

WANDER RODRIGUES DA SILVA

**NOVA METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES DE  
SEDIMENTAÇÃO E ADENSAMENTO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2008

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV

T

S586n  
2008

Silva, Wander Rodrigues da, 1970-  
Nova metodologia para determinação de propriedades de  
sedimentação e adensamento de rejeitos de mineração /  
Wander Rodrigues da Silva. – Viçosa, MG, 2008.  
xix, 136f.: il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Roberto Francisco de Azevedo.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Referências bibliográficas: f. 131-136.

1. Rejeitos - Consolidação. 2. Sedimentação. 3. Mineração.  
4. Testes de laboratório. I. Universidade Federal de Viçosa.  
II. Título.

CDD 22.ed. 624.1

WANDER RODRIGUES DA SILVA

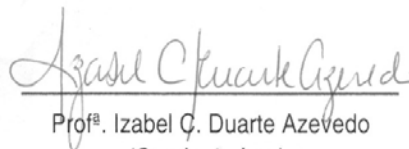
**NOVA METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES DE  
SEDIMENTAÇÃO E ADENSAMENTO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

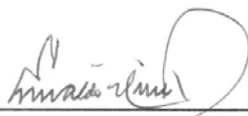
APROVADA: 22 de Agosto de 2008.



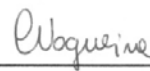
Prof. Lúcio Flávio Villar



Prof.<sup>a</sup>. Izabel C. Duarte Azevedo  
(Coorientadora)



Prof. Enivaldo Minette



Prof.<sup>a</sup>. Christianne Lyra Nogueira



Prof. Roberto Francisco de Azevedo  
(Orientador)

*A um amigo que partiu:  
“...mesmo que o tempo e a distância digam não...  
A certeza de que um dia o encontrarei.”*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pois sem ELE nada seria possível.

À minha filha Sara, pelo amor incondicional.

À minha enteada Mariana, por se tornar parte da minha vida.

À minha esposa Edilene pelo amor, pelo carinho e pela amizade.

Aos meus pais, irmãs, sobrinho e cunhados, pelo apoio e incentivo nas horas em que mais precisei.

Ao meu orientador e amigo, Professor Roberto Francisco de Azevedo, pelo apoio, pela orientação e pelos ensinamentos a todo o momento.

A todos os amigos, que contribuíram e torceram pelo meu sucesso.

Especialmente, à Universidade Federal de Viçosa, a grande responsável por toda a minha vida acadêmica e profissional.

## **BIOGRAFIA**

WANDER RODRIGUES DA SILVA, filho de Floriano Rodrigues da Silva e de Jacinta Ines Coutinho da Silva, nasceu em 13 de março de 1970, na cidade de Paula Cândido-MG.

Em agosto de 1994, graduou-se Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa-MG.

Em fevereiro de 1998, obteve o título de Mestre em Engenharia Geotécnica pela Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Desde junho de 2004, é integrante do quadro de engenheiros da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Em março de 2003, iniciou o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, em nível de Doutorado, na Universidade Federal de Viçosa (UFV), defendendo tese em 22 de agosto de 2008.

## SUMÁRIO

	<b>Página</b>
LISTA DE TABELAS .....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	ix
RESUMO .....	xvii
ABSTRACT.....	xix
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Colocação do problema .....	1
1.2 Objetivos.....	5
1.3 Organização da tese.....	7
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1 Introdução.....	8
2.2 Reservatórios de rejeito e processo de deposição .....	8
2.3 Sedimentação.....	12
2.3.1 Teoria.....	12
2.3.2 Ensaio de laboratório .....	17
2.4 Adensamento com deformações finitas .....	20
2.4.1 Teoria.....	20
2.4.2 Ensaio de laboratório .....	24
2.5 Características geotécnicas de rejeitos de mineração.....	27
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	47
3.1 Material .....	47
3.1.1 Rejeitos.....	47
3.1.2 Ensaio de caracterização.....	47
3.1.3 Ensaio edométrico tipo HCT .....	48
3.1.3.1 Descrição do equipamento.....	48

3.1.4	Ensaio de sedimentação em coluna .....	57
3.1.4.1	Descrição dos equipamentos .....	57
3.2	Métodos .....	60
3.2.1	Ensaio de caracterização .....	60
3.2.2	Ensaio edométrico tipo HCT .....	60
3.2.3	Ensaio de coluna .....	67
3.3	Metodologia proposta para interpretação do ensaio HCT .....	73
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	76
4.1	Caracterização .....	76
4.2	Ensaio de sedimentação em coluna .....	77
4.2.1	Ensaio de sedimentação na coluna grande .....	77
4.2.1.1	Rejeito de monazita .....	77
4.2.1.2	Rejeito de ácido fosfórico I .....	83
4.2.1.3	Rejeito de zinco .....	83
4.2.1.4	Rejeito de lavagem de bauxita I .....	93
4.2.1.5	Rejeito de ferro II .....	98
4.2.2	Ensaio de sedimentação na coluna pequena .....	102
4.2.2.1	Rejeito de monazita .....	102
4.2.2.2	Rejeito de zinco .....	105
4.2.2.3	Rejeito de ferro II .....	107
4.3	Ensaio edométrico Tipo HCT .....	110
4.3.1	Rejeitos de lavagem de bauxita .....	110
4.3.2	Rejeitos de ferro .....	111
4.3.3	Rejeitos de ouro .....	113
4.3.4	Rejeito de níquel .....	115
4.3.5	Rejeitos de ácido fosfórico .....	116
4.3.6	Rejeito de zinco .....	118
4.3.7	Rejeito de monazita .....	120
4.3.8	Rejeito de cobre .....	123
5.	CONCLUSÕES .....	128
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	131

## LISTA DE TABELAS

		<b>Página</b>
2.1	Resumo das características das amostras de rejeito .....	34
2.2	Limites de consistência de amostras de rejeito de lamas vermelhas .....	35
2.3	Limites de consistência de amostras de rejeitos .....	36
2.4	Peso específico das partículas .....	36
3.1	Vazões, seus respectivos tempos de curso e velocidades darcianas .....	51
4.1	Peso específico das partículas e limites de consistência dos rejeitos estudados.....	76
4.2	Distribuição granulométrica dos rejeitos estudados .....	77
4.3	Ensaio de sedimentação em coluna grande – rejeito de monazita .....	78
4.4	Parâmetros do modelo analítico .....	79
4.5	Ensaio de sedimentação em coluna grande – rejeito de ácido fosfórico .....	84
4.6	Parâmetros do modelo analítico .....	86
4.7	Ensaio de sedimentação em coluna – rejeito de zinco .....	88

	<b>Página</b>
4.8	Parâmetros do modelo analítico ..... 89
4.9	Ensaio de sedimentação em coluna – lavagem de bauxita I ..... 93
4.10	Parâmetros do modelo analítico ..... 95
4.11	Ensaio de sedimentação em coluna – rejeito de ferro II.... 98
4.12	Parâmetros do modelo analítico ..... 99
4.13	Ensaio de sedimentação em coluna – monazita ..... 103
4.14	Parâmetros do modelo analítico ..... 104
4.15	Ensaio de sedimentação em coluna – zinco..... 105
4.16	Parâmetros do modelo analítico ..... 106
4.17	Ensaio de sedimentação em coluna – ferro II..... 108
4.18	Parâmetros do modelo analítico ..... 109
4.19	Parâmetros obtidos pelo programa HCTPlus – lavagem de bauxita ..... 110
4.20	Parâmetros obtidos pelo programa HCTPlus – ferro..... 112
4.21	Parâmetros obtidos pelo programa HCTPlus – ouro ..... 114
4.22	Parâmetros obtidos pelo programa HCTPlus – níquel ..... 115
4.23	Parâmetros obtidos pelo programa HCTPlus – ácido fosfórico ..... 117
4.24	Parâmetros obtidos pelo programa HCTPlus – zinco..... 118
4.25	Parâmetros obtidos pelo programa HCTPlus – monazita.. 121
4.26	Parâmetros obtidos pelo programa HCTPlus – cobre ..... 123

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Página</b>
1.1 Dique de rejeitos da empresa Rio Capim Caulim, em Barcarena-PA. ....	2
1.2 Barragem de rejeitos de Marzagão, em Saramenha-MG. .	3
1.3 Barragem de rejeito da empresa Rio Paracatu Mineração, em Paracatu-MG.....	3
1.4 Barragem de rejeito da empresa Votorantim, em Três Marias-MG.....	4
2.1 Métodos construtivos de barragens de rejeito. ....	9
2.2 Esquema de alteamento da Barragem do Doutor. ....	11
2.3 Sequência de formação da camada de solo.....	12
2.4 Elemento infinitesimal para determinação da equação da continuidade. ....	14
2.5 Linhas características e movimento da interface líquido sobrenadante-rejeito.....	16
2.6 Coluna de Been e Sills (1981).....	18
2.7 Caixa de testes de grandes dimensões.....	19
2.8 Coluna de sedimentação usada por Santos (2001).....	20

