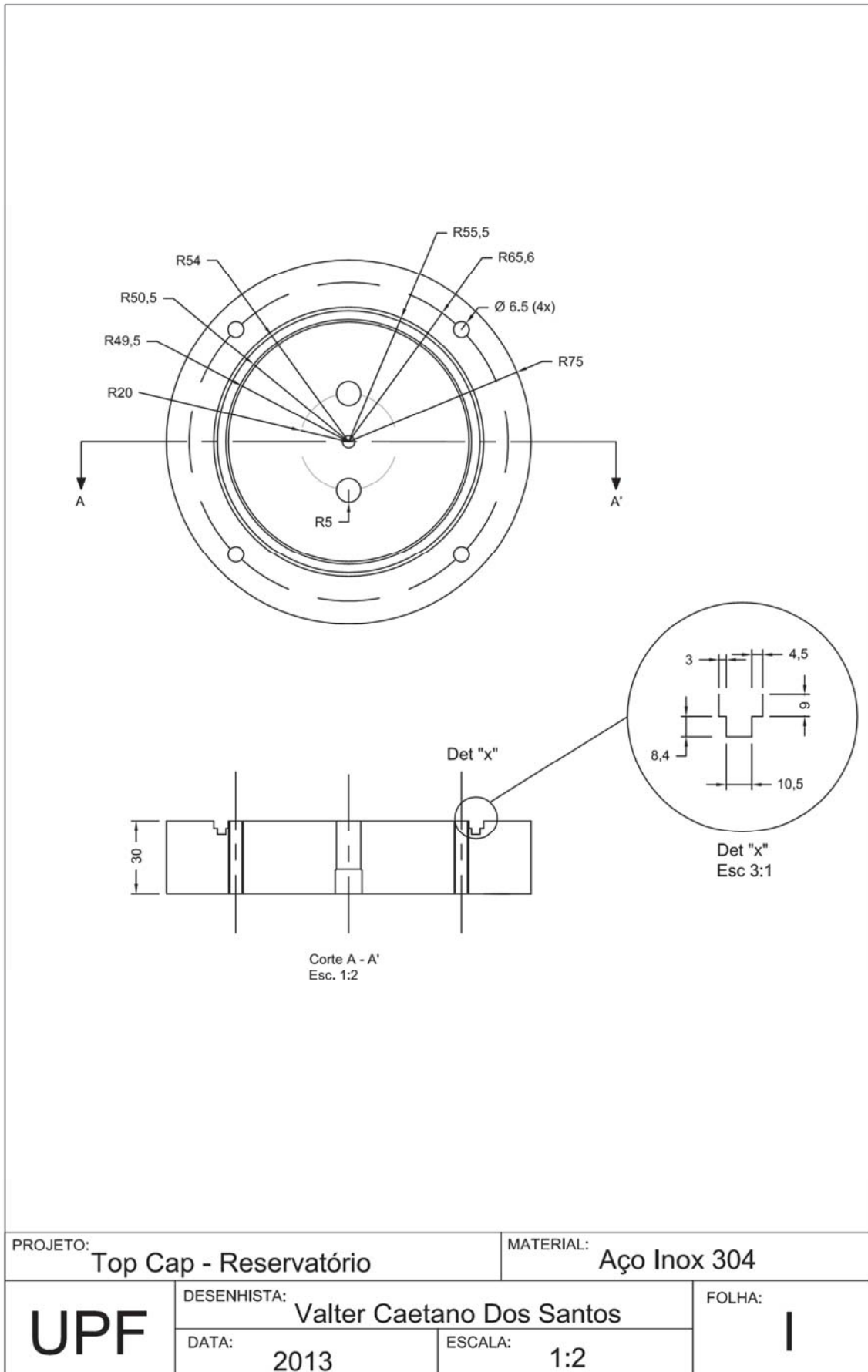
### APÊNDICE G - Tubo acrílico da câmara de ensaio



## APÊNDICE H - Base cap da câmara reservatório

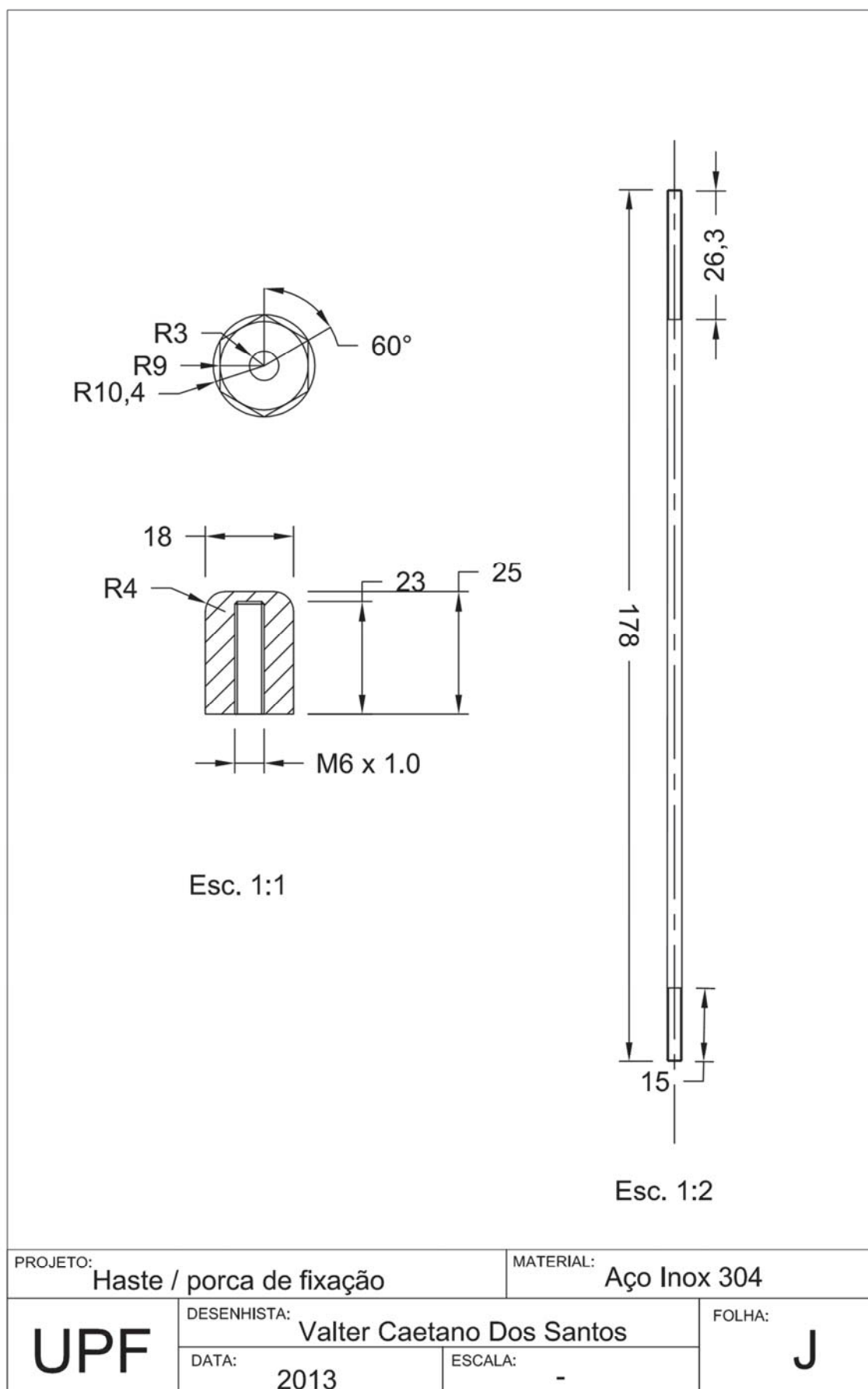


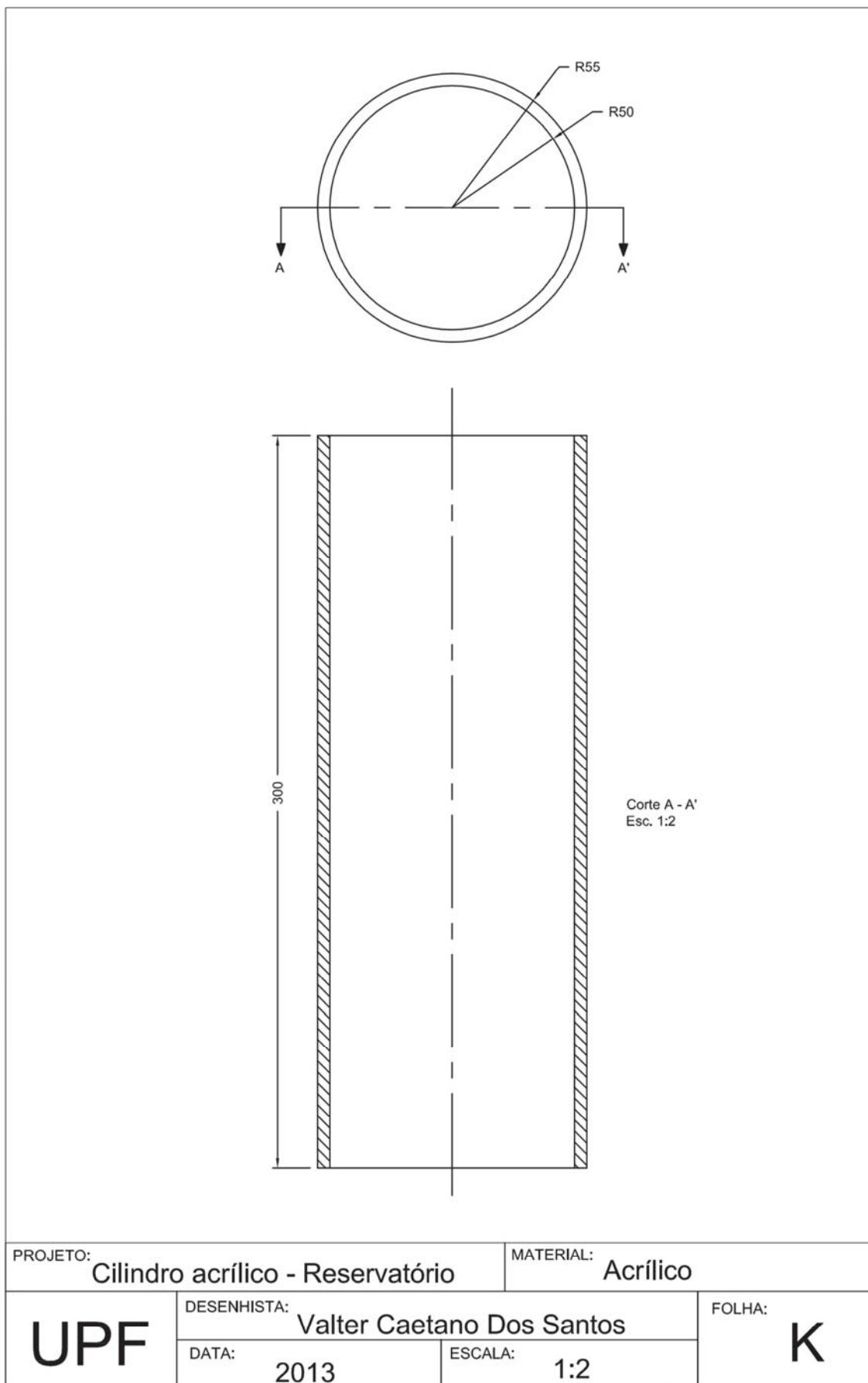
### APÊNDICE I - Top cap da câmara reservatório



