

Tese de Doutorado

ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DE COMPRESSIBILIDADE E ADENSAMENTO DE REJEITOS DE FOSFATO DE BAIXA DENSIDADE COM O USO DE TÉCNICAS EXPERIMENTAIS DE LABORATÓRIO E DE CAMPO

NUGEO

AUTOR: ELEONARDO LUCAS PEREIRA

ORIENTADOR: Prof. Dr. Romero César Gomes

ESCOLA DE MINAS / UFOP

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA DA UFOP

OURO PRETO - DEZEMBRO DE 2017

P434e

Pereira, Eleonardo Lucas.

Estudo das características de compressibilidade e adensamento de rejeitos de fosfato de baixa densidade com o uso de técnicas experimentais de laboratório e de campo

[manuscrito] / Eleonardo Lucas Pereira. - 2017.

254f.: il.: color; grafs; mapas.

Orientador: Prof. Dr. Romero César Gomes.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia.

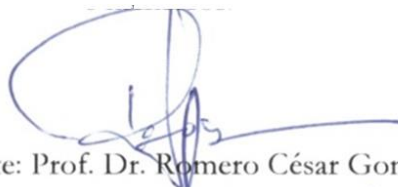
1. Rejeitos -Mineração. 2. Adensamento. 3. Compressibilidade. 4. Geotecnia-Mineração. 5. Mineração . I. Gomes, Romero César. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 624.13

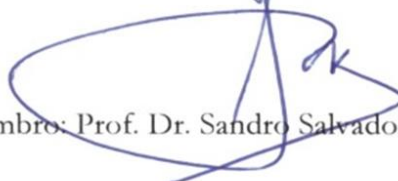
ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DE COMPRESSIBILIDADE E ADENSAMENTO DE REJEITOS DE FOSFATO DE BAIXA DENSIDADE COM O USO DE TÉCNICAS EXPERIMENTAIS DE LABORATÓRIO E DE CAMPO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Doutor em Geotecnia**.

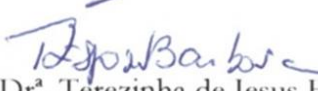
Esta tese foi apresentada em sessão pública e aprovada em 18 de dezembro de 2017, pela Banca Examinadora composta pelos membros:



Presidente: Prof. Dr. Romero César Gomes



Membro: Prof. Dr. Sandro Salvador Sandroni



Membro: Prof.ª Dr.ª Terezinha de Jesus Espósito Barbosa



Membro: Prof. Dr. Lúcio Flávio de Souza Villar



Membro: Prof. Dr. Lucas Deleon Ferreira

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, esposa e filhos.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

À minha esposa Anacarla e aos meus filhos, Maria Luísa e Filipe, pelo apoio incondicional, amor e compreensão.

Aos meus pais, Marcolino e Maria Aparecida, minha base, pela vida e incentivo constante.

Ao professor Romero César Gomes, pela orientação e incentivo desde a minha graduação.

Aos colegas do Departamento de Engenharia Urbana (DEURB) e do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas (NUGEO), pelo apoio constante.

À Companhia Mineira Miski Mayo (CMMM), na pessoa do Engenheiro Marcello Crispi, pelo apoio na realização dos ensaios de campo e na disponibilização de amostras e de dados para a pesquisa.

A todos aqueles que contribuíram de forma direta e indireta para a produção deste trabalho.

A Escola de Minas da UFOP, por todo o apoio estrutural ao longo da minha formação.

RESUMO

O conhecimento das características associadas à compressibilidade e adensamento dos rejeitos finos de mineração configura-se como elemento indispensável nos projetos de disposição por via úmida, permitindo uma estimativa mais coerente da vida útil dos sistemas de contenção. Geralmente, os rejeitos finos são lançados de maneira praticamente aleatória, sem o devido controle das variáveis que influenciam o processo de deposição. Além disso, estes materiais apresentam características peculiares, com elevadas proporções de partículas finas (fração argila), cujo processo de adensamento não é governado pela teoria clássica de Terzaghi, tornando-se fundamental o desenvolvimento de estudos específicos, com a previsão de um modelo deposicional essencialmente consistente, associado às grandes deformações experimentadas por estes materiais durante o processo de consolidação. Neste sentido, esse estudo apresenta um programa experimental implantado para a correta avaliação deste tipo de rejeito, incluindo o desenvolvimento de equipamentos e técnicas de ensaios de laboratório e de campo, além do estabelecimento de simulações numéricas, vinculadas aos resultados obtidos nos diferentes ensaios realizados. Os estudos foram aplicados a um rejeito fino de fosfato de baixa densidade, com características particulares, oriundo do processo de beneficiamento da Mina de Bayóvar, no Peru. Os resultados alcançados, a partir da sondagem piezométrica e dos ensaios HCT e CRD, especialmente, atestaram a efetividade, a precisão e a versatilidade dos equipamentos desenvolvidos, além de configurarem-se como representativos, a partir das análises e comparações instituídas e da definição das características de compressibilidade e adensamento do rejeito de fosfato. Adicionalmente, foram estabelecidas simulações de enchimento de dois reservatórios, baseadas nas leis de compressibilidade obtidas em campo, além de modelagens numéricas com o uso do *software* CONDES0, a partir dos parâmetros constitutivos extraídos dos ensaios HCT realizados. As diferentes análises sistematizadas, quando comparadas, mostraram-se consistentes na previsão da capacidade de armazenamento dos reservatórios, observando a particularidade de cada ensaio e do rejeito estudado.

Palavras-chave: rejeitos de mineração, adensamento, compressibilidade, ensaios de laboratório, ensaios de campo.

ABSTRACT

The knowledge of the characteristics associated with the compressibility and consolidation of the fine tailings mining is an indispensable element in the wet disposal projects, allowing a more coherent estimation of the life of the containment systems. Generally, the fine tailings are released in a practically random manner, without the proper control of the variables that influence the deposition process. In addition, these materials have peculiar characteristics, with great proportions of fine particles (clay fraction), whose consolidation process is not managed by the classical Terzaghi theory, making the development of specific studies with the prediction of a depositional model essentially consistent, associated to the large deformations experienced by these materials during the consolidation process. In this sense, this study presents an experimental program implemented for the correct evaluation of this type of tailing, including the development of equipment and techniques of laboratory and field tests, besides the establishment of numerical simulations, linked to the results obtained in the different tests performed. The studies were applied to a fine low density phosphate tailing, with particular characteristics, from the beneficiation process of the Bayóvar Mine in Peru. The results obtained, from the piezometric probing and the HCT and CRD tests, demonstrated the effectiveness, precision and versatility of the equipment developed, as well as being representative, based on the analyzes and comparisons instituted and the definition of the characteristics of compressibility and consolidation of the phosphate tailing. In addition, two tank filling simulations were established, based on field compressibility laws, as well as numerical modeling with the use of CONDES0 software, based on the constitutive parameters extracted from the HCT tests. The different systematized analyzes, when compared, were consistent in the prediction of the storage capacity of the reservoirs, observing the particularity of the each test and the studied tailing.

Key words: mining tailings, consolidation, compressibility, laboratory tests, field tests.

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Fluxograma sintético do processo convencional de mineração	5
Figura 2.2 – Faixas indicativas das propriedades dos rejeitos finos em função do teor de sólidos (Adaptado de Jewell, 2002).....	7
Figura 2.3 – Estágios (sequência) de deposição das partículas de solos finos	9
Figura 2.4 – Partícula em movimento browniano (publicação original de J. Perrin)....	12
Figura 2.5 – Esquema representativo do ensaio de coluna de sedimentação analisado pela teoria da sedimentação de Kynch (1952)	14
Figura 2.6 – Esquema representativo de pontos em um fluido nos sistemas lagrangeano e euleriano (Adaptado de Takagi <i>et al.</i> , 2011).....	16
Figura 2.7 – Esquema representativo de um elemento de solo na condição inicial ($t = 0$) e deformada ($t > 0$).....	17
Figura 2.8 – Esquema de ensaio CRD (Adaptado de Botelho, 2001)	21
Figura 2.9 – Esquema de ensaio HCT (Adaptado de Botelho, 2001).....	23
Figura 2.10 – Vista do ensaio equipamento para realização de ensaio HCT com bomba de fluxo do CTGA/NUGEO.	24
Figura 2.11 – Curva de compressibilidade – Samarco (Botelho, 2001).....	25
Figura 2.12 – Curva de permeabilidade – Samarco (Botelho, 2001)	25
Figura 2.13 – Desenho esquemático da sonda piezométrica com ponta de 18° desenvolvida por Villar (1990) citado por Villar (2002).....	27
Figura 2.14 – Curva fator tempo <i>versus</i> poropressão normalizada para ponta de 18° acoplada a soluções isotrópicas (Adaptado de Baligh e Levadoux, 1980).....	31
Figura 2.15 – Curva fator tempo <i>versus</i> poropressão normalizada para ponta de 60° acoplada a soluções isotrópicas (Adaptado de Baligh e Levadoux, 1980).....	32
Figura 2.16 – Distribuição mundial das reservas de fosfato (Adaptado de Focus Ventures, 2015).....	33
Figura 2.17 – Curva típica do teor de sólidos <i>versus</i> tempo (Adaptado de Roma, 1976)	35
Figura 2.18 – Relações gráficas de compressibilidade obtidas para argilas fosfáticas (Abu-Hejleh <i>et al.</i> , 1996).....	37

Figura 2.19 – Relações gráficas de permeabilidade obtidas para argilas fosfáticas (Abu-Hejleh <i>et al.</i> , 1996)	38
Figura 2.20 – Relações de compressibilidade para a amostra de argila fosfática A-9 (Adaptado de Abu-Hejleh <i>et al.</i> , 1996).....	38
Figura 2.21 – Distribuição dos índices de vazios para das condições de campo e simulação numérica – reservatório A-1 (Adaptado de Abu-Hejleh <i>et al.</i> , 1996)	39
Figura 3.1 – Curvas granulométricas do rejeito obtidas nos ensaios convencionais de peneiramento e sedimentação	43
Figura 3.2 – Desenho esquemático do funcionamento do granulômetro a laser (Adaptado de Allen, 1981).....	44
Figura 3.3 – Curvas granulométricas das amostras obtidas com o granulômetro a laser (sem hexametáfosfato e sem sonar)	45
Figura 3.4 – Curvas granulométricas das amostras obtidas com o granulômetro a laser (com hexametáfosfato e sem sonar).....	45
Figura 3.5 – Curvas granulométricas das amostras obtidas com o granulômetro a laser (sem hexametáfosfato e com sonar).....	46
Figura 3.6 – Curvas granulométricas das amostras obtidas com o granulômetro a laser (com hexametáfosfato e com sonar)	46
Figura 3.7 – Curvas granulométricas da amostra B-02 sob quatro condições de dispersão	47
Figura 3.8 – Curvas granulométricas do rejeito obtidas através do método convencional e com o granulômetro a laser	48
Figura 3.9 – Difractograma de raios-X do rejeito de fosfato.....	51
Figura 3.10 – MEV do rejeito de fosfato – aproximação 500X	51
Figura 3.11 – MEV do rejeito de fosfato – aproximação 2000X	52
Figura 3.12 – MEV do rejeito de fosfato – aproximação 5000X	52
Figura 3.13 – MEV do rejeito de fosfato – aproximação 2000X	53
Figura 3.14 – Exemplo de espectro de EDS	54
Figura 3.15 – Representação do ensaio de sedimentação em coluna	55
Figura 3.16 – Curva de sedimentação – interface rejeito/água.....	57
Figura 3.17 – Curva média de sedimentação – interface rejeito/água	57
Figura 3.18 – Vista da sequência de provetas – ensaio de sedimentação em coluna	58
Figura 3.19 – Curvas de sedimentação para diferentes teores de sólidos.....	60

Figura 3.20 – Curva de variação do índice de vazios durante a sedimentação.....	62
Figura 3.21 – Desenho esquemático do edômetro (câmara) tipo CRD implementado no CTGA/NUGEO	64
Figura 3.22 – Destaque das partes desmontáveis da câmara tipo CRD.....	65
Figura 3.23 – Cabeçote em acrílico com vista superior e inferior (pedra porosa).....	65
Figura 3.24 – Vista geral do equipamento tipo CRD desenvolvido	66
Figura 3.25 – Vista frontal do Spider 8 (HBM – Hottinger Baldwin Messtechnik).....	69
Figura 3.26 – Vista do painel posterior do Spider 8 (Adaptado de HBM, 2003).....	69
Figura 3.27 – Detalhe das pontas de 15 pinos (a) e 5 pinos (b).....	70
Figura 3.28 – Esquema de conexão do LVTD (Adaptado de HBM, 2003)	70
Figura 3.29 – Esquema de conexão da célula de carga (Adaptado de HBM, 2003)	71
Figura 3.30 – Esquema de conexão dos 3 transdutores de pressão (Adaptado de HBM, 2003)	71
Figura 3.31 – Curva de calibração da célula de carga	72
Figura 3.32 – Curva de calibração da célula do LVDT (potenciômetro)	72
Figura 3.33 – Curva de calibração dos transdutores de pressão T1, T2 e T3	73
Figura 3.34 – Vista geral do CRD com o sistema de aquisição de dados	74
Figura 3.35 – Tela de configuração do dispositivo (fixação dos transdutores) e entrada dos parâmetros de calibração – Catman 6.0	75
Figura 3.36 – Tela customizada para o CRD para visualização dos dados durante o ensaio – Catman 6.0.....	76
Figura 3.37 – Vista do misturador (a) e do processo de homogeneização da lama (b) ..	77
Figura 3.38 – Montagem do anel inferior para saturação da pedra porosa.....	78
Figura 3.39 – Curvas tensão total, tensão efetiva e poropressão versus tempo para o corpo de prova CP1 ($v = 0,075$ mm/min)	83
Figura 3.40 – Curvas tensão total, tensão efetiva e poropressão versus tempo para o corpo de prova CP2 ($v = 0,150$ mm/min)	83
Figura 3.41 – Curvas tensão total, tensão efetiva e poropressão versus tempo para o corpo de prova CP3 ($v = 0,750$ mm/min)	86
Figura 3.42 – Exemplo da dispersão dos pontos de tensão efetiva e poropressão na base para um trecho do ensaio com a velocidade de $0,150$ mm/min.....	88
Figura 3.43 – Curvas tensão efetiva e poropressão versus tempo para os corpos de prova CP3 ($v = 0,150$ mm/min)	90

Figura 3.44 – Curvas tensão efetiva e poropressão versus tempo para os corpos de prova CP3 ($v = 0,150$ mm/min)	90
Figura 3.45 – Curvas tensão efetiva e poropressão versus tempo para os corpos de prova CP3 ($v = 0,150$ mm/min)	91
Figura 3.46 – Curvas tempo versus índice de vazios para as diferentes velocidades de ensaio (CP1, CP2 e CP3)	92
Figura 3.47 – Curvas de compressibilidade obtidas (CP1, CP2 e CP3) - ensaio CRD ..	92
Figura 3.48 – Curvas de permeabilidade obtidas (CP1, CP2 e CP3) - ensaio CRD.....	93
Figura 3.49 – Detalhe das amostras nas câmaras principal e auxiliar no início do processo de sedimentação e adensamento por peso próprio.....	96
Figura 3.50 – Detalhe das amostras nas câmaras principal e auxiliar no final do processo de sedimentação e adensamento por peso próprio.....	96
Figura 3.51 – Vista geral do equipamento com a câmara montada.....	98
Figura 3.52 – Vista da bomba de fluxo conectada ao reversor de fluxo (ao fundo).....	99
Figura 3.53 – Curva poropressão versus tempo – adensamento induzido (CP 4).	100
Figura 3.54 – Curva variação de altura do CP versus tempo – adensamento por carregamento (CP 4).	101
Figura 3.55 – Curva variação da poropressão versus tempo – adensamento por carregamento (CP 4).	102
Figura 3.56 – Curva poropressão versus tempo – permeabilidade (CP 4).	103
Figura 3.57 – Vista de um corpo de prova de rejeito de fosfato seco ao final do ensaio (CP 4).....	103
Figura 3.58 – Curvas de compressibilidade dos corpos de prova ensaiados	110
Figura 3.59 – Curvas de permeabilidade dos corpos de prova ensaiados.....	110
Figura 3.60 – Comparação dos resultados dos ensaios HCT dos rejeitos de Bayóvar com os argilas fosfáticas da Flórida (Abu-Hejleh et al., 1996)	111
Figura 4.1 – Vista da haste construída em aço inox com rosca em náilon	113
Figura 4.2 – Desenho esquemático da sonda-torpedo	114
Figura 4.3 – Dimensões da sonda-torpedo (em mm).....	115
Figura 4.4 – Vista da sonda-torpedo e da pedra porosa cilíndrica.....	115
Figura 4.5 – Vista do sensor <i>5TE</i> (<i>Decagon Devices, Inc.</i>).....	116
Figura 4.6 – Componentes do sensor <i>5TE</i> (<i>Decagon Devices, Inc.</i>)	117
Figura 4.7 – Vista do suporte em náilon de proteção do sensor <i>5TE</i>	117

Figura 4.8 – Dimensões (em mm) do suporte em náilon de proteção do sensor <i>5TE</i> acoplado à sonda-torpedo	118
Figura 4.9 – Registrador eletrônico de dados destinado ao armazenamento das leituras de poropressão	119
Figura 4.10 – Painel indicador instalado na unidade de leitura	119
Figura 4.11 – Unidade de leitura e registro de dados	120
Figura 4.12 – Unidade de leitura e registro de dados	121
Figura 4.13 – Vista da tela do <i>LogChart II</i> (Novus).....	122
Figura 4.14 – Vista da tela do <i>ECH2O Utility</i> (<i>Decagon Devices, Inc.</i>).....	122
Figura 4.15 – Detalhe da sonda piezométrica montada com os principais componentes	123
Figura 4.16 – Caixas para armazenamento e transporte dos componentes da sonda ...	124
Figura 4.17 – Vista da caixa de hastes aberta	124
Figura 4.18 – Curva de calibração da função temperatura do sensor <i>5TE</i>	126
Figura 4.19 – Curva de calibração da função condutividade elétrica do sensor <i>5TE</i> ...	127
Figura 4.20 – Curva teor de umidade volumétrico do sensor <i>5TE versus</i> teor de umidade gravimétrico	129
Figura 4.21 – Curva constante dielétrica do sensor <i>5TE versus</i> teor de umidade gravimétrico	129
Figura 4.22 – Curva constante dielétrica do sensor <i>5TE versus</i> teor de sólidos.....	131
Figura 4.23 – Curva de calibração da sonda-torpedo	132
Figura 4.24 – Desenho em perfil da balsa proposta para a sondagem piezométrica ...	133
Figura 4.25 – Vista da balsa usada na sondagem piezométrica.....	133
Figura 4.26 – Vista geral da estrutura disponível para os ensaios de campo	134
Figura 4.27 – Vista do processo de montagem das hastes e cravação da sonda.....	135
Figura 4.28 – Curva típica de dissipação das poropressões.....	136
Figura 4.29 – Esquema representativo da sondagem piezométrica	137
Figura 4.30 – Vista do amostrador tipo seringa desenvolvido	139
Figura 4.31 – Desenho esquemático do amostrador tipo seringa	139
Figura 4.32 – Esquema de funcionamento do amostrador tipo seringa.....	140
Figura 4.33 – Curva comparativa dos teores de sólidos real e amostrado com a base B10	142

Figura 4.34 – Curva comparativa dos teores de sólidos real e amostrado com a base B07	143
Figura 4.35 – Curva comparativa dos teores de sólidos real e amostrado com a base B04	143
Figura 4.36 – Vista do anel biselado para o amostrador tipo pistão.....	144
Figura 4.37 – Vista do procedimento de amostragem dos rejeitos.....	145
Figura 4.38 – Vista dos mini amostradores	147
Figura 4.39 – Detalhe esquemático do procedimento de amostragem dos rejeitos (mini)	147
Figura 4.40 – Mapa da região de localização da Mina de Bayóvar com vista parcial da planta concentradora (Google, 2015).....	148
Figura 4.41 – Mapa geológico local da região de localização da Mina de Bayóvar (Adaptado de Golder Associates, 2007)	153
Figura 4.42 – Legenda relacionada ao mapa geológico apresentado na Figura 4.41 (Adaptado de Golder Associates, 2007)	154
Figura 4.43 – Diagrama de fluxo do processo de mineração da Mina de Bayóvar – Peru (Adaptado de CMMM, 2017)	158
Figura 4.44 – Mapa regional da região de Sechura destacando as linhas de transporte da mina até o porto (Adaptado de CMMM, 2017)	159
Figura 4.45 – Arranjo dos tanques de disposição de rejeitos da Mina de Bayóvar (Adaptado de CMMM, 2017)	160
Figura 4.46 – Vista de um processo de escavação, com destaque para delimitação das camadas de minério (fosforitas) e estéril (diatomitas) (Adaptado de CMMM, 2017) .	161
Figura 4.47 – Locação dos pontos de sondagem nos tanques TK-101 e TK-105	162
Figura 4.48 – Vista parcial do tanque de disposição de rejeitos TK-101	163
Figura 4.49 – Vista parcial do tanque de disposição de rejeitos TK-105	164
Figura 4.50 – Perfis do teor de sólidos e de umidade das sondagens SP-01-TK-105, SP-02-TK-105 e SP-03-TK-105	168
Figura 4.51 – Perfis de índice de vazios das sondagens SP-01-TK-105, SP-02-TK-105 e SP-03-TK-105.....	169
Figura 4.52 – Curvas de dissipação das poropressões – profundidades de sondagem de 01 m, 02 e 03 m – SP-01-TK-105.....	170

Figura 4.53 – Curvas de dissipação das poropressões – profundidades de sondagem de 12 m e 14 m – SP-01-TK-105.....	171
Figura 4.54 – Perfis do teor de sólidos e de índice de vazios SP-01-TK-101	172
Figura 4.55 – Comparação entre os perfis de teor de sólidos e de índices de vazios das sondagens SP-01-TK-101 e SP-M-TK-105	173
Figura 4.56 – Curva σ' versus e obtida da sondagem SP-01-TK-105.....	174
Figura 4.57 – Curva σ' versus e obtida da sondagem SP-02-TK-105.....	175
Figura 4.58 – Curva σ' versus e obtida da sondagem SP-03-TK-105.....	175
Figura 4.59 – Curva σ' versus e obtida da sondagem SP-01-TK-101.....	176
Figura 4.60 – Curvas σ' versus e obtidas para os tanques TK-101 e TK-105.....	177
Figura 4.61 – Curva σ' versus e ‘média’ – tanque TK-105.....	178
Figura 4.62 – Curva σ' versus e ‘média’ – tanques TK-101 e TK-105.....	178
Figura 4.63 – Curva de compressibilidade ‘média’ corrigida (sem a consideração dos pontos superficiais do tanque TK-105) – tanques TK-101 e TK-105	180
Figura 4.64 – Curva tensão efetiva versus índice de vazios normalizado para todos os perfis dos tanques TK-101 e TK-105	181
Figura 5.1 – Relação teor de sólidos inicial (ψ_i) e teor de umidade inicial (w_i) versus interface final rejeito/água sobrenadante	186
Figura 5.2 – Relação teor de sólidos inicial (ψ_i) versus interface final rejeito/água sobrenadante para as amostras natural e dessalinizada.....	188
Figura 5.3 – Comparação entre as curvas σ' versus e obtidas nos ensaios de laboratório - HCT e CRD	190
Figura 5.4 – Comparação entre as curvas σ' versus e obtidas nos ensaios de laboratório e de campo - HCT e perfis dos tanques TK-101 e TK-105	191
Figura 5.5 – Comparação entre as curvas σ' versus e obtidas nos ensaios de laboratório e de campo - HCT e média dos perfis dos tanques TK-101 e TK-105.....	192
Figura 5.6 – Comparação entre as curvas de compressibilidade obtidas nos ensaios de laboratório e de campo - CRD e perfis dos tanques TK-101 e TK-105	193
Figura 5.7 – Comparação entre as curvas σ' versus e obtidas nos ensaios de laboratório e de campo - CRD e média dos perfis dos tanques TK-101 e TK-105.....	194
Figura 5.8 – Comparação entre as curvas k versus e obtidas nos ensaios de laboratório - HCT e CRD	195

Figura 5.9 – Comparação entre as <i>k versus e</i> obtidas nos ensaios de laboratório e de campo.....	195
Figura 5.10 – Comparação entre as curvas de compressibilidade das amostras naturais (CP1 a CP4) e da amostra dessalinizada (CP5) - ensaio HCT.....	197
Figura 5.11 – Comparação entre as curvas de permeabilidade das amostras naturais (CP1 a CP4) e da amostra dessalinizada (CP5) - ensaio HCT.....	198
Figura 5.12 – Perfis de índice de vazios médio e de peso específico seco - TK-105...	200
Figura 5.13 – Perfis longitudinal e transversal relacionados às seções centrais do tanque TK-105 (Adaptado de CMMM, 2017)	202
Figura 5.14 – Curva cota <i>versus</i> volume – Tanque TK-105.....	203
Figura 5.15 – Curva de enchimento obtida com base no perfil de peso específico seco e o período real de operação – Tanque TK-105	206
Figura 5.16 – Curva peso específico seco <i>versus</i> profundidade – Tanque TK-105	207
Figura 5.17 – Perfil longitudinal relacionado à seção central do tanque TK-103 (Adaptado de CMMM, 2017)	209
Figura 5.18 – Perfil transversal relacionado à seção central do tanque TK-103 (Adaptado de CMMM, 2017)	210
Figura 5.19 – Imagem aérea referenciada do tanque TK-103, registrada em 12/10/2017 (Adaptado de CMMM, 2017)	211
Figura 5.20 – Curva cota <i>versus</i> volume – Tanque TK-103.....	212
Figura 5.21 – Curva de enchimento calculada com base no perfil de peso específico seco estimado – Tanque TK-103	214
Figura 5.22 – Perfil médio de tensões efetivas (SP01, SP02 e SP03) – Tanque TK-105	215
Figura 5.23 – Curvas de enchimentos obtidas com base no perfil de peso específico seco e na lei de compressibilidade de campo – Tanque TK-105.....	218
Figura 5.24 – Curvas de enchimentos obtidas com base no perfil de peso específico seco e na lei de compressibilidade de campo – Tanque TK-103.....	221
Figura 5.25 – Curva cota <i>versus</i> volume ampliada – Tanque TK-103.....	224
Figura 5.26 – Curvas de enchimentos obtidas com base nas condições iniciais de lançamento e nominal – Tanque TK-103	225
Figura 5.27 – Curva cota e altura <i>versus</i> tempo considerando a simulação de enchimento instantâneo – Tanque TK-103.....	226

Figura 5.28 – Curvas de enchimento nominal e de enchimento escalonado obtida na simulação numérica – Tanque TK-105.....	228
Figura 5.29 – Comparação entre as curvas de enchimento escalonado obtida na simulação e as curvas de enchimento de campo – Tanque TK-105	228
Figura 5.30 – Curvas de enchimento escalonado e de enchimento escalonado corrigido obtidas na simulação numérica – Tanque TK-105	231
Figura 5.31 – Comparação entre as curvas de enchimento escalonado obtidas na simulação e as curvas de enchimento de campo – Tanque TK-105	231
Figura 5.32 – Perfis de índices de vazios após adensamento para cada estágio da simulação do enchimento escalonado corrigido – Tanque TK-105	232
Figura 5.33 – Perfis de teor de sólidos após adensamento para cada estágio da simulação do enchimento escalonado corrigido – Tanque TK-105.....	232
Figura 5.34 – Perfis de poropressão após adensamento para cada estágio da simulação escalonada corrigida – Tanque TK-105.....	233
Figura 5.35 – Comparação dos perfis de índice de vazios e poropressão obtidos nos ensaios de campo e na simulação numérica escalonada corrigida – Tanque TK-105..	234
Figura 5.36 – Comparação entre as curvas de enchimento escalonado corrigido obtida na simulação e as curvas de enchimento de campo – Tanque TK-103	237
Figura 5.37 – Perfis de índices de vazios após adensamento para cada estágio da simulação do enchimento escalonado corrigido – Tanque TK-103	237
Figura 5.38 – Perfis de teor de sólidos após adensamento para cada estágio da simulação do enchimento escalonado corrigido – Tanque TK-103.....	238
Figura 5.39 – Perfis de poropressão após adensamento para cada estágio da simulação escalonada corrigida – Tanque TK-103.....	238

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Propriedades das argilas fosfáticas (Abu-Hejleh <i>et al.</i> , 1996).....	37
Tabela 2.2 – Parâmetros constitutivos obtidos (Abu-Hejleh <i>et al.</i> , 1996).....	37
Tabela 3.1 – Teores de umidade (w) e de sólidos (ψ) das bombonas de rejeito.....	41
Tabela 3.2 – Massa específica dos grãos (ρ_s) e índices de vazios de lançamento (e)	42
Tabela 3.3 – Frações granulométricas do rejeito	43
Tabela 3.4 – Limites de consistência do rejeito (LL obtido pela ABNT)	49
Tabela 3.5 – Limites de consistência do rejeito (LL obtido pela BS)	49
Tabela 3.6 – Análise química do rejeito de fosfato	50
Tabela 3.7 – Ensaio de coluna – proveta de sedimentação.....	56
Tabela 3.8 – Dados iniciais das amostras – ensaios de sedimentação	58
Tabela 3.9 – Ensaio de coluna para diferentes teores de sólidos (ψ).....	59
Tabela 3.10 – Valores dos índices de vazios (e) para os diferentes teores de sólidos (ψ)	61
Tabela 3.11 – Sensores utilizados no edômetro tipo CRD	64
Tabela 3.12 – Detalhamento dos sensores utilizados no equipamento.....	67
Tabela 3.13 – Detalhamento das conexões dos sensores do CRD no <i>Spider 8</i>	70
Tabela 3.14 – Detalhamento da configuração do dispositivo específico para o ensaio CRD no <i>Catman 6.0</i>	75
Tabela 3.15 – Dados dos corpos de prova antes da sedimentação e adensamento por peso próprio (medidos e calculados)	79
Tabela 3.16 – Dados dos corpos de prova após sedimentação e adensamento por peso próprio – σ_0 (medidos e calculados)	81
Tabela 3.17 – Dados de entrada e obtidos nos ensaios iniciais de CRD	82
Tabela 3.18 – Dados do CP3 antes da sedimentação e adensamento por peso próprio (medidos e calculados).....	85
Tabela 3.19 – Dados do CP3 após sedimentação e adensamento por peso próprio – σ_0	86
Tabela 3.20 – Dados de entrada e obtidos nos ensaios iniciais de CRD – CP3	86
Tabela 3.21 – Parâmetros de ajuste das tensões efetivas.....	89

Tabela 3.22 – Parâmetros de ajuste das poropressões de base	89
Tabela 3.23 – Relações índice de vazios (e) <i>versus</i> tempo (t) para os corpos de prova 91	
Tabela 3.24 – Dados iniciais dos corpos de prova - CP's - medidos.....	105
Tabela 3.25 – Dados iniciais dos corpos de prova - CP's - calculados	106
Tabela 3.26 – Dados dos corpos de prova após sedimentação e adensamento por peso próprio – σ_0 - calculados.....	107
Tabela 3.27 – Dados do ensaio de adensamento induzido por percolação.....	108
Tabela 3.28 – Dados do ensaio de carregamento em etapas.....	108
Tabela 3.29 – Dados do ensaio de permeabilidade.....	108
Tabela 3.30 – Parâmetros constitutivos obtidos no ensaio HCT	109
Tabela 3.31 – Relações constitutivas obtidas no ensaio HCT	109
Tabela 4.1 – Relação das entradas da unidade de leitura e registro dos dados.....	120
Tabela 4.2 – Teores de umidade volumétrico e gravimétrico e teores de sólidos associados às constantes dielétricas do sensor 5TE.....	130
Tabela 4.3 – Teores de umidade (w) real e amostrada.....	141
Tabela 4.4 – Teores de sólidos (ψ) real e amostrado.....	142
Tabela 4.5 – Comparação dos teores de umidade obtidos nos amostradores seringa e mini – tanque 101	147
Tabela 4.6 – Reserva e produção mundial de fosfato (Adaptado de DNPM, 2015)	149
Tabela 4.7 – Detalhamento dos pontos da campanha de investigação ' <i>in situ</i> '.....	163
Tabela 4.8 – Características da água sobrenadante (coletada no tanque TK-101)	164
Tabela 4.9 – Parâmetros obtidos na sondagem piezométrica SP-01-TK-105	166
Tabela 4.10 – Parâmetros obtidos na sondagem piezométrica SP-02-TK-105	166
Tabela 4.11 – Parâmetros obtidos na sondagem piezométrica SP-03-TK-105	167
Tabela 4.12 – Parâmetros obtidos na sondagem piezométrica SP-01-TK-101	172
Tabela 4.13 – Síntese das curvas obtidas em função das condições consideradas na análise	182
Tabela 5.1 – Ensaio de coluna para 4 diferentes teores de sólidos (ψ) das amostras dessalinizadas.....	187
Tabela 5.2 – Parâmetros constitutivos obtidos para a amostra dessalinizada.....	196
Tabela 5.3 – Relações constitutivas obtidas para a amostra dessalinizada.....	197
Tabela 5.4 – Valores dos índices de vazios médios e peso específico seco – TK-105. 200	
Tabela 5.5 – Volume por camadas e acumulados – tanque TK-105	201

Tabela 5.6 – Pesos secos por camadas e pesos secos acumulados – tanque TK-105...	204
Tabela 5.7 – Dados extraídos da planilha de acompanhamento de enchimento do tanque TK-105 – considerando $\psi = 15\%$ (CMMM, 2017)	205
Tabela 5.8 – Dados extraídos da planilha de acompanhamento de enchimento do tanque TK-105 – considerando $\psi = 14,17\%$ (CMMM, 2017)	206
Tabela 5.9 – Volume por camadas e acumulados – tanque TK-103	208
Tabela 5.10 – Pesos específicos secos, pesos secos por camadas e pesos secos acumulados estimados com base na Equação 5.1 – tanque TK-103	213
Tabela 5.11 – Índices físicos lei de compressibilidade de campo – TK-105.....	216
Tabela 5.12 – Pesos secos por camadas e pesos secos acumulados – tanque TK-105.	217
Tabela 5.13 – Índices físicos – lei de compressibilidade de campo – TK-103.....	219
Tabela 5.14 – Pesos secos por camadas e pesos secos acumulados – tanque TK-103.	220
Tabela 5.15 – Comparação entre as alturas obtidas experimentalmente e pela simulação numérica no ensaio HCT	223
Tabela 5.16 – Parâmetros constitutivos utilizados nas simulações	223
Tabela 5.17 – Resultados da simulação numérica de enchimento por escalonamento corrigido – tanque TK-105	230
Tabela 5.18 – Resultados da simulação numérica de enchimento por escalonamento corrigido – tanque TK-103	236

Lista de Símbolos, Nomenclaturas e Abreviações

ψ	Teor de sólidos
θ	Teor de umidade volumétrico
a	Coordenada lagrangeana
A	Área
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
a_v	Coefficiente de compressibilidade
BS	<i>British Standards Institution</i>
c	Concentração
CC	Célula de carga
c_h	Coefficiente de adensamento horizontal
cm^3	Centímetro cúbico
CMMM	Companhia Mineira Miski Mayo
CP	Corpo de prova
CPTU	Ensaio de cone
CRD	<i>Constant Rate of Deformation</i>
CRS	<i>Constant Rate of Strain</i>
CTGA	Centro Tecnológico de Geotecnia Aplicada
c_v	Coefficiente de adensamento vertical
D	Diâmetro
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
e	Índice de vazios
e_{00}	Índice de vazios para tensão efetiva nula
EDS	Espectroscopia por dispersão de energia
g	Aceleração da gravidade
g	Gramas
G_s	Densidade relativa dos grãos
HCT	<i>Hydraulic Consolidation Test</i>
h_f	Altura final

h_i	Altura inicial
H_s	Altura de sólidos
h_w	Altura da água
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
ICP	<i>Inductively Coupled Plasma</i>
IP	Índice de plasticidade
k	Coefficiente de permeabilidade
K_a	Constante dielétrica
k_h	Coefficiente de permeabilidade horizontal
km	Quilômetro
kN	QuiloNewton
kPa	QuiloPascal
k_v	Coefficiente de permeabilidade vertical
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
M	Massa
m	Metro
m^2	Metro quadrado
m^3	Metro cúbico
mA	MiliAmpère
mca	Metro de coluna de água
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
min	Minuto
mm	milímetro
M_s	Massa de sólidos
Mt	Milhões de toneladas
m_v	Coefficiente de compressibilidade volumétrica
n	Porosidade
NBR	Norma Brasileira Registrada
NUGEO	Núcleo de Geotecnia
°	Graus
P	Resistência específica

pH	Potencial hidrogeniônico
ppm	Parte por milhão
PVC	Policloreto de Vinila
q	Vazão
R	Raio
S	Grau de saturação
s	Segundo
SG	<i>Strain Gauge</i>
SP	Sondagem piezométrica
T	Fator tempo
t	Tonelada
t	Tonelada-força
TDR	<i>Time-domain Reflectometer</i>
u	Poropressão
u ₀	Poropressão de estabilização (equilíbrio)
u _b	Poropressão medida na base
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto
u _i	Poropressão inicial
V	Volt
v	Velocidade
V	Volume
V	Volume
v _s	Velocidade de sedimentação
w	Teor de umidade gravimétrico
w	Teor de umidade
z	Coordenada reduzida
z	Cota (altura)
ξ	Coordenada euleriana
ΔH	Variação de altura
ΔV	Variação de volume
γ	Peso específico
γ _d	Peso específico seco
γ _s	Peso específico dos sólidos

γ_w	Peso específico da água
μ	Viscosidade
ρ	Massa específica
ρ_d	Massa específica seca
ρ_s	Massa específica dos sólidos
ρ_w	Massa específica da água
σ	Condutividade elétrica
σ	Tensão total
σ	Tensão
σ'	Tensão efetiva
σ'_m	Tensão efetiva média
σ_b	Tensão total medida na base

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS DO TRABALHO.....	2
1.2.1 Objetivo geral.....	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	4
CAPÍTULO 2.....	5
REJEITOS FINOS DE MINERAÇÃO.....	5
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	5
2.2 COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DOS REJEITOS FINOS.....	8
2.3 SEDIMENTAÇÃO E ADENSAMENTO DOS REJEITOS FINOS.....	9
2.3.1 Sedimentação dos rejeitos finos.....	11
2.3.2 Adensamento dos rejeitos finos.....	15
2.3.3 Ensaios de laboratório aplicados aos rejeitos finos.....	19
2.3.4 Ensaios de campo aplicados aos rejeitos finos.....	26
2.4 REJEITOS DE FOSFATO.....	32
2.4.1 Depósitos de rocha fosfática.....	32
2.4.2 Rejeitos de fosfato.....	34
CAPÍTULO 3.....	40
PROGRAMA EXPERIMENTAL DE LABORATÓRIO.....	40
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	40
3.2 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO REJEITO.....	40

3.2.1 Amostragem do rejeito e determinação do teor de sólidos inicial	40
3.2.2 Determinação da massa específica dos grãos e análise granulométrica	41
3.2.3 Determinação dos limites de consistência	48
3.3 ANÁLISES QUÍMICA E MINERALÓGICA DO REJEITO.....	49
3.3.1 Análise química	50
3.3.2 Análise mineralógica	50
3.4 ENSAIOS ESPECIAIS	54
3.4.1 Ensaio de sedimentação em coluna	54
3.4.2 Ensaio de adensamento com taxa de deformação constante (CRD).....	63
3.4.3 Ensaio de adensamento induzido por percolação (HCT).....	94
CAPÍTULO 4.....	112
PROGRAMA EXPERIMENTAL DE CAMPO.....	112
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	112
4.2 ENSAIOS DE CAMPO	113
4.2.1 Desenvolvimento da sonda piezométrica	113
4.2.2 Calibração da sonda piezométrica desenvolvida e seus acessórios	125
4.2.3 Procedimento realizado na sondagem piezométrica	132
4.2.4 Amostragem dos rejeitos	137
4.2.5 Descrição da área de investigação e geologia local	148
4.2.6 Descrição do processo de mineração da Mina de Bayóvar	154
4.2.7 Descrição do sistema de disposição de rejeitos finos	159
4.2.8 Programa de investigação de campo e análises preliminares dos resultados	162
CAPÍTULO 5.....	183
ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	183
5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	183
5.2 ANÁLISES COMPARATIVA DOS RESULTADOS.....	184

5.2.1	Análise dos resultados dos ensaios de sedimentação em coluna	184
5.2.2	Comparação entre os resultados de campo e de laboratório	189
5.2.3	Efeito da salinidade da amostra no adensamento e na permeabilidade	196
5.3	SIMULAÇÕES DE ENCHIMENTO DOS TANQUES	199
5.3.1	Simulações de enchimento com base nos resultados de campo	199
5.3.2	Simulação numérica de enchimento com base nos resultados de laboratório	222
	CAPÍTULO 6	239
	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA OUTROS ESTUDOS.....	239
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	239
6.2	CONCLUSÕES	240
6.2.1	Desenvolvimento dos equipamentos	240
6.2.2	Ensaio e análises dos resultados de campo e de laboratório	240
6.2.3	Influência da salinidade	243
6.2.4	Simulações de enchimento.....	243
6.3	SUGESTÕES PARA OUTROS ESTUDOS	244
	REFERÊNCIAS.....	246

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Diversos fatores aceleram a expansão de investimentos diretos no setor da mineração, tanto para a aquisição de unidades em operação quanto para a exploração de novas reservas. A indústria mineradora é responsável pelas atividades destinadas a pesquisar, descobrir, mensurar, extrair, tratar ou beneficiar e transformar recursos minerais de forma a torná-los benéficos econômicos e sociais.

Na execução destas atividades, são gerados os rejeitos, caracterizados como materiais remanescentes dos processos extrativos (beneficiamento), cujas características granulométricas são dependentes diretamente do tipo de minério bruto envolvido no processo, além das questões relacionadas ao processo industrial de beneficiamento.

De maneira geral, os rejeitos podem abranger materiais grosseiros até faixas de granulometria muito fina (lamas), com significativas variações em termos de comportamento geotécnico. Como consequência, são justificados avanços nos estudos associados à disposição destes resíduos, envolvendo, fundamentalmente, o conhecimento destes materiais, com ênfase em avaliações particularizadas das propriedades de compressibilidade e adensamento.

No passado, a extração de substâncias minerais se utilizou de técnicas e ferramentas rudimentares, bem como nas etapas de tratamento e beneficiamento. A geração de rejeitos e os impactos decorrentes de sua disposição no meio ambiente eram considerados relativamente desprezíveis, cujos descartes eram realizados sem as devidas precauções ambientais. Registros deste tipo de disposição aconteceram nos primórdios da mineração no Brasil, há cerca de 300 anos, cujas principais tipologias minerais eram o ouro e, posteriormente, o diamante (IBRAM, 2016).

Mais recentemente, os aspectos ambientais cresceram em importância, com atenção amplamente voltada para estabilidade física e econômica das barragens, considerando o potencial de dano ambiental e os mecanismos de transporte de contaminantes. Aspectos de estabilidade física, entretanto, têm permanecido na vanguarda, em função dos recentes acidentes registrados com estruturas de contenção de rejeitos, com implicações financeiras e ambientais severas em muitos casos (CBDB, 2012). As causas destes acidentes podem estar vinculadas à desconsideração de tecnologias de disposição apropriadas nos processos de operação da mina ou mesmo atribuídas ao desconhecimento, mesmo que em caráter parcial, das características geotécnicas destes materiais.

Particularmente, para os rejeitos finos, o conhecimento do seu comportamento geotécnico pode garantir um maior controle na construção de futuras estruturas, bem como permitir uma estimativa mais racional da vida útil de um sistema de contenção. Com efeito, a correta interpretação do comportamento destes resíduos está especialmente associada ao planejamento das operações de mina e à previsão da redução de impactos ambientais associados a novas áreas de disposição.

O processo de adensamento destes materiais não pode ser avaliado convencionalmente, com base nas teorias clássicas. A deposição destes rejeitos é afetada por vários fatores, vinculados especialmente à sua consistência, resultando em um processo de segregação das partículas, diretamente associado à sistemática de lançamento no sistema de contenção (reservatório). De maneira geral, estes materiais experimentam grandes deformações durante o adensamento, necessitando ser estudados com metodologias específicas de análise, e parâmetros que representem, com maior assertividade, o modelo deposicional envolvido.

1.2 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS DO TRABALHO

Em face às características associadas aos rejeitos finos, vinculadas especialmente à granulometria e à consistência de lançamento, que resultam em um modelo de deposição não convencional, o conhecimento das variáveis específicas envolvidas no processo de sedimentação e adensamento torna-se particularmente relevante. Os parâmetros geotécnicos que governam estes mecanismos podem ser obtidos a partir

resultados extraídos de experimentos de campo e/ou de laboratório, com a formulação de leis de compressibilidade passíveis de ser aplicadas nas análises da capacidade de estocagem dos reservatórios, impactando na correta previsão da vida útil destas estruturas.

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho objetiva estudar o comportamento, em termos de compressibilidade e adensamento, de um rejeito de fosfato de baixa densidade, através de um amplo programa experimental, incluindo o desenvolvimento de equipamentos específicos e técnicas de ensaios de campo e de laboratório, que levem em consideração as características deste rejeito. O conhecimento destas características, numa visão que incorpora as condições reais de estocagem dos rejeitos finos e por ensaios de laboratório, já justifica a elaboração de pesquisas dedicadas ao tema.

1.2.2 Objetivos específicos

No contexto mais específico desta pesquisa, caracterizam-se como objetivos:

- Construir um edômetro tipo CRD (*Constant Rate of Deformation*) dedicado à realização de adensamento com taxa de deformação constante em materiais de baixa consistência;
- Desenvolver uma sonda piezométrica, visando a obtenção da compressibilidade ‘*in situ*’ (condições reais de estocagem), incluindo a idealização de novos tipos de amostradores;
- Implementar um amplo programa experimental de laboratório e de campo, com a realização de ensaios vinculados à utilização dos equipamentos desenvolvidos, bem como com o uso de técnicas de ensaios de sedimentação e ensaios HCT, visando a conhecimento do comportamento dos rejeitos de fosfato estudados (oriundos da Mina de Bayóvar, no Peru);
- Estabelecer comparações entre os resultados obtidos, considerando os diferentes ensaios realizados;

- Avaliar da influência da salinidade no processo de sedimentação e adensamento dos rejeitos de fosfato estudados;
- Realizar simulações numéricas de enchimento através das leis de compressibilidade obtidas experimentalmente, incluindo a utilização de uma análise por meio de um programa computacional denominado CONDES0;
- Propor a metodologia mais adequada ao estudo do adensamento e da compressibilidade dos rejeitos de fosfato de baixa de densidade.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

A presente tese foi estruturada em seis capítulos. O Capítulo 1 apresenta as considerações preliminares sobre os rejeitos de mineração, com apresentação dos objetivos e a justificativa da pesquisa proposta, além do escopo da tese resultante.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre rejeitos finos de mineração, com uma abordagem sobre os rejeitos de fosfato, e os processos envolvidos na sedimentação e no adensamento destes materiais, destacando os principais trabalhos publicados e vinculados ao tema.

Os Capítulos 3 e 4 descrevem os programas experimentais de laboratório e de campo, respectivamente. Estes capítulos são caracterizados pelo profundo detalhamento dos procedimentos utilizados, discorrendo sobre os equipamentos desenvolvidos, as técnicas utilizadas e a apresentação dos resultados, além de já apresentarem as primeiras análises e discussões associadas aos resultados obtidos.

O Capítulo 5 incorpora análises e discussões mais robustas dos resultados obtidos nos programas experimentais, em complemento ao já estabelecido nos capítulos anteriores. São realizadas também comparações acerca das principais formulações estabelecidas, a partir os resultados obtidos nos ensaios, e realizadas simulações numéricas de enchimento de reservatórios através de três diferentes procedimentos.

Finalizando a estrutura textual do presente trabalho, o Capítulo 6 destaca as principais conclusões extraídas dos estudos realizados e apresenta algumas sugestões para pesquisas complementares.

REJEITOS FINOS DE MINERAÇÃO

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Do ponto de vista conceitual, rejeitos são materiais remanescentes do processo de beneficiamento e concentração de minérios em instalações industriais, cujas características granulométricas dependem do tipo de minério bruto a ser extraído (ferro, fosfato, bauxita, ouro, etc.) e do processo industrial de extração e beneficiamento. Esses resíduos podem abranger uma ampla faixa de materiais, desde grosseiros até partículas de granulometria muito fina. Em função dos processos de beneficiamento, os rejeitos podem ser ativos (contaminados) ou inertes (não contaminados).

Os rejeitos são gerados através do processo de extração das riquezas minerais, cujo procedimento consiste basicamente de um conjunto de operações coordenadas, que objetivam o aproveitamento industrial das jazidas, desde a extração das substâncias minerais até o beneficiamento. A extração mineral que envolve esse procedimento, denominado tecnicamente como processo de mineração, é ancorada em uma sequência de eventos envolvidos por uma série de operações que, de maneira sintética, são mostradas na Figura 2.1.

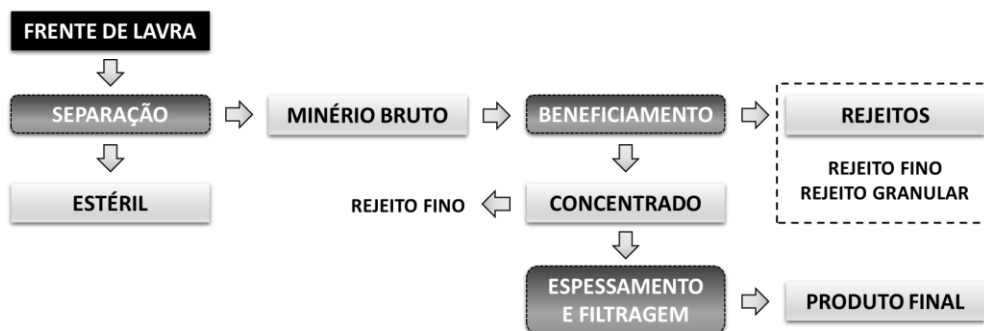


Figura 2.1 – Fluxograma sintético do processo convencional de mineração

Após a geração do rejeito como um subproduto desprovido de valor comercial, torna-se necessário o seu transporte e o consecutivo descarte. O descarte dos rejeitos é geralmente condicionado ao processo de beneficiamento, podendo ser feito na forma sólida ou na forma de polpa, essa mais comumente empregada (mais economicamente viável). A polpa é transportada por tubulações, denominadas ‘rejeitodutos’, por gravidade ou mediante a utilização de sistemas de bombeamento, quando necessário.

A disposição dos rejeitos pode ser realizada em cavidades, em ambientes subaquáticos ou em superfície, caracterizada como a mais comumente utilizada. A disposição superficial permite a acumulação dos resíduos em barragens e diques ou em cavas exauridas, técnica ainda pouco difundida, mas que vem sendo recentemente empregada pela indústria da mineração, justificada pela redução de custos em investimentos, assim como pelos riscos ambientais envolvidos (FEAM, 2016). A adoção do sistema mais adequado para a disposição de rejeitos está geralmente condicionada a variáveis técnicas, econômicas e ambientais. Para a configuração superficial, além de outros importantes fatores, destaca-se a compatibilidade do sistema com a condição topográfica local.

Para os rejeitos finos, particularmente, são propostos métodos alternativos que buscam a otimização dos sistemas de disposição, reduzindo, como consequência, a necessidade de grandes áreas para armazenamento, caracterizando-se como um grande avanço do ponto de vista ambiental. Nesse sentido, em conformidade com o avanço no processo de desaguamento dos rejeitos finos, a disposição pode apresentar-se em diferentes estados físicos, culminando na apresentação de comportamentos geotécnicos distintos. Dentre os métodos alternativos de disposição de rejeitos finos, associados ao processo de desaguamento, destacam-se os rejeitos em pasta e tipo torta (Portes, 2013).

Uma comparação entre os rejeitos finos dispostos em sistemas convencionais sob a forma de polpa e o método de disposição em pasta, de maneira geral, vincula o comportamento relacionado aos fenômenos físicos experimentados no depósito. Os rejeitos finos dispostos sob a forma de lamas são submetidos à sedimentação e ao adensamento pelo peso próprio. Em se tratando da disposição em pasta, Jewell (2002) a conceitua como um sistema de partículas finas caracterizadas como um fluido homogêneo, praticamente isento de processos físicos de segregação granulométrica.

Apesar da adoção majoritária e convencional dos sistemas de disposição superficial em polpa (lama) dos rejeitos finos, quando comparados aos métodos alternativos, esses últimos são vantajosos, especialmente do ponto de vista ambiental, já avaliado como considerável recentemente. Ademais, pela apresentação como opções de desaguamento da polpa gerada durante o processo industrial, os métodos alternativos produzem efeitos diretamente associados ao ganho de consistência do rejeito. Esse, por sua vez, agrega outros resultados significativos, do ponto de vista geotécnico, enfatizando, por exemplo, os parâmetros de resistência do material (Jewell, 2002). A Figura 2.2 apresenta as faixas indicativas do comportamento, em termos da resistência não drenada, dos rejeitos finos em função do teor de sólidos, onde são observados os diferentes estados associados. O diagrama apresenta ainda as características de segregação das partículas sólidas e os eventuais sistemas de disposição utilizados em função da concentração, além dos equipamentos comumente empregados no desaguamento e bombeamento destes materiais.

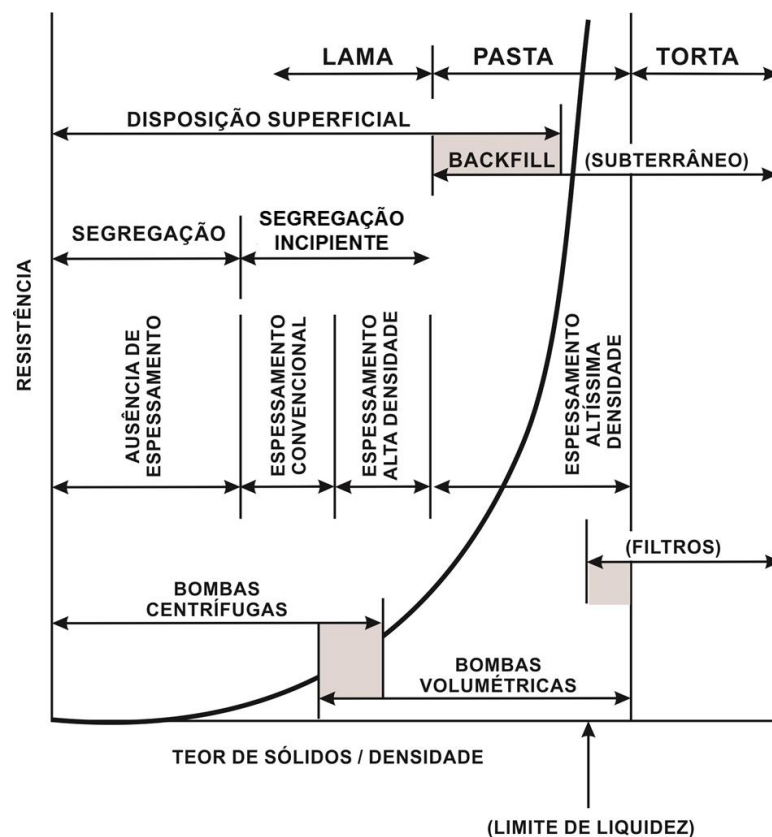


Figura 2.2 – Faixas indicativas das propriedades dos rejeitos finos em função do teor de sólidos (Adaptado de Jewell, 2002)

Os métodos alternativos de disposição permitem maiores volumes de rejeitos estocados em menores áreas, geralmente associados a um ganho de resistência em poucos dias. Em sistemas de disposição convencionais, no entanto, onde ainda não são justificados investimentos, do ponto de vista econômico e operacional, objetivando a implementação de tecnologias de espessamento em altíssima densidade para produção de pastas, a atual preocupação está relacionada à capacidade de estocagem dos reservatórios. No Brasil, por exemplo, os rejeitos finos são frequentemente dispostos sob a forma de polpa e requerem grandes estruturas de contenção (Portes, 2013).

2.2 COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DOS REJEITOS FINOS

Os rejeitos finos dispostos em forma de polpa são caracterizados por conter basicamente frações granulométricas correspondentes a silte e argila (com mais de 90% abaixo de 0,074 mm de diâmetro equivalente). De maneira geral, os rejeitos finos são materiais plásticos, altamente compressíveis. Convencionalmente, são depositados como uma lama (fluida) e com grande quantidade de água em sua composição. Nestas condições, a disposição é feita de forma contínua e grandes áreas são ocupadas, o que requer estruturas como diques ou barragens para a sua contenção.

Para determinadas propriedades, os rejeitos finos, em geral, comportam-se similarmente aos solos moles, como, por exemplo, a alta compressibilidade e a baixa permeabilidade. No entanto, a semelhança de comportamento não pode ser corriqueiramente generalizada, sendo fundamental a realização de análises particularmente cautelosas e ponderadas, visto que os rejeitos de mineração, ao contrário dos solos moles, são gerados através de processos industriais, apresentando composições química e mineralógica peculiares. Outra característica particular dos rejeitos é o fluido constituinte da polpa que, por ser derivado do processamento industrial, contém composições químicas e viscosidades que se diferenciam da água (presente nos solos).

Visando avaliar as propriedades geotécnicas, que são consideravelmente importantes, tanto na concepção de projetos de sistemas de disposição quanto na operação dos sistemas atuais, estes materiais têm sido alvo de várias pesquisas na área de geotecnia na instituição (Botelho, 2001; Araújo, 2005; Pereira, 2006; Cançado, 2010; Ferreira, 2011; Pereira e Gomes, 2012, Ferreira, 2016).

2.3 SEDIMENTAÇÃO E ADENSAMENTO DOS REJEITOS FINOS

Conforme já ressaltado, os rejeitos finos, além de apresentarem frações granulométricas de reduzidos diâmetros equivalentes, em geral, são caracterizados como plásticos, mesmo para índices de plasticidade pouco significativos. Estas características são responsáveis por atribuir a esses materiais processos de sedimentação e adensamento demasiadamente custosos, o que gera, como consequência, em muitos casos, a demanda de grandes áreas e significativos volumes para a sua disposição.

De maneira geral, após o lançamento em reservatórios de contenção, o mecanismo de deposição dos rejeitos pode ser comparado à sequência exposta por Imai (1981), em que a deposição de sedimentos (fração argila) ocorre segundo três estágios. Conforme mostra a Figura 2.3, como etapa precedente à sedimentação e ao adensamento, destaca-se o estágio de floculação, caracterizado pela união de partículas menores, formando, conseqüentemente, partículas de maiores dimensões.

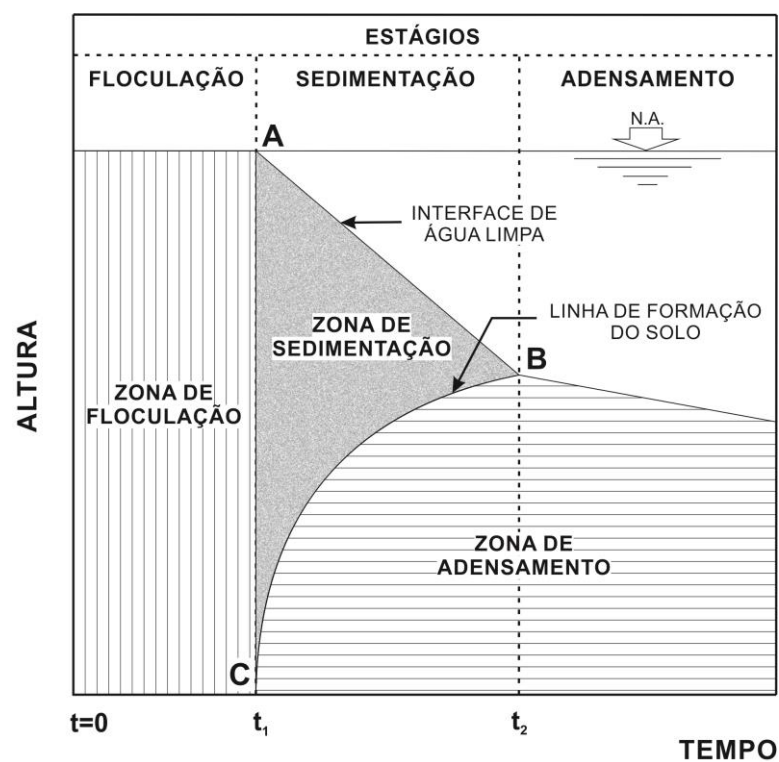


Figura 2.3 – Estágios (sequência) de deposição das partículas de solos finos
(Adaptado de Imai, 1981)

Destaca-se que, apesar de diversos estudos considerarem uma sequência nitidamente perceptível, as etapas de sedimentação e adensamento de materiais finos podem ocorrer de maneira simultânea, conforme destacam os trabalhos de Pane (1985) e Pane e Schiffman (1985). Devido às características associadas ao transporte e estocagem por via úmida, em que os rejeitos finos são geralmente submetidos, a concentração de sólidos, nestas etapas, tende a ser baixa. Estes materiais são, portanto, geralmente levados a processos de sedimentação e adensamento não convencionais.

Estes rejeitos, usualmente depositados sob a forma de lama, com significativa quantidade de água, ou seja, com baixo teor de sólidos, são conseqüentemente dispostos em baixa consistência, onde são continuamente submetidos a processos de sedimentação e adensamento, cuja compressibilidade não pode ser inferida mediante os princípios da teoria clássica de Terzaghi proposta para a Mecânica dos Solos convencional. Deve-se caracterizar, como uma importante afirmação, o fato desses materiais se submeterem a grandes deformações, que ocorrem ao longo do reservatório, durante os mecanismos de sedimentação e adensamento. Em função dos lançamentos que ocorrem ‘ininterruptamente’, os carregamentos também se caracterizam como contínuos, ao longo do tempo. Os modelos convencionais utilizados nas teorias clássicas de adensamento são baseados na teoria de deformações infinitesimais. Para essa condição, considera-se que a camada em adensamento conserva-se praticamente constante durante todo o processo, visto que as deformações ao longo do tempo são ínfimas quando comparadas à espessura inicial da camada. De fato, os deslocamentos das partículas assumem-se como sendo pequenos (infinitesimalmente pequenos).

Já no que diz respeito ao modelo deposicional dos rejeitos finos, onde impera a avaliação a partir da teoria das deformações finitas, é determinante a afirmação de que a espessura da camada é tratada como uma variável do processo e as deformações ao longo do tempo são, sobretudo, arbitrariamente expressivas. Os estudos que consideram o adensamento a grandes deformações são propostos na literatura técnica e são sugeridos para a avaliação do modelo deposicional de materiais finos sob deformações finitas, com destaques para alguns trabalhos pioneiros (Gibson *et al.*, 1967; Znidarcic, 1982; Schiffman *et al.*, 1984, Pane, 1985; Lee, 1981, de Campos *et al.*, 1991, Abu-Hejleh e Znidarcic, 1992; Gomes, 1998). Em trabalho recente, Ahmed e Siddiqua (2014) realizaram uma ampla revisão acerca do adensamento destes rejeitos.

2.3.1 Sedimentação dos rejeitos finos

Elaborada pioneiramente por Stokes em 1851, a sedimentação livre baseada na conhecida ‘Lei de Stokes’ relaciona o tamanho de uma esfera com a sua velocidade de queda. A partir das formulações, que consideram as forças gravitacional, de flutuação ascendente e de arraste, com associação da aceleração da gravidade, diâmetro e massa específica da esfera, a lei é geralmente aplicada para o escoamentos de um fluido viscoso e incompressível.

Na Mecânica dos Solos convencional, a Lei de Stokes é usualmente utilizada para calcular a velocidade de sedimentação discreta das partículas. Nesse tipo de sedimentação, os sedimentos apresentam uma velocidade uniforme e trajetória retilínea, não havendo aglomeração e nem interação entre as partículas durante o processo.

Em síntese, são consideradas as seguintes premissas:

- durante o processo de sedimentação, as partículas não são influenciadas por outras ou mesmo pelas paredes do canal ou reservatório;
- as partículas são esféricas;
- a viscosidade da água e a massa específica dos sólidos constituintes do solo são exatamente conhecidas.

Neste caso, as partículas sólidas são mantidas isoladas, não havendo alteração de massa específica da partícula durante a sedimentação, cuja velocidade de queda pode ser inferida pela Equação 2.1.

$$v_s = \frac{(\rho_s - \rho_w)}{18 \cdot \mu} \cdot g \cdot D^2 \quad (2.1)$$

Sendo:

v_s : velocidade de sedimentação da partícula sólida;

ρ_s : massa específica dos sólidos;

ρ_w : massa específica do fluido (água);

g : aceleração da gravidade;

μ : viscosidade dinâmica do fluido;

D : diâmetro da partícula.

Em se tratando de rejeitos finos, com elevadas proporções de partículas finas, a previsão do comportamento em termos de sedimentação não pode ser inferido com a consideração desta lei convencional, ocorrendo um movimento aleatório, gerado pelas colisões entre as moléculas do fluido e as partículas.

De acordo com Silva e Lima (2007), o movimento irregular de pequenas partículas imersas numa determinada solução foi originalmente observado em 1828 pelo botânico inglês Robert Brown. Ele notou que as partículas em suspensão comportavam-se numa espécie de movimento errático, posteriormente chamado de ‘movimento browniano’ (Figura 2.4).

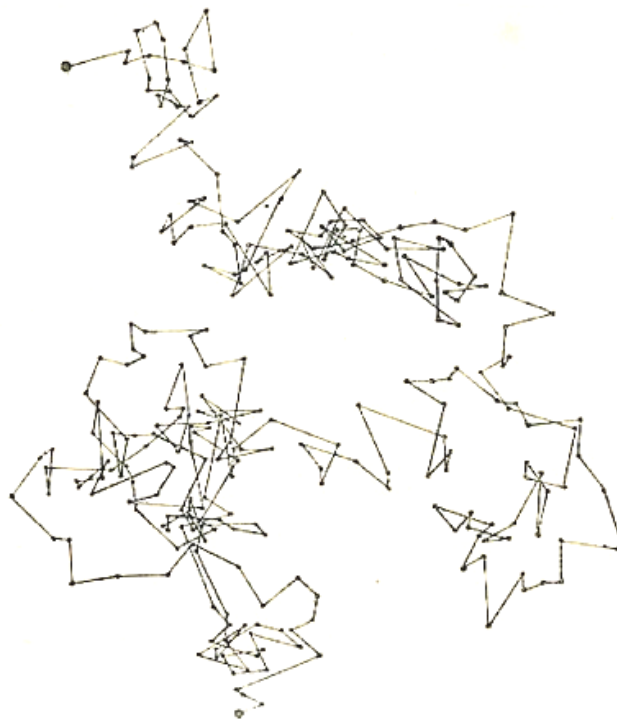


Figura 2.4 – Partícula em movimento browniano (publicação original de J. Perrin)
(Adaptado de Silva e Lima, 2007)

Somente a partir de 1860 o ‘zig-zague’ vinculado à trajetória das pequenas partículas foi observado sob o ponto de vista moderno, supondo-se que o movimento poderia estar associado a colisões com as moléculas do fluido. Verificou-se que suas trajetórias não se apresentavam tangentes (ou seja, não poderiam ser avaliadas como curvas diferenciais) e que o movimento definido como randômico aparentemente nunca cessava (Silva e Lima, 2007).

Silva e Lima (2007) destacam que o maior avanço científico, nos campos da física e da química, acerca do movimento browniano, foi introduzido por Einstein em 1905, que tornou a teoria atômico-molecular uma parte fundamental da estrutura da matéria. A partir de então, futuras investigações foram generalizadas visando uma melhor compreensão do movimento browniano.

Kynch (1952) formulou uma abordagem do processo de sedimentação de partículas dispersas em um fluido, estabelecendo que, durante o processo, há interferência entre elas. Na publicação, o autor propôs uma teoria baseada na hipótese de que a velocidade de queda das partículas, durante a sedimentação, não é função exclusiva das propriedades dos sólidos e do fluido, como já destacado na Lei de Stokes. Destacando que a teoria de Stokes não era satisfatória para a solução da sedimentação de pequenas partículas, Kynch (1952) enfatizou que o processo é também dependente da concentração das partículas, ou seja, para maiores concentrações de partículas sólidas são associadas menores velocidades de sedimentação. Neste caso, a continuidade das partículas caracteriza-se como elemento presente na proposição. A dedução da teoria pode ser vista com mais detalhes no trabalho do autor (Kynch, 1952).

Kynch (1952) ainda desenvolveu uma simplificação para descrever o processo da sedimentação, visando a sua aplicabilidade na prática de sedimentadores. O método baseia-se em ensaios de sedimentação, produzindo efeitos razoavelmente aceitáveis. Para tanto, o método admite as seguintes condições:

- a sedimentação é unidimensional;
- a concentração de sólidos aumenta com o tempo, no sentido do fundo do recipiente considerado;

- a velocidade de sedimentação tende ao valor zero quando a concentração tende ao seu valor máximo;
- a velocidade de sedimentação é somente dependente da concentração local de sólidos;
- os efeitos associados à parede são desconsiderados.

Na prática, o método tem sido utilizado para analisar o comportamento de materiais finos, com base em análises experimentais com o uso de provetas, cuja configuração é apresentada na Figura 2.5. As análises são então realizadas a partir da aplicação das Equações 2.2 e 2.3.

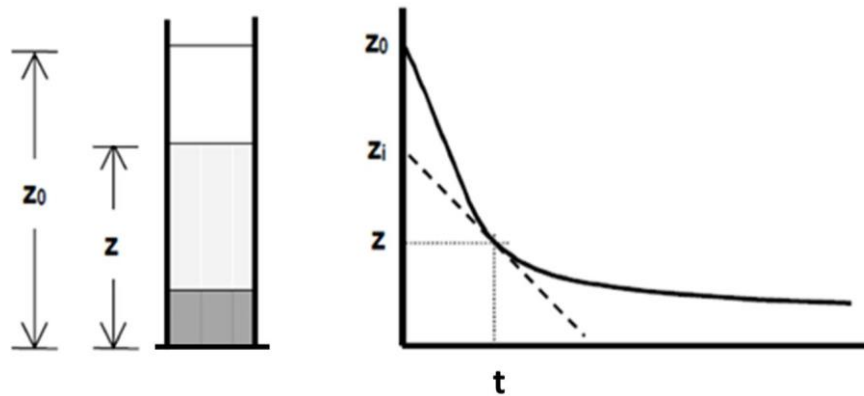


Figura 2.5 – Esquema representativo do ensaio de coluna de sedimentação analisado pela teoria da sedimentação de Kynch (1952)

$$v_s = \frac{z_i - z}{t} \quad (2.2)$$

$$c = \frac{c_0 z_0}{z_i} \quad (2.3)$$

Sendo:

v_s : velocidade de sedimentação da partícula sólida;

c_0 : concentração inicial da suspensão;

z_0 : altura da inicial da suspensão;

t : tempo relacionado à cota z (interface instantânea água clarificada / suspensão);

z_i : altura relacionada ao prolongamento da tangente ao ponto referente à cota z .

2.3.2 Adensamento dos rejeitos finos

Conforme já destacado, os rejeitos finos de mineração, considerando todas as suas características já elencadas, não podem ser avaliados com base na teoria clássica de Terzaghi, com a consideração das deformações infinitesimais. Neste sentido, Mikasa (1963) e Gibson *et al.* (1967) desenvolveram uma teoria específica, denominada de teoria do adensamento com deformações finitas, que até hoje é aplicada ao estudo do adensamento dos rejeitos finos.

As análises aplicadas ao problema, por envolver o movimento de partículas ao longo de um domínio (geometria variável), necessitam da consideração de referências e coordenadas para a completa descrição dos processos, sendo, portanto mais comumente adotados os seguintes sistemas: o euleriano e o lagrangeano, descritos e detalhados a seguir (Gibson *et al.*, 1967; Schiffman, 1980; Gibson *et al.*, 1981; Alves e Esperança, 1995).

- **Sistemas de coordenadas euleriano e lagrangeano**

O sistema euleriano considera que o movimento dos pontos é sempre acompanhado por coordenadas que variam com o tempo, ou seja, não é avaliado individualmente o deslocamento de partículas sólidas. Neste caso, o deslocamento considerado é relacionado a uma posição espacial fixa no domínio do meio, em função do tempo, sendo, portanto, previamente fixados um dado referencial e uma determinada região do espaço, cuja localização permanece invariável em relação ao referencial fixado. As partículas (sólidas e líquidas) deslocam-se através desta região, assumindo diferentes posições ao longo do tempo.

Já o sistema lagrangeano, por sua vez, pondera para o movimento dos diversos pontos, sempre associados às coordenadas iniciais. Considera-se, neste sistema, o deslocamento de uma dada região do espaço, delimitada por planos tomados em relação a um referencial pré-fixado, cujas posições serão variáveis, ao longo do tempo, em relação ao nível de referência inicial.

Na geotecnia aplicada à mineração, utiliza-se frequentemente o sistema de coordenadas reduzidas, caracterizado como um caso particular do sistema lagrangeano (Pane, 1985; Alves e Esperança, 1995). Neste sistema, é definida uma coordenada z , sendo caracterizada como o volume de partículas sólidas contido entre um plano de referência e o ponto da coordenada a ser avaliado. O volume de referência, embora tenda a se deformar durante o processo de adensamento, deverá conter sempre o mesmo conjunto de partículas sólidas, ocorrendo somente o fluxo da fase fluida através das suas faces.

A Figura 2.6 ilustra o que ocorre na consideração de diversos pontos em um fluido para os tempos $t = 0$ e $t \neq 0$. Observam-se os diversos pontos em movimento para o sistema lagrangeano. Para o sistema euleriano, o deslocamento considerado é relacionado a uma posição espacial fixa no domínio do meio, em função do tempo.

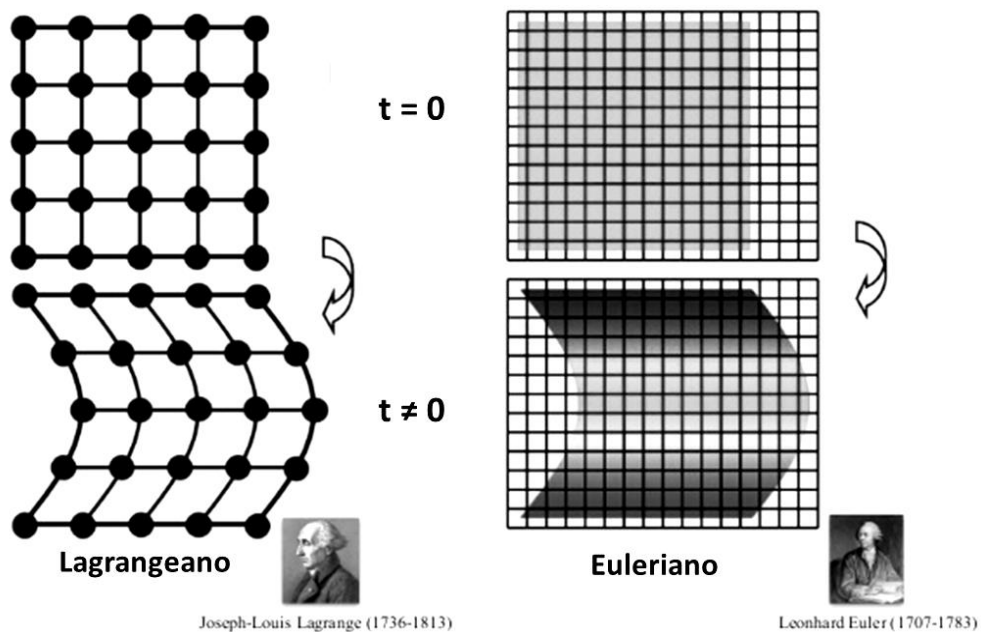


Figura 2.6 – Esquema representativo de pontos em um fluido nos sistemas lagrangeano e euleriano (Adaptado de Takagi *et al.*, 2011)

Considerando as coordenadas eulerianas, as lagrangeanas (associadas aos volumes totais) e as chamadas coordenadas reduzidas, podem ser estabelecidas correlações entre elas, expressas através das Equações 2.4 (coordenadas eulerianas e lagrangeanas), 2.5 (coordenadas eulerianas e reduzidas) e 2.6 (coordenadas reduzidas e lagrangeanas). Para tanto, considerou-se um elemento de solo, representado pela Figura 2.7.

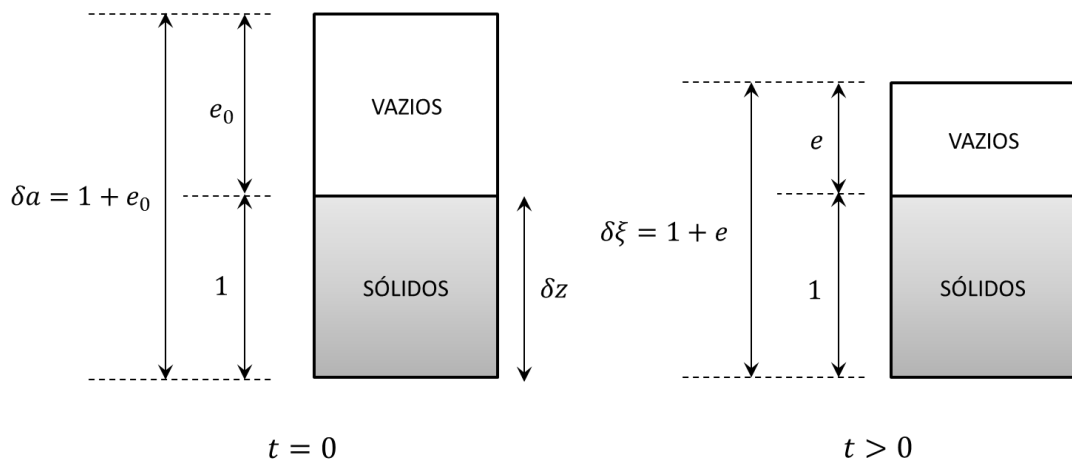


Figura 2.7 – Esquema representativo de um elemento de solo na condição inicial ($t = 0$) e deformada ($t > 0$)

$$\frac{\partial \xi}{\partial a} = \frac{\delta \xi}{\delta a} = \frac{1 + e(a, t)}{1 + e(a, 0)} \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial z} = \frac{\delta \xi}{\delta z} = 1 + e(z, t) \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial z}{\partial a} = \frac{\delta z}{\delta a} = \frac{1}{1 + e(a, 0)} \quad (2.6)$$

Sendo:

e_0 : índice de vazios para $t = 0$;

e : índice de vazios para $t > 0$.

- **Teoria do adensamento das grandes deformações**

A teoria das deformações finitas (ou de grandes deformações) inclui a espessura da camada como uma variável do problema, ou seja, a deformação da camada, para um determinado tempo t , é considerada, do ponto de vista da sua magnitude, significativa quando comparada com sua espessura inicial (Mikasa, 1963; Gibson *et al.*, 1967; Abu-Hejleh *et al.*, 1996).

A teoria de Gibson *et al.* (1967) tem sido frequentemente utilizada no estudo do adensamento dos rejeitos finos, sendo considerada como a que descreve de forma mais adequada a magnitude e a evolução dos recalques dos depósitos de materiais de granulometria fina e altamente compressíveis (Cançado, 2010). A teoria é baseada nas seguintes premissas:

- o solo é homogêneo e saturado;
- considera-se qualquer nível de deformação da camada;
- considera-se a incompressibilidade das partículas sólidas, bem como do fluido intersticial;
- o fluido é newtoniano;
- o fluxo é governado pela lei de Darcy-Gersevanov (Gersevanov, 1934), que corresponde a uma forma mais geral da lei de Darcy, onde a velocidade considerada é a velocidade relativa entre a água intersticial e as partículas sólidas. Nesta formulação, a variável fundamental é o índice de vazios;
- o adensamento secundário ou *creep* não é mobilizado;
- considera-se a validade do princípio das tensões efetivas;
- o adensamento ocorre sob condições isotérmicas, ou seja, sem a interferência da temperatura;
- as relações constitutivas são únicas, não variando com o tempo, bem como com as condições de carregamento;

- a concentração de substâncias dissolvíveis na água não interfere no processo de adensamento (pequenas concentrações), ou seja, não afeta as massas específicas do fluido e dos sólidos, a porosidade e o escoamento do fluido.

A equação do adensamento associado a deformações finitas (Equação 2.7) é determinada a partir das equações de equilíbrio do sistema, de equilíbrio do fluido intersticial e de continuidade das partículas. Adicionalmente, são considerados o princípio das tensões efetivas e as leis constitutivas do material, relativas às suas características de compressibilidade e permeabilidade (Gibson *et al.*, 1967).

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{k}{(1+e)\gamma_w} \cdot \frac{d\sigma'}{dz} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{k}{\gamma_w} \cdot \frac{(\gamma_s - \gamma_w)}{(1+e)} \right] + \frac{\partial e}{\partial t} = 0 \quad (2.7)$$

Sendo:

σ' e e : tensão efetiva e índice de vazios, respectivamente;

k : coeficiente de permeabilidade;

t : tempo;

z : coordenada reduzida;

γ_s e γ_w : peso específico dos sólidos e peso específico da água, respectivamente.

2.3.3 Ensaio de laboratório aplicados aos rejeitos finos

A literatura técnica destaca alguns ensaios de laboratório aplicados à determinação das propriedades dos rejeitos. São relacionadas, por exemplo, técnicas associadas à sedimentação, com destaque para os ensaios de coluna de pequenas e grandes dimensões (Been e Sills, 1981; Alves, 1992; Silva, 2008), e procedimentos voltados para o estudo do adensamento e permeabilidade. Neste caso, destacam-se os consolidômetros tipo CRD – Adensamento com taxa de deformação constante (Roma, 1996; Wissa *et al.*, 1971; Umehara e Zen, 1980; Lee, 1981; Znidarcic *et al.*, 1986; Guimarães Filho, 1990; Lima, 1996; Santos, 2001) e os ensaios tipo HCT (Znidarcic *et al.*, 1982, Znidarcic e Liu, 1989; Znidarcic *et al.*, 1992; Botelho, 2001; Araújo, 2005; Cançado, 2010).

- **Ensaio de coluna de sedimentação**

Os ensaios de colunas de sedimentação são geralmente realizados em equipamentos de grandes dimensões ou mesmo provetas convencionais, corriqueiramente usadas nos ensaios de Mecânica dos Solos. Além das características associadas ao processo de deposição dos rejeitos finos, os ensaios podem também ser aplicados na determinação indireta da permeabilidade destes materiais (Silva, 2008).

Utilizando técnicas não destrutivas, Been e Sills (1981) desenvolveram uma coluna de acrílico de 2 metros de altura, visando estudar a sedimentação e o adensamento por peso próprio de solos moles. Os autores utilizaram instrumentação específica, de forma a controlar as propriedades e delinear o comportamento destes solos durante todo o processo, com dispositivo de raios-X e transdutores de pressão, permitindo a mensuração dos índices de vazios e das poropressões, respectivamente, para diversos pontos da amostra. Considerando a saturação da amostra, a partir das determinações dos índices de vazios e poropressões, tornou-se possível a determinação das tensões efetivas, destacando a parcela da coluna submetida aos efeitos do adensamento.

Alves (1992) realizou ensaios de sedimentação em coluna aplicados ao estudo dos processos de sedimentação e adensamento de rejeitos de bauxita (lama vermelha) oriundos do beneficiamento da alumina, em Ouro Preto.

Silva (2008) construiu uma coluna de grandes dimensões, com 20 cm de diâmetro e 1 m de altura, visando a determinação do processo de sedimentação, com a medida da interface líquido sobrenadante e a água e a distribuição do índice de vazios com a profundidade. Para tanto, o equipamento foi construído com 3 aberturas laterais, permitindo a coleta das amostras em diversos tempos por meio da adaptação de uma seringa de pequenas dimensões. Apesar de inicialmente justificado pelo autor, comprovou-se, posteriormente, que este procedimento não foi efetivo. Além de se configurar como um mecanismo perturbador da amostra durante a sedimentação, o volume amostrado para determinação da umidade não foi suficiente para garantia da sua representatividade.

Silva (2008) também utilizou a proveta convencional de laboratório para realização de ensaios de coluna, obtendo, neste caso, melhores resultados associados ao controle

temporário da descida da interface líquido sobrenadante / rejeito. Os resultados permitiram uma interpretação à luz da teoria de Kynch (1952), bem como, uma comparação com as permeabilidades obtidas no ensaio HCT.

- **Ensaio de adensamento com taxa de deformação constante (CRD)**

Hamilton e Crawford (1959) introduziram o ensaio de adensamento com taxa de deformação constante (CRD) para solos moles. Posteriormente, Smith e Wahls (1969), Wissa *et al.* (1971), Umehara e Zen (1980), Lee (1981) e Znidarcic *et al.* (1986) modificaram o aparato, visando a aplicação dos procedimentos na avaliação do comportamento dos rejeitos de mineração. O ensaio consiste em introduzir na amostra uma compressão à taxa de deformação constante. Assim, fixando-se a velocidade de deformação, a amostra é submetida a um carregamento crescente ao longo do tempo. Para aplicação da carga, utiliza-se uma prensa de compressão, comumente utilizada nos ensaios de compressão simples e triaxial, cuja carga é transferida ao corpo de prova por meio de um pistão. Sobre a prensa, apoia-se a câmara de ensaio, que é preenchida com o material a ser estudado, sendo posteriormente fechada, com a consequente inserção do referido pistão. Em síntese, o equipamento é constituído pelas seguintes partes: edômetro, pistão, prensa de carregamento, transdutor para medir a tensão total e a poropressão e extensômetro, conforme mostrado na Figura 2.8.

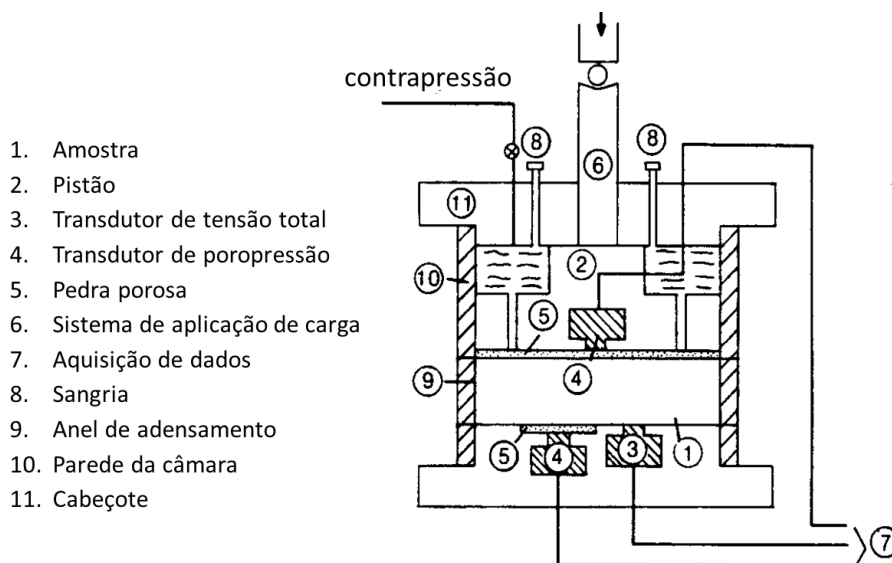


Figura 2.8 – Esquema de ensaio CRD (Adaptado de Botelho, 2001)

Durante o ensaio, são medidas as tensões totais e as poropressões, através de dois sensores instalados na base, e os respectivos deslocamentos, permitindo a determinação da variação das tensões efetivas e dos índices de vazios. Além disso, podem ser determinadas, de forma indireta, as permeabilidades correspondentes, sendo possível a construção das relações de permeabilidade ($e \times k$) e de compressibilidade ($e \times \sigma'$).

O ensaio é bem criterioso, pois uma das maiores dificuldades de execução encontra-se na determinação da melhor velocidade de compressão, de forma a se obter resultados mais consistentes. A velocidade deve ser baixa o bastante para garantia de uma melhor aquisição das variações dos índices de vazios, mas suficientemente elevada para permitir uma relação satisfatória entre as poropressões geradas durante o carregamento e a tensão total (Znidarcic *et al.*, 1986). Este fator apresenta influência significativa na determinação dos parâmetros de compressibilidade e está diretamente relacionado ao tipo de material estudado. Neste sentido, a maioria dos métodos utilizados para previsão da velocidade de compressão ainda consideram a razão entre a poropressão na base e a tensão total aplicada (u_b/σ).

Diversos autores propuseram formas de análises dos dados obtidos no ensaio (Smith e Wahls, 1969; Wissa *et al.*, 1971; Umehara e Zen, 1980; Lee, 1981). Além destes métodos de análise, destaca-se o proposto por Znidarcic *et al.* (1986), caracterizado pela incorporação da teoria das grandes deformações.

No Brasil, Lima (1996) desenvolveu um equipamento de PVC, semelhante ao introduzido por Znidarcic *et al.* (1986), mas com instrumentação ainda tímida, pela não automatização do registro e aquisição dos dados. Além disso, o equipamento não possuía um sensor específico para obtenção das tensões totais na base na célula durante o ensaio, sendo determinadas por meio um anel dinamométrico. Ressalta-se que o uso deste tipo de anel, de maneira isolada, não é recomendado, em especial para as tensões mais baixas, pois, além da baixa precisão na leitura, o dispositivo pode fornecer resultados de tensão total que não necessariamente representa o estado ao qual a amostra está submetida. Parte da tensão registrada pode estar associada ao atrito entre o êmbolo do pistão e a parede da câmara de adensamento. Neste sentido, Santos (2001) introduziu, na base do equipamento desenvolvido por Lima (1996), um transdutor de tensão total, além de acoplar ao sistema o registro e a aquisição automática de dados.

- **Ensaio de adensamento induzido por percolação (HCT)**

O ensaio HCT (*Hydraulic Consolidation Test*), ou de adensamento hidráulico, é baseado no princípio do adensamento induzido por forças de percolação, sendo inicialmente proposto por Imai (1979). O experimento consiste em submeter o corpo de prova ao fluxo induzido, ficando este sujeito a forças de percolação, provocando, portanto, o adensamento. Além do fluxo induzido, aplica-se também um estágio de carregamento na amostra, provocando um adensamento por carregamento, permitindo também a realização da etapa de permeabilidade com o uso da bomba de fluxo. As poropressões geradas na amostra são medidas com um transdutor diferencial de pressão acoplado a um sistema de registro e aquisição de dados.

Trabalhos realizados por Znidarcic e Liu (1989), Znidarcic *et al.* (1992), Abu-Hejleh *et al.* (1992), Abu-Hejleh *et al.* (1996), Botelho (2001), Araújo (2005) e Cançado (2010) descrevem bem os procedimentos e métodos de ensaio, que também serão enfatizados no Capítulo 3 deste trabalho. Um esquema do equipamento é apresentado na Figura 2.9 e uma foto do equipamento pertencente ao NUGEO pode ser vista na Figura 2.10.

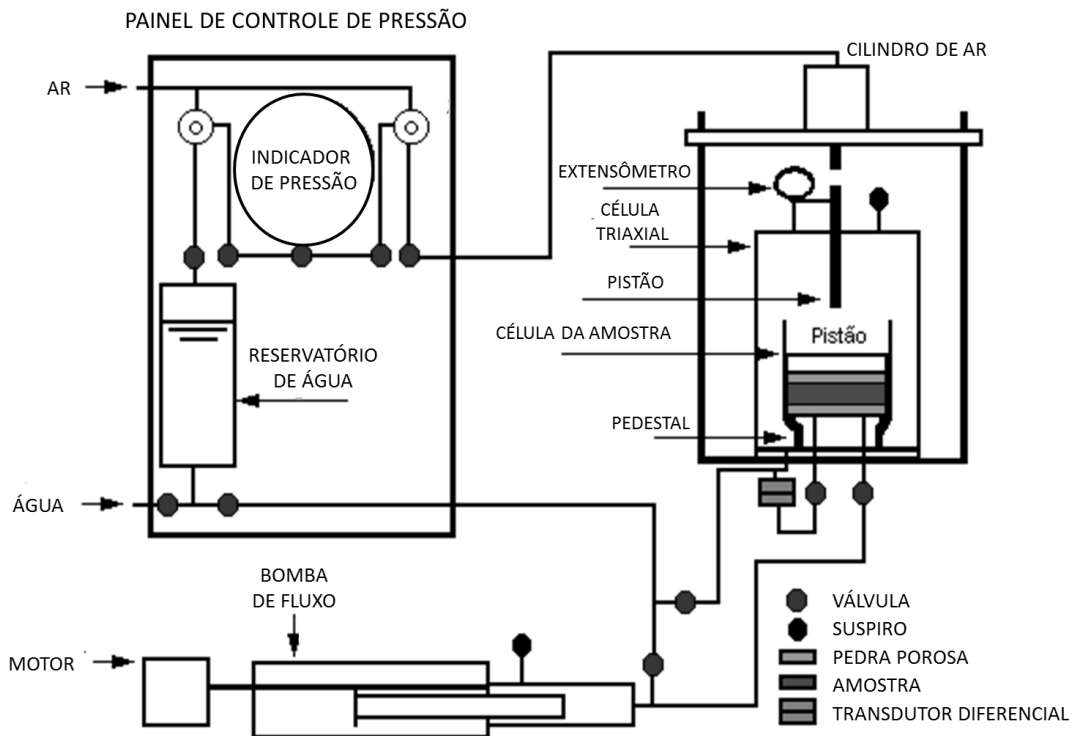


Figura 2.9 – Esquema de ensaio HCT (Adaptado de Botelho, 2001)



Figura 2.10 – Vista do ensaio equipamento para realização de ensaio HCT com bomba de fluxo do CTGA/NUGEO

Após a realização do ensaio, a teoria do adensamento a grandes deformações de Gibson *et al.* (1967) é comumente empregada nas análises dos resultados, com a respectiva obtenção das relações constitutivas do material. Para tanto, são mais utilizadas duas funções potenciais: Liu e Znidarcic (1991), para índices de vazios *versus* tensão efetiva (Equação 2.8) e Somogyi (1979), para índices de vazios *versus* permeabilidade (Equação 2.9). Nestas relações, A , B , C , D e Z são parâmetros constitutivos associados ao material. Destaca-se que há outras funções de ajuste do comportamento de compressibilidade e permeabilidade de materiais muito moles (Townsend e McVay, 1990; Bartholomeeusen *et al.*, 2002; Jeeravipoolvarn *et al.*, 2008).

$$e = A \cdot (\sigma' + Z)^B \quad (2.8)$$

$$k = C e^D \quad (2.9)$$

Sendo:

e e k : índice de vazios e coeficiente de permeabilidade, respectivamente;

σ' : tensão efetiva.

As Figuras 2.11 e 2.12 mostram curvas de compressibilidade e de permeabilidade típicas, obtidas a partir do emprego das equações 2.8 e 2.9, extraídas como exemplos do trabalho de Botelho (2001), para o rejeito fino (lama) da Samarco Mineração.