	<b>Página</b>
2.9	Diferentes sistemas de coordenadas. .... 22
2.10	Elemento de solo na configuração inicial e deformada. .... 23
2.11	Distribuição granulométrica de lamas vermelhas de diferentes procedências..... 28
2.12	Distribuição granulométrica de alguns rejeitos. .... 28
2.13	Distribuição granulométrica de alguns rejeitos. .... 30
2.14	Distribuição granulométrica da Lama vermelha da Alumar-Norte, em São Luis do Maranhão. .... 31
2.15	Faixa de variação da distribuição granulométrica da lama vermelha neutralizada da ALCAN, em Saramenha/Ouro Preto..... 31
2.16	Faixa de variação da distribuição granulométrica da lama vermelha não-neutralizada da ALCAN, em Saramenha/Ouro Preto..... 32
2.17	Faixa de variação da distribuição granulométrica da lama vermelha neutralizada e não-neutralizada da ALCAN, em Saramenha/Ouro Preto..... 32
2.18	Faixa de variação da distribuição granulométrica de rejeitos de cobre no Chile..... 33
2.19	Intervalos de limites de consistência de alguns rejeitos. ... 35
2.20	Compressibilidade de alguns rejeitos de mineração. .... 37
2.21	Permeabilidade de alguns rejeitos de mineração. .... 37
2.22	Curvas de compressibilidade (a) e permeabilidade (b) obtidas por Alves (1992)..... 38
2.23	(a) Curvas de compressibilidade e (b) curvas de permeabilidade obtidas por Silva (1999). .... 39
2.24	Curvas obtidas na estação J13, por Santos (2000)..... 40
2.25	Curvas obtidas na estação J8, por Santos (2000)..... 41
2.26	Curvas de compressibilidade e permeabilidade obtidas por Botelho (2001)..... 42

2.27	Resultados de ensaios edométricos do tipo CRD de resíduos de lavagem e processamento de bauxita. ....	43
2.28	Comparações entre as curvas de compressibilidade e permeabilidade da lama vermelha neutralizada da ALCAN obtidas em diversos trabalhos. ....	45
2.29	Curvas de compressibilidade e permeabilidade de lamas fosfáticas. ....	46
3.1	Visão esquemática do sistema completo.....	48
3.2	nterface ar-água. ....	49
3.3	Detalhes da bomba de fluxo. ....	50
3.4	Foto da pedra porosa instalada no pedestal da célula. ....	52
3.5	Foto do tubo de acrílico rosqueado no pedestal.....	52
3.6	Foto do <i>top cap</i> instalado na ponta do pistão.....	53
3.7	Foto mostrando pedra porosa instalada no <i>top cap</i> . ....	53
3.8	Foto mostrando o sistema de carregamento. ....	54
3.9	Transdutor diferencial de pressão. ....	55
3.10	Transdutor de deslocamento. ....	55
3.11	Sistema de aquisição de dados.....	56
3.12	Sistema de aplicação de pressão utilizado na calibração dos transdutores.....	57
3.13	Coluna para ensaio de sedimentação. ....	58
3.14	Detalhe da régua de medição e do furo para retirada de amostra.....	59
3.15	Coluna para ensaio convencional de sedimentação. ....	59
3.16	Homogeneização da amostra.....	60
3.17	Preparação da amostra na câmara de ensaio.....	61
3.18	Amostra dentro da câmara durante aplicação da contrapressão.....	62

	<b>Página</b>
3.19	Ensaio de sedimentação. .... 64
3.20	Extração de amostra de rejeito durante ensaio de sedimentação. .... 68
3.21	Colocação de amostra de rejeito para determinação do teor de umidade..... 69
3.22	Pesagem da amostra em balança de alta precisão..... 69
3.23	Descida com o tempo da interface líquido sobrenadante-lama em coordenadas eulerianas..... 73
3.24	Descida com o tempo da interface líquido sobrenadante-lama em coordenadas materiais..... 71
4.1	Descida da interface com o tempo - rejeito de monazita... 79
4.2	Comparação entre as descidas da interface com o tempo, obtidas experimental e analiticamente - rejeito de monazita. .... 79
4.3	Variações do teor de umidade com o tempo, obtidas experimentalmente. .... 80
4.4	Distribuição de teor de umidade na coluna para t = 100 minutos. .... 81
4.5	Distribuição de teor de umidade na coluna para t = 200 minutos. .... 81
4.6	Distribuição de teor de umidade na coluna para t = 600 minutos. .... 82
4.7	Comparação entre as variações do teor de umidade com o tempo, obtidas experimental e analiticamente..... 82
4.8	Descida da interface com o tempo – ácido fosfórico I. .... 85
4.9	Comparação entre as descidas da interface com o tempo, obtidas experimental e analiticamente – ácido fosfórico I. .... 85
4.10	Variações do teor de umidade com o tempo, obtidas experimentalmente. .... 86
4.11	Distribuição de teor de umidade na coluna para t = 100 minutos. .... 86

4.12	Distribuição de teor de umidade na coluna para t = 200 minutos.....	87
4.13	Distribuição de teor de umidade na coluna para t = 900 minutos.....	87
4.14	Comparação entre as variações do teor de umidade com o tempo, obtidas experimental e analiticamente.....	88
4.15	Descida da interface com o tempo – zinco.....	89
4.16	Comparação entre as descidas da interface com o tempo, obtidas experimental e analiticamente – zinco. ....	90
4.17	Variações do teor de umidade com o tempo, obtidas experimentalmente.....	90
4.18	Distribuição de teor de umidade na coluna para t = 100 minutos.....	91
4.19	Distribuição de teor de umidade na coluna para t = 200 minutos.....	91
4.20	Distribuição de teor de umidade na coluna para t = 300 minutos.....	92
4.21	Comparação entre as variações do teor de umidade com o tempo, obtidas experimental e analiticamente.....	92
4.22	Descida da interface com o tempo – lavagem de bauxita I.....	94
4.23	Comparação entre as descidas da interface com o tempo, obtidas experimental e analiticamente – lavagem de bauxita I.....	94
4.24	Variações do teor de umidade com o tempo, obtidas experimentalmente.....	95
4.25	Distribuição de teor de umidade na coluna para t = 200 minutos.....	96
4.26	Distribuição de teor de umidade na coluna para t = 400 minutos.....	96
4.27	Distribuição de teor de umidade na coluna para t = 900 minutos.....	97

	<b>Página</b>
4.28	Comparação entre as variações do teor de umidade com o tempo obtidas experimental e analiticamente..... 97
4.29	Descida da interface com o tempo – rejeito de ferro II. .... 99
4.30	Comparação entre as descidas da interface com o tempo, obtidas experimental e analiticamente – rejeito de ferro II. .... 99
4.31	Variações do teor de umidade com o tempo, obtidas experimentalmente. .... 100
4.32	Distribuição de teor de umidade na coluna para t = 100 minutos. .... 100
4.33	Distribuição de teor de umidade na coluna para t = 200 minutos. .... 101
4.34	Distribuição de teor de umidade na coluna para t = 600 minutos. .... 101
4.35	Comparação entre as variações do teor de umidade com o tempo, obtidas experimental e analiticamente..... 102
4.36	Descida da interface com o tempo – monazita..... 103
4.37	Comparação entre as descidas da interface com o tempo, obtidas experimental e analiticamente – monazita. 104
4.38	Comparação entre as permeabilidades obtidas através do ensaio em coluna grande e em coluna pequena, em função do índice de vazios – monazita..... 104
4.39	Descida da interface com o tempo – zinco. .... 106
4.40	Comparação entre as descidas da interface com o tempo, obtidas experimental e analiticamente – zinco. .... 106
4.41	Comparação entre as permeabilidades obtidas através do ensaio em coluna grande e em coluna pequena, em função do índice de vazios - zinco..... 107
4.42	Descida da interface com o tempo – ferro II. .... 108
4.43	Comparação entre as descidas da interface com o tempo, obtidas experimental e analiticamente – ferro II .... 109

4.44	Comparação entre as permeabilidades obtidas através do ensaio em coluna grande e em coluna pequena, em função do índice de vazios – ferro II.....	109
4.45	Curvas de compressibilidade dos rejeitos de lavagem de bauxita.....	110
4.46	Curvas de permeabilidade dos rejeitos de lavagem de bauxita.....	111
4.47	Curvas de compressibilidade dos rejeitos de ferro.....	112
4.48	Curvas de permeabilidade dos rejeitos de ferro II.....	112
4.49	Comparação entre as permeabilidades obtidas através do ensaio em coluna grande e em coluna pequena, em função do índice de vazios – ferro II.....	113
4.50	Comparação entre as permeabilidades obtidas através do ensaio em coluna grande e em coluna pequena, em função do índice de vazios – ferro II.....	113
4.51	Curvas de compressibilidade dos rejeitos de ouro.....	114
4.52	Curvas de permeabilidade dos rejeitos de ouro.....	115
4.53	Curvas de compressibilidade dos rejeito de níquel.....	116
4.54	Curvas de permeabilidade do rejeito de níquel.....	116
4.55	Curvas de compressibilidade dos rejeitos de ácido fosfórico.....	117
4.56	Curvas de permeabilidade dos rejeitos de ácido fosfórico.....	118
4.57	Curvas de compressibilidade do rejeito de zinco.....	119
4.58	Curvas de permeabilidade do rejeito de zinco.....	119
4.59	Comparação entre as permeabilidades obtidas no ensaio em coluna grande e em coluna pequena, em função do índice de vazios – zinco.....	120
4.60	Comparação entre as permeabilidades obtidas no ensaio em coluna grande e em coluna pequena, em função do índice de vazios – zinco.....	120
4.61	Curvas de compressibilidade do rejeito de monazita.....	121