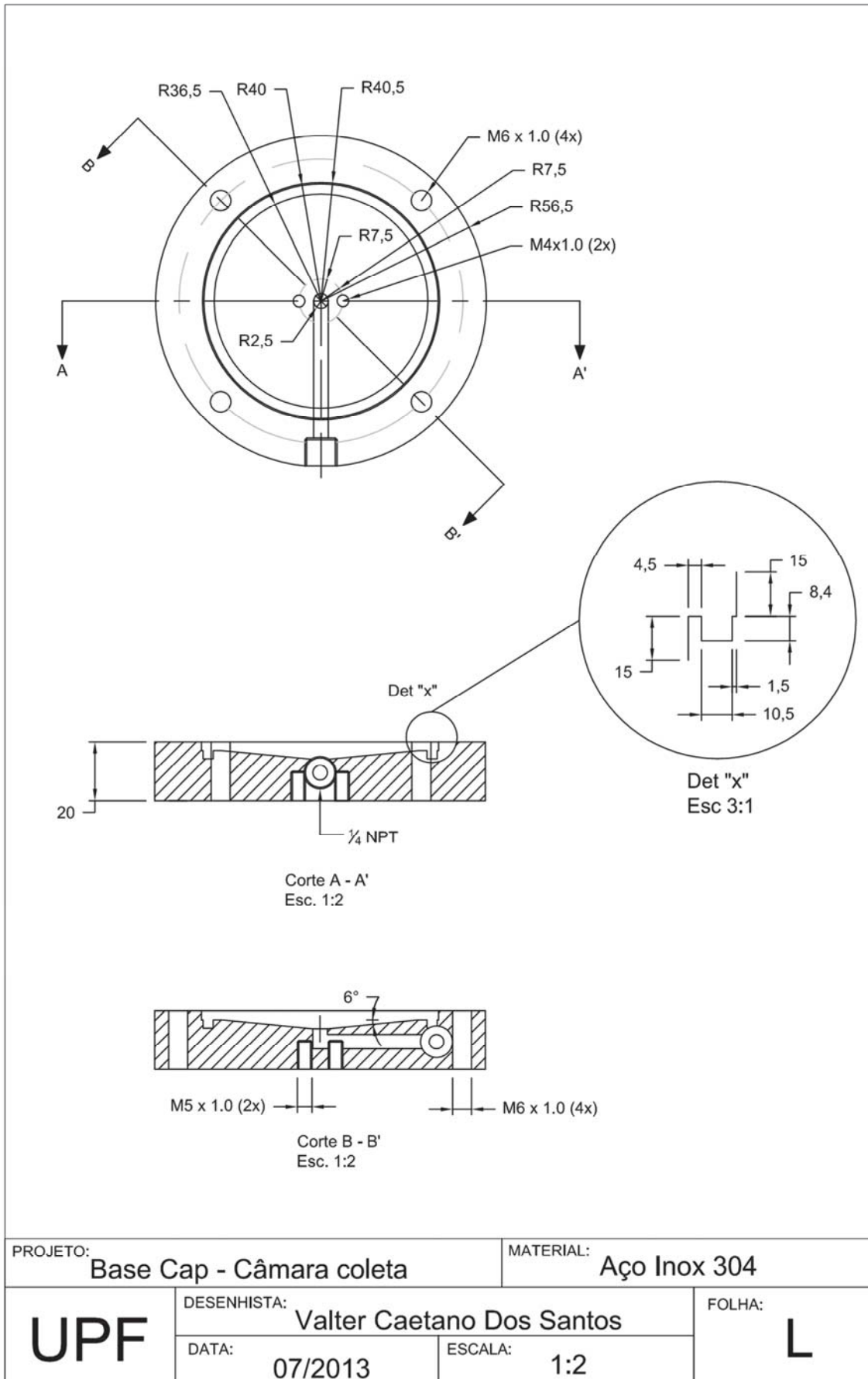
PROJETO: <b>Top Cap - Reservatório</b>		MATERIAL: <b>Aço Inox 304</b>
<b>UPF</b>	DESENHISTA: <b>Valter Caetano Dos Santos</b>	FOLHA: <b>I</b>
	DATA: <b>2013</b>	