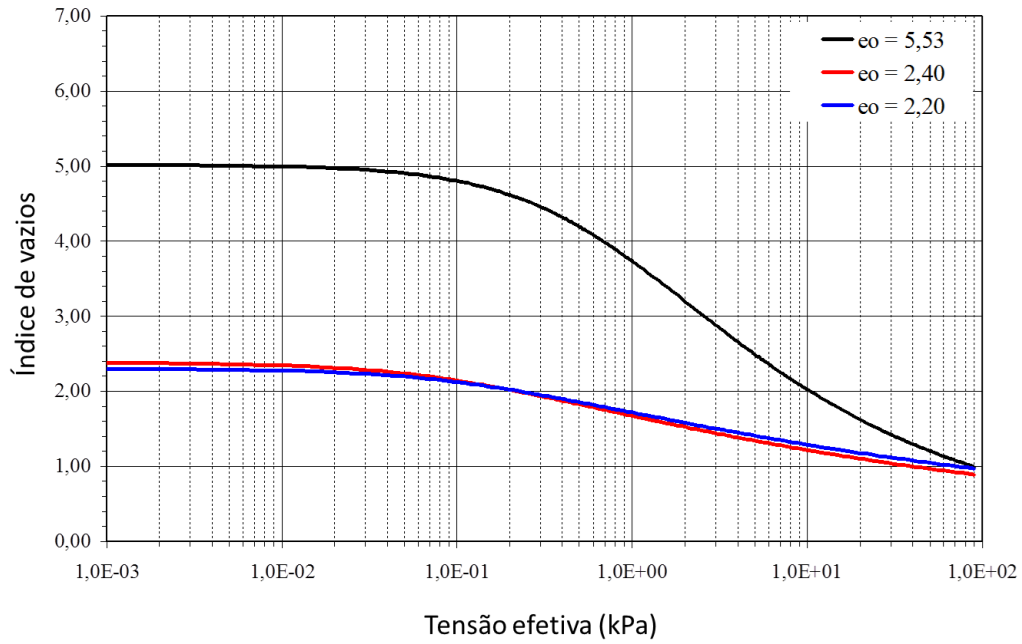


Figura 2.11 – Curva de compressibilidade – Samarco (Botelho, 2001)

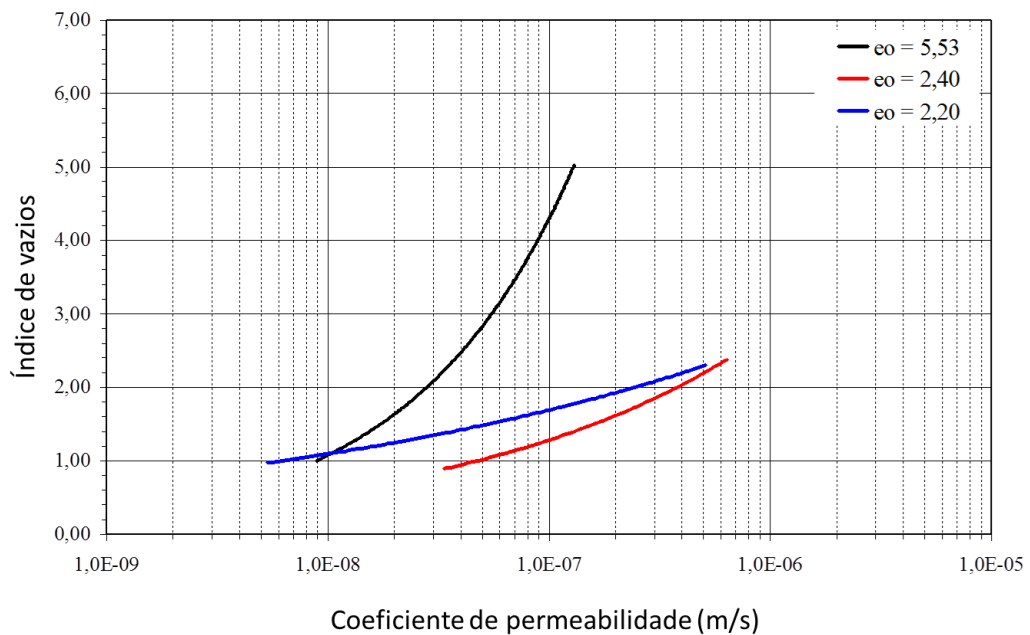


Figura 2.12 – Curva de permeabilidade – Samarco (Botelho, 2001)

Após o pioneirismo na implantação do ensaio HCT com bomba de fluxo na UFOP (Botelho, 2001), outras pesquisas foram continuadas no âmbito do CTGA/NUGEO, todas associadas à avaliação do comportamento de rejeitos finos de mineração (Araújo, 2005; Pereira, 2006; Cançado, 2010).

Buscando a otimização dos procedimentos experimentais na utilização do equipamento HCT da UFOP, Cançado (2010) realizou uma reestruturação na sua configuração original, com a reformulação de todo o seu aparato, em função das restrições e limitações observadas ao longo das pesquisas realizadas na instituição. Foram, portanto, introduzidas as seguintes intervenções:

- implementação de um sistema de instrumentação digital para aquisição de dados;
- montagem de um novo painel de controle, posicionando todos os dispositivos agregados ao painel, de forma a se obter uma definição objetiva dos circuitos de fluxo;
- implementação do controle da reversão de fluxo nas seringas através de válvulas solenoides, diminuindo as oscilações do registro de pressões durante as reversões de fluxo e visando a obtenção de registros contínuos, com uma definição mais acurada da estabilização das poropressões geradas durante o processo de fluxo;
- implementação de um novo sistema de carregamento;
- implementação de um novo sistema de aquisição de dados.

2.3.4 Ensaio de campo aplicados aos rejeitos finos

A obtenção da compressibilidade ‘*in situ*’, quando representativa, é relativamente atrativa, pois os resultados representam as condições reais de estocagem, onde são obtidos os perfis diretos das variações das tensões efetivas, índices de vazios e permeabilidades do rejeito com a profundidade.

No Brasil, Villar (1990) desenvolveu a primeira sonda piezométrica dedicada ao estudo da compressibilidade ‘*in-situ*’ de rejeitos finos de mineração, e capaz de medir poropressões, com transdutor de pressão associado a um sistema de aquisição de dados

com resolução de 0,05 kPa. O autor implementou uma metodologia de acompanhamento do comportamento de resíduos industriais depositados sob a forma de lama. O material analisado foi a lama vermelha, rejeito de processamento da bauxita para a extração da alumina. O equipamento incorporou também um aparato aplicado à extração de amostras em várias profundidades, possibilitando a determinação dos teores de umidade e o cálculo dos índices de vazios e massas específicas dos grãos. A técnica proposta pelo autor serviu como referência para o desenvolvimento de outros trabalhos, inclusive este. Além de Villar (1990), dentre os diversos estudos associados à investigação de campo com a sonda piezométrica e ao desenvolvimento de tecnologia aplicada aos procedimentos de sondagem, são destacados trabalhos como de Campos *et al.* (1991), de Campos *et al.* (1998), Gomes (1998), Santos (2001), Villar (2002) e Pereira e Gomes (2012).

As sondas piezométricas são geralmente tubulares, com barras roscáveis entre si, em cuja base (sonda-torpedo) é instalado um mini transdutor de pressão, responsável por registrar as poropressões ao longo da cravação do equipamento sobre o reservatório de rejeitos, que geralmente ocorre com o apoio de uma balsa. As pontas são cônicas para propiciar a cravação, podendo ser de 18° (Villar, 1990), mostrada na Figura 2.13, ou de 60° (padrão internacional utilizado no CPTU), conforme destacado por Villar (2002).

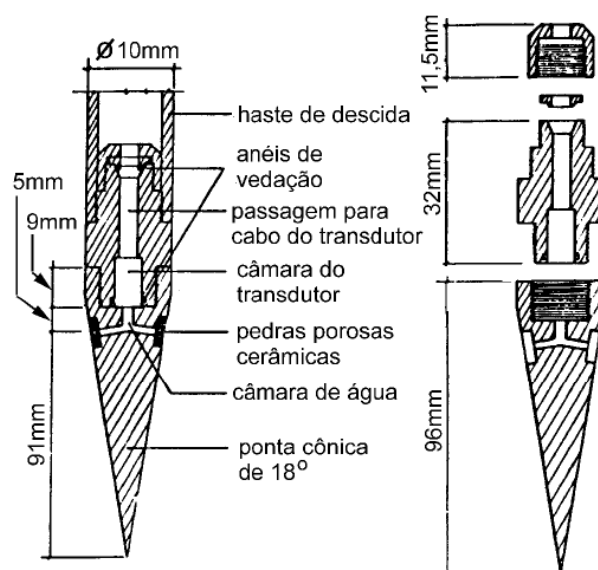


Figura 2.13 – Desenho esquemático da sonda piezométrica com ponta de 18° desenvolvida por Villar (1990) citado por Villar (2002)

Gomes (1998), buscando avaliar as características de compressibilidade e adensamento de rejeitos finos de bauxita no município de Ouro Preto, a partir de uma campanha de investigação com ensaios de campo, realizou análises específicas relacionadas à formulação de um modelo global de deposição dos materiais estudados. De acordo com o autor, os estudos particularizados permitiram uma avaliação mais consistente do modelo de deposição dos rejeitos, com uma abordagem mais racional da vida útil do reservatório. Além disso, os estudos forneceram elementos adicionais que evidenciaram a necessidade de superação de problemas associados às metodologias convencionais comumente adotadas em ensaios oedométricos de laboratório (consolidômetros tipo CRD), por exemplo, especialmente as adversidades vinculadas ao tempo de execução do ensaio.

Santos (2001) estudou o comportamento em termos de compressibilidade e permeabilidade de um rejeito de bauxita da barragem de Marzagão, visando a obtenção de relações constitutivas com ensaios de campo, comparando-os aos resultados de laboratório. Para tanto, foi construída uma sonda em aço inoxidável, com ponta cônica de 60°. Os resultados obtidos, em termos de compressibilidade, foram considerados consistentes e confiáveis. A autora enfatizou, no entanto, incoerências relacionadas aos resultados das relações de permeabilidade, quando avaliados à luz da teoria das grandes deformações.

Villar (2002), em estudos de diversas amostras de lamas vermelhas de bauxita, para diferentes estações de investigação, estabeleceu relações de compressibilidade e permeabilidade para os diferentes materiais. A metodologia empregada pelo autor na determinação da compressibilidade, com as técnicas relacionadas aos ensaios de campo, foi descrita como simples e eficiente. Assim como enfatizado por Gomes (1998), Villar (2002) destaca a importância do procedimento na obtenção de parâmetros mais adequados para o acompanhamento do comportamento final do depósito, sugerindo, inclusive, a possibilidade de uma avaliação rotineira nos locais de disposição deste tipo de rejeito. Ressalta-se adicionalmente, a proximidade das leis de compressibilidade obtidas em campo com os resultados de laboratório apresentados, particularmente com aqueles relacionados ao adensamento com taxa de carregamento controlada (CRD), para os materiais estudados.

Já no contexto da obtenção das características de permeabilidade, Villar (2002) destaca a razoabilidade das estimativas iniciais de campo, mas considera a escassez de pontos como um provável impedimento para a realização de interpretações mais consistentes, considerando os modelos teóricos mais comumente ajustáveis.

- **Estimativa da permeabilidade a partir dos resultados de campo**

Apesar de envolver várias hipóteses questionáveis (Santos, 2001; Villar, 2002), visto a incoerência com a teoria das grandes deformações, a estimativa do coeficiente de permeabilidade tem sido feita a partir da consideração do coeficiente de adensamento, o mesmo obtido nos ensaios oedométricos (Equação 2.10). Considerando as condições de isotropia em termos de compressibilidade ($m_v = m_h$) do material, e o coeficiente de adensamento horizontal (c_h), a equação pode ser reescrita para a permeabilidade na direção horizontal (Equação 2.11).

$$k_v = c_v \cdot m_v \cdot \gamma_w \quad (2.10)$$

$$k_h = c_h \cdot m_v \cdot \gamma_w \quad (2.11)$$

Sendo:

k_v e k_h : coeficientes de permeabilidade vertical e horizontal, respectivamente;

c_v e c_h : coeficientes de adensamento vertical e horizontal, respectivamente;

m_v : coeficiente compressibilidade volumétrica;

γ_w : peso específico da água.

O coeficiente de compressibilidade volumétrica (m_v) pode ser calculado a partir da consideração das Equações 2.12 e 2.13.

$$m_v = \frac{a_v}{1 + e} \quad (2.12)$$

$$a_v = \frac{de}{d\sigma'} \quad (2.13)$$

Sendo:

a_v : coeficiente compressibilidade;

e : índice de vazios;

σ' : tensão efetiva.

Com base nas equações apresentadas, torna-se necessário então estimar o coeficiente de adensamento horizontal com base nos ensaios de campo. Os procedimentos que envolvem a sua determinação utilizam análises das curvas de dissipação de poropressão obtidas durante a cravação da sonda piezométrica, nos diversos horizontes adotados na investigação. Os métodos mais comumente utilizados para interpretação são baseados em correlações empíricas ou aproximações originalmente previstas para ensaios CPTU, o que, muitas vezes, podem ser questionados, pois necessitam de uma razoável conformação das curvas de dissipação das poropressões, não muito comum para os níveis mais superficiais da sondagem piezométrica.

Citados originalmente por Robertson e Campanella (1984) e, posteriormente, por Santos (2001), são destacados como métodos de estimativa de permeabilidade as soluções teóricas de Torstenson (1977), Sodeberg (1962) e Baligh e Levodoux (1980). Este último também é descrito por Villar (1990) e aplicado por Santos (2001) e por Villar (2002) nos estudos de diversas amostras de lamelas vermelhas de bauxita, para diferentes estações de investigação.

Baligh e Levodoux (1980) propuseram uma sequência empírica para a estimativa do coeficiente de adensamento horizontal, sendo necessário, inicialmente, um ajuste que leve em consideração a normalização dos registros de dissipação das poropressões obtidos em campo (Equação 2.14). Nota-se que, para garantia da qualidade e representatividade dos resultados estimados, é fundamental a obtenção de curvas com bons ajustes dos registros de poropressão.

$$\bar{u} = \frac{u - u_0}{u_i - u_0} \quad (2.14)$$

Sendo:

u : poropressão para o tempo t considerando;

u_0 : poropressão de estabilização (equilíbrio);

u_i : poropressão inicial registrada.

Obtidos os diferentes valores de u , estes devem ser plotados em função dos respectivos tempos t , em escala logarítmica, visando a comparação com as curvas teóricas de Baligh e Levadoux (1980). Neste caso, a comparação deve considerar o tipo de ponta cônica utilizada na sondagem (Figuras 2.14 e 2.15), onde o fator tempo (T) é determinado e, posteriormente, levado à Equação 2.15 para determinação do coeficiente de adensamento horizontal (c_h)

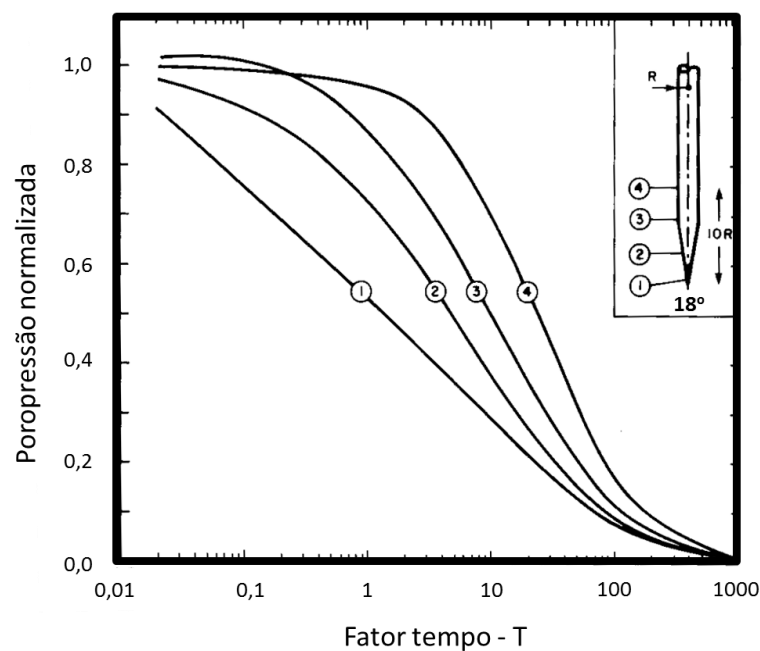


Figura 2.14 – Curva fator tempo *versus* poropressão normalizada para ponta de 18° acoplada a soluções isotrópicas (Adaptado de Baligh e Levadoux, 1980)

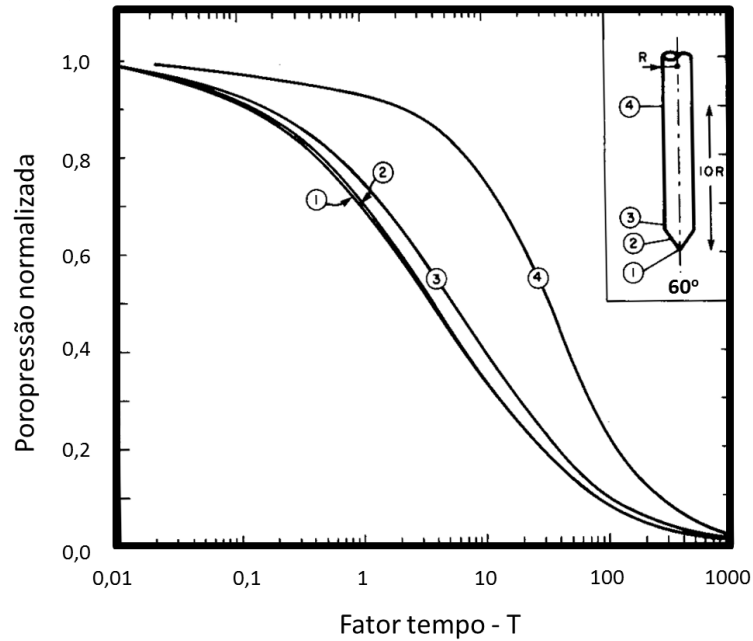


Figura 2.15 – Curva fator tempo *versus* poropressão normalizada para ponta de 60° acoplada a soluções isotrópicas (Adaptado de Baligh e Levadoux, 1980)

$$c_h = \frac{T \cdot R^2}{t} \quad (2.15)$$

Sendo:

c_h : coeficientes de adensamento horizontal;

T e t : fator tempo;

R : raio do fuste da sonda utilizada;

t : tempo associado à dissipação.

2.4 REJEITOS DE FOSFATO

2.4.1 Depósitos de rocha fosfática

Dentre as reservas de fosfato, em todo o mundo, 96% estão localizadas no hemisfério norte, em *clusters* geográficos, com 85% presentes no Marrocos, Saara Ocidental e Argélia (Figura 2.16). Esperava-se, com base na produção da China, que a capacidade

mundial de produção de fosfato aumente em um percentual de 2% ao ano até 2020. As maiores áreas de crescimento foram planejadas para a África e o Oriente Médio. No Marrocos, são relatadas as expansões das minas de rocha fosfatada e das instalações de processamento de minério, o que deverá duplicar a capacidade de produção de fosfato até 2020. Na Arábia Saudita, um novo complexo de mineração e processamento de fosfato é previsto para implantação, com investimento para produção de 5,3 milhões de toneladas por ano (USGS, 2017).

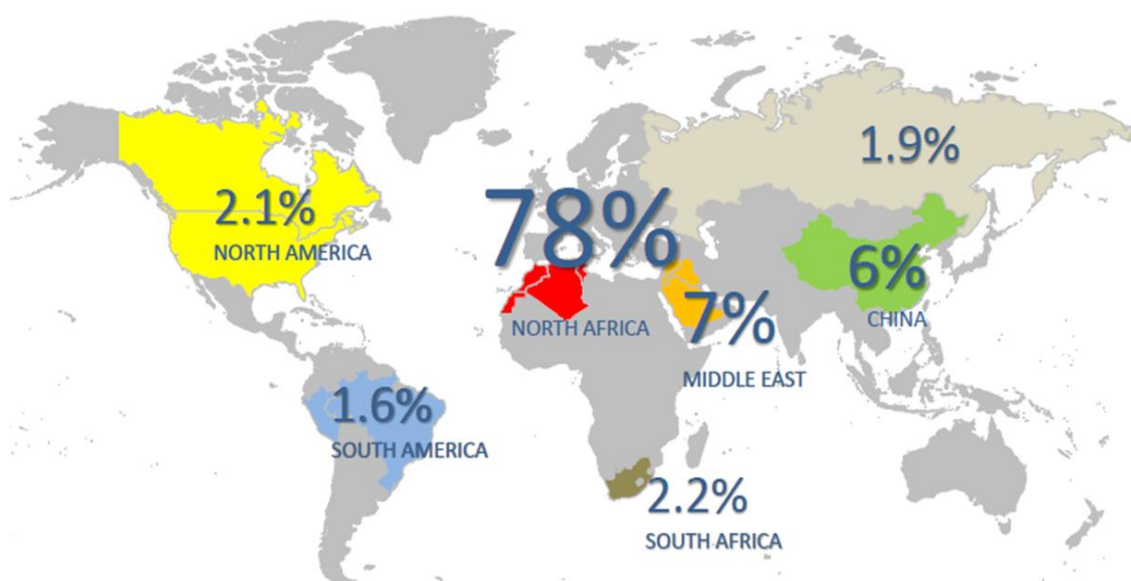


Figura 2.16 – Distribuição mundial das reservas de fosfato (Focus Ventures, 2015)

Os depósitos de fosfato podem ocorrer sob duas formas: em ambientes sedimentares marinhos ou em depósitos ígneos. Os depósitos sedimentares marinhos representam cerca de 80% das reservas mundiais e são formados pela deposição de conchas e fósseis marinhos e pela precipitação de flancolita por fosfogênese. Ocorrem em várias camadas e grandes áreas, cujo teor de P_2O_5 varia entre 10 e 30%, e os seus concentrados podem conter contaminantes (U_2O_3 e Cd). Já as rochas fosfáticas que ocorrem em depósitos ígneos, são comuns no Brasil, Rússia, Canadá e África do Sul. Estas são associadas a carbonatitos e pegmatitos, cujos teores de P_2O_5 variam em escalas menores, entre 4 e 15%, e os seus concentrados possuem poucos agentes contaminantes (Focus Ventures, 2015).

2.4.2 Rejeitos de fosfato

Os rejeitos gerados no beneficiamento da rocha fosfática apresentam as características dos rejeitos finos, cujo comportamento foi enfatizado ao longo deste capítulo, podendo ser plásticos e altamente compressíveis. Em função das suas características peculiares, os rejeitos de fosfato da Flórida (*Florida phosphatic clay*) são destacados em diversas pesquisas, do ponto de vista geotécnico, em termos de adensamento (Roma, 1976; Bromwell *et al.*, 1979; Somogyi, 1979; Novich, 1983; McVay *et al.*, 1986; Ericson *et al.*, 1993; Abu-Hejleh e Znidarcic, 1996; Morris *et al.*, 2000). Publicações mais recentes, associadas aos rejeitos de fosfato, em geral, estão particularizadas ao estudo de mecanismos de desagramento, com destaque para o uso de técnicas eletrocinéticas (Orazem *et al.*, 2014; Huang *et al.*, 2014; Kong, 2015).

O destaque das pesquisas está relacionado à importância da indústria mineradora de fosfato americana no século passado. Em 1986, por exemplo, estimava-se que cerca de 30% da produção mundial de fosfato estava concentrada no estado da Flórida (McVay *et al.*, 1986, citados por Abu-Hejleh e Znidarcic, 1996). Apesar das reservas representarem apenas 2,1% de todo o mundo, os Estados Unidos ainda ocupam o terceiro lugar quando se avalia a produção, estando atrás apenas da China e do Marrocos e Saara Ocidental (DNPM, 2015; USGS, 2017). O investimento em pesquisas contribuiu para a criação do Instituto de Pesquisas de Fosfato da Flórida, em 1978, com a finalidade de estudos vinculados ao processamento mineral, recuperação de áreas e disposição de rejeitos de fosfato, entre outros (McVay *et al.*, 1988).

Roma (1976) estudou as propriedades das argilas fosfáticas da Flórida, destacando a deposição dos rejeitos com teores de sólidos relativamente baixos (de três a cinco por cento), além alta plasticidade (os valores do índice de plasticidade geralmente variam de 120 a 190). O autor relata a baixa taxa de adensamento e a baixa permeabilidade dos rejeitos, o que contribui para que estes materiais permaneçam altamente compressíveis, exibindo pouca resistência ao cisalhamento, mesmo depois de décadas de deposição. Ericson *et al.* (1993) também destacaram as propriedades dos rejeitos de fosfato da Flórida (*Lake Pointe Village Mulberry*), cuja granulometria é constituída majoritariamente por grãos passantes na peneira #200. Segundo os autores, os depósitos de argila eram de natureza altamente plástica, com LL de 170% e LP de 35%.

Roma (1976) ressaltou a dificuldade de recuperação das áreas deposição, visto que os rejeitos ocupam grandes regiões, e os materiais depositados experimentam baixíssima consolidação. O autor cita exemplos de reservatórios, onde o rejeito foi lançado com teor de sólidos entre 3 e 5%. Posteriormente estes materiais experimentaram a sedimentação e atingiram, em um tempo relativamente curto, um teor de sólidos em torno de 15%. No entanto, o adensamento foi um processo muito lento. Para alguns casos, os reservatórios alcançaram um teor de sólidos de apenas 35%, após 40 anos de lançamento. A Figura 2.17 mostra uma curva típica do teor de sólidos *versus* tempo para um reservatório de armazenamento de rejeitos de fosfato da Flórida (Roma, 1976).

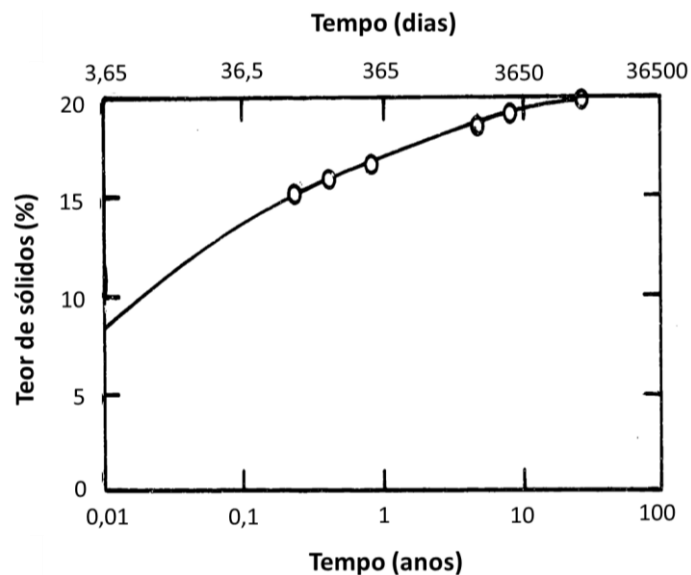


Figura 2.17 – Curva típica do teor de sólidos *versus* tempo (Adaptado de Roma, 1976)

Assim como nos solos naturais, o índice de vazios de formação (do rejeito) não é uma constante do material, mas depende do índice de vazios de lançamento. Carrier *et al.* (1983), citados por Abu-Hejleh e Znidarcic (1996), listaram valores típicos de índices de vazios para vários resíduos de granulometria fina, com um valor de 30 para as argilas de resíduos fosfatados. Segundo Abu-Hejleh e Znidarcic (1996), a magnitude da densificação que um depósito de lama atinge durante o adensamento é diretamente dependente da relação índice de vazios *versus* tensão efetiva e o tempo de densificação é diretamente dependente da relação índice de vazios *versus* permeabilidade.

Portanto, estudos envolvendo o adensamento e a permeabilidade destes tipos de rejeitos caracterizam-se como vantajosos. Abu-Hejleh e Znidarcic (1996) abordaram que o sucesso do estudo de materiais tão compressíveis depende da acurácia das análises, especialmente na determinação das relações constitutivas. Por outro lado, McVay *et al.* (1986), concluíram que os ensaios de laboratório não são adequados para a determinação das relações de permeabilidade das argilas fosfáticas, mas são aceitáveis para as relações de compressibilidade.

Os estudos com as argilas fosfáticas da Flórida, realizados por Roma (1976), com ensaios tipo CRSC (*Constant Rate of Strain Consolidation*), equipamento desenvolvido por Wissa *et al.* (1971), mostraram a consistência dos resultados para índices de vários entre 1,6 e 1,7, associados à tensões efetivas em torno de 10 kPa. Para o trecho normalmente adensado, foram encontrados c_v entre 1×10^{-4} e 3×10^{-4} cm²/s, valores razoavelmente concordantes com os resultados obtidos no consolidômetro de grande diâmetro, cujos ensaios foram realizados no mesmo trabalho.

Novich (1983), em sua tese, investigou a possibilidade de que a sedimentação e o adensamento dos rejeitos de fosfato pudessem estar diretamente relacionados à estrutura da lama, refletida pelo comportamento reológico. Visando verificar a relação entre a composição e estrutura da lama, um modelo de fluxo foi desenvolvido para fornecer uma interpretação física do comportamento reológico. Dentre outras conclusões, Novich (1983) verificou que a sedimentação e o adensamento da argila fosfática estão diretamente relacionados à estrutura da lama, que é controlada pelo teor de sólidos e o fluido dos poros.

Abu-Hejleh *et al.* (1996) realizaram ensaios HCT, visando a determinação das características de compressibilidade e permeabilidade para quatro amostras de argilas fosfatadas com elevado índice de vazios. Os autores utilizaram procedimentos já previamente estabelecidos e aprimorados na literatura técnica (Abu-Hejleh e Znidarcic, 1992; Znidarcic *et al.*, 1992). As análises de compressibilidade foram realizadas a partir das funções estabelecidas por Liu e Znidarcic (1991) e Somogyi (1979), respectivamente, cujas Equações 2.8 e 2.9 já foram apresentadas ao longo deste capítulo. As propriedades geotécnicas das quatro amostras de argilas fosfáticas são mostradas Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Propriedades das argilas fosfáticas (Abu-Hejleh *et al.*, 1996)

Amostra	G_s	LP (%)	LL (%)
A-1	2,60	74	318
A-9	2,82	49	233
C-1	2,92	33	114
S-1	2,71	50	198

Também são destacados os parâmetros constitutivos obtidos pelos autores, com a utilização do programa de simulação computacional SICTA (Abu-Hejleh e Znidarcic, 1992) (Tabela 2.2) e a representação gráfica da compressibilidade e da permeabilidade (Figuras 2.18 e 2.19). Reforça-se que as análises realizadas no SICTA utilizam, como dados de entrada, os resultados obtidos no ensaio de adensamento por fluxo induzido (HCT).

Tabela 2.2 – Parâmetros constitutivos obtidos (Abu-Hejleh *et al.*, 1996)

Amostra	A	B	Z (kPa)	C (m/s)	D
A-1	11,50	-0,230	0,029	$0,625 \times 10^{-11}$	3,14
A-9	12,74	-0,285	0,277	$0,361 \times 10^{-11}$	3,64
C-1	7,75	-0,191	0,065	$0,429 \times 10^{-11}$	4,26
S-1	13,49	-0,319	0,064	$0,384 \times 10^{-11}$	3,50

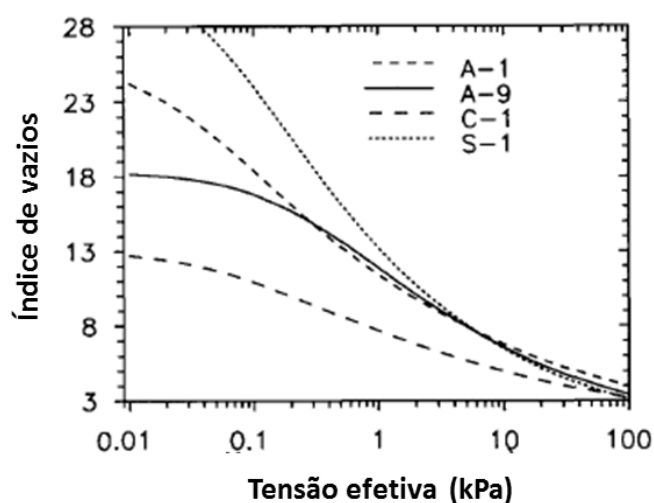


Figura 2.18 – Relações gráficas de compressibilidade obtidas para argilas fosfáticas (Abu-Hejleh *et al.*, 1996)

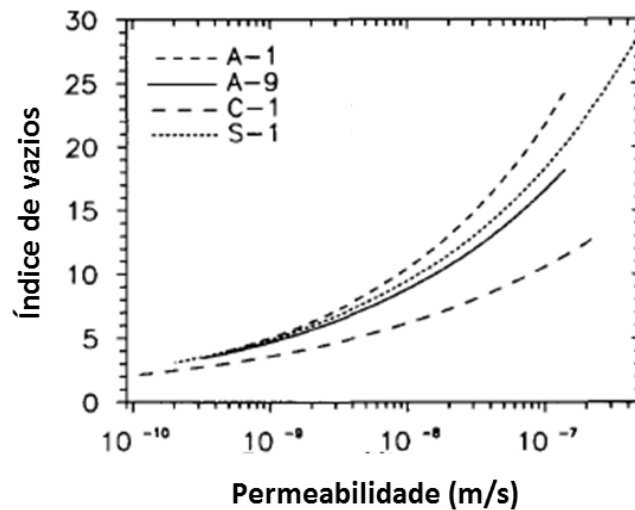


Figura 2.19 – Relações gráficas de permeabilidade obtidas para argilas fosfáticas (Abu-Hejleh *et al.*, 1996)

Abu-Hejleh *et al.* (1996) estabeleceram ainda uma comparação dos resultados obtidos nos ensaios HCT com ensaios de adensamento por fluxo restringido, onde destacam a boa concordância dos dados, com exceção para os níveis mais baixos de tensão efetiva. Os autores relatam que, para o fluxo restringido, o procedimento pode não ser confiável para baixas tensões efetivas, ressaltando a qualidade dos resultados fornecidos pelo ensaio HCT (Figura 2.20).

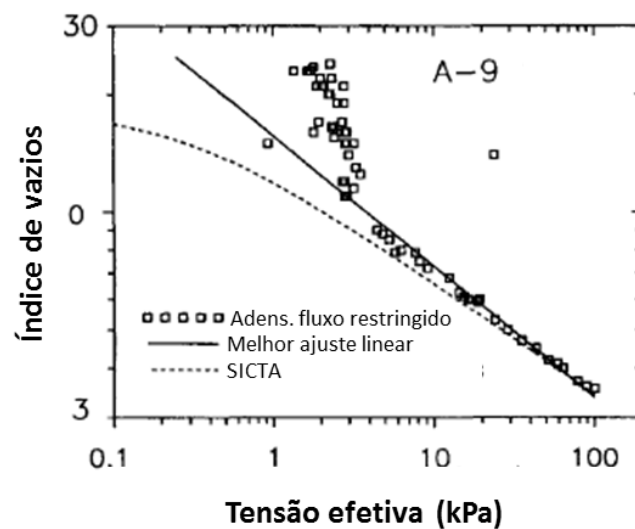


Figura 2.20 – Relações de compressibilidade para a amostra de argila fosfática A-9 (Adaptado de Abu-Hejleh *et al.*, 1996)

O trabalho ainda destaca a consistência do procedimento de análise realizado com base na teoria do adensamento para deformações finitas, que é rotineiramente utilizado para condições de campo nos reservatórios de disposição de rejeitos de fosfato. A metodologia utilizada soluciona o difícil problema geralmente enfrentado na determinação das características dos materiais, aspecto relativamente crítico em qualquer previsão de campo. Na Figura 2.21, é destacada a distribuição dos índices de vazios em função da altura para o reservatório associado à amostra A-1, onde há uma concordância entre a simulação numérica realizada a partir dos parâmetros da percolação induzida e os dados obtidos em campo.

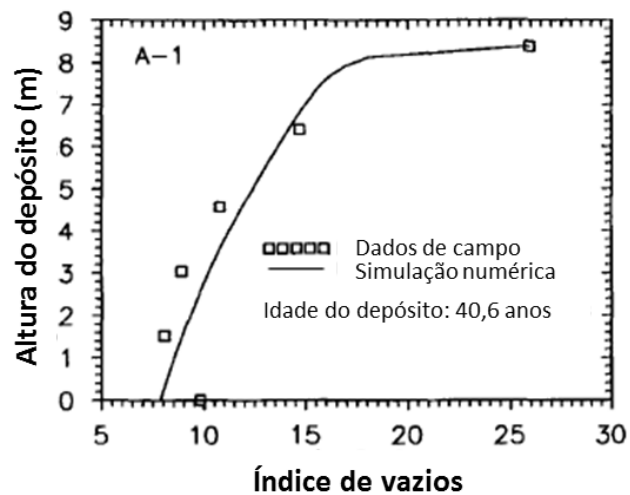


Figura 2.21 – Distribuição dos índices de vazios para das condições de campo e simulação numérica – reservatório A-1 (Adaptado de Abu-Hejleh *et al.*, 1996)

PROGRAMA EXPERIMENTAL DE LABORATÓRIO

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Um bom programa experimental de laboratório, principalmente associado ao estudo de rejeitos, deve conter a particularidade de ser, sobretudo, representativo. Apesar de avaliados como materiais com características comportamentais similares aos solos, haja vista o uso de normas específicas vinculadas ao estudo destes últimos, as distinções intrínsecas e estruturais peculiares devem ser observadas na condução dos ensaios e, especialmente, nas análises dos resultados.

Neste sentido, o escopo deste trabalho contempla uma campanha de investigação geotécnica em laboratório que buscou a acurácia e a representatividade dos ensaios. Toda a rotina do estudo, desde a caracterização dos rejeitos, até a implementação de equipamentos e metodologias dos ensaios, é destacada neste capítulo, incluindo-se a forma de apresentação dos resultados.

3.2 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO REJEITO

3.2.1 Amostragem do rejeito e determinação do teor de sólidos inicial

A amostragem do rejeito de fosfato, objeto de estudo desta tese, foi realizada diretamente no sistema de lançamento, orientado para a deposição nos tanques de armazenamento. Buscou-se preservar o teor de sólidos do material utilizado *'in situ'*, oriundo da flotação, com armazenamento em seis bombonas plásticas de 50 litros perfeitamente estanques, em razão da necessidade de transporte do Peru até o Brasil por meio de um navio, via o Porto de Santos. Destaca-se que estes materiais são geralmente gerados em teores de sólidos em torno de 15 e 16% - DSF (*dry salts free*).

Como parte do procedimento, foi realizada a determinação do teor de sólidos inicial das amostras, que nortearão as futuras moldagens nos chamados ensaios especiais. Todos os ensaios geotécnicos de caracterização física e especiais foram realizados no CTGA/NUGEO. Os teores de umidade e de sólidos dos rejeitos contidos nas bombonas, determinados em estufa, são mostrados na Tabela 3.1, onde é observada uma variação entre as amostras, com teores de sólidos entre 13,1% e 15,5%. Os teores de umidade (w) e de sólidos (ψ) foram obtidos com base nas Equações 3.1 e 3.2, respectivamente.

Tabela 3.1 – Teores de umidade (w) e de sólidos (ψ) das bombonas de rejeito

Bombona	w (%)	ψ (%)
B-01	592,2	14,45
B-02	661,1	13,14
B-03	601,3	14,26
B-04	590,3	14,49
B-05	543,8	15,53
B-06	662,1	13,12

$$w = \frac{M_w}{M_s} \quad (3.1)$$

$$\psi = \frac{M_s}{M} \quad (3.2)$$

Sendo:

M , M_w e M_s : massa total, massa de água e massa de sólidos, respectivamente.

3.2.2 Determinação da massa específica dos grãos e análise granulométrica

Pela inexistência de uma norma brasileira específica vigente, a massa específica dos grãos (ρ_s) foi determinada com base nos procedimentos da ASTM D-854 (ASTM, 2014). Observa-se a influência da sílica, que é caracterizada por possuir massa específica dos grãos em torno de 2,65 g/cm³ e são representativos na composição do rejeito (abordagem destacada na sequência do texto).

Com o conhecimento das massas específica dos grãos, obtidas e calculadas especificamente para cada uma das bombonas, tornou-se possível a determinação dos índices de vazios iniciais das amostras de cada um dos recipientes. Estes valores foram calculados e são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Massa específica dos grãos (ρ_s) e índices de vazios de lançamento (e)

Bombona	ρ_s (g/cm ³)	e
B-01	2,370	14,04
B-02	2,306	15,67
B-03	2,434	14,25
B-04	2,439	13,99
B-05	2,503	12,88
B-06	2,380	15,69

As curvas granulométricas foram obtidas inicialmente com os procedimentos na NBR-7181 (ABNT, 2017b) e as respectivas frações granulométricas foram estabelecidas a partir da NBR 6502 (ABNT, 1995). A norma brasileira preconiza o uso de uma massa passante na peneira #10 (abertura de 2,0 mm) de cerca 120 g, para material com características arenosas, ou 70 g, no caso de materiais siltsosos ou argilosos. No entanto, para materiais muito finos, às vezes, torna-se necessário a redução desta quantidade, visando a adaptação da leitura no densímetro. No caso dos rejeitos de fosfato que, de antemão conhecia-se a sua baixa velocidade de sedimentação, optou-se pela realização do ensaio utilizando uma amostra reduzida (40 g) e uma amostra com 70 g. O resultado com a amostra reduzida não foi satisfatório e, portanto, foi descartado. Observou-se que a baixa velocidade de sedimentação não estava relacionada à característica coloidal da amostra, pois se trata de um material com fração argila não muito representativa. Por outro lado, constataram-se valores de densidade relativa dos grãos baixos, comparada a outros rejeitos, o que, provavelmente, influenciou na velocidade de sedimentação.

O defloculante utilizado foi o mesmo recomendado na norma, o hexametáfosfato de sódio (NaPO₃)₆. As frações granulométricas obtidas são mostradas na Tabela 3.3. As curvas granulométricas são apresentadas na Figura 3.1. A análise granulométrica foi realizada com o material homogeneizado e proveniente da bombona 02.

Tabela 3.3 – Frações granulométricas do rejeito

Ensaio	Fração argila (%)	Fração silte (%)	Fração areia (%)		
			Fina	Média	Grossa
Com defloculante	16,5	64,9	18,6		
			18,4	0,2	-
Sem defloculante	7,2	62,2	30,6		
			30,5	0,1	-

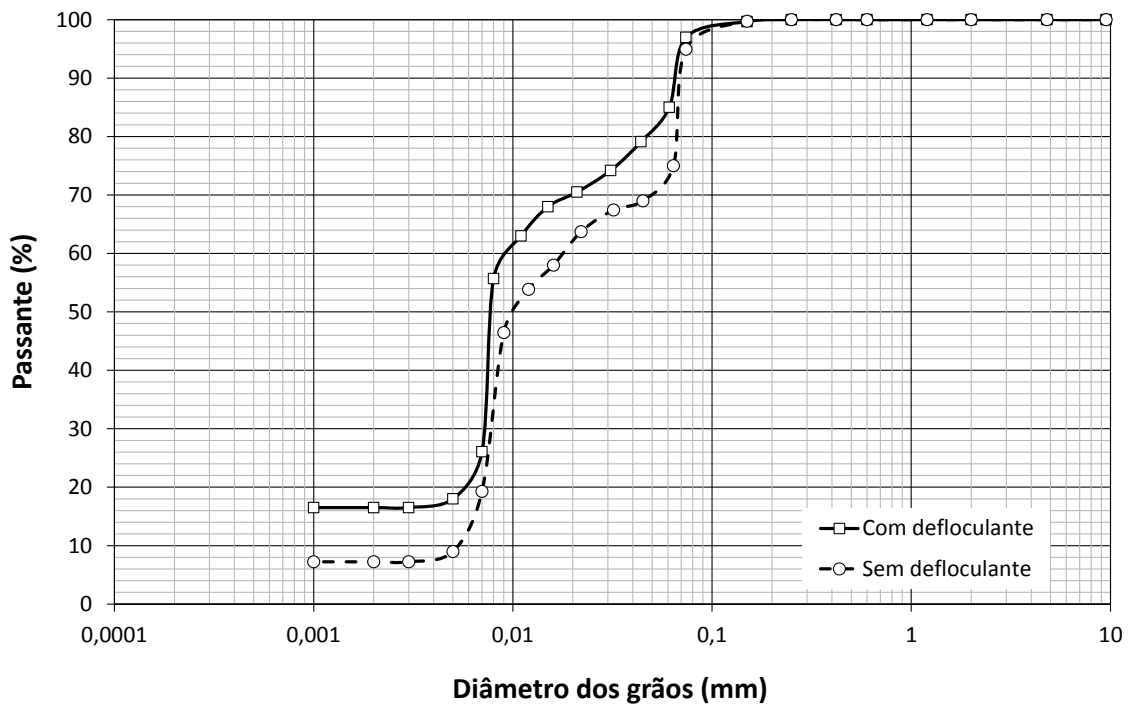


Figura 3.1 – Curvas granulométricas do rejeito obtidas nos ensaios convencionais de peneiramento e sedimentação

Posteriormente, a análise granulométrica foi realizada com o uso do granulômetro a laser. O analisador de tamanho de partícula por difração a laser (granulômetro a laser) utilizado foi o *Mastersizer 2000*, do CTGA/NUGEO, que proporciona a obtenção de distribuições rápidas e precisas do tamanho das partículas para dispersões secas e úmidas, com capacidade de medições que atingem até 0,0001 mm. O equipamento mede a intensidade da luz espalhada, ao tempo em que um feixe de laser, emitido pelo sensor, interage com as partículas dispersas da amostra. Os dados são utilizados para o cálculo da distribuição do tamanho das partículas obtidas, a partir do padrão de espalhamento gerado.

O equipamento determina a quantidade correta da concentração das partículas pela medição da quantidade de luz do laser que foi perdida ao passar pela amostra. Tal efeito é conhecido como ‘obscurecimento’, cuja saída é apresentada em porcentagem. De acordo com o manual do equipamento, a faixa de obscurecimento aceitável para o ensaio deve estar contida no intervalo de 10 a 30%. A amostra deve ser acrescentada ao sistema até que se enquadre nesse intervalo. Com os dados obtidos, um *software* específico processa os resultados e apresenta a curva de distribuição granulométrica do material. Estudos recentes com o uso do granulômetro a laser têm comprovado a sua eficiência para alguns tipos de solos e rejeitos (Oliveira *et al.*, 2016).

Os ensaios foram realizados em quatro condições: sem o uso do dispersante químico e/ou físico (somente agitação); com o uso do dispersante químico (hexametáfosfato de sódio) somente; com o uso somente do sonar (uma espécie de dispersor sônico); e com o uso do hexametáfosfato e do sonar, simultaneamente, possibilitando uma comparação entre os quatro arranjos e destes com o método convencional tratado pela norma brasileira. Um desenho esquemático do funcionamento do granulômetro a laser é mostrado na Figura 3.2 e as curvas granulométricas obtidas são apresentadas nas Figuras 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6.

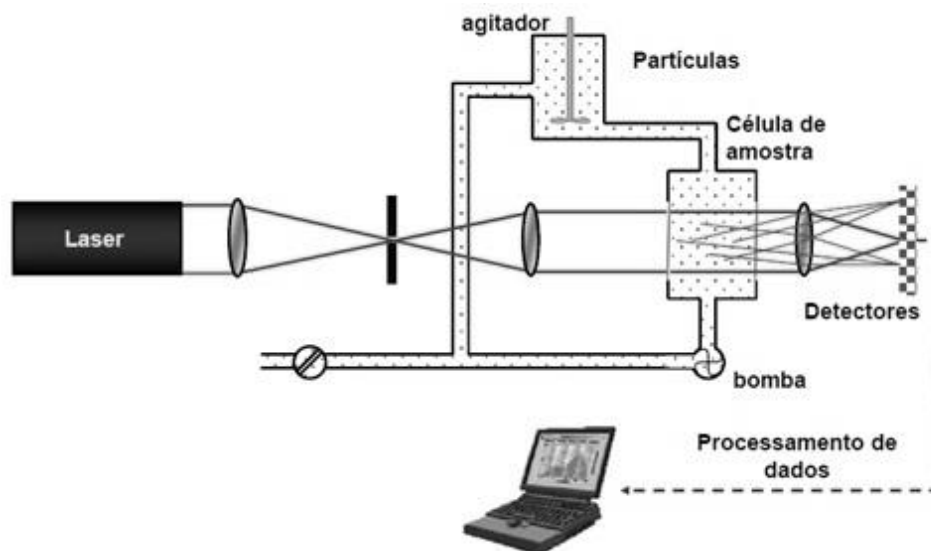


Figura 3.2 – Desenho esquemático do funcionamento do granulômetro a laser (Adaptado de Allen, 1981)

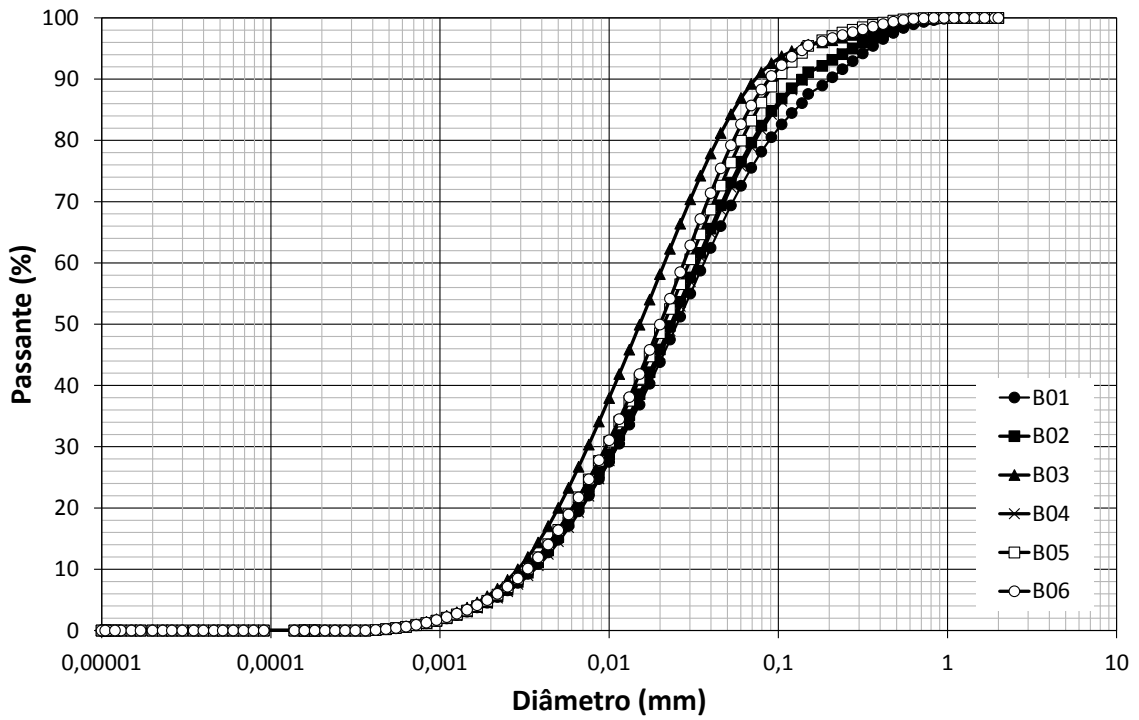


Figura 3.3 – Curvas granulométricas das amostras obtidas com o granulômetro a laser (sem hexametafosfato e sem sonar)

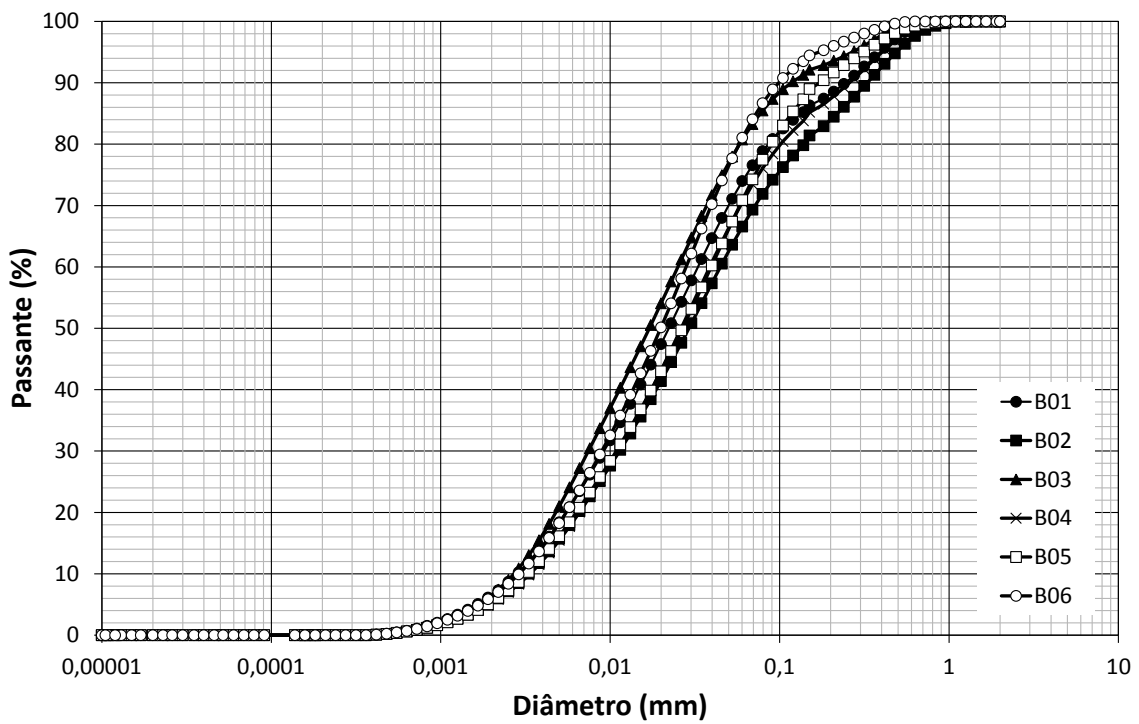


Figura 3.4 – Curvas granulométricas das amostras obtidas com o granulômetro a laser (com hexametafosfato e sem sonar)

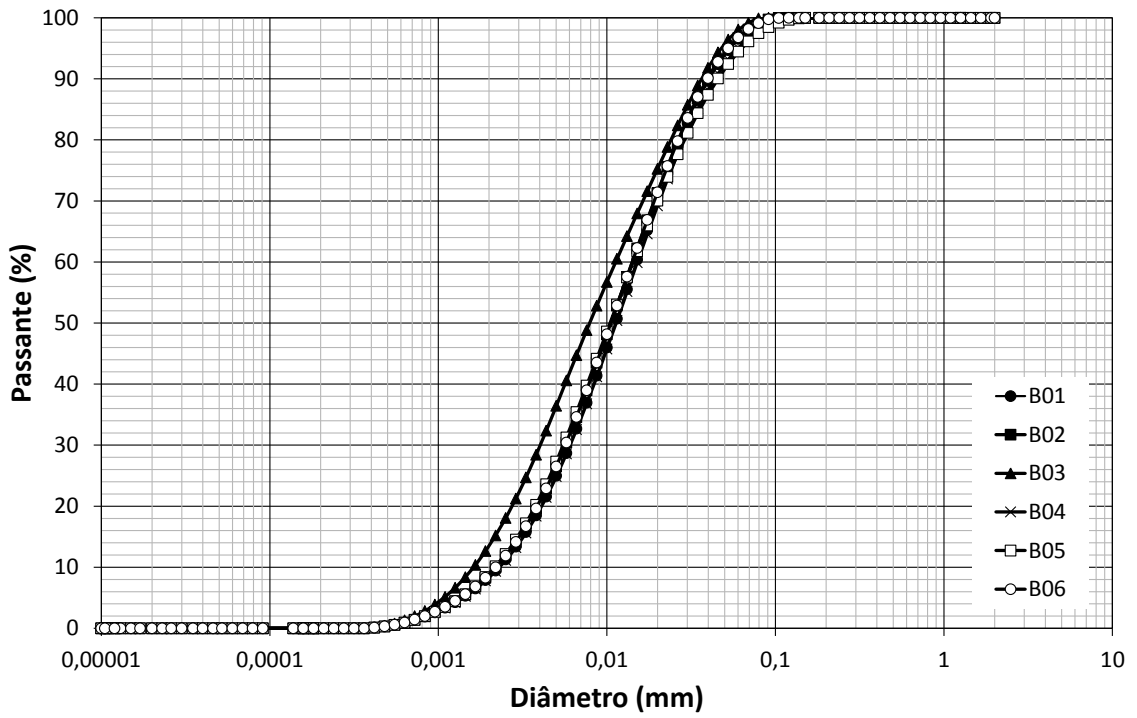


Figura 3.5 – Curvas granulométricas das amostras obtidas com o granulômetro a laser (sem hexametáfosfato e com sonar)

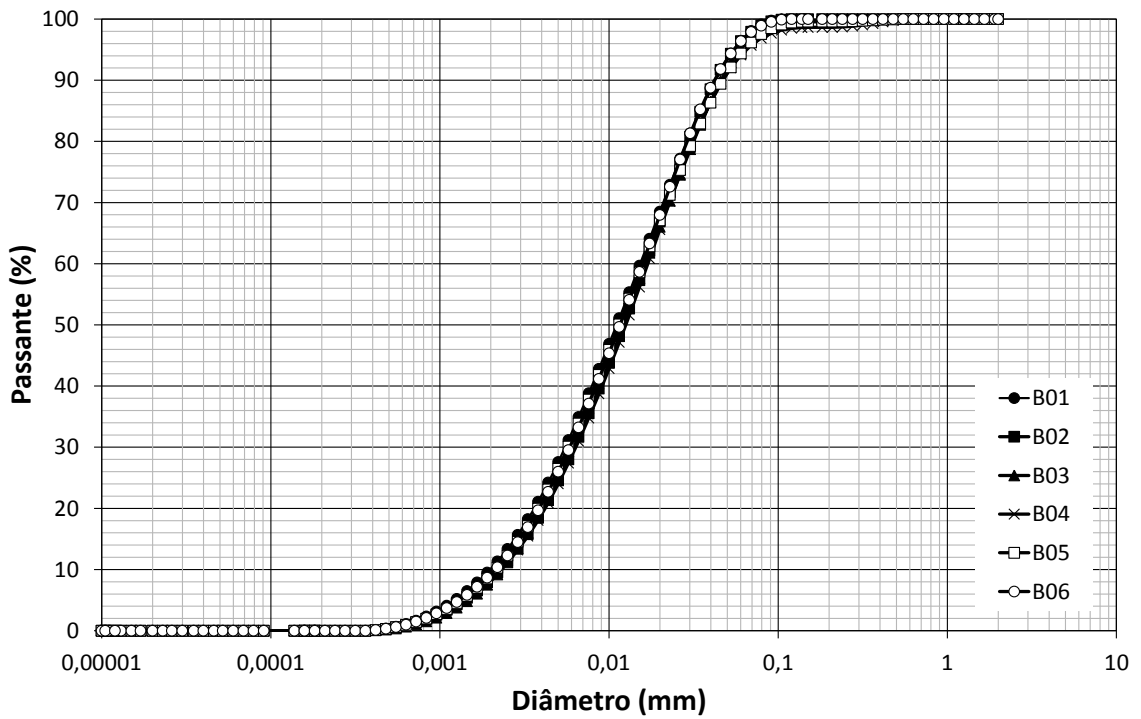


Figura 3.6 – Curvas granulométricas das amostras obtidas com o granulômetro a laser (com hexametáfosfato e com sonar)

Numa análise preliminar das amostras, observa-se uma proximidade relativa, independente do procedimento adotado para a dispersão ou mesmo sem a dispersão, mostrada na primeira curva. Para avaliação da eficiência de cada arranjo, buscou-se fazer uma comparação entre as diferentes condições para uma única amostra. A amostra escolhida foi a B-02 (bombona 2), que foi a mesma utilizada para os demais ensaios, cujos procedimentos e resultados serão explicitados posteriormente. As curvas comparativas entre os quatro arranjos são destacadas na Figura 3.7.

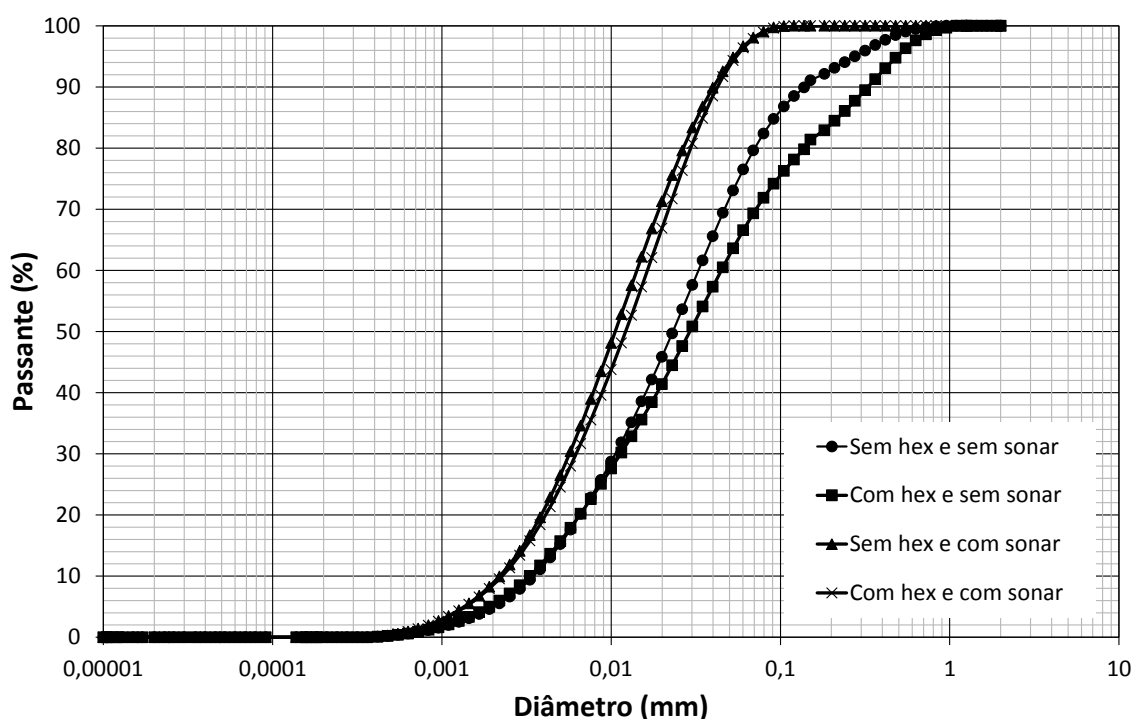


Figura 3.7 – Curvas granulométricas da amostra B-02 sob quatro condições de dispersão

Com base nas características apresentadas na Figura 3.7, o dispersante químico sozinho não teve a mesma efetividade quando comparado com a sua ação em concomitância com a dispersão por difração (sonar). Particularmente para este rejeito, o sonar, agindo sozinho teve o mesmo efeito da sua ação em conjunto com o dispersante químico.

Em relação ao método convencional, a curva granulométrica obtida pelo analisador de partículas a laser ocupou a mesma região do gráfico, caracterizando uma distribuição muito próxima e a efetividade do uso do granulômetro (Figura 3.8).

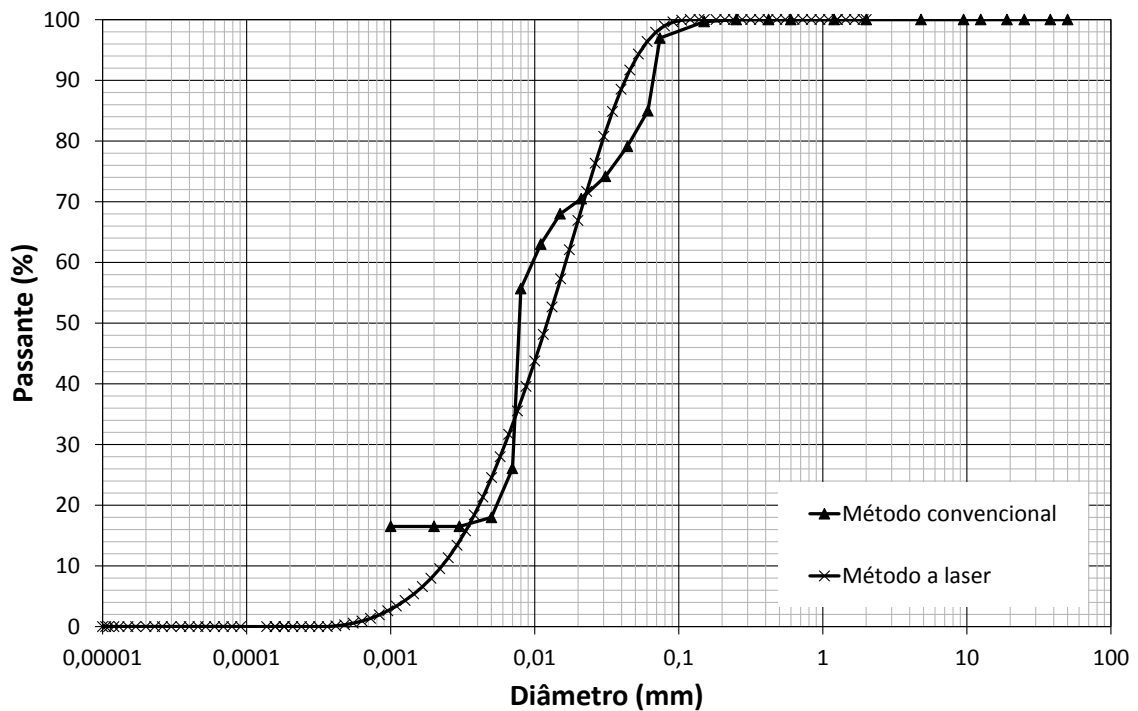


Figura 3.8 – Curvas granulométricas do rejeito obtidas através do método convencional e com o granulômetro a laser

A técnica de análise granulométrica por difração a laser considera que as partículas são dispersas num fluido em movimento, causando descontinuidades, que são detectadas por uma luz incidente, e correlacionadas com o tamanho de partícula. O princípio do método é baseado na consideração de que o ângulo de difração é inversamente proporcional ao tamanho da partícula. Desta forma, o método se aplica muito bem aos rejeitos que, mesmo na fração mais fina (argila), apresentam-se na forma granular. Enfatiza-se que a fração fina que compõe os rejeitos tem significado meramente granulométrico, sendo constituída por partículas ‘moídas’, em virtude do processo de beneficiamento industrial.

3.2.3 Determinação dos limites de consistência

Apesar de possuir comportamento majoritariamente granular, os rejeitos de fosfato, representados pela amostra B-02, apresentaram consistência, cujos limites foram definidos pela utilização de métodos extraídos nas normas brasileiras, bem como por procedimentos expressos pela norma britânica (*BS – British Standard*).

O limite de plasticidade foi obtido com base nos procedimentos da NBR-7180 (ABNT, 2016) e o limite de liquidez foi alcançado com o uso do Aparelho de Casagrande, a partir da NBR-6459 (ABNT, 2017a), bem como através do Cone de Penetração, pela BS-1377 (BSI, 1975). Os resultados, considerando os dois métodos, são apresentados nas Tabelas 3.4 e 3.5.

Tabela 3.4 – Limites de consistência do rejeito (LL obtido pela ABNT)

Ensaio	LL _{ABNT} (%)	LP (%)	IP (%)
01	75	40	35
02	74	41	33

Tabela 3.5 – Limites de consistência do rejeito (LL obtido pela BS)

Ensaio	LL _{BS} (%)	LP (%)	IP (%)
01	87	40	47
02	85	41	44

Observa-se uma discrepância de resultados entre os limites de liquidez calculados pela norma brasileira e pela norma britânica, o que pode estar relacionada à pequena percentagem da fração argila. Por outro lado, observou-se uma melhor trabalhabilidade quando os procedimentos foram realizados com o cone de penetração.

3.3 ANÁLISES QUÍMICA E MINERALÓGICA DO REJEITO

As características químicas e mineralógicas dos rejeitos podem apresentar consideráveis variações em termos de concentração. Essas variações estão diretamente relacionadas ao tipo de minério explorado e ao processo de beneficiamento industrial, incluindo ações afetadas pela mudança de frentes de lavra.

No caso do rejeito fino de fosfato estudado, oriundo da ciclonagem primária, a sua geração não incorpora quaisquer adições de flocculantes. As características são diretamente associadas à rocha fosfática, cujos concentrados são usualmente expressos em função do seu percentual de pentóxido de fósforo (P₂O₅).

3.3.1 Análise química

A análise química dos rejeitos pode ser realizada a partir de ensaios de espectrometria de absorção atômica ou através de técnicas espectroquímicas como, por exemplo, o ensaio de plasma de acoplamento indutivo (ICP).

As análises apresentadas na Tabela 3.6, realizadas pela própria empresa (CMMM), mostram a presença majoritária de SiO_2 e, em menor escala, de P_2O_5 , CaO e Al_2O_3 , bem como uma característica inativa do rejeito, do ponto de vista de elementos contaminantes.

Tabela 3.6 – Análise química do rejeito de fosfato

Composto		Teor
P_2O_5	%	7,2
CaO	%	9,3
SiO_2	%	61,6
Al_2O_3	%	6,9
F_2O_3	%	2,8
MgO	%	1,7
Cd	ppm	32,5
F	%	0,4
Cl	%	0,2
Na_2O	%	1,2
K_2O	%	1,0

3.3.2 Análise mineralógica

A análise mineralógica foi realizada por meio de microscópio eletrônico de varredura (MEV), equipamento capaz de produzir imagens de alta ampliação e resolução, bem como por equipamento de difratometria de raios-X, todos pertencentes ao NanoLab, da Escola de Minas/UFOP. Através dos resultados, destaca-se a presença de partículas de halita (H), bassanita (BA), biotita (BI), Quartzo (Q) fluorapatita, com óxidos de silício não superiores a 50 micras. Considerando a totalidade da análise, estes últimos representam um teor de quase 60%, presença bastante significativa. O difratograma de raios-X é apresentado na Figura 3.9.

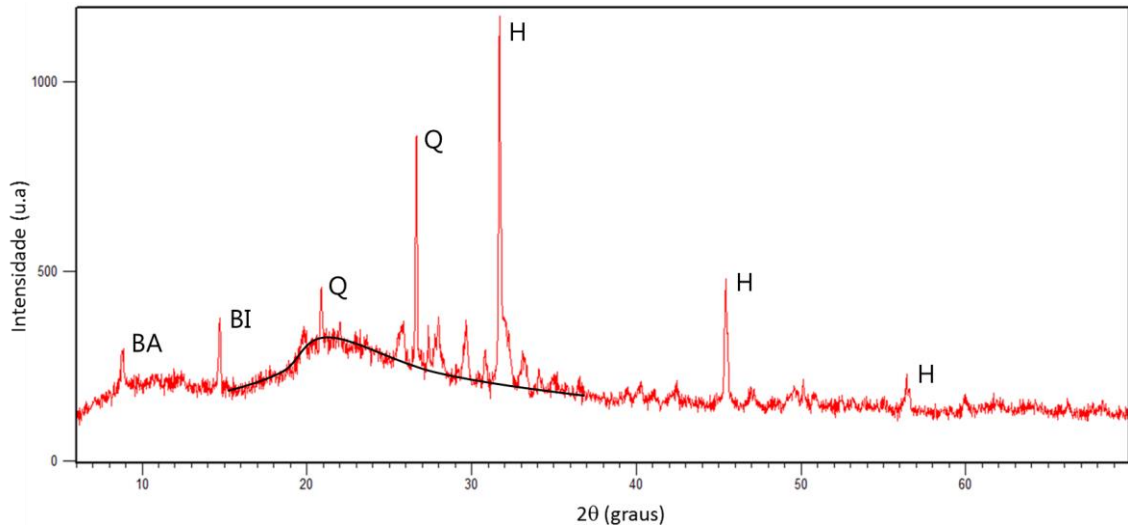


Figura 3.9 – Difratoograma de raios-X do rejeito de fosfato

As imagens obtidas a partir da microscopia eletrônica, com diferentes aproximações, são mostradas nas Figuras 3.10, 3.11 e 3.12, com identificação dos fosséis silicáticos na Figura 3.13.

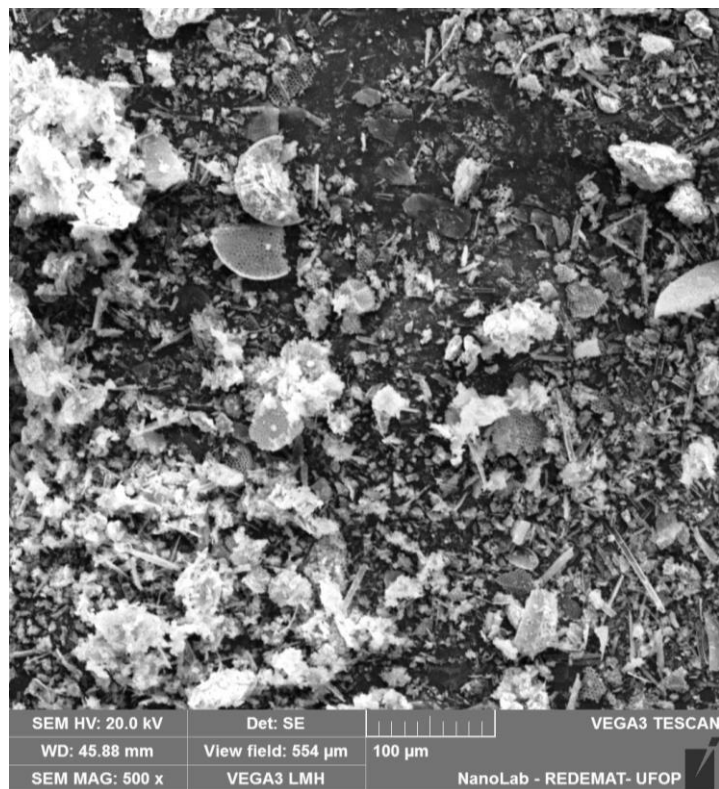


Figura 3.10 – MEV do rejeito de fosfato – aproximação 500X

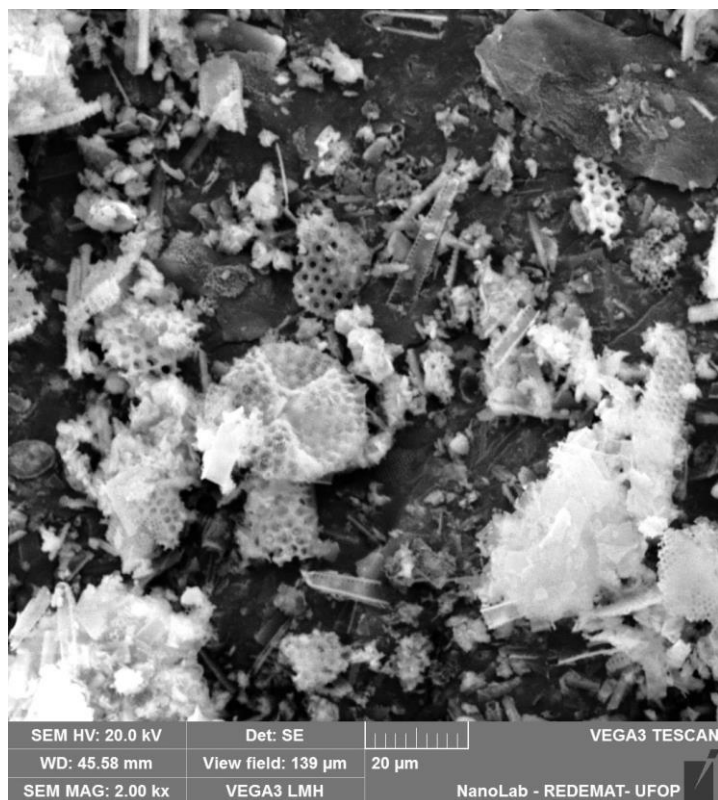


Figura 3.11 – MEV do rejeito de fosfato – aproximação 2000X

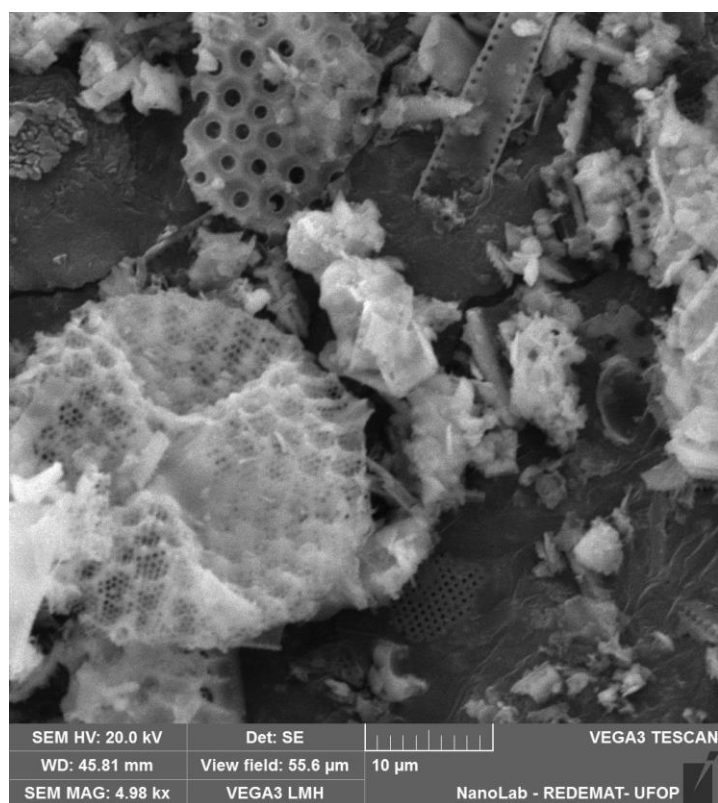


Figura 3.12 – MEV do rejeito de fosfato – aproximação 5000X

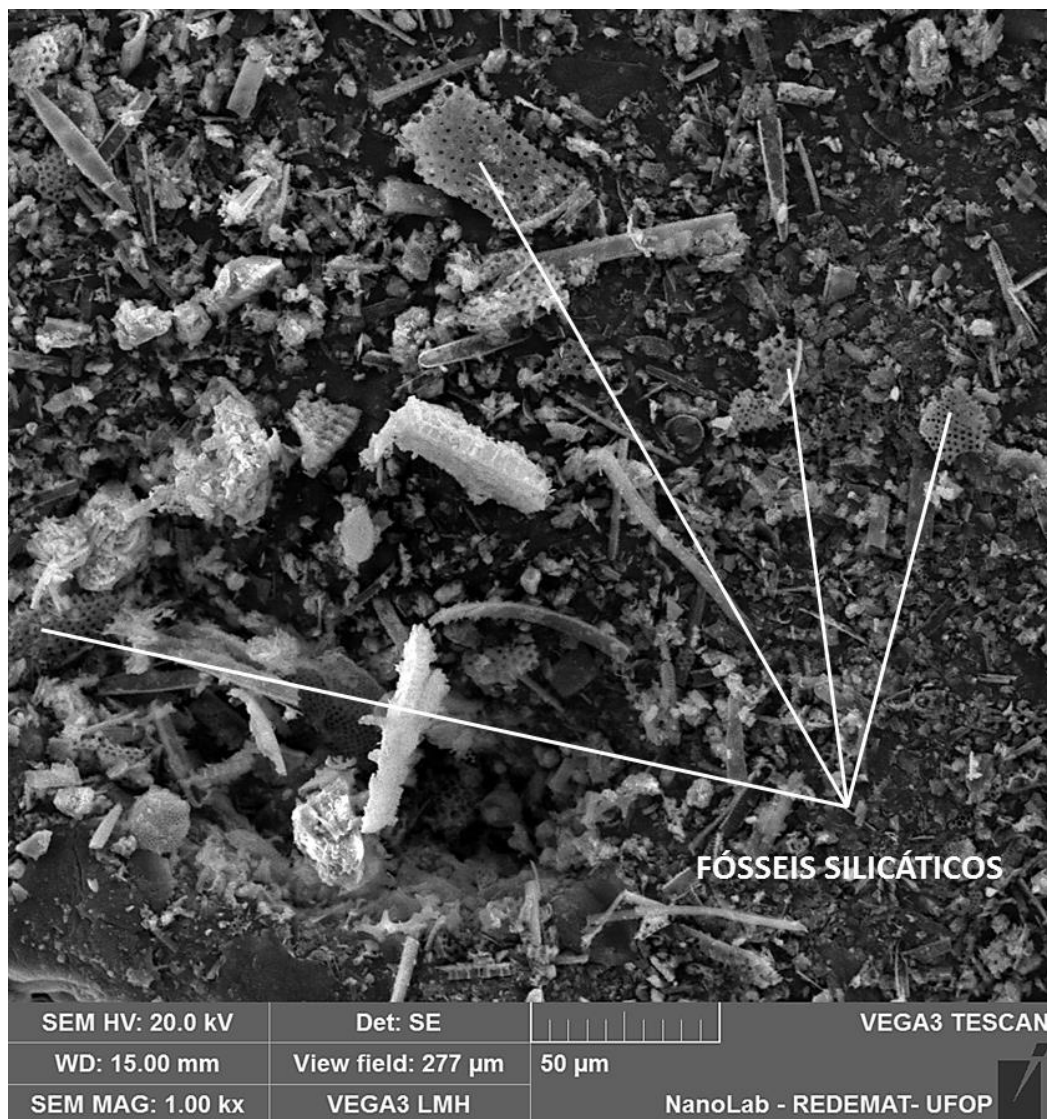


Figura 3.13 – MEV do rejeito de fosfato – aproximação 2000X

As principais fases foram obtidas por meio da difratometria de raios-X. As imagens da microscopia ressaltaram a presença significativa de fósseis marinhos silicáticos, comuns nas camadas e intercamadas da rocha fosfática. Os fósseis são característicos de plânctons (*Asteromphalus*). As fases observadas na difratometria de raios-X não ficaram tão evidentes quando analisadas a partir das espectroscopias por dispersão de energia (EDS). A Figura 3.14 mostra um espectro típico obtido nas análises, demonstrando a presença de oxigênio, silício e, em menor escala, cálcio, sódio e cloro. Os outros espectros também mostraram a presença de ferro, alumínio, potássio, carbono, magnésio, fósforo e enxofre, todos em pequenos percentuais.

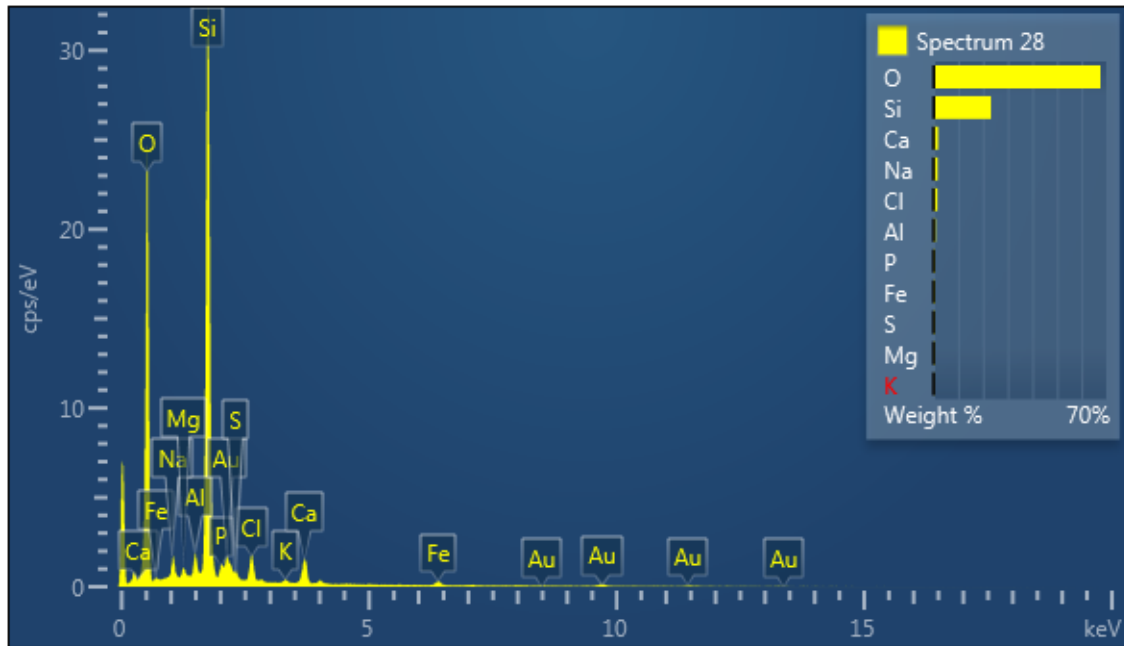


Figura 3.14 – Exemplo de espectro de EDS (NanoLab)

3.4 ENSAIOS ESPECIAIS

3.4.1 Ensaio de sedimentação em coluna

Objetivando avaliar a sedimentação do rejeito de fosfato e o comportamento do deslocamento da interface água sobrenadante / lama, foram realizados ensaios de sedimentação em coluna, com a utilização de provetas convencionais, de 1000 mL. Para ensaios específicos, as colunas de sedimentação geralmente utilizadas possuem dimensões maiores e diversos pesquisadores desenvolveram e utilizaram estes para análises (Been e Sills, 1981; Santos, 2001; Silva, 2008). Alguns destes equipamentos utilizam ensaios não destrutivos para avaliar o comportamento da coluna sedimentação ao longo tempo. Been e Sills (1981), por exemplo, idealizaram e construíram uma coluna de maiores dimensões, visando o estudo da sedimentação e do adensamento de solos moles. Para tanto, criaram um aparato com emissão de raios-X, para monitoramento do índice de vazios em diversas alturas, e posicionaram transdutores de pressão em diversas cotas, de forma a mensurar as poropressões e, conseqüentemente, as tensões efetivas na fase de adensamento.

No entanto, o uso de provetas simples, utilizadas nos ensaios de granulometria convencionais, também demonstrou efetividade, pois as curvas de sedimentação, interpretadas a partir de teorias já consolidadas, como a de Kynch (1952), por exemplo, podem produzir resultados satisfatórios, bem como fornecer parâmetros para a moldagem e definição de condições de contorno iniciais para outros ensaios.

Silva (2008), trabalhando com diversos tipos de rejeitos, utilizou uma coluna de grande porte e uma proveta convencional para determinação de curvas de permeabilidade. O autor comprovou que, apesar de apresentarem curvas de sedimentação um pouco diferentes, originam curvas de permeabilidade muito próximas, destacando a funcionalidade do equipamento para as análises realizadas.

O esquema representativo do início e do final do ensaio de sedimentação, na proveta convencional (1000 mL), pode ser visto na Figura 3.15, onde h_i é a altura inicial da lama, medida em unidade da divisão da proveta, h_w é a altura do líquido sobrenadante e h_f é a altura final da lama, após a estabilização do deslocamento da interface rejeito/líquido sobrenadante.

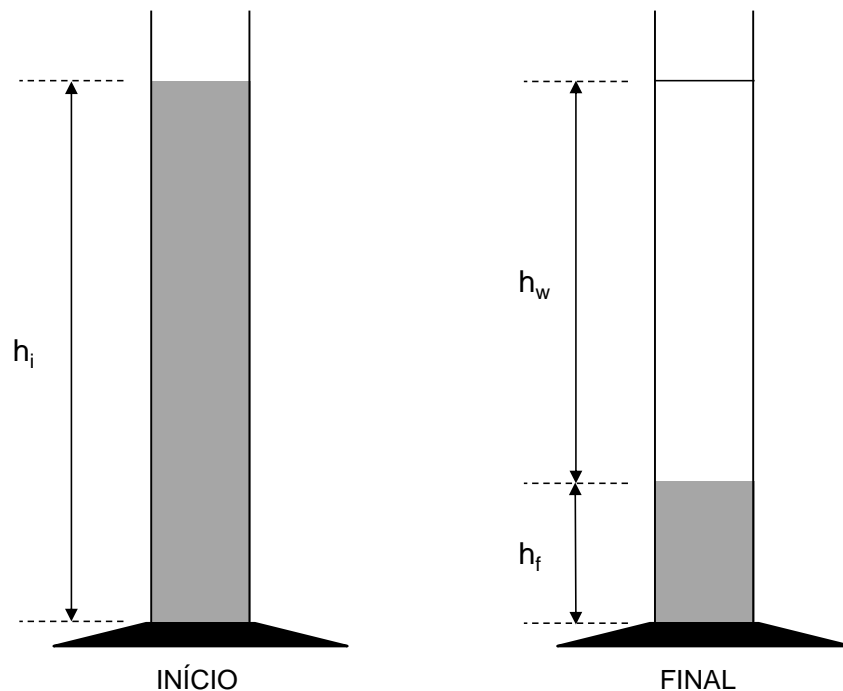


Figura 3.15 – Representação do ensaio de sedimentação em coluna

Buscando melhor reprodutibilidade e representatividade dos resultados, os ensaios foram inicialmente realizados em duas provetas, concomitantemente, no teor de sólidos utilizado na disposição dos rejeitos (entre 14 e 15%). O ensaio foi realizado durante 10 dias, sendo que o tempo de estabilização da interface foi percebido somente após 7 dias, demonstrando a baixa velocidade de sedimentação do rejeito.

Os resultados destes ensaios de coluna de sedimentação são destacados na Tabela 3.7, cuja representação gráfica é mostrada nas Figuras 3.16 e 3.17, que destacam, consecutivamente, os resultados provetas 1 e 2 separadamente e a curva média de sedimentação entre elas. Esta última curva foi proposta em função da proximidade entre os resultados das duas provetas.

Tabela 3.7 – Ensaio de coluna – proveta de sedimentação

Tempo (min)	Proveta1 (mL)	Proveta 2 (mL)	Média (mL)
0	1000,0	1000,0	1000,0
2	1000,0	1000,0	1000,0
4	1000,0	1000,0	1000,0
6	999,5	1000,0	999,8
8	999,0	999,5	999,3
10	999,0	999,5	999,3
15	999,0	999,5	999,3
30	998,0	999,0	998,5
45	996,0	997,0	996,5
60	994,0	995,0	994,5
120	804,0	805,0	804,5
180	700,0	704,0	702,0
240	604,0	605,0	604,5
300	603,0	604,0	603,5
360	602,0	603,0	602,5
420	600,5	601,0	600,8
480	509,0	600,5	554,8
660	506,5	508,0	507,3
1440	501,0	502,0	501,5
2880	407,5	408,0	407,8
4320	403,0	403,0	403,0
5760	401,5	401,5	401,5
8640	400,5	400,5	400,5
12960	400,0	400,0	400,0
14400	400,0	400,0	400,0

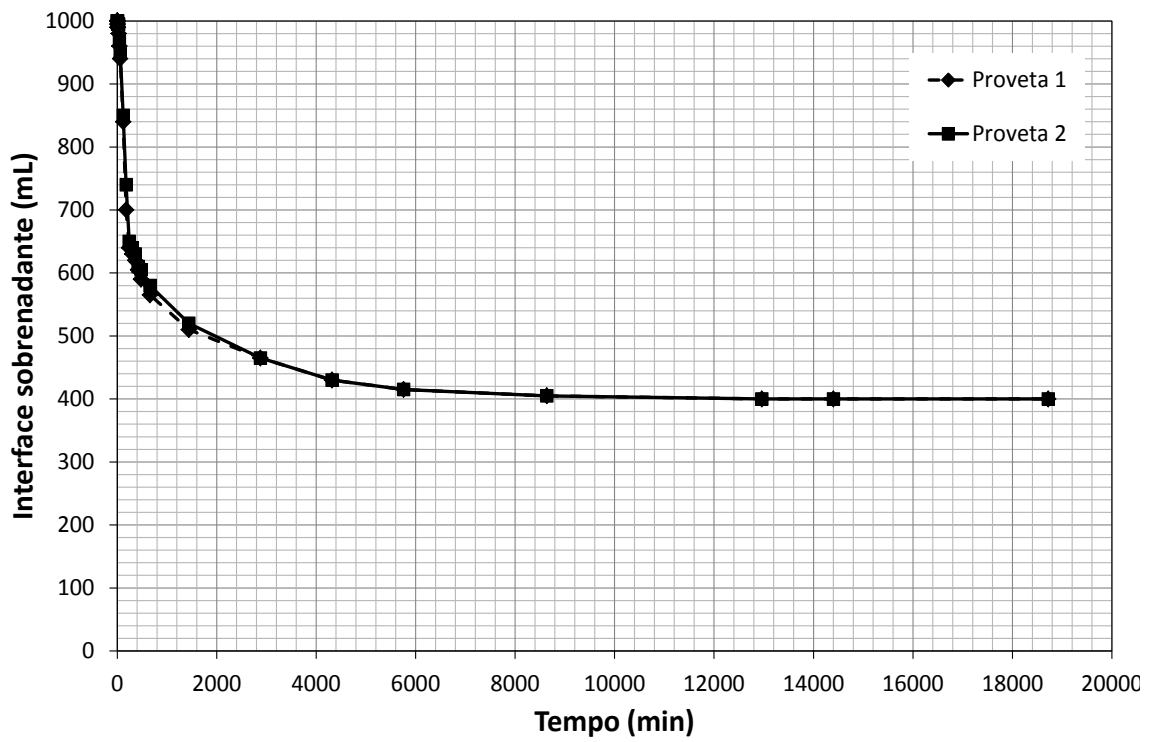


Figura 3.16 – Curvas de sedimentação – interface rejeito/água

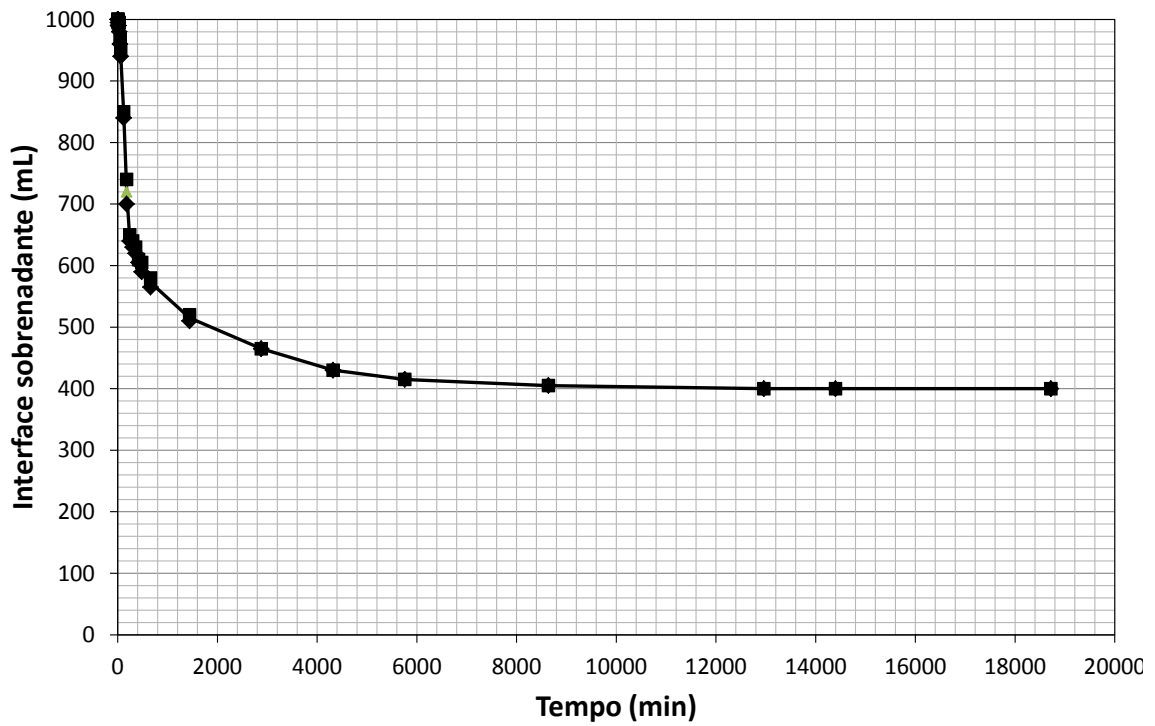


Figura 3.17 – Curva média de sedimentação – interface rejeito/água

Além da realização do ensaio no teor de sólidos inicial do rejeito, também foram realizadas sedimentações em amostras, considerando a variação do teor de sólidos, com a retirada parcial da água sobrenadante, seguida por uma nova homogeneização da lama, com a utilização da própria água do rejeito. Os teores de sólidos obtidos foram aleatórios, objetivando, neste caso, avaliar a influência destes no tempo de sedimentação, bem como a concentração da camada final sedimentada. Os dados são destacados na Tabela 3.8. A Figura 3.18 mostra a sequência de provetas.

Tabela 3.8 – Dados iniciais das amostras – ensaios de sedimentação

Proveta	Teor de umidade w (%)	Teor de sólidos ψ (%)	Índice de vazios inicial e_0	Altura de Sólidos H_s
1	330,6%	23,2%	7,835	113,18
2	366,0%	21,5%	8,673	103,38
3	391,3%	20,4%	9,274	97,33
4	422,2%	19,2%	10,005	90,86
5	442,7%	18,4%	10,491	87,02
6	478,5%	17,3%	11,339	81,04
7	505,6%	16,5%	11,984	77,02
8	535,3%	15,7%	12,687	73,06
9	564,5%	15,0%	13,378	69,55



Figura 3.18 – Vista da sequência de provetas – ensaio de sedimentação em coluna

Nesta nova avaliação, os ensaios foram realizados durante 13 dias. Os valores obtidos durante os ensaios, considerando os diferentes teores de sólidos, são apresentados na Tabela 3.9. As curvas são mostradas na Figura 3.19.