	<b>Página</b>
4.62	Curvas de permeabilidade do rejeito de monazita..... 122
4.63	Comparação entre as permeabilidades obtidas no ensaio em coluna grande e em coluna pequena, em função do índice de vazios – monazita. .... 122
4.64	Comparação entre as permeabilidades obtidas no ensaio em coluna grande e em coluna pequena, em função do índice de vazios – monazita. .... 123
4.65	Curvas de compressibilidade do rejeito de cobre. .... 124
4.66	Curvas de permeabilidade do rejeito de cobre. .... 124
4.67	Curvas de compressibilidade de rejeitos. .... 126
4.68	Curvas de permeabilidade de rejeitos. .... 127

## RESUMO

SILVA, Wander Rodrigues, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2008. **Nova metodologia para determinação de propriedades de sedimentação e adensamento de rejeitos de mineração.** Orientador: Roberto Francisco de Azevedo. Coorientadores: Eduardo Antônio Gomes Marques e Izabel Christina d'Almeida Duarte Azevedo.

No Brasil, a maioria dos rejeitos é lançada em forma de polpa em reservatórios formados por diques ou barragens. A altura dos diques e das barragens depende do transporte, da sedimentação e do adensamento dos rejeitos no reservatório. Dentre os três processos, a sedimentação e o adensamento são os que produzem variações de volume e, portanto, têm grande importância na determinação da altura daquelas estruturas. Pela teoria de Kynch, a sedimentação depende da relação entre o índice de vazios e o coeficiente de permeabilidade do rejeito, enquanto o adensamento depende, além dessa relação, da relação entre a tensão efetiva e o índice de vazios do rejeito. Essas relações podem ser obtidas em laboratório com o ensaio de adensamento induzido por forças de percolação (*Hydraulic Consolidation Test - HCT*). Entretanto, a interpretação dos resultados desse ensaio obriga a execução de etapas adicionais que o tornam mais demorado e menos preciso. O presente trabalho teve como principais objetivos, primeiro, desenvolver uma nova forma de interpretar e executar o ensaio HCT para determinar as curvas de compressibilidade e permeabilidade de rejeitos e, segundo, ampliar o banco

de dados com resultados de ensaios HCT em diferentes rejeitos de mineração brasileiros. As principais conclusões apontam que a nova metodologia proposta cumpre com o objetivo de tornar o ensaio HCT mais rápido e preciso, e que o conjunto de resultados obtidos com os diversos rejeitos ensaiados contribui significativamente para a ampliação de um banco de dados de resultados de ensaios HCT em rejeitos brasileiros.

## ABSTRACT

SILVA, Wander Rodrigues, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2008. **New methodology for the determination of properties of sediments and mine waste adviser:** Roberto Francisco de Azevedo. Co-advisers: Eduardo Antônio Gomes Marques and Izabel Christina d'Almeida Duarte Azevedo.

In Brazil, most mine rejects are disposed as pulp in reservoirs formed by dikes and dams. The height of these dikes and dams depends on reject transport, sedimentation and density in the reservoirs. Among these processes, sedimentation and density produce variations in volume, thus being of great importance in the determination of these structures' height. Based on Kynch's theory, sedimentation depends on the relationship between void ratio and the permeability coefficient of the reject while density, besides this relation, depends on the relation between the effective tension and the void ratio of the rejects. These relations can be obtained in the laboratory, with density assay induced by percolation forces (Hydraulic Consolidation Test - HCT). However, in order to interpret the results of these assays, additional steps are necessary, rendering interpretation longer and less precise. The main objectives of this study were: first, to develop a new procedure to interpret and implement the HCT assays and, secondly, to increase the data base with HCT assays in different Brazilian mineral rejects. The results indicate that the new methodology made the HCT test faster, and that the set of results obtained with the several rejects tested has contributed significantly to increase the database of HCT results of Brazilian mine rejects.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Colocação do problema

O interesse da humanidade em relação à preservação do meio ambiente tem aumentado nas últimas décadas. Esse interesse tem sido acompanhado por aspectos legais cada vez mais restritivos, tendo em vista a proteção das espécies e dos recursos naturais, de forma a garantir melhor qualidade de vida.

A disposição e o armazenamento de resíduos, em particular os de mineração, são problemas que requerem estudos especiais de engenharia, que objetivam diminuir o impacto ambiental e atender à legislação.

Anualmente, a indústria de mineração explora centenas de milhões de toneladas de solo e rocha para extrair minerais que, após beneficiamento, servem para produção de uma quantidade de produtos fundamentais para a civilização moderna (CARRIER *et al.*, 1983).

Frequentemente, a maior parte do material explorado é resíduo, ou seja, estéril e, ou, rejeito. Estéril é a designação usada para o material escavado que não contém o mineral desejado, ou o contém, porém em quantidade insuficiente para viabilizar economicamente sua exploração. Rejeito é o nome atribuído ao que se descarta, após o beneficiamento do minério. Em alguns casos, como na mineração de cobre ou de ouro, os rejeitos podem representar mais de 99% do resíduo.

Os rejeitos são descartados sob a forma sólida ou de polpa (lama) em superfície, em cavidades subterrâneas, ou em ambientes subaquáticos. No caso de rejeitos sólidos, o descarte é realizado por meio de caminhões ou correias transportadoras. Quando se trata de rejeitos na forma de polpa, o descarte é feito por meio de tubulação, exigindo, normalmente, um sistema de bombeamento.

No Brasil, a maioria dos rejeitos é lançada em forma de polpa em reservatórios formados por diques, conforme apresentado na Figura 1.1, ou barragens, de acordo com as Figuras 1.2, 1.3 e 1.4, conhecidas como barragens para rejeito. Em geral, os diques são de pequeno porte e as barragens são quase sempre construídas em vales menores, secos ou que coletam águas de pequenas bacias.

A altura dos diques ou das barragens depende do estudo do enchimento dos reservatórios com o rejeito e, naturalmente, condiciona o empreendimento. Esse estudo envolve o transporte, a sedimentação e o adensamento dos rejeitos no reservatório. Dentre os três processos, a sedimentação e o adensamento são os que produzem variações de volume e, portanto, têm grande importância na determinação da vida útil do reservatório.



Figura 1.1 – Dique de rejeitos da empresa Rio Capim Caulim, em Barcarena-PA.

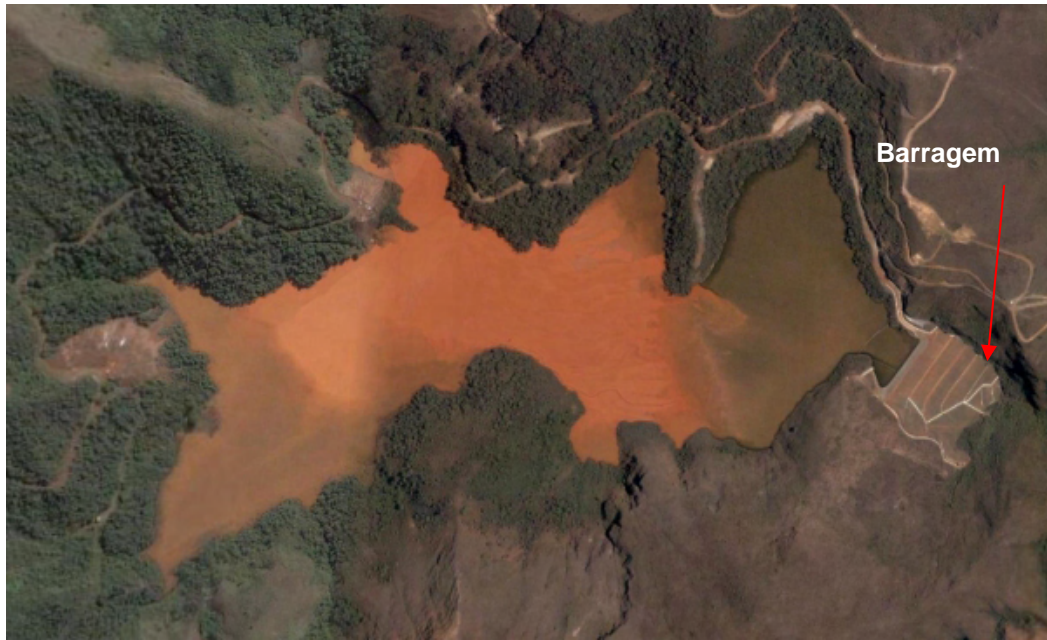


Figura 1.2 – Barragem de rejeitos de Marzagão em Saramenha-MG.



Figura 1.3 – Barragem de rejeito da empresa Rio Paracatu Mineração, em Paracatu-MG.