## APÊNDICE J - Haste e porca de fixação dos caps da câmara reservatório

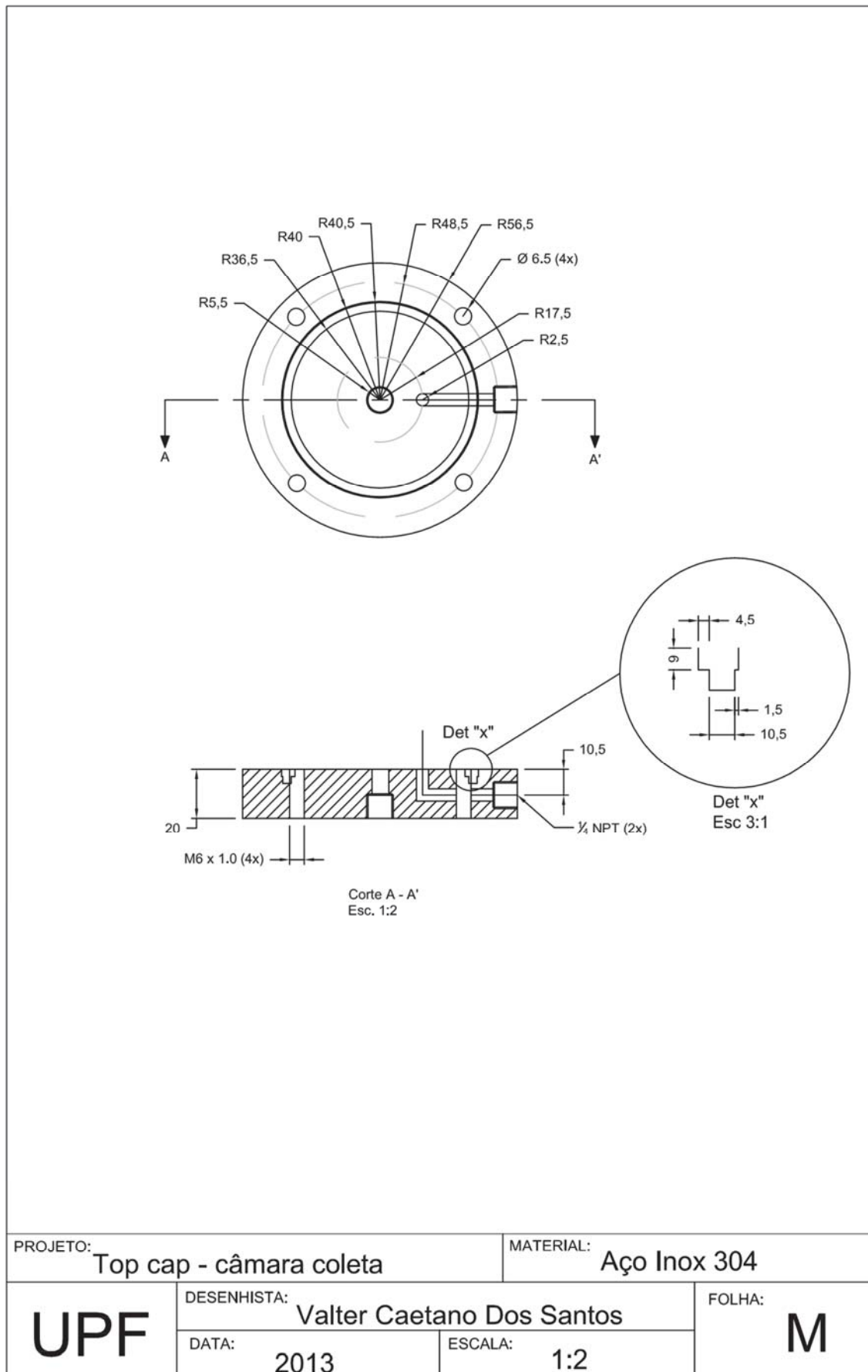


**APÊNDICE K - Tubo de acrílico da câmara reservatório**

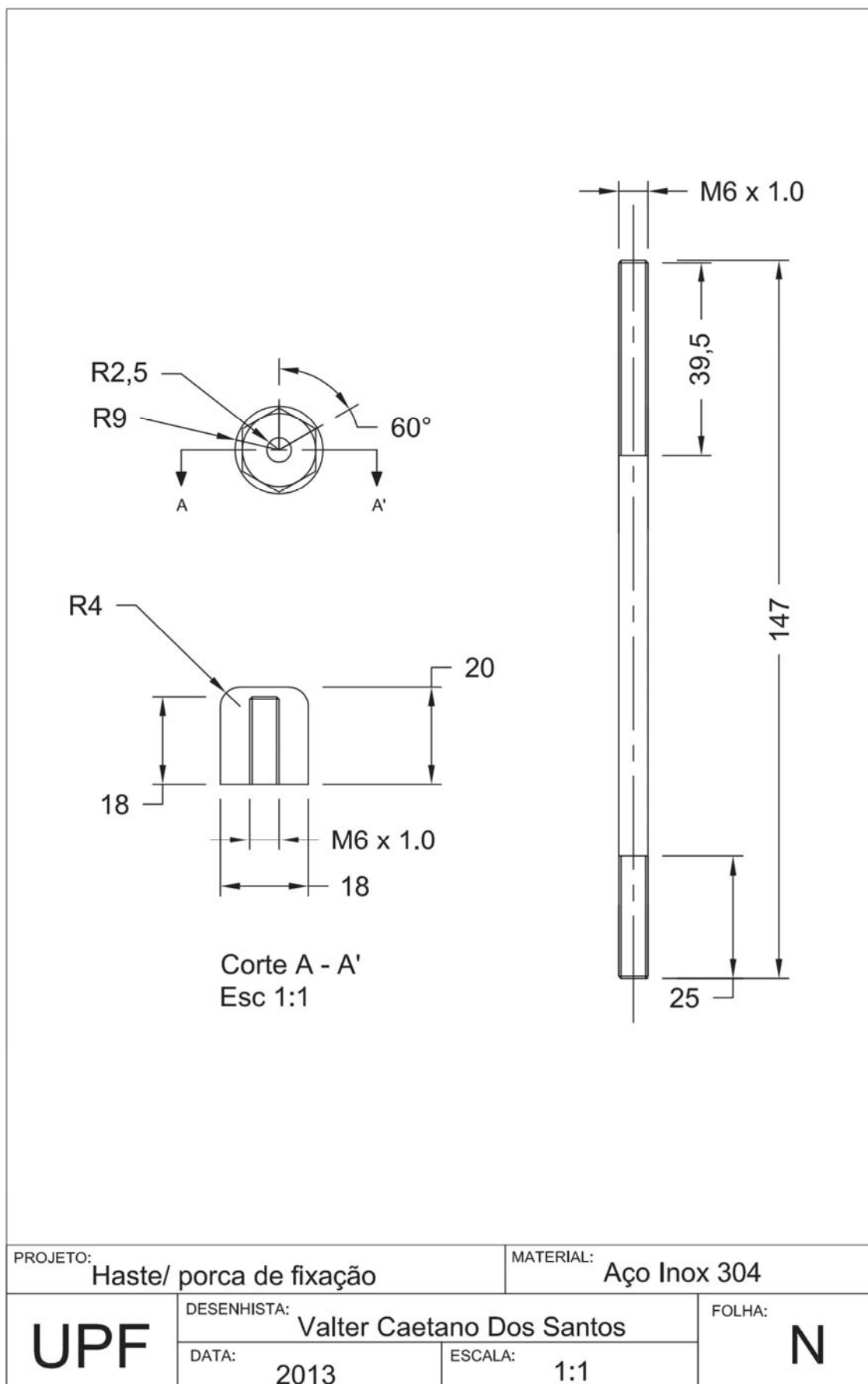
### APÊNDICE L - Base cap da câmara de coleta



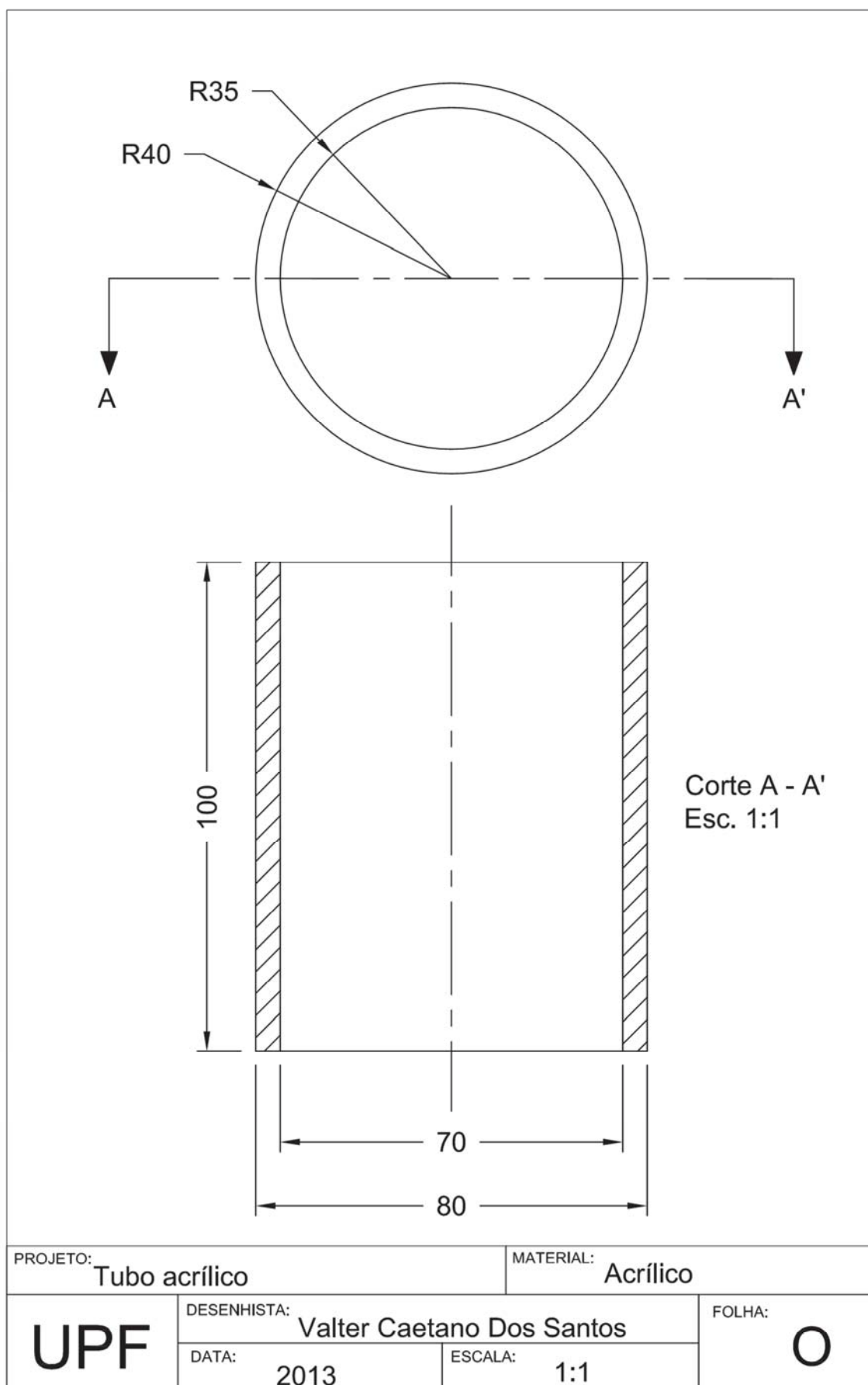
## APÊNDICE M - Top cap da câmara de coleta



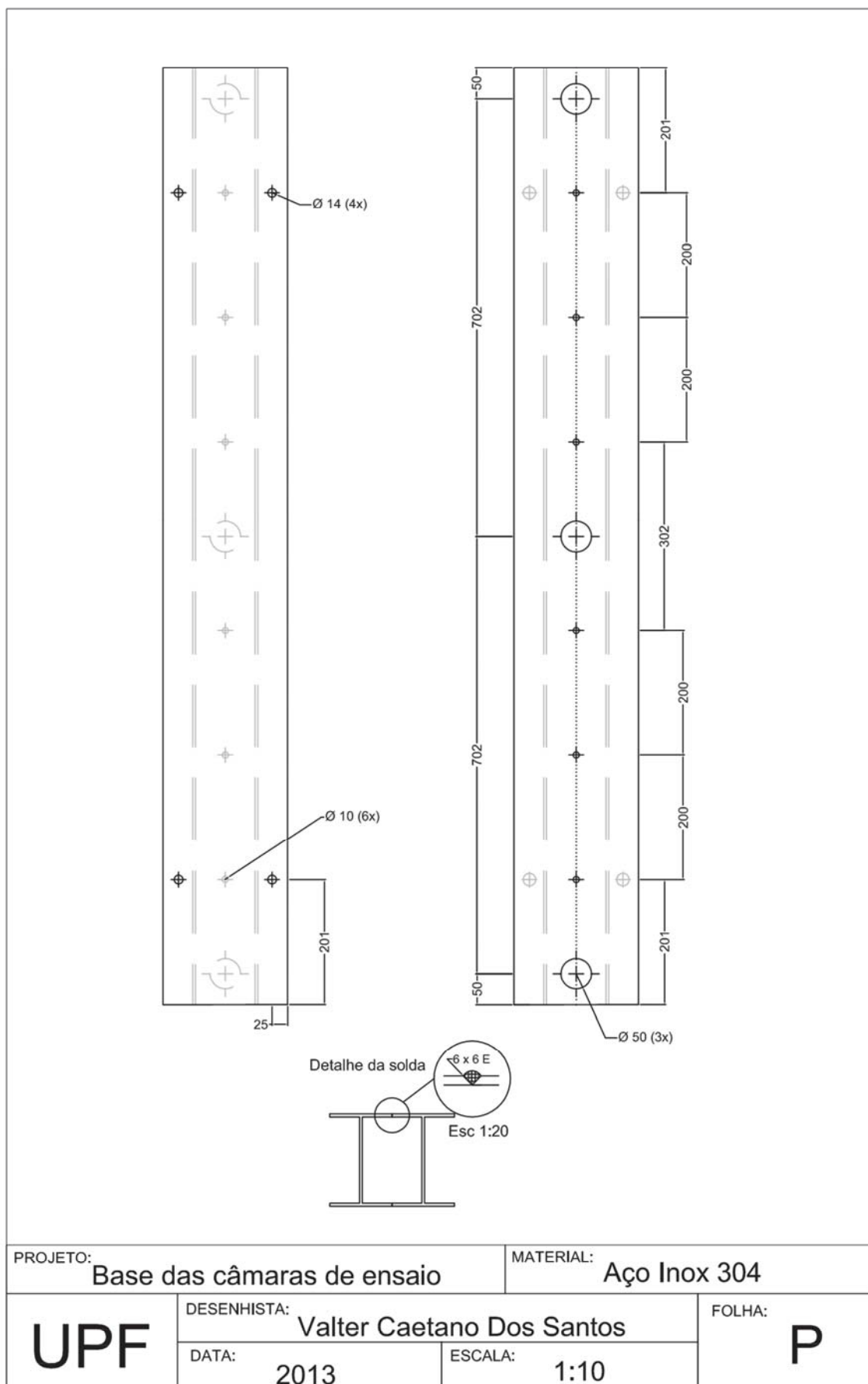
## APÊNDICE N - Haste e porca de fixação da câmara de coleta