Tabela 3.9 – Ensaio de coluna para diferentes teores de sólidos (ψ)

Tempo (min)	Prov.1	Prov.2	Prov.3	Prov.4	Prov.5	Prov.6	Prov.7	Prov.8	Prov.9
	(mL)	(mL)	(mL)	(mL)	(mL)	(mL)	(mL)	(mL)	(mL)
	ψ (%)	ψ (%)	ψ (%)	ψ (%)	ψ (%)	ψ (%)	ψ (%)	ψ (%)	ψ (%)
	23,2	21,5	20,4	19,2	18,4	17,3	16,5	15,7	15,0
0	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
2	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
4	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
6	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
8	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
10	1000	1000	1000	1000	995	995	995	1000	1000
15	1000	1000	1000	995	990	990	990	995	1000
20	1000	1000	995	990	985	990	990	990	990
30	1000	1000	990	985	985	985	985	990	990
60	1000	995	970	955	940	925	950	960	960
120	1000	995	950	910	930	860	845	840	880
180	995	985	930	885	880	855	825	805	795
240	995	980	915	865	835	800	785	770	770
300	990	975	905	850	820	790	770	755	750
360	990	970	895	840	810	770	755	740	735
420	990	970	890	830	800	760	740	730	720
480	990	960	880	820	790	750	735	720	715
1440	970	915	805	745	720	670	660	635	620
2880	950	870	760	700	675	635	615	590	570
4320	930	840	730	675	650	610	590	560	535
5760	910	810	710	655	630	590	570	540	510
7200	895	790	695	645	620	580	560	530	495
8640	880	770	680	635	610	570	550	520	485
10080	865	755	675	630	605	565	540	510	480
11520	850	745	670	625	600	560	540	510	480
12960	835	735	670	620	595	560	535	505	475
14400	825	725	665	620	595	550	530	505	475
15840	810	720	660	620	590	555	530	500	470
17280	800	715	660	620	590	555	530	500	470
18720	785	710	660	620	590	550	530	500	470

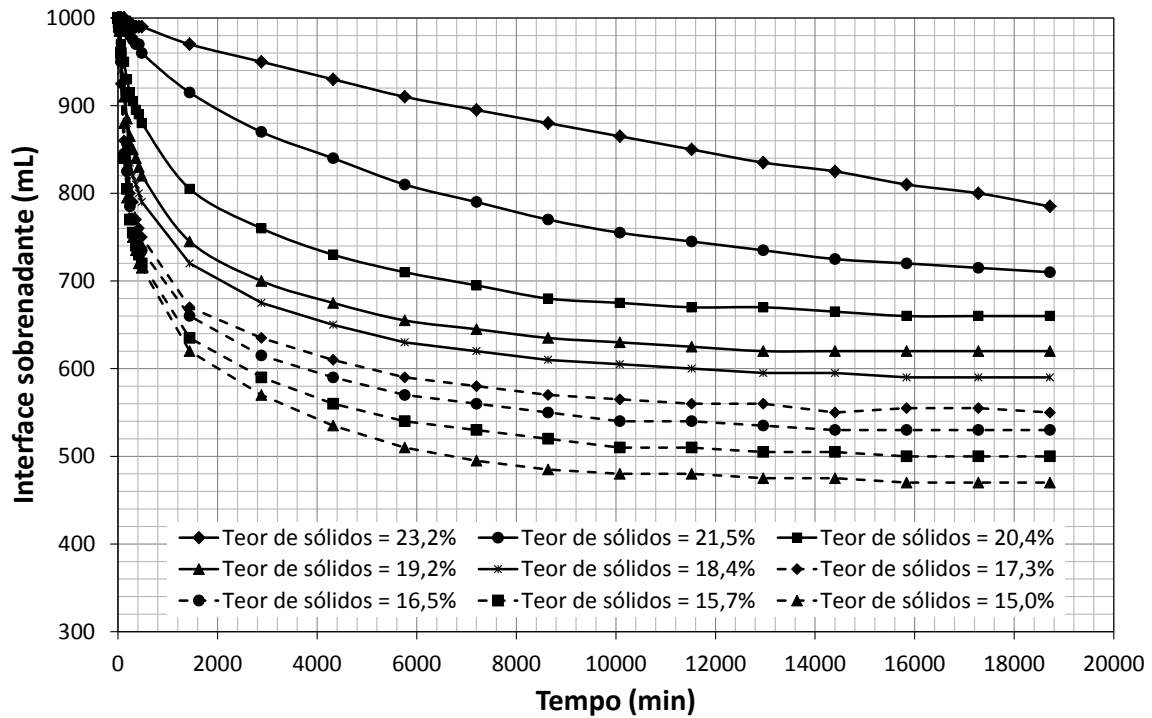


Figura 3.19 – Curvas de sedimentação para diferentes teores de sólidos

No sentido da avaliação da influência dos diferentes teores de sólidos no processo de sedimentação, a partir do conhecimento da interface líquido sobrenadante / rejeito, foram calculados os índices de vazios médios da coluna de lama em função do tempo de sedimentação. Considerando a saturação da amostra, os teores de umidade iniciais, e os índices de vazios no instante ' $t = 0$ ', tornou-se possível o cálculo dos demais índices de vazios (para $t \neq 0$), através do conhecimento da altura de sólidos para cada proveta.

Desta forma, os cálculos dos diversos índices de vazios, para os diferentes tempos, foram realizados através das Equações 3.3 e 3.4. Os valores determinados são mostrados na Tabela 3.10 e as respectivas curvas na Figura 4.20.

$$H_s = \frac{1000}{(e_0 + 1)} \quad (3.3)$$

$$e_{t \neq 0} = \frac{(1000 - H_s) - (1000 - L_{int})}{H_s} \quad (3.4)$$

Sendo:

H_s : altura dos sólidos;

e_0 : índice de vazios para o tempo ' $t = 0$ ';

L_{int} : leitura da interface rejeito / água no instante t .

Tabela 3.10 – Valores dos índices de vazios (e) para os diferentes teores de sólidos (ψ)

Tempo (min)	ψ (%) 23,2	ψ (%) 21,5	ψ (%) 20,4	ψ (%) 19,2	ψ (%) 18,4	ψ (%) 17,3	ψ (%) 16,5	ψ (%) 15,7	ψ (%) 15,0
0	7,835	8,673	9,274	10,005	10,491	11,339	11,984	12,687	13,378
2	7,835	8,673	9,274	10,005	10,491	11,339	11,984	12,687	13,378
4	7,835	8,673	9,274	10,005	10,491	11,339	11,984	12,687	13,378
6	7,835	8,673	9,274	10,005	10,491	11,339	11,984	12,687	13,378
8	7,835	8,673	9,274	10,005	10,491	11,339	11,984	12,687	13,378
10	7,835	8,673	9,274	10,005	10,434	11,278	11,919	12,687	13,378
15	7,835	8,673	9,274	9,950	10,376	11,216	11,854	12,619	13,378
20	7,835	8,673	9,222	9,895	10,319	11,216	11,854	12,550	13,234
30	7,835	8,673	9,171	9,840	10,319	11,154	11,789	12,550	13,234
60	7,835	8,625	8,966	9,510	9,802	10,414	11,335	12,140	12,803
120	7,835	8,625	8,760	9,015	9,687	9,612	9,971	10,497	11,653
180	7,791	8,528	8,555	8,740	9,112	9,550	9,712	10,018	10,431
240	7,791	8,480	8,401	8,520	8,595	8,871	9,192	9,539	10,071
300	7,747	8,432	8,298	8,355	8,423	8,748	8,998	9,334	9,784
360	7,747	8,383	8,195	8,244	8,308	8,501	8,803	9,129	9,568
420	7,747	8,383	8,144	8,134	8,193	8,378	8,608	8,992	9,352
480	7,747	8,286	8,041	8,024	8,078	8,254	8,543	8,855	9,280
1440	7,570	7,851	7,270	7,199	7,274	7,267	7,569	7,691	7,915
2880	7,393	7,416	6,808	6,704	6,757	6,835	6,985	7,076	7,196
4320	7,217	7,126	6,500	6,429	6,469	6,527	6,660	6,665	6,692
5760	7,040	6,835	6,294	6,209	6,240	6,280	6,401	6,391	6,333
7200	6,908	6,642	6,140	6,098	6,125	6,157	6,271	6,254	6,117
8640	6,775	6,448	5,986	5,988	6,010	6,033	6,141	6,117	5,973
10080	6,642	6,303	5,935	5,933	5,952	5,972	6,011	5,981	5,902
11520	6,510	6,207	5,883	5,878	5,895	5,910	6,011	5,981	5,902
12960	6,377	6,110	5,883	5,823	5,837	5,910	5,946	5,912	5,830
14400	6,289	6,013	5,832	5,823	5,837	5,787	5,881	5,912	5,830
15840	6,157	5,965	5,781	5,823	5,780	5,848	5,881	5,844	5,758
17280	6,068	5,916	5,781	5,823	5,780	5,848	5,881	5,844	5,758
18720	5,936	5,868	5,781	5,823	5,780	5,787	5,881	5,844	5,758

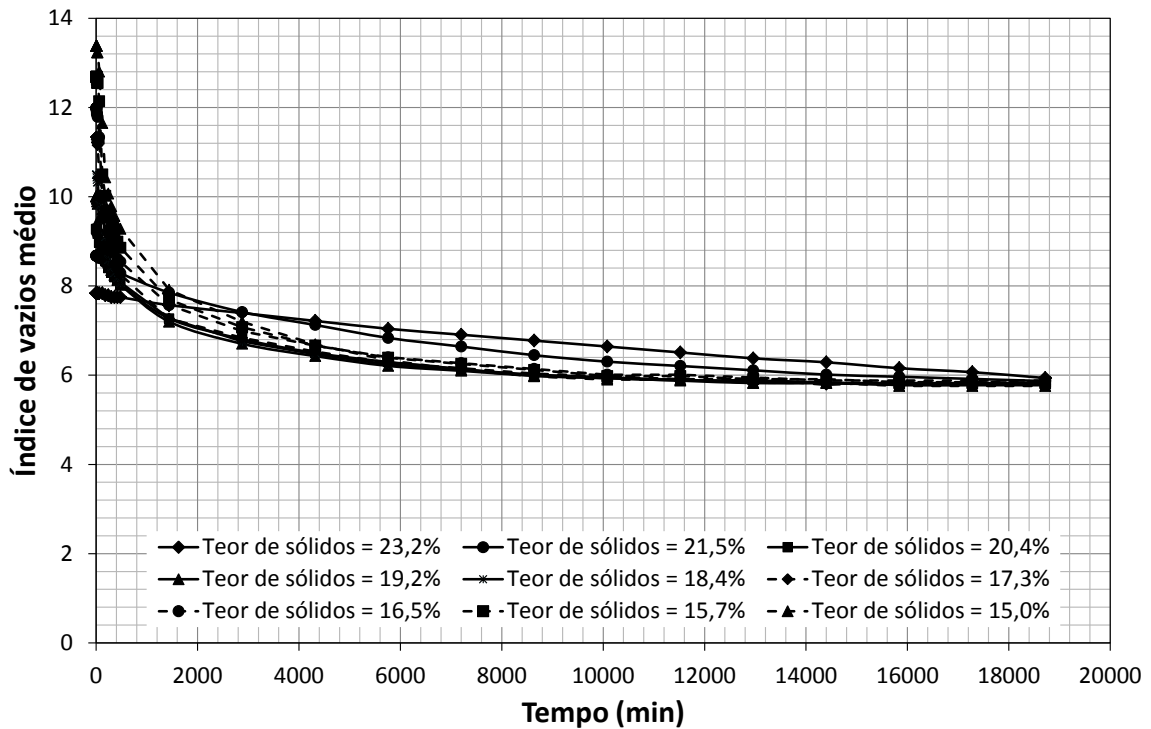


Figura 3.20 – Curvas de variação do índice de vazios durante a sedimentação

Destaca-se que o índice de vazios não é constante ao longo da camada do rejeito sedimentado, o que justifica a adoção do termo ‘índice de vazios médio’ representado no gráfico da figura anterior. A avaliação da variação do índice de vazios ao longo da altura de lama só seria possível numa coluna de sedimentação que permitisse a amostragem direta ou realizasse esta prospecção a partir que mecanismos não destrutivos, já destacados anteriormente. No entanto, a opção pela proveta convencional, já qualificada em estudos anteriores na literatura técnica como adequada para estudos dessa natureza (Silva, 2008), numa análise preliminar, mostrou que, independente do teor de sólidos inicial da amostra total, todos os rejeitos atingem, na estabilização, índices de vazios muito próximos. Esta constatação é perceptível nas curvas apresentadas na Figura 3.20 e, numa análise mais apurada, na Tabela 3.10, onde todas as amostras atingiram, ao final, índices de vazios entre 5,7 e 5,9, o que é razoável a consideração de um mesmo índice de vazios final.

Outra constatação, ponderando o rejeito estudado e as 9 amostras avaliadas, é que a estabilização da interface ocorre mais rapidamente para menores teores de sólidos, o que é comprovado pela teoria da sedimentação restringida de Kynch (1952), uma vez

que, de acordo com o autor, a velocidade de sedimentação de uma determinada partícula não depende somente de suas propriedades e do líquido, mas também da concentração de sólidos ao seu redor. Neste sentido, quanto maior a concentração de partículas, aqui representada pelo teor de sólidos, menor é a velocidade de sedimentação, considerando a continuidade das partículas.

3.4.2 Ensaio de adensamento com taxa de deformação constante (CRD)

- **Desenvolvimento do equipamento**

O desenvolvimento do equipamento partiu da necessidade da realização de adensamento com taxa de deformação constante em materiais de baixa consistência, com possibilidade de possuir baixo teor de sólidos e adensar a grandes deformações: é o caso dos rejeitos finos de mineração (numa abordagem generalizada).

Neste contexto, pela possibilidade de conter elevados teores de umidade, na consistência de lama, a concepção da câmara de adensamento foi bem planejada e teve como princípio fundamental a construção de uma estrutura estanque, utilizando materiais resistentes e que possibilitassem as vedações satisfatórias. Ressalta-se que as vedações devem ser suficientemente capazes de impedir a passagem de água nas junções das suas partes quando a amostra está sob contrapressão, que muitas vezes é utilizada para a saturação de determinadas amostras. A câmara foi construída em aço inox, e com sistemas de travamento que possibilitam o trabalho a elevadas pressões internas, sem causar deformações na estrutura. Destaca-se que muitas de suas partes foram idealizadas a partir do edômetro de PVC construído por Lima (1996), mas com inovações propostas tanto na concepção estrutural quanto na aquisição de dados que será detalhada adiante.

A câmara é dividida em partes desmontáveis e possui diâmetro interno de 21,55 cm e altura total do anel de 21 cm. O anel, que se encaixa nas bases inferior e superior, também se divide em duas partes, visando melhor operacionalização na montagem e desmontagem da câmara durante o ensaio: um anel inferior de 6,5 cm e outro, superior, medindo 14,5 cm. Em termos de altura útil interna, no entanto, o equipamento possui 17,5 cm, visto que a altura da base do êmbolo é de 3,5 cm. Ainda, quando se trabalha

com cabeçote de 6,6 cm de altura, desenvolvido para uniformizar o fluxo durante o ensaio, o seu valor é reduzido para 10,9 cm, possibilitando ensaios com volume de rejeito de até 3.975 cm³. Um desenho esquemático do equipamento é mostrado na Figura 3.21, cujos sensores (instrumentação), dedicados à aquisição de dados, são detalhados na Tabela 3.11. A Figura 3.22 destaca as partes da câmara já mencionadas.

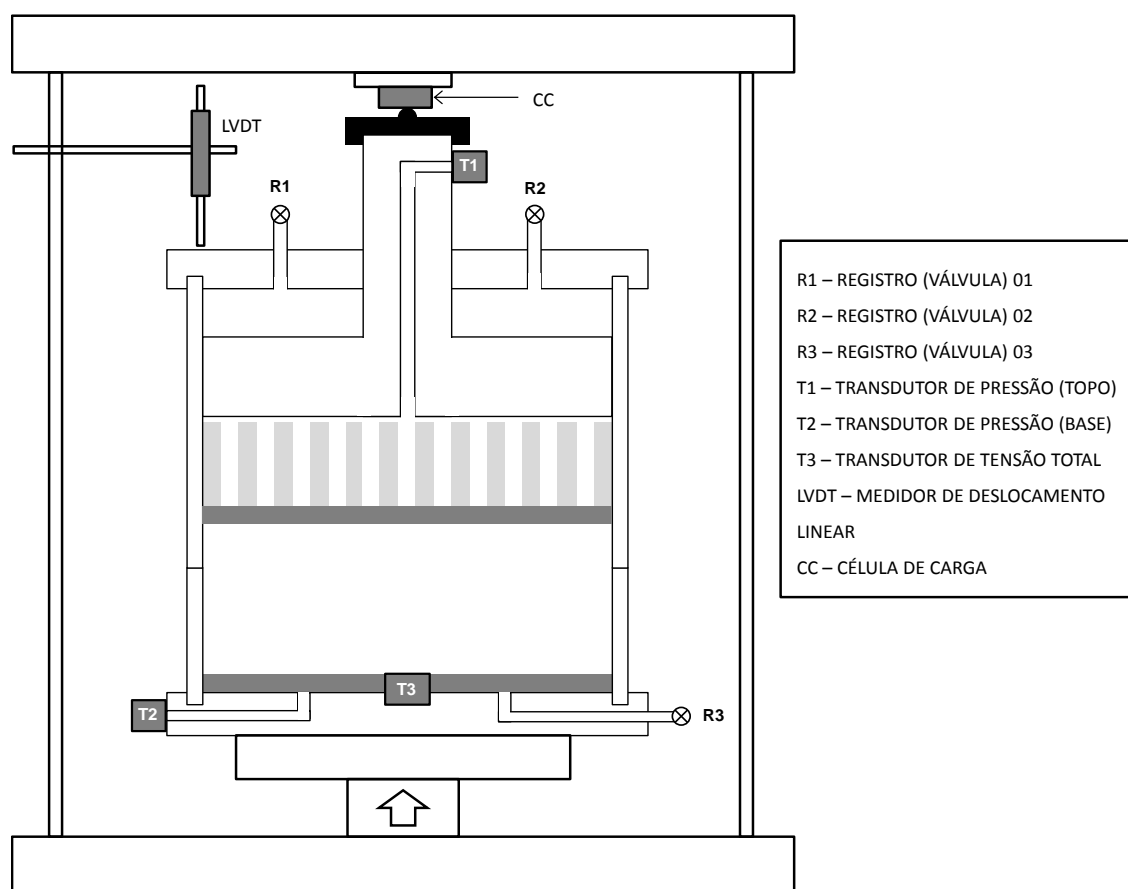


Figura 3.21 – Desenho esquemático do edômetro (câmara) tipo CRD implementado no CTGA/NUGEO

Tabela 3.11 – Sensores utilizados no edômetro tipo CRD

Sensor	Descrição
T1	Transdutor de pressão (topo)
T2	Transdutor de pressão (base)
T3	Transdutor de tensão total
LVDT	Medidor de deslocamento linear (vertical)
CC	Célula de carga

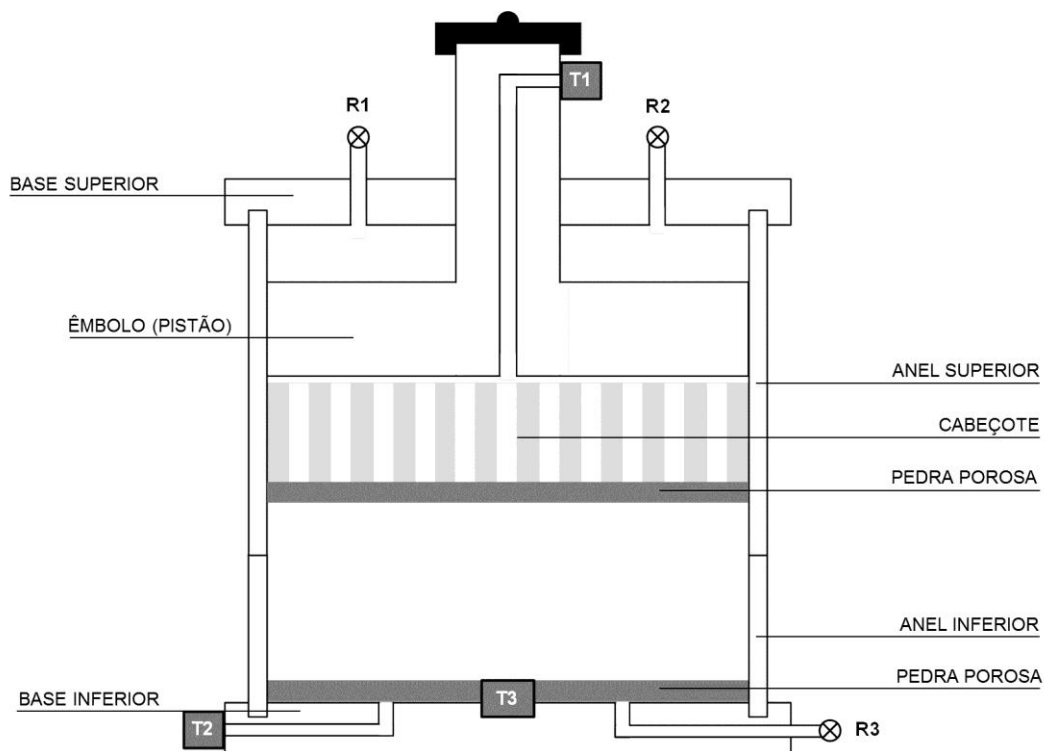


Figura 3.22 – Destaque das partes desmontáveis da câmara tipo CRD

Conforme já destacado, as bases e as paredes (anéis) foram concebidas em aço inox. Já o cabeçote, que foi idealizado visando a distribuição do fluxo, foi construído em acrílico de alta densidade (Figura 3.23). Tanto na base deste cabeçote quanto no topo da base inferior são dispostas pedras porosas de elevadas permeabilidade e pressão de borbulhamento. Uma vista geral do equipamento é mostrada na Figura 3.24.

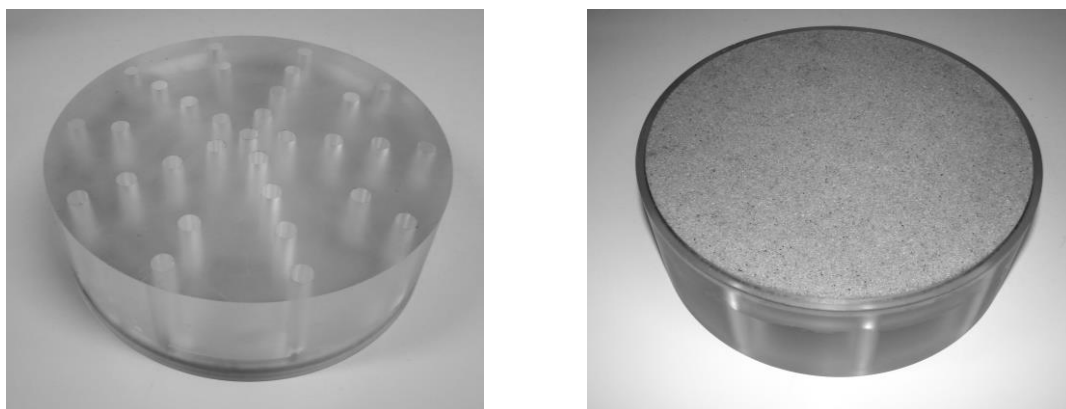


Figura 3.23 – Cabeçote em acrílico com vista superior e inferior (pedra porosa)

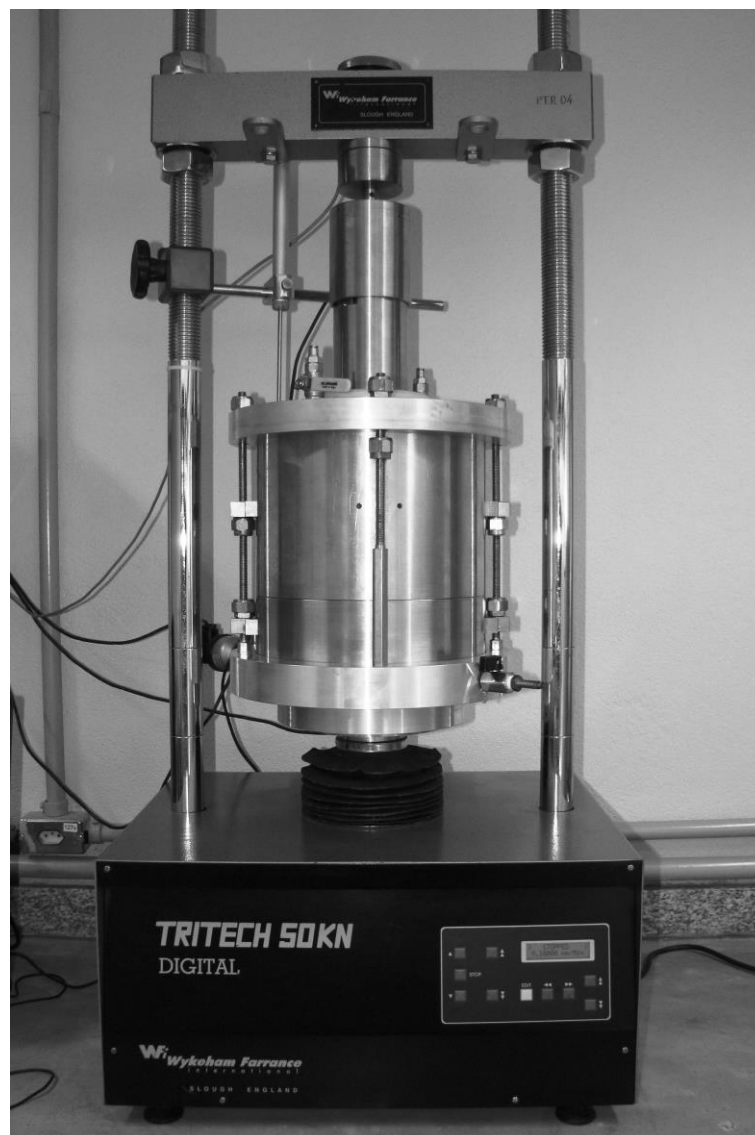


Figura 3.24 – Vista geral do equipamento tipo CRD desenvolvido

Conforme percebido na imagem da Figura 3.24, a câmara tipo CRD é apoiada em uma prensa digital de deformação controlada, com viga de reação, utilizada em ensaios triaxiais convencionais, modelo *Tritech*, de fabricação inglesa (*Wykeham Farrance*), com capacidade nominal de carga de 50 kN.

Ainda sobre as partes da câmara, a base superior (topo da câmara) possui o centro vazado por onde desliza o pistão, responsável por receber o carregamento, durante a compressão edométrica. A vedação entre o pistão e o furo da base foi feita por uma gaxeta, com anel de borracha, que auxilia na vedação. O engaxetamento é um dos

principais métodos de vedação entre duas peças unidas uma na outra, e também a forma mais antiga de vedar um eixo na instrumentação de laboratório. Basicamente, consiste da compressão de um material resistente, macio e lubrificante dentro do espaço formado pelo eixo e a caixa de vedação do equipamento.

Os registros R1, R2 e R3 são compostos por válvulas tipo *on/off* de fabricação da *Klinger*. Os registros R1 e R2 estão localizados no topo do equipamento e são responsáveis por promover a saturação ou aplicação de contrapressão. O registro localizado na base inferior é responsável por garantir o fluxo inferior e a saturação da pedra porosa localizada na base, além de possibilitar a drenagem. Os sensores serão destacados a seguir, na abordagem da aquisição automática de dados, cuja implementação foi também realizada nesta pesquisa.

- **Sistema de aquisição de dados**

A garantia da qualidade e precisão dos dados obtidos durante o ensaio só é conseguida com a efetivação de um sistema de aquisição de dados robusto, com mensuração de sinais elétricos emitidos pelos diversos sensores. Estes sinais são registrados simultaneamente, e as devidas conversões nas unidades de interesse para o experimento são realizadas e os respectivos dados gravados por um computador com *software* programável.

A instrumentação do CRD inclui 5 sensores, com transdutores de pressão, uma célula de carga e um LVDT, que já foram abordados e, agora, detalhados em função do tipo e dos intervalos de leitura (Tabela 3.12), que são responsáveis pelo registro das tensões totais, poropressões e deslocamentos durante o ensaio.

Tabela 3.12 – Detalhamento dos sensores utilizados no equipamento

Sensor	Descrição	Tipo	Intervalo de leitura
T1	Transdutor de pressão (topo)	DC 0 - 20mA	0 - 12 kPa
T2	Transdutor de pressão (base)	DC 0 - 20mA	0 - 16 kPa
T3	Transdutor de tensão total	DC 0 - 20mA	0 - 16 kPa
LVDT	Medidor de desloc. linear	Potenciômetro resistivo	0 - 120 mm
CC	Célula de carga	SG ponte completa	0 - 2 t

Os transdutores de pressão T1, T2 e T3 utilizam o mesmo princípio de funcionamento, ou seja, são equipamentos piezorresistivos. O transmissor do tipo piezorresistivo mede a pressão do processo através de um diafragma. Conforme a pressão varia, o diafragma é pressionado com intensidade proporcional. Um pequeno sensor, localizado na parte interna do diafragma, converte a variação de pressão em uma variação de resistência elétrica equivalente. Um pequeno circuito eletrônico transforma essa informação em um sinal de corrente ou tensão, compatível com o sistema de automação implantado. No entanto, destaca-se que os sensores T1 e T2 são equipamentos que possuem diafragmas que ficam em contato diretamente com o líquido, enquanto o transdutor T3, que fica localizado no centro da base da câmara, possui o diafragma faceado ao processo, também chamado de transdutor ‘mássico’. Este último é indicado para meios viscosos e que contém sólidos. Os transdutores T1 e T2 são fabricados pela *Jumo*, empresa alemã. Já o transdutor T3 é produzido pela *Wika*.

O medidor de deslocamento linear – LVDT – utilizado na construção do equipamento é do tipo potenciômetro. O sensor converte o deslocamento mecânico em sinais elétricos que são registrados pelo sistema de aquisição de dados. Consiste de uma resistência com um contato móvel, onde o elemento resistivo é alimentado com uma tensão de entrada e a tensão de saída é idealmente uma função linear do deslocamento. O equipamento é de haste prolongada, fabricado pela *Gefran*.

Já a célula de carga, é do tipo de compressão, com funcionamento baseado na variação da resistência ôhmica de um extensômetro (*strain gage*), quando submetido a uma deformação. O transdutor de força converte a carga que atua sobre ele em uma saída elétrica mensurável que também será registrada pelo sistema de aquisição de dados. A célula de carga utilizada é fabricada pela *Alfa*.

O sistema de aquisição de dados utilizado no equipamento é o *Spider 8* (Figura 3.25), de fabricação da empresa alemã *HBM – Hottinger Baldwin Messtechnik*. O *Spider 8* possui um sistema eletrônico para medir sinais elétricos e variáveis mecânicas como resistência, força, pressão, aceleração, temperatura e deslocamento linear. Os dados obtidos são gravados por um computador com *software* programável. A unidade deste *datalogger* é compreendida por 8 canais de entrada/saída, enumerados de 0 a 7, que podem ser agrupadas. Neste sentido, caracteriza-se como um sistema multicanal digital

universal, e se destaca, sobretudo, por sua simplicidade e rapidez de aplicação, sem a necessidade de interruptores, potenciômetros, pontes, *jumpers* ou *switches*. O seus canais possuem conversores que fornecem até 9.600 valores medidos por segundo. A Figura 3.26 mostra um desenho esquemático da parte posterior do *Spider 8*, com as suas respectivas portas (canais).



Figura 3.25 – Vista frontal do *Spider 8* (HBM – Hottinger Baldwin Messtechnik)

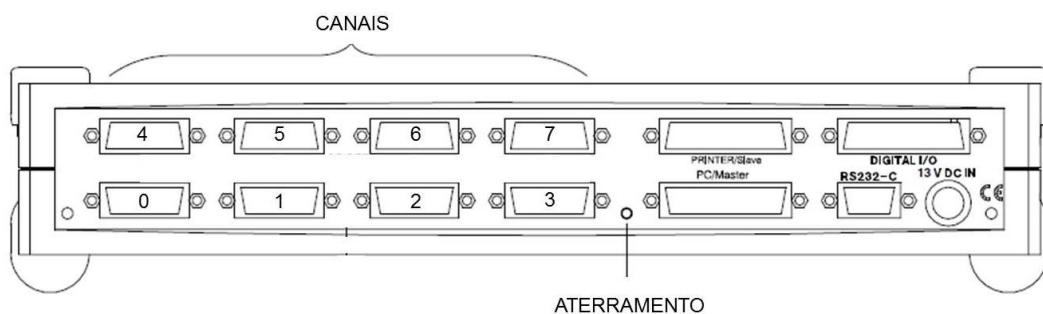


Figura 3.26 – Vista do painel posterior do *Spider 8* (Adaptado de HBM, 2003)

No módulo do *Spider 8* utilizado, os canais 0 a 3 são compostos por portas de 15 pinos (Figura 3.27a). Já as portas dos canais 4 a 7, possuem 5 pinos (Figura 3.27b). O fabricante recomenda tipo de porta para os diferentes tipos de sensores, cuja orientação conduziu a distribuição dos sensores do equipamento conforme a Tabela 3.13.

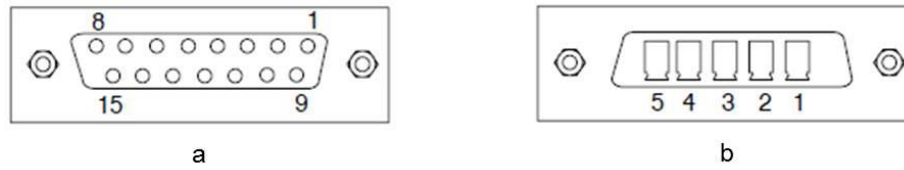


Figura 3.27 – Detalhe das pontas de 15 pinos (a) e 5 pinos (b)

Tabela 3.13 – Detalhamento das conexões dos sensores do CRD no *Spider 8*

Sensor	Descrição	Canal	Tipo de porta
LVDT	Medidor de desloc. linear	1	15 pinos
CC	Célula de carga	3	15 pinos
T1	Transdutor de pressão (topo)	4	5 pinos
T2	Transdutor de pressão (base)	5	5 pinos
T3	Transdutor de tensão total	6	5 pinos

Em conformidade com as orientações do fabricante do *Spider 8*, o LVDT foi conectado seguindo um esquema de um potenciômetro, destacado na Figura 3.28. A instalação da célula de carga foi realizada no esquema de ponte completa (sensores *strain gage*) (Figura 3.29) e os três transdutores foram ligados conforme o esquema da Figura 3.30.

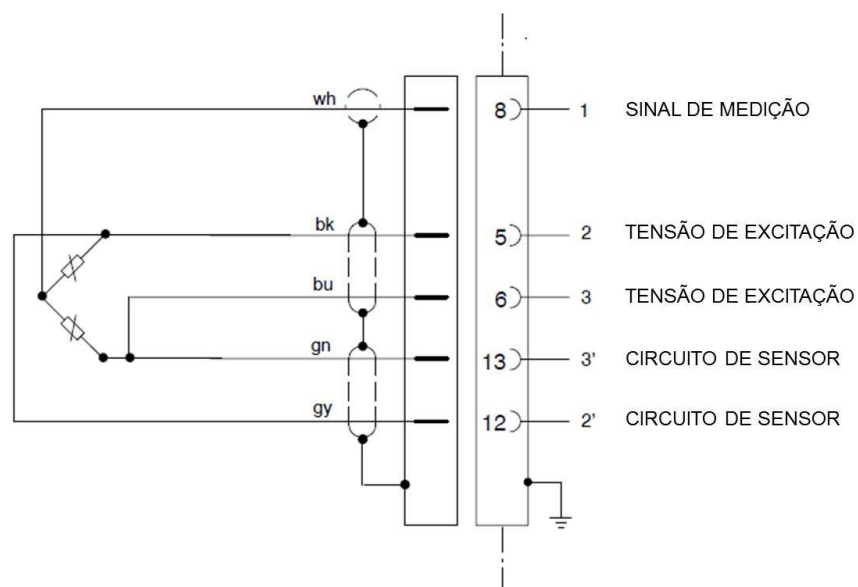


Figura 3.28 – Esquema de conexão do LVTD (Adaptado de HBM, 2003)

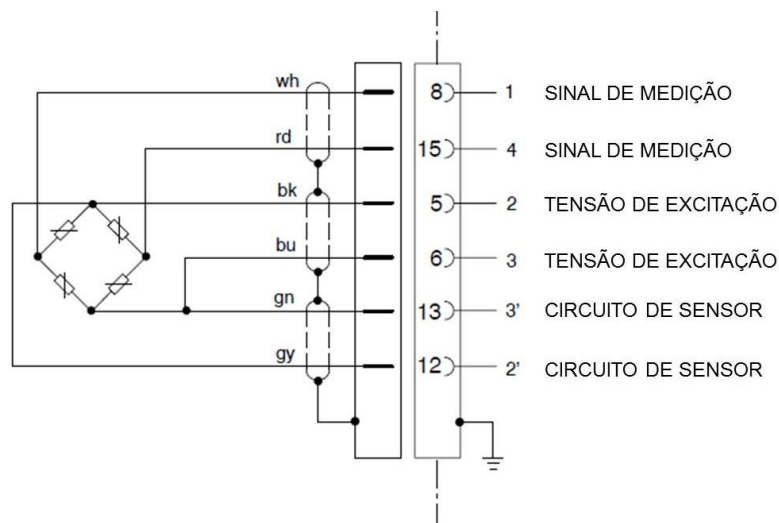


Figura 3.29 – Esquema de conexão da célula de carga (Adaptado de HBM, 2003)

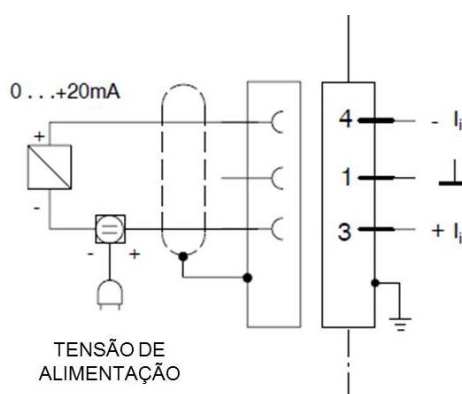


Figura 3.30 – Esquema de conexão dos 3 transdutores de pressão (Adaptado de HBM, 2003)

Depois de conectados, os sinais elétricos emitidos pelos sensores precisavam ser convertidos em unidade de carga (ou tensão, considerando a área do CP do CRD) para a célula de carga, em unidade de deslocamento para o LVDT e em unidade de pressão para o caso dos três transdutores.

Na calibração da célula de carga, foi utilizada outra célula rastreada. Os sinais lidos em mV/V foram convertidos em unidade de tensão, considerando a leitura percebida pela célula de carga e a área do CRD (Figura 3.31). A calibração do LVDT foi realizada a partir de um micrômetro, cuja leitura dos sinais elétricos foi configurada com *range* de 500 mV (Figura 3.32).

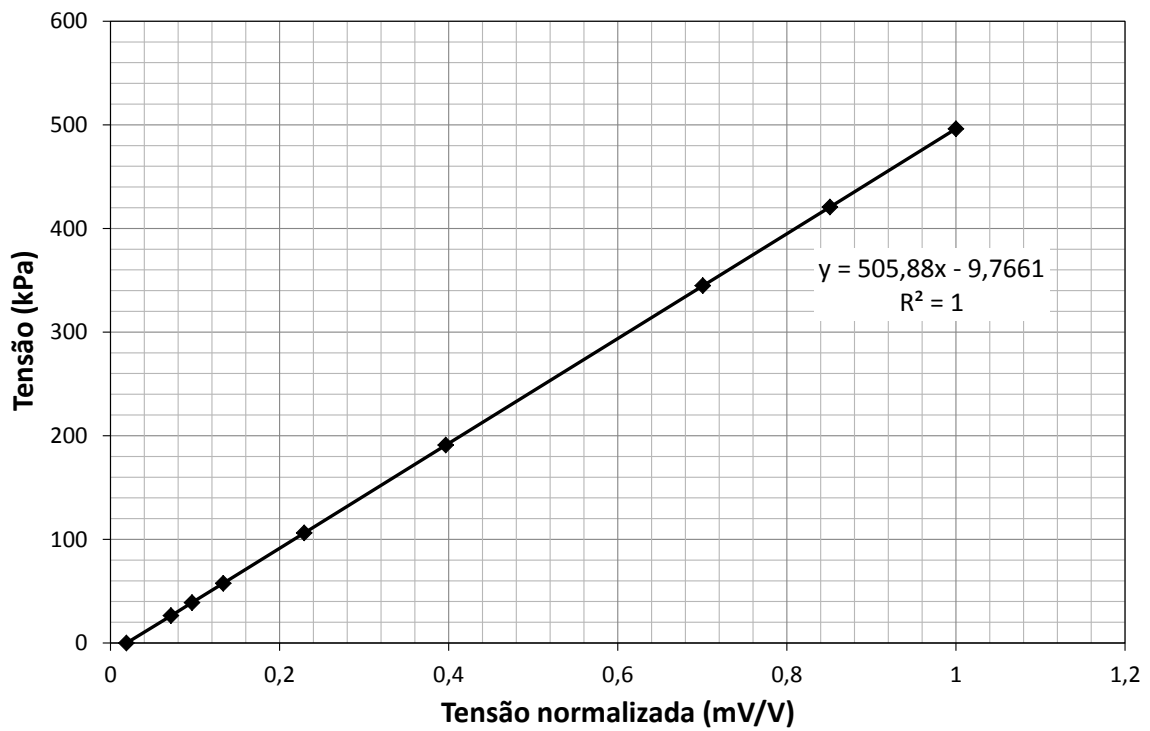


Figura 3.31 – Curva de calibração da célula de carga

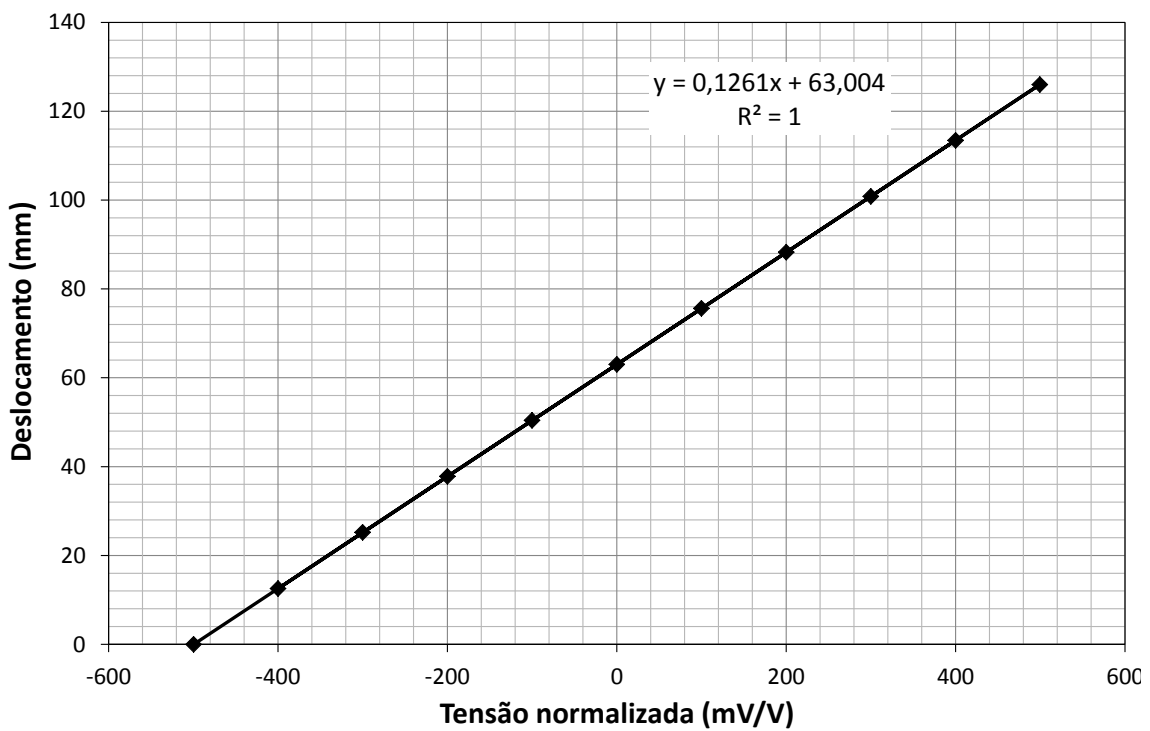


Figura 3.32 – Curva de calibração da célula do LVDT (potenciômetro)

Os três tradutores de pressão possuem o mesmo sinal de saída, em mA, com variação de 4 a 20 mA. Neste sentido a calibração dos equipamentos foi feita conjuntamente, com a câmara fechada e vários estágios de pressão através de um aplicador de um equipamento triaxial, recentemente calibrado. Neste sentido, a calibração foi restringida a 1200 kPa, capacidade máxima do transdutor T1. A curva de calibração dos transdutores é apresentada na Figura 3.33.

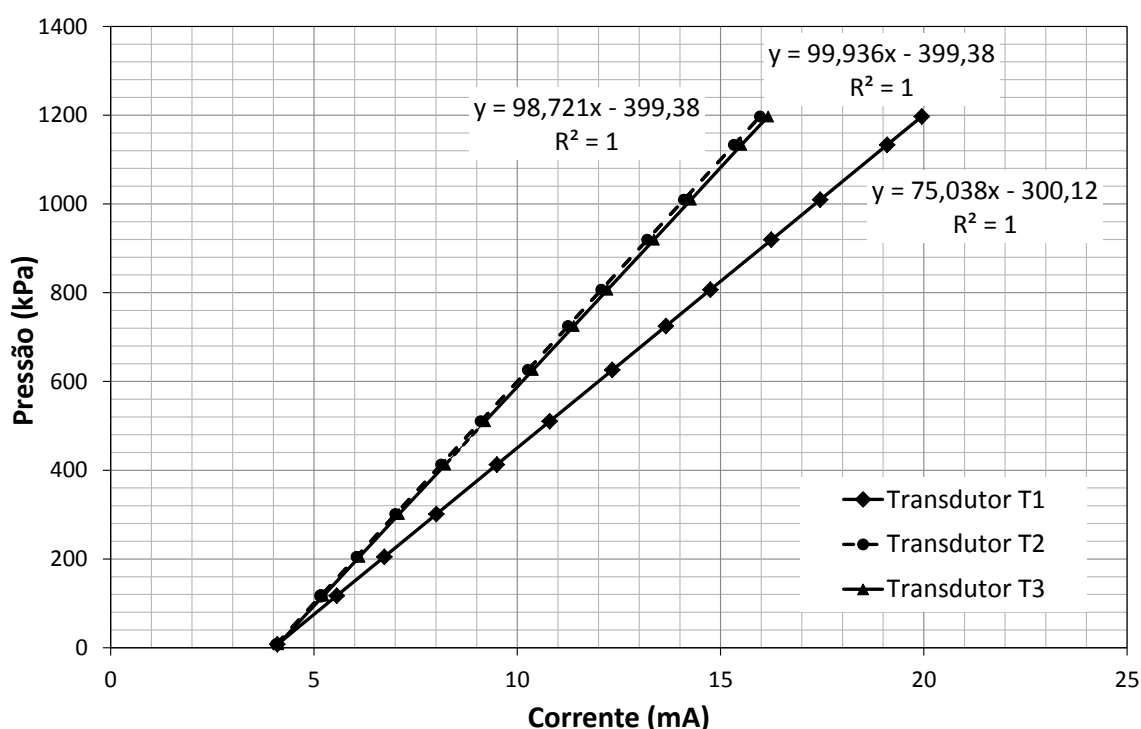


Figura 3.33 – Curva de calibração dos transdutores de pressão T1, T2 e T3

Concluída a etapa de calibração dos sensores, tanto as curvas quanto os dados obtidos na calibração poderiam ser utilizados na configuração do *software* responsável pelo registro e gravação dos dados. O *software* utilizado foi o *Catman Professional 6.0*, cedido ao CTGA pela *HBM* do Brasil. O *Catman* é um *software* para aquisição de dados (*DAQ - data acquisition*) que permite a visualização, análise e gravação dos dados durante a medição e posterior geração de relatórios. Além de possuir interface intuitiva e adaptável, possibilita múltiplos formatos para gravação e exportação (Catman BIN, Excel, ASCII, MDF 3/4, DIAdem, MATLAB, RPC III, UFF58, etc.).

O dispositivo empregado na configuração da tela de ensaio do CRD consistiu inicialmente em inserir nos campos específicos as curvas de calibração dos diversos transdutores utilizados. Foram configuradas duas telas de ensaio: uma delas considerou o uso da célula de carga; a outra não incluiu a célula de carga. Esta última configuração foi a utilizada nos ensaios, visto que, durante os ensaios, não se justificou a aquisição da tensão aplicada, como será exposto adiante.

As Figuras 3.34 e 3.35 mostram, respectivamente, uma visão geral do equipamento, já com o sistema de aquisição de dados em funcionamento e as telas de configuração dos transdutores no *Catman 6.0*.

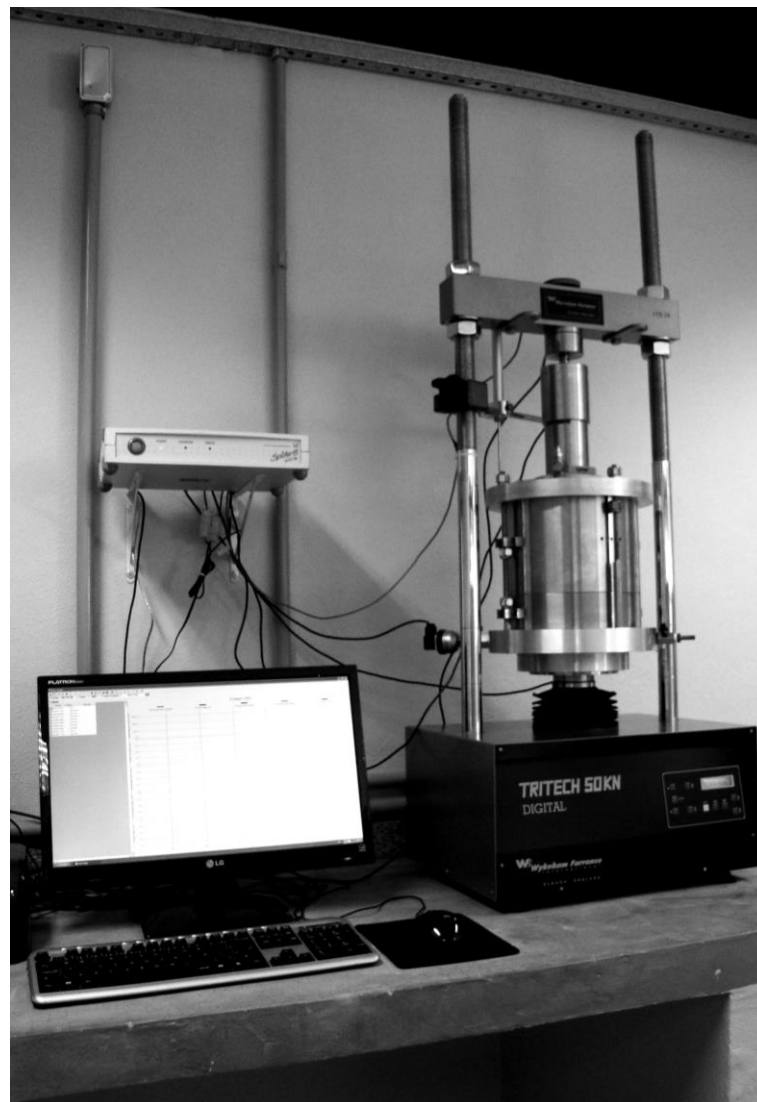


Figura 3.34 – Vista geral do CRD com o sistema de aquisição de dados

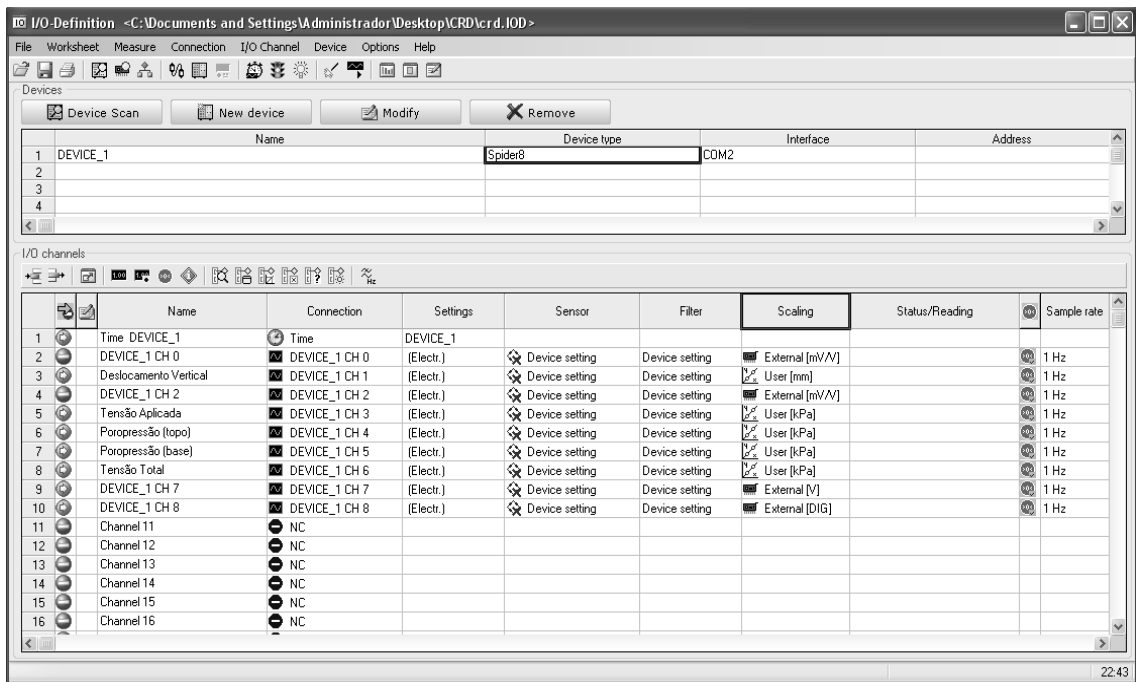




Figura 3.35 – Tela de configuração do dispositivo (fixação dos transdutores) e entrada dos parâmetros de calibração – *Catman 6.0*

Observa-se que os sensores foram conectados e configurados nos canais 1, 3, 4, 5 e 6, cujos dispositivos são destacados na Tabela 3.14. A frequência escolhida para todos foi de 1 Hz, conforme recomendação do fabricante.

Tabela 3.14 – Detalhamento da configuração do dispositivo específico para o ensaio CRD no *Catman 6.0*

Sensor	Canal	Configuração do sensor	Alcance da leitura do sensor
LVDT	1		500 mV/V
CC	3		3 mV/V
T1	4	$\frac{DC}{C}$	20 mA
T2	5	$\frac{DC}{C}$	20 mA
T3	6	$\frac{DC}{C}$	20 mA

O *datalogger* do *software* permite a customização de telas específicas do ensaio. Apesar dos cuidados tomados na adaptação e calibração da célula de carga (CC), conectada ao canal 3 do sistema, a configuração utilizada nos ensaios realizados considerou apenas a utilização do deslocamento vertical e das tensões registradas pelos três transdutores (tensão total, poropressão no topo e poropressão na base).

Observou-se que, nos primeiros ensaios, em função da vedação lateral do êmbolo da base do pistão, durante a compressão, as tensões registradas na célula de carga eram maiores do que aquelas percebidas no transdutor de tensão total. A vedação gerava um atrito na descida do mecanismo, falseando a leitura da tensão no topo. Uma possibilidade seria a calibração desta diferença, mas optou-se pela utilização somente do transdutor de tensão total.

Portanto, para a sequência dos ensaios que compõem o programa experimental desta tese, a célula de carga foi retirada da viga de reação da prensa e sequencialmente desativada na customização do *Catman 6.0*. A tela customizada (Figura 3.36) permitiu o acompanhamento do desenvolvimento das tensões e dos deslocamentos durante o ensaio. Após o registro, os dados foram exportados para o *Excel*.

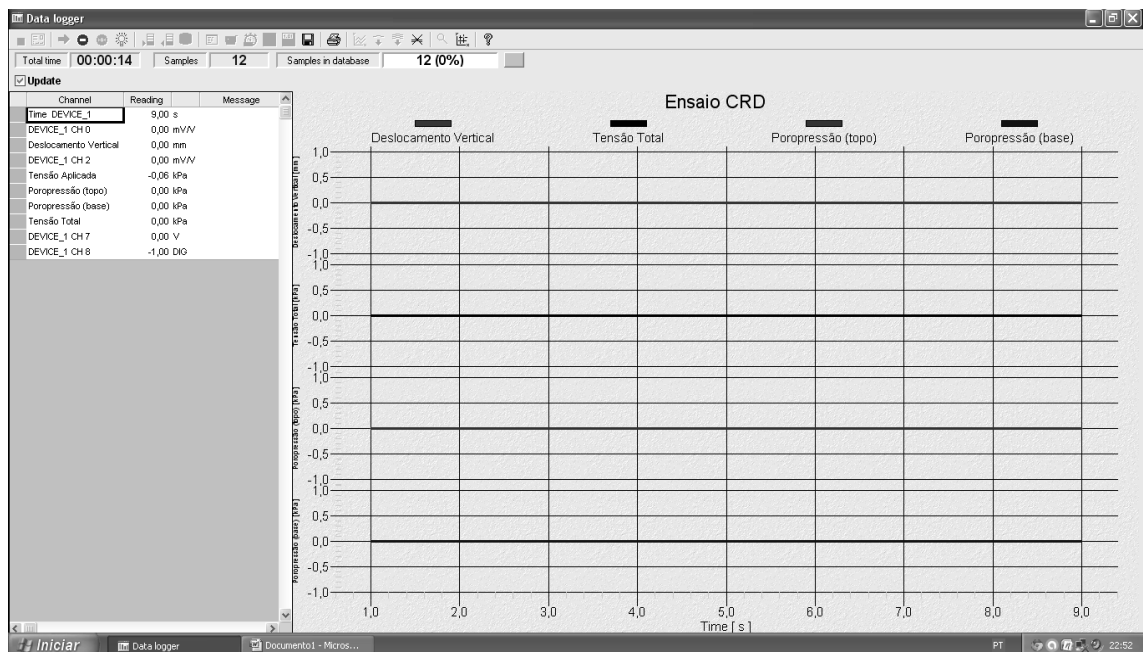


Figura 3.36 – Tela customizada para o CRD para visualização dos dados durante o ensaio – *Catman 6.0*

- **Programa de experimental**

O programa de ensaios com o equipamento desenvolvido envolveu três amostras do mesmo rejeito de fosfato (bombona 2), com proposta inicial da variação do teor de sólidos inicial e da velocidade de deformação. Como já foi visto anteriormente, no ensaio de sedimentação em coluna, o índice de vazios produzido (após a sedimentação) foi praticamente o mesmo. Portanto, a parametrização dos resultados foi reduzida na avaliação dos resultados observados em função da velocidade de compressão edométrica.

Um dos problemas históricos enfrentados nos ensaios com rejeitos finos é o processo de homogeneização da amostra e a sua representatividade. Como as amostras já estavam praticamente quarteadas nas bombonas enviadas ao laboratório, os próprios recipientes foram utilizados para mistura e homogeneização da lama. Para tanto, foi adaptado um misturador de tintas de haste longa (Figura 3.37a) a uma furadeira elétrica, realizando a homogeneização da cada amostra durante 10 minutos (Figura 3.37b). Para comprovação da efetividade do método, após a mistura, foram coletadas amostras em diferentes profundidades do recipiente e determinados os respectivos teores de umidade, que não tiveram oscilação significativa. Este procedimento foi realizado para todos os ensaios, inclusive para os experimentos de adensamento induzido por percolação (HCT), que será visto adiante.

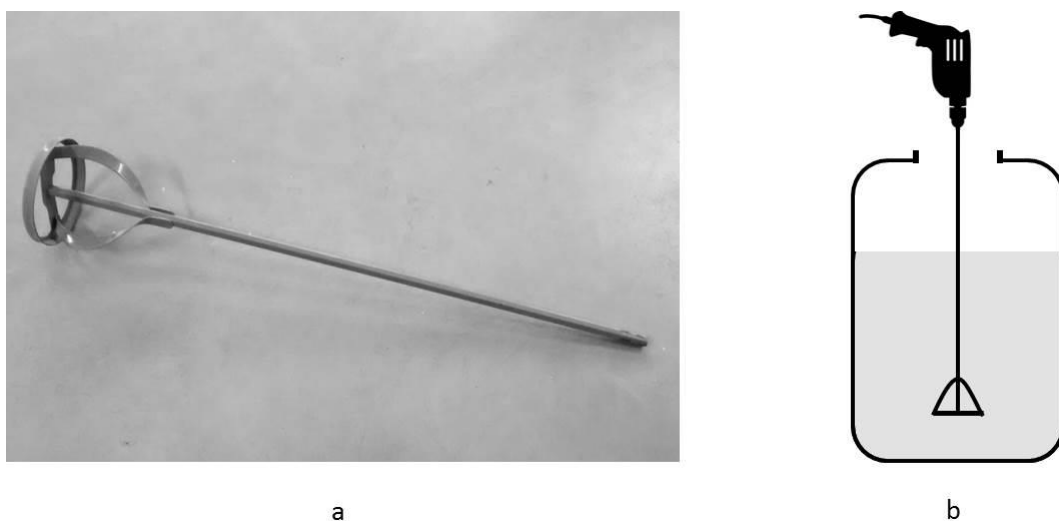


Figura 3.37 – Vista do misturador (a) e do processo de homogeneização da lama (b)

Antes da transferência do rejeito para o equipamento, o anel inferior da câmara foi devidamente encaixado e vedado para permitir a saturação da pedra porosa inferior. Acima da pedra porosa da base, foi colocado um disco de papel filtro, de forma a evitar a colmatção desta (Figura 3.38).



Figura 3.38 – Montagem do anel inferior para saturação da pedra porosa

Posteriormente, o anel superior foi introduzido. Destaca-se que, pela característica totalmente desmontável do equipamento, em todas as suas extremidades existiam anéis de vedação resistentes e, durante a montagem da câmara, todos os seus contatos foram devidamente lubrificados com vaselina sólida. No desenvolvimento do equipamento, foram projetadas barras roscáveis e porcas, que podem ser vistas na figura anterior, objetivando o seu fechamento, mas visando também facilitar a sua desmontagem, visto que, por se constituir de aço, a câmara possui um peso considerável.

A montagem do ensaio foi realizada com apoio de uma concha e de um recipiente, cujo conjunto (recipiente + concha + rejeito) foi pesado antes e após a transferência para a câmara do CRD (edômetro). Como se conhecia, previamente, o comportamento do

rejeito durante a sedimentação e o adensamento por peso próprio, obtido no ensaio de coluna, com a consideração do mesmo teor de sólidos, o volume de material transferido para o equipamento foi suficiente para que, após a estabilização desta primeira etapa, se atingissem alturas muito próximas, que foi torno de 6,6 cm. Esta altura já garantia condições de ensaio, visto que amostras com alturas elevadas demandariam um maior tempo de ensaio, além de não permitir a inserção e o devido encaixe do cabeçote e do pistão. Com a amostra restante contida no recipiente, foi determinado o teor de umidade com apoio de uma cápsula grande, objetivando maior representatividade no resultado.

As condições de moldagem para ensaios iniciais, destacando a etapa anterior à sedimentação e o adensamento por peso próprio, são mostradas na Tabela 3.15. Os índices de vazios iniciais foram calculados a partir do conhecimento das massas específicas dos grãos e seca, utilizando uma relação clássica da Mecânica dos Solos (Equação 3.5) e a altura de sólidos foi determinada com base na Equação 3.6.

Tabela 3.15 – Dados dos corpos de prova antes da sedimentação e adensamento por peso próprio (medidos e calculados)

Ensaio (amostra)	CP1	CP2
Altura inicial (cm):	15,7	15,7
Área inicial (cm ²):	364,74	364,74
Volume inicial (cm ³):	5.726,42	5.726,42
Massa inicial (g):	6.205,2	6.166,0
Teor de umidade inicial (%):	655,15	660,80
Teor de sólidos inicial (%):	13,24	13,14
Massa seca (g):	821,7	810,5
Massa específica inicial (g/cm ³):	1,08	1,08
Massa específica seca inicial - ρ_{di} (g/cm ³):	0,143	0,142
Massa específica dos grãos (g/cm ³):	2,306	2,306
Índice de vazios inicial - e_i :	15,070	15,293
Altura de sólidos (cm):	0,98	0,96

$$e_i = \frac{\rho_s}{\rho_{di}} - 1 \quad (3.5)$$

Sendo:

e_i : índice de vazios inicial;

ρ_s : massa específica dos grãos (g/cm³);

ρ_{di} : massa específica seca inicial (g/cm³);

$$H_s = \frac{M_s}{(\rho_s \cdot A)} \quad (3.6)$$

Sendo:

H_s : altura de sólidos (cm);

M_s : massa dos sólidos (massa seca) (g);

A : área da amostra – edômetro (cm²).

O tempo correspondente à etapa de sedimentação e adensamento por peso próprio foi de 13 dias (mesmo tempo utilizado nos ensaios de coluna). Após esta etapa inicial, a variação de altura da interface lama / água foi determinada com o auxílio de uma régua milimetrada, permitindo a determinação dos índices físicos para a condição de tensão de tensão efetiva nula (σ_0').

O índice de vazios após a sedimentação (índice de vazios correspondente a tensão efetiva nula) foi calculado considerando a Equação 3.7 e os dados são mostrados na Tabela 3.16.

$$e_{00} = e_i - \frac{\Delta H}{H_s} \quad (3.7)$$

Sendo:

e_{00} : índice de vazios associado à tensão efetiva nula;

ΔH : variação de altura da amostra durante etapa de sedimentação e adensamento por peso próprio (cm).

Tabela 3.16 – Dados dos corpos de prova após sedimentação e adensamento por peso próprio – σ_0 (medidos e calculados)

Ensaio (amostra)	CP1	CP2
Varição de altura medida - ΔH (cm):	9,0	9,1
Altura - H_0 (cm):	6,7	6,6
Volume - V_0 (cm ³):	2.323,2	2.288,5
Índice de vazios - e_{00} :	5,886	5,814
Massa específica seca (g/cm ³):	0,354	0,354

Depois de cada amostra sedimentada, o procedimento do ensaio seguiu uma rotina que contou com a inserção de um papel filtro sobre a superfície superior do rejeito e, posteriormente, o cabeçote, cuja base continha uma pedra porosa. O dispositivo foi lubrificado lateralmente com o uso de vaselina sólida e também colocado, sendo apoiado sobre o material sedimentado. Esta fase foi conduzida com especial atenção, deixando o cabeçote descer lentamente, de forma a não perturbar a amostra, preservando a condição de índice de vazios para a tensão efetiva nula.

Para o devido fechamento da câmara do equipamento, o seu topo foi montado e o pistão apoiado sobre o cabeçote. A complementação da água foi realizada com o líquido sobrenadante, proveniente de outra bombona (a água utilizada foi a do próprio rejeito). Para tanto, foram utilizados os acessos pelos registros R1 e R2 e, para garantia da saturação do canal que levava o líquido até o transdutor T1, a sangria próxima ao sensor foi também aberta.

- **Apresentação e discussão preliminar dos resultados**

Como não se conhecia, *a priori*, o comportamento do rejeito quando submetido à compressão sob deformação controlada, em termos da velocidade de deformação, foram adotadas inicialmente as taxas de 0,075 mm/min e 0,150 mm/min para as corpos de prova (CP's) 1 e 2, respectivamente. As velocidades foram introduzidas na própria prensa digital. Os dados iniciais de cada ensaio conduzido são apresentados na Tabela 3.17. O índice de vazios final e os índices de vazios calculados ao longo de cada ensaio foram determinados pela relação entre a variação de altura da amostra para um tempo t e a altura de sólidos já conhecida (Equação 3.8)

$$e_t = e_{00} - \frac{\Delta H_t}{H_s} \quad (3.8)$$

Sendo:

e_t : índice de vazios para um tempo t ;

ΔH_t : diferença entre a altura inicial da amostra e a altura medida para um tempo t (cm).

Tabela 3.17 – Dados de entrada e obtidos nos ensaios iniciais de CRD

Ensaio (corpo de prova)	CP1	CP2
Velocidade de deformação - v (mm/min):	0,075	0,150
Teor de umidade inicial - w_i (%):	250,36	247,30
Teor de sólidos inicial - ψ_i (%):	28,54	28,79
Varição de altura final - ΔH (mm):	37,6	37,4
Deformação final (%):	56,14	56,64
Tensão total final na base - σ_b (kPa):	1005,73	1005,68
Poropressão final na base - u_b (kPa):	27,22	47,04
Índice de vazios final - e_f :	2,048	1,921

As tensões efetivas durante a compressão edométrica foram calculadas com a consideração da metodologia proposta por Lima (1996), expressas em função de valores médios (Equação 3.9). No tratamento dos dados, no entanto, foi aplicado um ajuste que será detalhado adiante. A sequência das curvas tensão total, tensão efetiva e poropressão *versus* tempo são apresentadas nas Figuras 3.39 e 3.40.

$$\sigma'_m = \sigma_b - \frac{2}{3} \cdot u_b \quad (3.9)$$

Sendo:

σ'_m : tensão efetiva média (kPa);

σ_b : tensão total medida na base (kPa);

u_b : poropressão medida na base (kPa).

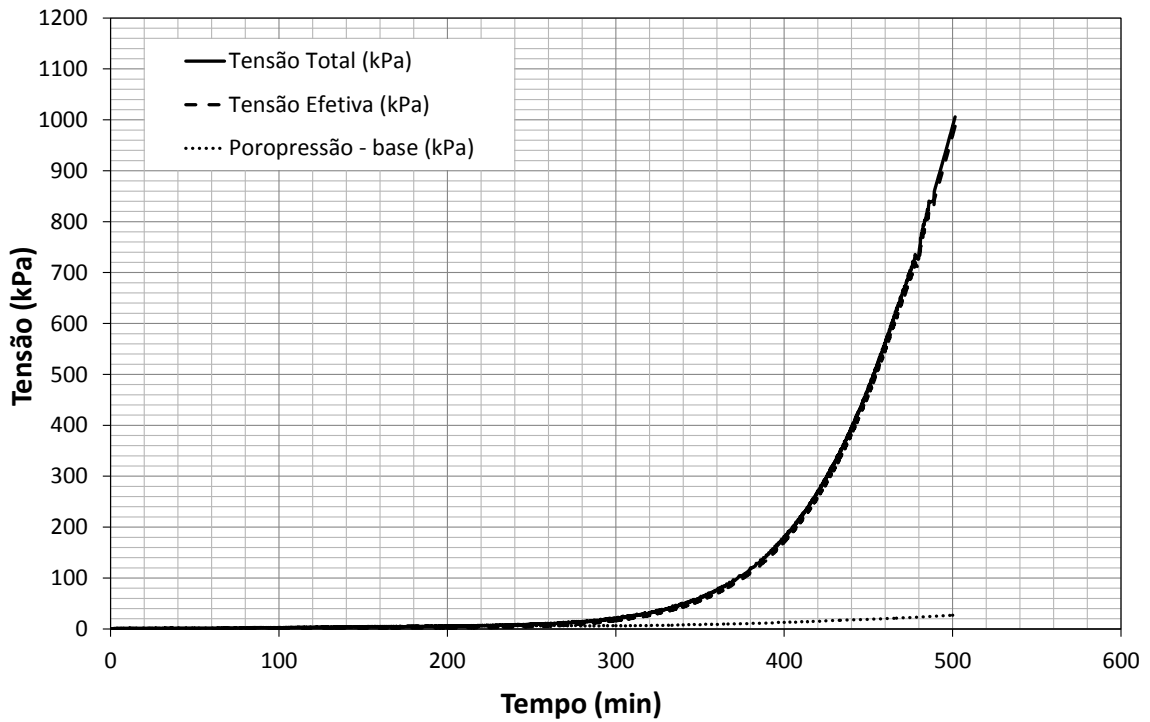


Figura 3.39 – Curvas tensão total, tensão efetiva e poropressão *versus* tempo para o corpo de prova CP1 ($v = 0,075$ mm/min)

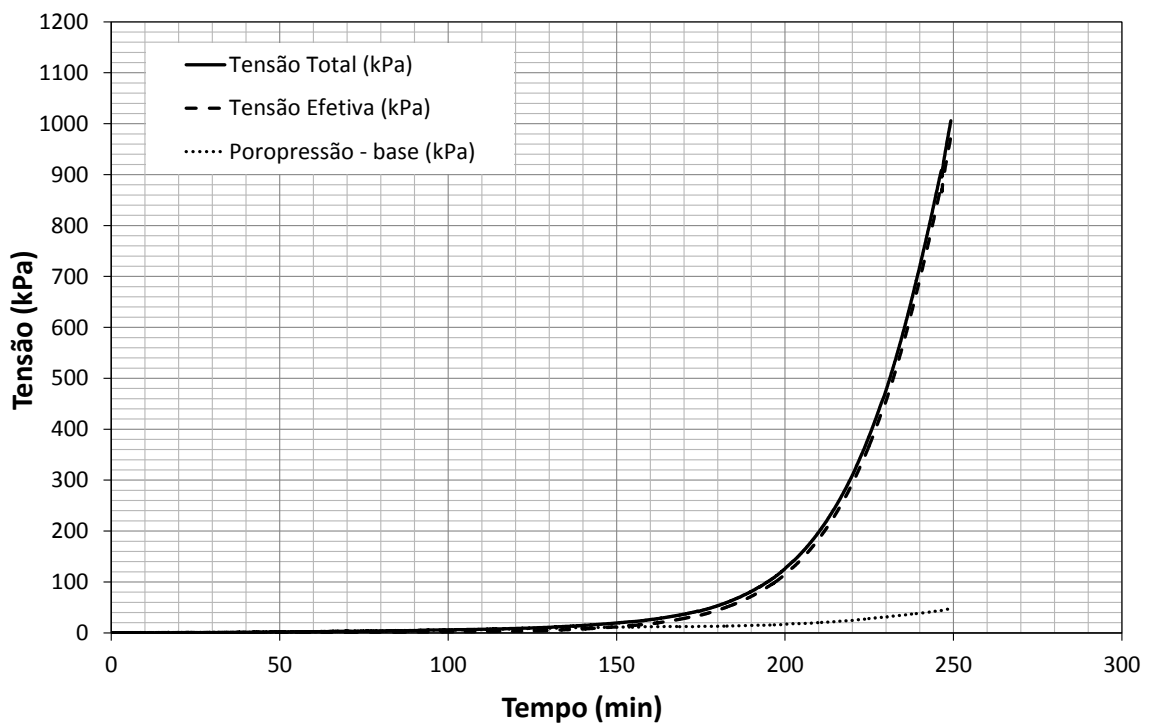


Figura 3.40 – Curvas tensão total, tensão efetiva e poropressão *versus* tempo para o corpo de prova CP2 ($v = 0,150$ mm/min)

A velocidade de ensaio é uma variável significativa para obtenção de curvas satisfatórias, no que tange o comportamento do rejeito em termos de compressibilidade. A literatura técnica, dentre as diversas publicações relacionadas ao ensaio do tipo CRD, não destaca um critério bem definido para o cálculo das velocidades. Sabe-se que a velocidade deve ser inicialmente baixa, para garantia de uma considerável variação do índice de vazios durante os ensaios, mas também suficientemente elevada, visando a geração de poropressões representativas, em torno de 30 a 40% da tensão total na base (Znidarcic *et al.*, 1986).

Moura (2004), em desenvolvimento de um equipamento tipo CRS, destacou outras referências associadas a diferentes velocidades adotadas no ensaio (Crawford, 1964; Crawford, 1965; Wahls e Degodoy, 1965; Smith e Wahls, 1969; Wissa *et al.*, 1971).

Crawford (1964), em estudo da influência da velocidade de deformação, apresentou dados oriundos de ensaios nos quais se adotaram valores de velocidade de deformação entre 0,02 mm/min e 0,045 mm/min. Neste caso, as poropressões registradas atingiram valores máximos de 5% a 8% da tensão vertical. Adicionalmente, Crawford (1965) apresentou resultados de ensaios CRS, onde as poropressões máximas registradas foram da ordem de 15% da tensão vertical aplicada, cujas velocidades comportaram-se entre 0,0005 mm/min e 0,025 mm/min.

Também em ensaios tipo CRS, em amostras amolgadas, Wahls e Degodoy (1965) mediram poropressões máximas na base entre 25% e 75% da tensão vertical atuante, associadas a uma faixa de velocidade de deformação entre 0,01 mm/min a 0,045 mm/min.

Citado por Moura (2004), o trabalho de Smith e Wahls (1969) apresenta resultados obtidos no ensaio em amostras de argilas reconstituídas em laboratório a uma velocidade de deformação que variou numa faixa entre 0,0005 mm/min e 0,05 mm/min. Neste caso, para o tipo de material utilizado, a relação máxima entre a poropressão na base e a tensão vertical aplicada deveria ser estabelecida em 50%, pois, para valores superiores, as poropressões medidas na base seriam elevadas e não condicionariam a possibilidade de uma distribuição aproximadamente uniforme da tensão efetiva ao longo do corpo de prova. Os autores obtiveram melhores resultados para menores velocidades de deformação.

Wissa *et al.* (1971), citado por Villar *et al.* (2007), apresentaram um extenso estudo a respeito do ensaio CRS, no qual vários pesquisadores reconhecem a importância do trabalho realizado por esses autores. De acordo com Villar *et al.* (2007), a determinação da velocidade de deformação na qual o teste é executado dependerá do coeficiente de poropressão, que é como é chamada a relação entre o excesso de poropressão na base da amostra e a tensão total aplicada. Os autores destacam que as recomendações para este valor variam de 2 a 5% (Wissa *et al.* 1971) a 50% (Smith & Wahls, 1969).

No presente trabalho, nas curvas apresentadas, as poropressões geradas, registradas pelo transdutor da base do equipamento, foram relativamente baixas, comparadas com a tensão total. Pelas curvas mostradas na figura anterior, as poropressões geradas no final do ensaio, associadas às velocidades de 0,075 mm/min (CP1), 0,150 mm/min (CP2) são, respectivamente, iguais a 27,22 e 47,4 kPa. Em relação às últimas tensões totais medidas, cujos valores são de 1005,73 e 1005,68 kPa, as poropressões representam 2,71 e 4,65%, para os corpos de prova 1 e 2, respectivamente.

Após verificar esta condição, para as duas velocidades, optou-se pela realização de um terceiro ensaio com uma velocidade bem mais elevada, de 0,750 mm/min, cujos dados são expostos na Tabela 3.18, 3.19 e 3.20 e as curvas tensão total *versus* tempo, tensão efetiva *versus* tempo e poropressão *versus* tempo, na Figura 3.41.

Tabela 3.18 – Dados do CP3 antes da sedimentação e adensamento por peso próprio (medidos e calculados)

Ensaio (amostra)	CP3
Altura inicial (cm):	15,7
Área inicial (cm ²):	364,74
Volume inicial (cm ³):	5.726,42
Massa inicial (g):	6.235,3
Teor de umidade inicial (%):	651,12
Teor de sólidos inicial (%):	13,31
Massa seca (g):	830,1
Massa específica inicial (g/cm ³):	1,09
Massa específica seca inicial - ρ_{di} (g/cm ³):	0,145
Massa específica dos grãos (g/cm ³):	2,306
Índice de vazios inicial - e_i :	14,903
Altura de sólidos (cm):	0,99

Tabela 3.19 – Dados do CP3 após sedimentação e adensamento por peso próprio – σ_0

Ensaio (amostra)	CP3
Varição de altura medida - ΔH (cm):	8,9
Altura - H_0 (cm):	6,8
Volume - V_0 (cm ³):	2.480,2
Índice de vazios - e_{00} :	5,913
Massa específica seca (g/cm ³):	0,334

Tabela 3.20 – Dados de entrada e obtidos nos ensaios iniciais de CRD – CP3

Ensaio (corpo de prova)	CP3
Velocidade de deformação - v (mm/min):	0,750
Teor de umidade inicial - w_i (%):	251,55
Teor de sólidos inicial - ψ_i (%):	28,45
Varição de altura final - ΔH (mm):	37,38
Deformação final (%):	54,98
Tensão total final na base – σ_b (kPa):	1004,28
Poropressão final na base – u_b (kPa):	271,43
Índice de vazios final - e_f :	2,138

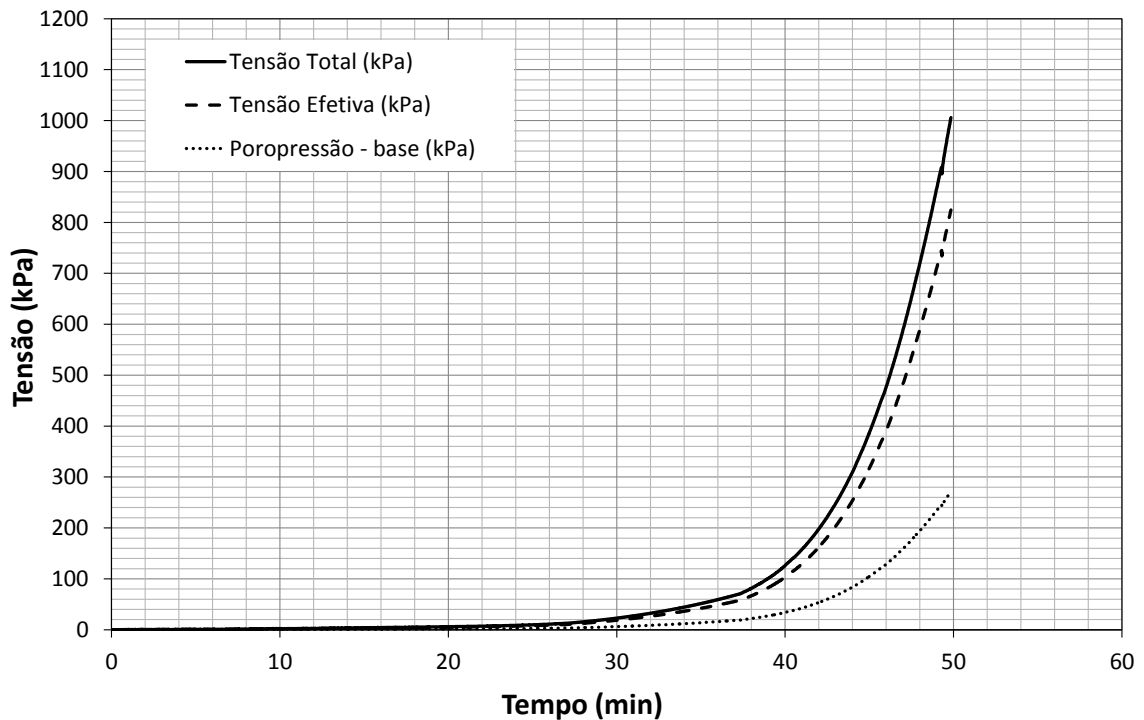


Figura 3.41 – Curvas tensão total, tensão efetiva e poropressão *versus* tempo para o corpo de prova CP3 ($v = 0,750$ mm/min)

Nota-se, pela representação das curvas tensão total, tensão efetiva e poropressão *versus* tempo, para a maior velocidade, uma elevação dos valores de poropressão. Os valores atingiram, em relação à tensão total, uma taxa de 27,03%, associada à poropressão final de 271,43 kPa.

Para a construção das curvas de compressibilidade e permeabilidade, foram usadas as Equações simplificadas propostas por Lima (1996), cuja determinação das tensões efetivas médias em função dos índices de vazios foi realizada através da Equação 3.7 já destacada. A construção das curvas de permeabilidade também foi simplificada, sendo estimada pela Equação 3.10.

$$k_m = \frac{v \cdot H_t \cdot \gamma_w}{2 \cdot u_b} \quad (3.10)$$

Sendo:

k_m : permeabilidade média (m/s);

v : velocidade de compressão edométrica (m/s);

H_t : altura da amostra e a altura medida para um tempo t (m);

γ_w : peso específico da água (kN/m³);

u_b : poropressão na base (kPa).

Com as relações expressas pelas Equações 3.9 e 3.10, torna-se possível a obtenção das características de compressibilidade e permeabilidade para os corpos de prova estudados. Por outro lado, a elevada dispersão dos dados, como no exemplo mostrado na Figura 3.42, não permite a construção de boas curvas. Isso ocorre por se tratar de dados experimentais, com uma grande nuvem de pontos, especialmente aqueles iniciais. Neste sentido, como uma nova proposta de tratamento dos dados, os pontos iniciais de poropressão e tensão efetiva, obtidos pelo sistema de aquisição, foram ajustados matematicamente por um programa computacional denominado *LAB Fit*, que trabalha em ambiente *Windows* e foi desenvolvido exclusivamente para tratamento e análise de dados experimentais, inclusive dados não similares (Silva *et al.*, 2004).

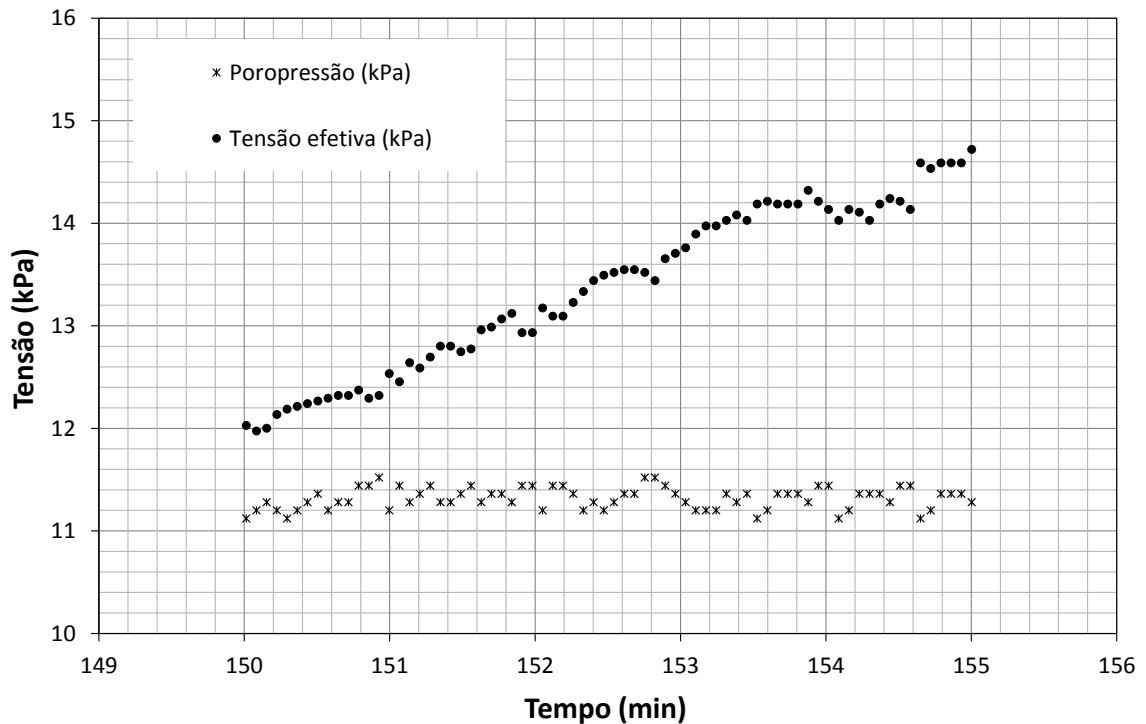


Figura 3.42 – Exemplo da dispersão dos pontos de tensão efetiva e poropressão na base para um trecho do ensaio com a velocidade de 0,150 mm/min

O *LAB Fit* realiza ajustes de funções através de regressão não linear aplicada de forma iterativa, até que um critério de convergência seja atingido. Como o processo iterativo é muito instável em termos computacionais, o algoritmo de *Levenberg-Marquardt* foi a opção utilizada pelos autores do programa para contornar a maioria dos problemas de divergência que ocorrem quando os valores iniciais estipulados pelo usuário não forem muito adequados (Silva *et al.*, 2004). O uso do programa foi gentilmente autorizado pelos autores.

O *LAB Fit* é bastante didático, do ponto de vista de utilização (plataforma amigável), e ajusta as funções partindo do pressuposto de que se trata de uma função não linear dos parâmetros, com diversas variáveis independentes. Neste sentido, até para casos mais simples, envolvendo, por exemplo, uma função linear com apenas uma variável independente, o tratamento dado é o mesmo para o caso mais geral. O melhor ajuste para os pontos, tanto para a tensão efetiva quanto para aqueles associados às poropressões geradas, se deu numa equação que envolve 4 parâmetros (*A*, *B*, *C* e *D*), sendo expressa da seguinte forma (Equação 3.11):

$$\sigma'_{ma}, u_{ba} = A \cdot t^{(B \cdot t + C \cdot t^2)} + D \cdot t \quad (3.11)$$

Sendo:

σ'_{ma} : tensão efetiva média ajustada (kPa);

u_{ba} : poropressão na base ajustada (kPa);

t : tempo (instante da aquisição) (min);

A, B, C e D : parâmetros obtidos no ajuste.

Em função da grande quantidade de dados obtidos pelo sistema de aquisição, foram selecionados cerca de 60 pontos para cada curva, representativos para o ajuste. Na simulação, os parâmetros obtidos para as tensões efetivas e poropressões são destacados nas Tabelas 3.21 e 3.22, respectivamente. As curvas construídas a partir dos ajustes são mostradas nas Figuras 3.43, 3.44 e 3.45.

Tabela 3.21 – Parâmetros de ajuste das tensões efetivas

Parâmetro	CP1 (v = 0,075 mm/min)	CP2 (v = 0,150 mm/min)	CP3 (v = 0,750 mm/min)
A	$2,0199 \times 10^{-4}$	$1,1693 \times 10^{-4}$	$3,1280 \times 10^{-4}$
B	$8,6463 \times 10^{-3}$	$1,8622 \times 10^{-2}$	0,12363
C	$-7,3952 \times 10^{-3}$	$-2,8253 \times 10^{-5}$	$-9,6001 \times 10^{-4}$
D	$1,0975 \times 10^{-2}$	$3,1570 \times 10^{-2}$	0,36871

Tabela 3.22 – Parâmetros de ajuste das poropressões de base

Parâmetro	CP1 (v = 0,075 mm/min)	CP2 (v = 0,150 mm/min)	CP3 (v = 0,750 mm/min)
A	1,2914	$3,3312 \times 10^{-2}$	$1,1166 \times 10^{-4}$
B	$6,3009 \times 10^{-5}$	$4,8322 \times 10^{-3}$	0,12270
C	$1,6687 \times 10^{-6}$	$7,7338 \times 10^{-7}$	$-9,4949 \times 10^{-4}$
D	$1,3238 \times 10^{-2}$	$5,6410 \times 10^{-2}$	0,11835

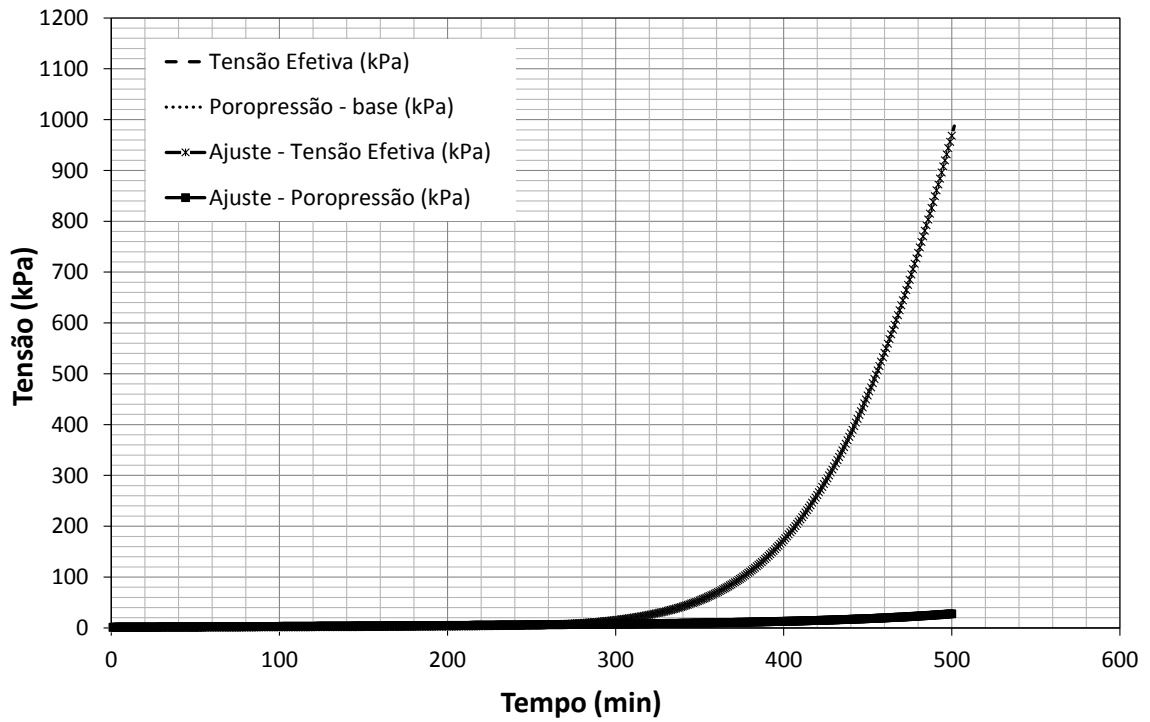


Figura 3.43 – Curvas tensão efetiva e poropressão *versus* tempo para os corpos de prova CP3 ($v = 0,075$ mm/min)

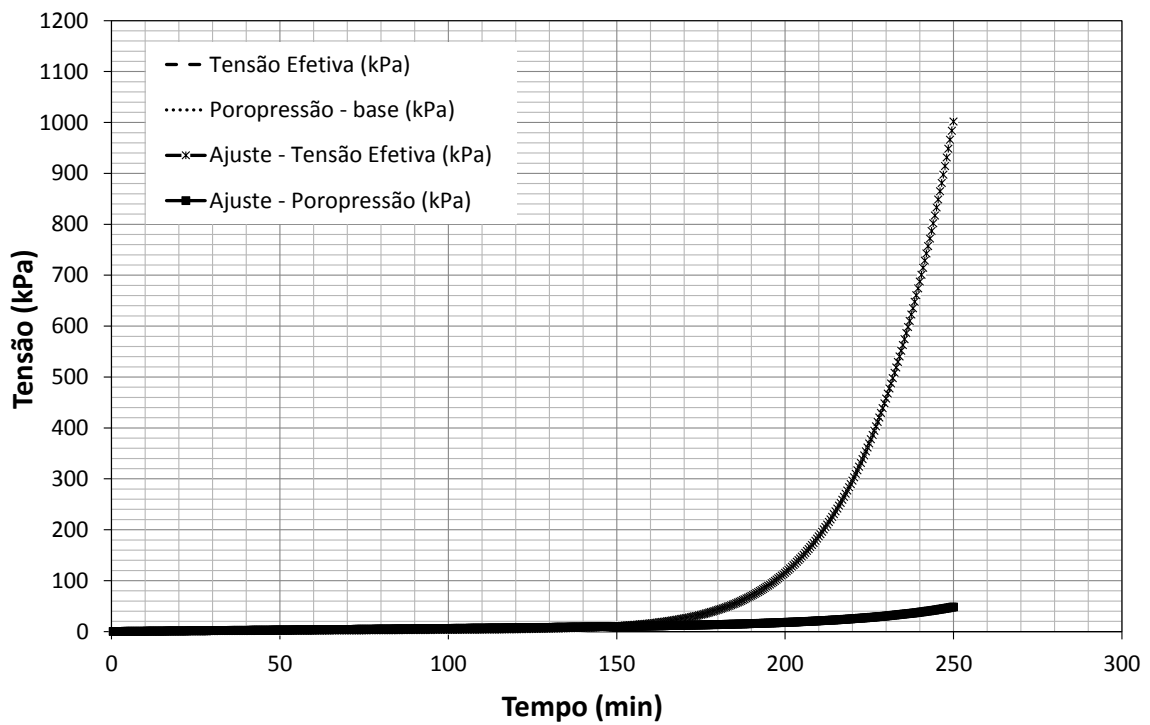


Figura 3.44 – Curvas tensão efetiva e poropressão *versus* tempo para os corpos de prova CP3 ($v = 0,150$ mm/min)

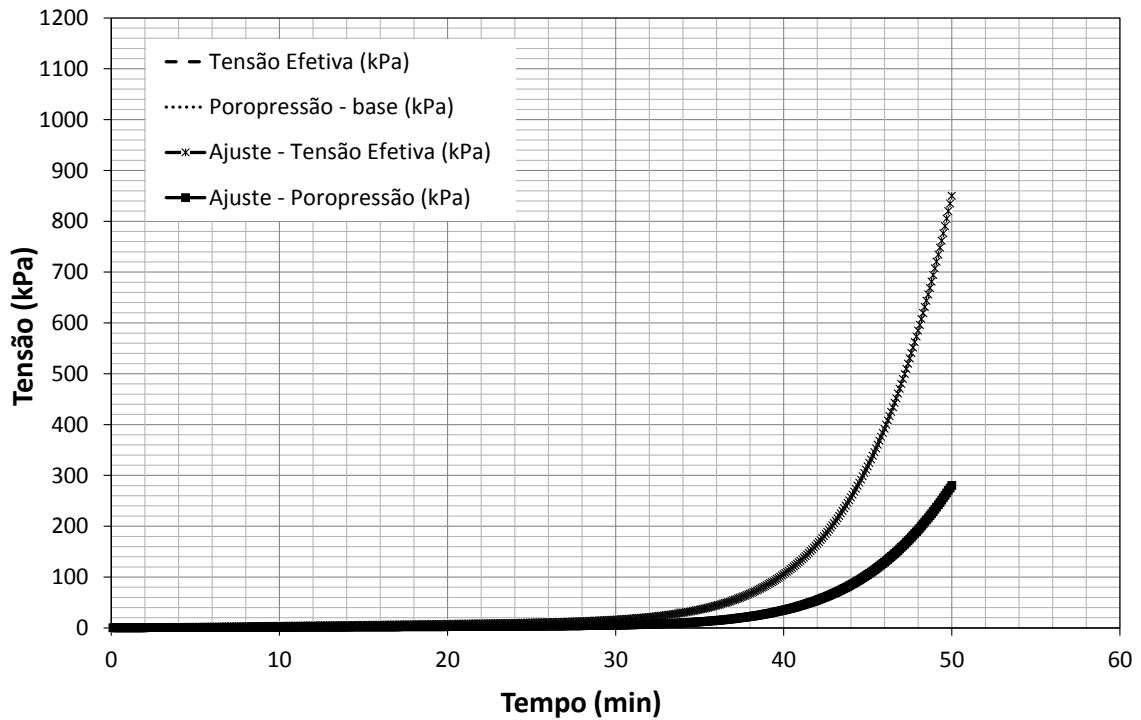


Figura 3.45 – Curvas tensão efetiva e poropressão *versus* tempo para os corpos de prova CP3 ($v = 0,750$ mm/min)

Para construção das curvas de compressibilidade e permeabilidade, além dos valores de tensão efetiva e poropressão, torna-se necessário o conhecimento dos diversos dos índices de vazios correspondentes durante a compressão edométrica. Considerando que a velocidade é constante durante o adensamento, torna-se viável a construção de relações entre os índices de vazios e os diversos tempos t , atribuídos para a construção das curvas ‘tensão efetiva e poropressão *versus* tempo’ (Figuras 3.43 a 3.45). Portanto, os valores experimentais de índices de vazios, assumidos pelas amostras durante o ensaio, foram correlacionados aos instantes de tempo correspondentes, obtendo-se os ajustes lineares para cada velocidade utilizada (Tabela 3.23 e Figura 3.46). As curvas de compressibilidade e permeabilidade são apresentadas nas Figuras 3.46 e 3.47.