Figura 1.4 – Barragem de rejeito da empresa Votorantim, em Três Marias-MG.

O processo de sedimentação tem sido habitualmente estudado pela lei de Stokes, que supõe que a velocidade de queda de uma partícula esférica em um líquido é função unicamente de seu peso específico e da viscosidade e do peso específico do líquido. Naturalmente, em um lago de rejeitos são inúmeras as partículas sedimentando-se simultaneamente, de forma que a interferência entre elas é inevitável e, portanto, a lei de Stokes não se aplica adequadamente. Por causa disso, a teoria de sedimentação restringida, ou seja, com interferência entre as partículas, desenvolvida por Kynch (1952), tem sido usada nos estudos de enchimento de reservatórios de rejeitos.

Por outro lado, o processo de adensamento tem sido estudado de acordo com a teoria de Terzaghi (1943). Ocorre que essa teoria, dentre outros fatores, supõe que as deformações são infinitesimais, ou seja, a geometria inicial permanece inalterada. No caso de rejeitos, materiais muito pouco consistentes, a hipótese de deformações infinitesimais é inaceitável, o que torna inadequada a teoria de Terzaghi. Nesse sentido, Mikasa (1963) e Gibson *et al.* (1967) desenvolveram, aproximadamente na mesma época e de forma

independente, uma teoria de adensamento com deformações finitas, que tem sido usada para representar o processo de adensamento dos rejeitos durante o enchimento do reservatório.

A teoria de sedimentação desenvolvida por Kynch (1952) depende da relação entre o índice de vazios e o coeficiente de permeabilidade do rejeito, enquanto a teoria de adensamento com deformações finitas de Gibson *et al.* (1967) depende das relações entre o índice de vazios e a tensão efetiva (compressibilidade) e o índice de vazios e o coeficiente de permeabilidade do rejeito. Essas relações podem ser obtidas por meio de ensaios de campo e, ou, de laboratório (AZEVEDO *et al.*, 1999).

No campo, normalmente são usados amostradores especiais e sondas piezométricas para determinação das relações de compressibilidade ( $\sigma'$  versus  $e$ ) e permeabilidade ( $k$  versus  $e$ ) (SANTOS, 2000; BOTELHO, 2001; VILLAR, 1990, 2002). No laboratório existem vários equipamentos para determinação dessas relações (SILVA, 1999). Dentre esses, na última década, o ensaio de adensamento por forças de percolação (HCT) tem se destacado por fornecer resultados mais consistentes (GOBARA *et al.*, 1995; ABU-HEJLEH *et al.*, 1996; SILVA, 1999; SILVA; AZEVEDO, 1999a, b; BOTELHO, 2001). Entretanto, como será visto mais adiante, a metodologia atualmente usada na interpretação desse ensaio envolve quatro fases distintas, o que o torna mais demorado, trabalhoso, oneroso e, além disso, menos preciso.

Para execução do ensaio HCT é necessário ter experiência. Em vista disso e em face da grande expansão das atividades de mineração no Brasil, que naturalmente aumentou a demanda pela execução de ensaios de adensamento hidráulico, é importante que se amplie as informações obtidas com esses ensaios com diferentes tipos de rejeito, o que facilitará a execução de novos ensaios.

## **1.2 Objetivos**

O presente trabalho teve como principais objetivos desenvolver uma forma simplificada de executar e interpretar o ensaio HCT e ampliar o banco de dados de resultados de ensaios HCT realizados com rejeitos de mineração brasileiros.

Para alcançar os objetivos da tese, as seguintes etapas foram executadas:

- Aperfeiçoar o edômetro especial para ensaios de adensamento por forças de percolação (HCT) desenvolvido por Silva (1999) e Silva e Azevedo, (1999a, b);
- Propor uma metodologia para determinação de parâmetros de sedimentação e adensamento de rejeitos, utilizando, a fase de fluxo do ensaio HCT e um ensaio de sedimentação em uma coluna convencional. Para isso foi necessário:
  - Construir uma coluna de grandes dimensões e realizar ensaios de sedimentação, procurando medir a descida da interface líquido sobrenadante-rejeito ao longo do tempo e a distribuição do índice de vazios do rejeito com a profundidade.
  - Interpretar os resultados dos ensaios de coluna com os fornecidos pela teoria de sedimentação restringida de Kynch (1952).
  - Realizar ensaios em uma coluna de sedimentação convencional.
  - Interpretar a descida da interface líquido sobrenadante-rejeito com o tempo, obtida nesse ensaio com a teoria de Kynch (1952).
  - Comparar os parâmetros da teoria de Kynch (1952) obtidos nos dois ensaios de sedimentação em coluna.
  - Utilizar o edômetro tipo HCT e a coluna de sedimentação convencional para realizar ensaios com alguns rejeitos de mineração.
  - Comparar as curvas de compressibilidade e permeabilidade obtidas com a técnica convencional e a metodologia proposta na tese.
  - Utilizar a nova metodologia para realizar ensaios em rejeitos de diferentes origens.

### **1.3 Organização da tese**

O trabalho foi dividido em cinco capítulos, incluindo este, de Introdução.

No Capítulo 2 apresentam-se os tipos de diques e barragens de rejeito e os processos envolvidos no processo de deposição dos rejeitos nos reservatórios. Sumarizam-se as teorias de sedimentação de Kynch (1952) e adensamento de Gibson *et al.* (1967), bem como os principais ensaios de laboratório para determinação da compressibilidade e permeabilidade de rejeitos necessárias para as teorias. Por fim, faz-se uma revisão de trabalhos anteriores, nos quais foram determinadas propriedades geotécnicas - índices físicos, compressibilidade e permeabilidade – de rejeitos de mineração.

No Capítulo 3 são descritos os rejeitos ensaiados e os equipamentos utilizados, e desenvolvidos, as metodologias normalmente usadas na execução dos ensaios e a nova metodologia proposta.

No Capítulo 4 apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos nos ensaios.

Finalmente, no Capítulo 5, são apresentadas as principais conclusões extraídas deste trabalho.

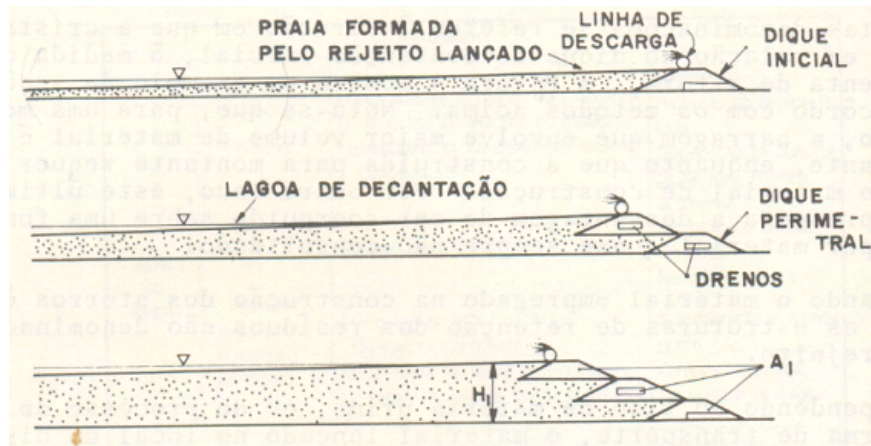
## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Introdução**

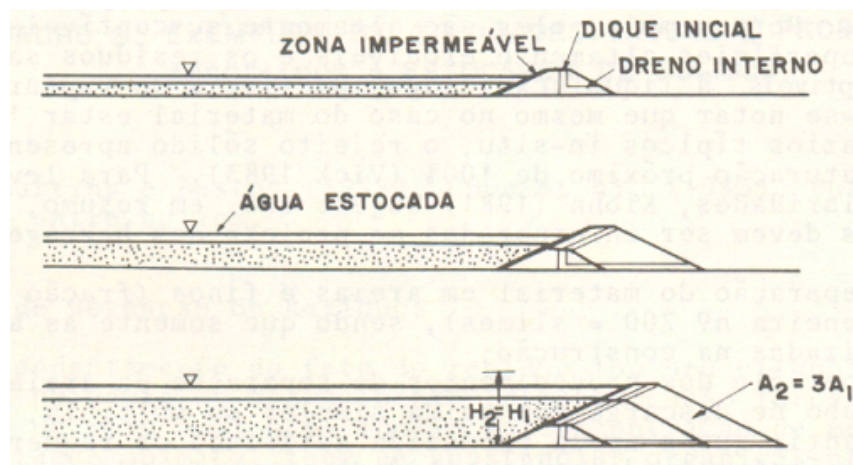
Este capítulo inicia-se com a apresentação dos diferentes tipos de alteamento de diques e barragens que formam os reservatórios de rejeito, para, em seguida, descrever as fases que ocorrem no processo de deposição dos rejeitos nos reservatórios. Como no processo de deposição a sedimentação e o adensamento são preponderantes, descrevem-se os principais aspectos das teorias de sedimentação e adensamento apropriadas para estudar o enchimento dos reservatórios, bem como os principais ensaios de laboratório para se obterem as propriedades dos rejeitos necessárias a essas teorias. Em seguida, faz-se uma síntese dos trabalhos anteriores nos quais foram determinadas essas e outras propriedades de rejeitos de mineração. Por fim, faz-se uma síntese da revisão bibliográfica.