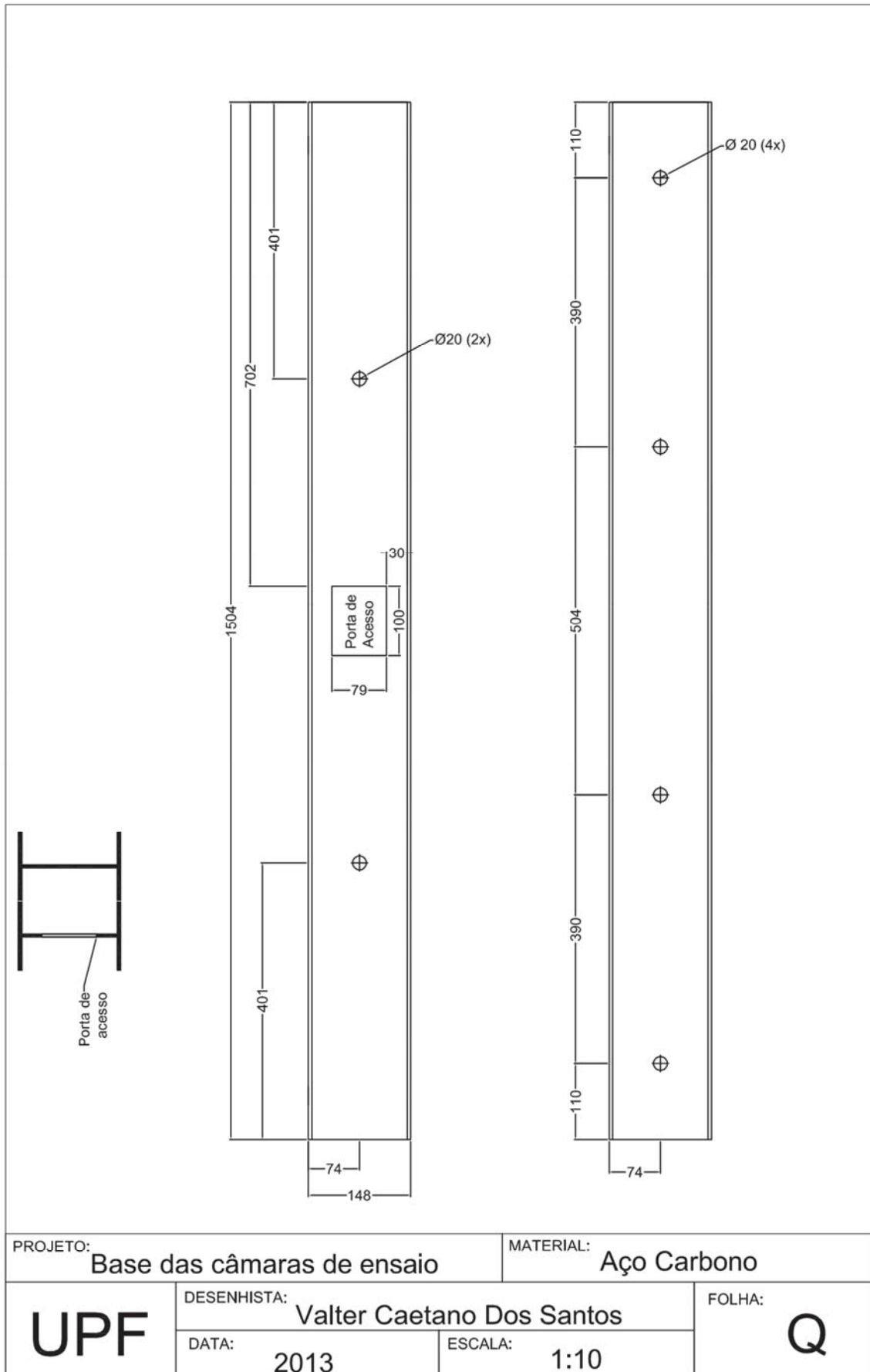


**APÊNDICE O - Tubo acrílico da câmara de coleta**

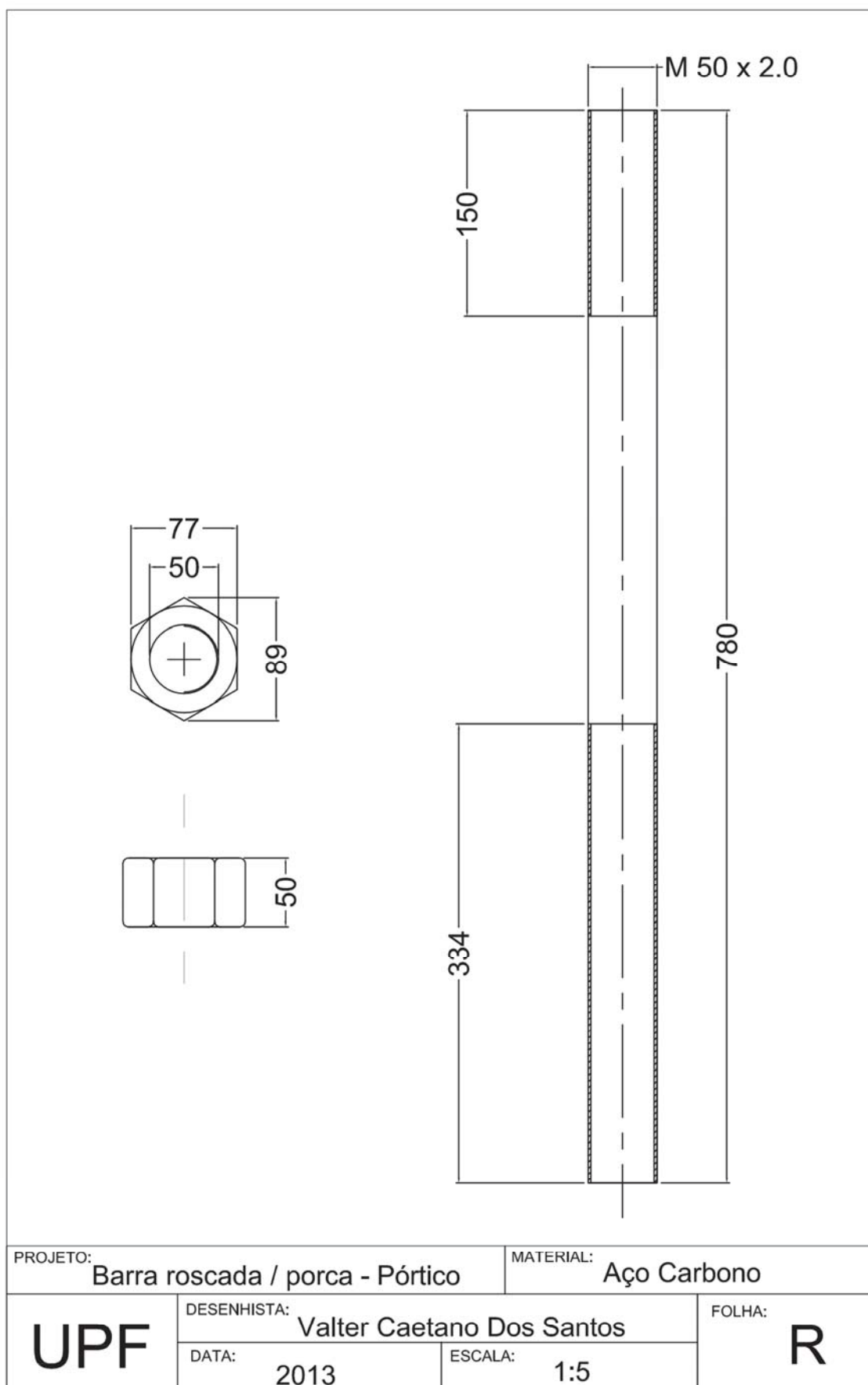
## APÊNDICE P - Base das câmaras de ensaio



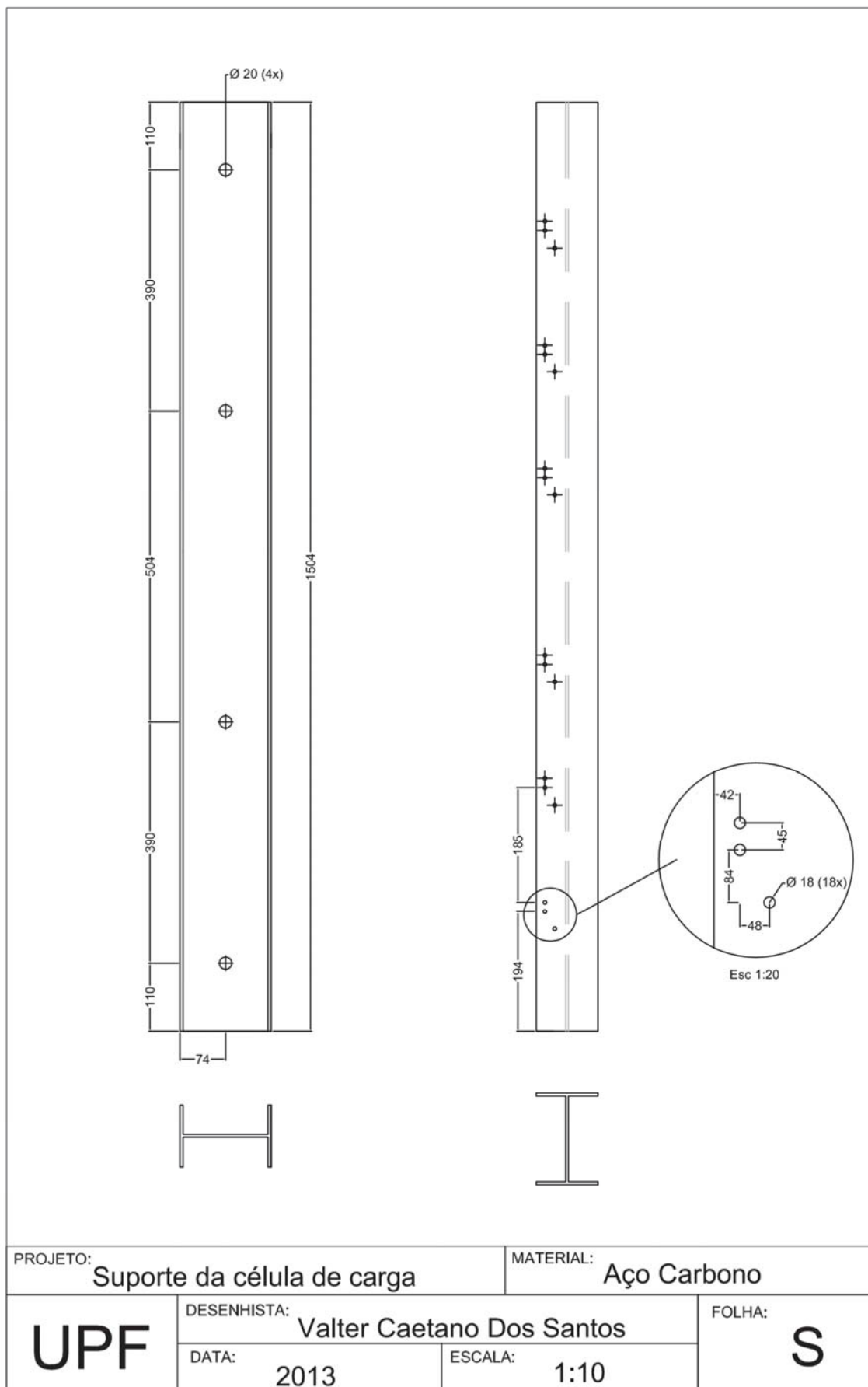
## APÊNDICE Q - Base das câmaras de ensaio