Tabela 3.23 – Relações índice de vazios (e) *versus* tempo (t) para os corpos de prova

CP1 ($v = 0,075$ mm/min)	CP2 ($v = 0,150$ mm/min)	CP3 ($v = 0,750$ mm/min)
$e = -0,0077 \cdot t + 5,886$	$e = -0,156 \cdot t + 5,815$	$e = -0,0758 \cdot t + 5,914$

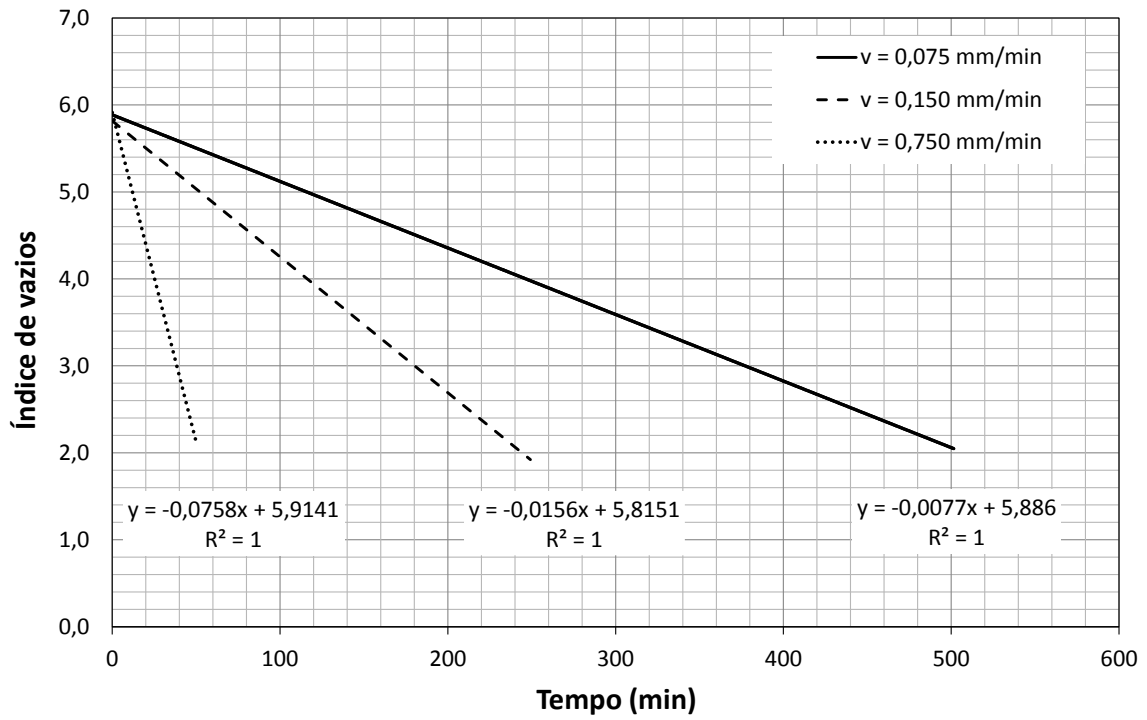


Figura 3.46 – Curvas tempo *versus* índice de vazios para as diferentes velocidades de ensaio (CP1, CP2 e CP3)

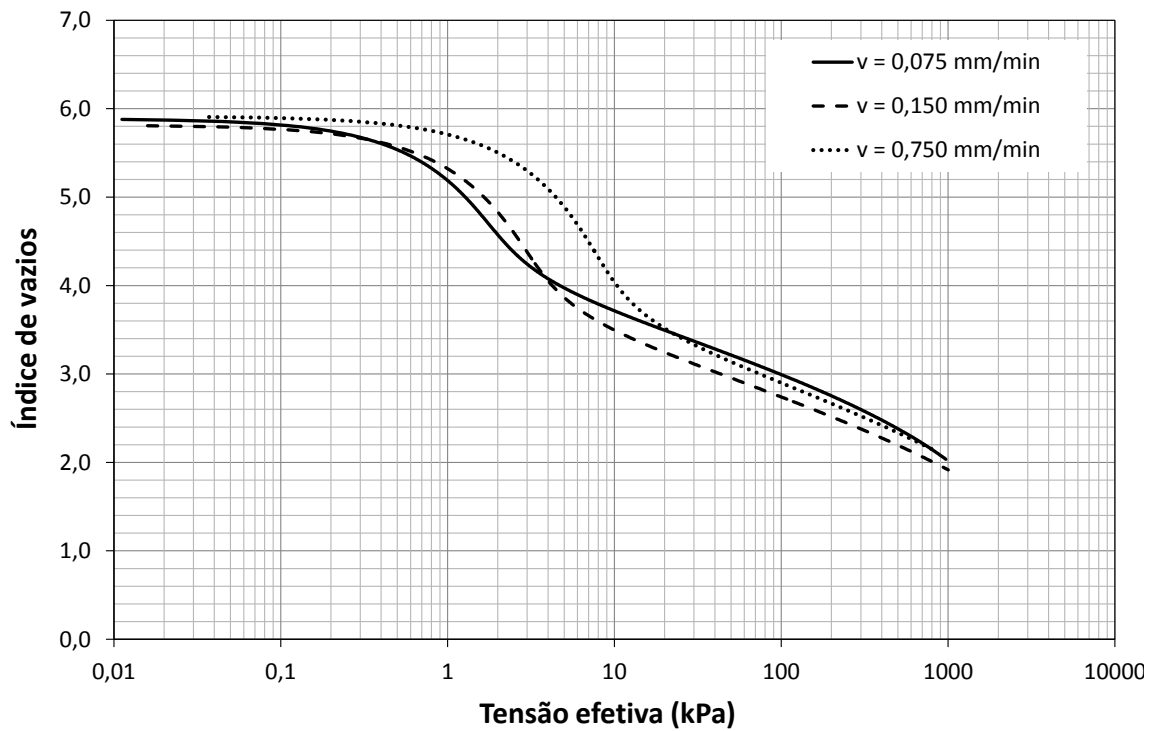


Figura 3.47 – Curvas de compressibilidade obtidas (CP1, CP2 e CP3) - ensaio CRD

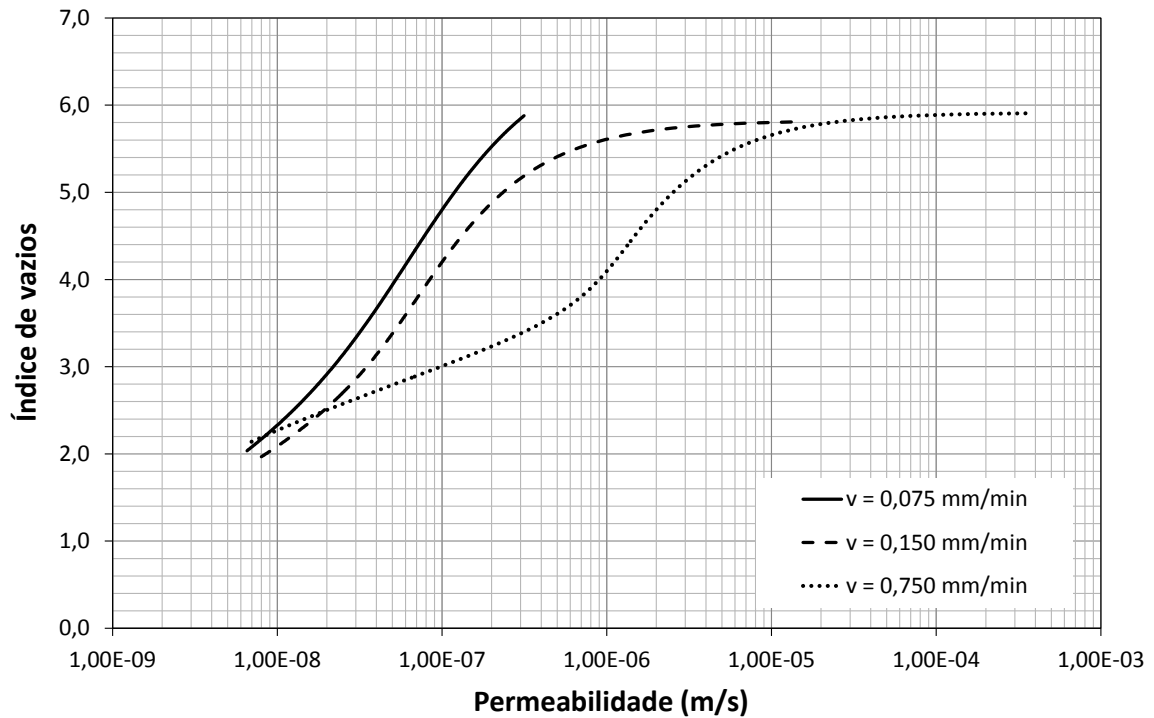


Figura 3.48 – Curvas de permeabilidade obtidas (CP1, CP2 e CP3) - ensaio CRD

A Figura 3.47, que mostra as curvas tensão efetiva *versus* índice de vazios, para as três velocidades trabalhadas, apresentam comportamentos, em termos de compressibilidade, muito próximos. Destaca-se que para as velocidades mais baixas (0,075 e 0,150 mm/min), as curvas aproximaram-se ainda mais quando comparadas à velocidade de 0,750 mm/min. Esta última, no entanto, também se aproximou das outras para tensões efetivas superiores a 10 kPa.

Em termos de permeabilidade, percebe-se uma discrepância maior entre as curvas, apesar de apresentarem tendências similares. Para um mesmo índice de vazios, as amostras ensaiadas com uma maior taxa de deformação apresentaram maior permeabilidade. A princípio, este comportamento pode ser explicado pelo fato de que o seu valor é diretamente proporcional à velocidade de deformação e inversamente proporcional à poropressão gerada na base. Como as poropressões são mais elevadas somente no final do ensaio, neste instante a permeabilidade assume menores valores, com a consequente aproximação das curvas. Uma avaliação mais efetiva será realizada no Capítulo 5, quando os resultados serão comparados aos ensaios de campo e aos demais ensaios de laboratório realizados.

3.4.3 Ensaio de adensamento induzido por percolação (HCT)

O ensaio HCT (*Hydraulic Consolidation Test*) é baseado no princípio do adensamento pela força de percolação e foi proposto por Imai (1979), como já destacado no Capítulo 2. O experimento consiste na submissão de um corpo de prova ao fluxo induzido, ficando este sujeito a forças de percolação, que serão responsáveis pelo adensamento, que ocorre, neste caso, para baixos níveis de tensão efetiva.

O equipamento utilizado para a realização dos ensaios de adensamento por percolação induzida nessa pesquisa, pertencente ao CTGA/NUGEO, é composto por dispositivos que incluem célula triaxial modificada, bomba de fluxo, painel de controle de pressão, transdutor diferencial de pressão, sistema de aplicação de carregamento com dispositivo de medida das deformações verticais e um sistema de aquisição de dados.

O aparato foi inicialmente implementado na instituição por Botelho (2001) e, posteriormente, otimizado por Cançado (2010). A descrição sintética das intervenções no equipamento foi também realizada no Capítulo 2.

- **Programa de experimental**

A amostragem para o ensaio consistiu nos rejeitos oriundos da bombona 2, a mesma utilizada nos ensaios tipo CRD. Neste ensaio, foram utilizadas duas velocidades de fluxo e quatro amostras, para um único teor de sólidos, o mesmo contido da amostra original. Antes, porém, da transferência da amostra, a câmara foi devidamente encaixada na base do pedestal e preenchida com água destilada e deaerada e todas as linhas foram saturadas. Este procedimento foi realizado por fluxo ascendente, com a água dos reservatórios localizados no painel.

As seringas da bomba de fluxo foram também preenchidas com água e encaixadas no equipamento. Visando eliminar todas as bolhas de ar existentes na tubulação, ainda com a câmara contendo água, a bomba de fluxo foi colocada em operação, com repetidas reversões. Desta forma, as bolhas de ar, porventura existentes nas linhas, eram dissipadas através do encaminhamento para o reservatório do painel de controle. O fluxo da água destilada só foi interrompido após a completa saturação de todas as linhas.

Como procedimento posterior, a câmara foi esvaziada por um sifão auxiliar, sendo deixada apenas uma lâmina d'água sobre a pedra porosa da base. Esta técnica visou garantir a manutenção da saturação da pedra porosa e de todo o sistema. Sobre a pedra, foi apoiado um papel filtro e a preparação da amostra seguiu o mesmo procedimento realizado no ensaio CRD.

A homogeneização foi realizada com o uso de misturador de tintas de haste longa e a moldagem da amostra também seguiu o mesmo roteiro do CRD, só que agora com uso de um funil, visto as menores dimensões da câmara. Assim, foi efetivada com apoio de uma concha e de um recipiente, cujo conjunto (recipiente + concha + rejeito + funil) foi pesado antes e após a transferência para a câmara. O material restante no recipiente, em quantidade suficiente, foi utilizado para dois outros procedimentos: verificação do teor de umidade inicial da amostra (moldagem) e determinação do índice de vazios para tensão efetiva nula (e_{00}).

Para obtenção do índice de vazios para tensão efetiva nula (e_{00}), etapa importante na condução do ensaio, utilizaram-se dois procedimentos, possibilitando a comparação dos valores obtidos por ambos. O primeiro procedimento consistiu na utilização dos resultados dos ensaios da coluna de sedimentação. Neste caso, foi observada a altura inicial da lama na coluna, bem como a altura após a sedimentação. Conhecendo-se as condições iniciais e a variação de altura, tornou-se possível a aquisição do valor de e_{00} .

O outro método utilizado foi proposto por Cançado (2010), que consistiu na construção de um dispositivo auxiliar e adoção de procedimento experimental específico. Para obtenção do índice de vazios para tensão efetiva nula (e_{00}), neste caso, utilizou-se uma câmara auxiliar com as mesmas dimensões da original, de forma a reproduzir as mesmas condições de montagem da amostra para o ensaio HCT, ou seja, um novo corpo de prova, no mesmo teor de sólidos e mesma altura, foi montado e deixado em repouso pelo mesmo período do CP principal. Neste caso, também foram utilizados 13 dias, para que o rejeito fosse submetido aos estágios de sedimentação e adensamento por peso próprio (Figuras 3.49 e 3.50). Adicionalmente, buscado a verificação do valor de e_{00} obtido neste último, foi ainda utilizado um béquer de 200 mL. Com a aproximação entre os resultados obtidos na coluna de sedimentação e câmara auxiliar, esta foi adotada referência para os outros ensaios.

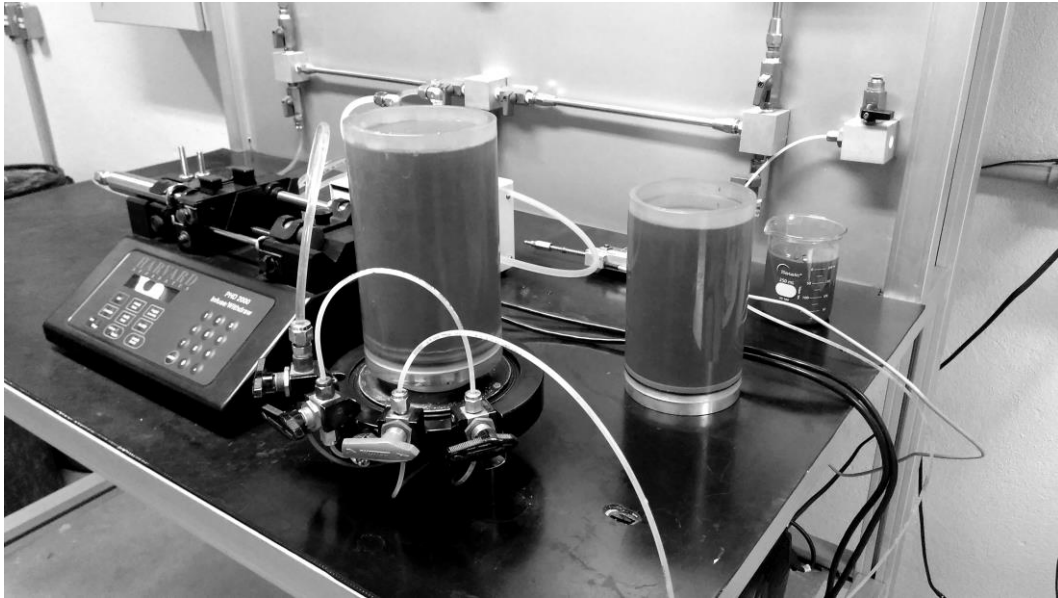


Figura 3.49 – Detalhe das amostras nas câmaras principal e auxiliar no início do processo de sedimentação e adensamento por peso próprio

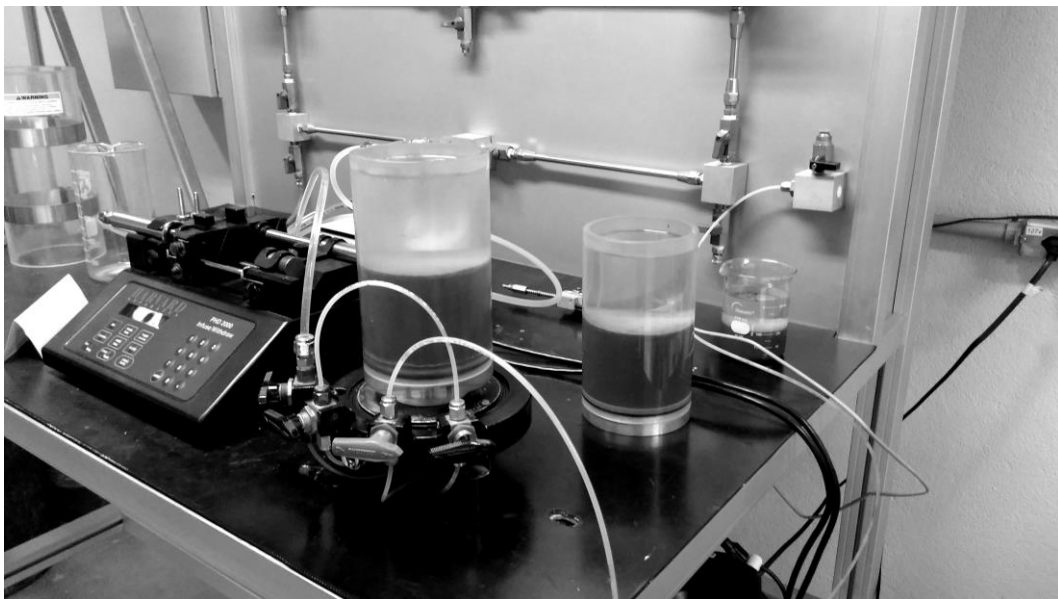


Figura 3.50 – Detalhe das amostras nas câmaras principal e auxiliar no final do processo de sedimentação e adensamento por peso próprio

Depois de decorridos os 13 dias, a água sobrenadante da câmara auxiliar e no béquer foi removida com o uso de uma espécie de sifão (através de uma mangueira fina) e uma seringa de borracha (para a região próxima à amostra). A amostra em lama sedimentada

foi transferida para um prato metálico, visando a consequente determinação do teor de umidade em estufa. No caso da amostra principal, a água não foi removida, mas a altura do rejeito sedimentado foi verificada, visando a posterior determinação da altura de sólidos (H_s). Ressalta-se que índice de vazios para tensão efetiva nula (e_{00}), por este procedimento, foi obtido a partir do conhecimento do teor de umidade da amostra sedimentada na câmara auxiliar, e foi adotado como dado de entrada do *software* responsável pelas análises.

Voltando à câmara principal, a altura inicial de moldagem adotada nos ensaios foi de 10 cm (CP's 1 e 2) e 14 cm (CP's 3 e 4), em razão de já se conhecer a razoável redução de altura da lama e a formação de uma camada da água sobrenadante para o teor de sólidos trabalhado. Depois de concluído o estágio de sedimentação e adensamento por peso próprio, a espessura da lama foi medida com uma régua milimetrada e devidamente registrada para cada corpo de prova. Apesar desta medida não se configurar como exata, é geralmente usada na comparação com a altura obtida pelo valor de e_{00} .

O passo seguinte consistiu na inserção de um cabeçote de acrílico perfurado e com pedra porosa na base, idêntico ao construído para o CRD (o dispositivo do CRD foi desenvolvido a partir do conhecimento deste). Antes da sua inserção, acima da lama sedimentada, foi posicionado um papel filtro. Em seguida, o cabeçote foi encaixado cuidadosamente, deixando-o descer até a borda superior do corpo de prova. A câmara externa foi montada posteriormente e o seu fechamento foi também realizado com o topo sendo travado pelas hastes externas.

O volume de água na câmara foi completado conectando-se a tubulação da base do reservatório à válvula de enchimento (base da câmara). Para permitir o enchimento com a água destilada do reservatório, o suspiro localizado no topo da câmara foi aberto, visando a saída do ar. Subsequentemente, o LVTD, responsável por medir as deformações durante o ensaio foi posicionado no pistão do equipamento e este, por sua vez, foi destravado, cuidadosamente apoiado no topo do cabeçote e novamente travado. Destaca-se que o outro sensor, o transdutor de pressão localizado na base da câmara, já estava conectado deste a etapa de saturação das linhas. Neste caso, só foi aberto o registro localizado no painel, objetivando a dissipação do excesso de pressão na linha, ocasionalmente gerado durante a moldagem do corpo de prova.

Após a determinação do índice de vazios para a tensão efetiva nula (e_{00}) e a conclusão da montagem da câmara triaxial (Figura 3.51), o equipamento encontrava-se ajustado para o prosseguimento das demais etapas.

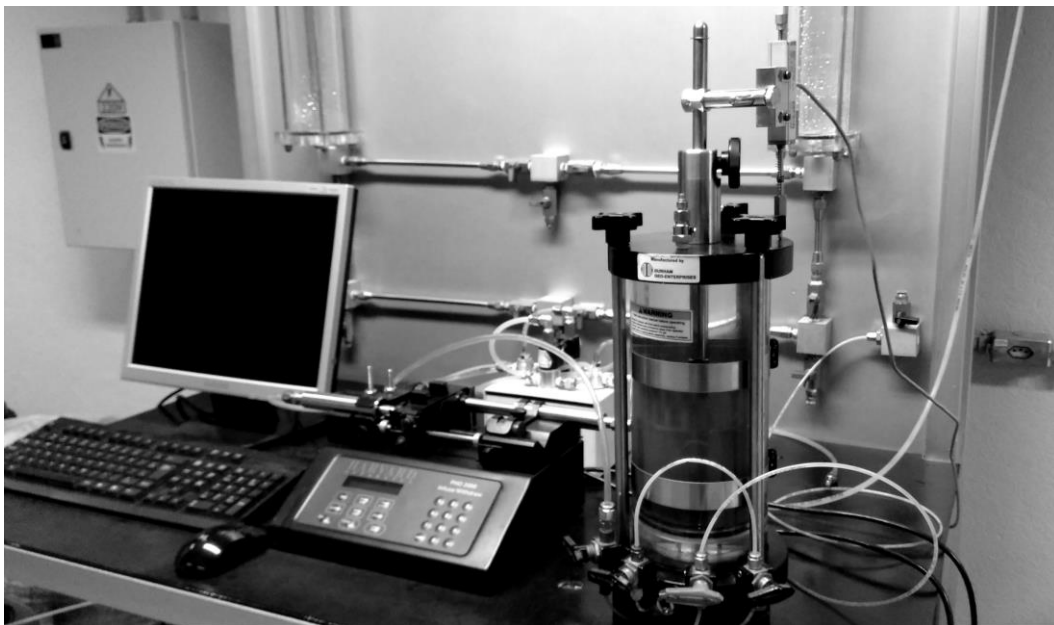


Figura 3.51 – Vista geral do equipamento com a câmara montada

Além da determinação do índice de vazios para a tensão efetiva nula (e_{00}), o ensaio ainda agrega três outras etapas: o adensamento induzido por percolação, o carregamento realizado em etapas e o ensaio de permeabilidade. As diferentes etapas permitem a determinação da relação índice de vazios *versus* tensão efetiva (curva de compressibilidade) e a relação índice de vazios *versus* permeabilidade (curva de permeabilidade).

Na etapa de adensamento por percolação induzida, uma velocidade é imposta pela bomba de fluxo, conectada a um reversor de fluxo (Figura 3.52), ao corpo de prova de rejeito. As poropressões geradas são registradas pelo transdutor diferencial, conectado à base da câmara. Este procedimento é realizado tanto na fase de adensamento por percolação induzida quanto na fase de permeabilidade. Nos ensaios realizados com o rejeito de fosfato, estas velocidades foram ajustadas progressivamente, até que se atingissem os níveis de poropressões adequados para realização do ensaio.

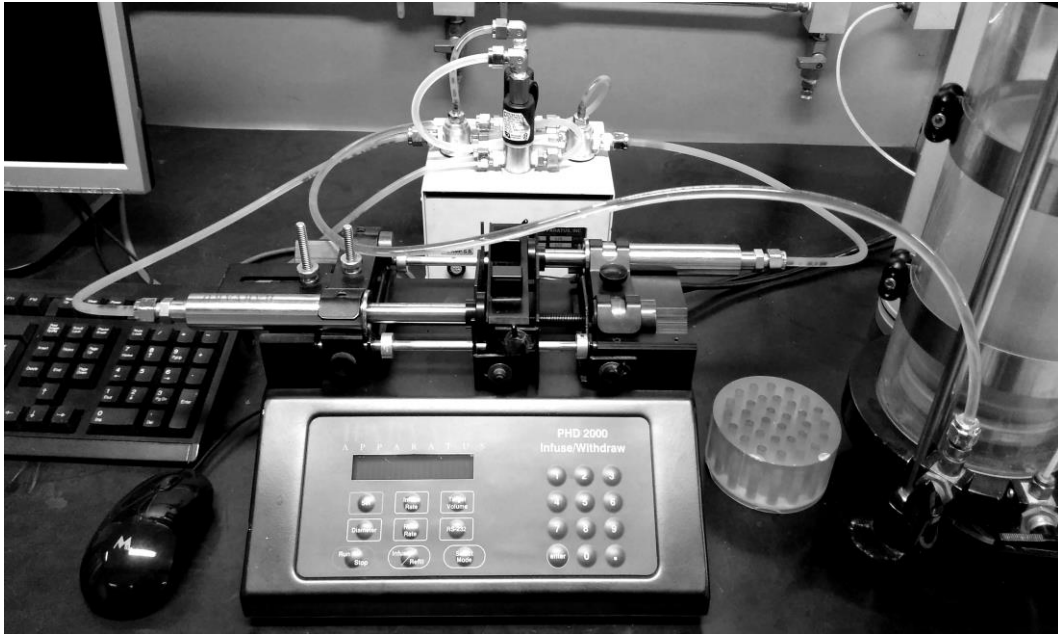


Figura 3.52 – Vista da bomba de fluxo conectada ao reversor de fluxo (ao fundo)

Neste sentido, na etapa de adensamento por fluxo induzido, diferentes vazões foram impostas para remoção da água do corpo de prova através bomba de fluxo. Consequentemente, este processo resulta no deslocamento das partículas sólidas, seguida de deformações verticais e redução do índice de vazios, o que provoca uma tensão efetiva entre as partículas.

A tensão efetiva de estabilização é conhecida a partir da poropressão de equilíbrio, gerada na base do corpo de prova e medida pelo transdutor diferencial. Ao final desta etapa, torna-se necessário a determinação da altura final do corpo de prova, o que foi feito com o deslocamento descendente da haste (previamente travada) até o topo do cabeçote, que se deslocou durante o adensamento. Destaca-se que este processo é realizado somente no final do ensaio, pois durante esta etapa a haste de carregamento permanece travada, para que esta não gere carregamento prévio sobre o cabeçote. O deslocamento, ao final, foi medido pelo LVDT adaptado na haste.

Os dados gerados durante o adensamento por fluxo induzido foram lidos, devidamente registrados e, posteriormente, exportados para uma planilha Excel, para o devido tratamento e a construção das respectivas curvas. A Figura 3.53 mostra uma das curvas obtidas nesta etapa.

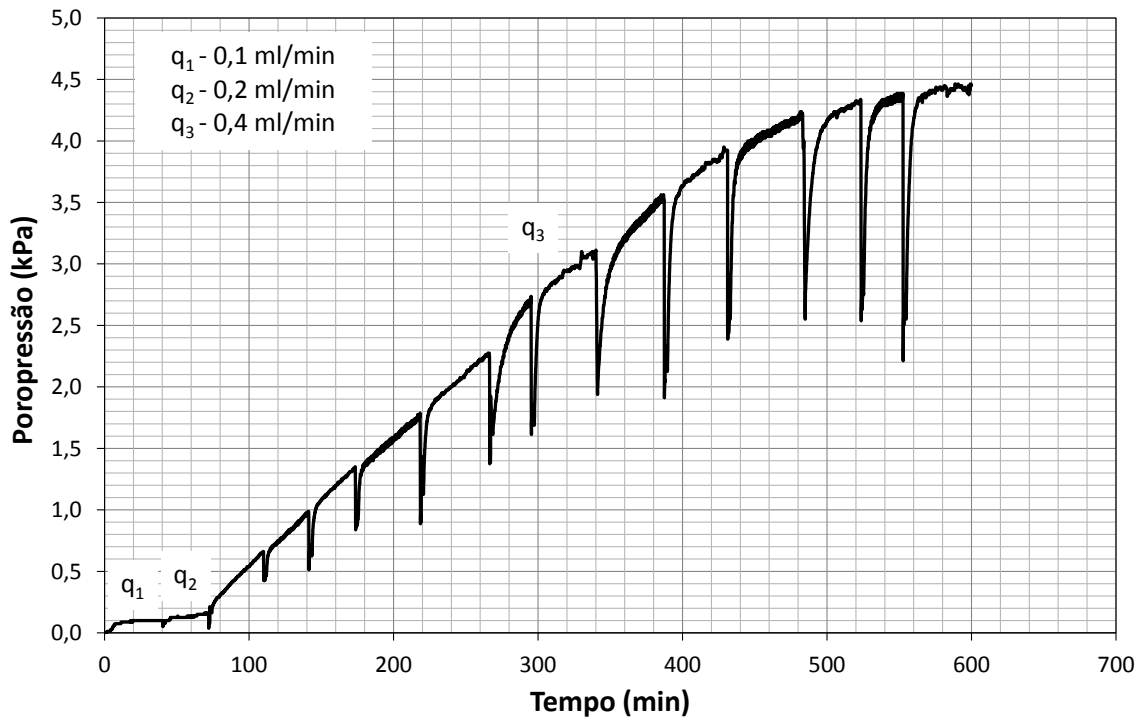


Figura 3.53 – Curva poropressão *versus* tempo – adensamento induzido (CP 4).

Os picos percebidos ao longo da trajetória da curva estão associados à inversão de fluxo, que é realizada ao longo do experimento, o que é necessário em função da capacidade máxima de cada seringa, que é de 20 mL. Considerando as vazões de trabalho, o ensaio em destaque (CP 4), nesta etapa, durou 10 horas, com volume total de fluxo de 225 mL.

O adensamento por fluxo induzido deve garantir poropressões geradas na base, no intervalo de 2 a 5 kPa, conforme sugestão de Znidarcic *et al.* (1992). Neste sentido, um dos mecanismos geralmente utilizados, visando a obtenção de valores nesta ordem de grandeza, é a adoção de vazões progressivas, visto que tanto durante o fluxo quanto na própria inversão deste, é possível a modificação da sua velocidade. No caso do ensaio em questão, ele foi iniciado com uma vazão de segurança de 0,1 mL/min e, posteriormente, alterado para 0,2 mL/min. Como se percebeu que as poropressões estabilizaram em valores muito baixos, a vazão foi dobrada para 0,4 mL/min, atingindo-se uma poropressão média final na base do corpo de prova de 4,45 kPa (trecho final do gráfico). Este mesmo procedimento foi adotado para todos os ensaios realizados nesta pesquisa.

Com a finalidade da obtenção de índices de vazios para níveis de tensões mais elevados, a sequência do procedimento envolve a aplicação de carregamentos estáticos. Esta fase foi cuidadosamente realizada com carregamentos em etapas, visto que o rejeito possui partículas muito finas, e uma possível carga instantânea causaria uma perturbação na amostra, fazendo com que as frações mais finas fossem carreadas, ascendente, por um fluxo de alta velocidade entre o cabeçote e a parede da célula de adensamento.

Neste sentido, o carregamento foi realizado gradativamente através das plataformas de um pendural adaptado por Cançado (2010) até que se atingisse uma tensão em torno de 50 kPa. Após o alcance deste nível de tensão, o corpo de prova permaneceu sob o mesmo carregamento até a estabilização da variação de altura, que foi monitorada por *software* dedicado e os dados foram registrados para construção da curva de adensamento por carregamento estático (Figura 3.54). O início do adensamento por carregamento é marcado pelo desenvolvimento imediato das poropressões na base do corpo de prova, cujos valores registrados atingem níveis próximos à tensão acumulada. Ao longo do ensaio, as poropressões são dissipadas até a estabilização (Figura 3.55).

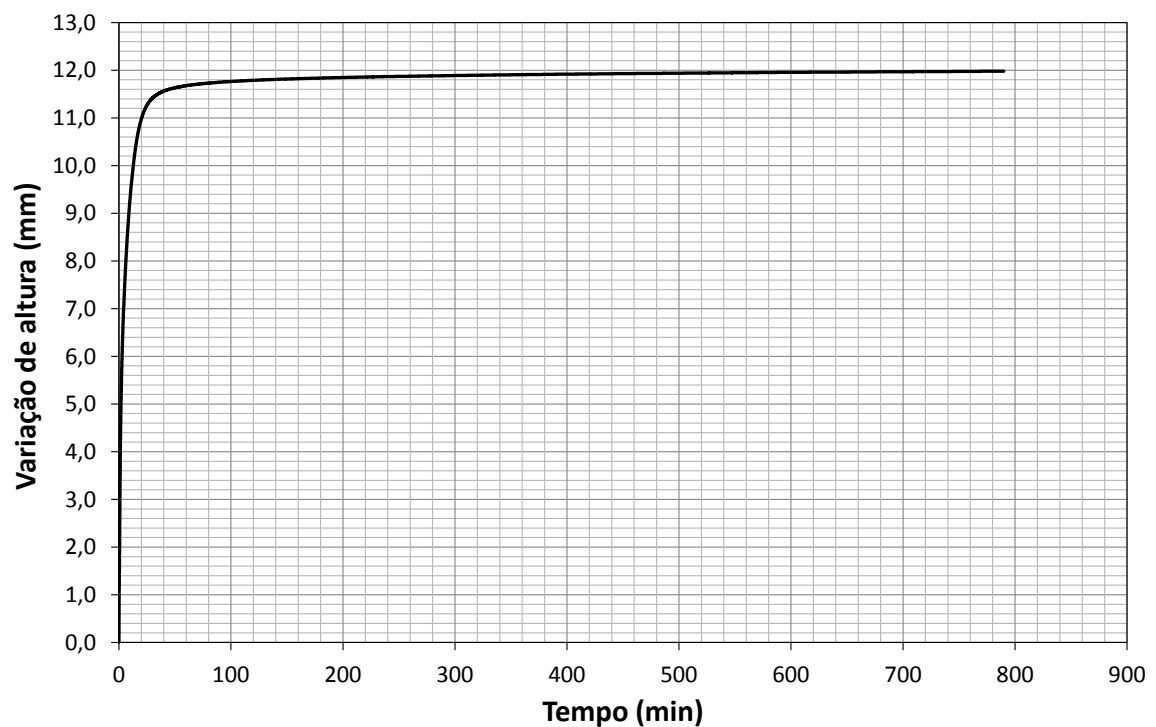


Figura 3.54 – Curva variação de altura do CP *versus* tempo – adensamento por carregamento (CP 4).

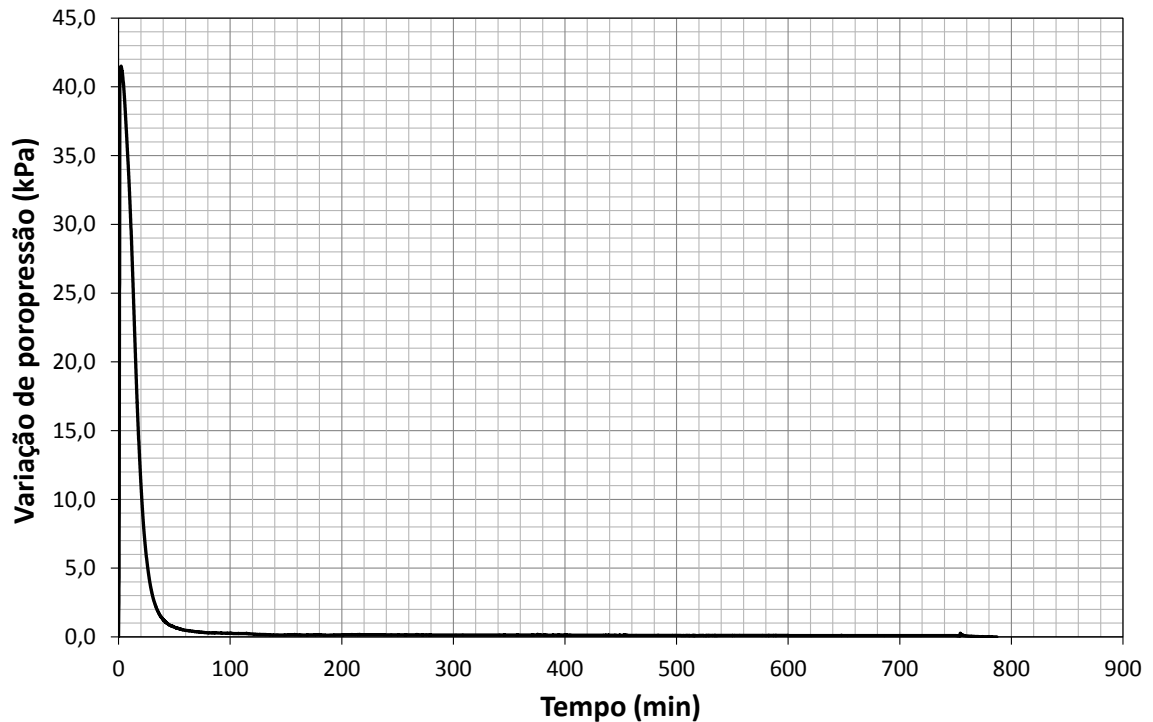


Figura 3.55 – Curva variação da poropressão *versus* tempo – adensamento por carregamento (CP 4).

Observa-se que a estabilização das deformações e das poropressões ocorre em tempo inferior à 3 horas. No entanto, como esta fase do procedimento é realizada logo após o adensamento por fluxo induzido e o equipamento possui um sistema de aquisição de dados robusto, o carregamento foi deixado de um dia para o outro, durante cerca de 13 horas.

A última etapa do ensaio envolve a determinação da permeabilidade e foi realizada logo após a fase de adensamento por carregamento estático. Esta etapa é realizada novamente com o uso da bomba de fluxo, mantendo-se o carregamento realizado na etapa anterior e pistão da haste é devidamente travado. Comparando esta à etapa de adensamento por fluxo induzido, há uma alteração apenas na velocidade de fluxo, que foi inicialmente ajustada para valores menores, relacionados àqueles utilizados na primeira fase do ensaio. Os dados também foram registrados eletronicamente por um sistema de aquisição de dados nesta etapa. As poropressões foram plotadas em função do tempo de duração do ensaio (Figura 4.56).

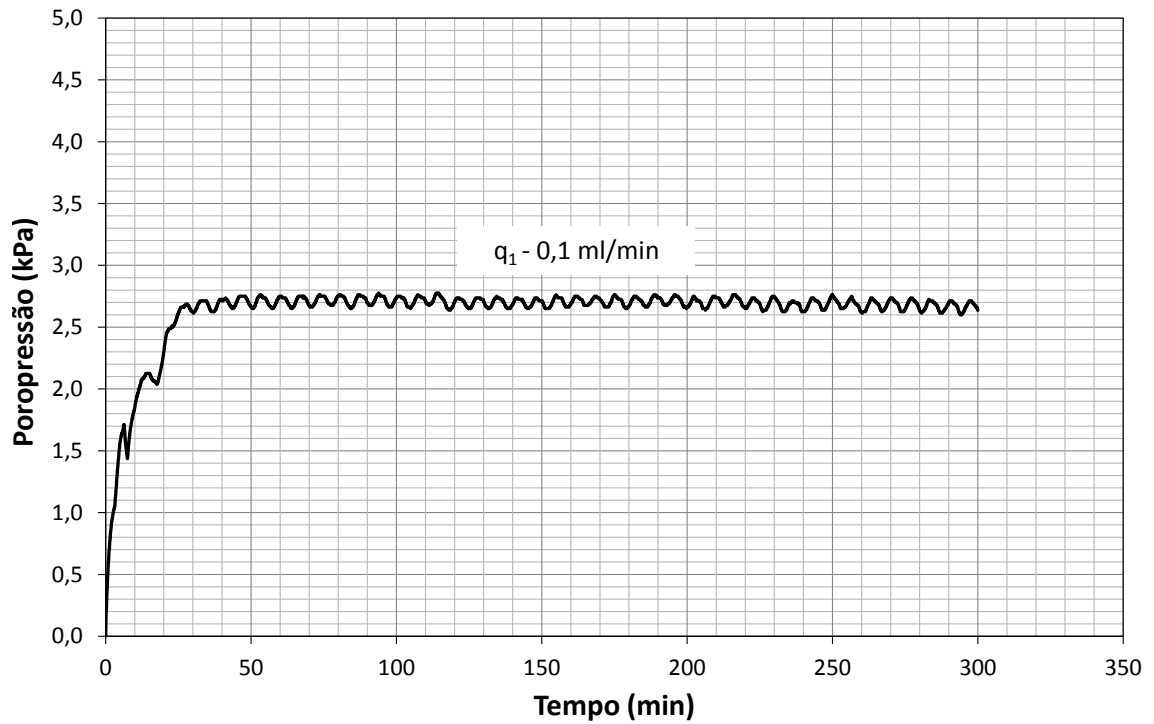


Figura 3.56 – Curva poropressão *versus* tempo – permeabilidade (CP 4).

Ao final de cada ensaio (para todos os CP's), o excesso de água não retirado durante fluxo foi removido da célula triaxial e esta foi desmontada. O corpo de prova foi extraído e levado à estufa para secagem e conhecimento do seu peso seco. Uma vista do corpo de prova seco é mostrada na Figura 3.57.



Figura 3.57 – Vista de um corpo de prova de rejeito de fosfato seco ao final do ensaio HCT (CP 4)

- **Apresentação e discussão preliminar dos resultados**

Após a execução dos procedimentos destacados, os resultados devem ser processados por um *software* específico que, no caso, é realizado por um algoritmo que envolve a minimização da soma dos quadrados das diferenças normalizadas entre os dados experimentais e as previsões calculadas para os estes dados.

O algoritmo de estimativa é proposto para determinação das relações constitutivas índice de vazios *versus* tensão efetiva (e x σ') e índice de vazios *versus* permeabilidade (e x k), por meio da obtenção dos parâmetros A , B , C , D e Z , cujos modelos matemáticos são expressos pelas Equações 3.12 (Liu e Znidarcic, 1991) e 3.13 (Somogyi, 1979).

$$e = A \cdot (\sigma' + Z)^B \quad (3.12)$$

$$k = C e^D \quad (3.13)$$

Sendo:

A , B , C , D e Z : parâmetros constitutivos associados ao material.

As análises para obtenção dos parâmetros foram realizadas através do *SICTA (Seepage Induced Consolidation Test Analysis)*, *software* desenvolvido por Abu-Hejleh e Znidarcic (1992).

Conforme já destacado, o programa experimental envolveu a utilização de 4 corpos de prova com alturas e velocidades de fluxo diferentes. O objetivo de se trabalhar com duas amostras para cada altura está vinculado à verificação da boa reprodução dos resultados, uma vez que o estudo envolve um material com comportamento essencialmente particular e, sobretudo, desconhecido do ponto de vista da literatura técnica. Portanto, adotaram-se amostras duplicadas, com alturas de 10 e 14 cm, devidamente homogeneizadas e extraídas diretamente da bombona 2, visando a manutenção do teor de sólidos próximo ao lançado nos tanques. Os dados iniciais dos corpos de prova são apresentados na Tabela 3.24.

Tabela 3.24 – Dados iniciais dos corpos de prova - CP's - medidos

Ensaio (amostra)	CP1	CP2	CP3	CP4
Altura inicial (cm):	10,0	10,0	14,0	14,0
Área inicial (cm ²)	62,21	62,21	62,21	62,21
Volume inicial (cm ³):	620,10	620,10	870,94	870,94
Teor de umidade inicial (%):	668,15	660,96	662,42	654,96
Teor de sólidos inicial (%):	13,02	13,14	13,12	13,25
Massa inicial (g):	681,30	688,63	945,25	958,80
Massa seca (g):	88,69	90,49	123,98	127,00
Massa esp. dos grãos (g/cm ³)	2,306	2,306	2,306	2,306
Massa específica inicial (g/cm ³):	1,10	1,11	1,09	1,10
Massa esp. seca inicial (g/cm ³):	0,143	0,146	0,143	0,146
Índice de vazios inicial:	15,103	14,809	15,129	14,827

Os dados de entrada para o processamento das análises no *SICTA* foram calculados, inicialmente, a partir do conhecimento da área da amostra, das características do material e das umidades iniciais, para obtenção da massa de sólidos e, conseqüentemente, da altura de sólidos (Equação 3.14).

$$H_s = \frac{M_s}{(\rho_s \cdot A)} \quad (3.14)$$

Sendo:

H_s : altura de sólidos (cm);

M_s : massa dos sólidos (massa seca) (g);

ρ_s : massa específica dos sólidos (g/cm³);

A : área da amostra – CP (cm²).

O índice de vazios inicial foi calculado a partir de relações básicas da Mecânica dos Solos e, com o conhecimento deste, tornou-se possível também a obtenção da altura inicial da amostra (Equação 3.15) e, conseqüentemente, do volume e das massas específicas saturada e seca antes da sedimentação e adensamento por peso próprio.

$$H_i = H_s(1 + e_i) \quad (3.15)$$

Sendo:

H_i : altura inicial da amostra calculada antes da sedimentação e adensamento por peso próprio (cm);

e_i : índice de vazios inicial da amostra.

Os dados iniciais, logo após a montagem das amostras no equipamento (célula), calculados para os 4 corpos de prova, são expressos na Tabela 3.25.

Tabela 3.25 – Dados iniciais dos corpos de prova - CP's - calculados

Ensaio (amostra)	CP1	CP2	CP3	CP4
Altura de sólidos - H_s (cm):	0,618	0,631	0,864	0,885
Índice de vazios inicial - e_i :	15,706	15,537	15,571	15,397
Altura inicial - H_i (cm ²)	10,33	10,43	14,32	14,52
Volume inicial - V_i (cm ³):	642,52	648,93	890,91	903,02
Massa esp. inicial (g/cm ³):	1,060	1,061	1,061	1,062
Massa esp. seca inicial (g/cm ³):	0,138	0,139	0,139	0,141

Utilizando a similaridade de raciocínio, após a sedimentação e o adensamento por peso próprio, foram calculados o índice de vazios para tensão efetiva nula e a altura inicial da amostra (primeiros dados de entrada do *SICTA*), com base na Equação 3.16.

$$H_0 = H_s(1 + e_{00}) \quad (3.16)$$

Sendo:

H_0 : altura inicial da amostra (cm);

e_{00} : índice de vazios associado à tensão efetiva nula.

Os dados correspondentes à tensão efetiva nula são apresentados na Tabela 3.26. Destaca-se que o teor de umidade considerado para alcance do índice de vazios foi determinado com o material sedimentado na câmara auxiliar, com as mesmas dimensões da original, dispositivo desenvolvido por Cançado (2010).

Tabela 3.26 – Dados dos corpos de prova após sedimentação e adensamento por peso próprio – σ_0 - calculados

Ensaio (amostra)	CP1	CP2	CP3	CP4
Teor de umidade (%):	265,43	260,30	257,85	250,57
Índice de vazios - e_{00} :	6,239	6,119	6,061	5,890
Altura - H_0 (cm):	4,47	4,49	6,10	6,10
Volume - V_0 (cm ³):	278,32	279,44	379,54	379,33
Massa específica seca (g/cm ³):	0,319	0,324	0,365	0,335

As informações do ensaio, correspondentes às etapas de adensamento, carregamento e permeabilidade são apresentadas nas Tabelas 3.27, 3.28 e 3.29, respectivamente. Os índices de vazios finais das etapas de adensamento induzido por percolação e carregamento foram determinados com fundamento na variação de altura da amostra na etapa e na altura de sólidos (Equações 3.17 e 3.18).

$$e_{fa} = e_{00} - \frac{\Delta H_a}{H_s} \quad (3.17)$$

$$e_{fc} = e_{fa} - \frac{\Delta H_c}{H_s} \quad (3.18)$$

Sendo:

e_{fa} : índice de vazios final na etapa de adensamento por percolação (cm);

e_{fc} : índice de vazios final na etapa de carregamento;

ΔH_a : variação de altura da amostra na etapa de adensamento por percolação (cm);

ΔH_c : variação de altura da amostra na etapa de carregamento.

Tabela 3.27 – Dados do ensaio de adensamento induzido por percolação

Ensaio (amostra)	CP1	CP2	CP3	CP4
Vazão de adens. - q_a (ml/min):	0,10	0,05	0,60	0,40
Velocidade - v (m/s):	$2,679 \times 10^{-7}$	$1,340 \times 10^{-7}$	$1,607 \times 10^{-6}$	$1,072 \times 10^{-6}$
Tensão efetiva no topo - σ_t (kPa):	0,0042	0,0042	0,0042	0,0042
Poropressão na base - Δu_b (kPa):	3,48	2,05	4,40	4,45
Tensão efetiva na base - σ_b (kPa):	3,564	2,047	4,517	4,570
Varição de altura do CP (cm):	0,289	0,299	1,596	2,281
Altura final do CP (cm):	4,18	4,19	4,58	3,82
Índice de vazios final - e_{fa} :	5,771	5,645	4,124	3,313

Tabela 3.28 – Dados do ensaio de carregamento em etapas

Ensaio (amostra)	CP1	CP2	CP3	CP4
Tensão (kPa):	47,31	47,31	47,31	47,31
Varição de altura do CP (cm):	2,416	2,443	1,853	1,200
Altura final do CP (cm):	1,76	1,75	2,96	2,62
Índice de vazios final - e_{fc} :	1,862	1,773	1,980	1,957

Tabela 3.29 – Dados do ensaio de permeabilidade

Ensaio (amostra)	CP1	CP2	CP3	CP4
Vazão de permeab. - q_b (ml/min):	0,01	0,01	0,1	0,1
Velocidade - v (m/s):	$2,679 \times 10^{-8}$	$2,679 \times 10^{-8}$	$2,679 \times 10^{-7}$	$2,679 \times 10^{-7}$
Poropressão na base - Δu_b (kPa):	0,55	0,51	2,60	2,65
Carga hidráulica - Δh (m):	0,056	0,052	0,265	0,270
Coef. de permeabilidade - (m/s):	$9,420 \times 10^{-9}$	$9,016 \times 10^{-9}$	$2,992 \times 10^{-8}$	$2,600 \times 10^{-8}$

Com os dados obtidos, a solução do algoritmo no *SICTA* é obtida com a consideração de que os parâmetros B e D são independentes. Neste caso, adotam-se valores iniciais estimados para estes parâmetros e os parâmetros A , C e Z são calculados com base no conhecimento do valor do índice de vazios para tensão efetiva nula (e_{00}), dos dados do ensaio de carregamento em etapas e do ensaio de permeabilidade. Os parâmetros relacionados às quatro amostras estudadas, obtidos através da simulação computacional, são expostos na Tabela 3.30. As relações constitutivas foram construídas com base nas Equações 3.12 e 3.13 (Tabela 3.31).

Tabela 3.30 – Parâmetros constitutivos obtidos no ensaio HCT

Parâmetro	Corpo de prova (ensaio)			
	CP1	CP2	CP3	CP4
A	16,13599	19,12911	5,07435	3,41846
B	-0,54376	-0,59606	-0,24338	-0,14461
Z (kPa)	5,74037	6,76826	0,48189	0,02323
C (m/s)	$4,6679 \times 10^{-9}$	$5,1457 \times 10^{-9}$	$6,4463 \times 10^{-9}$	$4,9614 \times 10^{-9}$
D	1,12944	0,97933	2,24716	2,46705

Tabela 3.31 – Relações constitutivas obtivas no ensaio HCT

Amostra	Relação constitutiva (compressibilidade e permeabilidade)	
CP1	Compressibilidade	$e = 16,13599 \cdot (\sigma' + 5,74037)^{-0,54376}$
	Permeabilidade (m/s)	$k = 4,6679 \cdot 10^{-9} \cdot e^{1,12944}$
CP2	Compressibilidade	$e = 19,12911 \cdot (\sigma' + 6,76826)^{-0,59606}$
	Permeabilidade (m/s)	$k = 5,1457 \cdot 10^{-9} \cdot e^{0,97933}$
CP3	Compressibilidade	$e = 5,07435 \cdot (\sigma' + 0,48189)^{-0,24338}$
	Permeabilidade (m/s)	$k = 6,4463 \cdot 10^{-9} \cdot e^{2,24716}$
CP4	Compressibilidade	$e = 3,41846 \cdot (\sigma' + 0,02323)^{-0,14461}$
	Permeabilidade (m/s)	$k = 4,9614 \cdot 10^{-9} \cdot e^{2,46705}$

(*) e : índice de vazios; k : permeabilidade.

Depois de construídas as equações associadas às relações constitutivas dos 4 corpos de prova ensaiados neste programa experimental, foram atribuídos valores de 0,001 a 1000 kPa e obtidos os respectivos valores de índice de vazios para o traçado das curvas de compressibilidade (Figura 3.58). Para os mesmos valores de índices de vazios, foram calculadas as permeabilidades associadas, visando a construção das curvas de permeabilidade (Figura 3.59).

Os dados foram inicialmente comparados com os resultados obtidos por Abu-Hejleh *et al.* (1996) nos ensaios HCT realizados para quatro amostras de argilas fosfatadas da Flórida (destacados no Capítulo 2).

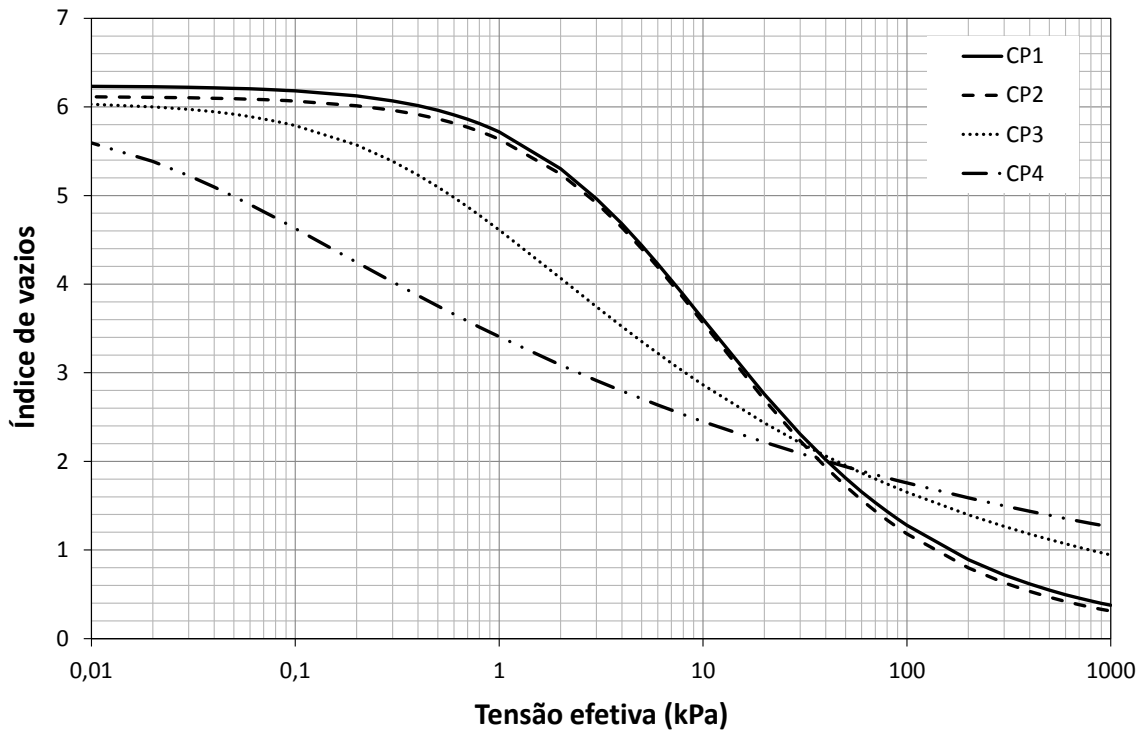


Figura 3.58 – Curvas de compressibilidade dos corpos de prova ensaiados

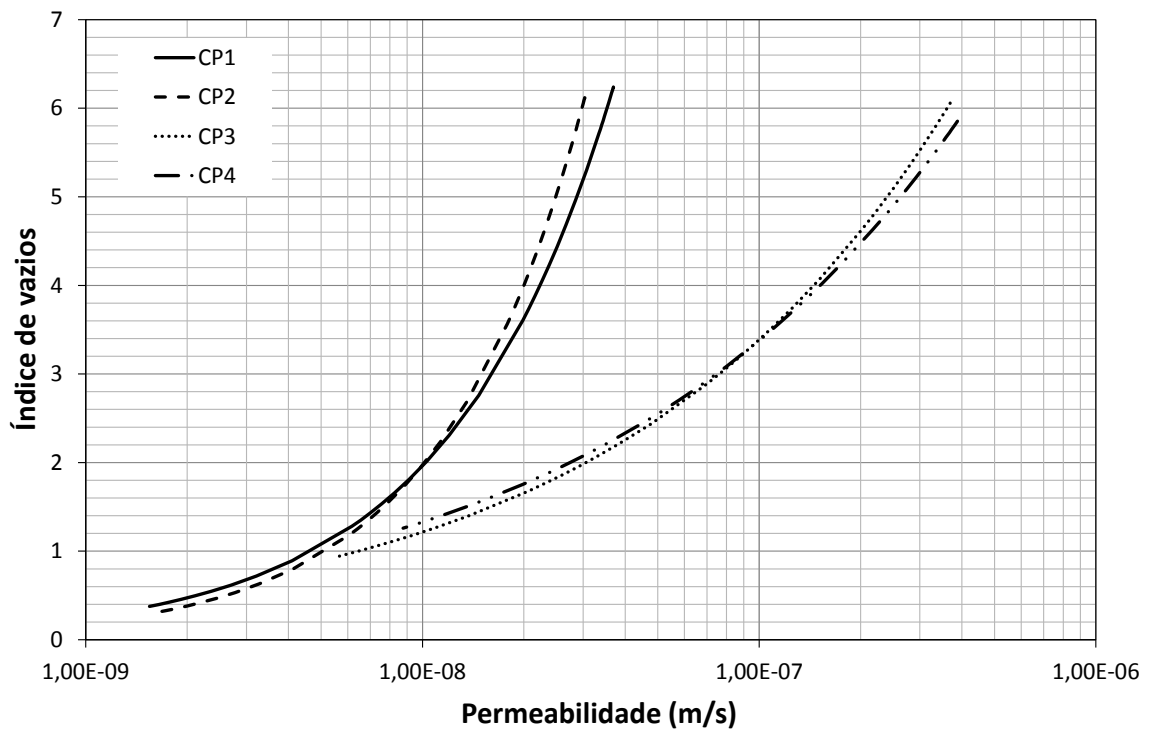


Figura 3.59 – Curvas de permeabilidade dos corpos de prova ensaiados

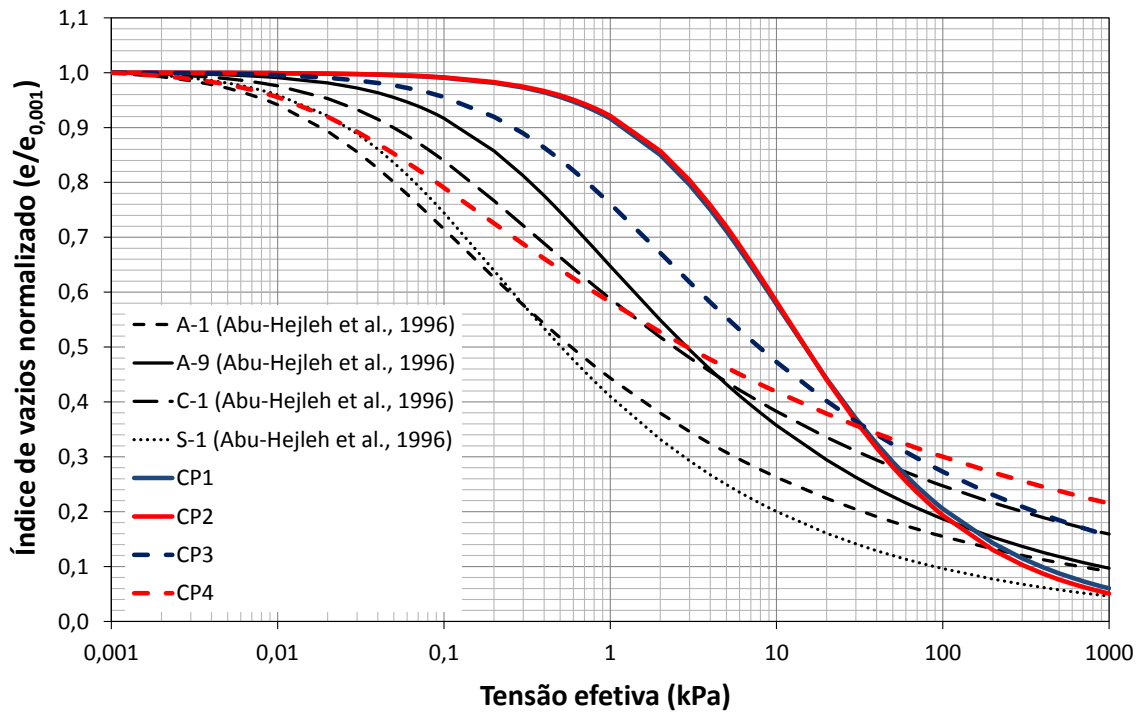


Figura 3.60 – Comparação dos resultados dos ensaios HCT dos rejeitos de Bayóvar com os argilas fosfáticas da Flórida (Abu-Hejleh *et al.*, 1996)

Considerando as curvas normalizadas, a comparação entre os valores obtidos nesta pesquisa, especialmente para os CP's 1 e 2, e os valores obtidos por resultados publicados por Abu-Hejleh *et al.* (1996), numa primeira análise, percebe-se, de uma maneira geral, uma menor compressibilidade para os rejeitos de fosfato de Bayóvar. Uma discussão do comportamento do material, com base nas curvas, estabelecendo-se uma comparação com aquelas obtidas nos ensaios de campo (Capítulo 4), bem como nos ensaios CRD, será realizada no Capítulo 5, que é específico para a discussão e análise dos resultados.

PROGRAMA EXPERIMENTAL DE CAMPO

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A mensuração das propriedades geotécnicas dos rejeitos finos (formato de lamas) visando, sobretudo, a realização de projetos de disposição e o monitoramento de reservatórios ao longo de sua vida útil, implica a realização de ensaios especiais cujos procedimentos já foram descritos na literatura técnica. A execução destes ensaios objetiva, principalmente, o conhecimento das propriedades geotécnicas de compressibilidade e adensamento.

Estes rejeitos apresentam um elevado número de partículas de dimensões equivalentes à fração argila, cuja compressibilidade não pode ser inferida mediante os princípios da teoria clássica de Terzaghi, sendo, portanto, necessário um estudo com procedimentos que levem em consideração as grandes deformações que ocorrem ao longo do reservatório. Neste sentido, os ensaios de campo, quando possíveis, destacam-se como uma alternativa viável na avaliação do comportamento geotécnico destes materiais. Os ensaios para determinação das características de compressibilidade e adensamento de rejeitos finos '*in situ*' utilizam procedimentos de medidas de poropressões e amostragem em diferentes profundidades do reservatório (Villar, 1990; Gomes, 1998; Villar, 2002; Pereira e Gomes, 2012).

O programa experimental incorpora a idealização e a construção de uma sonda confeccionada em aço inox tubular, capaz de monitorar, em diferentes horizontes, poropressões, teor de umidade, teor de sólidos, condutividade elétrica e temperatura. Juntamente com a sonda, foram desenvolvidos amostradores específicos. Como parte do procedimento, os ensaios de campo foram realizados em reservatórios de rejeitos da Mina de Bayóvar, no Peru.

4.2 ENSAIOS DE CAMPO

4.2.1 Desenvolvimento da sonda piezométrica

A realização de ensaios de campo para obtenção da compressibilidade *'in situ'*, com o uso de sondas piezométricas, é baseada inicialmente na construção de diversos equipamentos e procedimentos que se constituíram nos últimos anos. Dentre eles, no contexto da aplicabilidade a rejeitos finos, destacam-se os trabalhos brasileiros de Villar (1990), pioneiro no país, de Campos *et al.* (1991), de Campos *et al.* (1998), Gomes (1998), Santos (2001), Villar (2002) e Pereira e Gomes (2012).

A sonda piezométrica desenvolvida nesta pesquisa, específica e dedicada exclusivamente para ensaios geotécnicos em reservatórios de rejeitos finos, foi confeccionada em aço inox tubular. O equipamento é do tipo telescópico modular desmontável, com instrumentação, *hardware* e *software* para monitoramento das poropressões, teor de umidade volumétrica, condutividade elétrica e temperatura, para cada horizonte de investigação. As hastes possuem diâmetro de 49 mm, com encaixe rápido roscável, tipo macho / fêmea, confeccionado em polímero (náilon) de alta resistência (Figura 4.1). Ao todo, são 20 hastes, com comprimento de 1 metro cada. A escolha de todos os materiais para a confecção do equipamento levou em consideração a trabalhabilidade em campo.

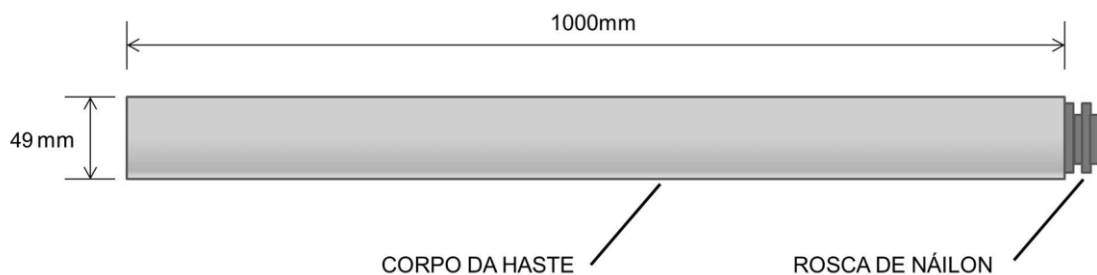


Figura 4.1 – Vista da haste construída em aço inox com rosca em náilon

Na base do conjunto de hastes interconectadas, é rosqueada a sonda-torpedo, propriamente dita, totalmente desmontável, com ponta cônica e adaptador para pedra

porosa cilíndrica. O seu interior possui um transdutor de pressão com diafragma faceado (indicado para meios viscosos e que contém sólidos), capaz de registrar pressões de até 1000 kPa, com saída de sinal de 4 a 20 mA, alimentado por uma tensão que pode variar de 9 a 30 V. O transdutor, construído com material inox, incluindo a sua membrana, possui exatidão de 0,1% e pode trabalhar em temperaturas de -40 a 100° C. Os sinais elétricos do transdutor são levados por um cabo blindado até uma unidade eletrônica, que faz a sua conversão em unidade de pressão (procedimento descrito posteriormente). A pedra porosa cilíndrica utilizada na sonda-torpedo possui alta permeabilidade e pressão de borbulhamento e é constituída por bronze sinterizado, com diâmetro interno de 28 mm, espessura de 10 mm e altura de 50 mm. Um desenho esquemático da sonda-torpedo é mostrado nas Figuras 4.2 e 4.3 (com dimensões), cuja imagem é apresentada posteriormente (Figura 4.4), com destaque para a pedra porosa cilíndrica. Ressalta-se que foi adotada a ponta de 60° por permitir correlações baseadas em ensaios CPTU.

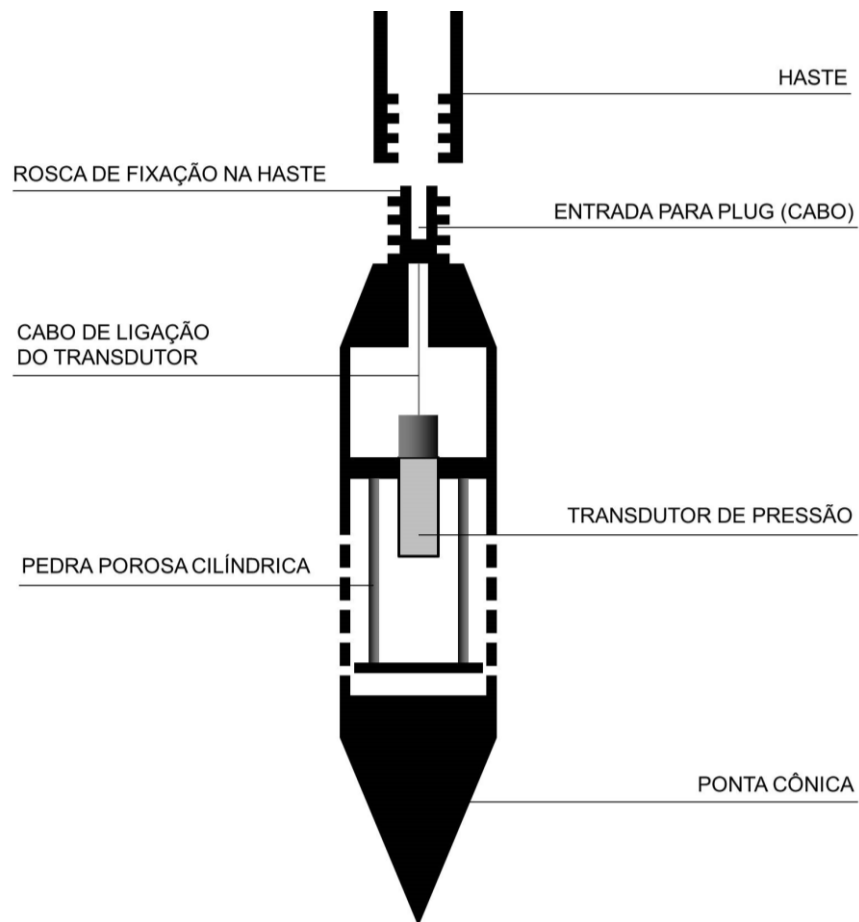


Figura 4.2 – Desenho esquemático da sonda-torpedo

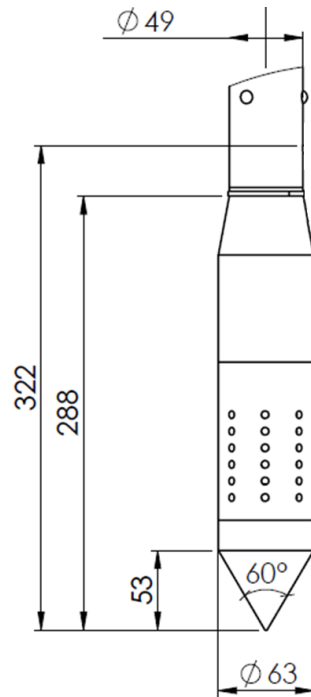


Figura 4.3 – Dimensões da sonda-torpedo (em mm)



Figura 4.4 – Vista da sonda-torpedo e da pedra porosa cilíndrica

Juntamente com a sonda, foi desenvolvido um suporte em náilon, que pode ser rosqueado logo acima do torpedo. Este suporte tem a função de proteger um sensor triplo, que monitora a umidade volumétrica, a condutividade elétrica e a temperatura do meio. Este sensor utiliza a técnica TDR (*Time Domain Reflectometry*), que permite a leitura em tempo real. A técnica, inicialmente usada para monitoramento do teor de

umidade dos solos na agricultura, consiste na medida da constante dielétrica e condutividade elétrica do solo pela determinação do tempo de trânsito e dissipação, respectivamente, de um pulso eletromagnético lançado ao longo de sondas metálicas paralelas inseridas no solo. Análises teóricas e correlações experimentais mostram que o tempo do pulso é proporcional à constante dielétrica aparente e que a dissipação do sinal é proporcional à condutividade elétrica do solo (Dalton, 1987). Trata-se, portanto, de uma medida indireta da umidade volumétrica, obtida da sua correlação com a constante dielétrica do meio.

O sensor, construído por hastes metálicas, recebe um pulso enviado pela unidade de TDR. Este sinal recebido pela sonda é refletido para a unidade, que faz a aquisição dos dados. A constante dielétrica do meio é determinada a partir do conhecimento do comprimento da sonda (sensor) e do tempo necessário para o percurso do sinal.

O sensor triplo, de fabricação da *Decagon Devices, Inc.*, modelo *5TE*, é projetado para medir o conteúdo de água (umidade volumétrica), a condutividade elétrica e temperatura do solo. O equipamento usa um oscilador a 70 MHz, que mede a permissividade dielétrica, usada para correlacionar a umidade do meio. Um termistor, caracterizado como um semicondutor sensível à temperatura, em contato térmico com os pinos do sensor, fornece temperatura do meio, enquanto os parafusos na superfície do sensor formam uma matriz elétrica de dois sensores para medir a condutividade elétrica. (Figuras 4.5 e 4.6).



Figura 4.5 – Vista do sensor *5TE* (*Decagon Devices, Inc.*)

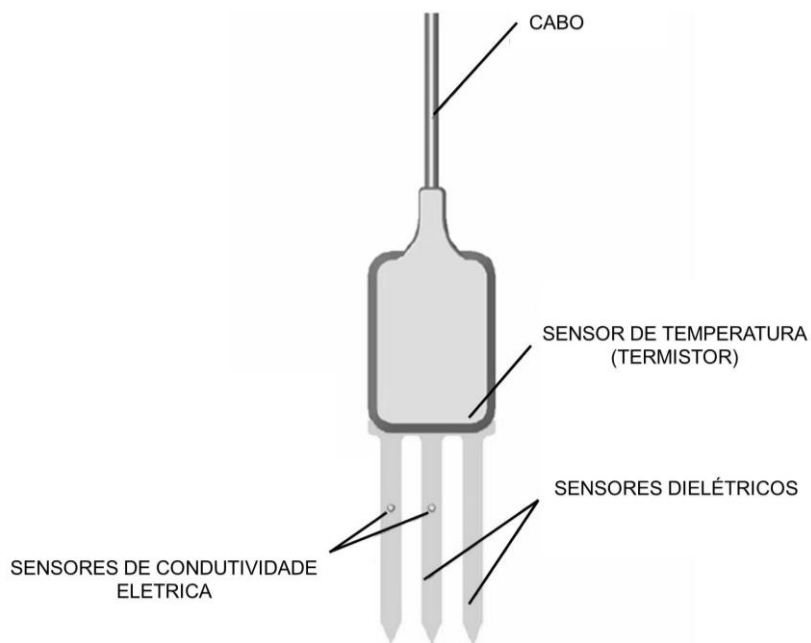


Figura 4.6 – Componentes do sensor *STE* (*Decagon Devices, Inc.*)

O suporte de náilon, desenvolvido para proteger o sensor, possui um dispositivo para fixação lateral na primeira haste da sonda (imediatamente acima do torpedo). Além de ser resistente à cravação em lamas, dispõe de visitas laterais, visando permitir o contato do material prospectado com as três hastas do sensor. O náilon foi escolhido por ser um material não condutor, o que poderia interferir na mensuração da condutividade elétrica. As Figuras 4.7 e 4.8 (dimensões) mostram o sensor envolvido pelo suporte de proteção.

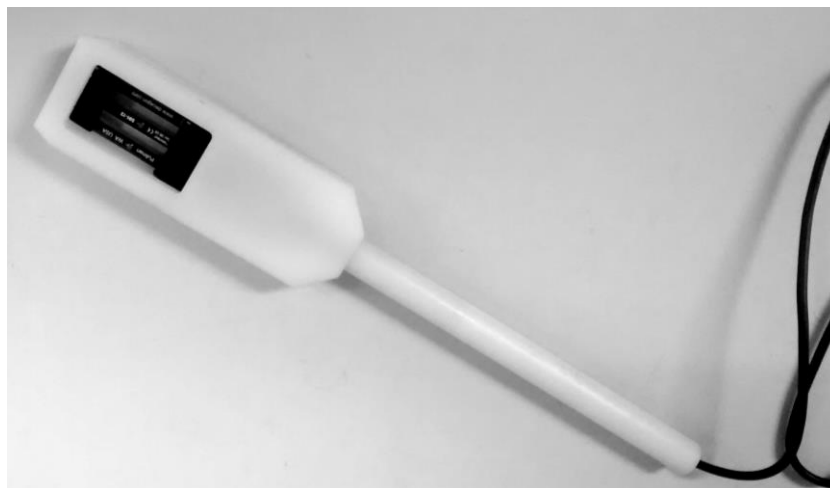


Figura 4.7 – Vista do suporte em náilon de proteção do sensor *STE*

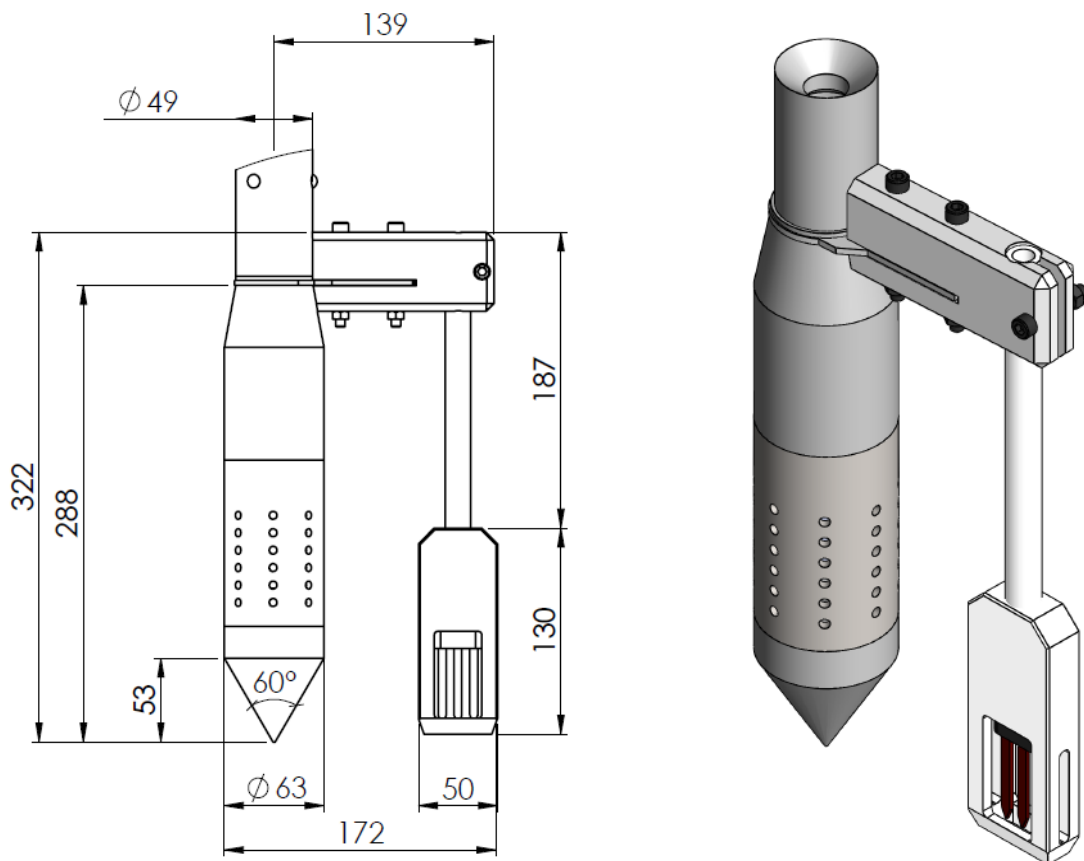


Figura 4.8 – Dimensões (em mm) do suporte em náilon de proteção do sensor *5TE* acoplado à sonda-torpedo

O sensor é capaz de medir a permissividade dielétrica (ϵ_a) variando de 1 (ar) a 80 (água), a condutividade elétrica de 0 a 23 dS/m e a temperatura de -40 a 50°C . Possui dimensões de 10 cm de comprimento, 3,2 cm de largura e 0,7 cm de espessura, com comprimento de hastes de 5,2 cm. Todos os dados são coletados e armazenados num sistema de aquisição próprio (*Em50G*), desenvolvido pelo mesmo fabricante, através de um cabo específico. Este sistema foi incorporado à unidade de leitura da sonda, que faz a aquisição dos sinais elétricos do transdutor de pressão.

A unidade microprocessada portátil desenvolvida é alimentada por bateria, com leitor digital (indicador) das grandezas em tempo real e estação remota de coleta e armazenamento de dados, com 2 registradores eletrônicos, com capacidades de memória de até 32.000 registros, para a propressão, e de até 36.800 registros, para as demais leituras: permissividade dielétrica, condutividade elétrica e temperatura.

O registrador eletrônico de dados, destinado ao registro das poropressões, é fabricado pela empresa brasileira *Novus*, modelo *LogBox-DA*. Os dados adquiridos (gravados) são armazenados na memória do registrador, e posteriormente enviados a um computador (*download*) para visualização e análise, na forma de tabela ou de gráfico; podem, inclusive, ser exportados para uso em programas como planilhas eletrônicas. A Figura 4.9 mostra o registrador eletrônico de dados, destinado ao armazenamento das leituras de poropressão.



Figura 4.9 – Registrador eletrônico de dados destinado ao armazenamento das leituras de poropressão

O indicador universal de leituras, modelo *N1500LC* (Figura 4.10), da *Novus*, foi configurado para indicar as leituras de poropressão durante a sondagem em campo e calibrado com o uso de uma coluna de água de 12 metros.



Figura 4.10 – Painel indicador instalado na unidade de leitura

Toda a configuração deste indicador é feita através do próprio teclado, sem a necessidade de qualquer alteração de circuitos ou uso de *software*. É possível também a programação de alarmes, para o caso de algum monitoramento, sendo tudo realizado via teclado frontal. A Figura 4.11 mostra a unidade de leitura com o indicador de poropressão acoplado. Conforme já destacado, esta unidade, construída em PVC, armazena o *LogBox* (aquisição das leituras de poropressão) e o *Em50G* (aquisição das leituras de permissividade dielétrica, condutividade elétrica e temperatura). Um esquema das ligações internas da caixa é mostrado na Figura 4.12, cujas entradas são detalhadas na Tabela 4.1.



Figura 4.11 – Unidade de leitura e registro de dados

Tabela 4.1 – Relação das entradas da unidade de leitura e registro dos dados

Entrada	Descrição	Tipo de entrada
1	Cabo da sonda / transdutor de poropressão	P2
2	Cabo do registrador de poropressão	P2
3	Cabo de carregamento da bateria da sonda / transdutor de poropressão	Serial
4	Cabo de aquisição de dados do sensor <i>5TE</i>	USB
5	Cabo de ligação do sensor <i>5TE</i>	P10

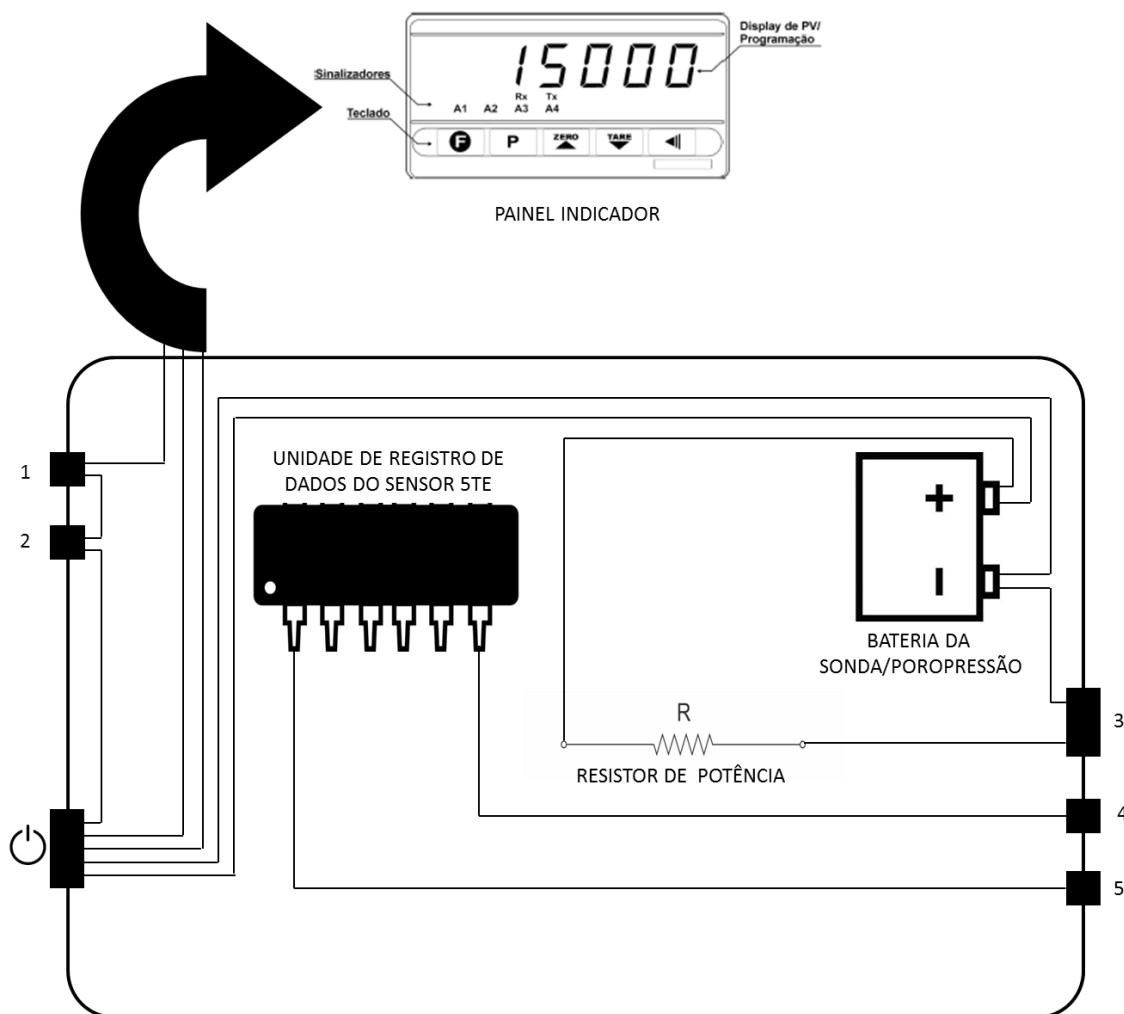


Figura 4.12 – Unidade de leitura e registro de dados

Como a unidade agrega dois sistemas de aquisição de dados, de dois fabricantes distintos, torna-se necessário o uso de dois softwares: O *LogChart-II (Novus)* que faz o *download* dos dados do *LogBox-DA* e o *ECH2O Utility (Decagon Devices, Inc.)*, responsável por gravar os registros do *Em50G*.

O *software LogChart II*, cuja tela é apresentada na Figura 4.13, é a ferramenta utilizada para a configuração do registrador e, ainda, *download* e visualização dos dados (caso seja necessário o acompanhamento em tempo real). A configuração do registrador define o seu modo de funcionamento, incluindo a programação de início e fim das aquisições de dados, parâmetros, como tipo de entrada, intervalos entre aquisições, fator de multiplicação, escala, etc.



Figura 4.13 – Vista da tela do *LogChart II (Novus)*

Da mesma forma, o *ECH2O Utility* (Figura 4.14) realiza a configuração do sistema de coleta de dados do sistema *Em50G* e, além de fazer o *download* dos dados, permite a visualização, em tempo real, quando conectado ao computador em campo.

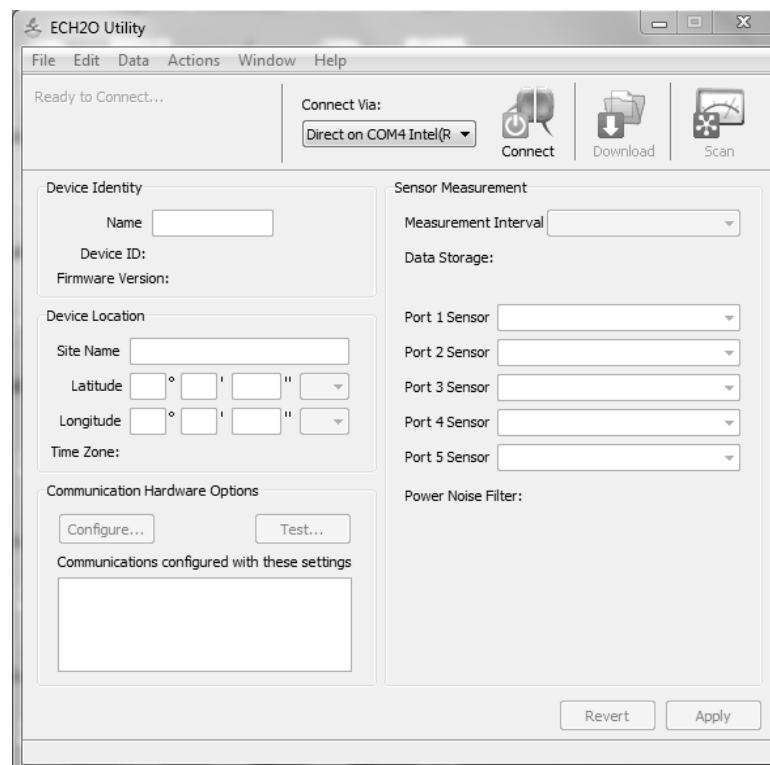


Figura 4.14 – Vista da tela do *ECH2O Utility (Decagon Devices, Inc.)*

A Figura 4.15 apresenta a configuração do equipamento, considerando todos os seus componentes: torpedo, sensores, hastes, cabos, etc.

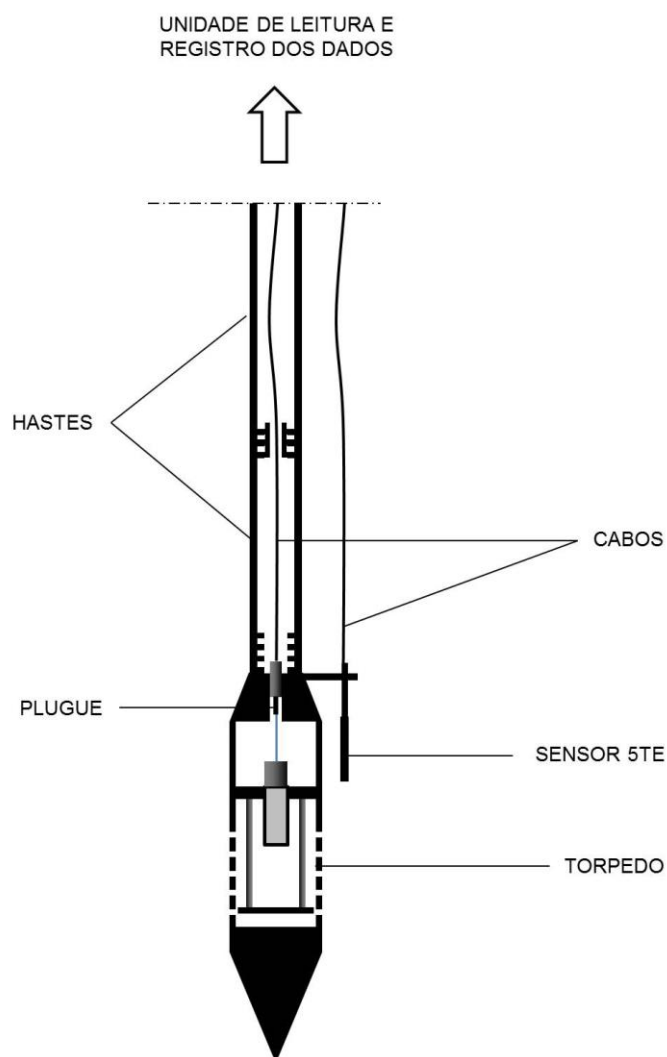


Figura 4.15 – Detalhe da sonda piezométrica montada com os principais componentes

Para o transporte do equipamento, constituído pelas partes já destacadas, foram desenvolvidas três caixas (Figura 4.16) com rodas resistentes, sendo 2 delas com dimensões de 1,13 m (comprimento) x 0,32 m (largura) x 0,15 m (altura), que armazenam as hastes, e uma, que possui medidas de 0,39 m (comprimento) x 0,33 m (largura) x 0,46 m (altura). Esta última armazena a unidade de aquisição de dados, o torpedo e os cabos.



Figura 4.16 – Caixas para armazenamento e transporte dos componentes da sonda

Na Figura 4.17 pode ser visualizada uma das caixas aberta, com as hastes e o amostrador tipo seringa, cujo desenvolvimento foi realizado nesta pesquisa e é descrito posteriormente, devidamente acondicionados.