### **2.2 Reservatórios de rejeito e processo de deposição**

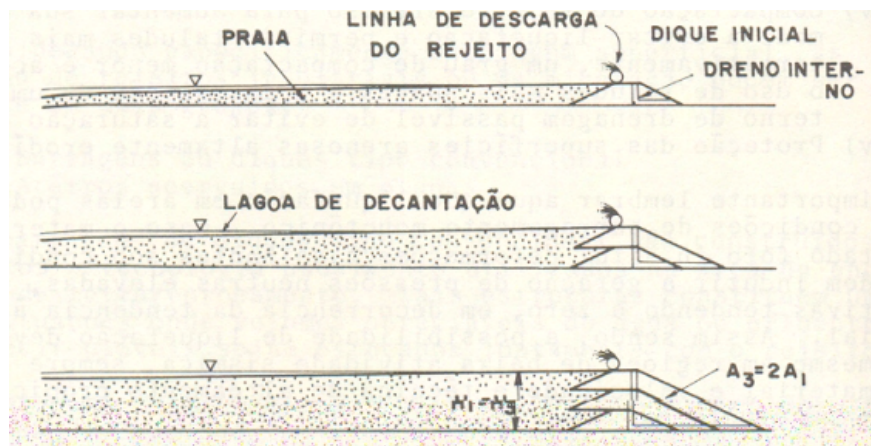
Os reservatórios que recebem rejeitos de mineração em forma de polpa são, normalmente, feitos por diques e barragens construídos em etapas, com alteamentos sucessivos. Os três métodos construtivos comumente empregados no alteamento dessas obras são: método de montante, método de jusante e método de linha de centro (Figura 2.1).



(a)



(b)



(c)

(a) alteamento para montante; (b) alteamento para jusante; e  
(c) alteamento pela linha de centro

Fonte: Campos (1986).

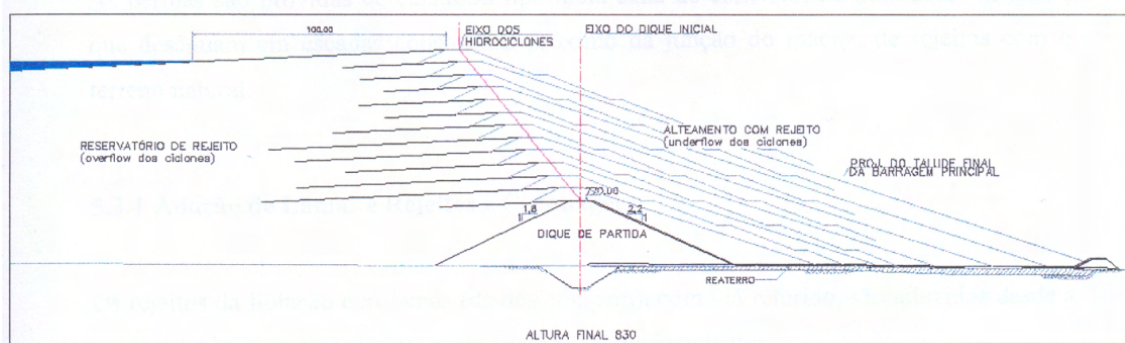
Figura 2.1 – Métodos construtivos de barragens de rejeito.

O método de montante consiste no deslocamento para montante do eixo da crista da barragem. O barramento começa com a construção de um dique (dique de partida), e, logo após, inicia-se o lançamento de rejeitos a montante da periferia da crista. Devido às segregações granulométricas que normalmente ocorrem durante o lançamento dos rejeitos, a fração grossa fica depositada próximo ao dique e servirá de suporte para o próximo alteamento (Figura 2.1a). Embora o método de montante seja o mais econômico, apresenta como desvantagens menor segurança, suscetibilidade à liquefação, limitada altura de alteamento e linha freática elevada, que pode causar problemas de instabilidade do talude de jusante.

O método de jusante consiste no alteamento da barragem para jusante do dique de partida, de tal maneira que a crista da barragem se move para jusante. Normalmente na sua construção são empregados solos de empréstimo ou estéril provenientes da lavra (Figura 2.1b). Este é o método mais seguro, visto ser possível controlar a qualidade do maciço e a posição da linha freática através da construção de um sistema contínuo de drenagem interna. A grande desvantagem é o alto custo devido ao grande volume de solo compactado necessário para construção do maciço da barragem.

No método de linha de centro o rejeito é lançado perifericamente a montante, formando uma praia, e, nos sucessivos alteamentos, lança-se o aterro no limite da praia e no talude de jusante do dique de partida. Os eixos da crista do dique de partida e da barragem após o alteamento são, praticamente, coincidentes (Figura 2.1c).

Existem, entretanto, situações nas quais nenhum desses três métodos de alteamento é seguido. Por exemplo, a Barragem do Doutor da Companhia Vale do Rio Doce, no município de Ouro Preto, Minas Gerais, que recebe rejeitos e lamas resultantes da concentração de minério de ferro das Minas de Capanema e Timbopeba, foi alteada para montante e jusante, mas não pela linha de centro de seu dique de partida (Figura 2.2). Esse método é, às vezes, denominado método da linha de centro modificado (GIBSON, 1998).

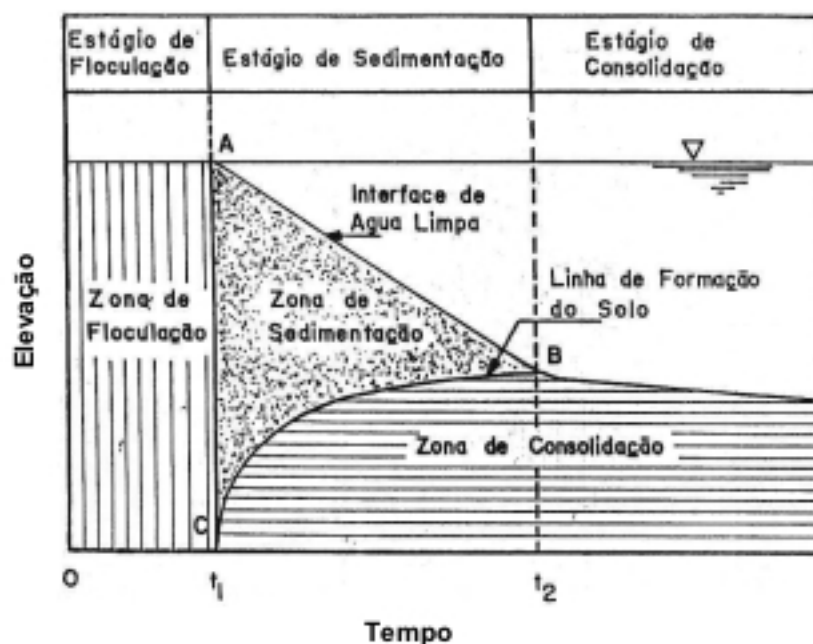


Fonte: Araújo (2006).

Figura 2.2 – Esquema de alçamento da Barragem do Doutor.

Depois de lançados nos reservatórios, os rejeitos passam por um processo de sedimentação e adensamento. Imai (1981) propôs, de forma simplificada para facilitar o entendimento, a seguinte seqüência para esses processos (Figura 2.3):

- **Etapa de floculação** – na qual não ocorrem recalques, apenas a floculação de pequenas partículas, formando partículas de maiores dimensões.
- **Etapa de sedimentação** – na qual as partículas se tornam suficientemente grandes para iniciarem movimento descendente, devido ao seu peso próprio. Do tempo  $t_1$  até o tempo  $t_2$ , no topo da coluna vai se formando uma camada de líquido sobrenadante abaixo da qual a concentração das partículas é ainda muito pequena e, conseqüentemente, a movimentação de uma partícula não interfere na movimentação da outra, resultando em um processo de sedimentação sem restrições. Logo abaixo, à medida que a concentração aumenta, o processo de sedimentação ocorre com a interferência de uma partícula sobre a outra, embora as tensões efetivas ainda sejam nulas. Mais no fundo aparece uma camada de espessura crescente, com concentração suficientemente grande para que apareçam tensões efetivas. Nessa camada já ocorre o processo de adensamento, devido ao peso próprio do material.
- **Etapa de adensamento** – a partir do tempo  $t_2$  todo o sedimento já se transformou em solo e se encontra adensando, devido às forças de peso próprio.



Fonte: modificado de Imai (1981).

Figura 2.3 – Sequência de formação da camada de solo.

Vários estudos descrevem os processos de sedimentação e adensamento isoladamente (TERZAGHI, 1943; KYNCH, 1952; GIBSON *et al.*, 1967, dentre outros). Esses processos, entretanto, ocorrem simultaneamente, por isso algumas pesquisas foram realizadas para tratá-los em conjunto (PANE, 1985; CONSOLI, 1990; ALVES, 1992; TOORMAN, 1996; AZEVEDO *et al.*, 1997; SILVA *et al.*, 1998; TOORMAN, 1998, 1999).