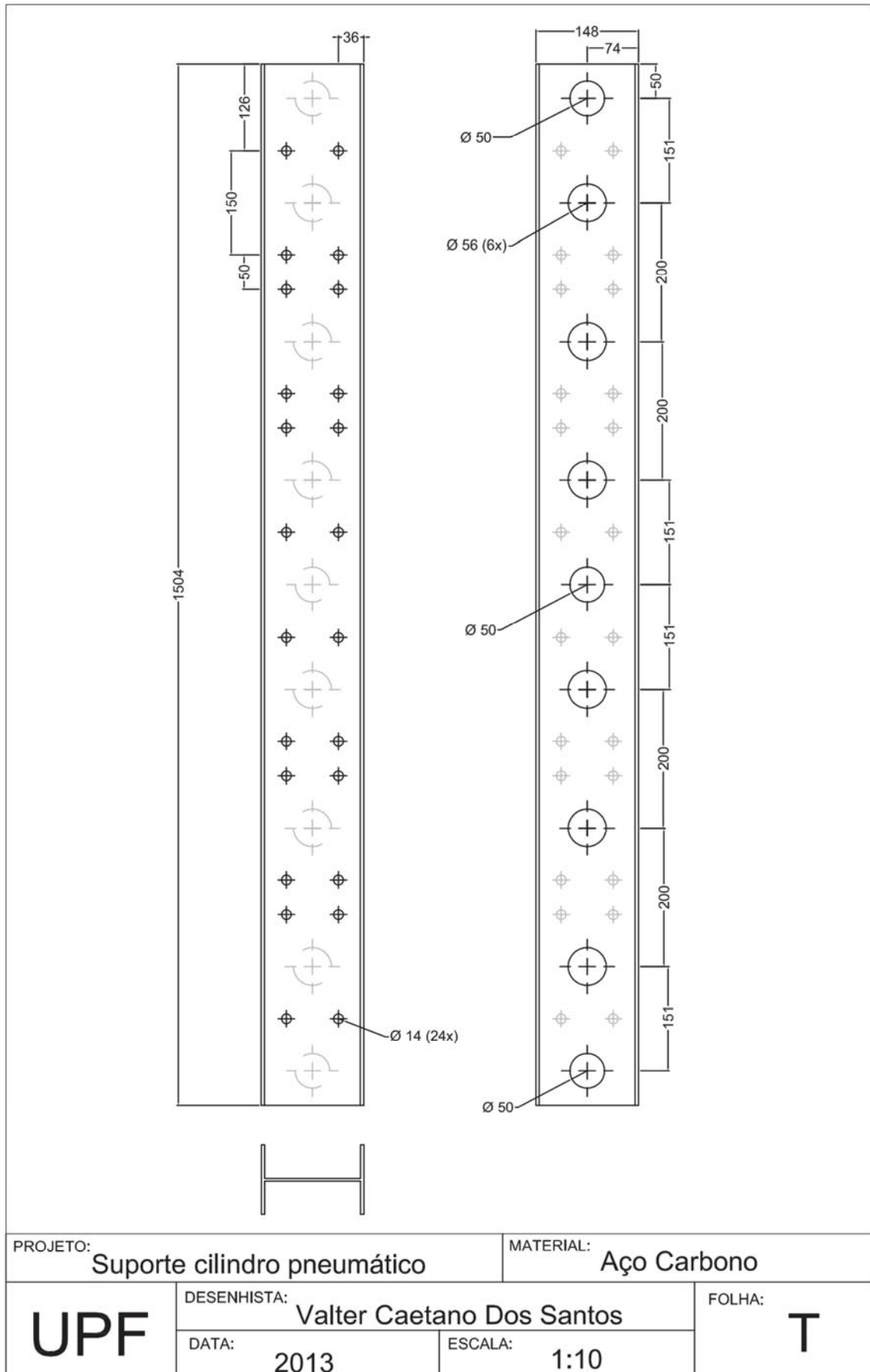
## APÊNDICE R - Barra roscada/ porca de regulagem