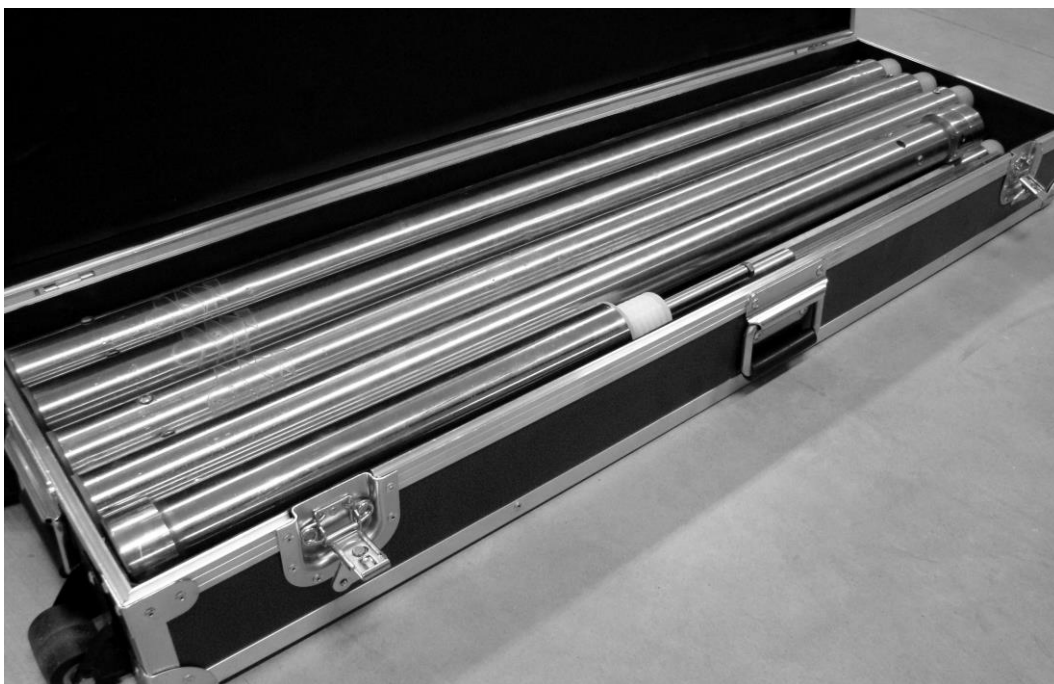


Figura 4.17 – Vista da caixa de hastes aberta

4.2.2 Calibração da sonda piezométrica desenvolvida e seus acessórios

Após a construção e a verificação das condições de funcionamento dos sensores do equipamento desenvolvido, torna-se imperativo a realização dos procedimentos de calibração. A calibração representa o conjunto de operações que estabelece, sob condições específicas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição, sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou material de referência, e os valores correspondentes às grandezas estabelecidas por padrões.

Mais do que o simples conceito, a calibração se faz necessária, pois autentica o desempenho dos sensores utilizados na construção do equipamento, garantindo que os equipamentos sejam capazes de fornecer os resultados desejados de forma precisa. No caso do presente trabalho, foram calibrados os seguintes sensores, cujos procedimentos adotados estão descritos na sequência: sensor *5TE* (temperatura, condutividade elétrica e teor de umidade volumétrico) e o transdutor de pressão.

- **Calibração do sensor *5TE* (laboratório)**

A calibração do sensor *5TE* em laboratório tornou-se necessária, por dois motivos: o primeiro está vinculado à funcionalidade do dispositivo, visto que se trata de uma inovação; o outro, além de evitar possíveis incorreções nas medidas fornecidas, visou estabelecer correlações entre os valores informados pelo equipamento e os valores reais medidos diretamente no rejeito.

Para tanto, utilizou-se água destilada e rejeitos finos disponíveis no laboratório, atentando-se para a representatividade destes, pois, dependendo da propriedade medida, cada material pode apresentar um comportamento diferente em termos de condutividade elétrica. Por isso, é fundamental que a avaliação seja realizada no próprio rejeito a ser investigado, o que só é possível após da disponibilidade do material, viabilizada pela amostragem durante os ensaios de campo.

A calibração da função temperatura foi realizada com um béquer e água destilada. Iniciou-se com uma temperatura mais baixa (em torno de 15° C), propiciada pela incorporação de gelo à água. O béquer com água destilada foi imerso, em banho-maria,

na água com o gelo, tomando-se o cuidado para manutenção da homogeneidade de temperatura em todo o volume armazenado. Para as temperaturas maiores, o béquer foi deixado em condições ambientes e, para aquelas ainda superiores, o béquer foi novamente colocado em banho-maria, com o aquecimento até a faixa de 45° C.

O sensor foi imerso no béquer com água e suas medições foram comparadas a um termômetro de tubo capilar de mercúrio já calibrado, com precisão leitura de 0,1° C. A curva de calibração é apresentada na Figura 4.18, demonstrando um erro sistemático insignificante, dentro da faixa de temperatura trabalhada.

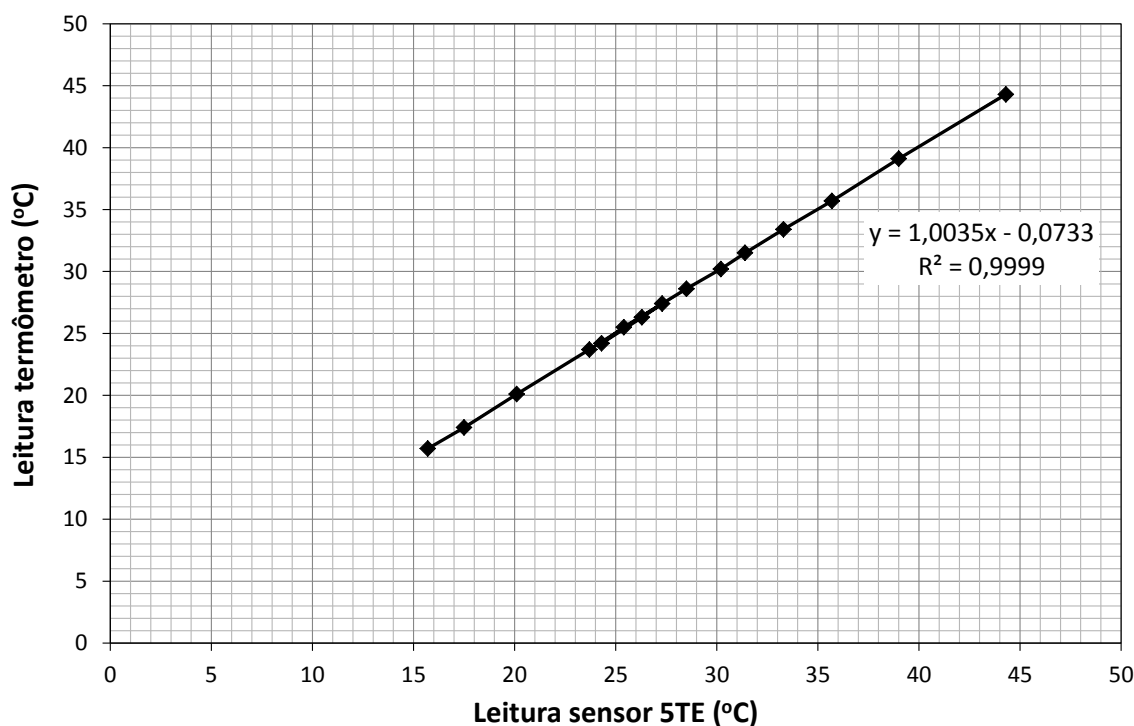


Figura 4.18 – Curva de calibração da função temperatura do sensor 5TE

As medições de condutividade elétrica foram aferidas a partir da comparação dos valores fornecidos por um condutivímetro modelo *DM-32*, de fabricação da *Digimed*, de posse do Centro Tecnológico de Geotecnia Aplicada. Para tanto, utilizou-se um béquer com volume suficiente para a total imersão da sonda 5TE e um rejeito de bauxita (disponível no laboratório), visto que, no momento de construção do equipamento, ainda não se dispunha do rejeito de fosfato da Mina de Bayóvar.

As medições ocorreram em diferentes teores de sólidos, sendo a variação destes realizadas a partir da incorporação da água do próprio rejeito, armazenada em laboratório. Observa-se uma diferença entre as leituras do condutivímetro *DM-32* e aquelas informadas pelo *software* da sonda *5TE*, sendo aumentada sistematicamente para condutividades maiores (Figura 4.19), permitindo um ajuste polinomial entre os valores medidos.

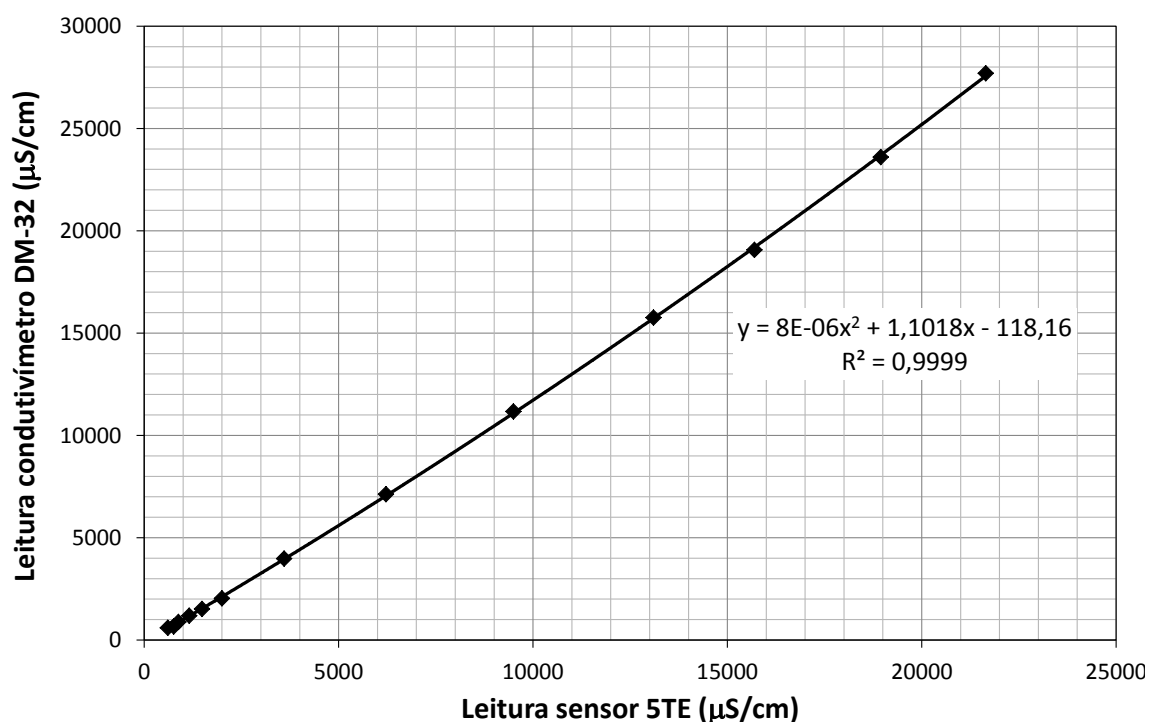


Figura 4.19 – Curva de calibração da função condutividade elétrica do sensor *5TE*

Destaca-se que a condutividade elétrica é a capacidade de uma substância conduzir eletricidade. Na sonda *5TE*, essa propriedade é medida pela aplicação de uma corrente elétrica alternada para dois eletrodos e medida a partir da resistência entre eles. A distância entre os eletrodos e a propriedade do meio é essencial para a boa precisão da medida, sendo, portanto, fundamental a sua calibração com o próprio material a ser investigado em campo.

Considerado um método indireto para a quantificação da quantidade de água presente, o teor de umidade volumétrico medido pela sonda *5TE* é obtido a partir da constante

dielétrica do meio, a partir da utilização da técnica da reflectometria no domínio do tempo (TDR). A estimativa da constante dielétrica do solo (ou rejeito, para o caso) é baseada no tempo de emissão / reflexão de um pulso eletromagnético, emitido por um gerador de pulsos, em hastes metálicas paralelas (sonda *5TE*), que servem como guia de ondas.

Existem diversas relações entre a constante dielétrica (K_a) e o teor de umidade volumétrico (θ) do meio, amplamente utilizado na ciência do solo, como uma determinação indireta. O *software* fornecido pela Decagon (*ECH2O Utility*) utiliza a calibração considerando a Equação de Topp (Topp *et al.*, 1980), expressa abaixo (Equação 4.1).

$$\theta = 4,3 \cdot 10^{-6} K_a^3 - 5,5 \cdot 10^{-4} K_a^2 + 5,92 \cdot 10^{-2} K_a - 5,3 \cdot 10^{-2} \quad (4.1)$$

Após a determinação dos teores de umidade volumétricos, calculados diretamente pelo *software*, estes foram correlacionados, para cada leitura com os respectivos teores de umidade gravimétricos, visto a sua importância para a determinação dos índices de vazios correspondentes.

Para obtenção desta correlação, em cada etapa, com a amostra cuidadosamente homogeneizada em um béquer, mediu-se inicialmente a constante dielétrica (K_a) da amostra e o seu respectivo teor de umidade volumétrico (θ). De cada etapa, retiraram-se amostras em 3 cápsulas para determinação do teor de umidade gravimétrico (w), utilizando-se uma estufa a 105° C, onde os materiais foram mantidos durante 48 horas. É importante destacar que as amostras foram ensaiadas do maior para o menor teor de sólidos, cuja redução foi viabilizada com a adição progressiva de água.

Os gráficos que destacam estas correlações, representados pelas Figuras 4.20 e 4.21, expressam o teor de umidade gravimétrico em função do teor de umidade volumétrico e em função da constante dielétrica, respectivamente. Foi adotado um ajuste polinomial de terceiro grau, bem como se verificou a viabilidade do uso da sonda para o tipo de rejeito utilizado na calibração.

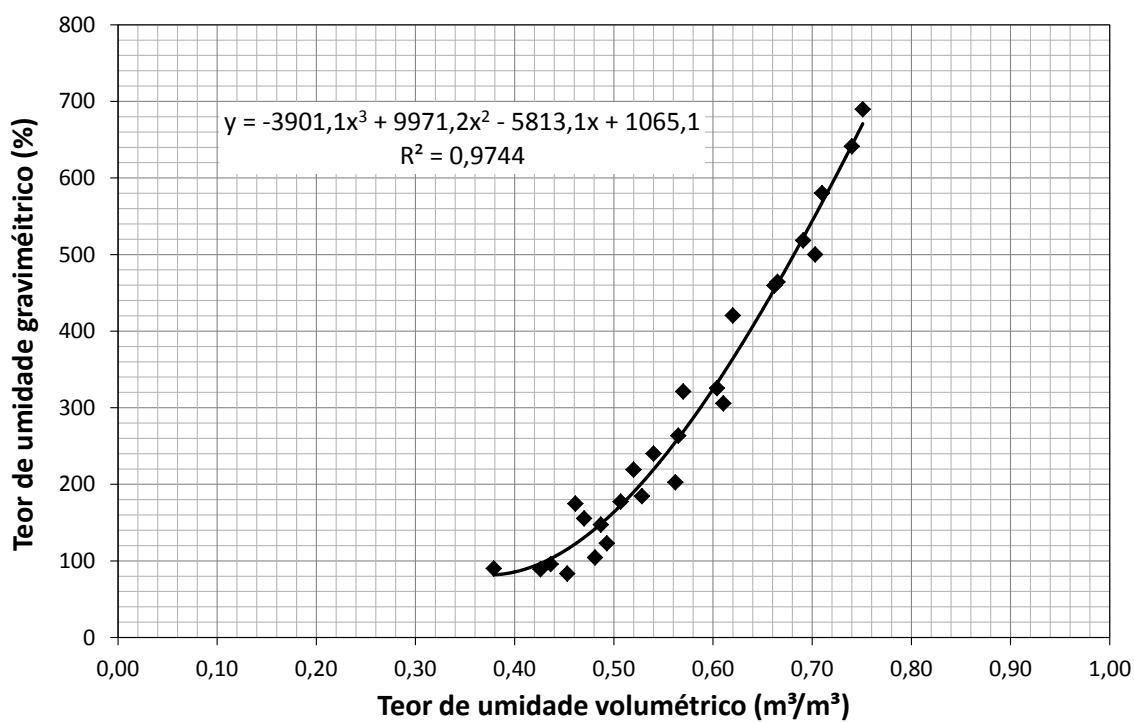


Figura 4.20 – Curva teor de umidade volumétrico do sensor *5TE* versus teor de umidade gravimétrico

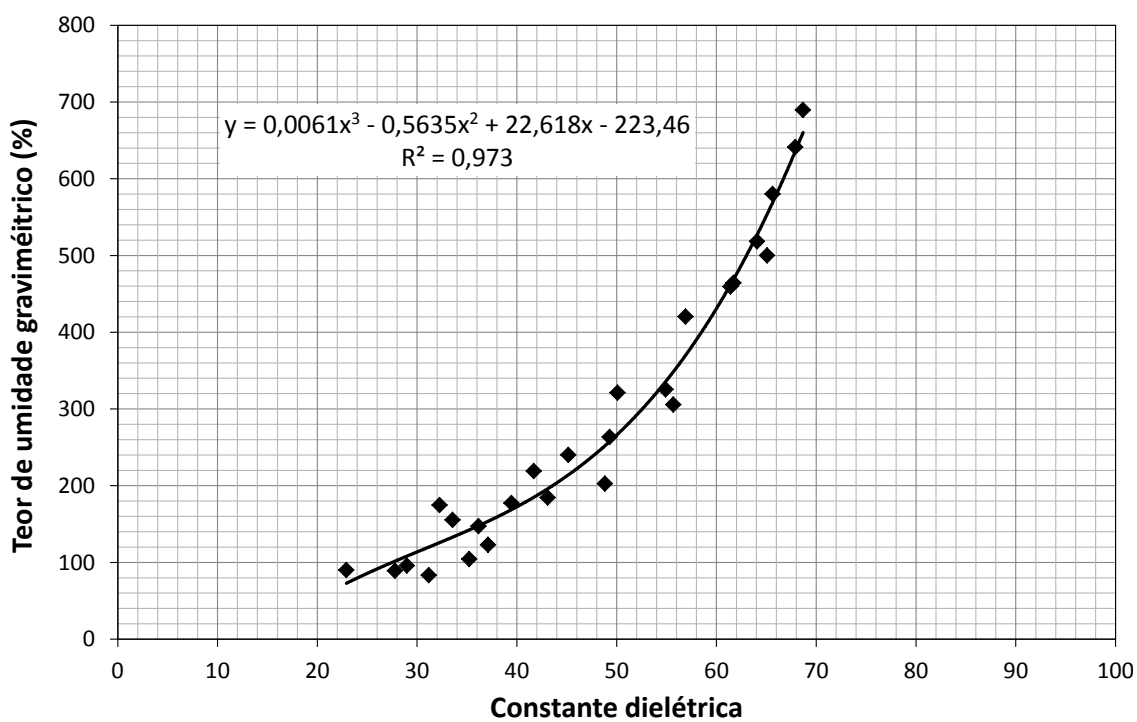


Figura 4.21 – Curva constante dielétrica do sensor *5TE* versus teor de umidade gravimétrico

Os dados extraídos dos ensaios, que foram utilizados para a construção das curvas ‘teor de umidade volumétrico do sensor *5TE* versus teor de umidade gravimétrico’ e ‘constante dielétrica do sensor *5TE* versus teor de umidade gravimétrico’, são expostos na Tabela 4.2. A tabela também apresenta os valores dos teores de sólidos calculados a partir da umidade gravimétrica.

Tabela 4.2 – Teores de umidade volumétrico e gravimétrico e teores de sólidos associados às constantes dielétricas do sensor *5TE*

Leitura	Constante dielétrica (Ka)	Teor de umidade		Teor de sólidos ψ (%)
		Volumétrico θ (m ³ /m ³)	Gravimétrico w (%)	
1	22,91	0,379	90,02	52,63
2	27,79	0,426	89,10	52,88
3	28,98	0,436	95,73	51,09
4	31,17	0,453	83,38	54,53
5	32,26	0,461	174,67	36,41
6	33,56	0,470	155,30	39,17
7	35,22	0,481	104,36	48,93
8	36,16	0,487	147,24	40,45
9	37,12	0,493	123,01	44,84
10	39,45	0,507	177,36	36,05
11	41,69	0,520	219,03	31,35
12	43,08	0,528	184,45	35,16
13	45,16	0,540	240,10	29,40
14	48,82	0,562	202,57	33,05
15	49,30	0,565	263,34	27,52
16	50,08	0,570	321,20	23,74
17	54,91	0,604	325,50	23,50
18	55,68	0,610	305,65	24,65
19	56,91	0,620	420,30	19,22
20	61,42	0,662	459,50	17,87
21	61,71	0,665	464,20	17,72
22	64,07	0,691	518,31	16,17
23	65,07	0,703	500,01	16,67
24	65,63	0,710	580,15	14,70
25	67,90	0,740	641,30	13,49
26	68,67	0,751	689,63	12,66

Com base nos resultados, também foi possível correlacionar o teor de sólidos do rejeito com a leitura da constante dielétrica fornecida pelo sensor *5TE*. A curva com a correlação é mostrada na Figura 4.22.

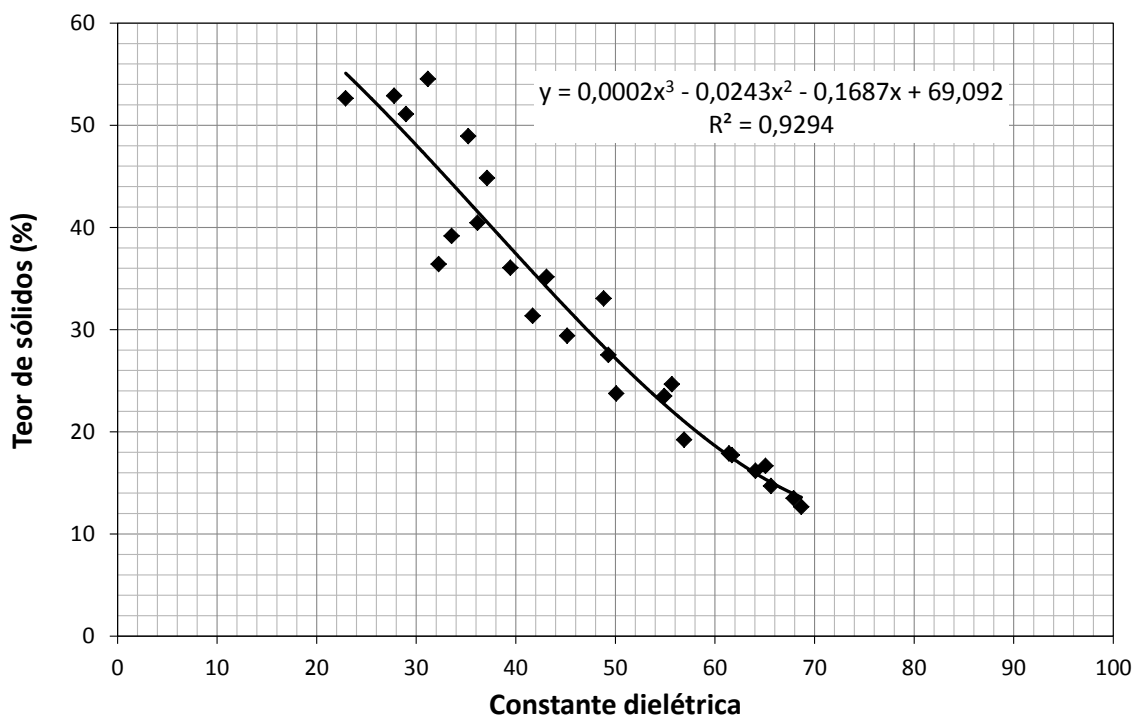


Figura 4.22 – Curva constante dielétrica do sensor *5TE* versus teor de sólidos

- **Calibração do transdutor de pressão da sonda-torpedo**

Antes dos ensaios de campo, o transdutor de pressão localizado na sonda-torpedo, responsável por registrar as dissipações das poropressões ‘*in situ*’ foi devidamente calibrado.

Para tanto, utilizou-se uma coluna construída com dois tubos de PVC de 100 mm (de 6 metros), interconectados, cuja base foi fechada através de um tampão (*cap*). A coluna foi fixada em um edifício em construção e propiciou uma altura de coluna d’água de 12 m. Inicialmente, a calibração considerou apenas dois pontos (0 e 12 m), visando inserir a correção do erro na própria unidade de leitura, através do indicador universal de leituras, modelo *N1500LC*, já descrito anteriormente. Após esta etapa, as pressões foram medidas a cada metro, para verificação da calibração (Figura 4.23).

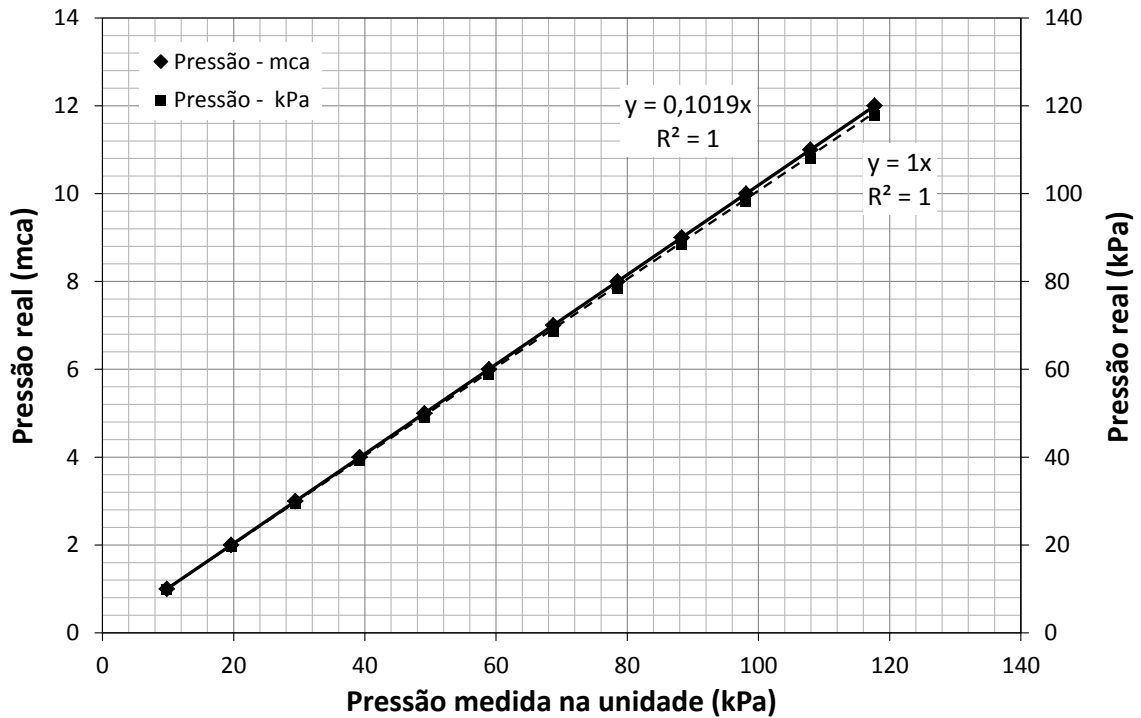


Figura 4.23 – Curva de calibração da sonda-torpedo

4.2.3 Procedimento realizado na sondagem piezométrica

A campanha de ensaios em campo visou verificar a consistência do equipamento desenvolvido, além de possibilitar a avaliação do comportamento do rejeito em estudo, cuja descrição de suas características e da área de investigação será realizada ao longo deste trabalho.

Necessariamente, todo ensaio de campo requer cuidados, enfatizando os aspectos de segurança, detalhe dos procedimentos, representatividade dos dados obtidos que, posteriormente serão interpretados à luz de modelos teóricos já consolidados na geotecnia. Neste sentido, além das mensurações devidamente obtidas pelos sensores presentes no equipamento, a amostragem tem fundamental importância para possibilitar análises consistentes.

A princípio, serão descritos os procedimentos sequenciados, adotados na campanha experimental de campo, bem como o desenvolvimento de métodos inovadores de amostragem de rejeitos em baixa e média consistência.

Para realização dos ensaios, torna-se necessário a construção de uma balsa com área mínima aproximada de 6 m². A balsa disponível para a investigação possuía área maior, 9 m². Esta balsa foi então posicionada nos pontos escolhidos para determinação de cada perfil de sondagem. A balsa possuía proteções laterais, forro de fundo (visando impedir a passagem das peças que compõem o equipamento), com furo central com dimensões aproximadas de 0,60 m x 1,00 m (Figuras 4.24 e 4.25).

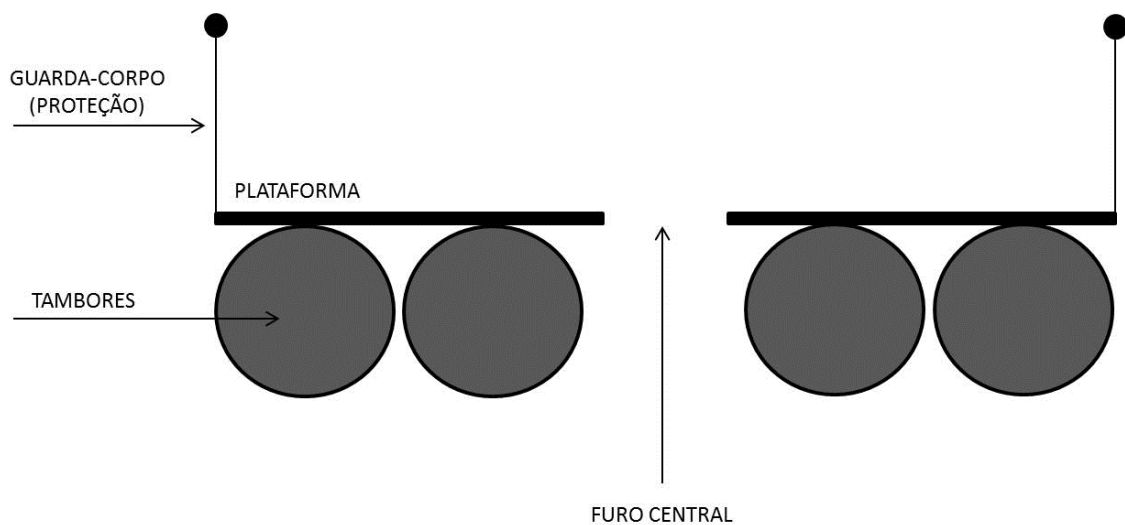


Figura 4.24 – Desenho em perfil da balsa proposta para a sondagem piezométrica



Figura 4.25 – Vista da balsa usada (disponível) na sondagem piezométrica

A estrutura e logística disponibilizada pela mineradora para realização da sondagem contava ainda com um bote inflável, utilizado para o deslocamento da balsa para os pontos definidos para a investigação, bem como da equipe (Figura 4.26). Devido às fortes correntes de vento no local, em especial no período vespertino, em cada ponto de ensaio, realizava-se uma ancoragem com o apoio de cordas e dois pesos que eram cuidadosamente lançados no fundo do reservatório, considerando o tensionamento das cordas na mesma direção do vento, para impedir o giro da balsa.



Figura 4.26 – Vista geral da estrutura disponível para os ensaios de campo

Após o correto posicionamento da balsa, antes mesmo da montagem da sonda, o primeiro passo do ensaio consistiu na realização de uma batimetria para determinação da altura de água sobrenadante. Este procedimento foi realizado com o uso de uma haste, presa em uma linha de náilon, cuja base era caracterizada por uma placa perfurada. Em superfície, o comprimento da linha foi determinado e devidamente registrado com o apoio de uma trena.

Posteriormente, o torpedo foi mergulhado em um balde com água extraída do próprio reservatório e, ainda com o conjunto imerso, a pedra porosa foi introduzida, de forma a não perder a sua saturação. Ressalta-se que a pedra porosa foi inicialmente saturada,

sendo fervida em laboratório, antes de ir a campo, e colocada em um recipiente protegido hermeticamente. Ainda com o torpedo mergulhado, o primeiro segmento do cabo, responsável por levar os sinais elétricos do transdutor até a superfície, foi conectado ao torpedo, assim como o suporte e o sensor *5TE*.

Na sequência, foram montadas duas hastes e o conjunto (torpedo + hastes) levado e mergulhado no reservatório. Só após este procedimento, com a garantia da imersão do torpedo na água superficial, o balde foi retirado para posterior descida da sonda. Novas hastes foram conectadas, os cabos foram então acoplados à unidade de registro dos dados e a sonda descida até a cota de interface lama / água sobrenadante. Após o encontro do rejeito, a cravação da sonda foi realizada a uma velocidade aproximada de 2 cm/s (Figura 4.27).



Figura 4.27 – Vista do processo de montagem das hastes e cravação da sonda

A velocidade de cravação escolhida (2 cm/s) para os ensaios foi a mesma utilizada nos procedimentos convencionais do piezocone. Além disso, um dos objetivos de padronizar uma velocidade relativamente baixa de cravação estava relacionado ao importante cuidado para garantia da perturbação mínima dos rejeitos finos investigados ao longo dos perfis escolhidos.

Durante a cravação da sonda piezométrica, a cada metro de profundidade, o procedimento foi interrompido para medida das poropressões, teor de umidade volumétrica, temperatura e condutividade elétrica. A manutenção da sonda na altura desejada era feita com a ancoragem na própria balsa. O avanço da sondagem só era reiniciado após constatação da estabilização das poropressões, cujo comportamento esperado pode ser visualizado na Figura 4.28. O acompanhamento da dissipação das poropressões foi realizado em superfície, através do painel indicador instalado na unidade eletrônica de leitura.

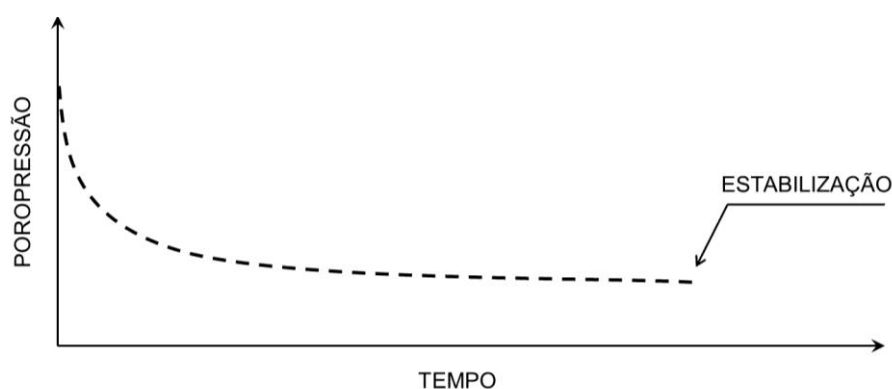


Figura 4.28 – Curva típica de dissipação das poropressões

O procedimento foi repetido para cada metro de avanço da sondagem, sempre observando a manutenção da velocidade de cravação. À medida que se avançou a prospecção, novas hastes (externas) e segmentos de cabos foram conectados. Reforça-se que todo o acompanhamento dos dados coletados em cada horizonte de sondagem foi realizado em superfície, através da unidade eletrônica para aquisição e armazenamento. O *download* dos dados em um computador portátil foi realizado ao final de cada dia. A Figura 4.29 mostra o esquema da sondagem realizada em campo.

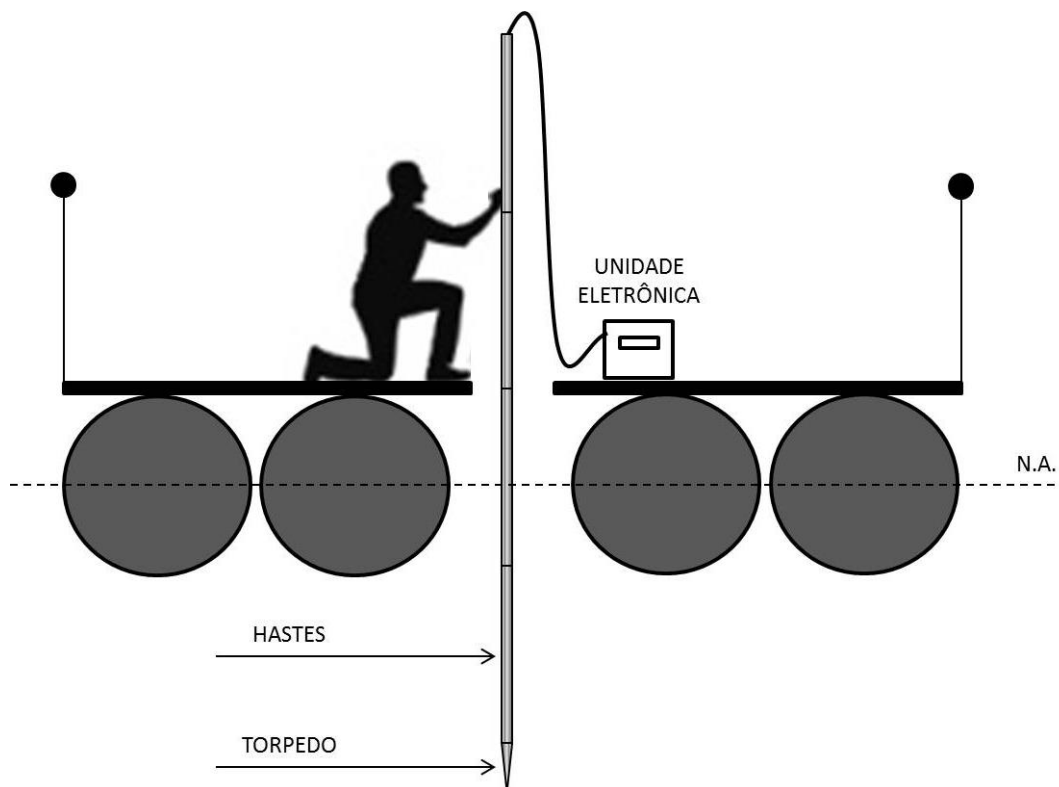


Figura 4.29 – Esquema representativo da sondagem piezométrica

Em geral, para cada perfil, a sondagem é interrompida no momento em que se percebe a dificuldade de avanço, visto que todo o procedimento caracteriza-se pela execução manual. No entanto, pela particularidade dos rejeitos estudados (pouco consolidados), tornou-se possível o avanço até a base (fundo) do tanque.

4.2.4 Amostragem dos rejeitos

Após os procedimentos de sondagem foi realizada a extração de amostras para cada horizonte. Para evitar a amostragem de amostras perturbadas, a balsa foi deslocada em torno de 2 metros lateralmente. Essa amostragem é necessária, para determinação dos teores de umidade gravimétrica, cálculo dos índices de vazios e os respectivos pesos específicos (natural e dos sólidos).

Convencionalmente, as amostragens realizadas em grandes profundidades dos reservatórios de rejeitos, onde a condição da lama apresenta-se em elevadas densidades, é realizada com amostradores tipo ‘shelby’ de pistão estacionário. Já para o caso de

lamas de baixa densidade, com reduzido teor de sólidos, utiliza-se o amostrador tipo caneco. Diversos autores abordam o uso destes amostradores na literatura técnica (Villar, 1990; Gomes, 1998; Santos 2001; Villar, 2002).

O amostrador tipo caneco é composto por um recipiente metálico cilíndrico, dotado de uma tampa móvel, geralmente vedada com um anel de borracha. A amostragem de lamas de baixo teor de sólidos é realizada a partir da introdução do equipamento vedado ao longo da profundidade do reservatório até o horizonte desejado. Atingida a profundidade de ensaio, a tampa do amostrador é acionada por um mecanismo que permite a sua abertura e a respectiva entrada (coleta) da lama fluida. Em seguida, a tampa retorna à sua posição de origem e o equipamento é levado à superfície e a amostra é retirada e, conseqüentemente, armazenada.

Apesar de já bastante utilizado, este procedimento apresenta algumas limitações:

- o mecanismo responsável pela abertura e fechamento da tampa móvel é composto por hastes, cujo acionamento é realizado em superfície. Dependendo da profundidade de amostragem, o procedimento deve ser repetido várias vezes, visando a certificação e a garantia da representatividade da amostra, uma vez que, durante a descida das hastes, pode ocorrer a entrada de lamas dos horizontes superiores;
 - apesar de bastante propício para coleta de rejeitos com baixo teor de sólidos, o amostrador tipo caneco pode não ser aplicado a amostras de média densidade (teor de sólidos médio), cuja consistência também não permite a coleta através de amostradores tipo ‘shelby’ em maiores profundidades. Neste caso, o peso próprio das camadas de rejeitos superiores, associada à sua consistência, pode impedir a abertura da tampa do amostrador.
- **Idealização e construção de um novo amostrador**

Visando superar estas limitações e, objetivando propor um procedimento de amostragem mais efetivo e a representatividade da amostra, foi desenvolvido, nesta pesquisa, um novo amostrador, tipo seringa, voltado para amostras de rejeitos finos de baixa e média densidade, já publicado anteriormente (Pereira e Gomes, 2012).

O equipamento foi construído em aço inoxidável, em formato cilíndrico, com 300 mm de altura, diâmetro interno de 48 mm e parede de 2 mm, possibilitando, portanto, a coleta de um volume aproximando de 540 cm³ (Figuras 4.30 e 4.31).



Figura 4.30 – Vista do amostrador tipo seringa desenvolvido

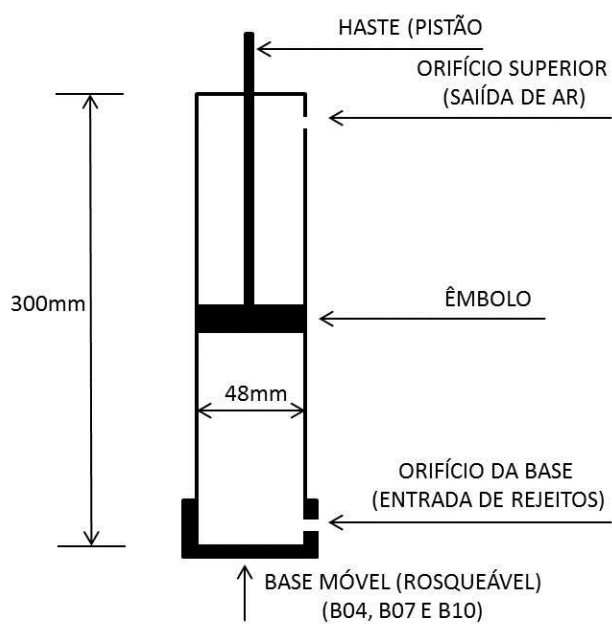


Figura 4.31 – Desenho esquemático do amostrador tipo seringa

O amostrador possui três bases móveis e roscáveis, com altura de 28 mm e diâmetro externo de 58 mm, contendo orifícios de 4, 7 e 10 mm de diâmetro, aplicáveis a rejeitos com diferentes consistências. Estas bases podem ser observadas na Figura 4.30, já apresentada. Internamente, o equipamento possui um êmbolo que se movimenta ao longo de toda a extensão do cilindro, com o apoio de uma haste metálica. A coleta é, portanto, iniciada com o êmbolo posicionado próximo à base e, em seguida, deslocado para o topo do amostrador através da haste metálica (pistão). Este mecanismo permite a sucção (aspiração) do rejeito para o interior do amostrador pelo orifício da base, sendo o ar interno extravasado por outro furo, localizado na parte superior do amostrador.

O amostrador possui em seu topo uma rosca externa construída em náilon, adaptável às hastes metálicas interconectáveis utilizadas no procedimento de sondagem. A haste de apoio ao êmbolo do amostrador também pode ser rosqueada a outras peças mais extensas que se deslocam no interior das hastes utilizadas no ensaio de sondagem, permitindo, desta forma, a coleta de rejeitos em diversas profundidades do reservatório. A Figura 4.32 mostra um esquema representativo do funcionamento do equipamento.

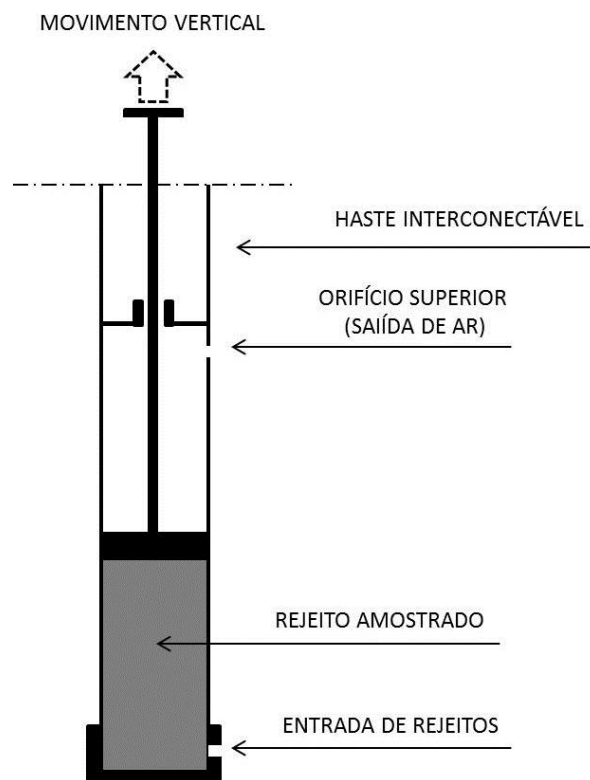


Figura 4.32 – Esquema de funcionamento do amostrador tipo seringa

Visando verificar a efetividade e a representatividade do amostrador, foi realizado um procedimento experimental em laboratório, em momento anterior à investigação de campo, cuja metodologia envolveu, basicamente, a amostragem de um rejeito fino de bauxita (disponível no momento da construção do equipamento), a partir de um balde, e a consecutiva determinação do teor de sólidos do material amostrado. O rejeito de bauxita utilizado nos ensaios teste do amostrador é oriundo da Mineração Paragominas e caracteriza-se pela composição majoritária de partículas finas, com mais de 95% do material passante na peneira #200 (0,074 mm), apresentando elevada plasticidade e densidade relativa dos grãos (G_s) igual a 2,67.

Os ensaios de determinação do teor de sólidos (ψ) dos rejeitos em lama de bauxita objetivaram, sobretudo, a verificação da representatividade dos procedimentos de amostragem realizados pelo equipamento. Para tanto, utilizaram-se amostras com seis diferentes teores de umidade (w), partindo, inicialmente, de um valor mais baixo, correspondente a um teor de sólidos em torno de 50%. A esta amostra, acrescentou-se água destilada, visando a redução do teor de sólidos, em mais cinco estágios (ensaios).

Para cada ensaio, determinou-se inicialmente o teor de sólidos após a homogeneização da amostra em um balde plástico provido de um misturador. Em seguida procedeu-se a coleta do rejeito com o amostrador cilíndrico, utilizando as três bases, identificadas como B04 (4 mm), B07 (7 mm) e B10 (10 mm). A determinação do teor de sólidos real, bem como do teor de sólidos das amostras extraídas com a utilização das três diferentes bases, foi realizada a partir do conhecimento do teor de umidade determinado em estufa. As Tabelas 4.3 e 4.4 fornecem os diferentes teores de umidade e de sólidos utilizados nos ensaios e determinados pelo amostrador, acoplado às bases B10, B07 e B10.

Tabela 4.3 – Teores de umidade (w) real e amostrada

Teor de umidade (%)	1	2	3	4	5	6
Real	94,9	104,3	119,1	170,1	289,3	740,2
Amostrador B10	95,2	104,0	119,4	169,8	297,4	741,2
Amostrador B07	95,3	103,9	119,5	169,7	297,7	741,1
Amostrador B04	96,0	104,0	119,3	170,6	298,9	739,2

Tabela 4.4 – Teores de sólidos (ψ) real e amostrado

Teor de sólidos (%)	1	2	3	4	5	6
Real	51,3	48,9	45,6	37,0	25,1	11,9
Amostrador B10	51,2	49,0	45,6	37,1	25,2	11,9
Amostrador B07	51,2	49,0	45,6	37,1	25,2	11,9
Amostrador B04	51,0	49,0	45,6	37,0	25,1	11,9

Construídas a partir das tabelas apresentadas, as Figuras 4.33, 4.34 e 4.35 apresentam os resultados, na forma de gráficos, do teor de sólidos de cada ensaio. As colunas estabelecem uma comparação dos resultados obtidos em cada amostrador com o teor de sólidos real, medido anteriormente, com o auxílio de uma concha. Cabe destacar que o teor de sólidos real foi obtido pela média de três determinações, a partir do teor de umidade conhecido.

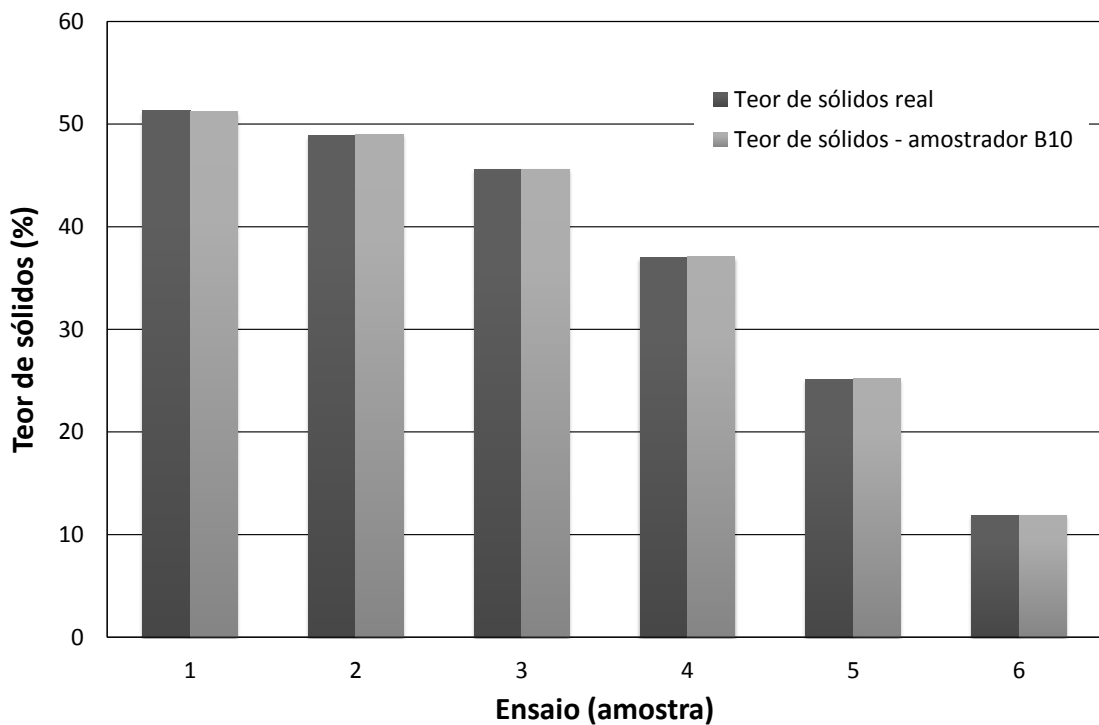


Figura 4.33 – Curva comparativa dos teores de sólidos real e amostrado com a base B10

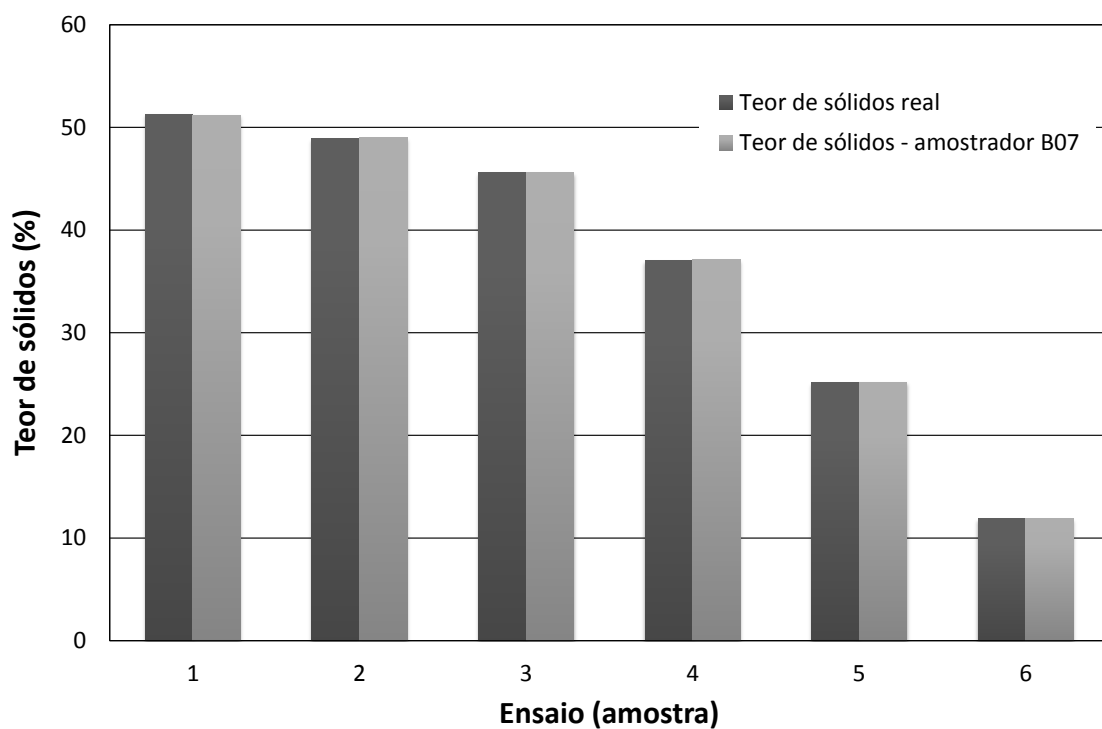


Figura 4.34 – Curva comparativa dos teores de sólidos real e amostrado com a base B07

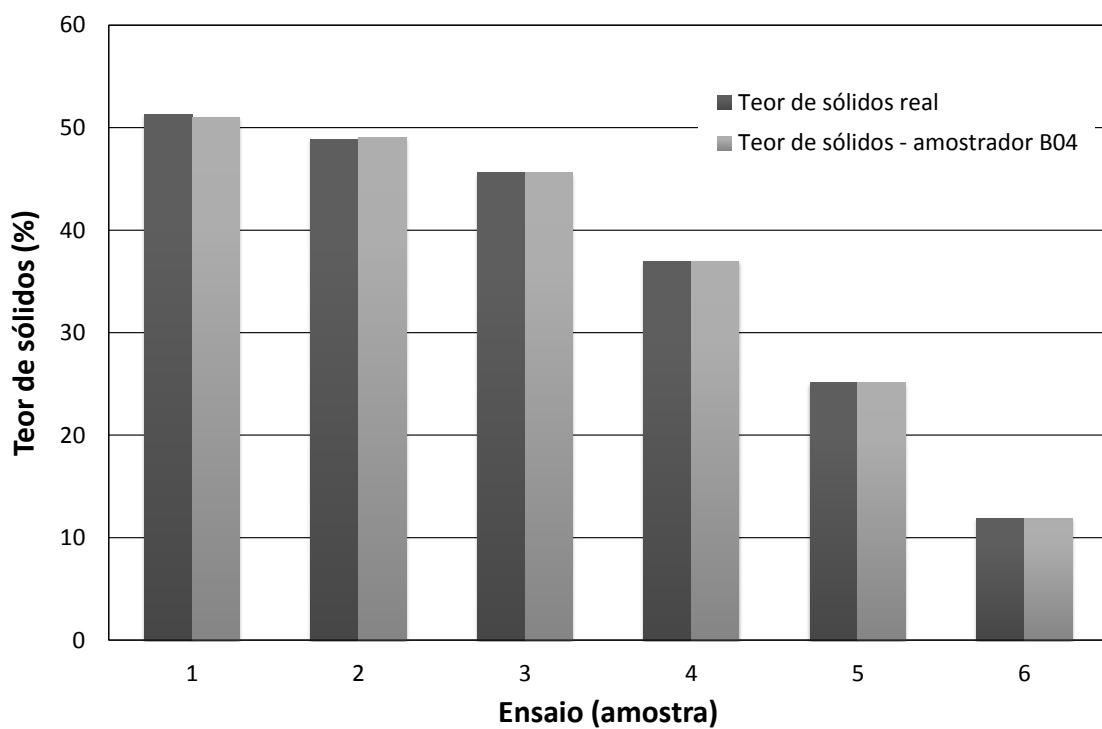


Figura 4.35 – Curva comparativa dos teores de sólidos real e amostrado com a base B04

As variações entre teor de sólidos real e o teor de sólidos das amostras extraídas em cada ensaio atingiram valores médios da ordem de 0,15%, considerado razoável quando se trata de lamas homogeneizadas artificialmente em recipiente de 18 litros (balde plástico).

A maior variação para o teor de sólidos real ocorreu quando se utilizou o amostrador com a base B04 na coleta do rejeito com teor de sólidos de 51,3%. Neste caso, o erro mensurado foi de 0,58%, sendo determinado no amostrador um teor de sólidos de 51,0%. A variação, mesmo que insignificante, não pode ser atribuída à base do amostrador, mas à representatividade da amostra coletada neste ensaio.

Devido à consistência da amostra, o volume coletado com esta base foi muito baixo em relação à capacidade do amostrador. A pequena abertura do orifício impediu a sucção do rejeito em volume representativo para maiores teores de sólidos, especialmente para os ensaios 1 e 2. Observou-se uma menor variação nos resultados quando se trabalhou com um teor de sólidos mais baixos, caracterizando uma maior homogeneidade da amostra. A variação máxima, considerando os resultados do ensaio 6 ($\psi = 11,90\%$), foi de 0,10%, o que é insignificante perante a efetividade do amostrador.

Para o caso de rejeitos armazenados e que estejam mais consistentes, impedindo a coleta pelo amostrador tipo seringa, este pode ser adaptado para um amostrador tipo pistão, bastando substituir as bases perfuradas por um anel biselado, que pode ser rosqueado no mesmo local da referida base (Figura 4.36).



Figura 4.36 – Vista do anel biselado para o amostrador tipo pistão

- **Realização da amostragem ‘in situ’**

Conforme já destacado, a coleta de amostras foi realizada nas mesmas profundidades dos ensaios de dissipação das poropressões, apenas com o deslocamento mínimo da balsa para evitar a amostragem na região já perturbada pela cravação da sonda-torpedo.

Pela característica dos rejeitos armazenados, apresentando-se pouco consolidados, a amostragem foi realizada somente com o amostrador tipo seringa, não necessitando do emprego do anel biselado, mesmo nas profundidades mais elevadas. A cada nível amostrado, a seringa foi trazida à superfície da balsa e, após a sua limpeza, o rejeito amostrado foi injetado em sacos plásticos reforçados ou recipientes plásticos, fornecidos pelo laboratório da mineradora. Uma vista do procedimento, com destaque para a barra interna que se deslocava no interior das hastes, é apresentada na Figura 4.37.



Figura 4.37 – Vista do procedimento de amostragem dos rejeitos

- **Desenvolvimento de mini amostradores**

O desenvolvimento do amostrador tipo seringa já caracterizou, além de uma inovação, um grande avanço para os procedimentos de amostragem, considerando a sua efetividade e representatividade. No entanto, ao longo da pesquisa, foi proposto também outro tipo de amostrador: o mini amostrador, idealizado como uma ferramenta a ser utilizada concomitantemente ao procedimento da sondagem piezométrica.

Neste caso, considerando a sua funcionalidade, o tempo necessário para a investigação tradicional, em que a amostragem é realizada em fase posterior à sondagem, seria significativamente reduzido, ou seja, não existiria esta última etapa, visto que as amostras já seriam retiradas juntamente com a extração da sonda. O mini amostrador foi desenvolvido visando a possibilidade de substituição do amostrador tipo seringa, quando possível, pois a coleta realizada por este último é trabalhosa, considerando que, a cada horizonte amostrado, o equipamento necessita ser levado à superfície. Esta é uma das dificuldades da amostragem após a cravação da sonda.

Ao todo, foram construídos 20 mini amostradores (Figura 4.38), um para cada haste, cujo esquema é representado pela Figura 4.39. O formato foi pensado com o objetivo de facilitar a sua cravação em conjunto com a sonda. O dispositivo possui um anel, responsável pela inserção entre as hastes, de forma que exista um amostrador para cada metro que profundidade. Cada amostrador possui uma cunha de fechamento, responsável por não permitir a entrada de material durante a cravação. A cunha foi inserida no amostrador na superfície da própria balsa e, para facilitar a sua retirada e melhorar o processo de vedação, esta foi lubrificada com o uso de vaselina sólida. Somente após atingir a profundidade final de investigação, as cunhas foram retiradas com o auxílio de uma corda de náilon puxada na superfície da balsa. Como a corda foi amarrada em todas as cunhas, depois de puxada, todos os amostradores foram abertos nas diferentes profundidades, permitindo a entrada do rejeito. Estes amostradores foram levados à superfície no momento da retirada da sonda. Como forma de testar a efetividade do mini amostrador desenvolvido e, como ainda não se tinha a certeza do seu funcionamento e representatividade, a amostragem foi realizada em conjunto com o amostrador tipo seringa em um dos reservatórios estudados. Os resultados, considerando os teores de umidade, são mostrados na Tabela 4.5.



Figura 4.38 – Vista dos mini amostradores

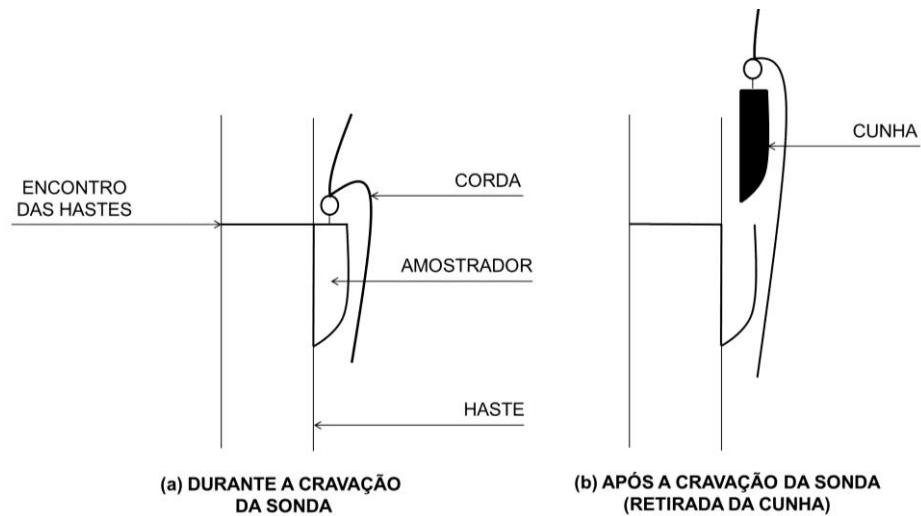


Figura 4.39 – Detalhe esquemático do procedimento de amostragem dos rejeitos (mini)

Tabela 4.5 – Comparação dos teores de umidade obtidos nos amostradores seringa e mini – tanque 101

Amostrador	Teores de umidade (%) – Profundidade (m)								
	5,20	6,20	7,20	8,20	9,20	20,20	11,20	12,20	14,20
Seringa	230,19	218,91	184,63	181,69	180,50	147,22	140,78	134,50	125,98
Mini	219,38	231,39	255,10	226,01	211,11	210,99	190,64	182,16	147,92

Os resultados apresentaram muita dispersão de valores, quando comparados. Esta dispersão pode estar associada, principalmente, à movimentação da balsa no momento da retirada da sonda, alterando o teor de umidade, influenciado pela entrada da água sobrenadante; pela água que descia das hastes superiores durante a elevação do equipamento; e pelo pouco volume, não representativo. Na sequência dos ensaios, os mini amostradores não foram mais utilizados.

4.2.5 Descrição da área de investigação e geologia local

- **Descrição da área de investigação e características do empreendimento**

Os ensaios de sondagem piezométrica foram realizados na Mina de Bayóvar, operada pela *Compañia Minera Miski Mayo SRL - Vale*. A planta está localizada em Bayóvar, na província de Sechura (deserto de Sechura), a 85 km da cidade de Piura, capital do Departamento de Piura, próxima ao Oceano Pacífico, e distante cerca de 1.000 km ao norte de Lima, no Peru (Figura 4.40).

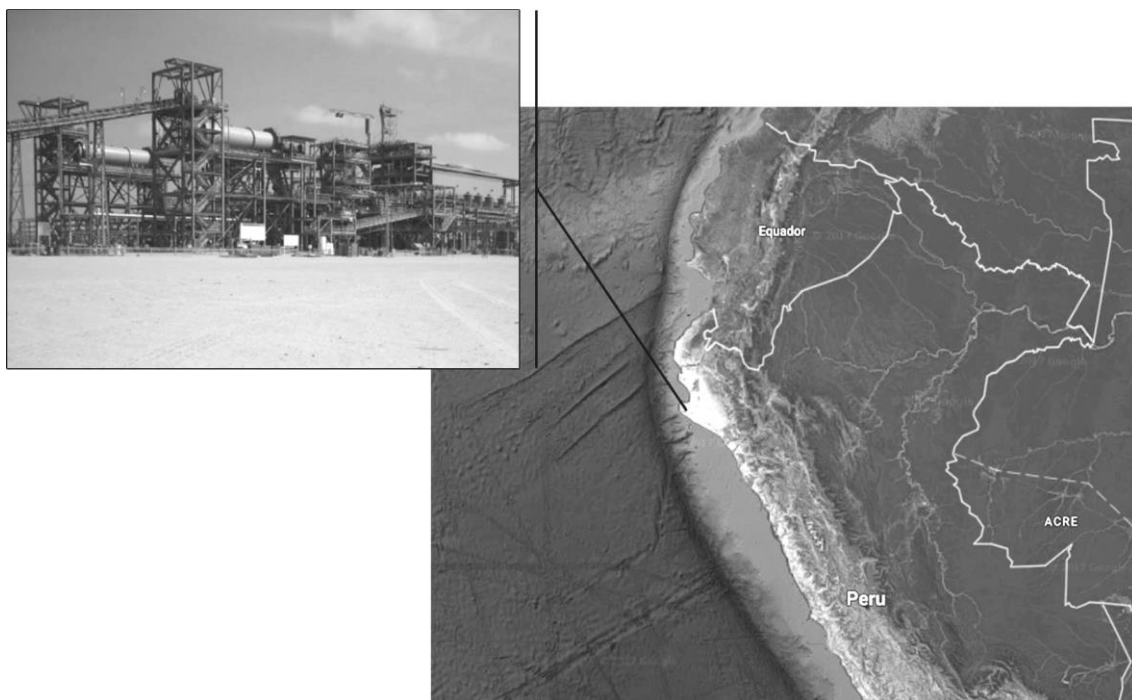


Figura 4.40 – Mapa da região de localização da Mina de Bayóvar com vista parcial da planta concentradora (Google, 2015)

A mina foi instalada no país no ano 2010, e é considerada um dos maiores depósitos de rocha fosfática da América do Sul, matéria-prima destinada à indústria de fertilizantes. A mina se destaca por possuir recursos de qualidade internacional, com baixo custo de mineração. A produção é escoada, principalmente, para os mercados do Brasil, da América do Norte e da Ásia. Além da Vale, as multinacionais Mosaic e Mitsui participam do chamado “Projeto Bayóvar”.

Ao contrário das reservas lavráveis brasileiras, que ocorrem em rochas ígneas carbonatíticas, com teores médios da ordem de 10% de P_2O_5 e com mineralogia e aproveitamento industrial complexo, resultando em custos elevados, as rochas fosfáticas do Peru ocorrem principalmente em rochas sedimentares, com teores em torno de 30% de P_2O_5 e com maior uniformidade e mineralogia mais simples (DNPM, 2015).

Conforme dados expostos na Tabela 4.6, em termos de produção mundial, o Peru ocupa o 11º lugar. No entanto, a sua produção é representativa no contexto da política de importação do nosso país. Em relação aos bens primários, a Mina de Bayóvar tem sido responsável por mais de 50% das 1,7 Mt de concentrado de rocha fosfática importadas pelo Brasil (DNPM, 2015).

Tabela 4.6 – Reserva e produção mundial de fosfato (Adaptado de DNPM, 2015)

País	Reservas (10 ³ t P ₂ O ₅)	Produção (10 ³ t)		(%)
		2013	2014	
China	3.700.000	108.000	100.000	46,1
Marrocos (c/ Saara Ocidental)	50.000.000	26.400	30.000	13,8
EUA	1.100.000	31.200	27.100	12,5
Rússia	1.300.000	10.000	10.000	4,6
Brasil	270.000	6.750	6.514	3,0
Jordânia	1.300.000	5.400	6.000	2,8
Egito	715.000	6.500	6.000	2,8
Tunísia	100.000	3.500	5.000	2,3
Israel	130.000	3.500	3.600	1,6
Arábia Saudita	211.000	3.000	3.000	1,4
Peru	820.000	2.580	2.600	1,2
Outros Países	7.471.000	19.570	17.250	7,9

- **Geologia regional e local**

O Peru está localizado às margens de duas placas tectônicas convergentes, a Placa Sul-americana, a leste, e a Placa de Nazca, a oeste. A fronteira entre a Placa de Nazca e a Placa Sul-Americana é marcada pela Trincheira Peru-Chile, localizada entre 140 km e 180 km a oeste da costa peruana. A borda ocidental da Placa sul-americana caracteriza-se pela sua estreita planície costeira, pelas montanhas da Cordilheira Oriental e Ocidental, bem como pelas falhas e dobras que delimitam os Andes, entre Peru e o norte do Chile.

Em nível regional, o empreendimento minerário está localizado na parte sul da bacia do Sechura, cuja base das rochas corresponde aos períodos inferiores, Pré-cambriano e Paleozóico, sujeitos ao contínuo aprofundamento durante o Cenozóico e a uma ascensão contínua do Neogeno até o presente. Para o oeste, a Mina de Bayóvar é delimitada pelo Cerro Illescas (montanhas), que é um remanescente da Cordilheira da Costa, e, a leste, pelos contrafortes do flanco ocidental dos Andes (INGEMMET, 1980).

A bacia de Sechura é preenchida por uma espessa sequência de sedimentos marinhos, em camadas, incluindo fosforita, diatomita, arenito, xisto e tufo vulcânico, variando em idades compreendidas entre o Eoceno (56,0 a 33.90 Ma), na base, e o Plioceno (5.33 a 2.58 Ma), na bacia superior (Golder Associates, 2016).

A litoestratigrafia regional inclui ainda afloramentos de rochas metamórficas e ígneas, situadas no Cerro Illescas. As rochas metamórficas consistem de gnaisses e tonalitos, do período Pré-cambriano, e migmatitos, granitos, xistos, filitos e ardósias, associados ao período Paleozóico Inferior. O conjunto destas rochas é pertencente ao chamado Complexo Basal da Costa.

Em termos de estratigrafia local, as unidades de solo são classificadas como depósitos eólicos, depósitos lacustres e de estuário, depósitos aluviais e os chamados ‘Tablazos Lobitos e Talara’, que são descritos a seguir (Golder Associates, 2007):

- Os depósitos eólicos são formados por dunas do tipo barcanas, longitudinais e transversais. Esses depósitos são compostos por areias de granulometria fina, com grãos arredondados. As dunas avançam na direção sul-norte,

podendo chegar a 5 km de comprimento. Os depósitos compreendem a Duna Gigante, localizada nas proximidades da Mina de Bayóvar.

- Os depósitos lacustres e de estuário consistem de areais e argilas limpas laminadas, intercaladas com finas camadas.
- Os depósitos aluviais compreendem conglomerados não consolidados de formas subangulares, quartzo, quartzitos, rochas metamórficas e rochas intrusivas, em uma matriz de areia quartzo-feldspática. Os principais depósitos deste tipo de formação estão localizados a leste do monte Illescas, entre o principal acesso à Mina de Bayóvar e a cidade de Porto Rico.
- O Tablazo Lobitos é composto de pacotes conglomerados, com pouca litificação, em matriz arenosa ou bioclasta. Os conglomerados são de origem variada e de formas subangulosas a subarredondadas, com conteúdo de alguns invertebrados fósseis. Está localizado a sudeste da cidade de Punta Lagunas.
- Já o Tablazo Talara, é uma plataforma sob a forma de uma crosta sedimentar, ligeiramente inclinada para o sudeste, coberta por depósitos de areia. É composto de camadas lenticulares de grãos médios a grossos. Está localizado ao sudoeste da Duna Gigante.

As unidades locais de rocha compreendem o Zócalo Paleozóico e as Formações Verdún, Chira, Montera, Zapallal e Miramar, sinteticamente descritas em sequência (Golder Associates, 2007):

- A formação denominada Zócalo Paleozóico é conformada por uma sequência de terraços similares que, em sua base, é composto por conglomerados avermelhados provenientes do Paleozóico. O conglomerado contém clastos arredondados para subângulos, de diferentes dimensões, em uma matriz esbranquiçada e, na parte superior, arenitos calcáreos dolomíticos.
- A Formação Verdún encontra-se no Paleozóico e está localizada entre os Cerros que delimitam Punta Aguja e Punta Lagunas.

- A Formação Chira compreende uma sequência sedimentar que consiste de arenitos com fósseis, em camadas finas, moderadamente cimentadas e intercaladas com arenitos limoníticos. Esta formação está próxima à cidade de Punta Lagunas e, devido à descontinuidade dos afloramentos, é difícil estimar a espessura da sua sequência.
- A Formação Montera é formada, na base, por arenitos, de grãos médios a grandes, com quartzo ou feldspatos e minerais máficos em uma matriz de argila arenosa. A formação possui ainda intercalações de arenitos esbranquiçados e friáveis e calcários descarbonados, amarelos esbranquiçados, de granulometria fina. Esta formação está localizada a leste do Monte Illescas, região onde os afloramentos atingem cerca de 70 m de altura.
- A Formação Zapallal é o produto de uma sedimentação associada a um processo de subsidência profunda. Nesta formação, é possível observar a distinção de dois membros principais, com diferentes níveis, separados por uma camada de argila. O chamado primeiro membro é composto por 3 níveis, contendo areias e fosfatos em camadas que variam de 20 a 40 cm. O membro superior compreende 5 níveis, com areias fosfóricas e diatomitas finas na base e, na sequência, ainda possui as chamadas diatomitas Incas e Quechua e estéril, além da zona Minerva. A formação avança na região de Bayóvar.
- A Formação Miramar inclui conglomerados aluviais de baixa consolidação, em matriz arenosa, intercalados com camadas lenticulares de arenitos e finas camadas de arenitos laminados, muito friáveis, de baixa cimentação. Esta formação surge ao sul de Bayóvar, concordante com a Formação Zapallal e Tablazo Talara.

As unidades estratigráficas que contém o fosfato ocorrem nos níveis superiores de 135 a 215 m do Mioceno (23,22 a 5,33 Ma), na bacia de Sechura, dentro da Formação Zapallal. O depósito de fosfato de Sechura possui característica sedimentar, também conhecido como depósito de fosfato ascendente, depósito de fosfato estratiforme ou até

mesmo depósito de fosforita. Os depósitos de fosfato sedimentar são de origem bioquímica. A formação destes depósitos ocorre ao longo do tempo geológico, abrangendo desde o Proterozóico (2.500 a 542 Ma) até o presente (Garrison, 1992, citado por Golder Associates, 2016).

Os depósitos de fosfato sedimentar modernos são atualmente formados na costa do Pacífico do Peru, sob condições deposicionais e controles semelhantes que estavam em vigor durante a deposição do Mioceno e a formação do depósito de fosfato Bayóvar (Froelich *et al.*, 1988, citado por Golder Associates, 2016).

As unidades de solo e de rocha descritas são mostradas no mapa geológico local, na Figura 4.41, cuja legenda é destacada na Figura 4.42.

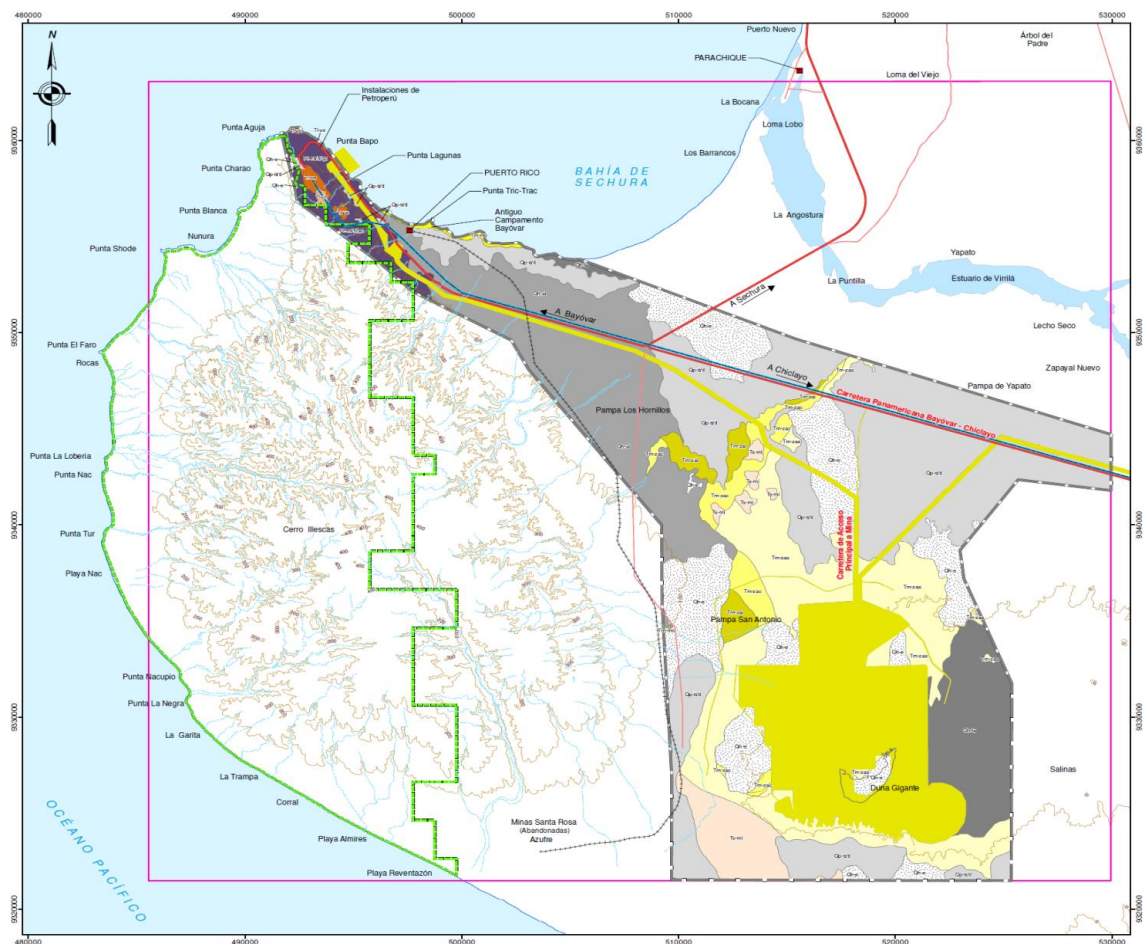


Figura 4.41 – Mapa geológico local da região de localização da Mina de Bayóvar (Adaptado de Golder Associates, 2007)

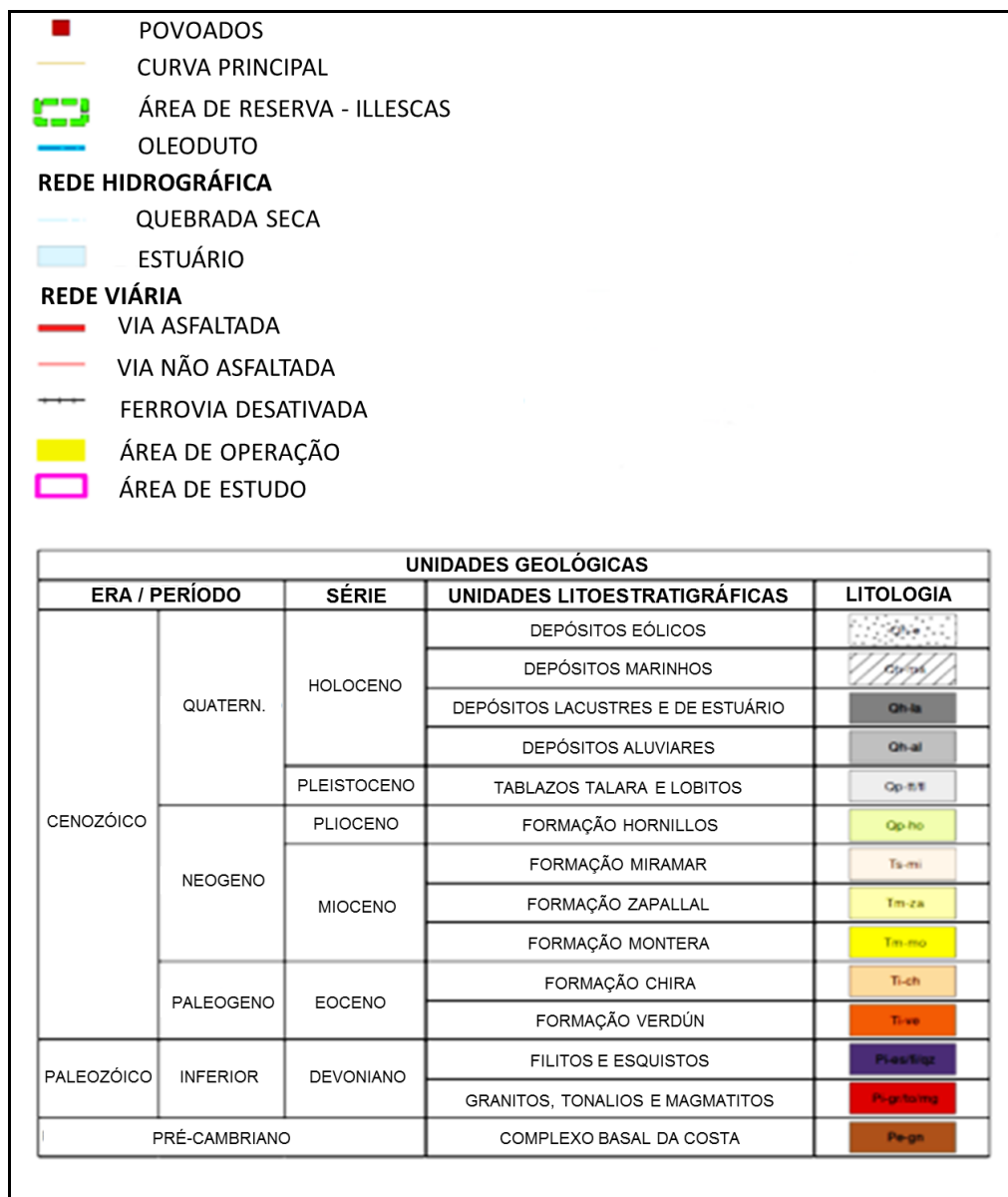


Figura 4.42 – Legenda relacionada ao mapa geológico apresentado na Figura 4.41 (Adaptado de Golder Associates, 2007)

4.2.6 Descrição do processo de mineração da Mina de Bayóvar

O processo de mineração de fosfato na Mina de Bayóvar utiliza procedimentos que envolvem a utilização de água captada no mar, que é bombeada para uma planta de dessalinização localizada no complexo. Parte do processo de beneficiamento do minério utiliza a água do mar natural e parte, especificamente os filtros, já envolve a água dessalinizada.

Devido aos grandes volumes utilizados no processo de mineração, a água do mar é bombeada e aduzida até a planta de concentração por tubulações de polietileno de alta densidade, de 36 polegadas de diâmetro, a uma distância próxima a 40 km. A água do mar é armazenada em reservatórios de decantação, para remoção da areia, e posteriormente bombeada para o processo. Este mesmo reservatório fornece água para uma planta de dessalinização, que é utilizada na lavagem final do minério, conforme se verá adiante. O processo de dessalinização dentro da mina é realizado por meio de osmose inversa.

Como já ressaltado anteriormente, a planta recupera concentrado com teor nominal em torno de 30% de P_2O_5 . Os minerais de ganga incluem gesso e diatomita. No processo de lavagem, os fragmentos de gesso e os agregados de diatomita, rocha sedimentar, rica em sílica, formada pelo aprofundamento das carapaças silicosas das diatomáceas, opalas e outros corpúsculos, são removidos do minério por triagem a 0,8 mm. A diatomita desagregada é removida do minério por lavagem. Uma lavagem com o uso de água dessalinizada é realizada no concentrado desidratado para remover e na água do mar utilizada para o processamento.

As instalações da Mina de Bayóvar incluem as seguintes etapas, compostas pela operação da mina e pelo pátio de secagem (CMMM, 2017):

- Britagem primária;
- Cilindro de lavagem;
- Peneiramento primário;
- Hidrociclone primário;
- Cilindro de abrasão;
- Peneiramento secundário;
- Hidrociclone secundário;
- Correia de filtro;
- Secador.

Os minérios de fosfato, extraídos das cavas, são transportados por caminhões do local da mina para uma série de pilhas, de acordo com a classificação, umidade, etc., onde ocorre a alimentação do processo por carregadores frontais em um sistema composto por separadores estáticos e tanques. Uma das finalidades do carregamento frontal é garantir que a planta de lavagem receba uma mistura de minério relativamente constante e homogênea. O separador estático remove os materiais de maior granulometria em etapa anterior ao envio do minério para o cilindro de lavagem.

Na sequência do procedimento da operação da mina, uma britagem primária é realizada, visando fornecer, à planta de lavagem, um fluxo constante de alimentação. O material reservado no tanque (depósito de recepção) é conduzido através de dois alimentadores de correias (duas linhas) que, seguidamente, enviam o minério para os cilindros de lavagem, onde são criadas as condições necessárias para a desagregação do material.

Antes e após o procedimento de alimentação dos cilindros de lavagem, dois processos de separação por vibração horizontal ocorrem simultaneamente com o material oriundo da britagem primária. A separação primária (anterior ao cilindro de lavagem) é realizada com a água do mar, sendo que o material retido, com diâmetro superior a 6 mm, é enviado para o cilindro de lavagem. Uma segunda etapa de peneiramento (nesta fase) utiliza o material que passou pela desagregação do cilindro de lavagem dissolvido em água salgada (recirculada do processo). Ao final desta etapa, que envolve o peneiramento anterior e posterior ao processo de desagregação, o material com diâmetro inferior a 6 mm é levado à bateria de hidrociclones (hidrociclones primários). O material retido neste processo constitui a primeira geração de rejeitos grossos.

Os hidrociclones de alta eficiência separam o minério oriundo dos separadores primários (materiais que passaram pela peneira de 6 mm). A alimentação dos hidrociclones é diluída com água salgada e, nesta etapa, são separados os rejeitos finos que são diretamente bombeados para os tanques de contenção, com um teor de sólidos em torno de 15%. A outra parcela do material é vertida para os separadores de alta frequência. A água do mar reservada (oriunda de uma lagoa de armazenamento) é bombeada para estes separadores que também retêm rejeitos grossos (segunda etapa de geração) e envia o material de diâmetro inferior a 0,8 mm aos hidrociclones secundários.

Os rejeitos grossos, tanto da seleção primária quanto da geração secundária, são coletados e transportados por correias e, posteriormente, dispostos sob a forma de pilhas.

Os hidrociclones secundários recebem o material de menor diâmetro, consistindo por apatitas, algumas diatomitas e gangas com sal dissolvido. A bateria de hidrociclones trabalha com materiais diluídos com água do mar, que também é usada no processo de ciclolavagem. Estes equipamentos são responsáveis pela eliminação dos últimos agregados de apatita, mediante um processo de desidratação, visando a sua descarga em um tanque distribuidor, que alimenta correias de filtro em paralelo, com área de 120 m². As correias desaguam o concentrado de apatita e promovem uma lavagem do concentrado com a água dessalinizada. A operação possui uma planta de dessalinização cuja água é destinada exclusivamente aos filtros.

A lavagem do concentrado ocorre com a água dessalinizada em três etapas, suficientes para redução do teor de cloretos solúveis a níveis relativamente aceitáveis. O concentrado lavado é transportado por uma correia ao pátio de concentrados para posterior carga do produto.

O material concentrado final da operação de mina, com teor de umidade em torno de 15%, contendo até 700 ppm de cloretos, é inicialmente transportado por caminhões tipo 'bitrem', por meio de uma estrada industrial com extensão de 32 km, e disposto em pilhas para posterior envio à planta de secagem. Esta segunda etapa do transporte, efetuada a uma distância de 5,5 km, é realizada por correias transportadoras, sendo o material depositado em tanques de recepção, que alimentam os secadores rotatórios localizados na planta de secagem.

A planta de secagem está localizada ao sul da Baía de Sechura, na parte inferior do Morro Illescas. Neste processo, o fosfato concentrado com umidade média inicial de 15%, é levado a uma nova umidade, de 3%, por meio de dois fornos rotativos de gás natural e, posteriormente, armazenado em silos. Os concentrados de fosfato são então enviados para o porto por meio de uma correia transportadora.

Todo este processo é apresentado em um diagrama de fluxo (Figura 4.43). Um mapa, destacando as linhas é mostrado na Figura 4.44.

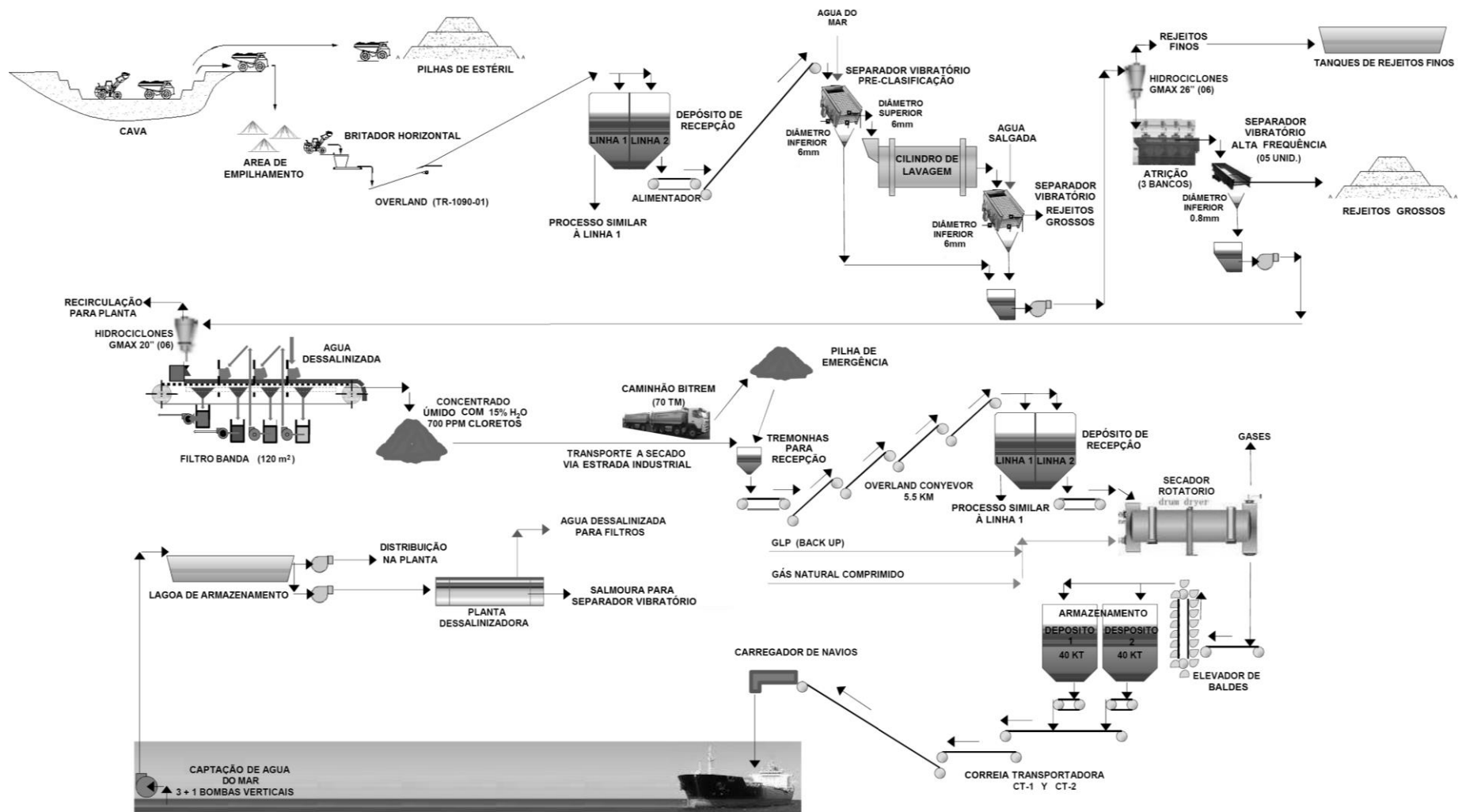


Figura 4.43 – Diagrama de fluxo do processo de mineração da Mina de Bayóvar – Peru (Adaptado de CMMM, 2017)

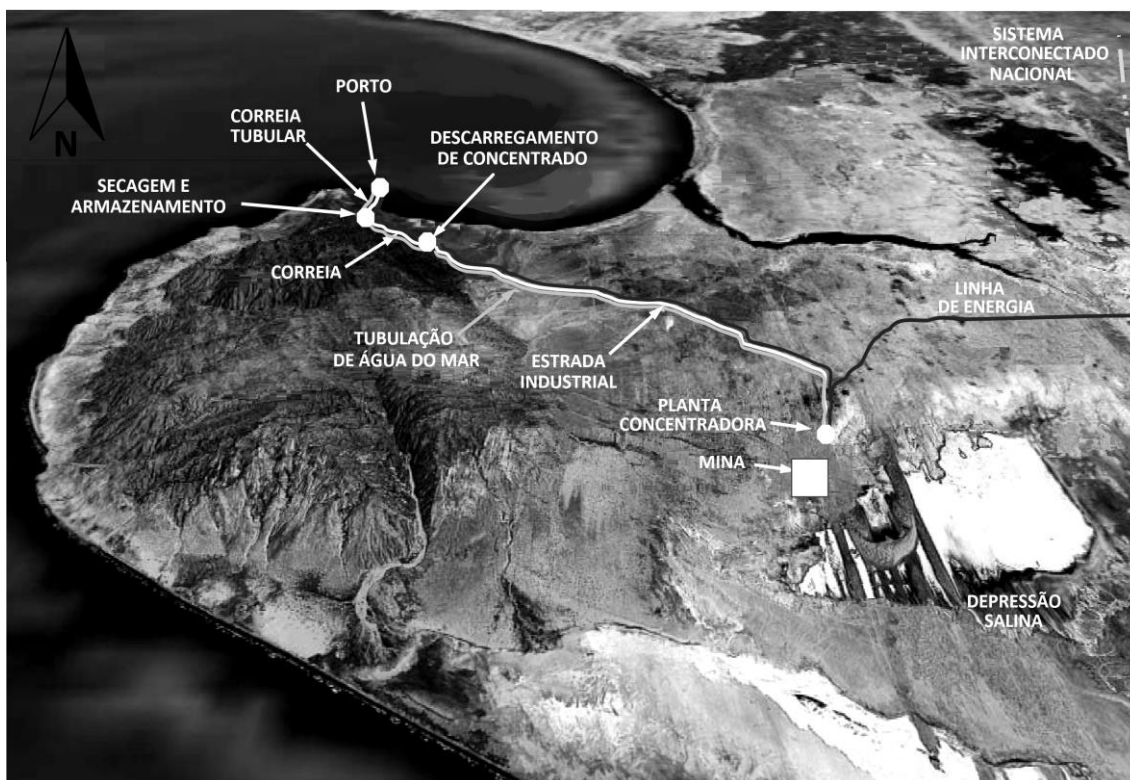


Figura 4.44 – Mapa regional da região de Sechura destacando as linhas de transporte da mina até o porto (Adaptado de CMMM, 2017)

4.2.7 Descrição do sistema de disposição de rejeitos finos

- **Disposição dos rejeitos finos**

Os rejeitos finos são provenientes dos processos de classificação primária e secundária, já expostos, e apresentam-se majoritariamente compostos pela quase totalidade por partículas com diâmetro inferior a 0,074 mm. Os rejeitos são bombeados da planta de concentração e dispostos em tanques, escavados como frente de lavra, localizados na região sul da mina.

O projeto inicial para disposição dos rejeitos finos incorporava um total de 12 tanques (Figura 4.45), sendo que um deles, o TK-101, já se encontra completamente cheio, e outro, o TK-105, apresenta-se em final de operação. De acordo com o projeto, a capacidade total do conjunto dos 12 tanques será de 239 Mm³. Além do tanque TK-101 e do tanque TK-105 (em final de operação), encontra-se em escavação o TK-103.