## 2.3 Sedimentação

### 2.3.1 Teoria

A sedimentação livre, que trata da queda de uma partícula esférica em um meio fluido, foi estudada pioneiramente por Stokes, em 1851 (<http://pt.wikipedia.org/wiki/Wikip%C3%A9dia>). Alguns trabalhos experimentais são, até hoje, baseados na lei de Stokes, por exemplo, a determinação da distribuição granulométrica da parte fina dos solos.

Kynch (1952) formulou a primeira abordagem do processo de sedimentação de uma mistura, em que diversas partículas sedimentam em um líquido com interferência entre elas, que, como mencionado, é mais adequado

para simular o que acontece durante o enchimento de um reservatório de rejeitos. O autor propôs uma teoria de sedimentação restringida baseada, na hipótese fundamental de que a velocidade de queda de uma partícula ( $v$ ) não é somente função das propriedades da partícula e do líquido, como na teoria de Stokes, mas também da concentração de partículas ( $c$ ) na sua vizinhança, ou seja, quanto maior a concentração de partículas, menor a velocidade de queda e vice-versa. Desta forma, a teoria de Kynch considera a continuidade das partículas, embora não leve em conta o equilíbrio de forças da partícula (equação de movimento).

A concentração de partículas é definida como:

$$c = \frac{V_s}{V_T} \quad (2.1)$$

em que  $V_s$  e  $V_T$  são, respectivamente, os volumes de sólidos e o volume total.

Designa-se ( $S$ ) o fluxo de partículas que atravessa uma seção horizontal por unidade de área e tempo:

$$S = c \cdot v(c) \quad (2.2)$$

em que  $v$  é a velocidade de queda de uma partícula.

Estudando a continuidade das partículas entre duas seções horizontais infinitesimalmente próximas,  $\xi$  e  $\xi+d\xi$ , num intervalo de tempo  $dt$ , a acumulação de partículas entre essas seções é a diferença entre o fluxo de partículas que entra na seção  $\xi$ . e o fluxo de partículas que sai na seção  $\xi+d\xi$ . Assim, pode-se escrever, com base na Figura 2.4:

$$[S(\xi + d\xi) - S(\xi)]dt = -[c(\xi + d\xi) - c(\xi)]d\xi \quad (2.3)$$

ou:

$$-\frac{c(\xi + d\xi) - c(\xi)}{\partial t} = \frac{S(\xi + d\xi) - S(\xi)}{\partial \xi} = \frac{\partial S}{\partial \xi} \quad (2.4)$$

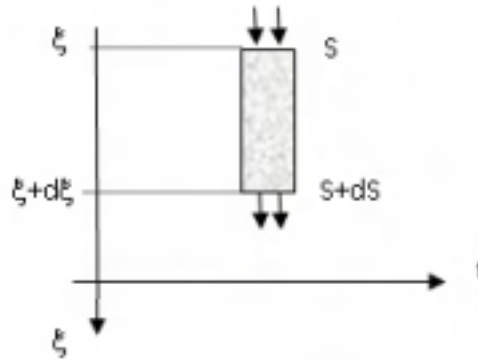


Figura 2.4 – Elemento infinitesimal para determinação da equação da continuidade.

Notar que o sinal negativo indica que se ocorre acumulação de partículas, a concentração na entrada  $c(\xi)$  é menor que na saída  $c(\xi + d\xi)$  e o fluxo de partículas que entra  $S(\xi)$  é maior que o fluxo de partículas que sai  $S(\xi + d\xi)$ . A equação 2.4 que representa a continuidade da fase sólida (partículas) pode ser escrita como:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial \xi} = 0 \quad (2.5)$$

Considerando a equação (2.1),

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial c} \frac{\partial c}{\partial \xi} = \frac{\partial c}{\partial t} + \left[ c \frac{\partial S}{\partial c} + v(c) \right] \frac{\partial c}{\partial \xi} = 0 \quad (2.6)$$

Ou,

$$\frac{\partial c}{\partial t} + V(c) \frac{\partial c}{\partial \xi} = 0 \quad (2.7)$$

na qual  $V(c)$ , variação do fluxo de partículas com a concentração, é igual a:

$$V(c) = c \frac{\partial S}{\partial c} + v(c) \quad (2.8)$$

A equação (2.7) é uma equação diferencial convectiva que pode ser resolvida pelo método das características (Wylie 1975). Nesse método, designa-se como característica uma curva no espaço das variáveis independentes, nesse caso  $\xi$  e  $t$ , ao longo da qual a variável dependente, neste caso a

concentração de partículas, é constante. Portanto, no caso em apreço, as curvas características são linhas de concentração constantes, ou seja, numa mesma curva característica tem-se que:

$$c(\xi, t) = c(\xi + d\xi, t + dt) \quad (2.9)$$

ou,

$$dc(\xi, t) = \frac{\partial c}{\partial \xi} d\xi + \frac{\partial c}{\partial t} dt = 0 \quad (2.10)$$

Substituindo  $\frac{\partial c}{\partial t}$  definido na equação (2.7) em (2.10), obtém-se:

$$\frac{\partial c}{\partial \xi} (d\xi - V(c) dt) = 0 \quad (2.11)$$

ou seja,

$$d\xi - V(c) dt = 0 \quad (2.12)$$

Que é a equação diferencial das curvas características e pode ser escrita como:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = V(c) \quad (2.13)$$

O lado direito da equação (2.13), é constante porque, ao longo da curva característica, a concentração ( $c$ ) é constante. Portanto, no caso em estudo, as curvas características, expressas pela integral da equação 2.13, são linhas retas expressas por:

$$\xi = \xi_0 + V(c)t \quad (2.14)$$

Na Figura 2.5 estão as linhas características e a variação com o tempo da interface líquido sobrenadante – rejeito. A altura inicial da mistura ( $H_0$ ) e o concentração de sólidos inicial uniforme ( $c_0$ ) são conhecidas.

A interseção de uma linha característica qualquer (KP) com a interface ABCD, ponto P( $\xi_p$  e  $t_p$ ), pode ser determinada da seguinte forma: a linha característica (KP) representa a elevação na mistura com variação de fluxo  $V(c_0)$  de um nível ( $\xi_0$ ), através do qual, partículas com índice de vazios ( $c_0$ )

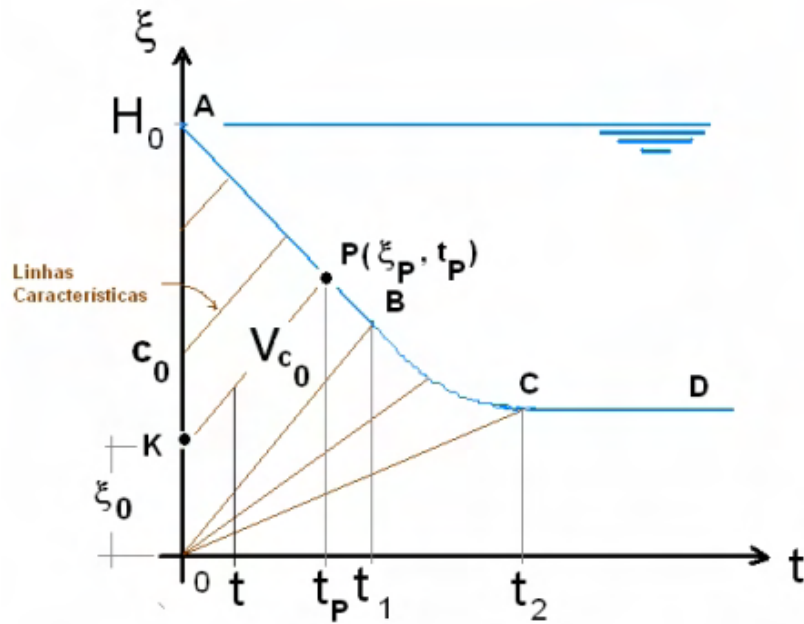


Figura 2.5 – Linhas características e movimento da interface líquido sobrenadante-rejeito.

caem com velocidade  $v(c_0)$ . Num tempo ( $t$ ), o número de partículas que atravessaram esse nível,  $n(\xi_0)$ , é igual a:

$$n(\xi_0) = c_0 [V(c_0) + v(c_0)]t \quad (2.15)$$

Esse nível atinge a interface quando o número de partículas iguala-se ao número de partículas originalmente acima do nível  $\xi_0$ , correspondente ao ponto K, ou seja:

$$n(\xi_0) = c_0 (H_0 - \xi_0) \quad (2.16)$$

As equações 2.15 e 2.16 permitem o cálculo do tempo ( $t_p$ ):

$$t_p = \frac{H_0 - \xi_0}{V(c_0) + v(c_0)} \quad (2.17)$$

Conhecido ( $t_p$ ), o valor de  $\xi_p$  pode ser calculado por (2.13):

$$\xi_p = \xi_0 + V(c_0)t_p \quad (2.18)$$

No próximo capítulo explica-se a metodologia para interpretação dos ensaios de coluna à luz da teoria de Kynch.