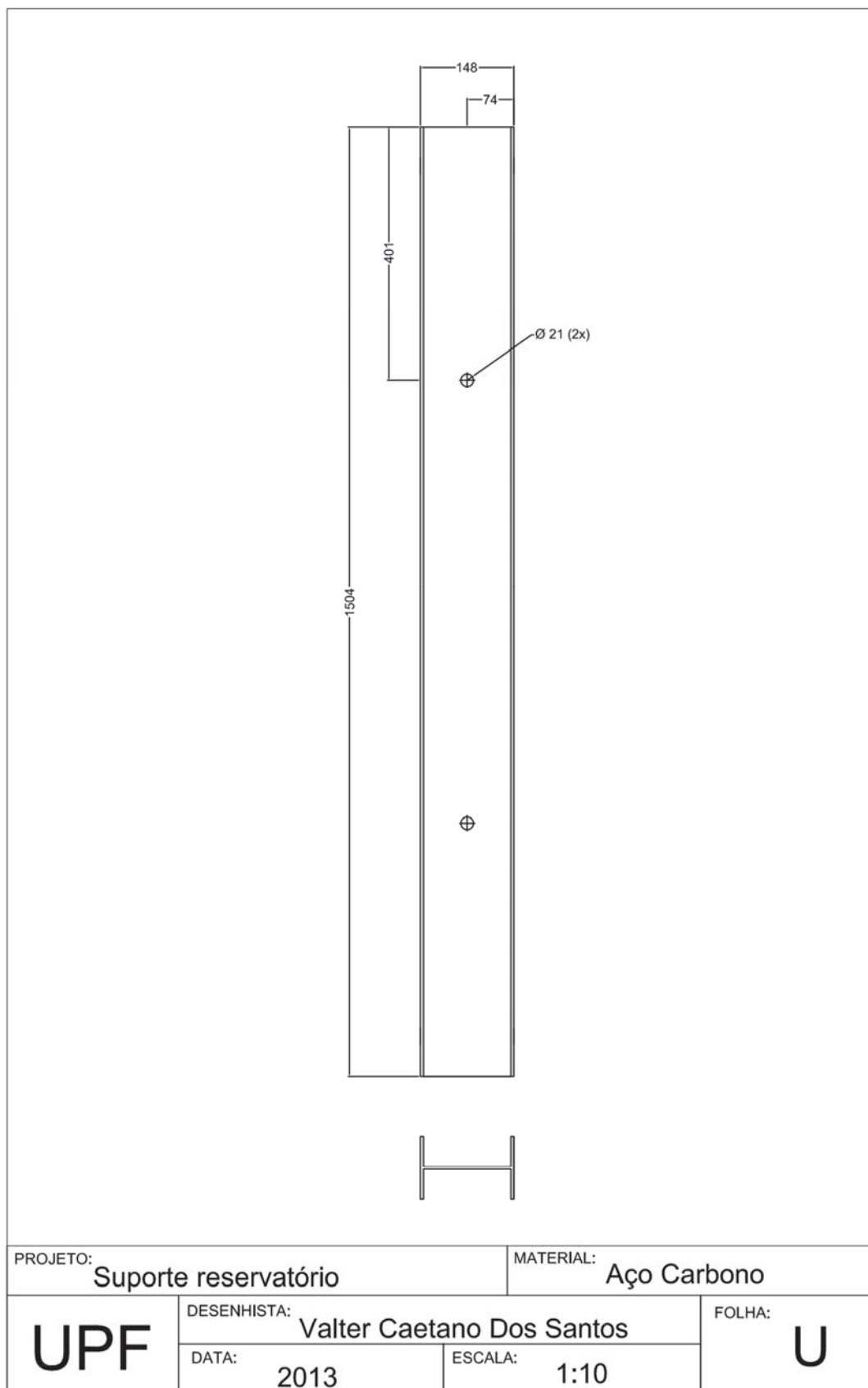


## APÊNDICE S - Suporte das células de carga

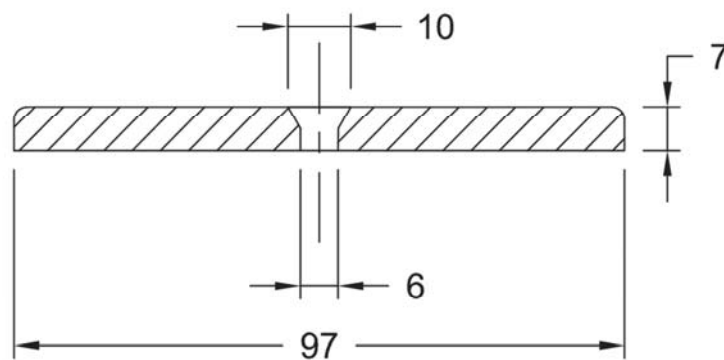
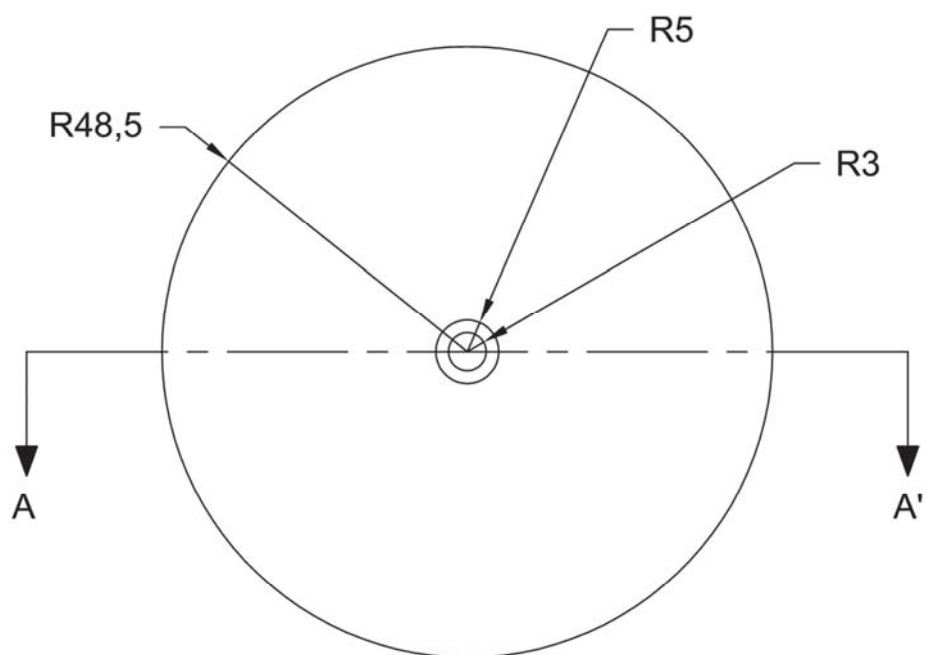


## APÊNDICE T - Suporte dos cilindros pneumáticos



**APÊNDICE U - Suporte dos reservatórios**

### APÊNDICE V - Disco guia das câmaras de ensaio

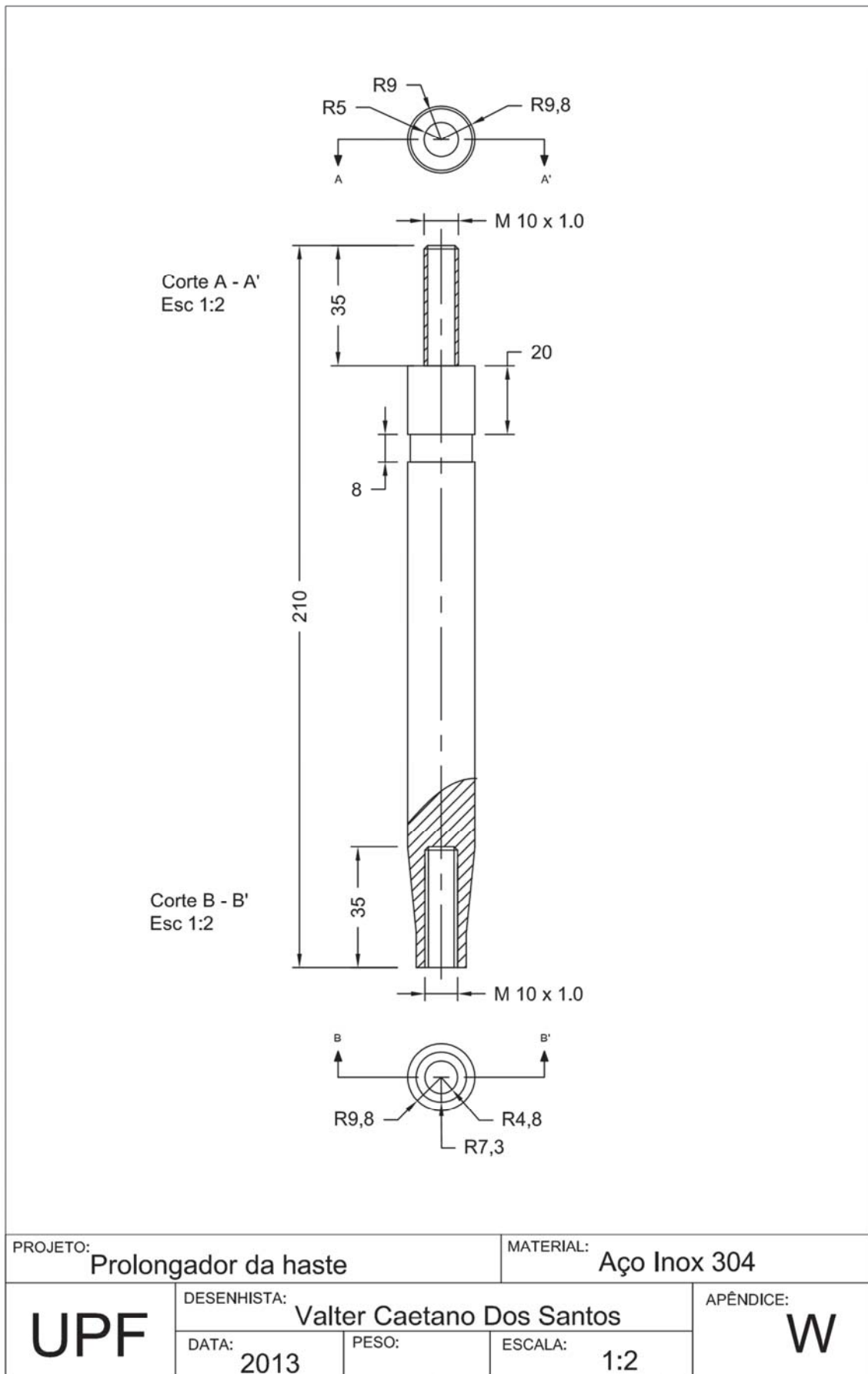


Corte A - A'  
Esc. 1:1

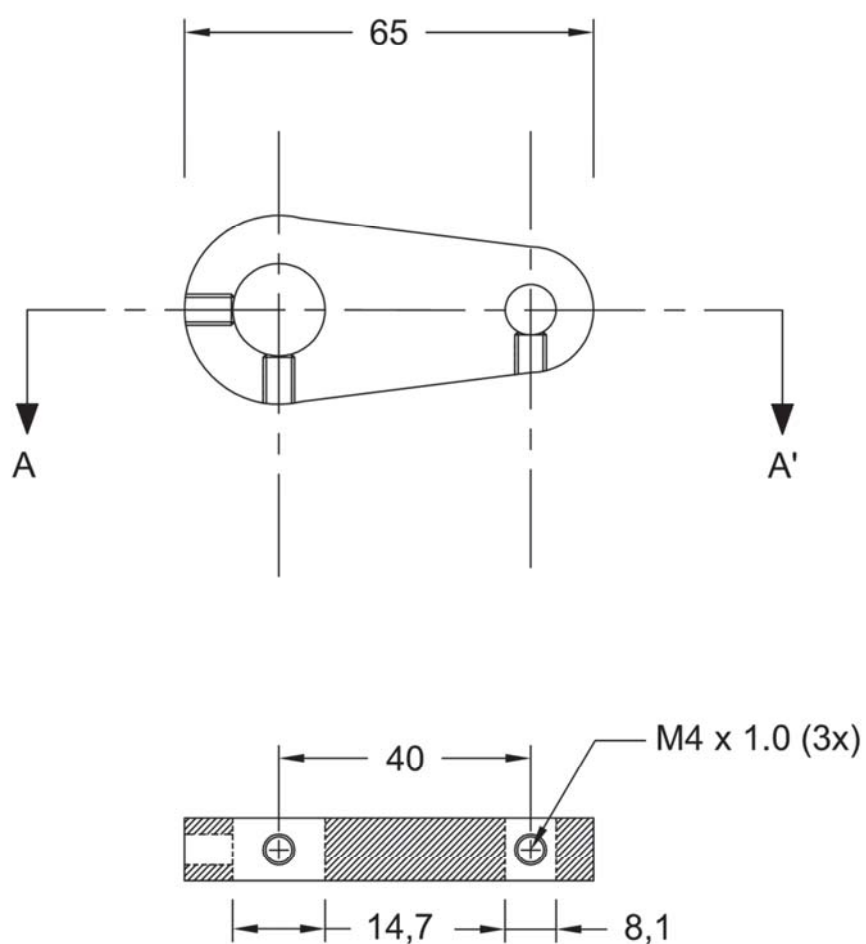
PROJETO: Disco guia da câmara de ensaio		MATERIAL: Aço Carbono	
UPF	DESENHISTA: Valter Caetano Dos Santos		APÊNDICE: V
	DATA: 2013	ESCALA: 1:1	



## APÊNDICE W - Haste prolongadora do pistão de carga



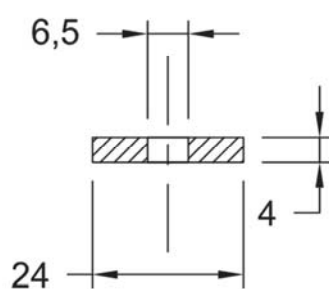
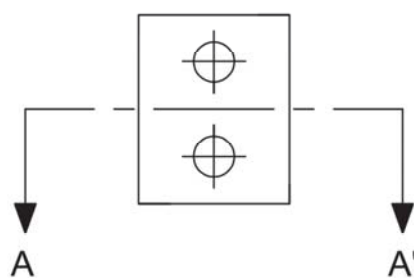
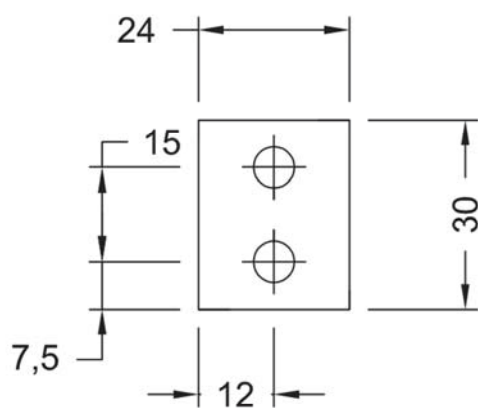
## APÊNDICE X - Suporte de fixação do LVDT