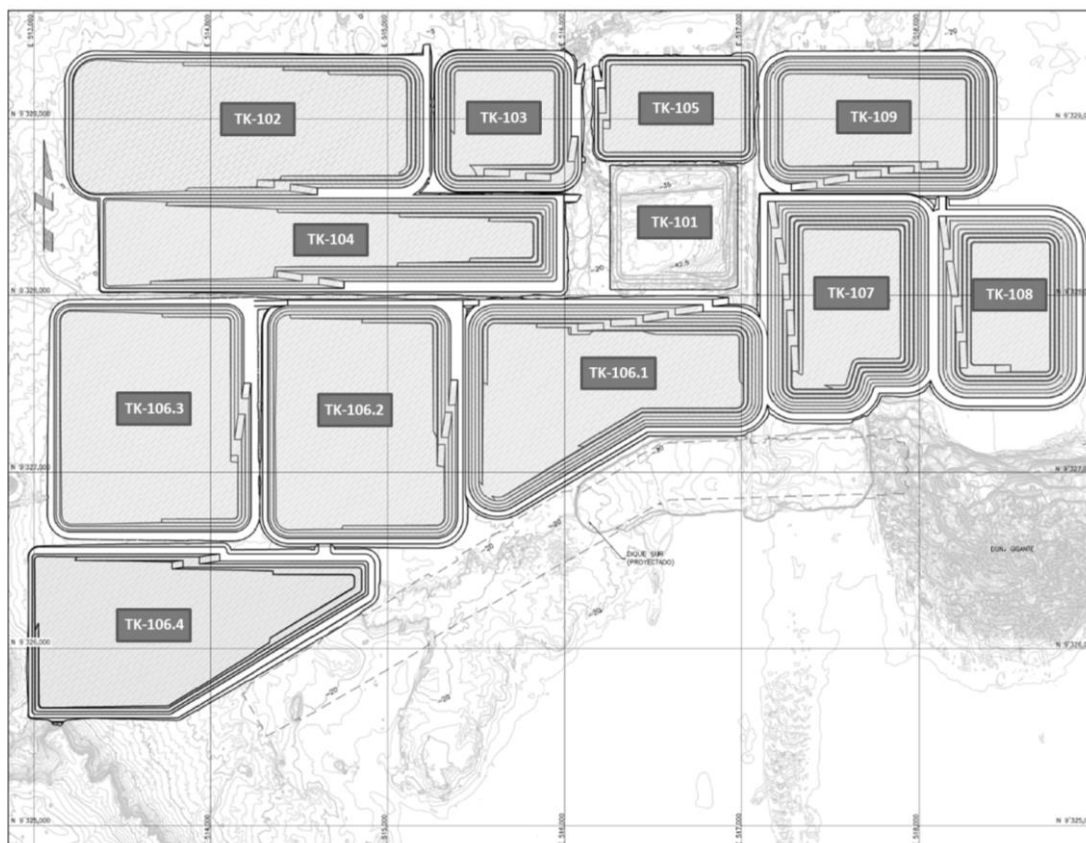


Figura 4.45 – Arranjo dos tanques de disposição de rejeitos da Mina de Bayóvar
(Adaptado de CMMM, 2017)

Os rejeitos finos, gerados nos processos já explanados, são diluídos para bombeamento até os tanques de disposição com um teor de sólidos em torno de 15%, sendo conduzidos por tubos PEAD. Os rejeitos possuem de baixa a média plasticidade e baixa densidade relativa dos grãos (já visto no Capítulo 3), dependendo da frente de lavra e da etapa de beneficiamento do minério, visto que as partículas mais finas e menos densas são geradas como *overflow* da primeira etapa de ciclonagem. As partículas mais grossas (siltes a areias finas) e com densidade relativa dos grãos mais elevadas são provenientes da flotação (CMMM, 2017).

Uma característica particular dos rejeitos gerados na mina é a salinidade, contendo relativa composição de cloretos, visto que, na separação e ciclonagem primária, se utiliza a água do mar, além dos cloretos dissolvidos na própria matriz rochosa. No entanto, em termos de geração de ácidos e de potencial de lixiviação, tratam-se de resíduos inertes.

Os tanques destinados à disposição dos rejeitos finos são caracterizados pelas áreas de lavra, cujas rochas fosfáticas estão situadas em camadas. De acordo com o plano de mina da Miski Mayo (CMMM, 2017), os tanques TK-101, TK-105 e TK-109 atingem a cota de fundo coincidente com a camada 5, enquanto que as demais estruturas de contenção de rejeitos serão construídas com escavação até a camada 7, que são camadas de minério de fosfato de pouca espessuras (fosforitas) intercaladas com outras de estéreis, também pouco espessas (diatomitas ou diatomitas fosfóricas) (Figura 4.46). O pacote sedimentar de interesse mineral possui espessura entre 30 a 50m.

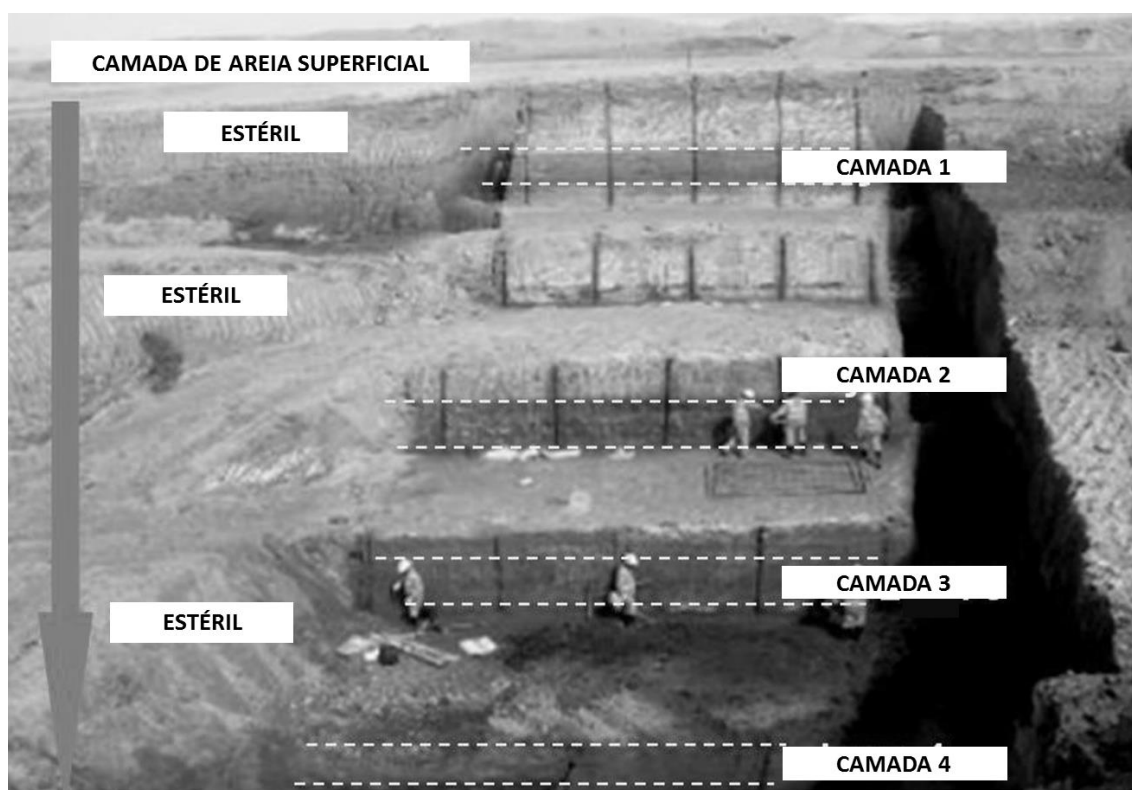


Figura 4.46 – Vista de um processo de escavação, com destaque para delimitação das camadas de minério (fosforitas) e estéril (diatomitas) (Adaptado de CMMM, 2017)

Atualmente, encontra-se em processo de escavação do tanque TK-103, onde os rejeitos finos serão depositados após o esgotamento da capacidade de armazenamento do tanque TK-105. Os tanques (reservatórios para disposição) são escavados durante a operação e, para a disposição, não possuem quaisquer dispositivos de drenagem de fundo.

4.2.8 Programa de investigação de campo e análises preliminares dos resultados

A realização do programa de investigação de campo buscou basicamente avaliar o comportamento dos rejeitos depositados para obtenção da compressibilidade *'in situ'*, com o uso da sonda piezométrica desenvolvida nesta pesquisa. Desta forma, além de avaliar a efetividade do uso do equipamento, a realização destes ensaios objetivou, principalmente, o conhecimento das propriedades geotécnicas de compressibilidade e adensamento dos rejeitos.

Devido à particularidade do tanque TK-105 que, atualmente, encontra-se em fase final de operação (praticamente preenchido), a estrutura de disposição foi escolhida como a principal área de investigação, com a locação de 3 pontos de estudos, em 3 diferentes seções. Além disso, foi realizada uma sondagem no tanque TK-101, considerando um ponto central de investigação. A pesquisa envolveu os procedimentos anteriormente descritos neste capítulo. Um desenho esquemático com as seções escolhidas é mostrado na Figura 4.47.

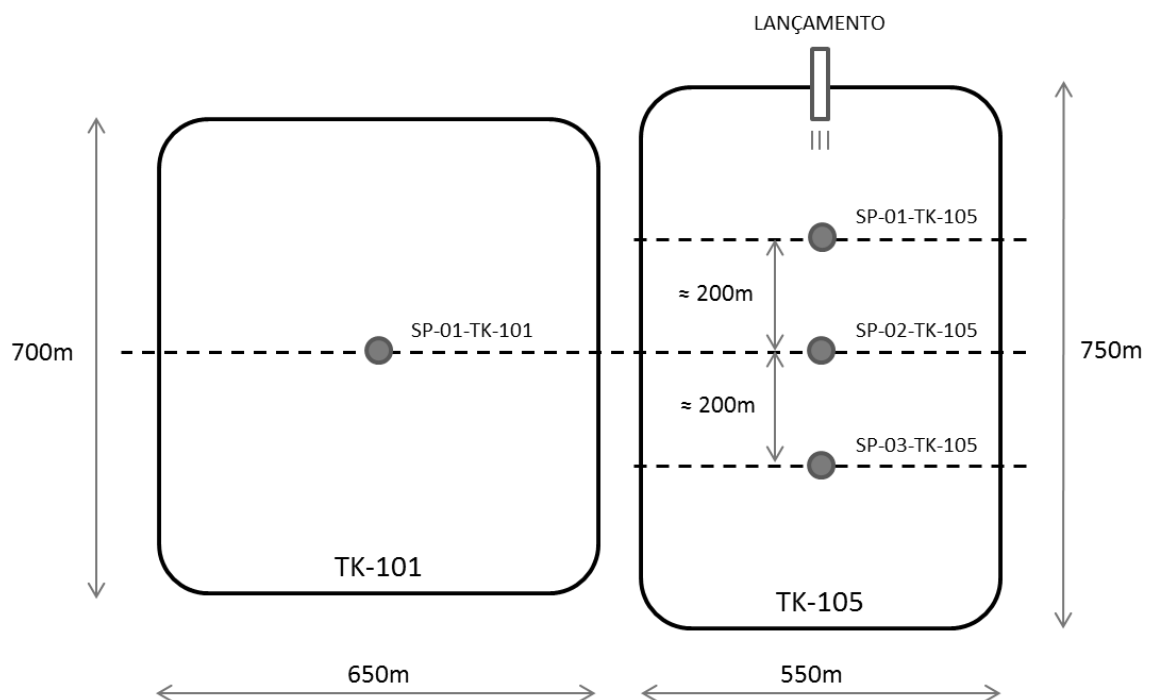


Figura 4.47 – Locação dos pontos de sondagem nos tanques TK-101 e TK-105

Destaca-se que a representação das seções é basicamente esquemática, visto que, devido aos fortes ventos, o posicionamento inicial da balsa exato tornava-se muito difícil. Desta forma, após a estabilização da balsa, as coordenadas dos pontos investigados foram registradas com o uso de um GPS (Tabela 4.7).

Tabela 4.7 – Detalhamento dos pontos da campanha de investigação ‘*in situ*’

Tanque	Identificação da investigação	Coordenadas	Dimensões aproximadas de borda (m)	
			L	C
TK-105	SP-01-TK-105	N 9 329, 231; E 516,474	550	750
TK-105	SP-02-TK-105	N 9 329, 226; E 516,670		
TK-105	SP-03-TK-105	N 9 328, 978; E 516,841		
TK-101	SP-01-TK-101	N 9 328, 410; E 516,675	650	700

As vistas parciais dos tanques de rejeitos TK-101 e TK-105 da Mina de Bayóvar são apresentadas nas Figuras 4.48 e 4.49, com destaque para volume de água sobrenadante, cujos níveis superficiais estão situados a cerca de 20 metros abaixo do nível do mar.



Figura 4.48 – Vista parcial do tanque de disposição de rejeitos TK-101



Figura 4.49 – Vista parcial do tanque de disposição de rejeitos TK-105

- **Resultados**

Atualmente, os rejeitos são dispostos no tanque TK-105. Os rejeitos são lançados em uma extremidade do tanque, cujo esquema foi mostrado na Figura 4.47, e na outra ocorre, além do bombeamento, uma transposição da água sobrenadante deste para o tanque TK-101, onde a água também é bombeada. Ou seja, as características da água sobrenadante dos dois tanques são idênticas, resumindo-se nos dados iniciais coletados no primeiro dia dos ensaios de campo, apresentados na Tabela 4.8 (dados fornecidos pela CMMM). Esta água é bombeada para um tanque de evaporação ao sul dos tanques.

Tabela 4.8 – Características da água sobrenadante (coletada no tanque TK-101)

Propriedade	Unidade	Medida
Condutividade elétrica (σ)	mS/cm	69,20
Resistência específica (P)	Ω .cm	14,45
Resíduo seco de filtração (TDS)	g/L	69,20
Potencial hidrogeniônico (pH)	-	8,58
Concentração de oxigênio (O ₂)	mg/L	10,90
Saturação do oxigênio (O ₂)	%	122,10
Pressão parcial do oxigênio (O ₂)	bar	154,00

Observa-se uma alta condutividade elétrica da água coletada *'in situ'*, em função da sua salinidade. Esta característica impediu o uso da sonda *5TE* nos ensaios de campo, pois a condutividade máxima registrada pelo dispositivo é de 23 dS/m. Apesar de o seu uso ter sido testado e apresentado resultados consistentes em um rejeito de baixa condutividade elétrica, em laboratório, para o rejeito de fosfato, nos ensaios de campo, a sonda *5TE* não foi efetiva. A própria a água do mar apresenta uma elevada condutividade elétrica, uma vez que os sais presentes se dissociam em íons. A condutividade varia, sobretudo, com a temperatura e a salinidade, e a sua medição permite o conhecimento da própria salinidade. Apesar, da quantidade total de sais dissolvidos na água do mar variar entre diferentes regiões geográficas e profundidades na coluna de água, esses sais mantêm suas proporções aproximadamente constantes em todos os oceanos (Libes, 1992).

Particularmente, os rejeitos finos de Bayóvar possuem uma presença de cloretos (Cl^-) em concentração superior à água do mar, pois existe também a contribuição dos íons introduzidos pelo sal solúvel no minério. O elevado teor de cloretos acarreta em condutividade elétrica da água contida no rejeito superior à condutividade média da água do mar, que apresenta valores médios em torno de 51 mS/cm.

Em função do limite de leitura da sonda *5TE*, a sondagem realizada nos tanques TK-101 e TK-105 limitou-se ao registro da dissipação das poropressões e à amostragem dos rejeitos em diferentes profundidades, visando a determinação dos índices físicos deste material e, conseqüentemente, das suas características de compressibilidade. Para cada ponto de sondagem, foram extraídas duas amostras, em duas diferentes cravações, com os índices físicos determinados a partir do teor de umidade médio, obtido pela média aritmética das duas umidades.

Os materiais amostrados foram identificados de acordo com a profundidade e imediatamente enviados para o laboratório da própria planta, para determinação do teor de umidade. Após o conhecimento da umidade, os rejeitos secos foram armazenados em sacos plásticos para envio ao NUGEO. Inicialmente, são apresentados os resultados dos ensaios realizados no tanque TK-105 (Tabelas 4.9, 4.10 e 3.11) e os seus respectivos perfis. O valor médio de G_s foi considerado a partir da média aritmética das 6 amostras de laboratório (bombonas 1 a 6 – capítulo anterior). Ressalta-se que esta consideração se deu em função de dificuldades enfrentadas na exportação das amostras pela CMMM.

Tabela 4.9 – Parâmetros obtidos na sondagem piezométrica SP-01-TK-105

Prof. (m)	Prof. rejeito (m)	u equil. (kPa)	w média (%)	ψ médio (%)	G_s médio	e	γ (kN/m ³)	σ (kPa)	σ' (kPa)
1,90	1,00	20,40	411,73	19,54	2,45	10,087	11,42	20,51	0,11
2,90	2,00	30,19	255,54	28,13	2,45	6,261	12,12	32,63	2,44
3,90	3,00	41,80	235,99	29,76	2,45	5,782	12,26	44,89	3,09
4,90	4,00	53,57	222,33	31,02	2,45	5,447	12,37	57,26	3,69
5,90	5,00	65,69	198,14	33,54	2,45	4,854	12,60	69,86	4,17
6,90	6,00	75,26	167,51	37,38	2,45	4,104	12,97	82,83	7,57
7,90	7,00	87,40	177,63	36,02	2,45	4,352	12,84	95,67	8,27
8,90	8,00	100,22	150,92	39,85	2,45	3,698	13,22	108,88	8,66
9,90	9,00	114,40	129,20	43,63	2,45	3,165	13,62	122,50	8,10
10,90	10,00	130,00	121,25	45,20	2,45	3,216	13,57	136,07	6,07
11,90	11,00	144,10	165,41	37,68	2,45	4,053	13,00	149,07	4,97
12,90	12,00	154,98	162,22	38,14	2,45	3,974	13,04	162,12	7,14
14,90	14,00	177,40	141,57	41,40	2,45	3,469	13,38	188,87	11,47

Tabela 4.10 – Parâmetros obtidos na sondagem piezométrica SP-02-TK-105

Prof. (m)	Prof. rejeito (m)	u equil. (kPa)	w média (%)	ψ médio (%)	G_s médio	e	γ (kN/m ³)	σ (kPa)	σ' (kPa)
2,40	1,00	25,40	375,11	21,05	2,45	9,190	11,54	25,68	0,28
3,40	2,00	35,52	295,85	25,26	2,45	7,248	11,88	37,55	1,73
4,40	3,00	47,89	264,93	27,40	2,45	6,491	12,06	49,61	1,72
5,40	4,00	59,13	280,57	26,28	2,45	6,874	11,96	61,57	2,44
6,40	5,00	70,56	255,38	28,14	2,45	6,257	12,12	73,69	3,13
7,40	6,00	82,44	230,85	30,23	2,45	5,656	12,30	85,99	3,55
8,40	7,00	94,38	252,51	28,37	2,45	6,186	12,14	98,12	3,74
9,40	8,00	106,07	222,56	31,00	2,45	5,453	12,37	110,49	4,42
10,40	9,00	119,73	207,83	32,49	2,45	5,092	12,50	123,00	3,27
11,40	10,00	131,76	211,70	32,08	2,45	5,187	12,47	135,46	3,70
12,40	11,00	144,97	217,41	31,50	2,45	5,327	12,41	147,88	2,91
13,40	12,00	155,77	209,21	32,34	2,45	5,126	12,49	160,37	4,60
15,40	14,00	179,80	190,04	34,48	2,45	4,656	12,69	185,75	5,95

Tabela 4.11 – Parâmetros obtidos na sondagem piezométrica SP-03-TK-105

Prof. (m)	Prof. rejeito (m)	u equil. (kPa)	w média (%)	ψ médio (%)	G_s médio	e	γ (kN/m ³)	σ (kPa)	σ' (kPa)
2,40	1,00	24,90	370,84	21,24	2,45	9,086	11,55	25,69	0,79
3,40	2,00	36,00	268,44	27,14	2,45	6,577	12,03	37,72	1,72
4,40	3,00	47,50	281,58	26,21	2,45	6,899	11,95	49,68	2,18
5,40	4,00	60,00	264,93	27,40	2,45	6,491	12,06	61,73	1,73
6,40	5,00	72,20	267,47	27,21	2,45	6,553	12,04	73,77	1,57
7,40	6,00	82,30	226,51	30,63	2,45	5,550	12,34	86,11	3,81
8,40	7,00	94,60	216,40	31,61	2,45	5,302	12,42	98,53	3,93
9,40	8,00	106,50	211,86	32,07	2,45	5,191	12,47	111,00	4,50
10,40	9,00	119,60	189,32	34,56	2,45	4,638	12,70	123,70	4,10
11,40	10,00	130,30	194,53	33,95	2,45	4,766	12,64	136,34	6,04
12,40	11,00	143,10	165,80	37,62	2,45	4,062	12,99	149,33	6,23
13,40	12,00	159,60	175,04	36,36	2,45	4,288	12,87	162,20	4,60
15,40	14,00	182,40	188,64	34,65	2,45	4,622	12,71	187,61	5,21

Observa-se que, neste tanque, a espessura da lâmina de água sobrenadante variou de 0,90 m (SP-01-TK-105) a 1,40 m (SP-02-TK-105 e SP-03-TK-105). Os horizontes de investigação sempre foram definidos a cada metro de profundidade, depois de atingida a interface água-rejeito. A cravação da sonda foi realizada até a profundidade máxima possível, sendo o fundo do tanque alcançado antes mesmo de um provável avanço para observação de mais um horizonte de sondagem, para todas as seções estudadas. No momento da realização das investigações *'in situ'*, o tanque TK-105 possuía uma altura média de 15,50 m de rejeito depositado (centro), incluindo a água sobrenadante.

Em termos dos perfis de teor de sólidos, no geral, os valores obtidos foram crescentes ao longo da profundidade, como era esperado. No entanto, considerando alguns níveis subsequentes, observaram-se valores mais baixos do teor de sólidos em horizontes relativamente mais profundos. Este comportamento ocorreu em todas as seções avaliadas, demonstrando uma heterogeneidade característica da baixa consolidação do material. O valor do teor de sólidos máximo obtido neste tanque foi de 45,20%. A Figura 4.50 mostra os perfis de teor dos sólidos e umidade das três seções estudadas.

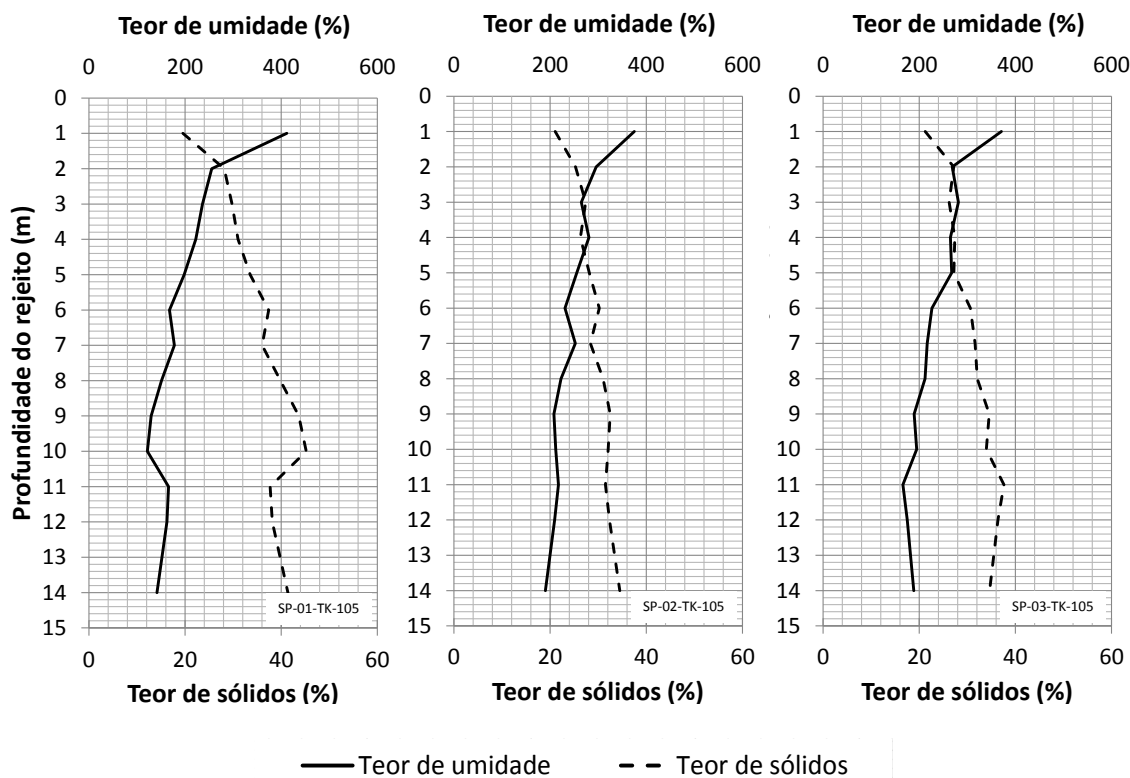


Figura 4.50 – Perfis do teor de sólidos e de umidade das sondagens SP-01-TK-105, SP-02-TK-105 e SP-03-TK-105

A partir dos perfis apresentados nesta figura, pode ser observado um horizonte superior pouco espesso (de 1 a 2 m de profundidade), com um teor de sólidos médio em torno de 24%; uma camada intermediária, de 2 a 6 m de profundidade, com teor de sólidos médio em torno de 28%; e uma terceira, variando de 6 a 14 m de profundidade, em que esse teor médio já se encontra próximo a 35%. Esta característica foi observada nas três seções prospectadas no tanque TK-105. Reforça-se que estes materiais são bombeados da planta de operação para o tanque com um teor de sólidos médio em torno de 15%, demonstrando, desta forma, o pouco ganho em termos de sedimentação / adensamento do rejeito depositado.

A formação de uma camada superior (entre 1 e 2 m de profundidade), com muitos sólidos ainda em suspensão e, conseqüentemente, baixíssimo teor de sólidos, pode estar associado ao lançamento de rejeitos ainda recente, uma vez que o tanque ainda encontra-se em operação. No perfil de sondagem associado ao TK-101, que já se encontra fora de operação, esta camada não é tão perceptível, como se verá adiante.

O perfil de índice de vazios mostra uma tendência de baixa variação de 6 a 14 m de profundidade, evidenciando o comportamento já observado nos perfis de teor de sólidos (Figura 4.51). Observa-se também, uma tendência do índice de vazios em assumir um valor menor para o perfil SP-01-TK-105, quando comparado aos perfis SP-02-TK-105 e SP-03-TK-105. Esta tendência é mais perceptível abaixo do horizonte de 6 m, em que o índice de vazios possui um valor médio em torno de 4 para SP-01-TK-105 e, quando são observados os outros dois perfis, este valor já oscila entre 5 e 6.

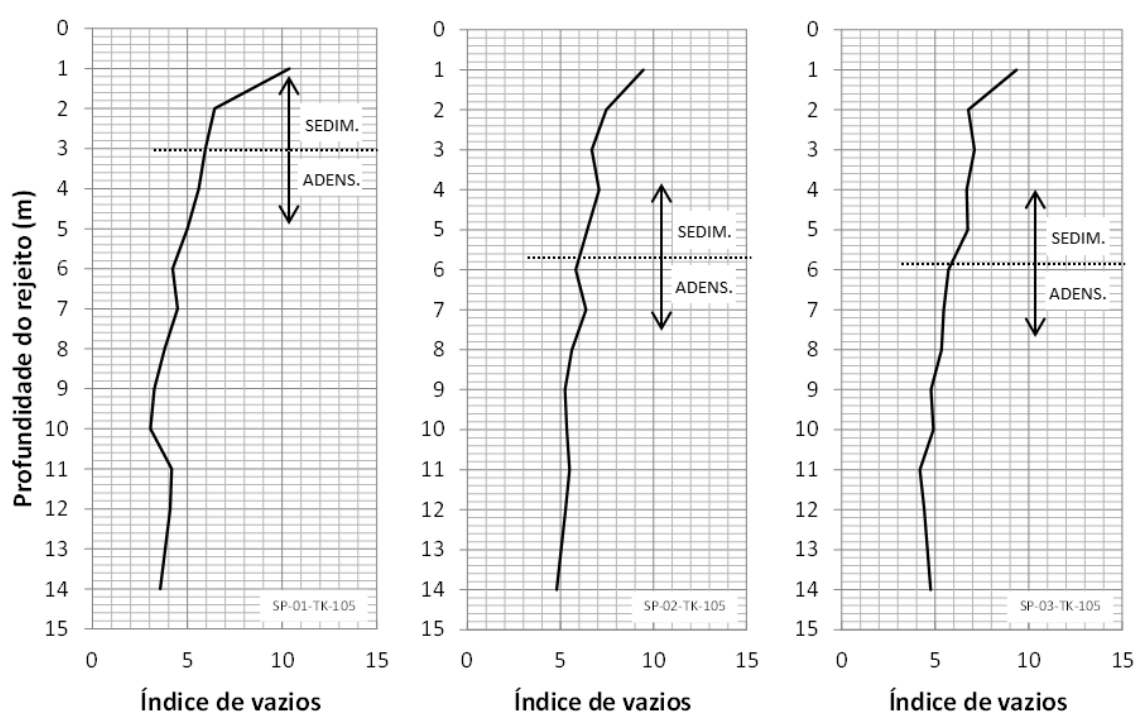


Figura 4.51 – Perfis de índice de vazios das sondagens SP-01-TK-105, SP-02-TK-105 e SP-03-TK-105

O rejeito investigado no perfil mais próximo ao lançamento apresentou, em geral, índices de vazios relativamente menores. Este comportamento pode estar associado a uma provável segregação hidráulica, onde a polpa do rejeito, ao escoar ao longo do reservatório, perde velocidade e, conseqüentemente, capacidade de arraste ao longo das trajetórias de fluxo. Em princípio, portanto, as partículas maiores e mais densas tenderiam a ocupar as regiões mais próximas aos pontos de lançamento tornando esta região mais compacta, quando comparada às zonas mais distantes do lançamento. Nos

perfis apresentados, foram destacadas a região que ainda se encontra em processo de sedimentação e a região já sedimentada (em processo de adensamento). Este contorno foi estabelecido com base nos ensaios de sedimentação em coluna, realizados em laboratório.

Para determinação das três últimas colunas das Tabelas 4.9, 4.10 e 4.11, consideraram-se as propriedades e a condição de deposição do material em cada camada. Neste sentido, tornou-se possível a determinação dos pesos específicos e as subsequentes tensões totais e efetivas. Estas últimas foram determinadas levando-se em consideração as poropressões de estabilização após a cravação da sonda. Notou-se que, em função da própria movimentação da balsa, mesmo que mínima, e das condições de elevado índice de vazios, não foi possível uma construção clara das curvas de dissipação para alguns ensaios. Pelas mesmas condições expostas, as poropressões estabilizavam-se em poucos minutos e as curvas ajustavam-se quase que horizontalmente. As Figuras 4.52 e 4.53 mostram algumas curvas de dissipação das poropressões de níveis superiores e mais profundos, respectivamente, para o perfil SP-01-TK-105.

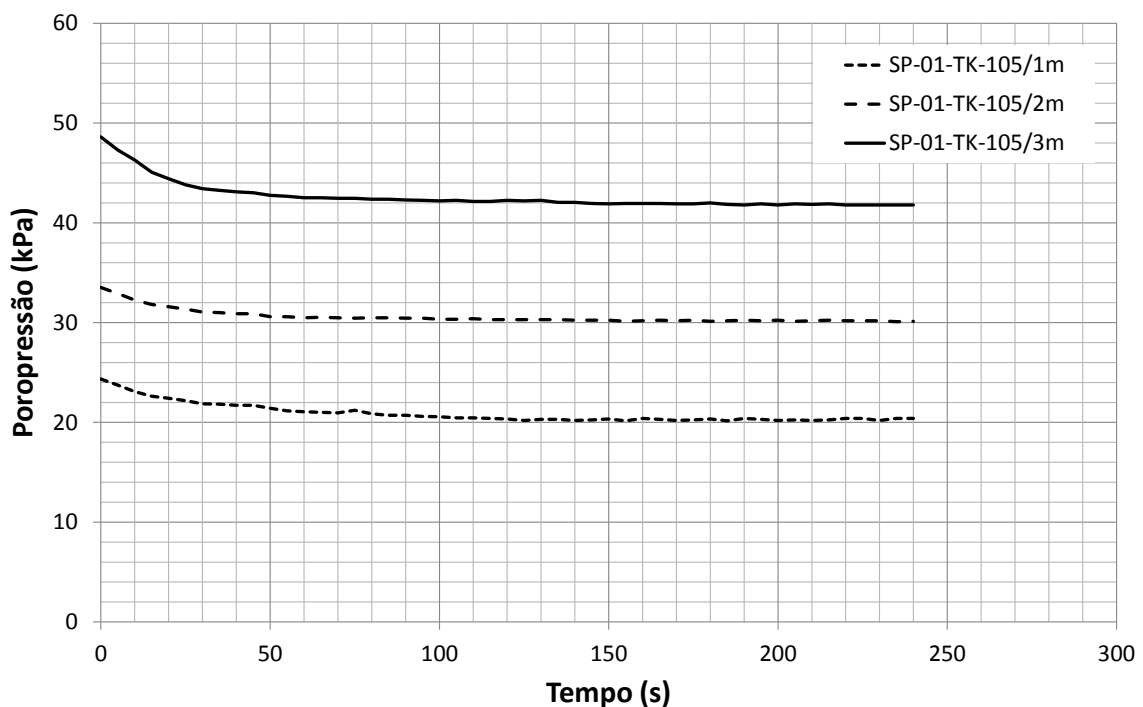


Figura 4.52 – Curvas de dissipação das poropressões – profundidades de sondagem de 01 m, 02 m e 03 m – SP-01-TK-105

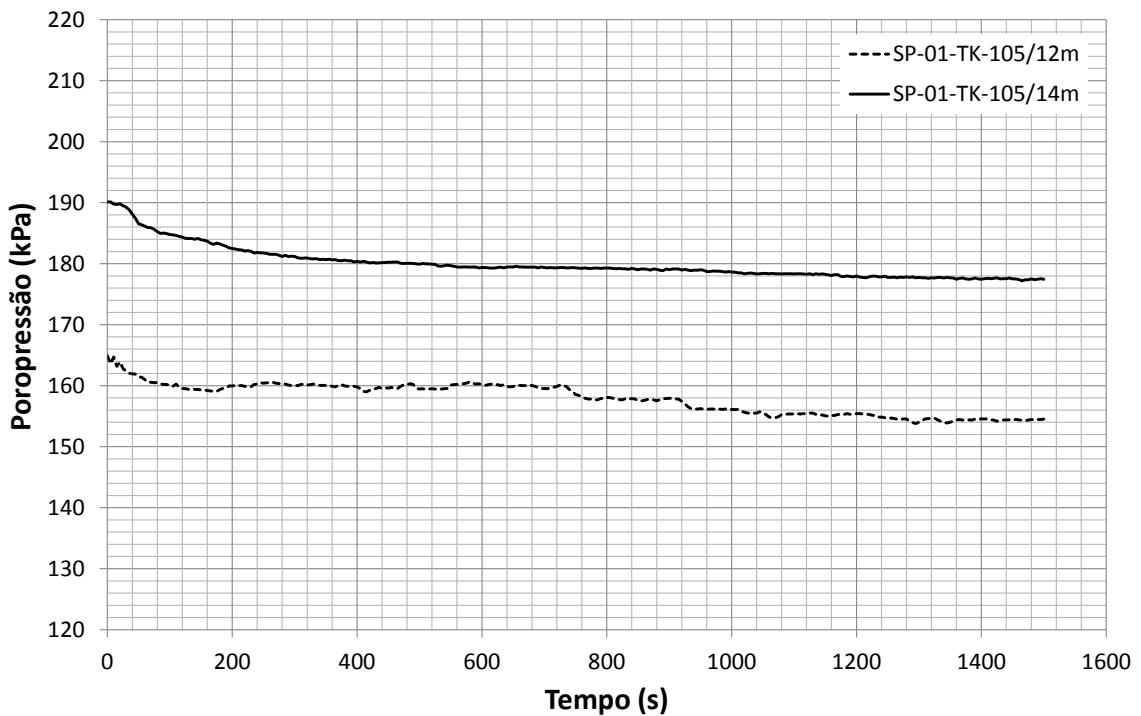


Figura 4.53 – Curvas de dissipação das poropressões – profundidades de sondagem de 12 m e 14 m – SP-01-TK-105

No tanque TK-101, realizou-se uma sondagem na região central do reservatório, aqui identificada como SP-01-TK-101. Ao contrário do tanque TK-105, este tanque não se encontra mais em operação. O lançamento de rejeitos nesta estrutura foi paralisado em setembro de 2014, ou seja, o material lançado ficou em repouso até o período da sondagem (realizada em julho 2017).

Após a paralisação da operação, que ocorria desde outubro de 2013, a água superficial deste tanque foi bombada até o limite possível e, posteriormente, o reservatório foi submetido ao processo de evaporação, chegando a surgir, em alguns pontos, uma região não saturada, praticamente seca. Posteriormente, em junho deste ano, o reservatório passou a receber água proveniente do tanque TK-105, por meio de um canal de transposição construído para este fim. Este procedimento contribuiu para a elevação do nível de água sobrenadante no tanque. Portanto, também foi realizada uma prospecção no tanque TK-101, objetivando avaliar o comportamento dos rejeitos depositados há um tempo maior e se o processo de evaporação, a que o reservatório foi submetido, contribuiu para a consolidação dos rejeitos.

Os parâmetros obtidos, associados a este tanque, são mostrados na Tabela 4.12 e na Figura 4.54. Destaca-se que a água sobrenadante estava a uma altura de 3,20 m.

Tabela 4.12 – Parâmetros obtidos na sondagem piezométrica SP-01-TK-101

Prof. (m)	Prof. rejeito (m)	u equil. (kPa)	w média (%)	ψ médio (%)	G_s médio	e	γ (kN/m ³)	σ (kPa)	σ' (kPa)
4,20	1,00	41,42	239,00	29,50	2,45	5,855	12,24	44,56	3,14
5,20	2,00	52,65	230,19	30,29	2,45	5,640	12,31	56,86	4,21
6,20	3,00	63,68	218,91	31,36	2,45	5,363	12,40	69,26	5,08
7,20	4,00	75,12	184,63	35,13	2,45	4,523	12,75	82,01	6,89
8,20	5,00	88,52	181,69	35,50	2,45	4,451	12,79	94,80	6,28
9,20	6,00	100,74	180,50	35,65	2,45	4,422	12,80	107,60	6,86
10,20	7,00	113,32	147,22	40,45	2,45	3,607	13,28	120,88	7,56
11,20	8,00	127,67	140,78	41,53	2,45	3,449	13,39	134,27	6,60
12,20	9,00	139,52	134,50	42,64	2,45	3,295	13,51	147,78	8,26
14,20	11,00	164,52	125,98	44,25	2,45	3,086	13,68	175,15	10,63

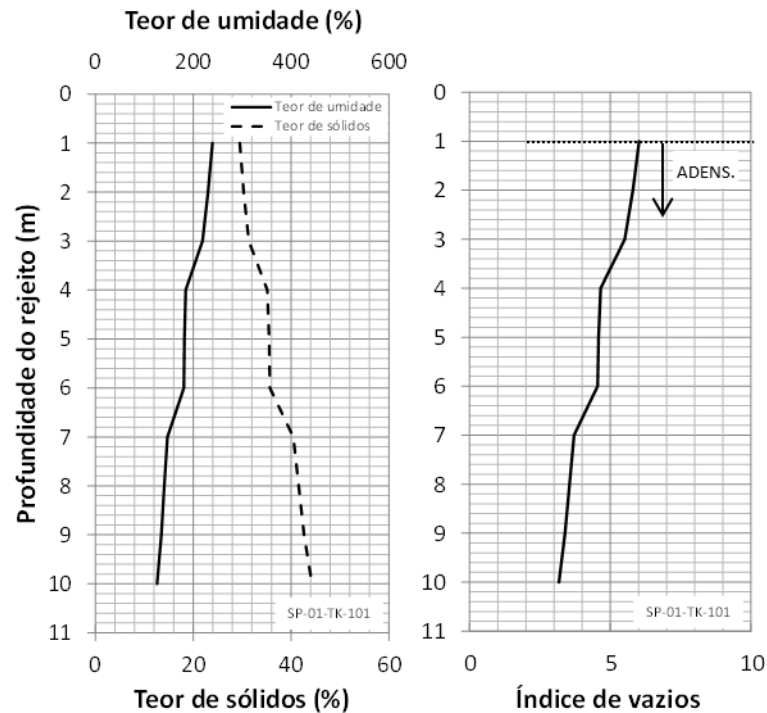


Figura 4.54 – Perfis do teor de sólidos e de índice de vazios SP-01-TK-101

Os perfis produzidos na Figura 4.54 atestam uma variação de teor de sólidos perceptível de 30 a 44% sendo esta variação ao longo da profundidade mais uniforme, quando comparado aos perfis do tanque TK-105. O perfil de índice de vazios apresenta valores iniciais em torno de 6 e, nas cotas mais profundas, são registrados valores entre 4 e 3, mostrando-se um material mais consolidado.

Estabelecendo uma comparação entre as condições dos rejeitos dispostos nos dois tanques, foi estabelecida uma média dos valores de teor de sólidos e índice de vazios para os pontos de sondagem SP-01-TK-105, SP-02-TK-105 e SP-03-TK-105, realizados no tanque TK-105. Depois de estabelecido o perfil médio do tanque TK-105, denominado SP-M-TK-105, este foi confrontado com o perfil associado ao tanque TK-101, já apresentado. Percebe-se, uma tendência sistemática de inclinações similares, registro de teores de sólidos maiores e, conseqüentemente, índices de vazios menores no perfil vinculado ao tanque TK-101. Estas observações são expostas graficamente na Figura 4.55

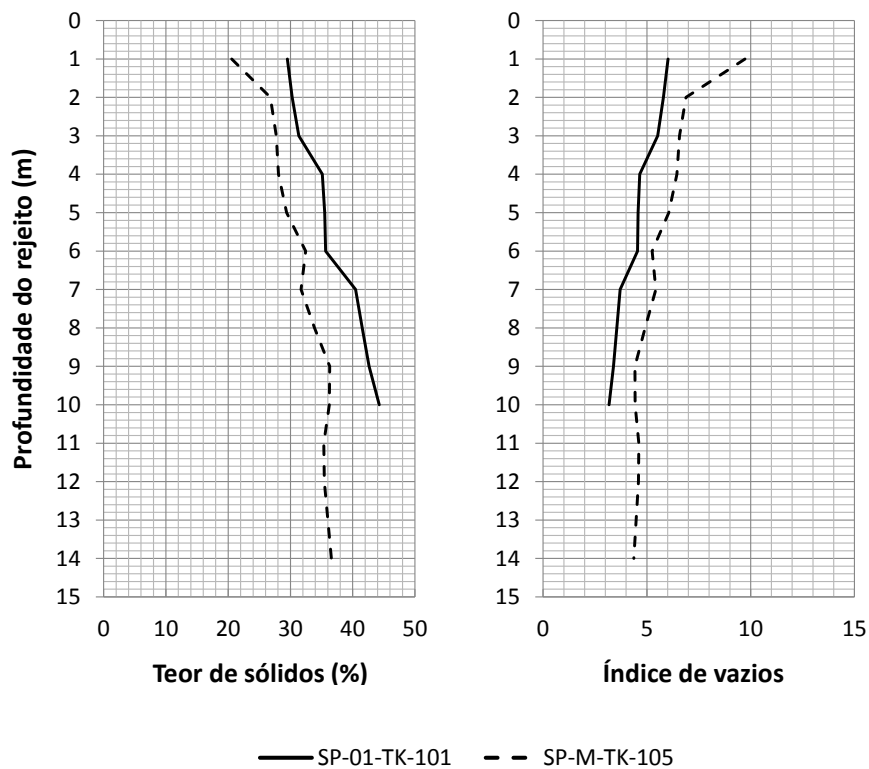


Figura 4.55 – Comparação entre os perfis de teor de sólidos e de índices de vazios das sondagens SP-01-TK-101 e SP-M-TK-105

A partir dos valores de índices de vazios e das tensões efetivas, calculados para cada horizonte de sondagem e já destacados nas Tabelas 4.9 a 4.12, tornou-se possível a construção das curvas σ' versus e , considerando, inicialmente, cada prospecção realizada. Ressalta-se a importância de análises desta natureza, visando a obtenção de um modelo deposicional do rejeito em estudo, considerando as condições 'in situ', ou seja, o estado real de armazenamento. A partir do conhecimento dos mecanismos de deposição, é possível, por exemplo, a previsão da capacidade de armazenamento de futuros reservatórios, além de orientar outros estudos vinculados à otimização dos processos envolvidos na deposição.

As Figuras 4.56 a 4.59 apresentam resultados das análises associadas às sondagens piezométricas SP-01-TK-105, SP-02-TK-105, SP-03-TK-105 e SP-01-TK-101, dos rejeitos de fosfato da Mina de Bayóvar, considerando a faixa de variação dos valores encontrados em campo. A partir dos ajustes potenciais, tornou-se possível a definição de uma equação que considera, neste caso as condições de sedimentação e adensamento dos rejeitos (Equações 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5).

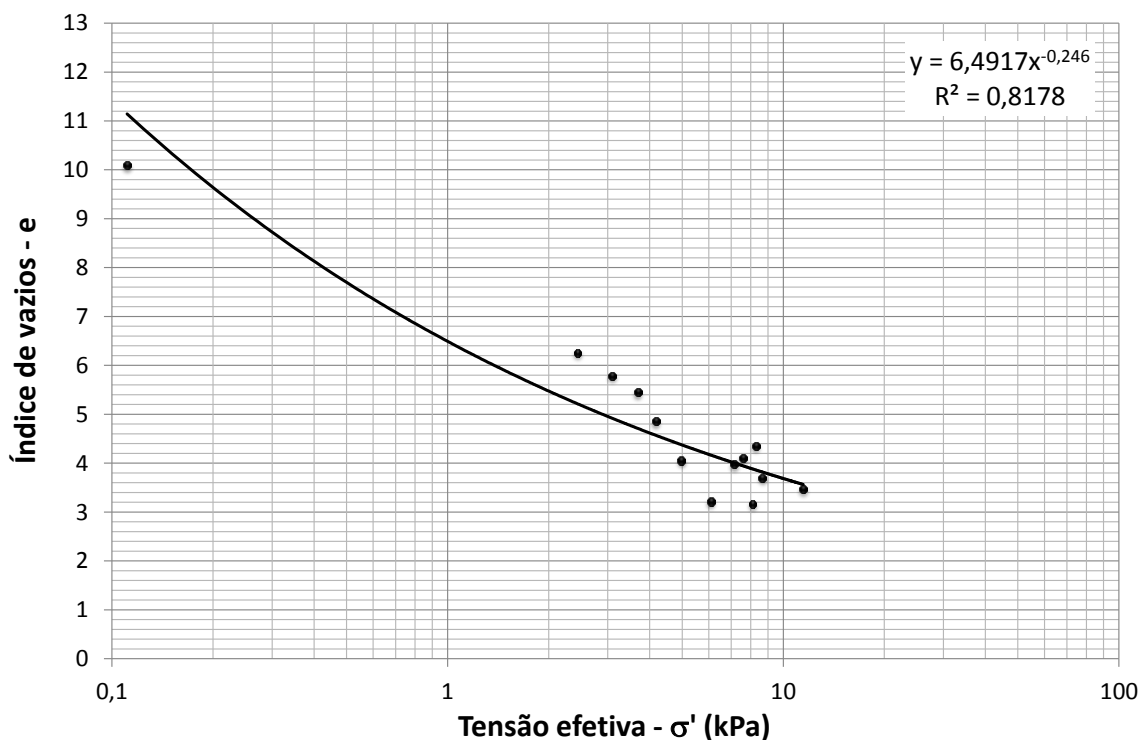


Figura 4.56 – Curva σ' versus e obtida da sondagem SP-01-TK-105

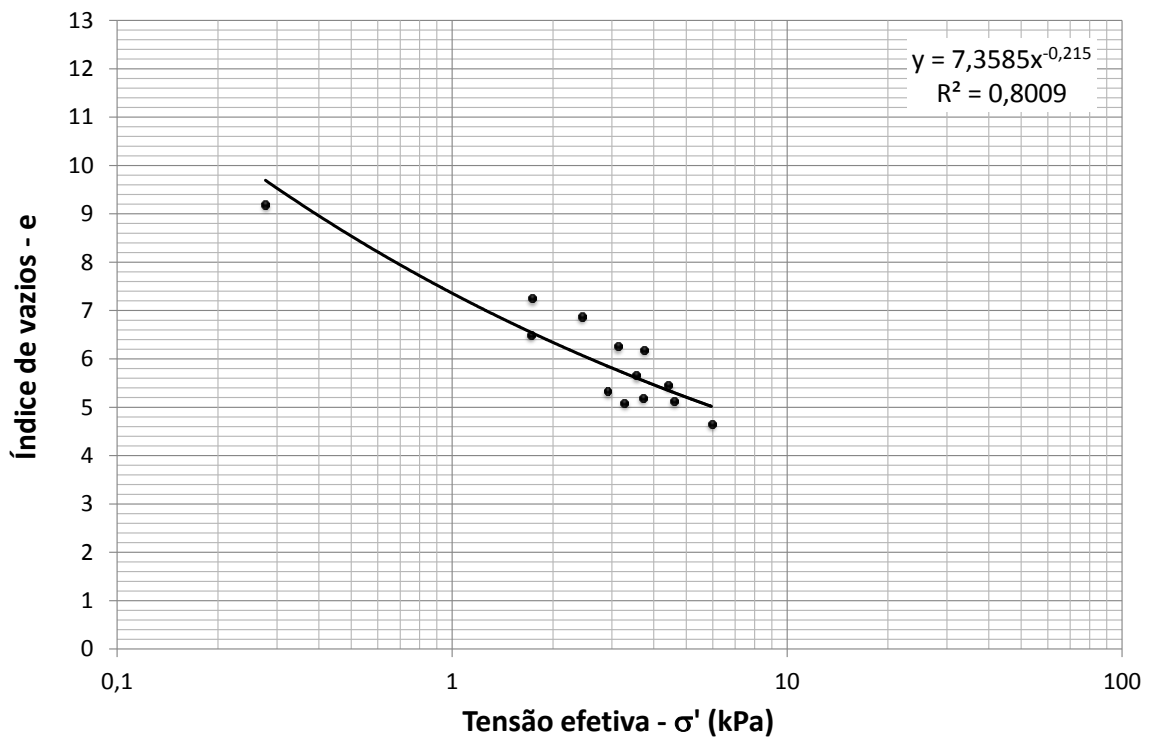


Figura 4.57 – Curva σ' versus e obtida da sondagem SP-02-TK-105

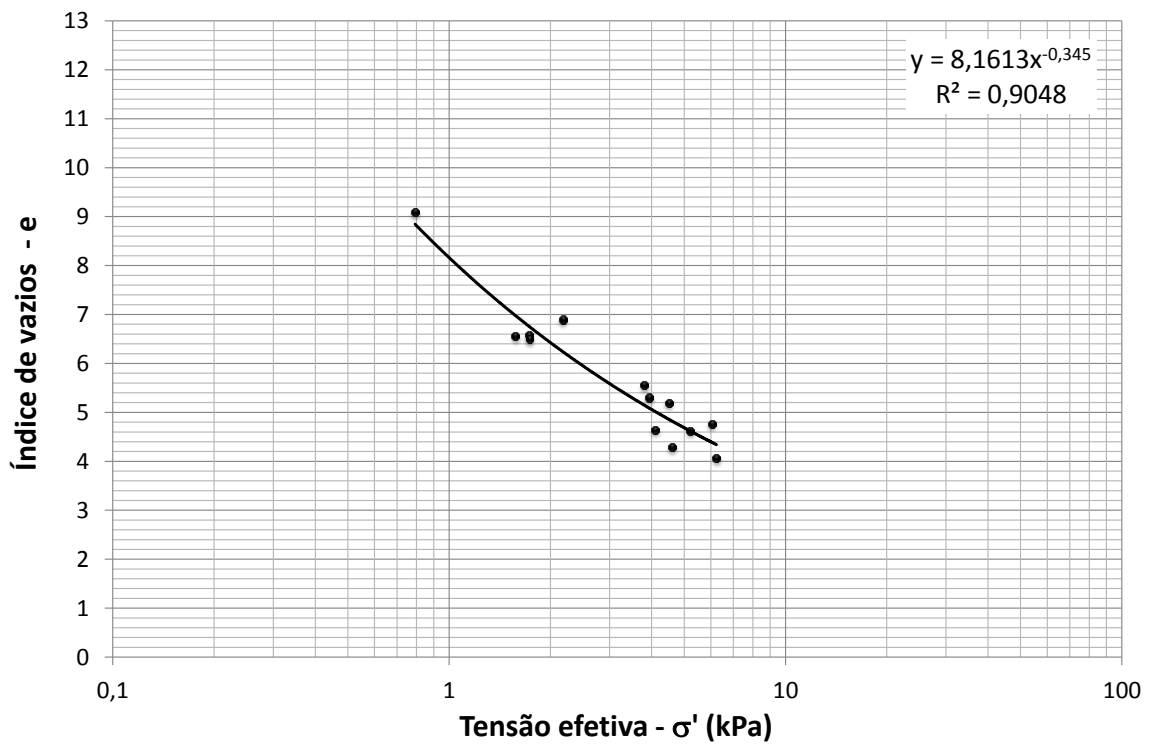


Figura 4.58 – Curva σ' versus e obtida da sondagem SP-03-TK-105

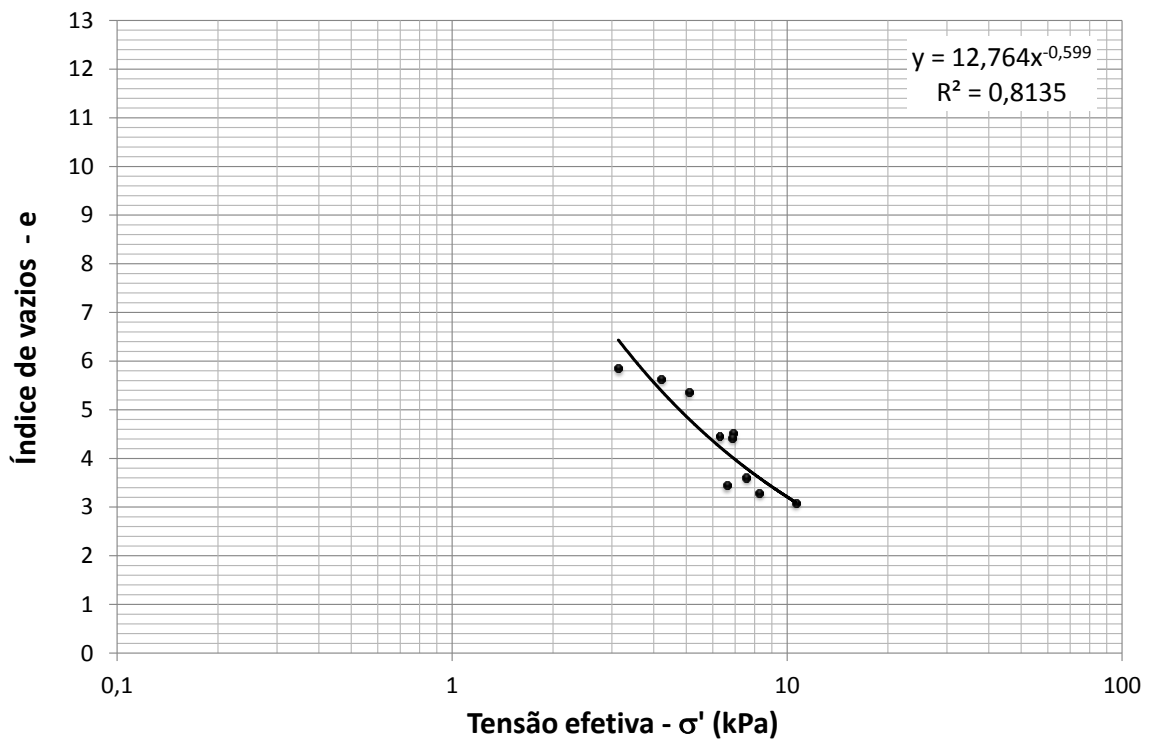


Figura 4.59 – Curva σ' versus e obtida da sondagem SP-01-TK-101

Equações obtidas:

$$e = 6,4917 \cdot \sigma'^{-0,246} \quad (4.2)$$

$$e = 7,3585 \cdot \sigma'^{-0,215} \quad (4.3)$$

$$e = 8,1613 \cdot \sigma'^{-0,345} \quad (4.4)$$

$$e = 12,7460 \cdot \sigma'^{-0,599} \quad (4.5)$$

Sendo:

e : índice de vazios do rejeito;

σ' : tensão efetiva.

A Figura 4.60 apresenta todas as curvas plotadas no mesmo gráfico. Observa-se uma razoável aproximação das curvas, mesmo considerando os pontos associados aos horizontes que ainda encontravam-se em processo de sedimentação (pontos iniciais). Estas curvas tendem a ocupar uma mesma região do gráfico, com inclinações muito próximas para as curvas associadas ao tanque TK-105, e uma maior variação do índice de vazios com a tensão efetiva quando analisada a lei vinculada ao tanque TK-101, na faixa estudada.

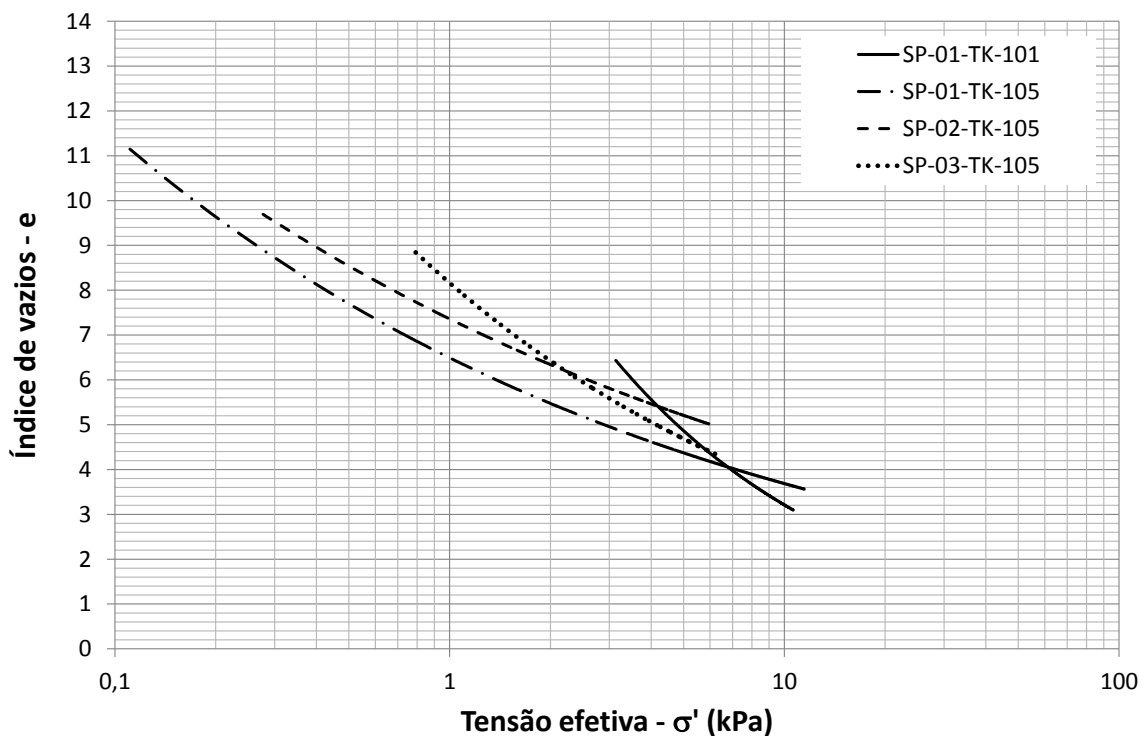


Figura 4.60 – Curvas σ' versus e obtidas para os tanques TK-101 e TK-105

Considerando a proximidade das curvas justapostas na Figura 4.60, foi feita uma interpretação dos resultados, obtendo-se uma curva ‘média’ para todos os pontos obtidos em todas as seções avaliadas. Para tanto, realizou-se inicialmente a disposição dos pontos, levando-se em consideração apenas o tanque TK-105 (Figura 4.61) e, posteriormente, foram lançados todos os pontos, incluindo aqueles associados ao tanque TK-101, obtendo-se uma nuvem pela qual se obteve outro ajuste, conforme destaca a Figura 4.62.

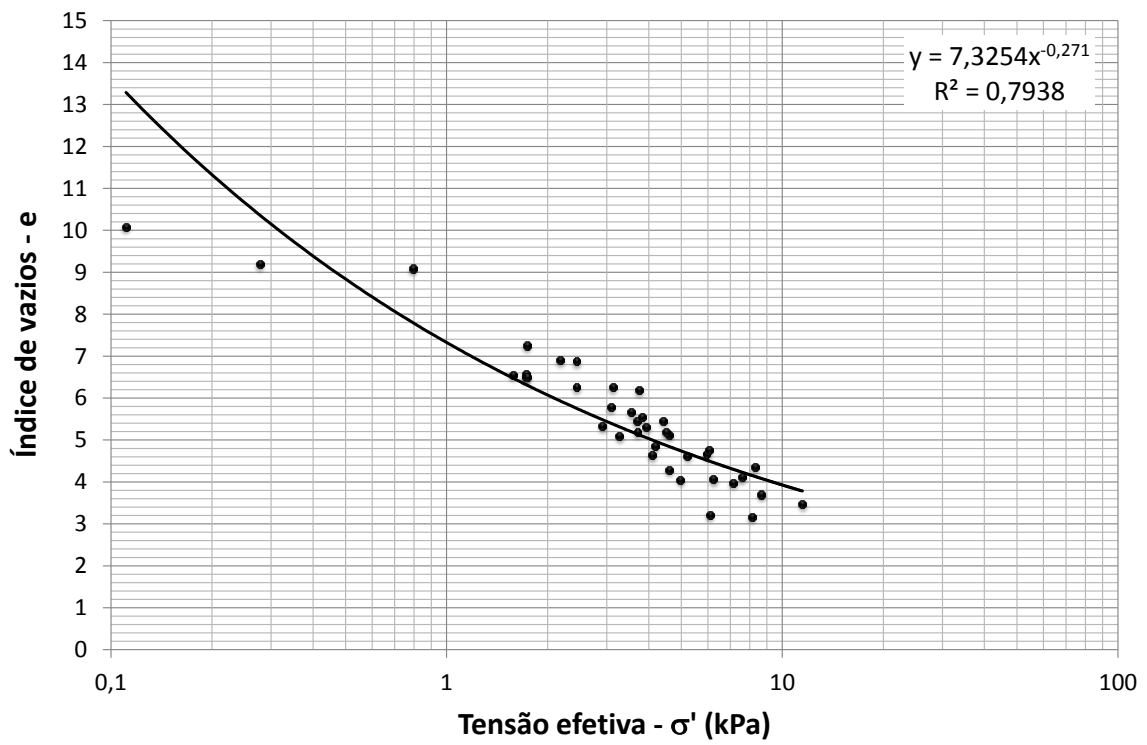


Figura 4.61 – Curva σ' versus e ‘média’ – tanque TK-105

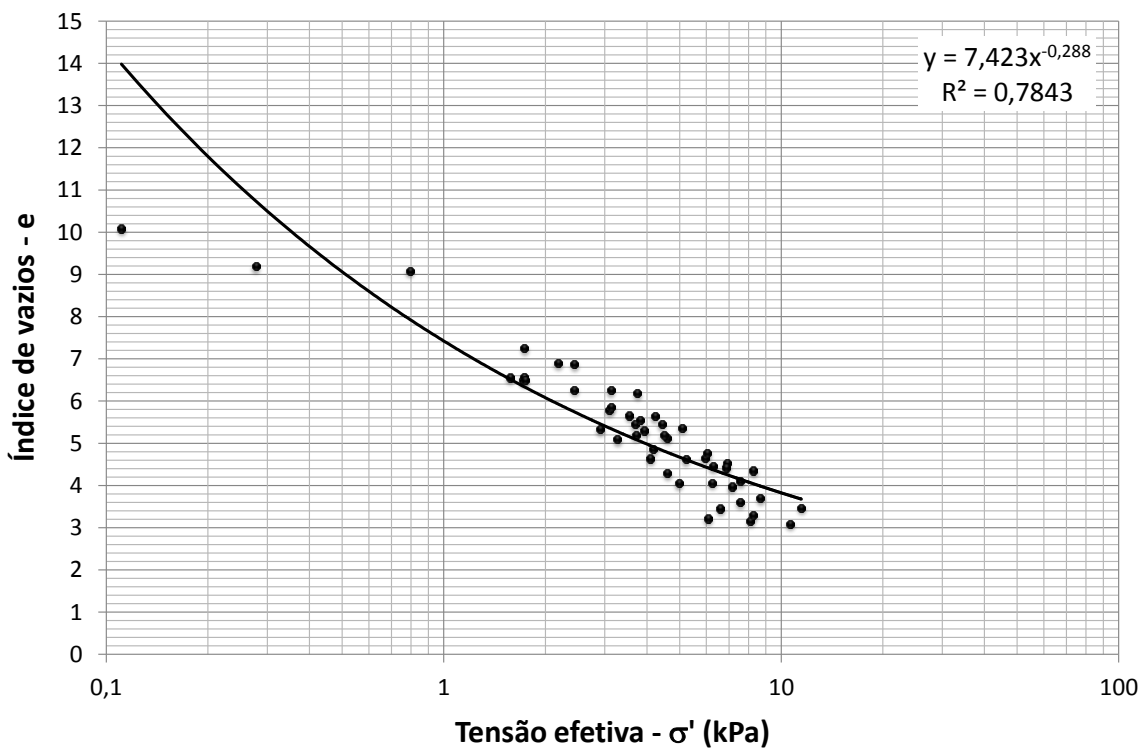


Figura 4.62 – Curva σ' versus e ‘média’ – tanques TK-101 e TK-105

As Equações 4.6 e 4.7 destacam os ajustes ‘médios’ obtidos considerando-se primeiramente o tanque TK-105 e, posteriormente, os dois tanques (TK-101 e TK-105).

$$e = 7,3254 \cdot \sigma'^{-0,271} \quad (4.6)$$

$$e = 7,4230 \cdot \sigma'^{-0,288} \quad (4.7)$$

A regressão obtida na consideração dos dois tanques, com uma dispersão de pontos relativamente alta, aponta para uma elevada variação de índice de vazios relacionada a uma estreita faixa de tensões efetivas. Na análise obtida pela curva da Figura 4.62, representada pela equação 3.7, por exemplo, a faixa de tensões efetivas de 1 a 10 kPa está associada a uma variação de índice de vazios, de 7,42 a 3,82, respectivamente. Ou seja, para uma pequena variação das tensões efetivas há uma considerável variação do índice de vazios do rejeito.

Observa-se também uma ampla dispersão dos primeiros pontos associados às sondagens SP-01-TK-105, SP-02-TK-105 e SP-03-TK-105. Estes pontos correspondem ao primeiro horizonte da investigação, na região em que os grãos do rejeito ainda se encontram em suspensão, comportamento que não foi percebido no tanque TK-101, conforme já apresentado.

Com efeito, a própria proximidade das curvas obtidas (com e sem os pontos gerados pelo perfil do tanque TK-101), e expressas pelas Equações 4.6 e 4.7, pode ser explicada pela influência destes pontos, uma vez que estes são dispersos na obtenção das duas curvas. Nas duas condições, estes pontos superficiais, por estarem mais dispersos, condição visivelmente percebida na curva, exercem influência sobre o ajuste final obtido. De fato, estes pontos foram inicialmente considerados, mas, numa análise específica da compressibilidade, eles devem ser desprezados, visto que, para índices de vazios mais elevados, o próprio ensaio de coluna já mostrou que os rejeitos ainda se encontram em processo de sedimentação.

Neste sentido, justifica-se uma nova análise, considerando uma regressão particularizada pela exclusão destes pontos comuns às três sondagens. Esta regressão é aqui denominada de curva de compressibilidade ‘média’ corrigida (Figura 4.63), onde

se percebe uma elevação do coeficiente de determinação e, conseqüentemente um melhor ajuste do modelo para a faixa avaliada. Considerando a mesma faixa de oscilação dos valores de tensão efetiva considerada anteriormente (com o uso da Equação 4.7), de 1 a 10 kPa, corresponde uma nova variação do índice de vazios, de 8,91 a 3,50, respectivamente. Estes valores foram obtidos pela lei de compressibilidade ‘média’ corrigida, expressa pela Equação 4.8.

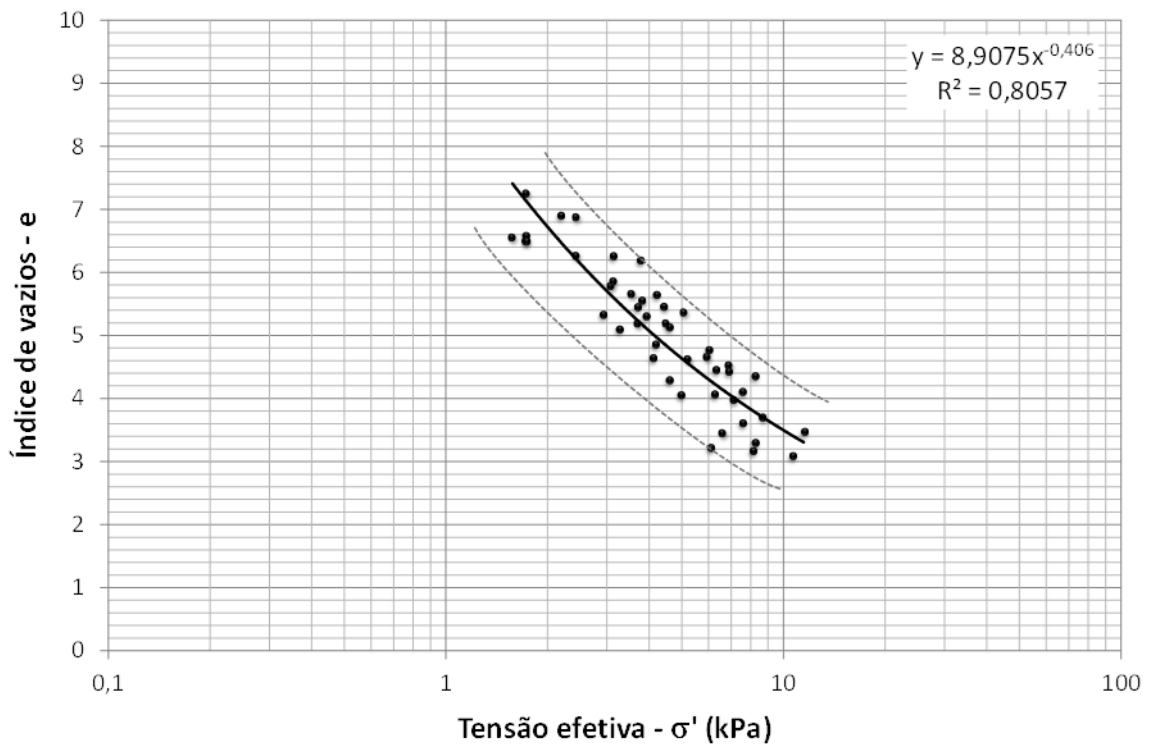


Figura 4.63 – Curva de compressibilidade ‘média’ corrigida (sem a consideração dos pontos superficiais do tanque TK-105) – tanques TK-101 e TK-105

$$e = 8,9075 \cdot \sigma'^{-0,406} \quad (4.8)$$

Na seqüência (Figura 4.64), são apresentadas as curvas de todos os perfis, desconsiderando os pontos associados aos índices de vazios mais elevados (acima do índice de vazios para tensão efetiva nula, obtido no ensaio de coluna de sedimentação). A visualização das curvas, em função dos índices de vazios normalizados e com as

abscissas em escala linear, mostra a tendência de concordância para todos os perfis investigados. A normalização dos índices de vazios foi realizada em função do índice de vazios de estabilização no ensaio de coluna de sedimentação, o mesmo observado ao final da etapa de sedimentação do ensaio HCT. Este índice de vazios é conhecido como índice de vazios para tensão efetiva nula (e_{00}).

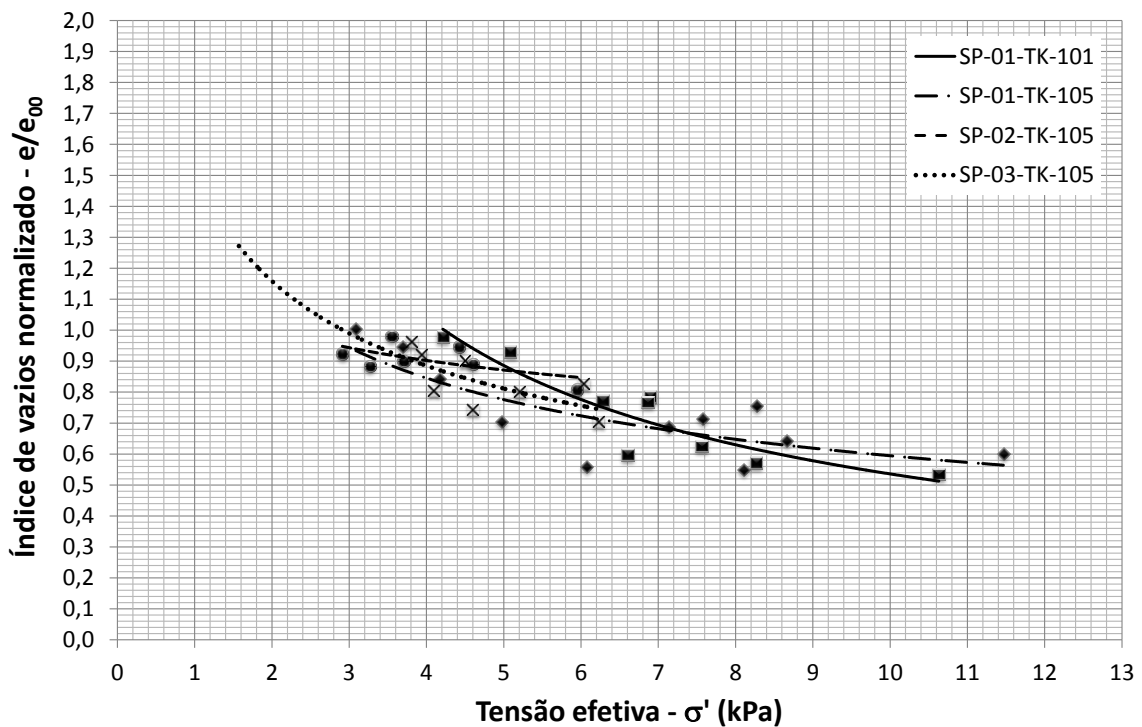


Figura 4.64 – Curva tensão efetiva *versus* índice de vazios normalizado para todos os perfis dos tanques TK-101 e TK-105

A seguir, é apresentada uma síntese das curvas σ' *versus* e obtidas neste capítulo, geradas a partir das análises de campo, sistematizadas em função das diferentes condições consideradas nas análises realizadas dentro deste programa experimental (Tabela 4.13). Estas relações já foram expostas pelas Equações 4.2 a 4.8, obtidas por regressão relacionada sob a forma de potência, cujo modelo matemático melhor ajustou os valores observados, além de ser condizente para representação, em termos práticos, do fenômeno em estudo. A curva associada à Equação 4.8 é a que melhor representa as características de compressibilidade dos tanques.

Tabela 4.13 – Síntese das curvas obtidas em função das condições consideradas na análise

Equação (referência)	Tanque (condição considerada)	Curva obtida
4.2	Perfil SP-01-TK-105	$e = 6,4917 \cdot \sigma'^{-0,246}$
4.3	Perfil SP-02-TK-105	$e = 7,3585 \cdot \sigma'^{-0,215}$
4.4	Perfil SP-03-TK-105	$e = 8,1613 \cdot \sigma'^{-0,345}$
4.5	Perfil SP-01-TK-101	$e = 12,746 \cdot \sigma'^{-0,599}$
4.6	Média dos pontos dos 3 perfis do tanque TK-105	$e = 7,3254 \cdot \sigma'^{-0,271}$
4.7	Média dos pontos dos 3 perfis TK-105 e do perfil TK-101	$e = 7,4230 \cdot \sigma'^{-0,288}$
4.8	Média dos pontos dos 3 perfis TK-105 e do perfil TK-101, com a desconsideração da camada superficial	$e = 8,9075 \cdot \sigma'^{-0,406}$ (compressibilidade)

As curvas apresentadas neste capítulo, obtidas com a consideração das condições reais de estocagem dos rejeitos nos tanques TK-101 e, com maior representatividade, no tanque TK-105, sob todos os aspectos ponderados nas diferentes análises, serão confrontados, numa análise mais efetiva, com os resultados dos ensaios de laboratório (CRD e HCT) realizados no Centro Tecnológico de Geotecnia Aplicada do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas – CTGA/NUGEO (apresentados no capítulo anterior) no Capítulo 5.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nos projetos associados à disposição de rejeitos finos de mineração na forma de polpa, a previsão correta da capacidade de armazenamento dos reservatórios é imprescindível para viabilizar uma estimativa mais precisa da vida útil destes, variável importante no processo que envolve a indústria da mineração. Para tanto, além do conhecimento das condições específicas dos materiais lançados nestas estruturas, o modelo de deposição, concernente à compressibilidade e ao adensamento da polpa, é também importante para a avaliação da vida útil dos empreendimentos.

No entanto, muitas vezes, fatores ligados essencialmente às peculiaridades dos materiais a dispor são subestimados, por avaliações impróprias para o material ou mesmo pela simples extrapolação de procedimentos empíricos comumente utilizados. Reforça-se que os rejeitos finos, particularmente com elevadas proporções de partículas finas (fração argila), experimentam um processo de deposição que não devem ser interpretados com base nos princípios da teoria clássica de Terzaghi, necessitando de estudos que contribuam efetivamente para a formulação de modelos deposicionais consistentes.

Adicionalmente, para o caso dos rejeitos finos de fosfato de baixa densidade, aqui avaliados, além das características já apresentadas, existem ainda fatores associados ao elevado percentual de cloretos presentes, tanto na água utilizada no beneficiamento industrial, visto que, nos processos de separação e ciclone primária, se utiliza a água do mar, quanto na própria matriz rochosa (cloretos solúveis). Estes fatos justificam uma análise específica que considere as condições reais de estocagem (ensaios de campo) e simulações que incorporem as condições de contorno no processo de deposição (ensaios de laboratório).

Neste sentido, além da apresentação dos resultados obtidos nos programas experimentais de campo e de laboratório, algumas análises do mecanismo de compressibilidade e adensamento dos rejeitos estudados já foram realizadas nos capítulos anteriores. Em complemento às abordagens já estabelecidas, serão estabelecidas análises comparativas entre os resultados de sedimentação, adensamento por fluxo induzido, adensamento por deformação constante e aqueles obtidos em campo, sob a ótica particular da natureza destes materiais.

Após a constatação dos melhores modelos de deposição associados aos rejeitos estudados, obtidos pelo programa experimental estabelecido no âmbito deste trabalho, serão ainda realizadas simulações de enchimento de dois tanques localizados na Mina de Bayóvar, sendo um deles já preenchido e outro prestes a entrar em operação. Estas simulações visam validar as leis de compressibilidade obtidas nos estudos experimentais de laboratório e de campo.

5.2 ANÁLISES COMPARATIVA DOS RESULTADOS

5.2.1 Análise dos resultados dos ensaios de sedimentação em coluna

A deposição de sedimentos finos, de maneira geral, é influenciada por diversos fatores. Dependem diretamente das características e das propriedades da água, bem como do próprio sedimento. Um dos principais mecanismos envolvidos no processo de sedimentação é a floculação das partículas. Numa análise geral, a floculação, que envolve a colisão e a coesão entre as partículas, gera uma nova ‘partícula’ agregada de maior diâmetro e a respectiva velocidade de sedimentação tende a ser maior do que quando analisada individualmente.

Na avaliação de materiais granulares na Mecânica dos Solos clássica, é comum referenciar-se à velocidade de sedimentação com base na Lei de Stokes, o que é válido apenas para partículas que sedimentam de forma isolada e em baixa concentração. No entanto, para os rejeitos finos, o processo de deposição não é governado por este mecanismo, pois durante a sedimentação destes materiais, ocorre o chamado ‘movimento browniano’, fenômeno pelo qual as partículas finas suspensas em um líquido tendem a se mover em caminhos aleatórios.

O ‘movimento browniano’ promove a colisão entre as partículas e a consequente agregação. A agregação de partículas por colisões, por exemplo, produz uma redução em seu número e um incremento do diâmetro médio dos agregados formados, favorecendo, portanto, o fenômeno de floculação, considerado fundamental para a análise dos rejeitos.

As análises realizadas anteriormente mostraram que, independente do teor de sólidos inicial da amostra total, todos os rejeitos atingiram, na estabilização, índices de vazios muito próximos. Além disso, para todas as amostras estudadas, a estabilização da interface rejeito / água sobrenadante ocorreu mais rapidamente para menores teores de sólidos (Figuras 3.19 e 3.20).

- **Efeito da salinidade da amostra no processo de sedimentação**

Além da influência da concentração de partículas, aqui representada pelo teor de sólidos, já analisada anteriormente (Kynch, 1952), a salinidade do rejeito também pode ter interferência no processo de sedimentação. Neste sentido, realizou-se um processo de dessalinização em laboratório de uma amostra parcial da polpa de rejeitos extraída de uma das bombonas.

Esta redução foi realizada fisicamente, apenas com a substituição progressiva, ao longo de vários dias, da água salina presente no rejeito por água destilada, obtendo-se, ao final, uma amostra com teor de cloretos significativamente menor do que a amostra original. Para tanto, utilizou-se um recipiente, onde o rejeito era deixado em sedimentação durante dias e, posteriormente, a água sobrenadante era substituída por água destilada. Este processo foi repetido quatro vezes, onde todo o procedimento durou, portanto, 52 dias.

A verificação do percentual de redução dos cloretos presentes na amostra foi realizada por meio da análise do líquido presente tanto na amostra dessalinizada quanto na amostra original. O procedimento foi realizado pelo Laboratório de Saneamento Ambiental da Escola de Minas da UFOP, considerando a metodologia proposta por Greenberg *et al.* (1992), voltada para análises de águas de rios. As análises mostraram, inicialmente, a elevada concentração de cloreto (Cl⁻) no líquido extraído da água sobrenadante do rejeito, inclusive superior à concentração da amostra da água do mar,

que também foi analisada, mostrando a influência dos cloretos dissolvidos na matriz rochosa. O mecanismo de dessalinização físico realizado possibilitou uma concentração de cloretos 40 vezes menor do que a medida na amostra original.

Com as amostras dessalinizadas, foram obtidos 4 diferentes teores de sólidos aleatórios e levados às provetas de sedimentação durante 13 dias, para posterior comparação com o rejeito original sedimentado. Pela impossibilidade da obtenção, com precisão, dos mesmos teores de sólidos utilizados na sedimentação em coluna com as amostras originais do rejeito, foi estabelecida uma relação, ajustada através de uma função polinomial, entre os teores de sólidos iniciais e as alturas finais (divisão da proveta) da interface rejeito / água sobrenadante (Figura 5.1). Os teores de umidade iniciais de cada proveta foram também plotados na mesma curva, obtendo-se, um ajuste polinomial com as alturas finais (água sobrenadante). As equações de ajuste possibilitam a obtenção das alturas da interface rejeito / água para quaisquer teores de sólidos utilizados, dentro da faixa analisada.

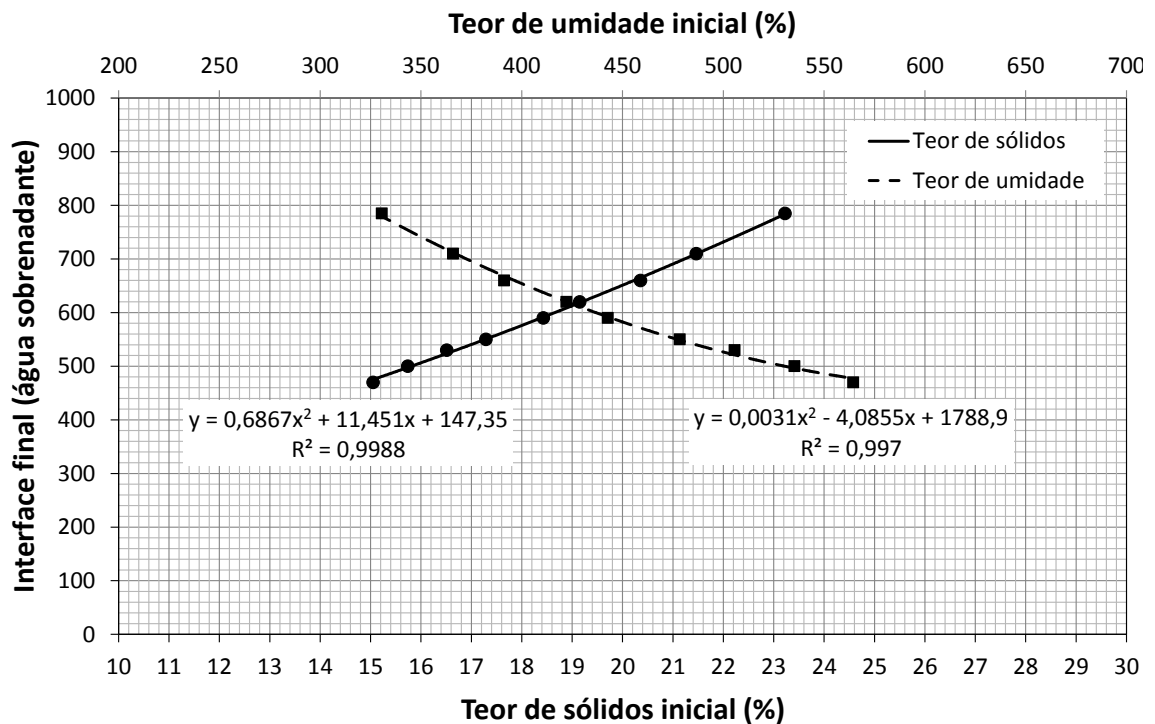


Figura 5.1 – Relação teor de sólidos inicial (ψ_i) e teor de umidade inicial (w_i) versus interface final rejeito/água sobrenadante

Os valores obtidos durante os ensaios, considerando os quatro diferentes teores de sólidos, são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Ensaio de coluna para 4 diferentes teores de sólidos (ψ) das amostras dessalinizadas

Tempo (min)	Proveta 1 (mL)	Proveta 2 (mL)	Proveta 3 (mL)	Proveta 4 (mL)
	ψ (%) 19,1	ψ (%) 17,1	ψ (%) 15,0	ψ (%) 14,3
0	1000	1000	1000	1000
2	1000	1000	1000	1000
4	1000	1000	1000	1000
6	1000	1000	1000	995
8	1000	1000	1000	995
10	1000	100	995	990
15	1000	995	995	985
20	1000	995	990	980
30	995	995	990	975
60	995	990	985	945
120	995	990	975	915
180	990	985	945	890
240	985	980	930	870
300	980	970	905	850
360	975	945	885	830
420	970	935	875	820
480	960	930	870	820
1440	900	810	745	700
2880	840	750	690	650
4320	780	690	640	600
5760	770	675	630	590
7200	750	660	620	580
8640	735	650	610	570
10080	730	645	600	565
11520	725	645	600	565
12960	715	640	595	560
14400	715	640	595	560
15840	715	640	595	560
17280	715	640	595	560
18720	715	640	595	560

Os resultados das alturas finais atingidas, para cada ensaio, também foram relacionados com os teores de sólidos iniciais. Pelos resultados, apresentados na Figura 5.2, e comparados com a tendência, obtida matematicamente, para os mesmos valores de teores de sólidos, observa-se que o NaCl, presente na polpa, trabalha como um agente floculante, contribuindo para a sedimentação dos rejeitos. Para a faixa de teores de sólidos analisada, o simples procedimento físico utilizado no processo de dessalinização elevou em torno de 20% o volume do material sedimentado. Ou seja, inicialmente, pode-se afirmar que a baixa taxa de sedimentação do material, também observada em campo, não está diretamente associada à presença de NaCl. Pelo contrário, o sal age no sentido de contribuir na deposição dos rejeitos.

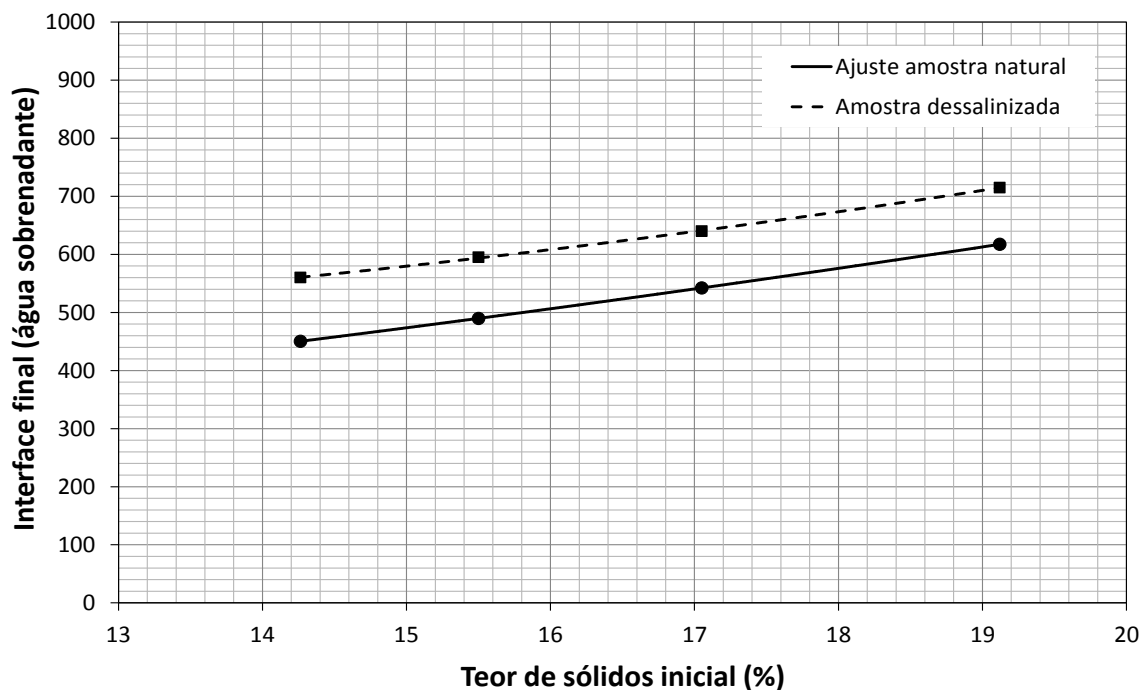


Figura 5.2 – Relação teor de sólidos inicial (ψ_i) versus interface final rejeito/água sobrenadante para as amostras natural e dessalinizada

Com efeito, a literatura técnica aborda a influência da salinidade na floculação e, conseqüentemente, na sedimentação das partículas. Por exemplo, Ramos (2013), em estudo do efeito da salinidade sobre a velocidade de queda de sedimentos finos de uma bacia portuária, destaca que na água salgada encontram-se presentes íons eletropositivos

fortes de sódio, Na^+ . A ionização destes cátions absorvidos na superfície das partículas de argila é muito forte e, em elevadas concentrações, pode conduzir a uma grande ocupação na camada Stern, reduzindo o potencial Stern e, por sua vez, o potencial Zeta. Neste sentido, vão existir mais forças atrativas, que formarão nuvens de íons positivos em torno das partículas. Ao haver colisões entre as partículas coesivas, estas, por sua vez vão flocular. Nos ensaios de coluna de sedimentação realizados por Ramos (2013), confirmou-se que o aumento do nível de salinidade no líquido aumenta as propriedades coesivas entre as partículas, contribuindo para a floculação e conduzindo a uma elevada velocidade de queda dos sedimentos.

Existem técnicas para avaliação que podem ser aplicadas ao estudo de floculação dos rejeitos. Por exemplo, o ‘*jar test*’ (Pask, 1993), ou teste de jarros, é um ensaio realizado em bancada (geralmente utilizado em estações de tratamento de água), que reproduz as condições do processo de coagulação / floculação, considerando-se as características da água, com a aplicação de reagentes e controle dos parâmetros envolvidos no processo.

5.2.2 Comparação entre os resultados de campo e de laboratório

Além de verificar a efetividade dos equipamentos construídos, associados ao estudo da compressibilidade e adensamento, os resultados dos ensaios tipo CRD e da sondagem piezométrica realizada ‘*in situ*’, em condições reais de estocagem dos rejeitos de fosfato, foram comparados com os ensaios de adensamento por fluxo induzido (HCT). O ensaio HCT com o uso da bomba de fluxo tem sido utilizado em pesquisas recentes e os seus resultados são considerados relativamente confiáveis, para fins de projeto, quando se trabalha com rejeitos finos de mineração.

As análises dos resultados dos ensaios HCT foram feitas pelo SICTA, *software* responsável pela determinação dos parâmetros constitutivos *A*, *B*, *C*, *D* e *Z* dos modelos matemáticos propostos por (Liu e Znidarcic, 1991), para compressibilidade e Somogyi (1979), associado à permeabilidade, utilizados neste trabalho. Os modelos utilizados foram os mesmos aplicados para os rejeitos da Flórida (Abu-Hejleh e Znidarcic, 1996). A Figura 5.3 destaca inicialmente uma comparação entre os resultados obtidos nos ensaios HCT e CRD, considerando diferentes condições.

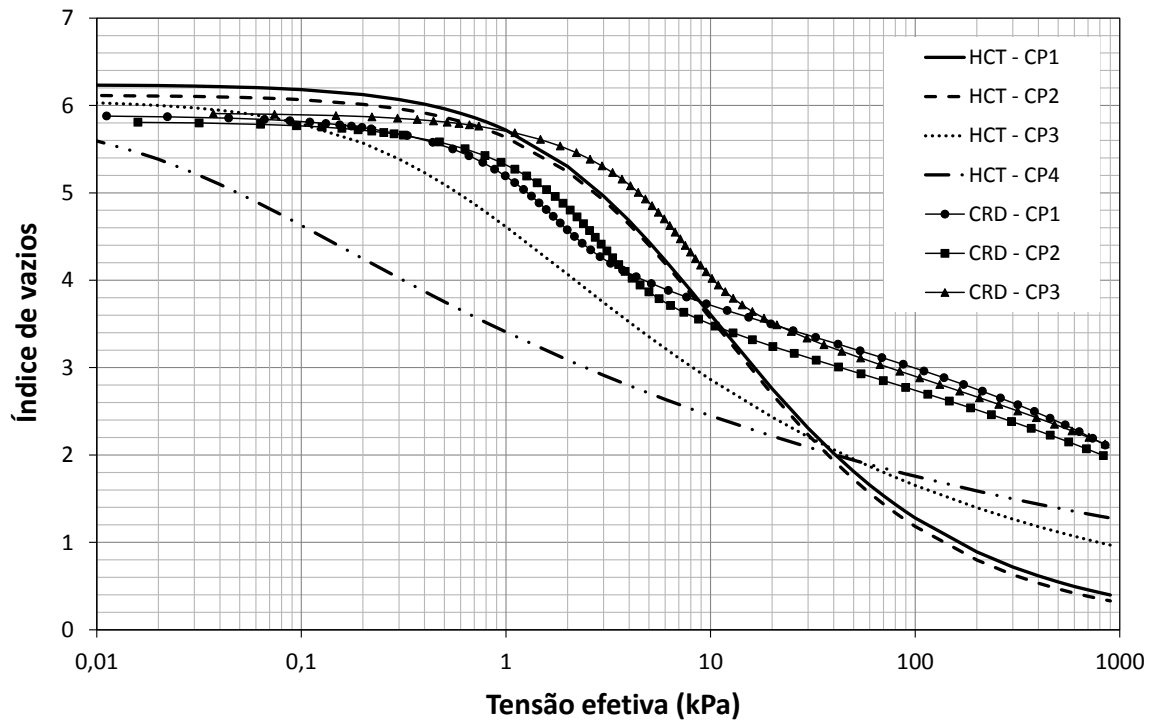


Figura 5.3 – Comparação entre as curvas σ' versus e obtidas nos ensaios de laboratório - HCT e CRD

Observa-se uma boa concordância dos resultados obtidos nos ensaios HCT (CP1 e CP2) e os nos ensaios CRD para tensões menores de 10 kPa. Por outro lado, as relações observadas para os ensaios de HCT, conduzidos em maiores velocidades de adensamento por percolação e maiores alturas iniciais (HCT - CP3 e HCT - CP4), não apresentaram boa aproximação com as curvas obtidas no consolidômetro de deformação controlada, bem como aquelas geradas no próprio equipamento, com vazões de 0,10 e 0,05 mm/min.