### 2.3.2 Ensaio de laboratório

Os ensaios de sedimentação em colunas de pequenas dimensões são frequentemente usados em laboratório de geotecnia, para determinação da distribuição granulométrica das partículas menores dos solos.

No entanto, os ensaios de sedimentação nessas colunas podem ser úteis, dentre outras coisas, para determinação da curva de permeabilidade de solos moles e, ou, rejeitos, como será mostrado nesta tese.

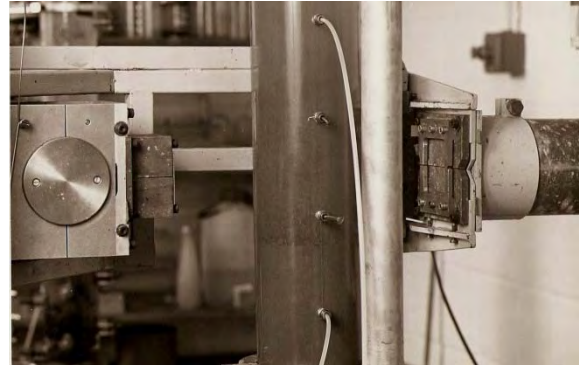
Been e Sills (1981) desenvolveram uma coluna de acrílico de 10,2 cm de diâmetro e 200 cm de altura para estudar a sedimentação e o adensamento por peso próprio de solos moles (Figura 2.6). Um dispositivo de raios X permite determinar a distribuição de índice de vazios ao longo da altura da amostra durante o ensaio. Transdutores de pressão medem a poro-pressão em diversos pontos da amostra. Com a distribuição de índice de vazios, obtém-se a distribuição de tensão total e, com as poro-pressões medidas, pode-se calcular a distribuição de tensão efetiva na porção já em adensamento da coluna.

Alves (1992) utilizou esse equipamento para determinar o comportamento de sedimentação e adensamento de uma lama vermelha proveniente do processo de produção de alumina da ALCAN em Ouro Preto, Minas Gerais (CAMPOS et al. 1994). Essa coluna, indiscutivelmente mais interessante que a utilizada nesta tese, é dispendiosa e, além disso, a execução dos ensaios exige cuidados especiais em função do uso de raio X.

Pacheco e Melo (1987) apresentaram resultados de sedimentação realizados em numa coluna de grandes dimensões (1 x 1 m na base e 3 m de altura), conforme ilustrado na Figura 2.7. Segundo os autores, os resultados não são conclusivos em função do pequeno número de ensaios realizados. Entretanto, comentam que esses ensaios são particularmente importantes na definição da transição entre a sedimentação e o início do adensamento, na caracterização do comportamento geotécnico do rejeito e na pesquisa das relações entre índice de vazios, tensões efetivas e coeficiente de permeabilidade, para serem usadas nas teorias de adensamento com deformações finitas. Essa coluna possibilita as mesmas medições da coluna maior usada nesta tese, entretanto os ensaios são mais dispendiosos e difíceis de serem executados.



(a)



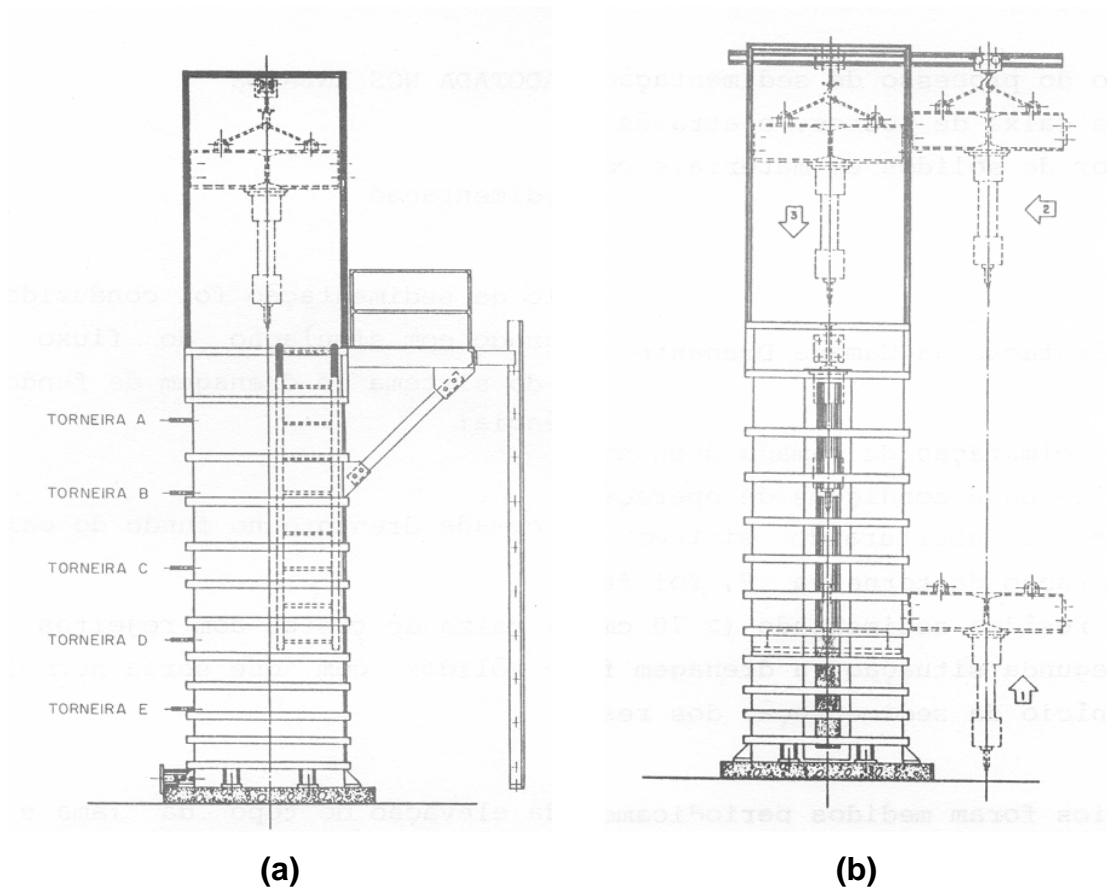
(b)

a) Vista geral do equipamento; e b) detalhe do emissor e receptor de raio X.

Figura 2.6 – Coluna de Been e Sills (1981).

Santos (2001) estudou a otimização da disposição de sedimento dragado por meio do acréscimo de polímeros não-iônicos. Para isso, procurou avaliar o processo de sedimentação das partículas de misturas, colocadas em uma coluna cilíndrica transparente, através da observação da variação da densidade em função do tempo e da posição, utilizando emissores e receptores de raio  $\gamma$  e a técnica de atenuação desses raio (Figura 2.8). A coluna utilizada é mais sofisticada e mais cara que a usada nesta tese, e a execução dos ensaios exige cuidados especiais.

No Brasil, Abreu (1989), Abreu *et al.* (1990) e Alves (1992) foram os primeiros a programar a teoria de Kynch e a comparar resultados experimentais e analíticos. Os ensaios de sedimentação foram realizados em colunas normalmente usadas em laboratório de geotecnia para determinação da distribuição granulométrica de solos finos. Foram estudados dois materiais, um rejeito de bauxita proveniente do processo de fabricação de alumínio e lamas com diferentes índices de vazios iniciais, fabricadas em laboratório,



(a)

(b)

(a) vista lateral; e (b) vista frontal.

Fonte: Pacheco e Melo (1987)

Figura 2.7 – Caixa de testes de grandes dimensões.

misturando-se água e caulinita. Constatou-se boa concordância entre os resultados experimentais e teóricos.

Azevedo *et al.* (1994) apresentaram a análise numérica dos ensaios de sedimentação em coluna de grandes dimensões realizados por Alves (1992) e Campos *et al.* (1994). Os resultados numéricos e experimentais são razoavelmente semelhantes.