Corte A - A'  
Esc. 1:1

PROJETO: Suporte fixação do LVDT		MATERIAL: Aço carbono
UPF	DESENHISTA: Valter Caetano Dos Santos	FOLHA: X
	DATA: 2013	

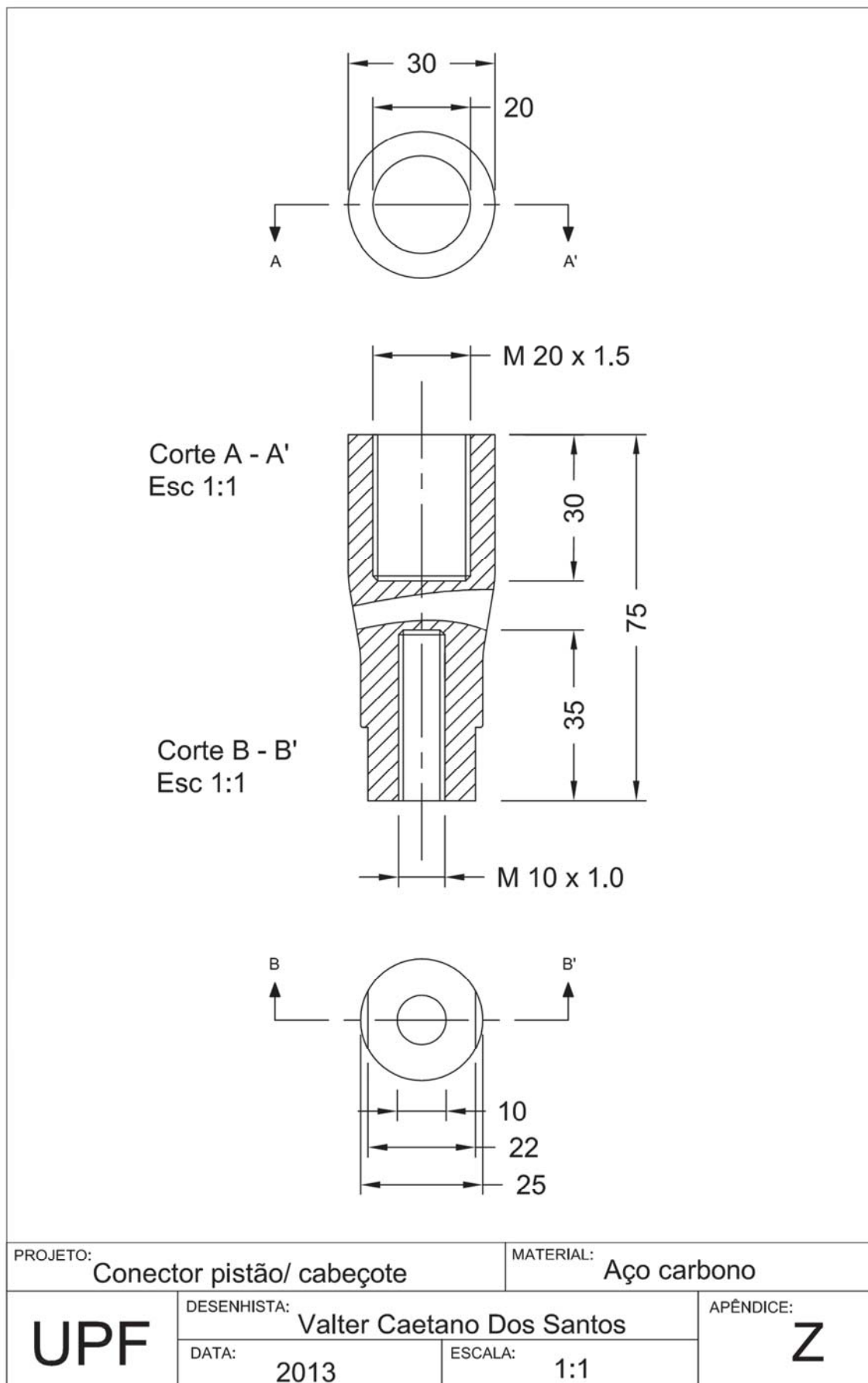
## APÊNDICE Y - Afastador das câmaras de coleta e célula de carga



Corte A - A'  
Esc. 2:1

PROJETO: Afastador câmara/ célula carga		MATERIAL: Aço Carbono
UPF	DESENHISTA: Valter Caetano Dos Santos	APÊNDICE: Y
	DATA: 2013	

### APÊNDICE Z - Conector do pistão ao cabeçote.



## APÊNDICE AA – Manual do Operador

### ETAPA I: Calibração dos sensores e obtenção das constantes de calibração

#### 1) Célula de carga (Figura 1).

1.1) Posicionar o multímetro na unidade de leitura desejada (V) e adicionar ponteiros do multímetro na saída do condicionador de sinal (Figura 2);

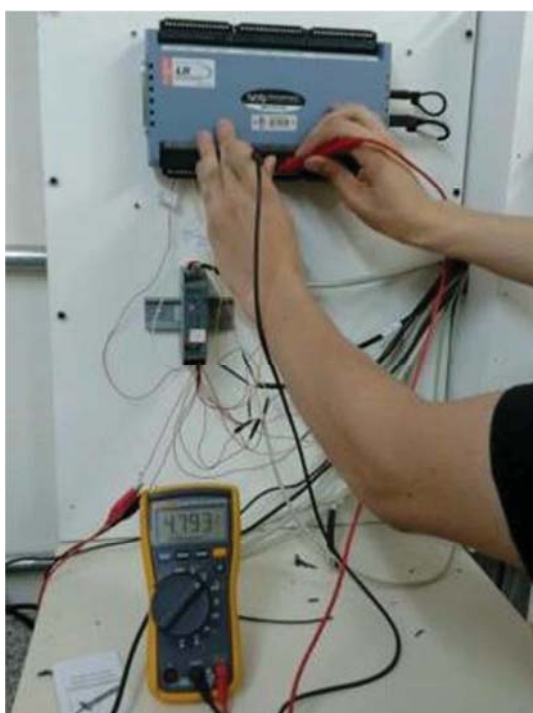
1.2) Adicionar pesos conhecidos ou volumes conhecidos, sobre a célula de carga e verificar a tensão correspondente na saída deste sensor, isso para cada incremento;

1.3) Plotar o gráfico: Incrementos de massa adicionados versus tensão na saída do condicionador de sinal (X= tensão/ Y= massa);

Figura 1: Célula de carga.



Figura 2: Verificação da tensão na saída do sensor.



## 2) Transdutor de Pressão (Figura 3)

- 2.1) Posicionar o multímetro na unidade de leitura desejada (V) e adicionar ponteiras do multímetro na saída do transmissor de pressão (Figura 4);
- 2.2) Conectar o transmissor de pressão na rede de ar;
- 2.3) Adicionar incremento de pressão sob o transdutor de pressão;
- 2.4) Verificar com multímetro as variações de tensão apresentadas na saída do sensor;
- 2.5) Plotar gráfico: Incrementos de pressão versus tensão na saída do transdutor de pressão (X= tensão/ Y= pressão aplicada);

Figura 3: Verificação da tensão na saída do sensor.



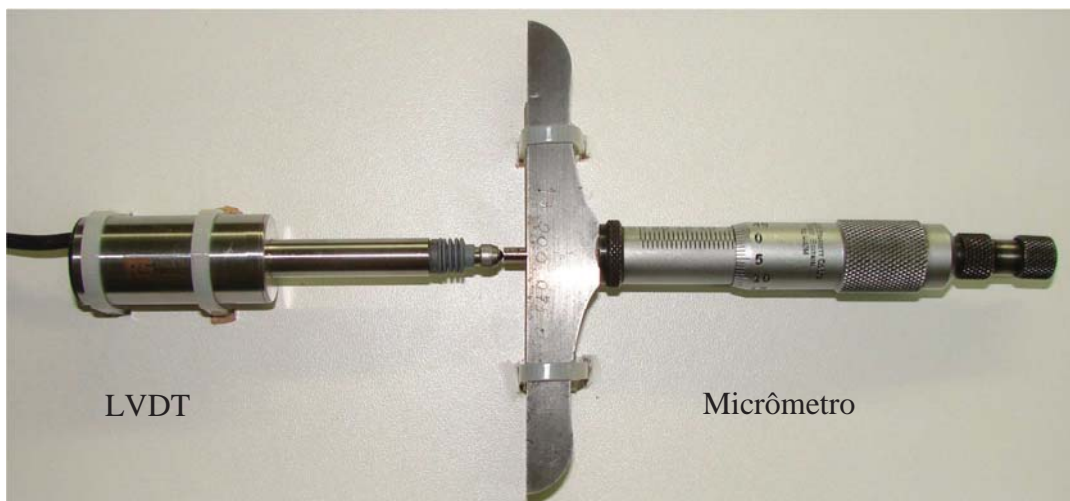
Figura 4: Verificação da tensão na saída do sensor.



### 3) LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*)

- 3.1) Fixar o sensor e o micrômetro de profundidade na posição adequada (Figura 5);
- 3.2) Posicionar o multímetro na unidade de leitura desejada (V) e adicionar ponteiras do multímetro na saída do sensor;
- 3.3) Adicionar incrementos de medida, girar o tambor do micrômetro e observar os valores apresentados no cilindro graduado do instrumento;
- 3.4) Verificar com multímetro a variação de tensão na saída do sensor para cada incremento de medida adicionado no micrômetro;
- 3.5) Plotar gráfico: Incrementos de medidas versus tensão na saída do LVDT (X= tensão/ Y= pressão aplicada);

Figura 5: Posição do sensor e do instrumento de medição.



Obs.: Os procedimentos descritos devem ser realizados para cada sensor que tenha diferentes fabricantes. Dessa forma, sensores de fabricantes diferentes, apresentarão valores para as constantes das curvas de calibração diferentes.