As curvas de compressibilidade ajustadas para os três corpos de prova do ensaio CRD (CRD - CP1, CRD - CP2 e CRD - CP3) se aproximam entre si para níveis de tensão superiores a 10 kPa, mas se distanciam, no mesmo trecho, das curvas associadas aos ensaios de adensamento por percolação induzida (HCT - CP1, HCT - CP2, HCT - CP3 e HCT - CP4). Outra observação acerca das curvas obtidas nos ensaios CRD é que elas se aproximam bem para baixas e elevadas tensões efetivas. O ajuste realizado através de um programa computacional possibilitou uma boa apresentação das curvas, em especial para as tensões mais baixas, onde a dispersão dos pontos é mais significativa, mesmo

com a elevada precisão dos transdutores utilizados. O ensaio tipo CRD tem sido relativamente utilizado para o estudo de materiais muito moles como os rejeitos finos e o seu carregamento é variável e crescente ao longo do tempo. Dependendo da precisão dos sensores utilizados, bem como pela própria característica da condução dos ensaios nos instantes iniciais, ocorre uma dispersão dos os primeiros pontos obtidos. No presente trabalho, a elevada frequência na aquisição provocou esta dispersão.

No entanto, a regressão não linear aplicada de forma iterativa, com o uso do *software LAB Fit*, considerando a função apresentada na Equação 3.11, possibilitou um bom ajuste para os primeiros pontos, tanto para a tensão efetiva quanto para aqueles associados às poropressões geradas durante a compressão, em todas as velocidades.

Os resultados obtidos nos ensaios de campo também foram comparados aos ensaios HCT. As comparações são inicialmente estabelecidas para todos os pontos de sondagem realizados e, posteriormente, com as médias obtidas para os diferentes perfis de sondagem (Figuras 5.4 e 5.5).

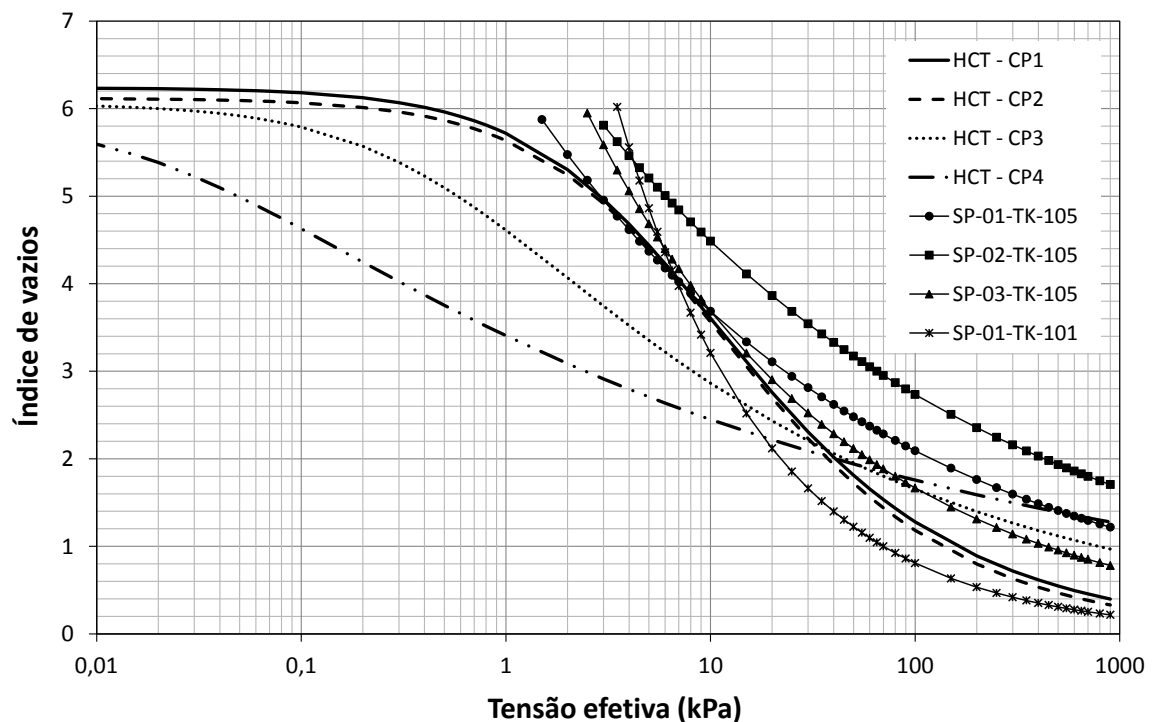


Figura 5.4 – Comparação entre as curvas σ' versus e obtidas nos ensaios de laboratório e de campo - HCT e perfis dos tanques TK-101 e TK-105

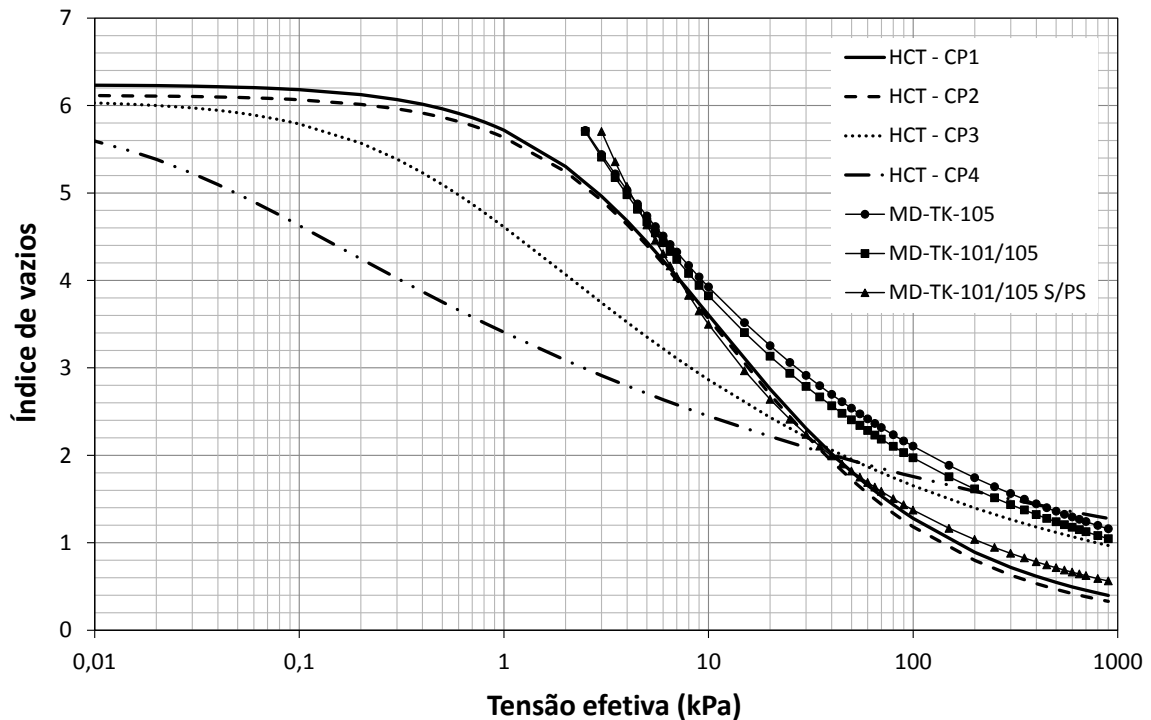


Figura 5.5 – Comparação entre as curvas σ' versus e obtidas nos ensaios de laboratório e de campo - HCT e média dos perfis dos tanques TK-101 e TK-105

Para os ensaios de campo, as curvas foram bem ajustadas para tensões acima de 2 kPa, condição justificada pela própria precisão dos sensores do equipamento de sondagem e das variações de leituras devido a movimentação da balsa durante a prospecção. Quando analisadas isoladamente, as curvas apresentaram-se pouco dispersas, mas se avaliadas através das médias, apresentadas na Figura 5.5, o agrupamento se torna mais evidente, particularmente para o perfil médio dos tanques TK-101 e TK-105, com a desconsideração dos pontos obtidos na camada superficial (MD-TK-101/105 S/PS – média dos perfis TK-101 e TK-105 sem os pontos superficiais), que representa, de fato, os pontos associados ao adensamento. Esta curva é praticamente coincidente com as curvas obtidas nos ensaios de adensamento por percolação induzida HCT - CP1 e HCT - CP2. Na Figura 5.5 também são apresentados os ajustes MD-TK-105 (média dos perfis TK-105) e MD-101/105 (média dos perfis TK-101 e TK-105).

Da mesma forma verificada na comparação anterior com os ensaios CRD, as curvas de compressibilidade HCT - CP3 e HCT - CP4 também não apresentaram uma razoável concordância com as curvas de σ' versus e obtidas nos procedimentos realizados em

campo, para as tensões menores que 20 kPa. Reforça-se que, nestes ensaios, a maior tensão efetiva registrada foi em torno de 10 kPa, conforme já foi percebido na apresentação dos resultados realizada no Capítulo 4. Para este nível de tensão, os rejeitos ainda possuem elevado índice de vazios (entre 3,5 e 4), demonstrando a baixa consolidação também observada durante os ensaios de campo realizados nos tanques TK-101 e TK-105.

Quando são estabelecidas as comparações entre as curvas obtidas na sondagem piezométrica e as ajustadas nos ensaios tipo CRD (Figura 5.6), a concordância é mais visível para a compressibilidade do corpo de prova CRD - CP3, cujo ensaio foi conduzido numa maior taxa de compressão ($v = 0,750$ mm/min). O agrupamento, no entanto, é razoável apenas para tensões efetivas entre 2 e 10 kPa. Esta análise se torna ainda mais consistente quando a curva CRD - CP3 é comparada às curvas médias MD-TK-105, MD-101/105 e MD-TK-101/105 S/PS (Figura 5.7). Para tensões superiores a 10 kPa, as curvas obtidas dos ensaios CRD tendem a se afastar daquelas associadas às curvas σ' versus e das seções de campo, com exceção do perfil SP-03-TK-105.

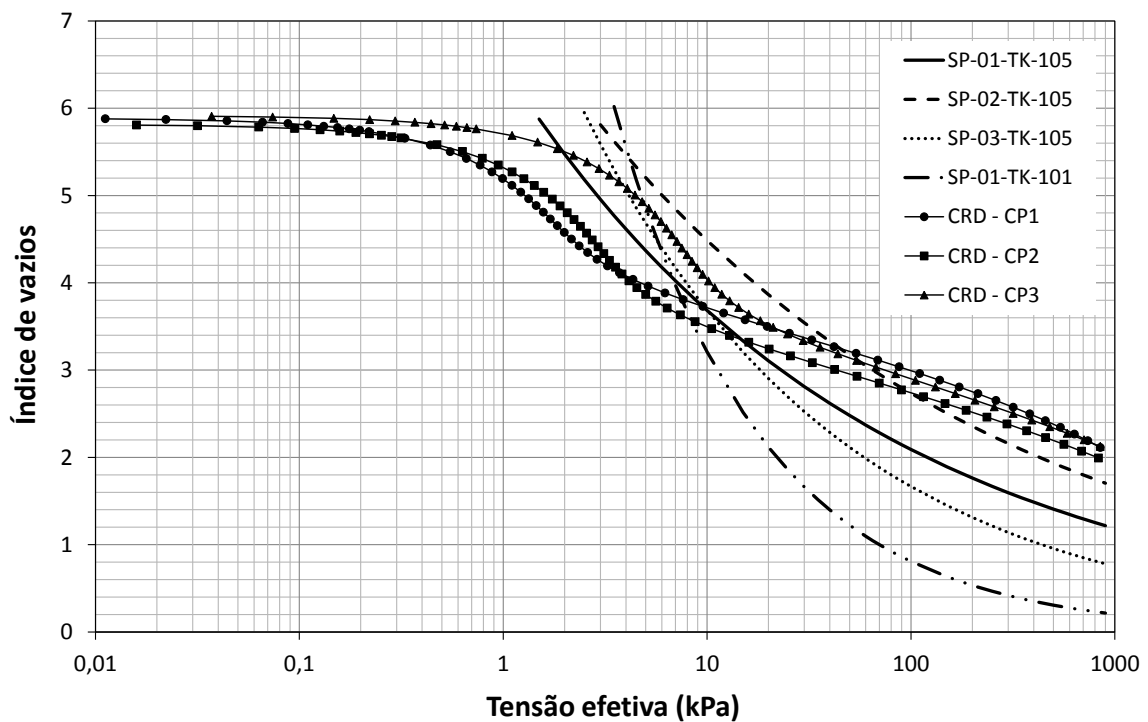


Figura 5.6 – Comparação entre as curvas σ' versus e obtidas nos ensaios de laboratório e de campo - CRD e perfis dos tanques TK-101 e TK-105

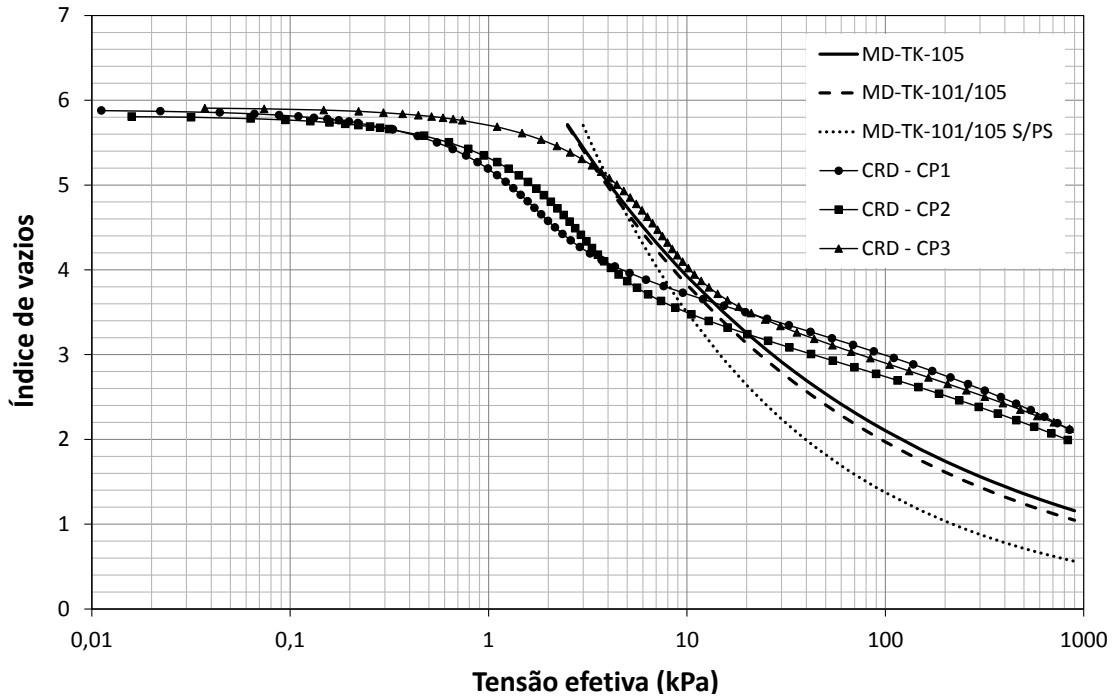


Figura 5.7 – Comparação entre as curvas σ' versus e obtidas nos ensaios de laboratório e de campo - CRD e média dos perfis dos tanques TK-101 e TK-105

Em termos da permeabilidade obtida em laboratório, observa-se uma significativa dispersão entre os ensaios HCT e CRD, onde as curvas ocupam regiões associadas a permeabilidades entre 10^{-8} e 10^{-7} m/s. No entanto, há uma relativa concordância das curvas do ensaio CRD - CP1 e CP2 com as curvas do ensaio HCT, relacionadas aos CP's 1 e 2, para índices de vazios entre 2 e 3. Para índices de vazios maiores, entre 5 e 6, elas já se aproximam daquelas relacionadas aos CP's 3 e 4 do ensaio HCT, conforme pode ser percebido na Figura 5.8.

Para os ensaios de campo, a permeabilidade foi estimada com a consideração da curva teórica de Baligh e Levadoux (1980), para o cone de 60° , cuja exposição foi abordada no Capítulo 2. Desta forma, foram obtidos os coeficientes de adensamento horizontais, considerando 50% da dissipação das poropressões e o tempo t real de dissipação pelo ajuste exponencial dos tempos de estabilização, em função da profundidade. De posse dos valores de C_h , também foram calculados os valores dos coeficientes de compressibilidade (a_v) e de variação volumétrica (m_v), permitindo, desta forma, o cálculo dos coeficientes de permeabilidade (k_h) associados à faixa de índices de vazios de campo, sendo comparados aos obtidos em laboratório (Figura 5.9).

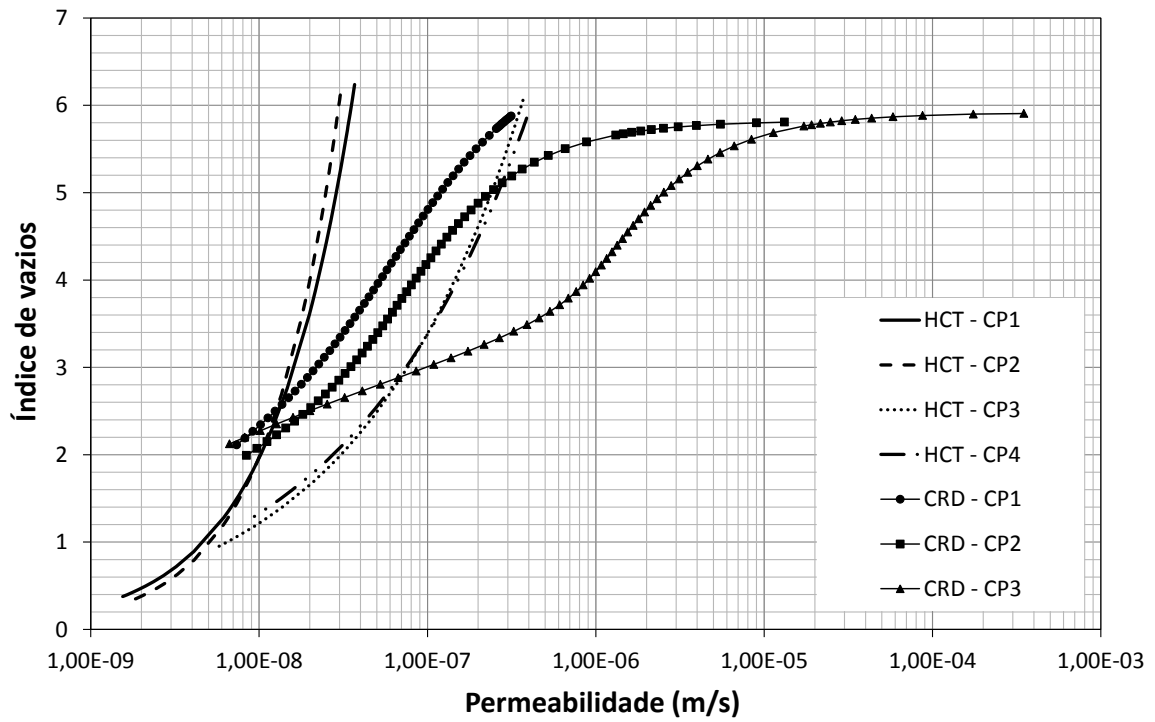


Figura 5.8 – Comparação entre as curvas k versus e obtidas nos ensaios de laboratório - HCT e CRD

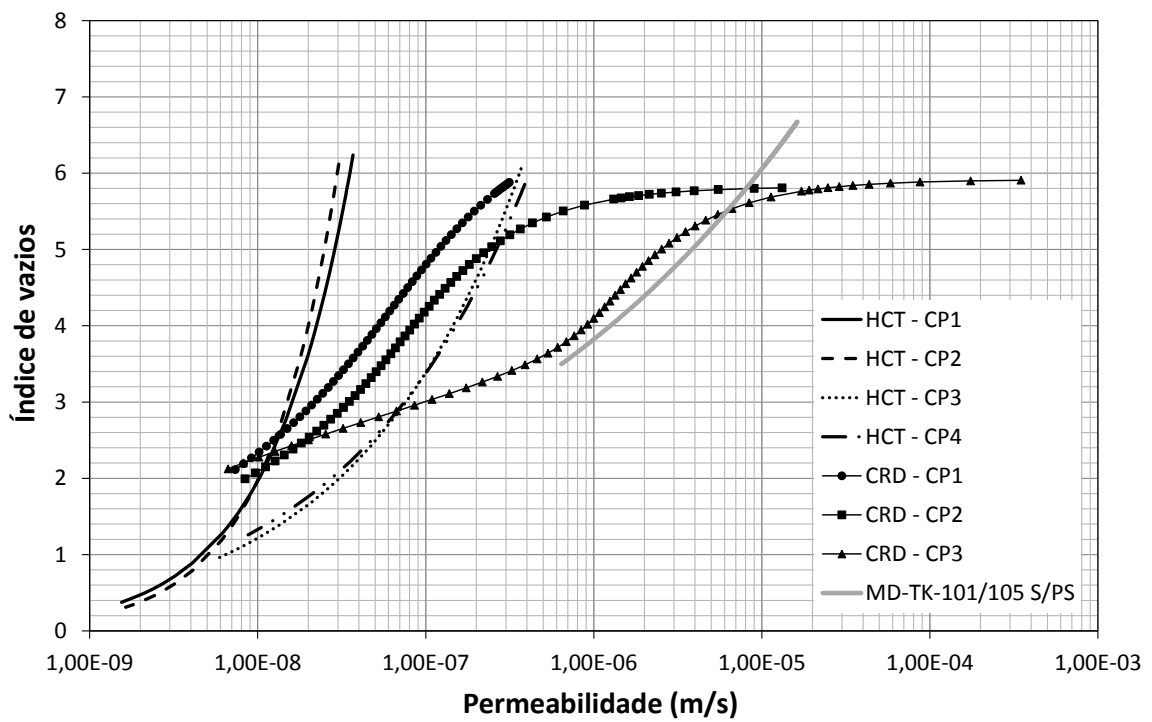


Figura 5.9 – Comparação entre as k versus e obtidas nos ensaios de laboratório e de campo

Ressalta-se que o ajuste dos tempos de estabilização das poropressões foi necessário pela dispersão observada nos ensaios de sondagem piezométrica, com valores em torno de 3 a 5 min para os níveis superficiais e 20 a 25 minutos para as profundidades mais elevadas. Para estimativa dos coeficientes de compressibilidade (a_v), foi considerada a lei de compressibilidade de campo obtida pela curva média dos tanques TK-101 e TK-105, com a desconsideração dos pontos superficiais MD-TK-101/105 S/PS.

Observa-se, na Figura 5.9, uma aproximação da curva de permeabilidade de campo apenas com a curva relacionada ao ensaio CRD - CP3, conduzido em maior velocidade de compressão, para índice de vazios entre 3,5 e 6. Esta concordância também foi percebida nas curvas de compressibilidade, onde o agrupamento das curvas obtidas pelos ensaios de campo se aproxima mais da curva relacionada ao CP3 do ensaio CRD, para tensões efetivas entre 2 e 10 kPa.

5.2.3 Efeito da salinidade da amostra no adensamento e na permeabilidade

Os ensaios de sedimentação realizados nas amostras dessalinizada já anteciparam o comportamento claro da elevação do índice de vazios ao final da sedimentação, ou seja, mostraram a influência da salinidade na floculação e na deposição das partículas.

Visando verificar a influência da salinidade também no processo de adensamento, foi realizado um novo ensaio HCT com bomba de fluxo, utilizando a mesma amostra dos ensaios de sedimentação em coluna. Os parâmetros relacionados à amostra dessalinizada, obtidos através da simulação computacional, são expostos na Tabela 5.2. As relações apresentadas na Tabela 5.3 foram utilizadas para a construção das curvas de compressibilidade e permeabilidade.

Tabela 5.2 – Parâmetros constitutivos obtidos para a amostra dessalinizada

Parâmetro	CP5
A	9,68521
B	-0,25552
Z (kPa)	2,60144
C (m/s)	$2,7613 \times 10^{-12}$
D	6,33697

Tabela 5.3 – Relações constitutivas obtidas para a amostra dessalinizada

Amostra	Relação constitutiva (compressibilidade e permeabilidade)	
CP5	Compressibilidade	$e = 9,68521 \cdot (\sigma' + 2,60144)^{-0,25552}$
	Permeabilidade (m/s)	$k = 2,7613 \cdot 10^{-12} \cdot e^{6,33697}$

(*) e : índice de vazios; k : permeabilidade.

As curvas tensão efetiva *versus* índice de vazios e permeabilidade *versus* índice de vazios são mostradas nas Figuras 5.10 e 5.11, respectivamente, sendo construídas através das relações constitutivas extraídas dos modelos matemáticos de Liu e Znidarcic (1991) e Somogyi (1979) e apresentadas na Tabela 5.3. As curvas de compressibilidade e permeabilidade foram comparadas às curvas obtidas para as amostras naturais (rejeitos obtidos em condições naturais, coletados diretamente no ponto de descarga), ensaiadas através dos corpos de prova 1, 2, 3 e 4.

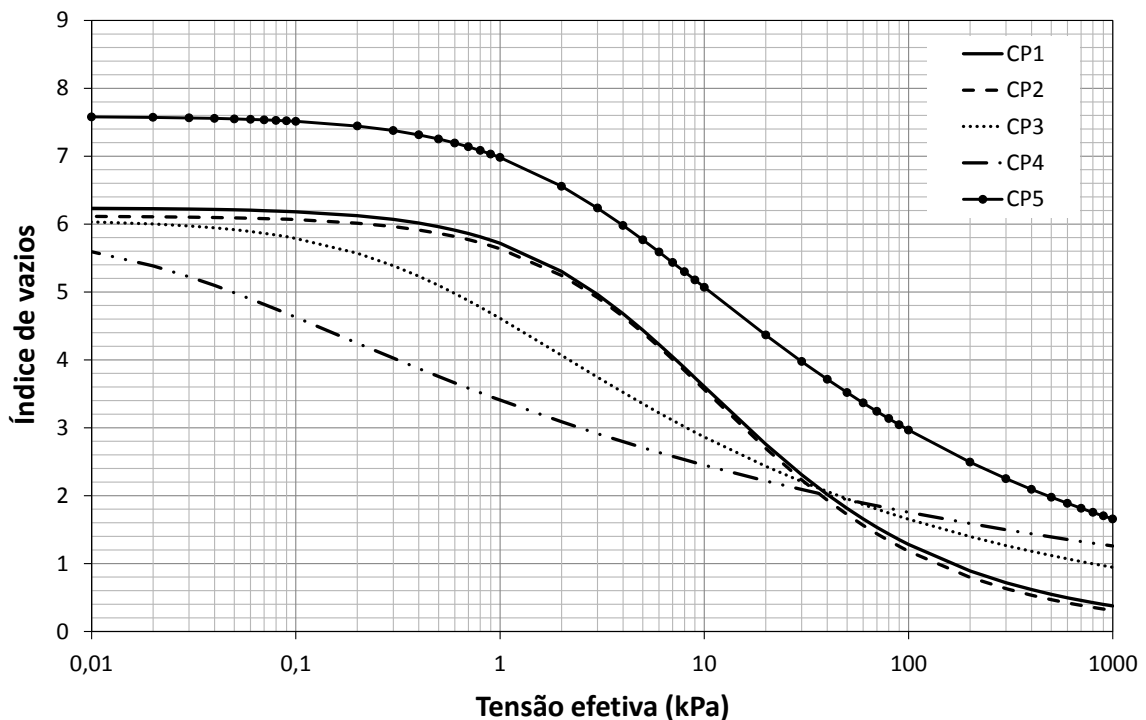


Figura 5.10 – Comparação entre as curvas de compressibilidade das amostras naturais (CP1 a CP4) e da amostra dessalinizada (CP5) - ensaio HCT

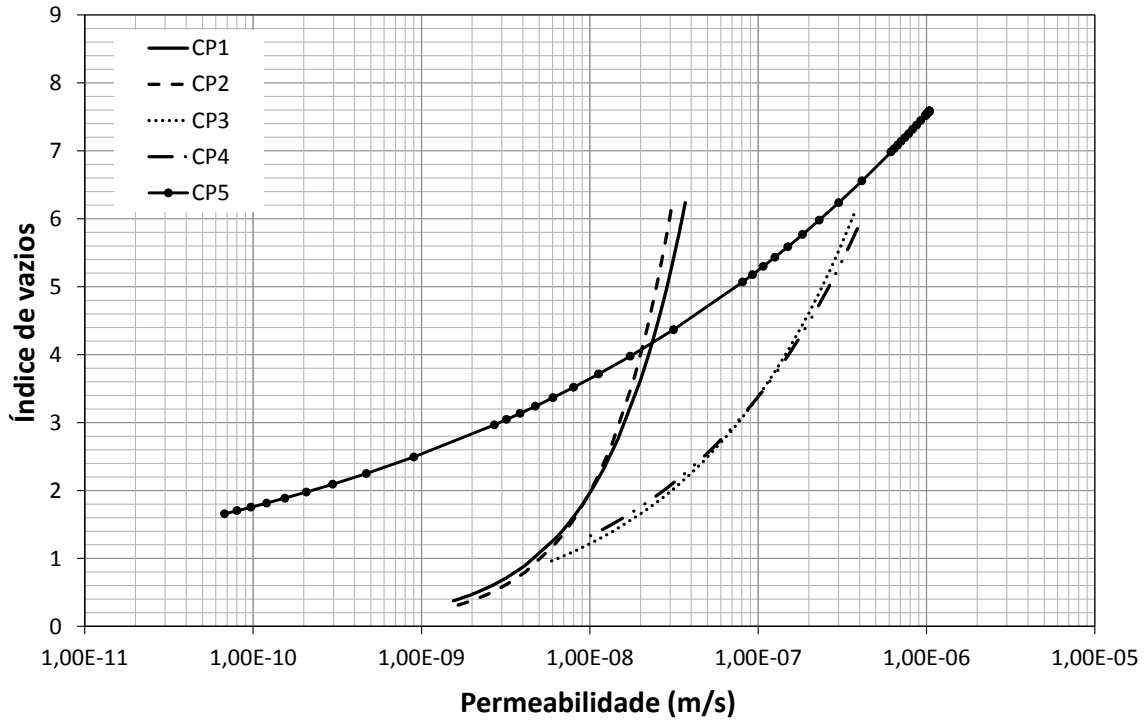


Figura 5.11 – Comparação entre as curvas de permeabilidade das amostras naturais (CP1 a CP4) e da amostra dessalinizada (CP5) - ensaio HCT

O mesmo comportamento observado nos ensaios de sedimentação em coluna, para a amostra dessalinizada, também foi notado, tanto na fase inicial da curva de compressibilidade quanto para as etapas de adensamento por fluxo induzido e de carregamento. Quando se compara esta curva às curvas obtidas para os CP's 1 e 2 (amostras originais), a variação de índice de vazios permanece praticamente constante para todos os níveis de tensão, comprovando mais uma vez que a dessalinização eleva os índices de vazios dos rejeitos, ou seja, a presença de NaCl no líquido contribui para a otimização da sedimentação e adensamento dos rejeitos, agindo como um floculante e tornando estes materiais mais compressíveis.

Diferentemente do comportamento das amostras naturais, a curva de permeabilidade relacionada ao CP5 apresenta uma maior variação com os índices de vazios, assumindo valores em torno de 10^{-6} m/s, para índice de vazios vinculados à tensão efetiva nula, até 10^{-8} m/s, correspondentes aos menores índices de vazios medidos no carregamento. Para índices de vazios menores, em torno de 1,8, por exemplo, a curva de compressibilidade ajustada teoricamente conduz a permeabilidades da ordem de 10^{-10} m/s.

5.3 SIMULAÇÕES DE ENCHIMENTO DOS TANQUES

5.3.1 Simulações de enchimento com base nos resultados de campo

Nos sistemas de contenção de rejeitos de mineração por via úmida, é imprescindível o conhecimento das leis de compressibilidade (σ' versus e) e permeabilidade (k versus e) que envolvem a polpa, de forma a quantificar com maior precisão a capacidade de armazenamento e a vida útil dos reservatórios. A formulação de um modelo teórico para simulação do problema é algo relativamente complexo, por envolver um grande número de variáveis, em especial para os rejeitos finos, onde o adensamento pode ocorrer a grandes deformações.

Com base nos resultados dos procedimentos laboratoriais e de campo realizados, onde foram obtidas as leis de compressibilidade, o presente trabalho incorpora simulações numéricas de enchimento através de três procedimentos: o primeiro consiste na análise realizada a partir da consideração dos resultados obtidos diretamente no campo, considerando, neste caso, um perfil médio de índice de vazios (associado aos pesos específicos secos); o segundo procedimento baseia-se na lei de compressibilidade obtida pela média dos perfis que mais se aproximou da compressibilidade obtida no ensaio HCT; e a terceira proposta está vinculada à utilização de um *software* de simulação numérica (CONDES0), desenvolvido por Yao e Znidarcic (1997), e os parâmetros obtidos nos ensaios HCT com o uso da bomba de fluxo, considerando as contribuições de Pereira (2006). As simulações inicialmente são aplicadas ao tanque TK-105, na condição atual, objetivando verificar a metodologia, uma vez que o reservatório já está completamente cheio. Posteriormente são aplicadas ao tanque TK-103, até a cota final ajustada no projeto, já preparado para as operações iniciais de enchimento.

- **Simulação de enchimento com base no perfil de peso específico seco (TK-105)**

Para a realização da simulação de enchimento do tanque TK-105, reservatório atual de lançamento dos rejeitos de fosfato, foi construído um perfil médio de índice de vazios, a partir da consideração dos perfis SP-01-TK-105, SP-01-TK-105 e SP-01-TK-105. Com base no perfil de índice de vazios médio obtido, as respectivas massas específicas secas foram calculadas, sendo também construído um perfil de peso específico seco,

trabalhado em kN/m^3 e em tf/m^3 . Os perfis médios de índice de vazios e de peso específico seco são apresentados na Figura 5.12, cujos valores são destacados na Tabela 5.4.

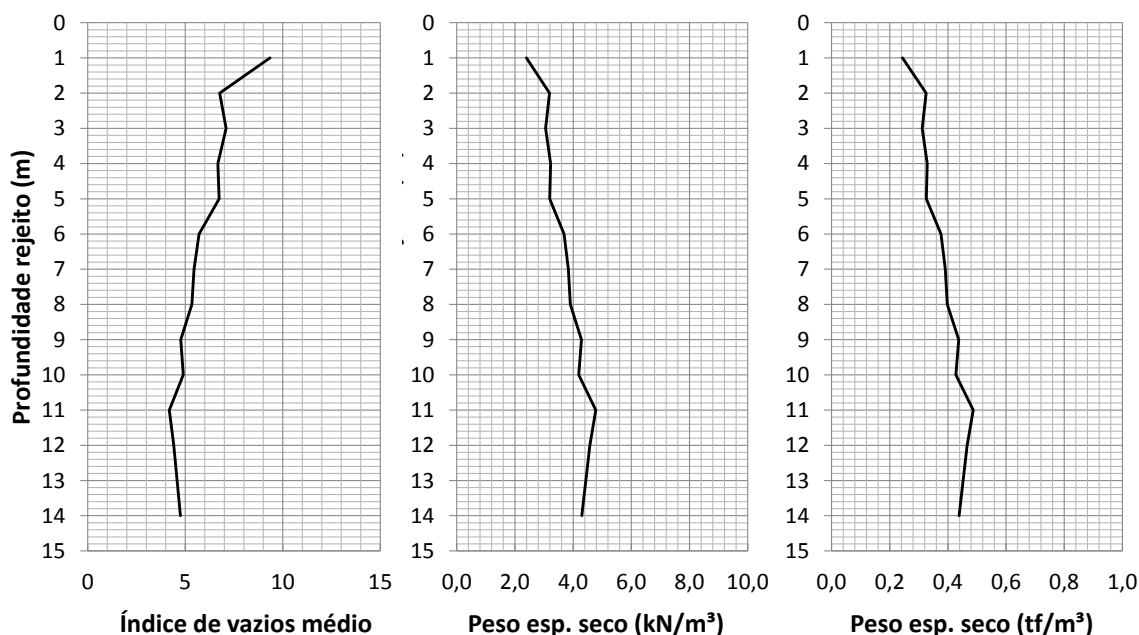


Figura 5.12 – Perfis de índice de vazios médio e de peso específico seco - TK-105

Tabela 5.4 – Valores dos índices de vazios médios e peso específico seco – TK-105

Profundidade (m)	Índice de vazios	Peso específico seco	
		kN/m^3	tf/m^3
1,00	9,345	2,39	0,244
2,00	6,765	3,19	0,325
3,00	7,096	3,06	0,312
4,00	6,676	3,22	0,329
5,00	6,740	3,20	0,326
6,00	5,708	3,69	0,376
7,00	5,453	3,83	0,391
8,00	5,339	3,90	0,398
9,00	4,771	4,29	0,437
10,00	4,902	4,19	0,427
11,00	4,178	4,78	0,487
12,00	4,411	4,57	0,466
14,00	4,754	4,30	0,438

O cálculo das massas específicas do rejeito depositado envolveu a consideração do peso específico seco da água salina como sendo aproximadamente igual a 10,1 kN/m³. A adoção deste valor se deu pela constatação de que os vazios do rejeito são preenchidos com a água salina, com altos teores de cloreto Cl⁻. Destaca-se que a massa específica da água do mar é dependente da temperatura e, obviamente, da concentração principalmente do cloreto de sódio (NaCl). Considerou-se uma massa específica média da igual a 1,03 g/cm³.

A sequência do procedimento envolveu o cálculo do volume acumulado do reservatório, que foi dividido em camadas de 1 m (Tabela 5.5). As espessuras, multiplicadas pela área média de cada camada, produziram o volume utilizado nos procedimentos de cálculo. Para tanto, foram utilizados os perfis longitudinal e transversal do reservatório (Figura 5.13), extraídos das seções centrais das plantas fornecidas pela Miski Mayo (CMMM, 2017).

Tabela 5.5 – Volume por camadas e acumulados – tanque TK-105

Cota (m)	Profundidade de rejeitos (m)	Área média (m ²)	Camada	Volume da camada (m ³)	Volume acumulado (m ³)
-23,7	0	383.392,14	0-1	383.392,14	4.913.659,51
-24,7	1	376.632,43	1-2	376.632,43	4.530.267,37
-25,7	2	374.696,27	2-3	374.696,27	4.153.634,95
-26,7	3	368.997,83	3-4	368.997,83	3.778.938,68
-27,7	4	345.091,68	4-5	345.091,68	3.409.940,85
-28,7	5	324.712,96	5-6	324.712,96	3.064.849,17
-29,7	6	320.594,54	6-7	320.594,54	2.740.136,21
-30,7	7	315.718,83	7-8	315.718,83	2.419.541,67
-31,7	8	310.950,12	8-9	310.950,12	2.103.822,83
-32,7	9	307.013,75	9-10	307.013,75	1.792.872,71
-33,7	10	303.243,29	10-11	303.243,29	1.485.858,96
-34,7	11	299.395,36	11-12	299.395,36	1.182.615,67
-35,7	12	289.557,47	12-13	289.557,47	883.220,31
-36,7	13	254.034,70	13-14	254.034,70	593.662,84
-37,7	14	192.087,28	14-15	192.087,28	339.628,14
-38,7	15	100.022,56	15-16	130.029,32	147.540,86
-39,7	16	13.470,41	16-17,3	17.511,54	17.511,54

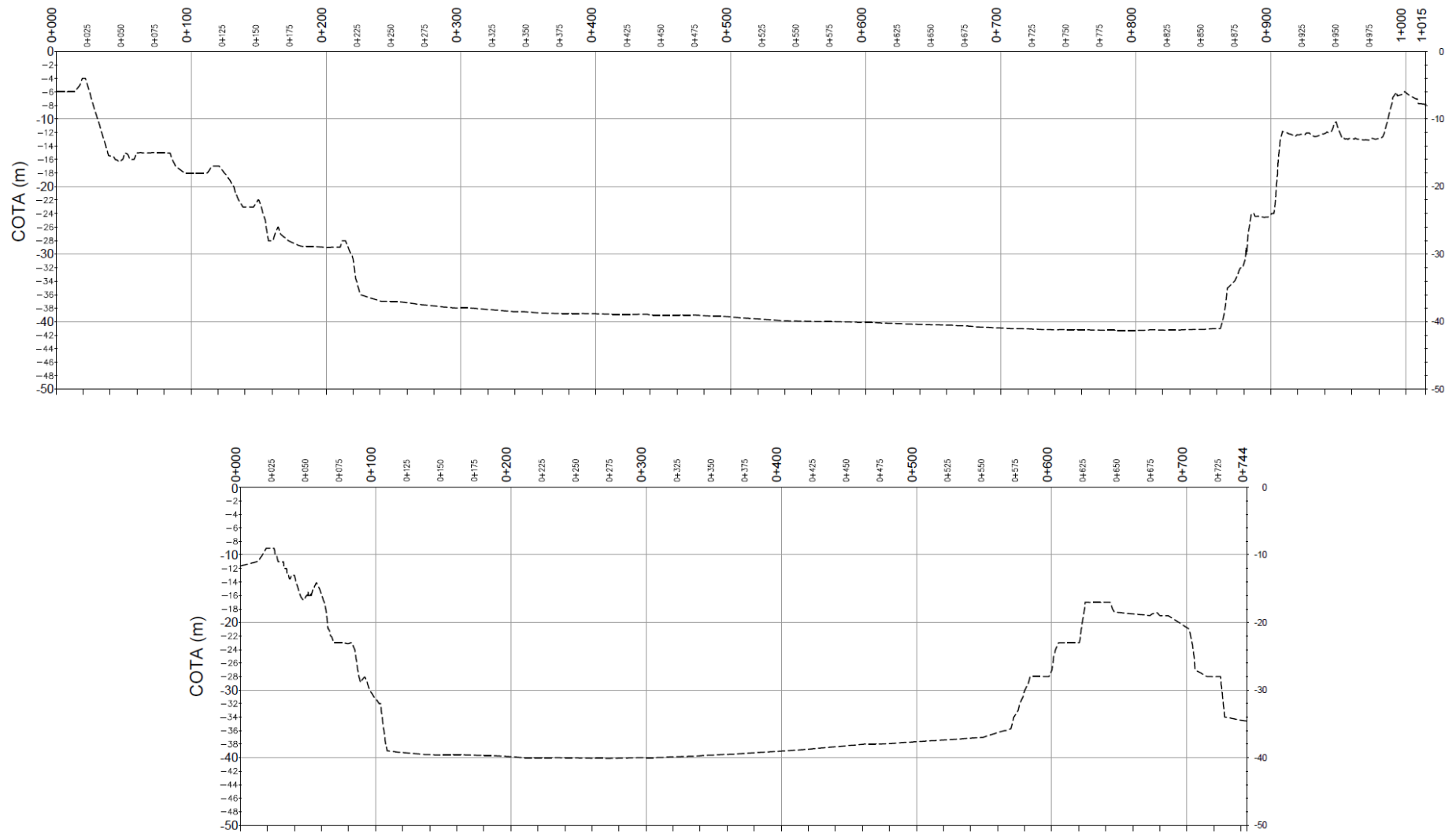


Figura 5.13 – Perfis longitudinal e transversal relacionados às seções centrais do tanque TK-105 (Adaptado de CMMM, 2017)

De posse dos dados obtidos nos cálculos apresentados na tabela anterior, tornou-se possível a construção da curva cota *versus* volume (Figura 5.14), que será utilizada em todas as análises de enchimento, independente da metodologia adotada, pois se trata da topografia real do reservatório.

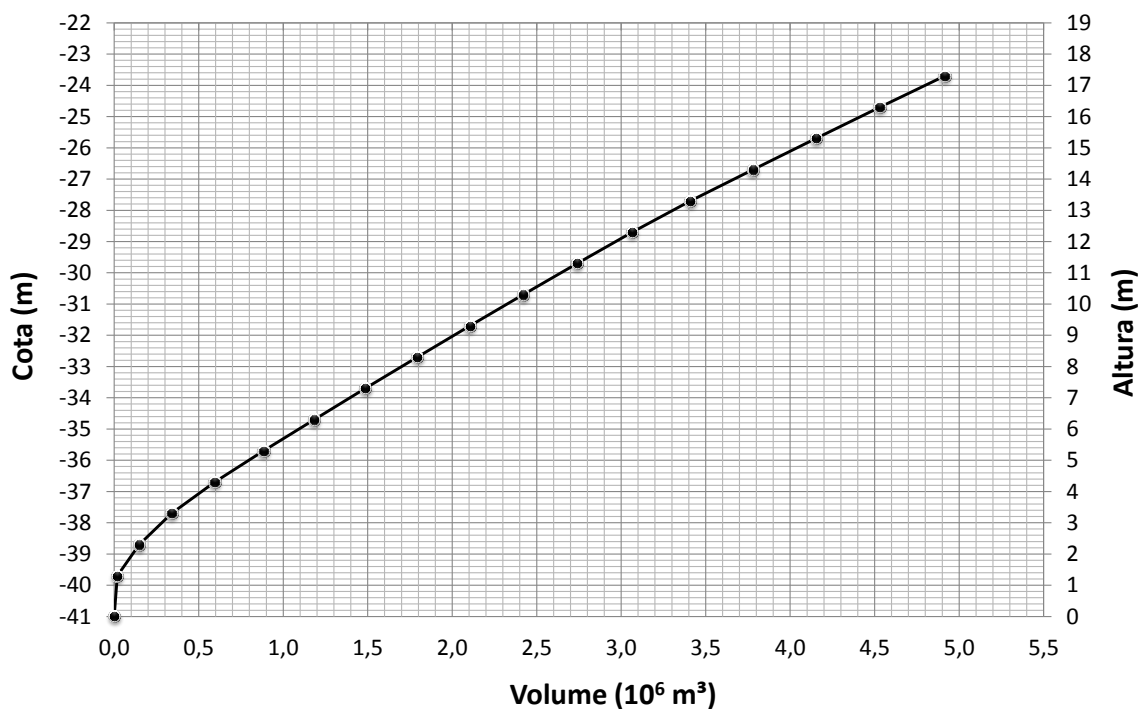


Figura 5.14 – Curva cota *versus* volume – Tanque TK-105

Considerando as condições observadas em campo e o perfil de peso específico seco determinado, foram também calculados os pesos secos por camada e acumulados (Tabela 5.6). Neste caso, adotou-se a média dos pesos específicos secos determinados no nível anterior e posterior ao centro da camada. A exceção se fez entre as cotas -23,7 m (nível ‘zero’) e -24,7 m (camada 0-1), onde o cálculo do peso específico seco médio foi realizado apenas para o valor encontrado para a cota -24,70 m. Para a segunda camada (camada 1-2), por exemplo, calculou-se a média aritmética entre os valores obtidos para as cotas -24,7 m e -25,7 m. Para os horizontes não investigados, associados à região mais profunda do reservatório (região direita do perfil longitudinal), considerou-se o peso específico seco do nível anterior (14m).

Tabela 5.6 – Pesos secos por camadas e pesos secos acumulados – tanque TK-105

Cota (m)	Profundidade de rejeitos (m)	Camada	Peso específico seco (kN/m ³)	Peso seco da camada (kN)	Peso seco acumulado (kN)
-23,7	0	0-1	2,393	610.724,9	17.885.109,9
-24,7	1	1-2	3,187	1.050.259,9	17.274.385,0
-25,7	2	2-3	3,060	1.169.325,8	16.224.125,1
-26,7	3	3-4	3,227	1.158.313,1	15.054.799,4
-27,7	4	4-5	3,197	1.107.486,5	13.896.486,2
-28,7	5	5-6	3,687	1.117.600,3	12.788.999,9
-29,7	6	6-7	3,835	1.205.597,2	11.671.399,5
-30,7	7	7-8	3,903	1.221.174,4	10.465.802,3
-31,7	8	8-9	4,286	1.273.194,6	9.244.627,9
-32,7	9	9-10	4,188	1.301.391,0	7.971.433,3
-33,7	10	10-11	4,776	1.359.804,4	6.670.042,4
-34,7	11	11-12	4,570	1.399.504,6	5.310.238,0
-35,7	12	12-13	4,570	1.323.766,0	3.910.733,4
-36,7	13	13-14	4,295	1.126.778,7	2.586.967,3
-37,7	14	14-15	4,295	825.855,2	1.460.188,6
-38,7	15	15-16	4,295	559.044,8	634.333,4
-39,7	16	16-17,3	4,295	75.288,6	75.288,6

Com os dados fornecidos pela Miski Mayo, foram calculadas as taxas de enchimento e, conseqüentemente, os pesos depositados ao longo do tempo. Para o cálculo da descarga média de enchimento, consideraram-se os seguintes dados referentes à produção de rejeitos finos em 2016:

- Volume da polpa (m³): 19.510.409;
- Teor de sólidos médio aproximado (%): 15;
- Peso seco (kN): 28.700.872 (2.926.570 t).

A partir destes dados, a média horária de descarga ao longo de 2016 foi calculada, obtendo-se o valor de 78.633,6 kN/dia (\approx 8.018 t/dia). Esta descarga é realizada através de duas linhas e, conforme o relatório de acompanhamento da empresa, em alguns momentos, o lançamento no tanque TK-105 foi parcialmente e/ou totalmente interrompido, quando a descarga foi direcionada para outro tanque.

Para o cálculo da descarga real lançada no tanque TK-105, considerou-se inicialmente que a descarga total da mina é dividida igualmente nas duas linhas (L1 e L2) e os respectivos períodos de lançamento registrados na Tabela 5.7. Ressalta-se que, em alguns momentos, a operação esteve paralisada devido a eventos chuvosos ou mesmo em função da própria interrupção das atividades da planta. Nesta situação, o peso acumulado calculado foi de 22.950.837,2 kN, lançados ao longo de 541 dias.

Tabela 5.7 – Dados extraídos da planilha de acompanhamento de enchimento do tanque TK-105 – considerando $\psi = 15\%$ (CMMM, 2017)

Período	Linha em operação	Dias efetivos	Peso lançado (kN)	Dias acumulados	Peso seco acum. (kN)
04/02/16 – 19/03/16	L1	45	1.769.223,0	45	1.769.223,0
20/03/16 – 07/04/16	L1 + L2	19	1.494.012,4	64	3.263.235,4
08/04/16 – 19/04/16	L1	12	471.792,8	76	3.735.028,2
04/07/16 – 07/09/16	L1	66	2.594.860,4	142	6.329.888,6
22/09/16 – 12/01/17	L1	113	4.442.715,6	255	10.772.604,2
13/01/17 – 22/01/17	L1 + L2	10	786.322,3	265	11.558.926,5
15/02/17 – 14/03/17	L1 + L2	27	2.123.070,3	292	13.681.996,8
20/04/17 – 28/07/17	L1 + L2	100	7.863.223,2	392	21.545.219,9

A discrepância entre o peso acumulado final calculado, a partir das informações da empresa, e o valor encontrado com base nas informações da sondagem piezométrica pode estar associada ao valor estimado do teor de sólidos médio de lançamento. Levando-se em consideração a média aritmética dos valores de teor de sólidos obtidos em laboratório (Tabela 3.1), cujas amostras foram obtidas diretamente do ponto de descarte, que foi de 14,17%, os dados de acompanhamento se aproximam mais daqueles obtidos nos ensaios de sondagem piezométrica. Neste caso, a média horária de descarga ao longo de 2016 é ajustada para o novo teor de sólidos, obtendo-se o valor aproximando de 74.229,2 kN/dia.

Mesmo com a aproximação dos dados, ainda existe uma diferença com os valores obtidos nos ensaios de campo, o que é justificada pela oscilação do teor de sólidos de lançamento, devido à alteração da frente de lavra (Tabela 5.8).

Tabela 5.8 – Dados extraídos da planilha de acompanhamento de enchimento do tanque TK-105 – considerando $\psi = 14,17\%$ (CMMM, 2017)

Período	Linha em operação	Dias efetivos	Peso lançado (kN)	Dias acumulados	Peso seco acum. (kN)
04/02/16 – 19/03/16	L1	45	1.670.147,8	45	1.670.147,8
20/03/16 – 07/04/16	L1 + L2	19	1.410.347,0	64	3.080.494,8
08/04/16 – 19/04/16	L1	12	445.372,7	76	3.525.867,6
04/07/16 – 07/09/16	L1	66	2.449.550,1	142	5.975.417,7
22/09/16 – 12/01/17	L1	113	4.193.926,7	255	10.169.344,3
13/01/17 – 22/01/17	L1 + L2	10	742.287,9	265	10.911.632,2
15/02/17 – 14/03/17	L1 + L2	27	2.004.177,3	292	12.915.809,6
20/04/17 – 28/07/17	L1 + L2	100	7.422.879,1	392	20.338.688,7

Com base nos dados obtidos (Tabela 5.4), considerando os pesos específicos secos e os pesos secos por cada camada, estes foram divididos pela descarga diária, com base no número de dias compreendido entre 04/02/16 e 28/07/17, obtendo-se a evolução diária (curva cota *versus* tempo), cujo comportamento é apresentado na Figura 5.15.

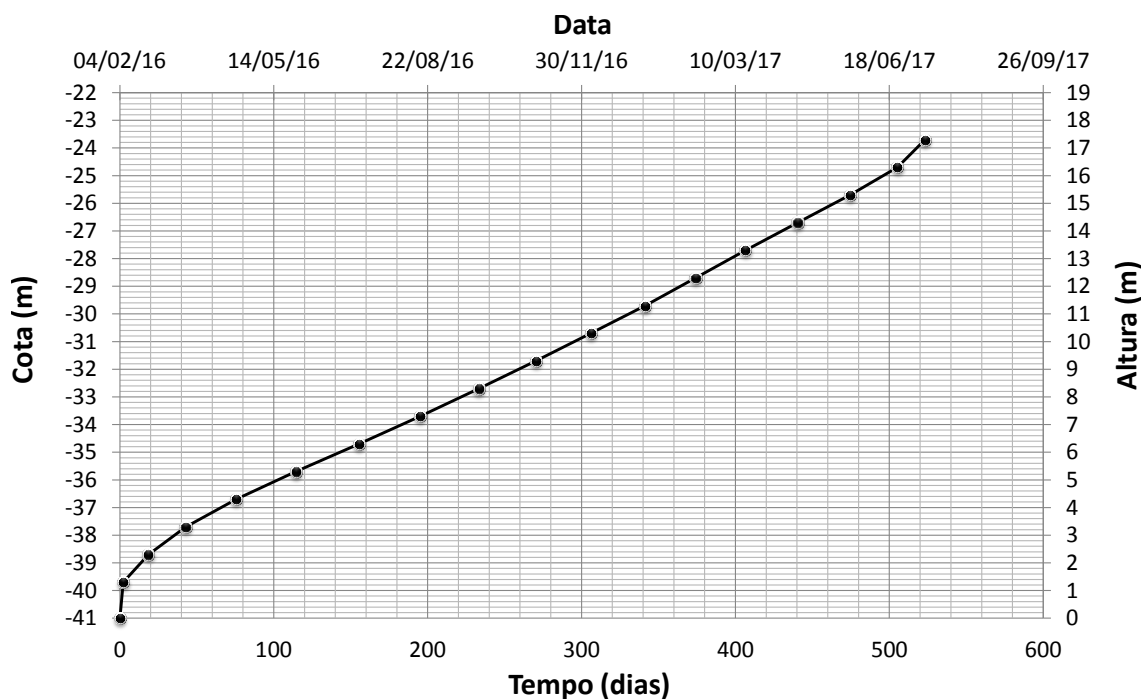


Figura 5.15 – Curva de enchimento obtida com base no perfil de peso específico seco e o período real de operação – Tanque TK-105

- **Simulação de enchimento com base no perfil de peso específico seco (TK-103)**

Para realização da simulação de enchimento do tanque TK-103, próximo reservatório previsto para início da operação, utilizando a mesma metodologia, foi inicialmente estimado um perfil de peso específico seco baseado nos resultados obtidos para o tanque TK-105, dada a inexistência de rejeitos lançados no tanque TK-103. Neste caso, adotou-se um ajuste em potência (melhor ajuste) em função das profundidades investigadas no tanque TK-105 (Figura 5.16). Os pesos específicos secos foram plotados em kN/m³.

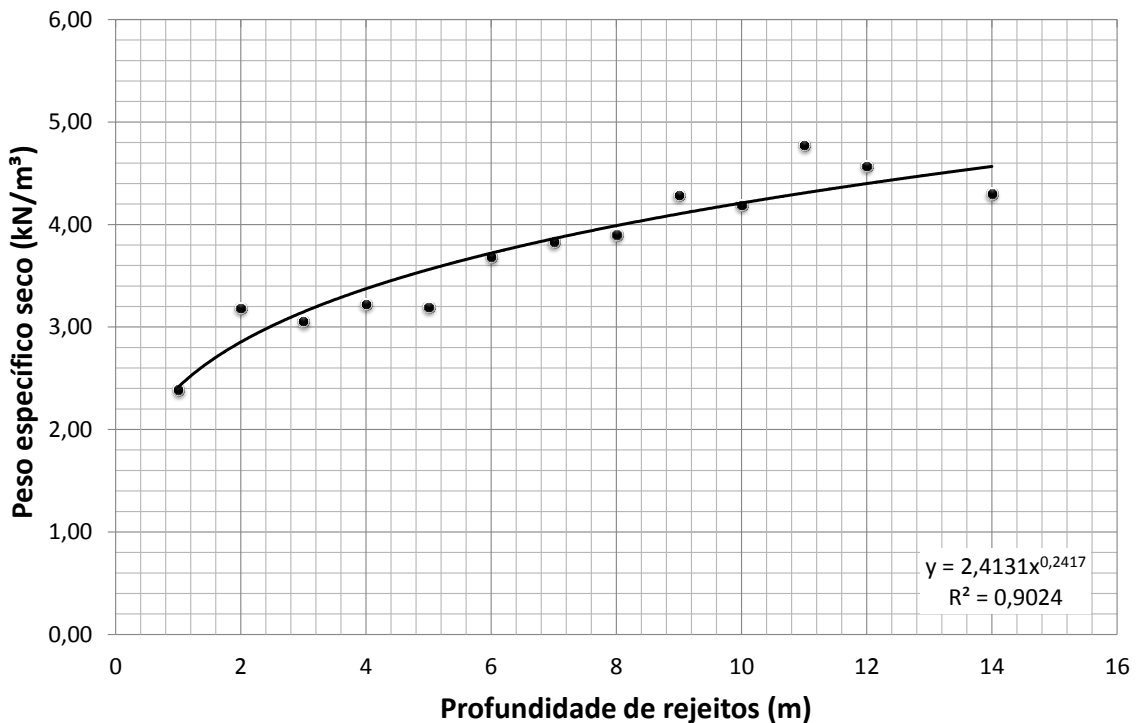


Figura 5.16 – Curva peso específico seco *versus* profundidade – Tanque TK-105

A continuidade do procedimento também incorporou a construção da curva cota *versus* volume associada ao reservatório. A construção envolveu o cálculo do volume acumulado do reservatório, que foi dividido em camadas de 1 m (Tabela 5.9) utilizando os perfis longitudinal e transversal do reservatório, extraídos das seções centrais das plantas fornecidas pela Miski Mayo (CMMM, 2017). As cotas inicial e final de enchimento previstas são de -32,5 e -9,0 m, respectivamente.

Tabela 5.9 – Volume por camadas e acumulados – tanque TK-103

Cota (m)	Profundidade de rejeitos (m)	Área média (m ²)	Camada	Volume da camada (m ³)	Volume acumulado (m ³)
-9,0	0	1.020.977,99	0-1	1.020.977,99	12.181.779,30
-10,0	1	953.169,52	1-2	953.169,52	11.160.801,31
-11,0	2	887.205,53	2-3	887.205,53	10.207.631,79
-12,0	3	836.291,24	3-4	836.291,24	9.320.426,26
-13,0	4	798.509,84	4-5	798.509,84	8.484.135,02
-14,0	5	747.790,93	5-6	747.790,93	7.685.625,18
-15,0	6	690.242,37	6-7	690.242,37	6.937.834,25
-16,0	7	641.479,84	7-8	641.479,84	6.247.591,88
-17,0	8	604.228,34	8-9	604.228,34	5.606.112,04
-18,0	9	576.615,73	9-10	576.615,73	5.001.883,70
-19,0	10	551.617,15	10-11	551.617,15	4.425.267,97
-20,0	11	521.835,59	11-12	521.835,59	3.873.650,82
-21,0	12	479.690,36	12-13	479.690,36	3.351.815,23
-22,0	13	440.931,77	13-14	440.931,77	2.872.124,87
-23,0	14	407.925,39	14-15	407.925,39	2.431.193,10
-24,0	15	385.206,68	15-16	385.206,68	2.023.267,71
-25,0	16	358.531,16	16-17	358.531,16	1.638.061,03
-26,0	17	333.236,30	17-18	333.236,30	1.279.529,87
-27,0	18	300.593,82	18-19	300.593,82	946.293,57
-28,0	19	261.452,55	19-20	261.452,55	645.699,75
-29,0	20	192.227,70	20-21	192.227,70	384.247,20
-30,0	21	123.640,25	21-22	123.640,25	192.019,50
-31,0	22	45.586,17	22-23,5	68.379,25	68.379,25

Ressalta-se que os dados dos perfis foram extraídos dos mapas fornecidos pela empresa, vinculado a um levantamento topográfico recente. As condições iniciais previstas em projeto foram alteradas devido a questões operacionais. O projeto inicial (plano de engenharia) previa uma escavação até a cota -44 m (cota em relação ao nível do mar), o que permitiria uma capacidade de armazenamento de rejeitos de 13,43 Mm³. Com a elevação da cota máxima para o nível -9 m, e com a ampliação da área do reservatório, a capacidade atualizada, com base no levantamento topográfico (Figuras 5.17 e 5.18), é de 12,18 Mm³.

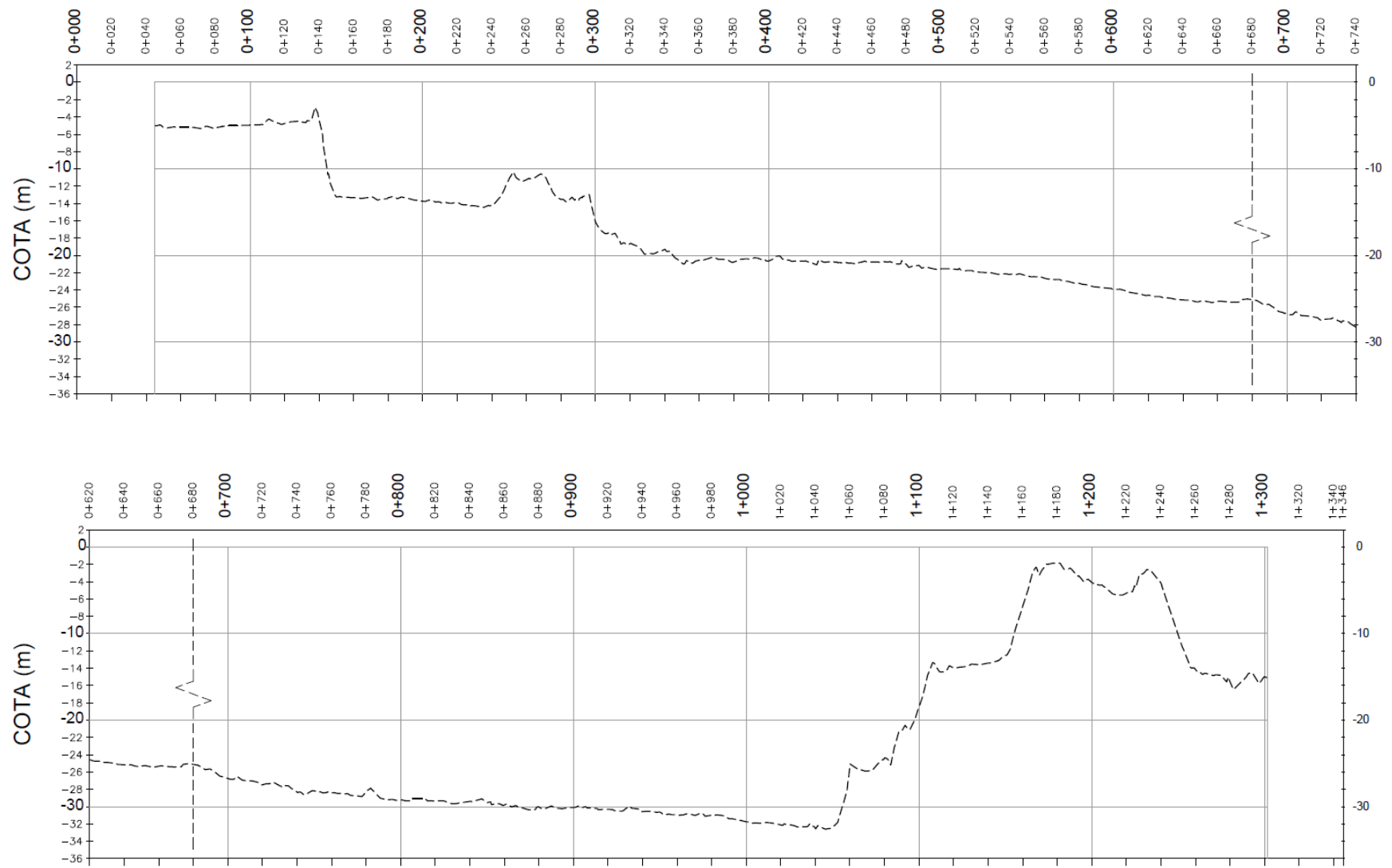


Figura 5.17 – Perfil longitudinal relacionado à seção central do tanque TK-103 (Adaptado de CMMM, 2017)

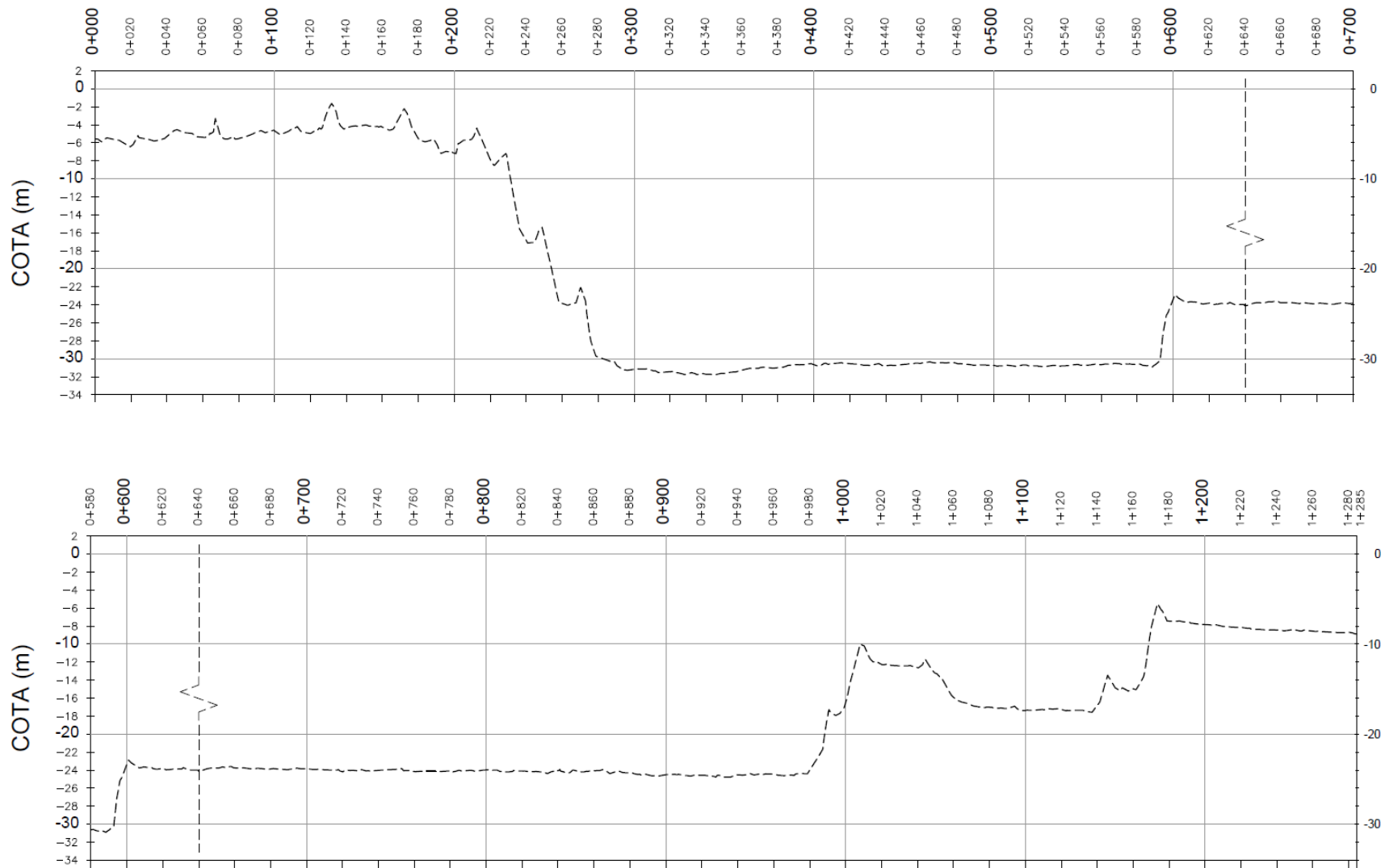


Figura 5.18 – Perfil transversal relacionado à seção central do tanque TK-103 (Adaptado de CMMM, 2017)

O levantamento topográfico do tanque TK-103 foi realizado recentemente, como o uso de sistemas aéreos não tripulados (drone). Além dos dados obtidos com precisão, foram produzidas ortofotos. Uma vista aérea do tanque é mostrada na Figura 5.19.



Figura 5.19 – Imagem aérea referenciada do tanque TK-103, registrada em 12/10/2017 (Adaptado de CMMM, 2017)

Da mesma forma adotada para o tanque TK-105, a partir dos dados calculados e apresentados na tabela anterior, foi construída a curva cota *versus* volume para o tanque TK-103, mostrada na Figura 5.20.

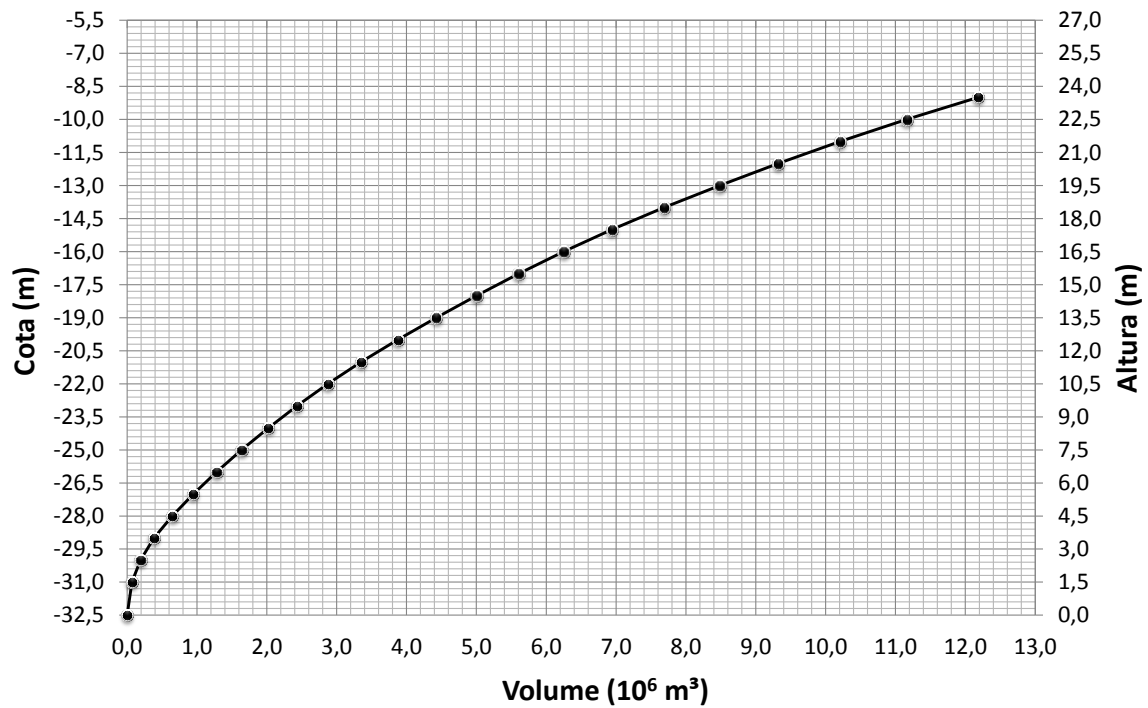


Figura 5.20 – Curva cota *versus* volume – Tanque TK-103

Os pesos secos de cada camada foram calculados considerando o ajuste dos pesos específicos secos em função da profundidade, já destacado na Figura 5.16, e representado pela Equação 5.1. Os resultados são mostrados na Tabela 5.10, onde também são apresentados os respectivos pesos acumulados.

$$\gamma_d = 2,4131 \cdot z^{0,2417} \quad (5.1)$$

Sendo:

γ_d : peso específico seco (kN/m³);

z : profundidade dos rejeitos.

Tabela 5.10 – Pesos específicos secos, pesos secos por camadas e pesos secos acumulados estimados com base na Equação 5.1 – tanque TK-103

Cota (m)	Profundidade de rejeitos (m)	Camada	Peso específico seco (kN/m ³)	Peso seco da camada (kN)	Peso seco acumulado (kN)
-9,0	0	0-1	2.084.036,0	45.952.621,2	20.438.141,5
-10,0	1	1-2	2.537.343,0	43.868.585,1	24.883.723,2
-11,0	2	2-3	2.672.108,8	41.331.242,1	26.205.370,8
-12,0	3	3-4	2.732.162,8	38.659.133,3	26.794.320,8
-13,0	4	4-5	2.772.104,1	35.926.970,5	27.186.024,8
-14,0	5	5-6	2.725.044,8	33.154.866,5	26.724.514,4
-15,0	6	6-7	2.618.970,2	30.429.821,7	25.684.241,1
-16,0	7	7-8	2.519.608,8	27.810.851,4	24.709.803,0
-17,0	8	8-9	2.446.185,8	25.291.242,7	23.989.744,2
-18,0	9	9-10	2.398.004,9	22.845.056,9	23.517.234,0
-19,0	10	10-11	2.350.211,8	20.447.052,0	23.048.526,7
-20,0	11	11-12	2.272.752,5	18.096.840,2	22.288.884,1
-21,0	12	12-13	2.131.728,7	15.824.087,6	20.905.863,0
-22,0	13	13-14	1.996.277,2	13.692.358,9	19.577.490,7
-23,0	14	14-15	1.879.019,0	11.696.081,7	18.427.539,7
-24,0	15	15-16	1.803.203,6	9.817.062,8	17.684.017,5
-25,0	16	16-17	1.703.886,1	8.013.859,1	16.710.011,2
-26,0	17	17-18	1.606.358,2	6.309.973,0	15.753.554,5
-27,0	18	18-19	1.468.599,0	4.703.614,8	14.402.550,7
-28,0	19	19-20	1.293.725,2	3.235.015,8	12.687.563,2
-29,0	20	20-21	962.752,5	1.941.290,6	9.441.713,8
-30,0	21	21-22	626.409,1	978.538,0	6.143.193,9
-31,0	22	22-23,5	352.129,0	352.129,0	3.453.328,8

A capacidade de armazenamento de armazenamento deste tanque é praticamente o dobro do tanque TK-105, conforme já foi percebido na curva cota *versus* volume apresentada. O peso de material seco máximo previsto é de aproximadamente $2,04 \times 10^7$ kN, referenciado pela cota de - 9 m, estimados pela Equação 5.1.

Com base nos dados apresentados na Tabela 5.10, considerando os pesos específicos secos calculados e os pesos secos estimados por cada camada, estes foram divididos pela descarga diária, obtendo-se a evolução diária (curva cota *versus* tempo), mostrada

na Figura 5.21. A descarga diária foi adotada a partir dos dados fornecidos pela empresa, extraídos da média registrada pela equipe de operação da mina em 2016, considerando, neste caso, as duas linhas operando continuamente. A partir dos dados fornecidos e já apresentados anteriormente, a média horária de descarga considerada foi de 3.276,4 kN/h (≈ 8.018 t/dia), prevista para os próximos anos.

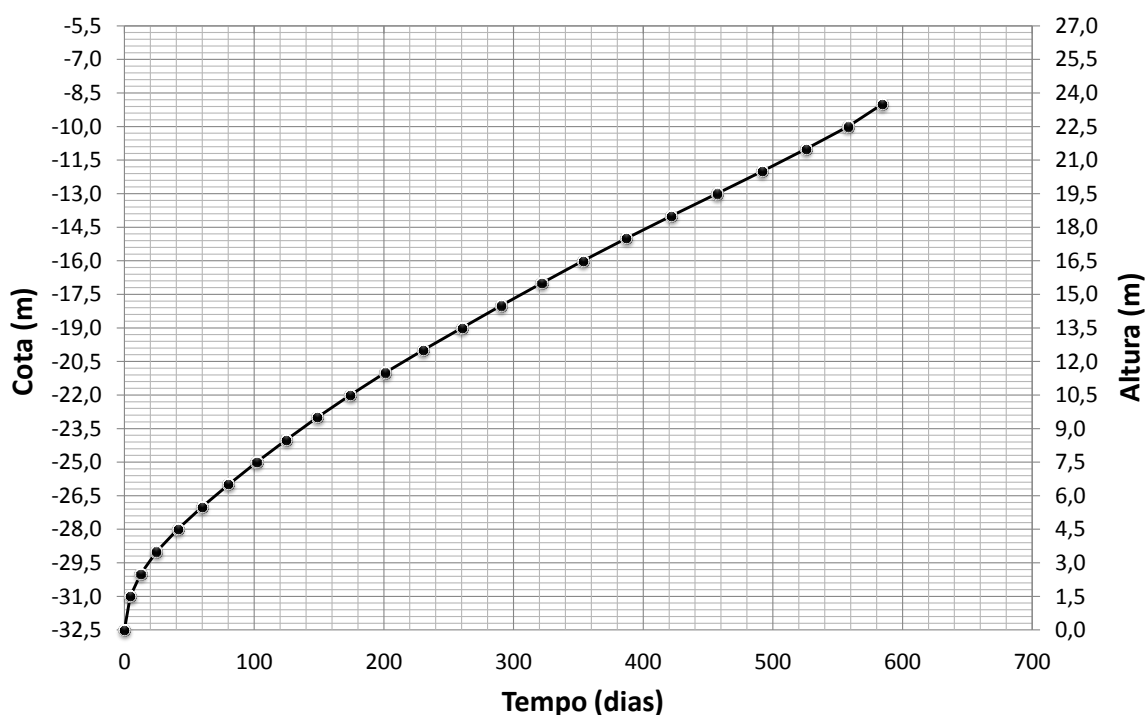


Figura 5.21 – Curva de enchimento calculada com base no perfil de peso específico seco estimado – Tanque TK-103

Considerando a descarga ininterrupta, com a taxa de descarga de 78.632,5 kN/dia, a curva de enchimento, baseada no perfil de peso específico seco estimado, aponta para o enchimento total do tanque em 585 dias.

Nota-se que, apesar das seções e da profundidade configurarem-se superiores ao tanque TK-105, possibilitando um maior volume armazenado ao final de sua operação, o enchimento do tanque TK-103 ocorrerá em um tempo proporcionalmente menor. Este fato é justificado pela elevação considerada da vazão da polpa prevista, ponderando-se para o direcionamento da descarga total para esta estrutura.

- **Simulações de enchimento com base lei de compressibilidade de campo**

A curva σ' versus e que mais se aproximou dos ensaios HCT (CP's 1 e 2) realizados com a bomba de fluxo é representada pela Equação 4.8 (Capítulo 4), obtida pela média dos pontos dos 3 perfis TK-105 e do perfil TK-101, com a desconsideração da camada superficial (lei de compressibilidade). A comparação se deu com os ensaios HCT associados aos corpos de prova 1 e 2, por estes apresentarem curvas mais próximas dos ensaios CRD para níveis de tensão efetiva mais baixos.

Conforme já visto no Capítulo 4 desta tese, em função das elevadas poropressões de estabilização, durante os ensaios de sondagem piezométrica no tanque TK-105, as tensões efetivas configuraram-se com baixos valores e, conseqüentemente, muito próximos e também dispersos. Neste sentido, optou-se por estabelecer um ajuste linear dos pontos, buscando associar os níveis de tensão efetiva em função da profundidade do reservatório (Figura 5.22). Este procedimento permitirá o cálculo das tensões efetivas não só para o tanque investigado (TK-105), mas também para o próximo tanque a ser operado, o tanque TK-103.

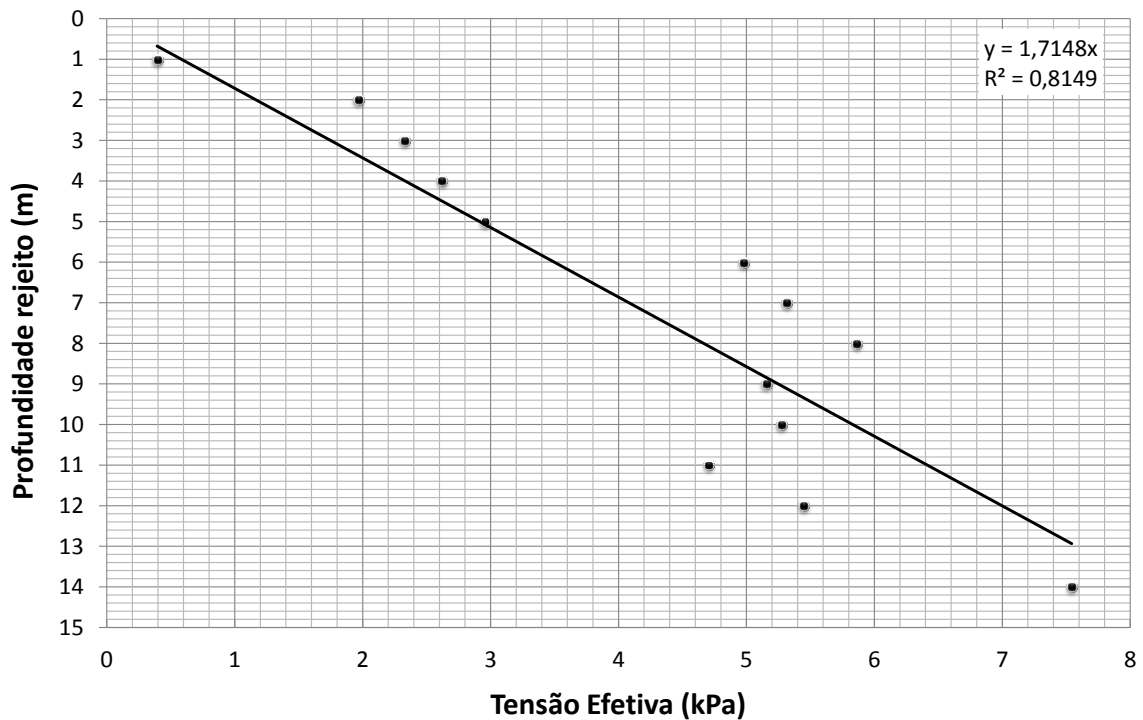


Figura 5.22 – Perfil médio de tensões efetivas (SP01, SP02 e SP03) – Tanque TK-105

Os pontos de tensão efetiva utilizados no ajuste foram obtidos pela média aritmética dos valores de tensões efetivas obtidos nas três sondagens piezométricas (SP-01, SP-02 e SP-03), para cada horizonte de prospecção. Desta forma, utilizando a lei de compressibilidade de campo, foram obtidos os índices de vazios correspondentes à tensão efetiva calculada pelo ajuste linear exposto na Figura 5.22.

Com os índices de vazios calculados, relacionados às tensões efetivas no centro de cada camada, foram calculados os respectivos pesos específicos secos (Tabela 5.11). Esta simulação é feita inicialmente para o tanque TK-105, reservatório onde se concentrou a maior parte das investigações.

Tabela 5.11 – Índices físicos (lei de compressibilidade de campo) – TK-105

Cota (m)	Profundidade de rejeitos (m)	Camada	Tensão efetiva no centro (kPa)	Índice de vazios	Peso específico seco (kN/m ³)
-23,7	0	0-1	0,29	14,691	1,530
-24,7	1	1-2	0,87	9,405	2,305
-25,7	2	2-3	1,46	7,643	2,775
-26,7	3	3-4	2,04	6,667	3,138
-27,7	4	4-5	2,62	6,021	3,423
-28,7	5	5-6	3,21	5,550	3,668
-29,7	6	6-7	3,79	5,186	3,884
-30,7	7	7-8	4,37	4,893	4,080
-31,7	8	8-9	4,96	4,651	4,256
-32,7	9	9-10	5,54	4,445	4,413
-33,7	10	10-11	6,12	4,268	4,560
-34,7	11	11-12	6,71	4,113	4,698
-35,7	12	12-13	7,29	3,977	4,825
-36,7	13	13-14	7,87	3,854	4,953
-37,7	14	14-15	8,46	3,744	5,060
-38,7	15	15-16	9,04	3,644	5,178
-39,7	16	16-17,3	9,71	3,540	5,296

A sequência deste procedimento envolveu a determinação dos pesos secos por camada e os pesos secos acumulados em kN/m³, que são apresentados na Tabela 5.12. Apesar da grande dispersão dos pontos utilizados no ajuste das tensões efetivas e da própria

simplificação deste tipo de regressão em função da profundidade, uma vez que o comportamento não é exatamente linear, observa-se que os valores finais acumulados tiveram uma relativa aproximação com a primeira metodologia (Tabela 5.6, relacionada aos pesos específicos secos medidos em campo).

Tabela 5.12 – Pesos secos por camadas e pesos secos acumulados – tanque TK-105

Cota (m)	Profundidade de rejeitos (m)	Camada	Peso específico seco (kN/m ³)	Peso seco da camada (kN)	Peso seco acumulado (kN)
-23,7	0	0-1	1,530	587.059,9	18.420.047,8
-24,7	1	1-2	2,305	869.726,5	17.832.988,0
-25,7	2	2-3	2,775	1.041.598,4	16.963.261,5
-26,7	3	3-4	3,138	1.156.323,6	15.921.663,0
-27,7	4	4-5	3,423	1.181.028,7	14.765.339,5
-28,7	5	5-6	3,668	1.191.212,3	13.584.310,8
-29,7	6	6-7	3,884	1.245.296,1	12.393.098,5
-30,7	7	7-8	4,080	1.287.268,9	11.147.802,4
-31,7	8	8-9	4,256	1.322.220,3	9.860.533,5
-32,7	9	9-10	4,413	1.354.711,2	8.538.313,1
-33,7	10	10-11	4,560	1.383.031,6	7.183.601,9
-34,7	11	11-12	4,698	1.406.811,0	5.800.570,3
-35,7	12	12-13	4,825	1.398.018,7	4.393.759,3
-36,7	13	13-14	4,953	1.257.419,6	2.995.740,6
-37,7	14	14-15	5,060	972.881,5	1.738.321,0
-38,7	15	15-16	5,178	672.754,3	765.439,5
-39,7	16	16-17,3	5,296	92.685,2	92.685,2

Considerando os dados obtidos, calculados para as 16 camadas consideradas na análise, os pesos secos por cada de cada camada foram divididos pela mesma descarga diária utilizada na simulação anterior, com base no número de dias compreendido no período de 04/02/16 a 28/07/17, com a pressuposição de descarga em torno de 34.187,2 kN por dia.

A evolução diária (curva cota *versus* tempo) obtida nesta simulação é apresentada na Figura 5.23, sendo comparada à curva construída a partir do perfil de peso específico seco.

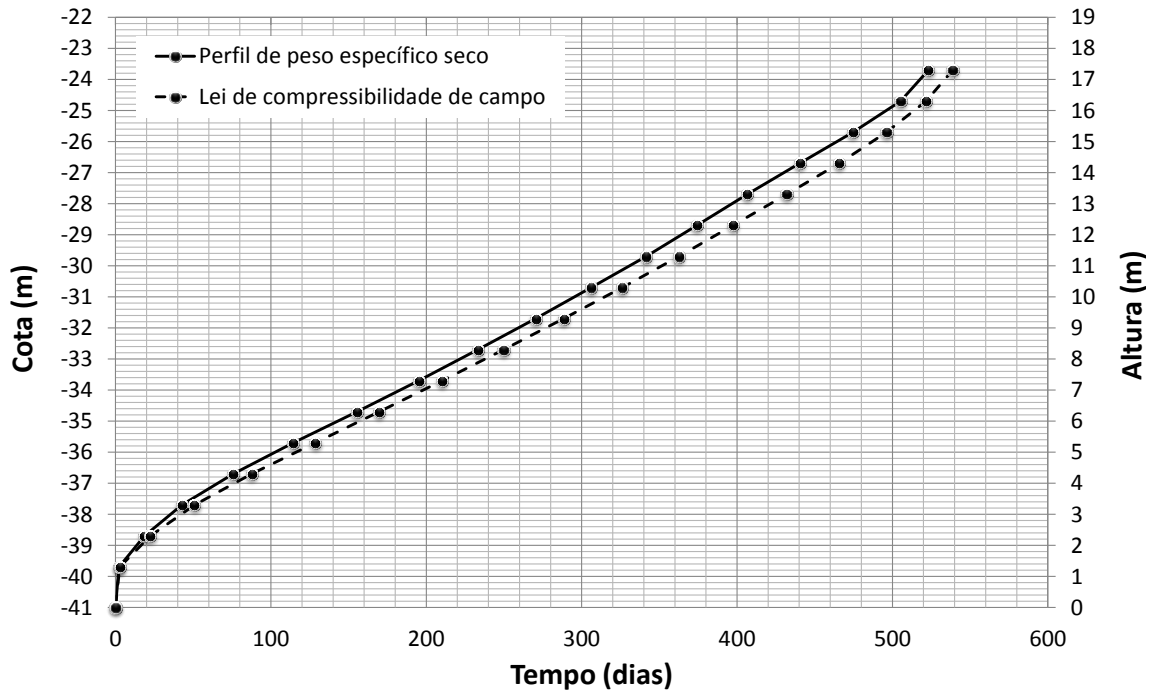


Figura 5.23 – Curvas de enchimentos obtidas com base no perfil de peso específico seco e na lei de compressibilidade de campo – Tanque TK-105

A Figura 5.23 mostra uma boa concordância das duas curvas. Para a primeira simulação (perfil de peso específico seco), a cota máxima considerada na avaliação do enchimento, de -23,7 m, foi atingida com 523 dias de lançamento, enquanto que, nesta simulação (lei de compressibilidade de campo), o mesmo nível de rejeitos foi atingido em 539 dias. Esta cota, relacionada ao nível do mar, cuja unidade é comumente apresentada em msnm (*metros sobre el nivel del mar*), não representa a cota máxima de projeto, mas foi adotada como máxima para fins de comparação das diferentes simulações adotadas neste trabalho, configurando-se como o nível máximo observado no reservatório, durante a campanha de sondagem piezométrica.

O mesmo procedimento foi adotado para o tanque TK-103. Neste caso, como o tanque ainda não se encontra em operação, os dados considerados, relacionados à lei de compressibilidade de campo foram os mesmos utilizados no tanque TK-105, obtida pela média dos pontos dos 3 perfis TK-105 e do perfil TK-101, com a desconsideração da camada superficial. Esta adoção é bem justificada, levando-se em consideração que serão dispostos os mesmos tipos de rejeitos, esperando-se, portanto, o mesmo comportamento em termos de compressibilidade e adensamento.

Os dados estimados para o tanque TK-103 são apresentados nas Tabelas 5.13 e 5.14. Como as equações adotadas para a estimativa são as mesmas do tanque TK-105, as tensões efetivas e os índices de vazios seguem a mesma tendência. No entanto, como este tanque armazenará um volume maior de rejeitos, atingindo profundidade máxima de 22,5 m, os índices de vazios e os pesos específicos secos nas cotas iniciais atingem valores de 3,104 e 5,855 kN/m³, respectivamente. Na simulação relacionada ao tanque TK-105, os valores máximos de índice de vazios e peso específico seco registrados foram de 3,540 e 5,295 kN/m³, respectivamente.

Tabela 5.13 – Índices físicos – lei de compressibilidade de campo – TK-103

Cota (m)	Profundidade de rejeitos (m)	Camada	Tensão efetiva no centro (kPa)	Índice de vazios	Peso específico seco (kN/m ³)
-9,0	0	0-1	0,29	14,691	1,530
-10,0	1	1-2	0,87	9,405	2,305
-11,0	2	2-3	1,46	7,643	2,775
-12,0	3	3-4	2,04	6,667	3,138
-13,0	4	4-5	2,62	6,021	3,423
-14,0	5	5-6	3,21	5,550	3,668
-15,0	6	6-7	3,79	5,186	3,884
-16,0	7	7-8	4,37	4,893	4,080
-17,0	8	8-9	4,96	4,651	4,256
-18,0	9	9-10	5,54	4,445	4,413
-19,0	10	10-11	6,12	4,268	4,560
-20,0	11	11-12	6,71	4,113	4,698
-21,0	12	12-13	7,29	3,977	4,825
-22,0	13	13-14	7,87	3,854	4,953
-23,0	14	14-15	8,46	3,744	5,060
-24,0	15	15-16	9,04	3,644	5,178
-25,0	16	16-17	9,62	3,553	5,276
-26,0	17	17-18	10,21	3,469	5,374
-27,0	18	18-19	10,79	3,391	5,472
-28,0	19	19-20	11,37	3,320	5,561
-29,0	20	20-21	11,95	3,253	5,649
-30,0	21	21-22	12,54	3,191	5,737
-31,0	22	22-23,5	13,41	3,104	5,855

Tabela 5.14 – Pesos secos por camadas e pesos secos acumulados – tanque TK-103

Cota (m)	Profundidade de rejeitos (m)	Camada	Peso específico seco (kN/m ³)	Peso seco da camada (kN)	Peso seco acumulado (kN)
-9,0	0	0-1	1,530	1.563.347,6	47.241.201,6
-10,0	1	1-2	2,305	2.201.076,6	45.677.854,0
-11,0	2	2-3	2,775	2.466.295,9	43.476.777,4
-12,0	3	3-4	3,138	2.620.674,7	41.010.481,5
-13,0	4	4-5	3,423	2.732.789,7	38.389.806,8
-14,0	5	5-6	3,668	2.743.277,5	35.657.017,2
-15,0	6	6-7	3,884	2.681.131,6	32.913.739,7
-16,0	7	7-8	4,080	2.615.482,5	30.232.608,1
-17,0	8	8-9	4,256	2.569.296,3	27.617.125,7
-18,0	9	9-10	4,413	2.544.341,4	25.047.829,4
-19,0	10	10-11	4,560	2.515.814,8	22.503.488,0
-20,0	11	11-12	4,698	2.452.022,1	19.987.673,2
-21,0	12	12-13	4,825	2.316.003,5	17.535.650,9
-22,0	13	13-14	4,953	2.182.521,7	15.219.647,6
-23,0	14	14-15	5,060	2.066.055,9	13.037.125,8
-24,0	15	15-16	5,178	1.993.007,8	10.971.069,9
-25,0	16	16-17	5,276	1.892.205,6	8.978.062,2
-26,0	17	17-18	5,374	1.791.713,1	7.085.856,5
-27,0	18	18-19	5,472	1.644.684,4	5.294.143,5
-28,0	19	19-20	5,561	1.454.274,7	3.649.459,0
-29,0	20	20-21	5,649	1.086.001,0	2.195.184,3
-30,0	21	21-22	5,737	708.896,4	1.109.183,3
-31,0	22	22-23,5	5,855	400.286,9	400.286,9

Pelos valores na Tabela 5.14, nota-se que o peso máximo estimado para armazenamento do tanque TK-103 foi de $4,72 \times 10^7$ kN. O resultado aproxima-se bastante do valor apresentado na Tabela 5.10 ($2,04 \times 10^7$ kN), evidenciando a representatividade das análises, no contexto das configurações adotadas.

Os pesos secos estimados por cada camada também foram divididos pela descarga diária, obtendo-se a evolução diária (curva cota versus tempo), mostrada na Figura 5.24. A descarga diária foi adotada foi a mesma da análise anterior, de 78.632,5 kN/dia.