## ETAPA II: Inicialização do Sistema de Aquisição de Dados

1) Ligar dispositivos eletrônicos (PC /Módulo USB /Fonte de Alimentação);

2) Iniciar o Software Labview;

3) Selecionar a rotina desejada (previamente desenvolvida);

4) Interface I – Dados de entrada: (Figura 6)

4.1) Identificar o ensaio e o usuário no campo requisitado;

4.2) Adicionar as características da amostra;

4.3) Adicionar o intervalo de aquisição e gravação dos dados;

4.4) Adicionar constantes das curvas de calibração referente a cada sensor;

4.5) Pressionar → OK (antes de seguir para a tela seguinte);

4.6) Salvar em uma pasta identificada.

Figura 6: Interface dos Dados de Entrada.

The screenshot shows a software interface with a blue background and a grey header bar. The header bar contains three tabs: 'Dados de entrada' (selected), 'Pré-Ensaio', and 'Ensaio'. The main area is divided into three sections:

- Identificação do ensaio:** A text box containing 'Enasio Piloto I'.
- Identificação do usuário:** A text box containing 'valter'.
- Diâmetro da amostra (mm):** A spin box with a value of 70.
- Altura inicial da amostra (mm):** A spin box with a value of 60.
- Intervalo de gravação de dados (s):** A spin box with a value of 300.

The central section is titled 'CONSTANTES DE CALIBRAÇÃO' and contains four spin boxes:

- Célula de carga:** 1058,84
- Transdutor Reservatório:** 250
- Transdutor Cilindro Pneumático:** 250,53
- LVDT:** 0,682707
- Transdutor Câmara de Ensaio:** 250,53
- Transdutor Câmara de Coleta:** 250,53

On the right side, there is a 'Data/Hora' section with a text box showing '19/3/2013 09:44:55' and an 'OK' button below it.

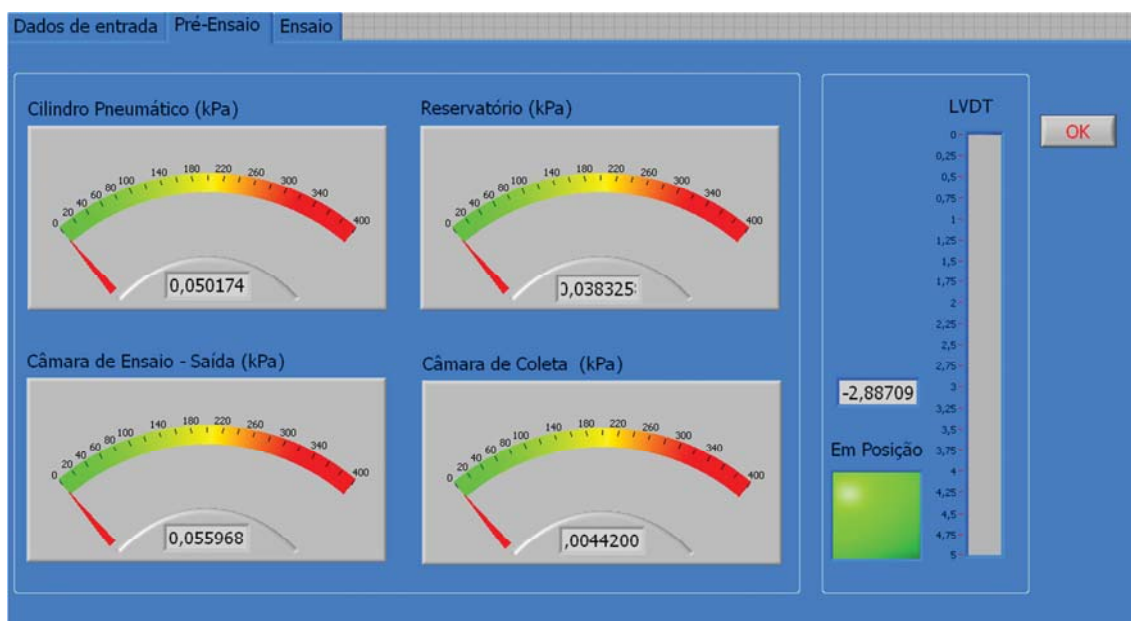
Obs.: Observar as unidades adequadas ao preenchimento.



## 5) Interface II – Pré-Ensaio: (Figura 7).

- 5.1) Regular a pressão desejada para alimentação dos elementos de ar:
  - a) Pressão no Cilindro pneumático;
  - b) Pressão no Reservatório;
  - c) Pressão na Câmara de coleta;
- 5.2) Câmara de ensaio = 0 kPa (apenas para observação durante a saturação);
- 5.3) Fixar o suporte do LVDT junto ao pistão de aplicação de carga. Posicionar sua haste sob a superfície do top cap da câmara de ensaio (é imprescindível que a haste do sensor esteja apoiada na superfície do cap);
- 5.4) Pressionar → OK (antes de seguir para a tela seguinte).

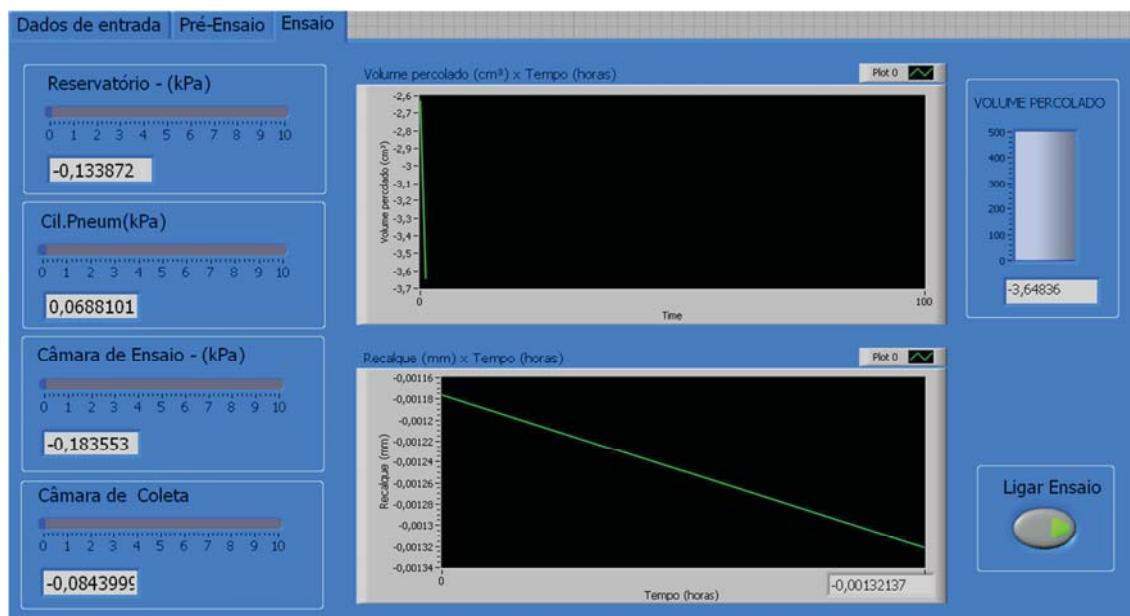
Figura 7: Interface do Pré-Ensaio.



## 6) Interface III – Ensaio: (Figura 8).

- 6.1) Tela de observação dos valores adquiridos pelos sensores naquele instante;
- 6.2) Para a fase de saturação dos CPs com água destilada, deve ser monitorado se a pressão aplicada no [Reservatório] está sendo gradativamente equiparada com a pressão verificada na [Câmara de Ensaio].

Figura 8: Interface para monitoramento do Ensaio.



Obs.: Para inferir que os CPs tenham atingido o estágio próximo ao de saturação, a pressão na saída da câmara de ensaio, deve apresentar valores próximos aos verificados na entrada do reservatório de pressão hidráulica. Dessa forma, adotamos um valor mais próximo de 1. Para chegar a este valor, dividimos o valor da [câmara de ensaio] pelo do [reservatório].

### ETAPA III: Início da percolação (saturação dos corpos de prova)

A etapa inicial do ensaio consiste na permeação de água destilada através dos corpos de prova (CP), com o intuito de diminuir os volumes de ar contidos na amostra, de forma que a água destilada ocupe o espaço vazio existente no CP.

**1) Após a inicialização do SAD, inserir as constantes de calibração, regular as pressões desejadas.**

- 1.1) Certificar se todas as válvulas do sistema estão fechadas;
- 1.2) A pressão desejada deve ser ajustada no regulador de pressão;
- 1.3) A válvula de entrada é acionada, liberando a água destilada do reservatório para fluir pela tubulação (teflon e aço inox) e ser conduzida até a câmara de ensaio;
- 1.4) Acionar a válvula de saída da câmara de ensaio;
- 1.5) Observar a pressão verificada na saída da câmara;

1.6) Acionar a válvula de entrada da câmara de coleta (devidamente pressurizada) e aguardar o líquido percolado pela amostra, fluir para dentro desta câmara (aguardar alguns minutos);

1.7) Observar se a pressão na saída da câmara de ensaio está aumentando;

1.8) A pressão de saída da câmara de ensaio, preterivelmente deve aumentar gradativamente, devido a percolação constante da água destilada pelo CP, até aproximar a pressão aplicada no reservatório;

1.9) Diversas e consecutivas observações dos valores das pressões devem ser realizadas, atentando sempre para o procedimento de fechar a válvula de entrada da câmara de coleta, antes de verificar a pressão que ocorre na saída da câmara de ensaio, pois, esta câmara encontra-se pressurizada e poderá influenciar nos valores de pressão verificados;

1.10) Os valores das pressões do reservatório e da câmara de ensaio devem se aproximar ao longo do tempo, indicando que a amostra atingiu um estágio próximo ao da saturação. Para isso, dividimos a pressão de saída da câmara de ensaio pela pressão de entrada do reservatório, tendendo a 1. Dificilmente esse patamar de igualdade seja atingido, então aceitamos que o CP esteja próximo a saturação, quando atingir valores superiores a 0,9, quando dessa divisão;

1.11) Após a saturação inferida, deixar a água destilada permear pela amostra e, aguardar o reservatório esvaziar quase por completo, afim de, evitar uma possível diluição da solução contaminante quando esta for inserida neste. Atentar para que não entre ar na tubulação;

1.12) Inserir a solução contaminante no reservatório;

1.13) Acionar a válvula de entrada do reservatório, câmara de ensaio e de coleta;

1.14) Ensaio em andamento;