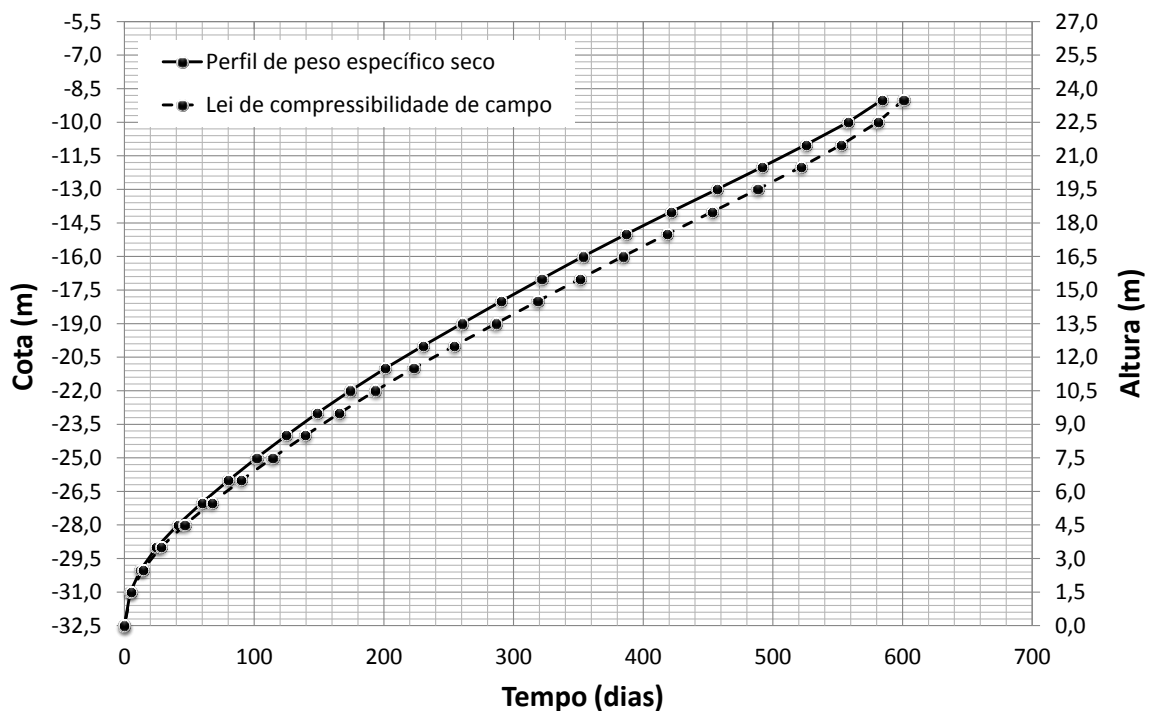


Figura 5.24 – Curvas de enchimentos obtidas com base no perfil de peso específico seco e na lei de compressibilidade de campo – Tanque TK-103

A Figura 5.24 mostra uma boa concordância das duas curvas, seguindo a mesma tendência observada nas análises associadas ao tanque TK-105. A simulação realizada através da lei de compressibilidade de campo mostra uma elevação de reservatório suavemente maior ao longo do tempo, mas convergindo para um tempo final previsto muito próximo para o enchimento completo, em torno de 600 dias, quando comparada à outra curva, baseada no perfil de peso específico seco estimado, que apresentou um enchimento total do tanque em 585 dias. Em síntese, as simulações de campo, tanto para tanque TK-105 quanto para o tanque TK-103, realizadas de duas formas, mas utilizando o comportamento do material observado *in situ*, apresentaram-se razoavelmente coincidentes. As características dos rejeitos, em termos de compressibilidade e adensamento, foram avaliadas com base nas investigações de campo, sendo, portanto, baseado nas condições reais de estocagem destes materiais.

As análises obtidas serão comparadas às simulações numéricas realizadas a seguir, por meio de *software* dedicado, que utiliza, como dados de entrada (*input*), as relações constitutivas obtidas no ensaio HCT.

5.3.2 Simulação numérica de enchimento com base nos resultados de laboratório

A formulação da modelagem teórica para rejeitos que experimentam adensamentos a grandes deformações é algo relativamente complexo, conforme já citado neste trabalho, reforçando o que já foi exposto na literatura técnica. Neste sentido, muitas vezes, a solução o problema exige o uso de ferramentas computacionais, associadas a modelagens numéricas.

Com base nos resultados dos ensaios HCT com bomba de fluxo, a partir dos parâmetros constitutivos apresentados no capítulo anterior, torna-se possível a simulação de enchimento pelo *software* CONDES0, desenvolvido por Yao e Znidarcic (1997), dispositivo utilizado nesta pesquisa.

- **Simulação de enchimento com base os resultados do ensaio HCT**

O programa computacional CONDES0 (Yao e Znidarcic, 1997) consiste em um algoritmo numérico para análise de adensamento unidimensional a grandes deformações, fornecendo a solução de uma equação diferencial parcial de segunda ordem não linear. O programa permite, ainda, a obtenção de soluções unidimensionais transientes, perfis da distribuição dos índices de vazios ao longo da camada de rejeitos e, como complemento, efeitos de ressecamento e dos mecanismos de propagação de trincas. Além disso, podem ser obtidos os perfis de poropressões geradas e as espessuras das camadas ao longo do adensamento.

Pereira (2006) realizou análises numéricas com o uso do programa computacional CONDES0 para estimativa do processo de enchimento de um reservatório de rejeitos de flotação de ouro (Barragem de Cuiabá). No estudo, o autor simulou o enchimento por meio de duas formas distintas, englobando análises convencionais, bem como a consideração do adensamento experimentado pelos rejeitos para cada etapa, progressivamente.

No presente trabalho, foram utilizadas algumas das premissas da simulação realizada por Pereira (2006), com as devidas adaptações, visto que os rejeitos de fosfato de Bayóvar apresentam um comportamento particularizado, como se verá nas análises a seguir.

Como passo preliminar do procedimento, buscou-se analisar a consistência do programa no estudo do adensamento dos rejeitos de fosfato. Para tanto, foi simulado o enchimento instantâneo, análise permitida pelo CONDES0, e os resultados foram comparados aos obtidos no ensaio HCT. Neste caso, como a primeira etapa do ensaio já considera o índice de vazios para a tensão efetiva nula, torna-se possível somente uma comparação para as etapas seguintes. Baseado nesta constatação, realizou-se a comparação dos resultados obtidos experimentalmente com a simulação numérica para a fase de adensamento por carregamento do ensaio HCT (corpos de prova 1 e 2), verificando a consistência do uso dos parâmetros constitutivos como dados de entrada (Tabela 5.15). Os CP's 1 e 2 tiveram uma melhor concordância entre as curvas.

Tabela 5.15 – Comparação entre as alturas obtidas experimentalmente e pela simulação numérica no ensaio HCT

Corpo de prova	CP1	CP2
Altura - H_0 (cm):	4,47	4,49
Tensão aplicada (kPa):	47,31	47,31
Altura final medida - ensaio - H_{fm} (cm):	1,76	1,75
Altura final calculada - simulação - H_{fc} (cm):	1,767	1,748
Índice de vazios final medido - ensaio - e_{fm} :	1,862	1,773
Índice de vazios final calculado - e_{fc} :	1,862	1,773

Os parâmetros do CP1 foram utilizados nas simulações numéricas de enchimento para todas das condições de análise adotados (Tabela 5.16).

Tabela 5.16 – Parâmetros constitutivos utilizados nas simulações

Parâmetro	CP1
A	16,13599
B	-0,54376
Z (kPa)	5,74037
C (m/ano – m/dia)	$1,4721 \times 10^{-1} - 4,033 \times 10^{-4}$
D	1,12944

a) Simulação de enchimento instantâneo do tanque TK-105

Nesta simulação, considerou-se o enchimento imediato do tanque, admitindo-se que todo o rejeito fosse lançado instantaneamente. Apesar de não simular as condições reais de operação do empreendimento, a simulação orienta a avaliação preliminar do comportamento do rejeito em termos de consolidação ao longo do tempo, considerando a altura final de armazenamento.

Como a simulação ocorre a partir da curva nominal, é desconsiderada a etapa de sedimentação experimentada pelo material durante o lançamento. A chamada ‘curva nominal’ de enchimento representa a condição teórica de deposição do rejeito, desconsiderando os efeitos de adensamento do material. Neste caso, são mantidas as condições de saturação do rejeito e as respectivas alturas do material sedimentado, são calculadas com base na relação entre o índice de vazios inicial de lançamento (e_i) e o índice de vazios associado à tensão efetiva nula (e_{00}), extraído do ensaio HCT. A Figura 5.26 mostra as curvas de enchimento para a condição inicial de lançamento e de enchimento nominal, cujas alturas nominais (H_n) foram obtidas pela Equação 5.2. Para a obtenção das curvas, considerou-se uma nova curva cota *versus* volume (Figura 5.25).

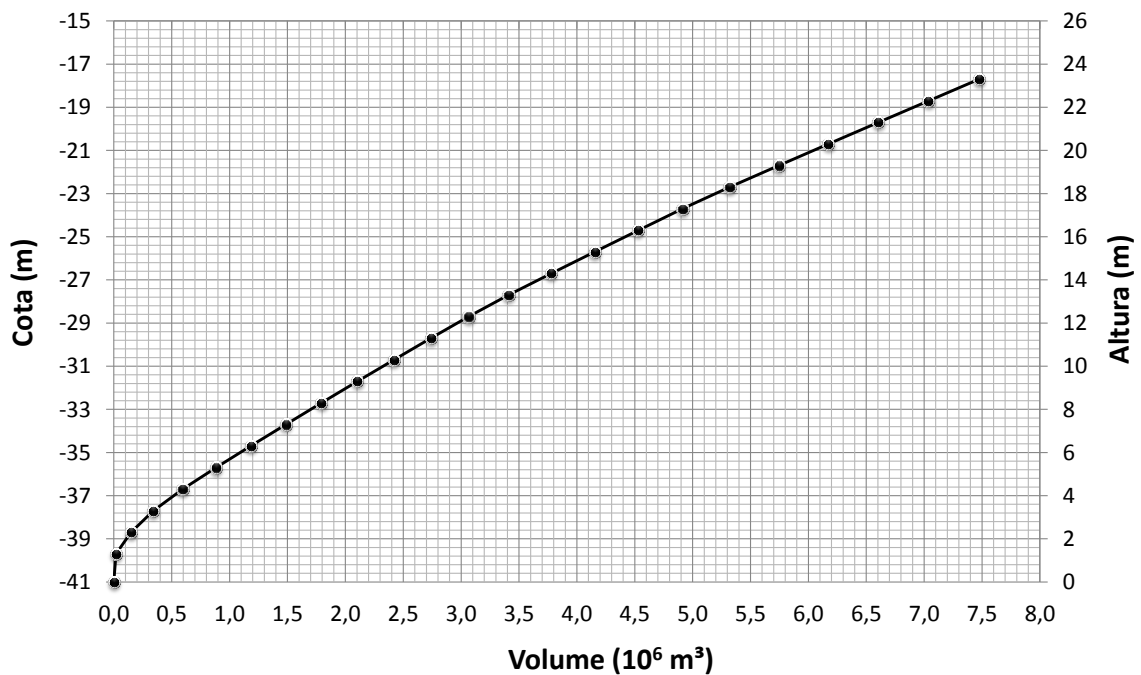


Figura 5.25 – Curva cota *versus* volume ampliada – Tanque TK-105

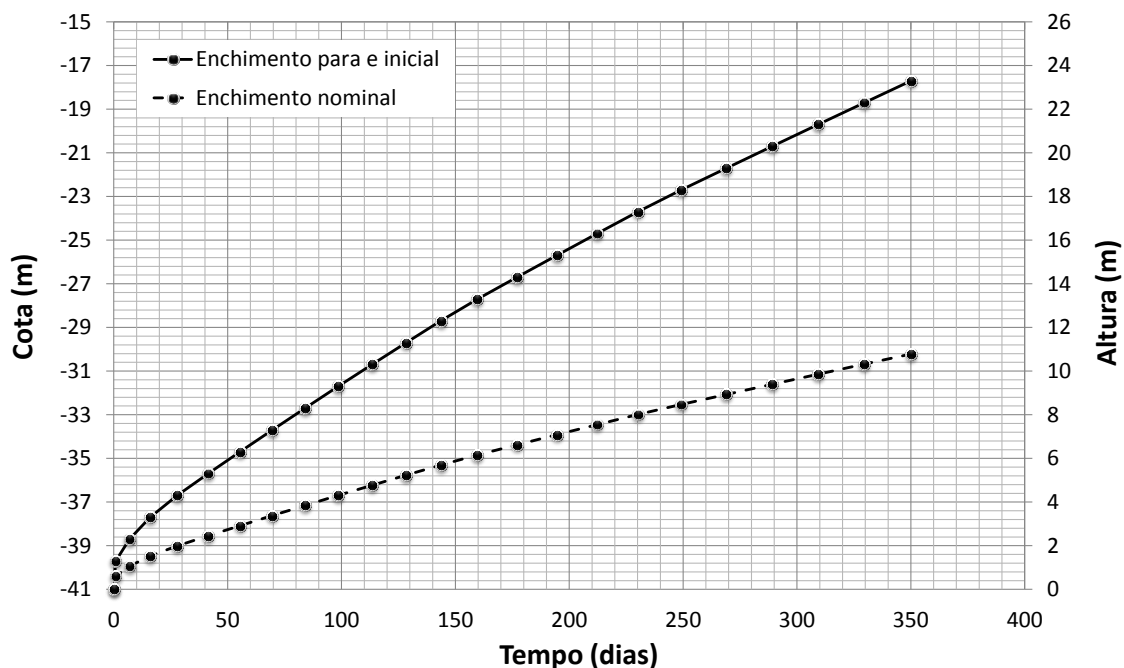


Figura 5.26 – Curvas de enchimentos obtidas com base nas condições iniciais de lançamento e nominal – Tanque TK-105

$$H_n = \frac{1 + e_{00}}{1 + e_i} \cdot H \quad (5.2)$$

Sendo:

e_i : índice de vazios inicial;

e_{00} : índice de vazios para tensão efetiva nula;

H : altura de rejeitos para $e = e_i$;

H_n : altura de rejeitos para $e = e_{00}$.

Nota-se que para a construção da curva, a curva de enchimento para os rejeitos lançados em condições iniciais foi prolongada para cotas superiores ao limite superior de campo (cota -23,7 m). Neste sentido, a curva de enchimento nominal atingiu uma altura em torno de 11 m para um tempo de 350 dias, o que é considerado bastante razoável, quando comparada às condições reais de campo, cujas curvas, obtidas pelo perfil de peso específico seco e pela lei de compressibilidade, foram apresentadas na Figura 5.23.

A simulação de enchimento instantâneo, cujo comportamento é apresentado na Figura 5.27, mostrou o que já se esperava em termos da compressibilidade do material. A partir do índice de vazios para a tensão efetiva nula, relacionada à cota -23,7 m, praticamente inexistem variações de altura, considerando a vida útil do reservatório (para a cota -23,7 m) identificada em campo. O período necessário de operação deste tanque para se atingir a cota -23,7 m (17,3 metros de rejeitos acumulados) foi de 541 dias. A simulação mostrou uma variação total de altura neste período de apenas 33 cm, mostrando que, durante a operação, os efeitos de adensamento por peso próprio são praticamente desprezíveis, mesmo considerando o enchimento instantâneo do reservatório.

A Figura 5.27 mostra ainda que, depois de lançado, os rejeitos apresentarão, ao longo de vários anos, uma baixa variação de volume, o que também já foi percebido na prática para os tanques mais antigos. Como exemplo, destaca-se o tanque TK-101, cuja sondagem apresentou um perfil com pouca variação de índices de vazios quando comparado ao tanque TK-105.

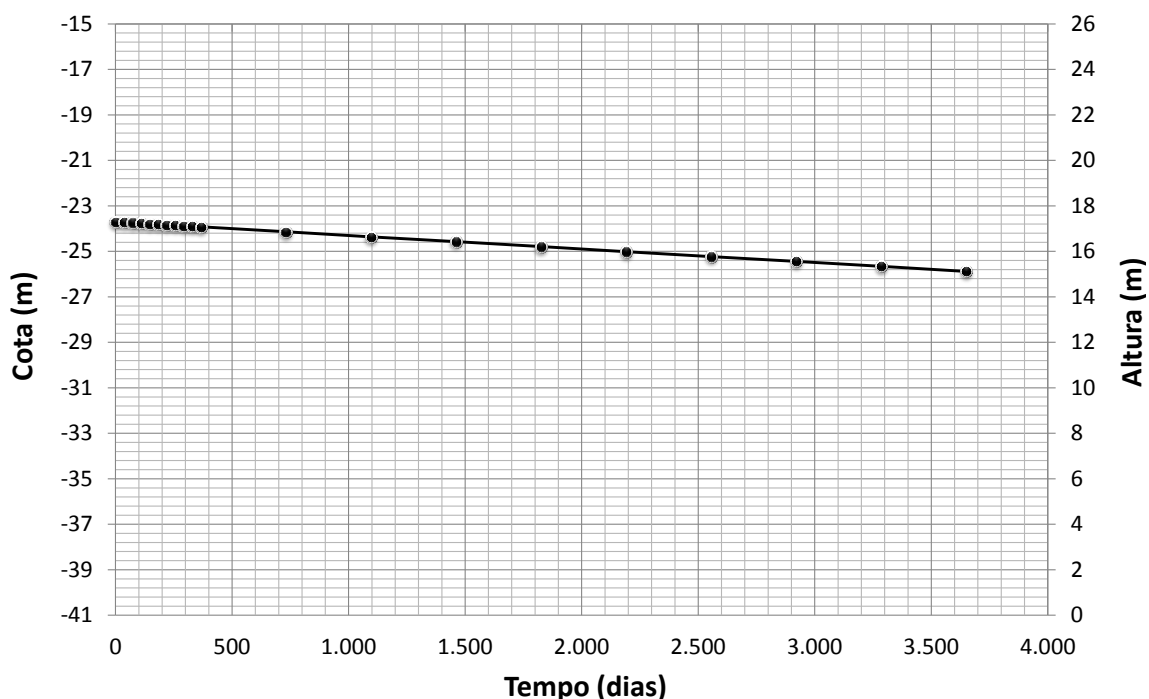


Figura 5.27 – Curva cota e altura *versus* tempo considerando a simulação de enchimento instantâneo – Tanque TK-105

b) Simulação de enchimento escalonado com curva nominal do TK-105

Diferentemente as simulações convencionais, onde se considera o estado de regime permanente para composição do enchimento escalonado, para os rejeitos de Bayóvar, os perfis de índices de vazios considerados para a composição das camadas subsequentes do lançamento foram condicionados ao tempo final de lançamento de cada estágio considerado no enchimento escalonado.

A simulação que envolve a consideração deste tipo de enchimento é geralmente adotada na prática convencional de disposição de rejeitos. Neste caso, a curva de enchimento é subdividida em vários trechos (denominados estágios) e são definidos em tempos inicial e final para cada estágio, bem como a taxa de enchimento associada a cada um deles. A definição de diferentes taxas de variação de altura (elevação / tempo) tornou-se necessária em função da característica não uniforme das seções transversais do tanque, onde a taxa de enchimento é reduzida para as maiores alturas, em função dos níveis superiores possuírem a capacidade de armazenamento de um maior volume de rejeitos.

Para a simulação escalonada, considerou-se 17 estágios de enchimento, cujas taxas de enchimento variaram em 56,3 m/ano (níveis inferiores) a 8,2 m/ano (níveis superiores). Os estágios foram considerados a cada metro de enchimento, a partir das alturas nominais obtidas da curva de enchimento (Figura 5.26).

Como já esperado, pelo comportamento apresentado no enchimento instantâneo, cujas variações de altura, em geral, são maiores do que na simulação de enchimento escalonado, praticamente não houve variação da curva de enchimento nominal com a curva obtida nesta simulação (Figura 5.28). No gráfico, quando se analisa a altura relacionada ao tempo de 350 dias, por exemplo, a curva de enchimento nominal registra um valor de 10,78 m, enquanto que a curva de enchimento escalonado apresenta uma elevação de 10,67 m para o mesmo tempo, ou seja, a diferença de altura é mínima, podendo ser justificada pela pequena deformação no período, já percebido na Figura 5.27, vinculada ao enchimento instantâneo. A curva também foi comparada às curvas obtidas em campo, para o perfil de peso específico seco e para a lei de compressibilidade, onde se observa uma boa concordância de resultados do início do enchimento até 350 dias, juntamente coincidente com o limite da curva de enchimento nominal (Figura 5.29).

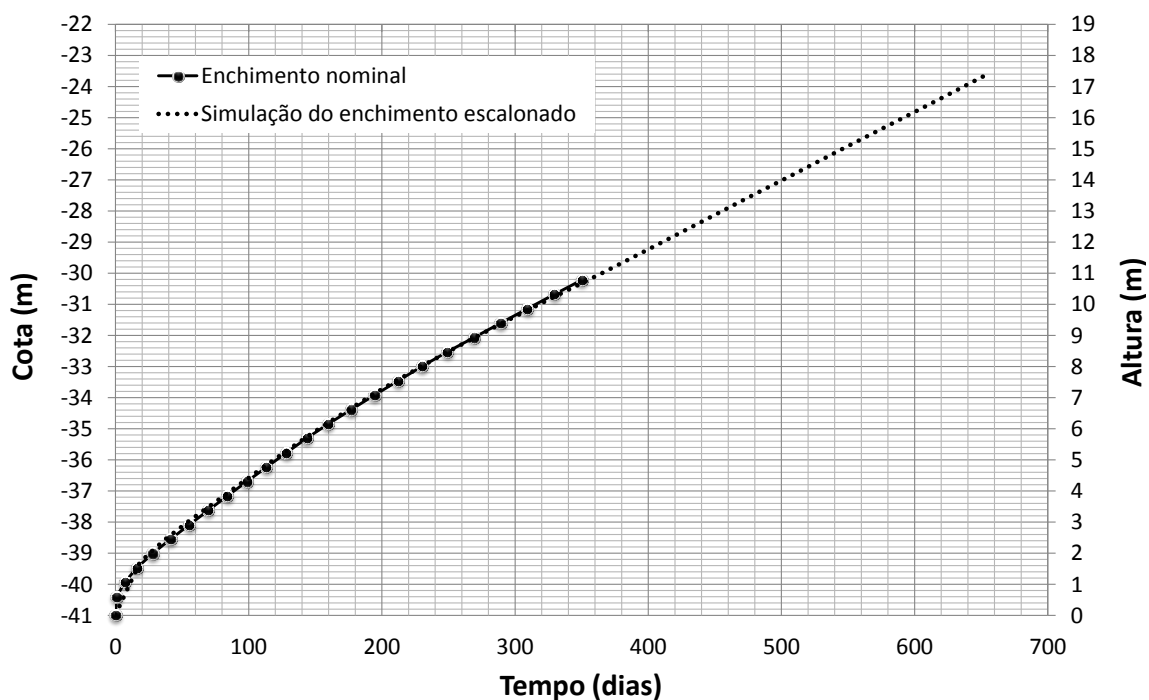


Figura 5.28 – Curvas de enchimento nominal e de enchimento escalonado obtida na simulação numérica – Tanque TK-105

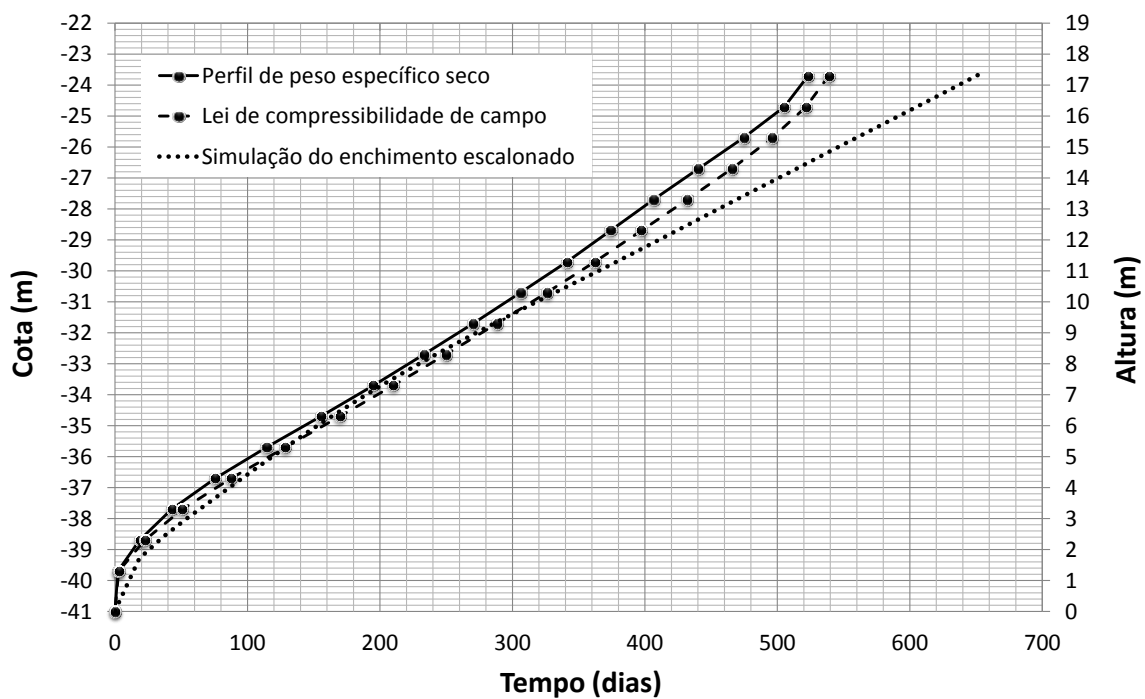


Figura 5.29 – Comparação entre as curvas de enchimento escalonado obtida na simulação e as curvas de enchimento de campo – Tanque TK-105

O afastamento das curvas no trecho final (após 350 dias) se deve ao fato do uso de alturas nominais associadas a taxas de enchimentos calculadas para seções não coincidentes a estas alturas durante a simulação e ao uso das mesmas taxas de enchimento utilizadas para o trecho final da curva. As alturas nominais foram calculadas através da curva de enchimento total, que foi prolongada para cotas superiores à cota máxima observada em campo, que foi de -23,7 m. A simples redução das alturas, mantendo-se associadas às seções superiores, não representa as condições reais, apesar de, na prática, se aproximar. Neste sentido, tornam-se fundamentais a simulação com a consideração da correção da curva de enchimento nominal.

c) Simulação de enchimento escalonado com curva nominal corrigida do tanque TK-105

Esta simulação pode ser avaliada como uma análise mais rigorosa e representativa das condições reais de operação do tanque, quando comparadas às outras avaliações já realizadas. Neste caso, é levado em consideração o adensamento de cada camada e, a redução do volume do material, considerando uma nova altura, ocasiona um novo espaço 'disponível' para lançamento da próxima camada. Apesar dos rejeitos de fosfato, objetos desta tese, não apresentarem compressibilidade considerável, conforme já visto nas outras simulações, a própria consideração das alturas nominais corrigidas a cada etapa já possibilita a obtenção de uma curva mais próxima da realidade de campo.

O procedimento da sequência de cálculo é detalhado no trabalho de Pereira (2006), considerando a linearização da curva cota *versus* volume. De forma sintética, a análise considera um volume de rejeitos lançados para um determinado período de tempo. A altura nominal de rejeitos neste período foi extraída da curva *versus* volume, a partir da utilização da Equação 5.2. Como dados de entrada no CONDES0, têm-se o tempo inicial igual a zero, o tempo final correspondente ao período adotado, e a taxa de enchimento sendo igual à altura nominal dividida pelo tempo. A simulação é então realizada, considerando a altura inicial igual a zero e obtendo-se a altura final correspondente ao primeiro estágio, que é menor do que a altura nominal, devido ao adensamento experimentado pela camada. Sequencialmente, esta nova altura é então superposta à curva cota *versus* volume, obtendo-se um novo volume, agora corrigido, e definindo-se um novo trecho para a próxima camada (estágio).

Repete-se o procedimento para os demais estágios, até que se atinja a altura (cota) final prevista para o enchimento completo do sistema. Particularmente, para os rejeitos de Bayóvar, esta metodologia foi adaptada com a consideração dos estágios coincidentes com as camadas utilizadas nas simulações anteriores, devido à pequena variação de altura provocada pelo adensamento em cada estágio. Outra observação é que a altura final considerada por camada foi adotada como sendo a altura correspondente ao tempo necessário para o enchimento (vinculado à altura nominal), visto que o regime permanente para estes materiais é atingindo somente depois de alguns anos.

A Tabela 5.17 apresenta os resultados obtidos na simulação, considerando a linearização da curva cota *versus* volume para o tanque TK-105, para 17 estágios de enchimento, cuja curva é destacada nas Figuras 5.30 e 5.31. Esta última leva em consideração a comparação com as demais curvas obtidas. Também são apresentados os perfis de índices de vazios, teor de sólidos e poropressão (Figuras 5.32 a 5.34).

Tabela 5.17 – Resultados da simulação numérica de enchimento por escalonamento corrigido – tanque TK-105

Estágio	Tempo (d)	Tempo acumulado (d)	Altura nominal (m)	Altura final (m)	Altura final acum. (m)	Volume final (m ³)	Volume final acum. *10 ⁻⁶ (m ³)
1	1,66	1,66	1,300	1,247	1,247	16.583,43	0,017
2	12,40	14,06	1,053	1,044	2,291	129.787,17	0,146
3	18,30	32,36	1,009	0,988	3,279	189.223,71	0,336
4	24,44	56,81	1,021	0,984	4,263	248.669,25	0,584
5	28,31	85,12	1,037	0,982	5,245	283.031,09	0,867
6	29,86	114,98	1,055	0,981	6,226	293.165,76	1,160
7	30,82	145,80	1,074	0,981	7,207	297.196,92	1,458
8	31,75	177,55	1,093	0,979	8,186	300.215,81	1,758
9	32,76	210,31	1,114	0,979	9,165	303.971,42	2,062
10	33,88	244,19	1,135	0,975	10,140	307.182,09	2,369
11	35,15	279,33	1,160	0,980	11,120	313.402,54	2,682
12	36,22	315,55	1,180	0,980	12,100	317.477,39	3,000
13	38,83	354,39	1,200	0,970	13,070	330.663,19	3,331
14	42,46	396,85	1,230	0,980	14,050	356.119,46	3,687
15	44,22	441,07	1,250	0,970	15,020	362.030,77	4,049
16	45,61	486,68	1,280	0,970	15,990	364.791,33	4,414
17	59,71	546,39	1,650	1,290	17,280	445.553,15	4,859

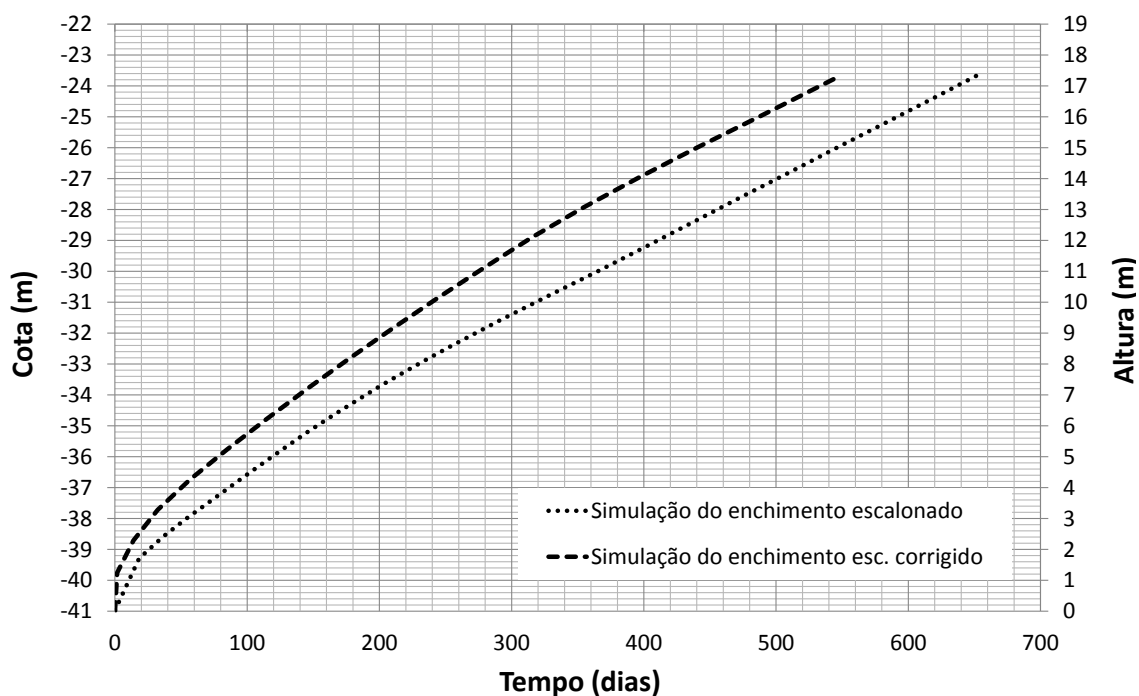


Figura 5.30 – Curvas de enchimento escalonado e de enchimento escalonado corrigido obtidas na simulação numérica – Tanque TK-105

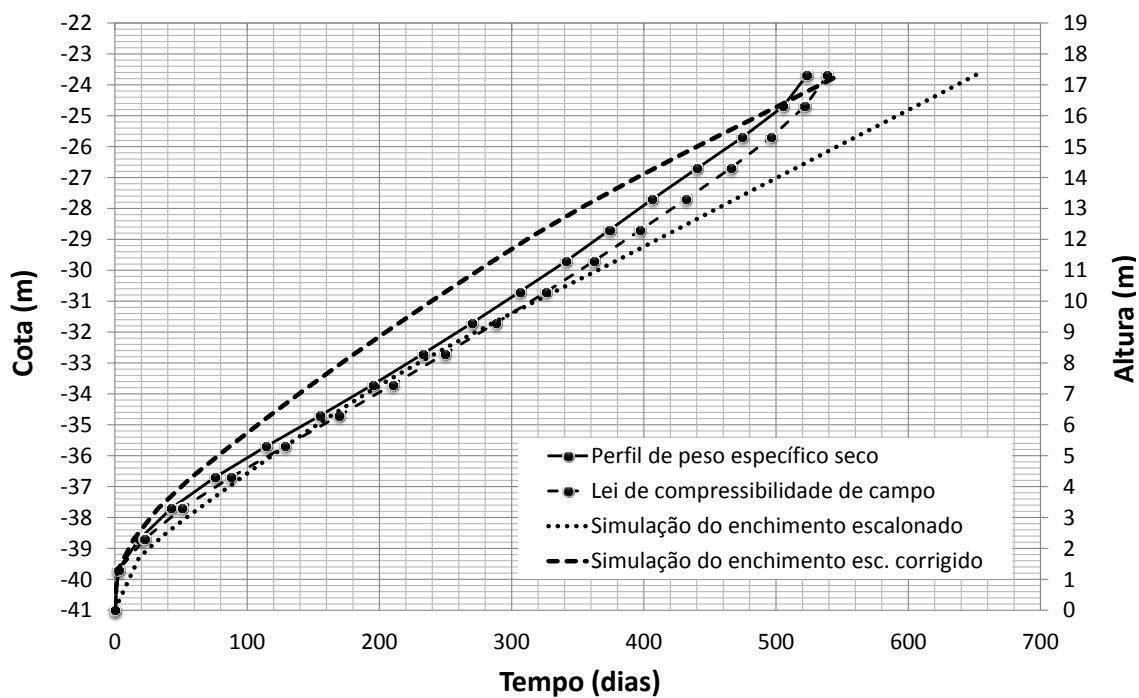


Figura 5.31 – Comparação entre as curvas de enchimento escalonado obtidas na simulação e as curvas de enchimento de campo – Tanque TK-105

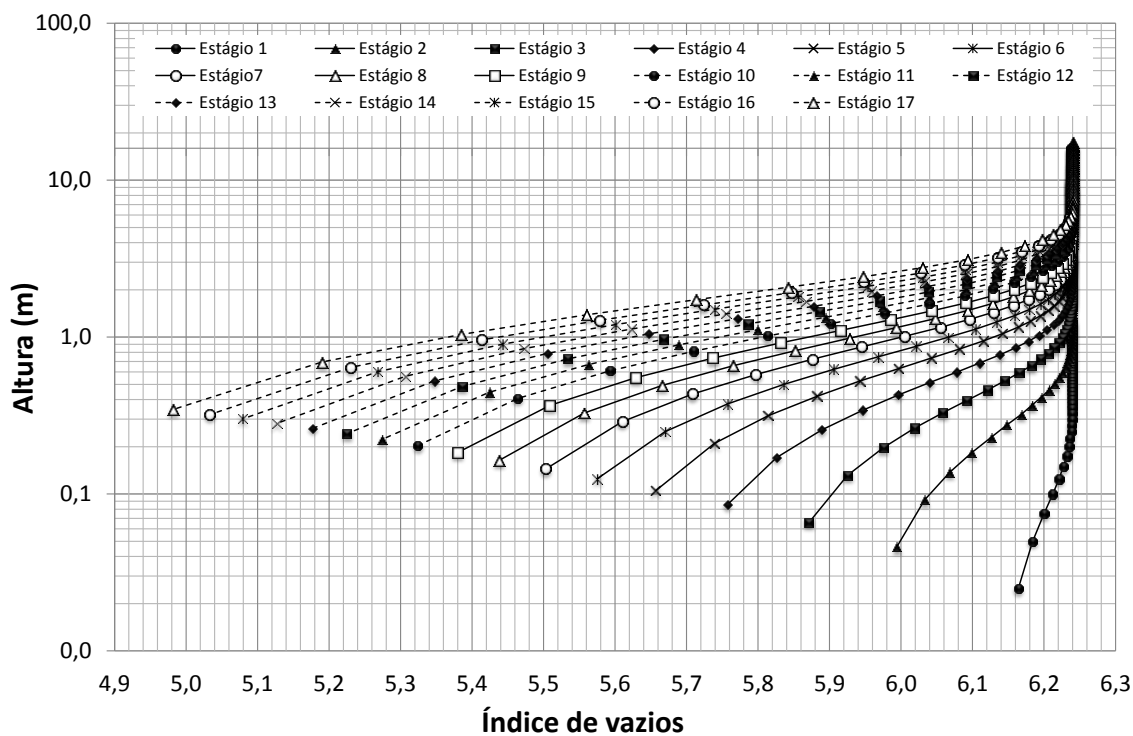


Figura 5.32 – Perfis de índices de vazios após adensamento para cada estágio da simulação do enchimento escalonado corrigido – Tanque TK-105

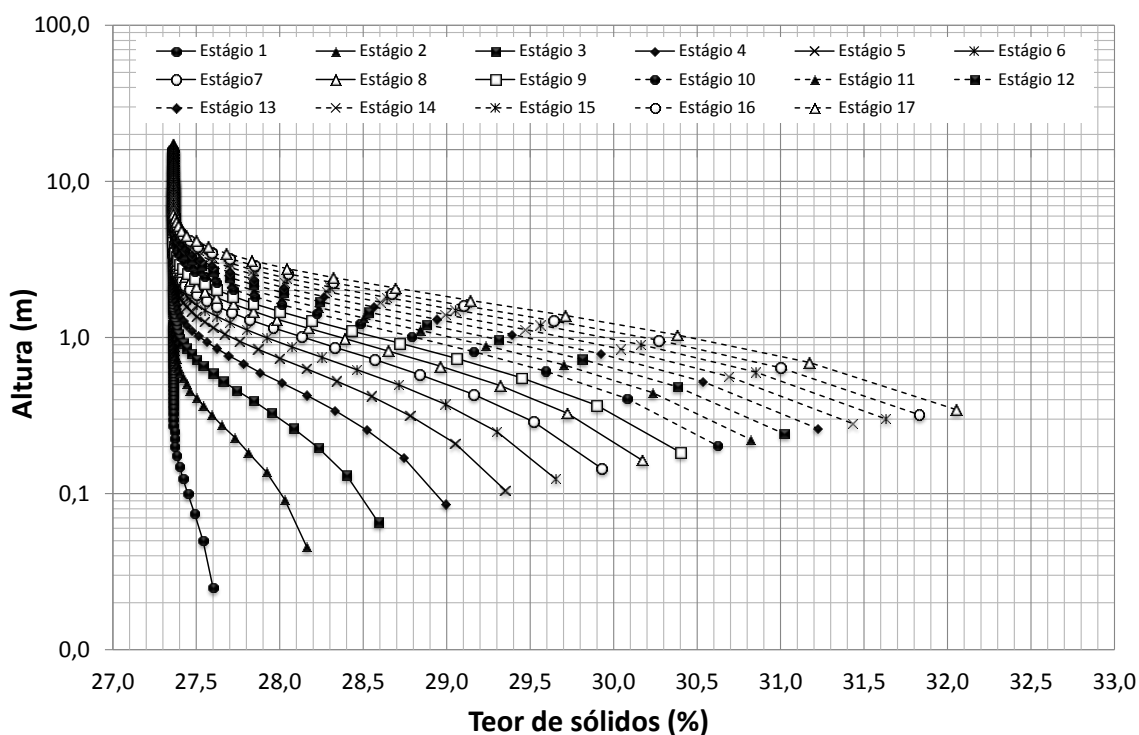


Figura 5.33 – Perfis de teor de sólidos após adensamento para cada estágio da simulação do enchimento escalonado corrigido – Tanque TK-105

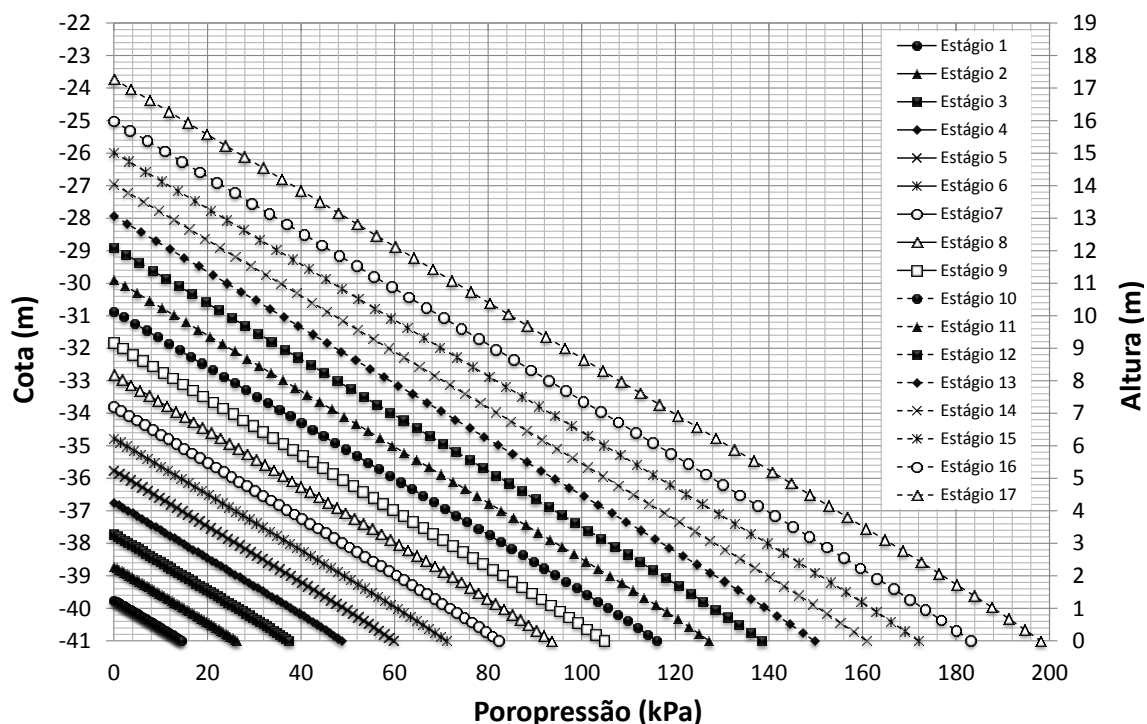


Figura 5.34 – Perfis de poropressão após adensamento para cada estágio da simulação escalonada corrigida – Tanque TK-105

Conforme já destacado anteriormente, estes perfis são obtidos como dados de saída (em arquivo tipo *.out, que pode ser aberto em leitor de arquivo *.txt ou MS Excel) do CONDES0. Na simulação, as condições consideradas na entrada são referentes a cada estágio adotado, vinculados aos respectivos tempos apresentados na Tabela 5.17. Os perfis são então referentes aos tempos acumulados, necessários para se atingir cada nível de enchimento, e não de regime permanente, uma vez que o lançamento ocorre continuamente. Neste sentido, as simulações foram programadas para o registro dos perfis nos tempos 1,66 d, 14,06 d, 32,36 d, etc., que são referentes aos subsequentes estágios e foram obtidos a partir da altura nominal, extraída da curva de enchimento, e da respectiva taxa de enchimento (razão entre o volume lançado em cada camada e o volume diário médio).

Os perfis de índice de vazios e de poropressão obtidos na simulação numérica foram comparados aos perfis obtidos na sondagem piezométrica (Figura 5.35). O perfil de poropressão considerado foi o SP-02-TK-105 (seção central do tanque) e o de índice de vazios corresponde aos valores médios observados nas três seções do tanque TK-105.

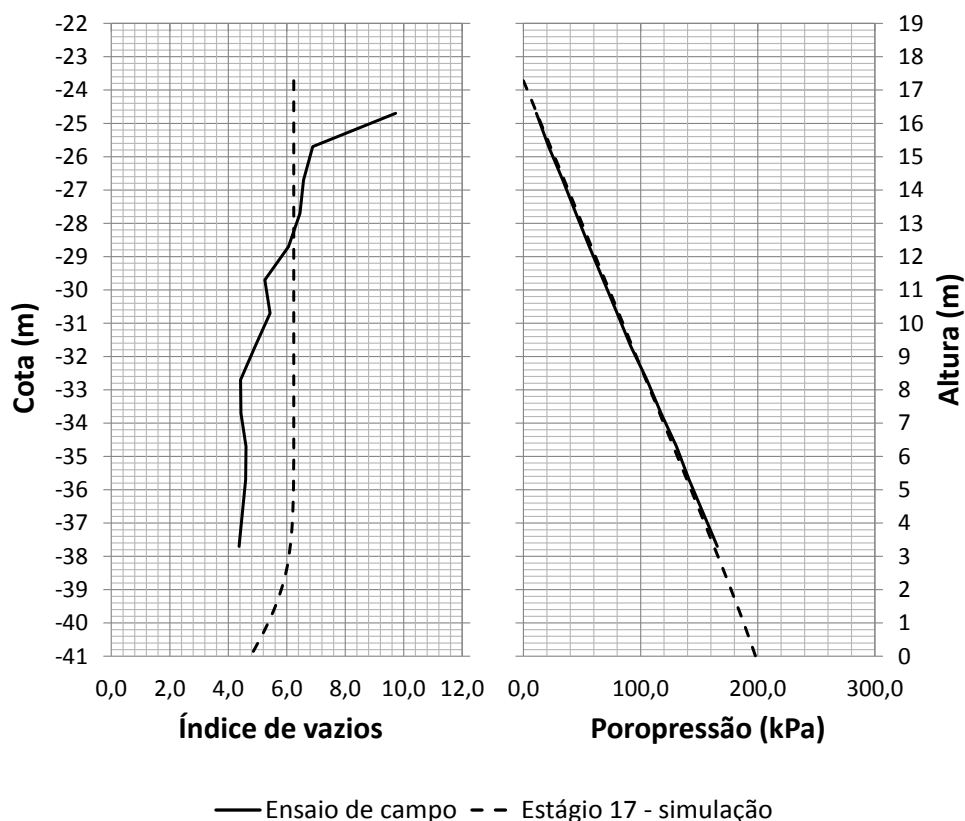


Figura 5.35 – Comparação dos perfis de índice de vazios e poropressão obtidos nos ensaios de campo e na simulação numérica escalonada corrigida – Tanque TK-105

As curvas associadas às poropressões foram idênticas. Consideraram-se, para efeito comparativo, as poropressões registradas no último estágio da simulação e as poropressões de estabilização obtidas durante a cravação da sonda-torpedo no reservatório.

Já para os perfis de índices de vazios, há uma discrepância entre os valores de campo e da simulação para os níveis superficiais, bem como para os horizontes mais profundos. Acima da cota -28 m, os valores de índice de vazios obtidos na investigação de campo são relativamente maiores do que os obtidos na simulação numérica, pois esta considera, para obtenção do índice de vazios máximo, a condição de tensão efetiva nula, ou seja, o valor de e_{00} obtido a partir das relações constitutivas do ensaio HCT informadas como elementos de entrada no *software*. Já em campo, percebeu-se que estes materiais ainda encontram-se em processo de sedimentação, com muitas partículas ainda em suspensão, especialmente para as camadas mais superficiais.

Ao contrário, nas maiores profundidades os índices de vazios registrados em campo são naturalmente menores do que os obtidos na simulação numérica. Este fato justifica a diferença de comportamento das curvas de enchimento apresentadas na Figura 5.31. Observa-se que até aproximadamente 320 dias de lançamento a curva obtida pela simulação do enchimento escalonado corrigido tende a distanciar das curvas de enchimento de campo. Posteriormente, ela comporta-se inversamente, tendendo a se aproximar das demais. Se observado o eixo das ordenadas, isso ocorre entre as cotas -28 e -29 m, ponto de cruzamento dos perfis de índice de vazios de campo e da simulação numérica (Figura 5.35a).

Ao final das curvas, considerando a simulação de enchimento escalonado corrigido e as curvas de enchimento de campo (perfil de peso específico e lei de compressibilidade de campo), os tempos finais são praticamente os mesmos (entre 520 e 540 dias), considerando a cota -23,7 m (17,3 m de altura), atestando a qualidade da simulação numérica e dos ensaios de campo associados ao tanque TK-105. Isso reforça a potencialidade do uso de dos parâmetros constitutivos obtidos no ensaio HCT para previsão da capacidade de armazenamento de futuros reservatórios, mas observados os cuidados do comportamento particularizado destes rejeitos.

d) Simulação de enchimento escalonado com curva nominal corrigida do tanque TK-103

Fundamentado pelos bons resultados apresentados na simulação numérica associada ao tanque TK-105, aplicou-se o mesmo procedimento para o tanque TK-103, considerando, neste caso, apenas a simulação em estágios de escalonamento, a partir da correção da curva cota *versus* volume. A simulação escalonada, sem a correção, não foi realizada para este sistema de contenção, uma vez que a curva resultante distanciou-se das demais ao final do enchimento.

Para o tanque TK-103, foram considerados 22 estágios de enchimento, sendo a curva corrigida metro a metro, como também foi realizado no reservatório em operação. Portanto, as cotas consideradas variaram de -32,5 a -9 metros, em relação ao nível do mar, correspondendo a uma altura de 23,5 m de rejeitos armazenados. A Tabela 5.18 apresenta os resultados obtidos na simulação de enchimento escalonado, considerando a linearização da curva cota *versus* volume.

Tabela 5.18 – Resultados da simulação numérica de enchimento por escalonamento corrigido – tanque TK-103

Estágio	Tempo (d)	Tempo acum. (d)	Altura nominal (m)	Altura final (m)	Altura final acum. (m)	Volume final (m ³)	Volume final acum. *10 ⁻⁶ (m ³)
1	1,23	1,23	2,500	2,483	2,483	189.917,62	0,190
2	3,18	4,42	1,017	1,014	3,497	193.752,90	0,384
3	4,12	8,53	1,003	0,997	4,494	260.460,52	0,644
4	4,71	13,24	1,006	0,998	5,492	299.757,78	0,944
5	5,07	18,31	1,008	0,997	6,489	331.975,45	1,276
6	5,80	24,11	1,011	0,996	7,485	356.818,79	1,633
7	8,48	32,59	1,015	0,995	8,480	382.880,51	2,016
8	13,63	46,22	1,020	0,992	9,472	404.207,61	2,420
9	17,62	63,84	1,028	0,988	10,460	434.716,41	2,854
10	19,56	83,40	1,040	0,990	11,450	473.343,11	3,328
11	22,94	106,34	1,050	0,990	12,440	514.509,97	3,842
12	26,01	132,35	1,060	0,980	13,420	538.797,91	4,381
13	27,31	159,67	1,080	0,980	14,400	563.083,53	4,944
14	29,62	189,28	1,100	0,990	15,390	595.424,80	5,540
15	32,22	221,50	1,110	0,980	16,370	624.552,58	6,164
16	33,86	255,36	1,130	0,980	17,350	670.098,39	6,834
17	35,86	291,21	1,150	0,970	18,320	716.724,92	7,551
18	40,74	331,96	1,180	0,980	19,300	773.410,24	8,324
19	45,76	377,72	1,200	0,970	20,270	803.646,22	9,128
20	49,42	427,13	1,230	0,970	21,240	848.879,08	9,977
21	51,99	479,13	1,260	0,970	22,210	907.423,80	10,884
22	67,55	546,68	1,620	1,270	23,480	1.276.977,59	12,161

A Figura 5.36 mostra a curva de enchimento obtida na simulação, sendo comparada às curvas das simulações de campo. A curva apresenta o mesmo comportamento observado na simulação relacionada ao tanque TK-105, com um distanciamento das demais curvas, seguida da subsequente aproximação para os períodos finais de enchimento. Particularmente, para a cota final, a curva apresenta os mesmos valores obtidos na simulação realizada pela lei de compressibilidade de campo. Neste caso, o tempo final para o completo enchimento foi exatamente de 600 dias. Também são apresentados os perfis de índices de vazios, teor de sólidos e poropressão associados ao tanque TK-103 (Figuras 5.37 a 5.39).

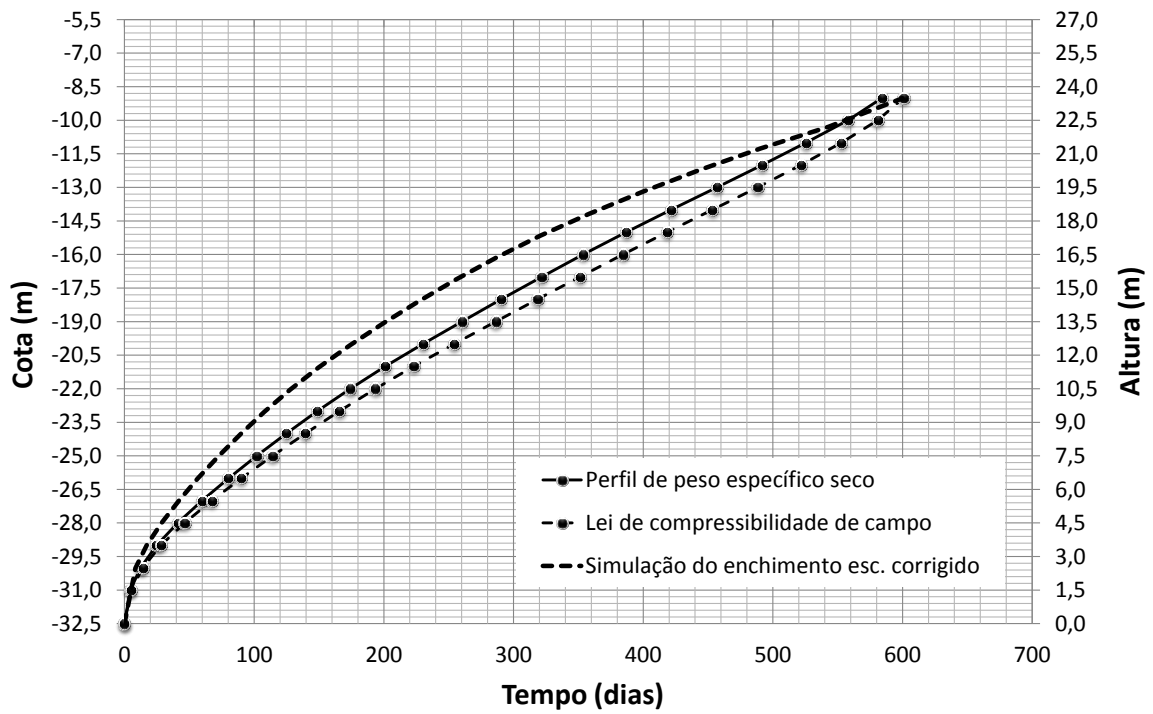


Figura 5.36 – Comparação entre as curvas de enchimento escalonado corrigido obtida na simulação e as curvas de enchimento de campo – Tanque TK-103

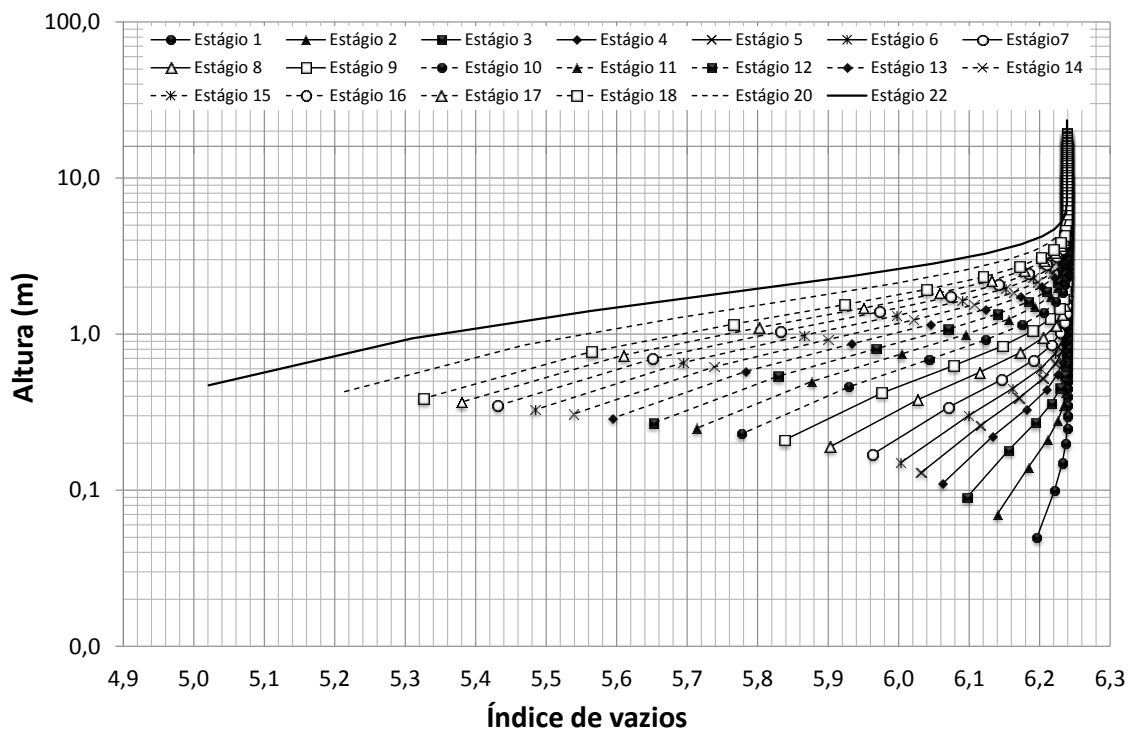


Figura 5.37 – Perfis de índices de vazios após adensamento para cada estágio da simulação do enchimento escalonado corrigido – Tanque TK-103

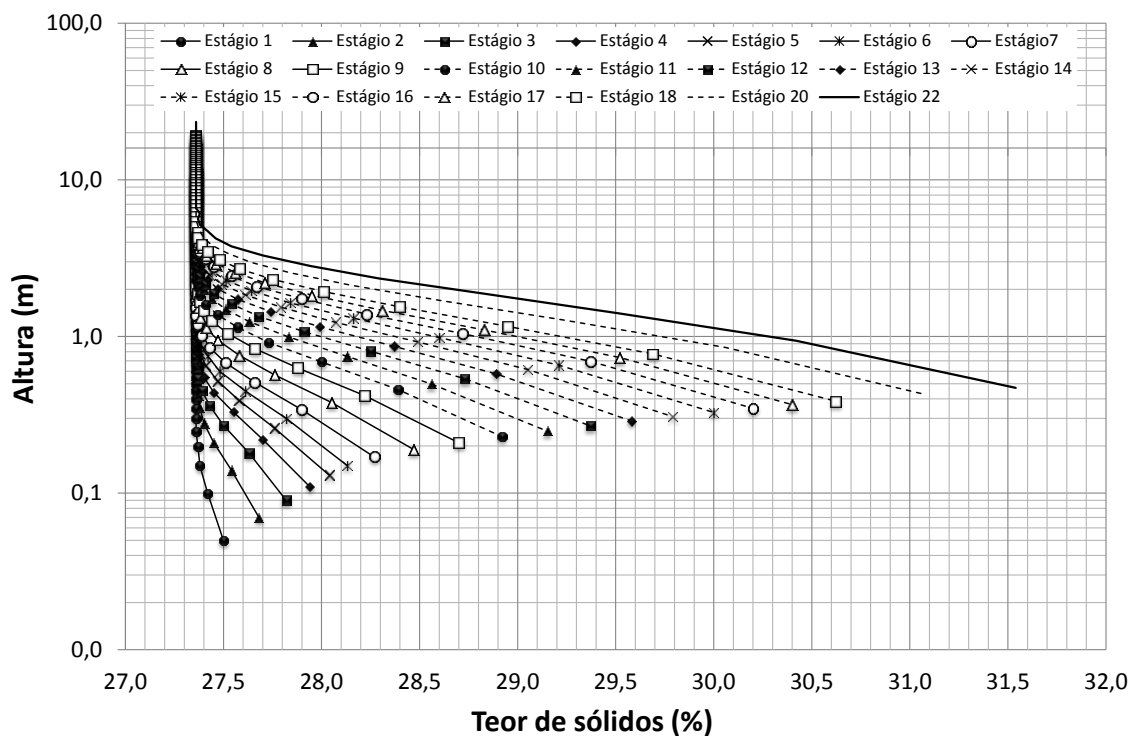


Figura 5.38 – Perfis de teor de sólidos após adensamento para cada estágio da simulação do enchimento escalonado corrigido – Tanque TK-103

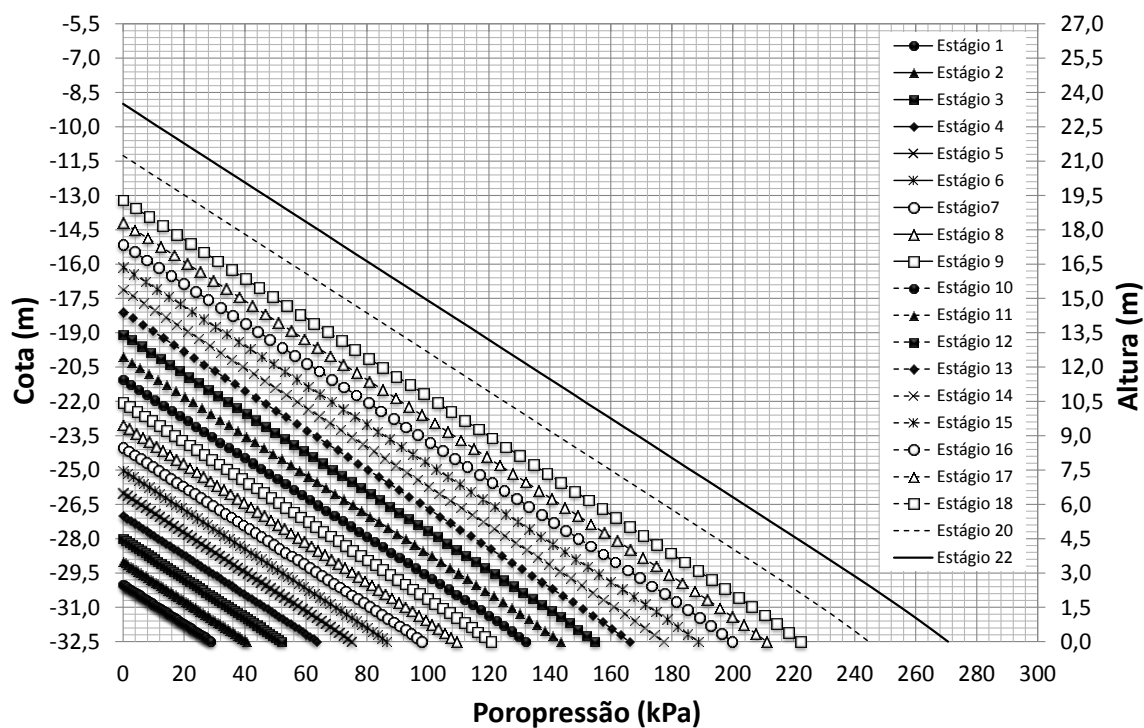


Figura 5.39 – Perfis de poropressão após adensamento para cada estágio da simulação escalonada corrigida – Tanque TK-103

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA OUTROS ESTUDOS

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O correto dimensionamento e a respectiva operação dos sistemas de disposição de rejeitos de mineração são diretamente dependentes da adequada previsibilidade do comportamento geotécnico destes materiais, quando armazenados, sobretudo, em termos do adensamento e da compressibilidade. O conhecimento deste comportamento permite uma estimativa mais racional da vida útil de um sistema de contenção, o que está especialmente associada ao planejamento das operações de mina, particularmente para os rejeitos finos. Para estes rejeitos, onde o processo de adensamento não é governado pela teoria clássica de Terzaghi, são necessárias abordagens substanciadas, com técnicas especiais e apropriadas, que envolvam as características comportamentais associadas às grandes deformações experimentadas durante o processo de adensamento, e representem, com maior assertividade, as relações de compressibilidade concernentes à deposição destes materiais.

Neste sentido, o presente trabalho incorporou um estudo abrangente, com o desenvolvimento, a construção de equipamentos e a implementação de técnicas de ensaios de laboratório e de campo, que foram empregados no estudo de um rejeito fino de fosfato, com características particulares, oriundo do processo de beneficiamento da Mina de Bayóvar, no Peru. Além do programa experimental detalhado neste trabalho, a pesquisa englobou ainda análises representativas, quantitativas e comparativas, inclusive com simulações numéricas, vinculadas aos resultados obtidos nos diferentes programas experimentais realizados.

O estudo possibilitou a obtenção de vários pontos conclusivos acerca dos procedimentos e análises realizados, bem como relacionados ao comportamento deposicional destes rejeitos.

6.2 CONCLUSÕES

6.2.1 Desenvolvimento dos equipamentos

O desenvolvimento dos equipamentos de campo e de laboratório contribuíram, de maneira geral, para o estudo dedicado e o consequente conhecimento das propriedades geotécnicas de compressibilidade e adensamento dos rejeitos finos de mineração, materiais. Em termos gerais, os resultados obtidos, mostraram-se consistentes no que tange à precisão e repetitividade.

Os sistemas de aquisição adotados e configurados, especificamente para a sonda piezométrica e para o edômetro de deformação controlada, caracterizaram-se, sobretudo pela simplicidade de operação, precisão, versatilidade e confiabilidade na obtenção, conversão e gravação dos dados. Os sensores adotados caracterizaram-se pela facilidade no processo de automação e foram compatíveis com o material estudado. A exceção se faz para a sonda *5TE* que não se aplicou corretamente aos rejeitos estudados, em função da salinidade destes. Neste sentido, torna-se necessário a adequação de um sensor de teor de umidade volumétrica e condutividade elétrica que possua funcionalidade específica para mensuração em soluções com elevado teor de cloretos.

Os mini amostradores idealizados não foram efetivos em relação aos resultados obtidos. No entanto, o amostrador tipo seringa, desenvolvido para uso nos procedimentos de sondagem piezométrica, superaram as limitações elencadas neste trabalho, associadas aos amostradores tradicionais tipo caneco e ‘*shelby*’. A efetividade do amostrador tipo seringa foi atestada em laboratório, em momento anterior à investigação de campo, e a sua funcionalidade foi comprovada nos ensaios de campo. O equipamento mostrou-se versátil para o uso em lamas, bem como em rejeitos mais consistentes, com a simples substituição das bases perfuradas por um anel biselado roscável.

6.2.2 Ensaios e análises dos resultados de campo e de laboratório

Os ensaios de campo foram realizados em dois tanques (reservatórios de armazenamento). Observou-se uma razoável concordância das curvas, considerando a relação índice de vazios *versus* tensão efetiva.

O programa experimental de laboratório envolveu a utilização dos ensaios especiais tipo HCT, CRD e coluna de sedimentação, além da realização dos ensaios tradicionais de caracterização. Os ensaios de coluna foram fundamentais para o conhecimento inicial do comportamento dos rejeitos de fosfato em termos da sedimentação, mostrando que, independente do teor de sólidos inicial, todas as amostras atingiram, na estabilização, valores de índices de vazios muito próximos. Constatou-se também que, quanto maior o teor de sólidos, menor foi a velocidade de sedimentação experimentada pelas amostras.

Os ensaios tipo CRD foram realizados para três diferentes velocidades de compressão: 0,075 mm/min, 0,150mm/min e 0,750mm/min. Os dados resultantes dos ensaios foram tratados e ajustados matematicamente por um programa computacional denominado *LAB Fit*, que se mostrou relativamente consistente para esta aplicabilidade. O ajuste possibilitou uma boa apresentação das curvas, em especial para as tensões mais baixas, onde a dispersão dos pontos foi mais perceptiva.

As curvas tensão efetiva *versus* índice de vazios, obtidas pelo ensaio CRD, apresentaram comportamentos muito próximos. Para as velocidades mais baixas (0,075 e 0,150 mm/min) as curvas aproximaram-se mais quando comparadas à velocidade de 0,750 mm/min. Em termos de permeabilidade, notou-se uma discrepância maior entre as curvas, apesar de apresentarem tendências similares. Para um mesmo índice de vazios, as amostras ensaiadas com uma maior taxa de deformação apresentaram maior permeabilidade.

Os ensaios de adensamento por percolação induzida (HCT) foram realizados para 4 amostras, sendo duas com altura inicial de 10 cm e duas com 14 cm. As análises dos resultados para obtenção dos parâmetros constitutivos dos rejeitos foram realizadas através do *SICTA*, possibilitando a obtenção das relações de compressibilidade e permeabilidade. Posteriormente, as curvas obtidas no ensaio HCT, juntamente com aquelas que evidenciaram o comportamento através do ensaio CRD, foram confrontadas entre si e com as curvas relacionadas aos ensaios de campo. De maneira geral, na comparação dos resultados obtidos nos ensaios CRD e HCT, as relações observadas para os ensaios de HCT, conduzidos em maiores velocidades de adensamento por percolação e maiores alturas iniciais, não apresentaram boa concordância com as curvas obtidas no ensaio tipo CRD.

Para os ensaios de campo, as curvas foram mais bem ajustadas para tensões acima de 2 kPa. Apresentaram-se ainda pouco dispersas entre si, mas próximas quando associadas ao perfil médio dos tanques TK-101 e TK-105, com a desconsideração dos pontos obtidos na camada superficial (curva média corrigida). Esta curva, que representa, de fato, a compressibilidade, é praticamente coincidente com as curvas obtidas nos ensaios de adensamento por percolação induzida HCT - CP1 e HCT - CP2.

Pelos resultados comparativos, considerando a condição de campo, que incorporam a situação real de deposição, os ensaios HCT são mais recomendados na previsibilidade de comportamento dos rejeitos de fosfato, em termos de compressibilidade. Os resultados obtidos no ensaio CRD, quando comparados aos resultados de campo e de adensamento por percolação induzida, mostraram-se mais dispersos, não sendo recomendados na avaliação dos rejeitos de Bayóvar (considerando os níveis de tensão observados '*in situ*'), especialmente para fins de projetos.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de sedimentação e de adensamento, comprovou-se que os rejeitos de fosfato de Bayóvar experimentam uma maior redução de volume na fase de sedimentação, sendo pouco compressíveis para os níveis de tensão correspondentes à condição de campo. A maior variação de índice de vazios ocorre na etapa de sedimentação.

As curvas de permeabilidade ajustadas para os ensaios de laboratório ocuparam majoritariamente regiões associadas aos valores entre 10^{-8} e 10^{-7} m/s. No entanto, houve relativa aproximação das curvas do ensaio CRD (CP1 e CP2) com as curvas do ensaio HCT (CP1 e CP2), para menores índices de vazios. Para índices de vazios maiores, elas já se aproximaram mais das curvas relacionadas aos CP's 3 e 4 do ensaio HCT. A curva de permeabilidade de campo, estimada através da curva teórica de Baligh e Levadoux (1980) mostrou uma concordância razoável apenas com a curva relacionada ao ensaio CRD conduzido em maior velocidade de compressão, apenas para índice de vazios entre 3,5 e 6, mas com muita precariedade de concordância.

Considerando estas observações e a particularidade dos rejeitos de fosfato estudados, em termos de permeabilidade, há uma dispersão muito grande dos resultados, caracterizando-se como não confiáveis os resultados estimados em campo e no ensaio CRD, para estes rejeitos.

6.2.3 Influência da salinidade

Além da influência da concentração de partículas, a influência da salinidade do rejeito foi verificada como possibilidade interferência no processo de sedimentação. O mesmo comportamento observado nos ensaios de sedimentação em coluna, para a amostra dessalinizada, também foi notado nos ensaios HCT com bomba de fluxo. Observou-se que o processo simplificado de dessalinização não contribuiu para a otimização do adensamento e compressibilidade do rejeito. Pelo contrário, a redução do teor de cloretos deixou os materiais menos compressíveis. Os ensaios mostraram que a presença de NaCl age como uma espécie de floculante, tornando estes materiais mais compressíveis.

6.2.4 Simulações de enchimento

A partir dos resultados obtidos nas análises dos ensaios de campo de laboratório, foram realizadas simulações numéricas de enchimento através de três procedimentos: um primeiro, considerando o perfil médio de índice de vazios (associado aos pesos específicos secos); um segundo, que se baseou na lei de compressibilidade obtida pela média dos perfis de sondagem; um terceiro, com a utilização de uma análise computacional pelo CONDES0, cujos dados de entrada utilizados foram os parâmetros obtidos nos ensaios HCT com o uso da bomba de fluxo (CP1).

Observou-se uma boa concordância entre as curvas obtidas na simulação realizada através da lei de compressibilidade de campo e pelo perfil de peso específico seco. A tendência, para os dois tanques analisados, foi de uma suave elevação das curvas obtidas pela lei de compressibilidade ao longo do tempo, mas convergindo para um tempo final previsto muito próximo, para o enchimento completo. Na simulação numérica computacional, o enchimento escalonado convencional foi simulado apenas para o tanque TK-105. A curva resultante foi comparada às curvas obtidas em campo, onde se observou uma boa concordância de resultados do início do enchimento até 350 dias. No entanto, ocorreu um distanciamento das curvas para as cotas finais do enchimento, justificando a simulação escalonada com a consideração da correção da curva de enchimento nominal para os dois tanques.

De maneira geral, as curvas de enchimento, considerando a simulação de enchimento escalonado corrigido e as curvas de enchimento de campo (perfil de peso específico e lei de compressibilidade de campo), mostraram que os tempos associados às cotas máximas de cada reservatório foram praticamente os mesmos (em torno de 540 dias, para o tanque TK-105, e 600 dias, para o tanque TK-103). Esta constatação reforça a potencialidade do uso dos parâmetros constitutivos obtidos no ensaio HCT para previsão da capacidade de armazenamento de futuros reservatórios, mas observados os cuidados do comportamento particularizado destes rejeitos.

Apesar das etapas experimentais de campo permitirem a obtenção de resultados que representam as condições reais de deposição, muitas das vezes, as possibilidades de realização destes ensaios não se tornam possíveis, especialmente quando analisadas as políticas de segurança das mineradoras. Neste sentido, com base nos resultados de laboratório obtidos nesta tese, especialmente na aproximação destes com as condições de campo, comprovou-se como efetiva a seguinte sequência metodológica na análise do comportamento de rejeitos desta natureza, para fins de projetos:

- Realização de ensaios de caracterização tecnológica;
- Realização de ensaios de coluna de sedimentação, visando verificar a influência deste mecanismo na formação dos reservatórios (ganho de volume de armazenamento);
- Realização de ensaios de adensamento por percolação induzida (HCT) e análises de enchimento, considerando a simulação de enchimento escalonado corrigido a partir da utilização do CONDES0.

6.3 SUGESTÕES PARA OUTROS ESTUDOS

No intuito de se estabelecer pesquisas complementares à pesquisa desenvolvida no presente trabalho, são propostos outros estudos, destacados a seguir:

- Implementar um novo sensor à sonda piezométrica desenvolvida, visando a adequação aos rejeitos armazenados em soluções salinas, em função da sua elevada condutividade elétrica;

- Estudar, com maior profundidade, os efeitos da salinidade no processo de adensamento e compressibilidade dos rejeitos de fosfato oriundos do beneficiamento de rochas sedimentares marinhas, inclusive com a incorporação de análises com adição de diferentes flocculantes orgânicos e inorgânicos passíveis utilização na prática de operação da mina;
- Avaliar o processo de ressecamento dos rejeitos de fosfato, com a variação de parâmetros de entrada, utilizando o *software* CONDES0, e verificar o seu efeito associado à redução de volume dos reservatórios;
- Implementar um algoritmo numérico que simule numericamente a etapa de sedimentação dos rejeitos de fosfato no processo de enchimento dos reservatórios, uma vez que o *software* CONDES0 considera o índice de vazios associado à tensão efetiva nula como máximo valor, ou seja, simula apenas a etapa de adensamento;
- Simular tanques em escala de laboratório, com instrumentação, possibilitando o monitoramento contínuo e a avaliação das variáveis envolvidas na disposição, inclusive com ensaios não invasivos (não destrutivos);
- Aplicar a sistemática de ensaios e análises a outros tipos de rejeitos.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2017a.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 2017b.
- ABU-HEJLEH, A. N.; ZNIDARCIC, D. **User manual for computer program SICTA**. Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, Boulder, Colorado, 1992, 101 p.
- ABU-HEJLEH, A. N.; ZNIDARCIC, D.; BARNES, B. L. Consolidation characteristics of phosphatic clays. **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, v. 122, n. 4, p. 295-301, 1996.
- AHMED, S. I. E SIDDIQUA, S. A review on consolidation behavior of tailings. **International Journal of Geotechnical Engineering**, v. 8, n. 1, p. 102-111-301, 2014.
- ALLEN, T. Particle Size Measurement. **Powder Sampling and Particle Size Measurement**. Chapman, v. 1, 1981
- ALVES, M. C. M. **Comportamento de sedimentação e adensamento de uma lama vermelha**. 1992. 213f. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC/Rio, Rio de Janeiro, 1992.
- ALVES, M. C. M.; ESPERANÇA, P. T. T. Uma discussão sobre o uso das descrições euleriana e lagrangeana na teoria do adensamento. In: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS, 1995, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: s. n. v. 1, 1995, p. 37-43.
- ARAÚJO, G. S. **Estudo experimental do comportamento dreno-filtrante de interfaces rejeitos finos-geotêxteis**. 2005. 113f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, 2005.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D-854: Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer**. West Conshohocken, PA, 2014.

BALIGH, M. M.; LEVADOUX, J. N.. Consolidation after Undrained Piezocone Penetration II: Numerical Analysis. **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, v. 112, n. 7, p. 725-745, 1980.

BARTHOLOMEEUSEN, G.; SILLS, G.; ZNIDARCIC, D.; van KESTEREN, W.; MERCKELBACH, L. M.; PYKE, R.; CARRIER, W. D.; LIN, H.; PENUMADU, D; WINTERWERP, H. Sidere: numerical prediction of largestrain consolidation, **Géotechnique**, v. 53, n. 9, p. 639-648, 2002.

BEEN, K. E SILLS, G. C. Self-weight consolidation of soft soils: an experimental and theoretical study. **Géotechnique**, v. 31, n. 4, p. 519-535, 1981.

BOTELHO, A. P. D. **Implementação de metodologia de ensaios para determinação de relações constitutivas de processos de fluxos em solos com a utilização da bomba de fluxo**. 2001. 254f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, 2001.

BROMWELL, L. G.; CARRIER, III. W. Consolidation of fine-grained mining wastes. In: SIXTH PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION, 1979, Lima. **Proceedings...** Lima, 1979, p. 293-304.

BSI - BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 1377: Methods of test for soils for civil engineering purposes**. London, UK, 1975.

CANÇADO, N. L. **Desenvolvimento de equipamento para realização de ensaios HCT com o uso da bomba de fluxo**. 2010. 96f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, 2010.

CARRIER III, W. D.; BROMWELL, L. G.; SOMOGYI, F. Design Capacity of Slurried Mineral Waste Ponds. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 109, n. 5, p. 699-716, 1983.

CBDB - COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. **Barragens de Rejeitos no Brasil**. ÁVILA, J. P. Comitê Brasileiro de Barragens. Rio de Janeiro, 2012.

CMMM - COMPANHIA MINEIRA MISKI MAYO. **Relatórios, projetos e documentos diversos**, 2017.

CRAWFORD, C. B. Interpretation of the Consolidation Test. **Journal of Geotechnical Engineering Division**, v. 90, p. 93-108. 1964.

CRAWFORD, C. B. Resistance of Soil Structure to Consolidation. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 2, p. 90-115. 1965.

DALTON, F. N. Measurement of soil water content and electrical conductivity using Time Domain Reflectometry. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MEASUREMENT OF SOIL AND PLANT WATER STATUS. **Proceedings...** 1987, p. 95-98.

de CAMPOS T. M. P.; VILLAR, L. F. S., COSTA FILHO, L. M. Field monitoring of fine waste disposal ponds. In: ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS, 1998, Rotterdam **Proceedings...** Rotterdam: Balkema, 1998, v. 1, p. 253-258.

de CAMPOS, T. M. P.; VILLAR, L. F. S., AZEVEDO, R.; GUIMARÃES FILHO J. L. Consolidation analysis of tailings reservoir. In: PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 1991, Viña del Mar. **Proceedings...** Viña del Mar, Chile, v. 1, p. 1021-1033.

DNPM - DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. Fosfato. **Sumário mineral brasileiro**. Departamento Nacional de Produção Mineral. Brasília, 2015.

ERICSON, W. A.; MOORE, L. P.; MADRID, L. D., Development on Florida's Phosphate Mine Lands. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CASE HISTORIES IN GEOTECHNICAL ENGINEERING, 1993, St. Louis, Missouri, **Proceedings...** St. Louis, 1993.

FEAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. Banco de boas práticas ambientais. **Estudo de Caso - Disposição de rejeitos em cavas exauridas utilizando o método de empilhamento drenado**. Fundação Estadual do Meio Ambiente, Belo Horizonte, 2016. Disponível em: < http://www.feam.br/images/stories/2016/PRODUCAO_SUSTENTAVEL/Disposi%C3%A7%C3%A3o_de_rejeitos_em_cavas_e_xauridas_utilizando_o_m%C3%A9todo_de_empilhamento_drenado.PDF >. Acessado em: 18/11/2017.

FERREIRA, L. D. **Desaguamento e Adensamento de Rejeito de Mineração Utilizando Processos Eletrocínéticos**. 2016. 248f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, 2016.

FERREIRA, L. D. **Desaguamento e Adensamento de Rejeito de Mineração Utilizando Processos Eletrocínéticos**. 2016. 248f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, 2016.

FERREIRA, L. D. **Desenvolvimento de equipamento de laboratório para o estudo de fenômenos eletrocínéticos no processo de adensamento de rejeitos de mineração**. 2011. 144f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, 2011.

FOCUS VENTURES. **The Bayóvar 12 Phosphate Project Northern Peru**. Presentation. 2015. Disponível em: < http://www.enernews.com/media/briefs/focus-ventures--bayovar-12-proyecto-de-fosfato-norte-de-peru_1152.pdf >. Acessado em: 24/11/2017.

FROELICH, P. N.; ARTHUR, M. A.; BURNETT, W. C.; DEAKIN, M.; HENSLEY, V., JAHNKE, R.; KAUL, L.; KIM, K. H.; ROE, K.; SOUTAR, A.; VATHAKANON, C. Early diagenesis of organic matter in Peru continental margin sediments: phosphorites precipitation. **Marine Geology**, v. 80, p. 309-343. 1988.

GARRISON, R., Neogene phosphogenesis along the eastern margin of the Pacific Ocean. **Revista Geológica de Chile**, v. 19, n. 1, p. 91-111, 1992.

GERSEVANOV, N. M. Dinamika Mekhaniki Gruntov. **Foundations of Soil Mechanics**. v 2, Gosstroistat, 1934.

GIBSON, R. E.; ENGLAND, G. L; HUSSEY, M. J. L. The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: I. Finite non-linear consolidation of thin homogeneous layers. **Géotechnique**, v. 17, n. 3, p. 261-273, 1967.

GIBSON, R. E.; ENGLAND, G. L; HUSSEY, M. J. L. The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: I. Finite non-linear consolidation of thin homogeneous layers. **Géotechnique**, v. 17, n. 3, p. 261-273, 1967.

GIBSON, R. E.; SCHIFFMANN, R. L. CARGILL, K. W. The Theory of O.D. Consolidation of Saturated Clays, II: Finite nonlinear consolidation of thick homogeneous layers. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 18, n. 2, p. 280-293. 1981.

GOLDER ASSOCIATES. **Bayóvar 12 Phosphate Project**. Piura, Peru: Golder Associates, 2016.

GOLDER ASSOCIATES. **EIA of Bayóvar Phosphates Mine, for Compañía Minera Miski Mayo (CMMM)**. Piura, Peru: Golder Associates, 2007.

GOMES, R. C. Características de compressibilidade e adensamento de rejeitos de bauxita. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 1998, Brasília. **Anais...** Brasília, 1998, v. 1, p. 1775-1998.

GOOGLE. **Google Earth Pro**, 2015. Disponível em: < <https://www.google.com/earth/download/gep/agree.html> >. Acessado em: 13/12/2017.

GREENBERG A. E.; CLESCERI L. S. EATON A. D. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 18 ed. Washington. Ed. American Public Health Association, 1992.

GUIMARÃES FILHO, J. L. **Desenvolvimento de um edômetro para ensaios com taxa de deformação constante de deslocamento**: aplicação a rejeitos industriais depositados sob a forma de lama. 1990. 122f. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC/Rio, Rio de Janeiro, 1990.

HAMILTON, J. J.; CRAWFORD, C. B Improved Determination of Preconsolidation pressure of a Sensitive Clay. In: SYMPOSIUM ON TIME RATES OF LOADING IN SOIL TESTING, ASTM. p. 254-271, 1959.

HBM - HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK. **Spider 8**. Operating manual. Darmstadt: HBM, 2003.

HUANG, Y.; ORAZEM, M. E.; KONG, R.; YU, D.; LAI, H.; MOGHADDAM, S.; BLOOMQUIST, D.; CLEVELAND, C. Laboratory-Scale Apparatus for Semi-Continuous Electrokinetic Dewatering of Phosphatic Clay Suspensions Electrolysis and Electrochemical Processes. **Meeting Abstracts. The Electrochemical Society**, v. 12, p. 587-587, 2014.

IBRAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração**. Organizador: Instituto Brasileiro de Mineração. 1. Ed. Brasília: IBRAM, 2016.

IMAI, G. Development of a new consolidation test procedure using seepage force. **Soil and Foundations**, v. 19, n. 3, p. 45-60, 1979.

IMAI, G. Experimental studies on sedimentation mechanism and sediment formation of clay minerals. **Soil and Foundations**, v. 21, n. 1, p. 7-20, 1981.

INGEMMET - INSTITUTO GEOLÓGICO MINERO Y METALÚRGICO. **Memoria sobre la geología económica de la región Piura**. RODRÍGUEZ, I.; VILLARREAL, E.; ACOSTA, J. (Org.). Lima, Peru, 1980.

JEERAVIPOOLVARN, S.; CHALATURNYK, R. J.; SCOTT, J. D. Consolidation modeling of oil sands fine tailings: history matching. In: 61ST CANADIAN GEOTECHNICAL CONFERENCE. Edmonton, 122 Alberta, Canada, 2008, p. 190-197.

JEWELL, R. J. Introduction. In: JEWELL, R. J.; FOURIE, A. B.; LORD, E. R. (Eds.) **Paste and Thickened Tailings - a Guide**. Nedlands: The Australian Centre for Geomechanics, The University of Western Australia, 2002. p. 1-8.

KONG, R. **Continuous electrokinetic dewatering of phosphatic clay suspensions**. 2015. 117f. PhD. Thesis – University of Florida, Gainesville, 2015.

KYNCH, G. J. **A theory of sedimentation**. Transactions of the Faraday Society, v. 48, p. 166-176, 1952.

LEE, K. Consolidation with constant rate of deformation. **Géotechnique**, v. 31, n. 2, p. 215-229, 1981.

LIBES, S. **An Introduction to Marine Biogeochemistry**. New York: John Wiley & Son, Inc., 1992.

LIMA, P. P. **Ensaio oedométrico com taxa de deslocamento constante em solos muito moles**. 1996. 110f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa, 1996.

LIU, J. C.; ZNIDARCIC, D. Modeling one-dimensional compression characteristics of soils. **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, v. 117, n. 1, p. 162-169, 1991.

McVAY, M.; TOWNSEND, F.; BLOOMQUIST, D. Quiescent consolidation of phosphatic waste clays. **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, v. 112, n. 12, p. 1033-1049, 1986.

McVAY, M.; ZULOAGA, P. I.; TOWNSEND, F. C. **Reclamation of phosphatic play waste ponds by 'capping'**. Florida Institute of Phosphate Research. 1988.

MIKASA, M. **The consolidation of soft-clay**. A new consolidation theory and application. Tokyo: Kajima Shuppankai, 1963.

MORRIS, P. H.; LOCKINGTON, D. A.; APELT, C. J. Correlations for mine tailings consolidation parameters. **International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment**. Environ, v. 14, (3), p. 171-182.

MOURA, A. P. **Adensamento com velocidade controlada de deformação (CRS): Desenvolvimento do equipamento e realização de ensaios em solos moles do leste de Santa Catarina**. 2004. 121f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Santa Catarina, 2004.

NOVICH, B. E. 1976. **The composition and rheology of the Florida phosphatic waste clay slurries: geotechnical implications**. 1983. 132f. MS. Thesis – Massachusetts Institute of Technology, USA, 1983.

OLIVEIRA, T. G.; MENDES, G. C.; PEREIRA, E. L.; FERREIRA, L. D. Análise Comparativa entre o Granulômetro a Laser e o Método Convencional de Granulometria por Sedimentação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2016, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2016.

ORAZEM, M. E.; HUANG, Y.; KONG, R.; HORNER, D. A.; MOGHADDAM, S.; BLOOMQUIST, D.; CLEVELAND, C.; LAI, H. Development of Electrokinetic Dewatering for Phosphate Mine Tailings. **Meeting Abstracts. The Electrochemical Society**, v. 16, p. 683-863, 2014.

PANE, V. **Sedimentation and consolidation of clays**. 1985. 302f. PhD. Thesis – Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, Boulder, Colorado, 1985.

PANE, V.; SCHFFMAN, R. L. A note on sedimentation and consolidation. **Géotechnique**, v. 35, n. 3, p. 69-72, 1985.

PASK, D. **Jar testing: getting started on a low budget**. National Environmental Service Center, 1993.

PEREIRA E. L.; GOMES, R. C. Construção de um amostrador para rejeitos finos de baixa e média densidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2012, Porto de Galinhas. **Anais...** Porto de Galinhas, 2012.

PEREIRA, B. A. **Adensamento e simulação do enchimento do reservatório de uma barragem para contenção de ouro**. 2006. 115f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, 2006.

PORTES, A. M. C. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências de polpa e torta**. 2013. 154f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 2013.

RAMOS, S. S. S. **Efeito da salinidade sobre a velocidade de queda de sedimentos finos de uma bacia portuária**. Caso de estudo: Marina do Parque das Nações. 2013. 58f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2013.

ROBERTSON, P. K.; CAMPANELLA, R. G. **Guidelines for use and interpretation of the electronic cone penetration test**. Vancouver: British Columbia University, 1984. (Technical Report).

ROMA, J. R. **Geotechnical properties of Florida phosphatic clays**. 1976. 132f. Dissertação (Mestrado) – Massachusetts Institute of Technology, USA, 1976.

SANTOS, D. C. D. **Determinação das propriedades de compressibilidade e permeabilidade do rejeito de bauxita da barragem de Marzagão através de ensaios de laboratório e de campo**. 2001. 254f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa, 2001.

SCHIFFMAN R. L. Finite and infinitesimal strain consolidation. **Journal of Geotechnical Engineering Division**, v. 106, GT2, p. 203-207. 1980.

SCHIFFMAN, R. L.; PANE, V.; GIBSON, R. E. The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: IV. An overview of nonlinear finite strain sedimentation and consolidation. In: YONG, R. N.; TOWNSEND, F. C. (Eds.) **Sedimentation: consolidation models**. ASCE, 1984, p. 1-29.

SILVA, J. M.; LIMA, J. A. S. Quatro abordagens para o movimento browniano. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 29, n. 1, p. 25-35, 2007. ISSN 1806-1117. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11172007000100007> >. Acessado em: 13/12/2017.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; CAVALCANTI, C. G. B.; SILVA, D. D. P. S.; SOARES, I. B.; OLIVEIRA, J. A. S.; SILVA, C. D. P. S. LAB Fit curve fitting: a software in Portuguese for treatment of experimental data. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 26, n. 4, p. 419-427, 2007. N 1806-1117. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11172004000400018.1> >. Acessado em: 13/12/2017.

SILVA, W. R. **Nova metodologia para determinação de propriedades de sedimentação e adensamento de rejeitos de mineração**. 2008. 136f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa, 2008.

SMITH, R. E.; WAHLS. H. E. Consolidation under constant rates of strain. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, v. 1, SM2, p. 519-539, 1969.

SODEBERG, L. O. Consolidation theory applied to foundation pile time effects. **Géotechnique**, v. 12, n. 3, p. 217-2225, 1962.

SOMOGYI, F. **Analysis and prediction of phosphatic clay consolidation: implementation package**. Lakeland: Florida Phosphatic Clay Research Project. 1979. (Technical Report).

TAKAGI, S.; SUGIYAMA, K.; II, S., MATSUMOTO, Y. A Review of Full Eulerian Methods for Fluid Structure Interaction Problems. **Journal of Applied Mechanics**. ASME, v. 79, n. 4, 7 p, 2011.

TOPP, G. C.; DAVIS, J.,L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurement incoaxial transmission lines. **Water Res. Res.**, v. 16, p. 574-582. 1980.

TORSTENSON, B. A. **The pore pressure probe**. Norsk Jord-Og Fjellteknisk Forbund. Oslo, Foredrag 34.1-34.15. Troedheim, Norway, 1977.

TOWNSEND, F. C.; McVAY, M. C. Soa: large strain Consolidation predictions. **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, v. 116, n. 2, p. 222-243, 1990.

UMEHARA, Y.; ZEN, K. Constant rate of strain consolidation for very soft clayey soils. **Soils and Foundations**, v. 20, n. 2, p. 79-95, 1980.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY – USGS. **Mineral Commodity Summaries**. Prepared by JASINKI, S. M., USGS, 2017.

VILLAR, L. F. S. **Análise do comportamento de resíduos industriais de bauxita: desenvolvimento de facilidades experimentais de campo e de laboratório**. 1990. 156f. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC/Rio, Rio de Janeiro, 1990.

VILLAR, L. F. S. **Estudo do adensamento e ressecamento de resíduos de mineração e processamento de bauxita**. 2002. 461f. Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC/Rio, Rio de Janeiro, 2002.

VILLAR, L. F. S.; de CAMPOS, T. M. P.; AZEVEDO, R. F.; ZORNBERG, J.G. Experimental Evaluation of Compressibility and Permeability of Compressible Mining Waste using CRS Tests. In: FIFTH BRAZILIAN SYMPOSIUM ON GEOSYNTHETICS, GEOSSINTÉTICOS 2007, AND SIXTH BRAZILIAN CONGRESS ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS, REGEO' 2007 (In Portuguese), Recife. **Proceedings...**, Recife, 2007, p. 1-8 (CD-ROM).

WAHLS, H. E.; DEGODOY, N. S. Interpretation of Consolidation Test – Discussion. **Journal of Soils Mechanics and Foundation Division**. ASCE, v. 91, p.147-152, 1965.

WISSA, A. E. Z.; CHRISTIAN, J. T.; DAVIS, E. H.; HEIBERG, S. Consolidation at constant rate of strain. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division**, v. 4, SM10, p. 1393-1413, 1971.

YAO, D. T. C.; ZNIDARCIC, D. **User's manual for computer program CONDES0.** London, Boulder, Colorado: Florida Institute of Phosphate Research, 1997.

ZNIDARCIC, D. **Laboratory determination of consolidation properties of cohesive soils.** 1982. 172f. PhD. Thesis – Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, Boulder, Colorado, 1982.

ZNIDARCIC, D.; ABU-HEJLEH, A. N.; FAIRBANKS, T.; ROBERTSON, A. Seepage induced consolidation test, equipment description and users manual. **Reported Prepared for Florida Institute of Phosphate Research,** Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, Boulder, Colorado, 63 p., 1992.

ZNIDARCIC, D.; LIU, J. C. Consolidation characteristics determination for dredged material. In: ANNUAL DREDGING SEMINAR, 1989, Department of Civil Engineering, Tacoma. **Proceedings...** Tacoma, Washington, 1989, p. 45-65.

ZNIDARCIC, D.; SCHIFFMAN, R. L.; PANE, V.; CROCE, P.; KO, H. Y; OLSEN, H. W. The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: v. constant rate of deformation testing and analysis. **Géotechnique**, v. 36, n. 2, p. 227-236, 1986.

ZNIDARCIC, D.; SCHIFFMAN, R. L.; PANE, V.; CROCE, P.; KO, H. Y; OLSEN, H. W. The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: v. constant rate of deformation testing and analysis. **Géotechnique**, v. 36, n. 2, p. 227-236, 1986.