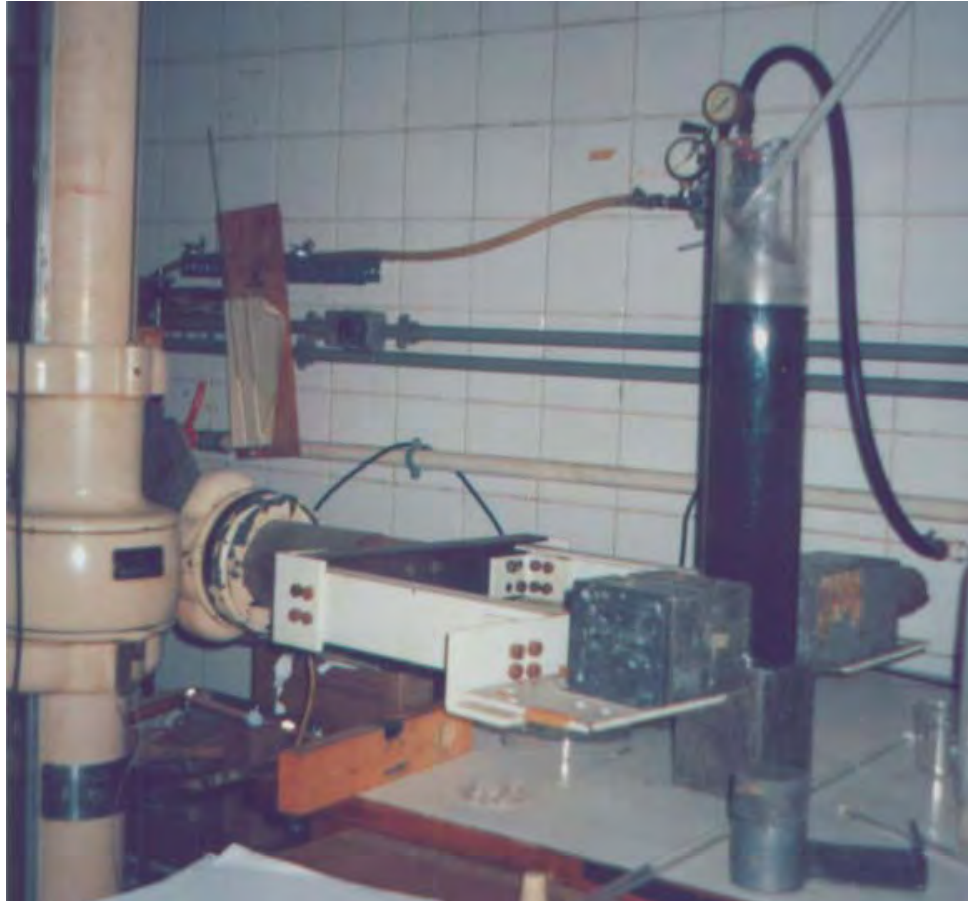


Figura 2.8 – Coluna de sedimentação usada por Santos (2001).

## 2.4 Adensamento com deformações finitas

### 2.4.1 Teoria

Como mencionado, pelo fato de os rejeitos de mineração terem grandes deformações ao serem depositados em reservatórios, a hipótese de deformações infinitesimais da teoria de Terzaghi não é razoável. Em função disso, Mikasa (1963) e Gibson *et al.* (1967) desenvolveram uma teoria unidimensional, denominada teoria do adensamento com deformações finitas, portanto mais adequada para estudar o adensamento de rejeitos.

Entretanto, como se trata de uma teoria em que a geometria é variável, é necessário introduzir conceitos de diferentes tipos de sistemas de coordenadas, antes de apresentá-la.

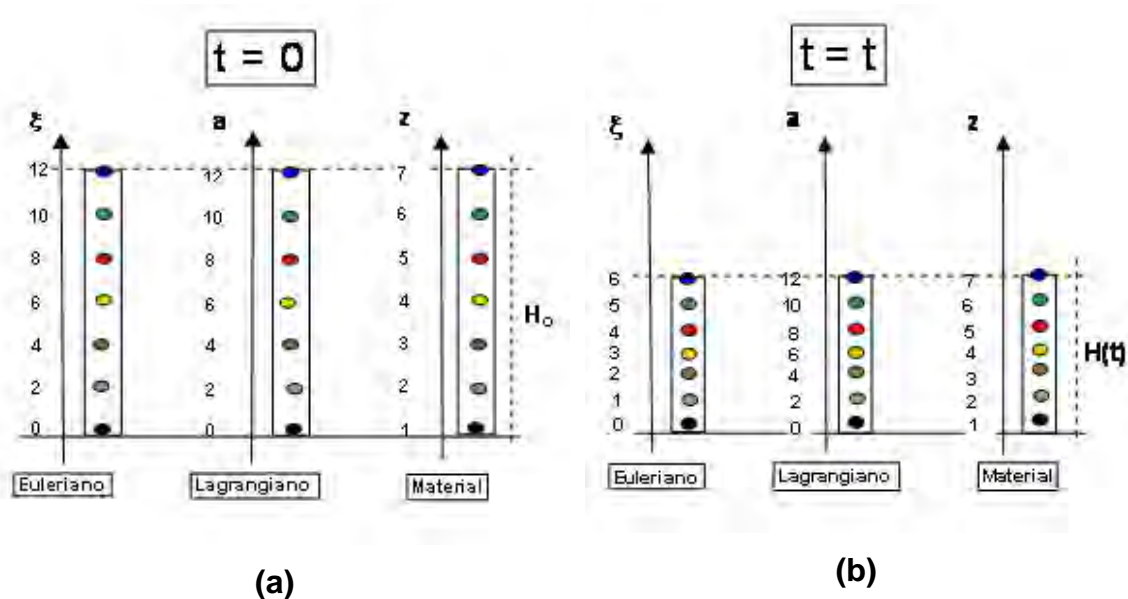
Os sistemas de coordenadas euleriano e lagrangeano são interessantes nos estudos de sedimentação e adensamento (ORTENBLAD, 1930; McNABB 1960; ALVES; ESPERANÇA, 1995).

No primeiro, o movimento dos diversos pontos é acompanhado por coordenadas que variam com o tempo.

Já no sistema de coordenadas lagrangeano, os diversos pontos em movimento são sempre definidos por suas coordenadas iniciais, ou seja, suas coordenadas não variam com o tempo.

Um tipo de sistema de coordenadas lagrangeano muito utilizado no estudo do adensamento com deformações finitas é o sistema de coordenadas material (PANE, 1985; SCHIFFMAN, 1987; ALVES; ESPERANÇA, 1995). Nesse sistema, a coordenada  $z$  é definida como o volume de partículas sólidas contido entre um plano de referência, normalmente a base da camada, e o ponto de coordenada lagrangeana a ser analisado. Sendo assim, considerando-se que as partículas são incompressíveis e que não ocorre carregamento de partículas, a coordenada  $z$  de um ponto independe do tempo.

Na Figura 2.9 apresenta-se uma coluna composta, para simplificar, de somente sete partículas de volume unitário. Consequentemente,  $V_s$  é igual a  $7 \text{ (cm}^3\text{)}$  e a altura total inicial é igual a  $H_0 = 12 \text{ cm}$ . Na Figura 2.9a, apresentam-se as coordenadas de cada partícula nos sistemas de coordenadas euleriano, lagrangeano e material. Transcorrido o tempo  $t$ , em função da sedimentação e, ou, do adensamento, as partículas se aproximaram. Na Figura 2.9b, estão as novas coordenadas das diversas partículas. Observa-se que as coordenadas eulerianas modificam-se em função do tempo, enquanto as outras duas permanecem constantes. Também pode ser observado que no sistema de coordenadas material a coordenada de cada partícula corresponde ao volume de sólidos do referencial (base da coluna) até o ponto no qual a partícula está localizada.



a) valores das coordenadas no tempo  $t=0$ ; e b) valores das coordenadas no tempo  $t$ .

Figura 2.9 – Diferentes sistemas de coordenadas.

Considerando as definições anteriores, a coordenada material  $z$  é relacionada a coordenada lagrangeana  $a$ , por:

$$\frac{dV_s}{dV} = \frac{dV_s}{dV_s + dV_v} \quad (2.19)$$

ou,

$$dV_s = \frac{dV_s}{dV_s + dV_v} dV \quad (2.20)$$

Logo,

$$V_s = \int \frac{1}{1+e} dV \quad (2.21)$$

Ou, uma vez que a seção transversal da coluna tem área unitária,

$$z(a) = \int_0^a \frac{1}{1+e(a,0)} da \quad (2.22)$$

em que  $e(a,0)$  representa o índice de vazios no ponto de coordenada lagrangeana  $a$ , no tempo ( $t = 0$ ).

As relações entre os sistemas de coordenadas são (Figura 2.10):

- Coordenadas euleriana e lagrangeana

$$\frac{d\xi}{da} = \frac{1 + e(a, t)}{1 + e(a, 0)} \quad (2.23)$$

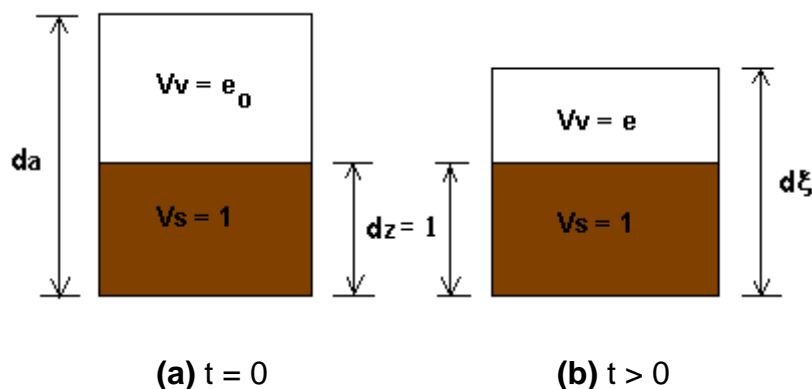


Figura 2.10 – Elemento de solo na configuração inicial e deformada.

- Coordenadas euleriana e material

$$\frac{d\xi}{dz} = 1 + e(z, t) \quad (2.24)$$

- Coordenadas material e lagrangeana

$$\frac{dz}{da} = \frac{1}{1 + e(a, 0)} \quad (2.25)$$

A equação do adensamento com deformações finitas, equação 2.26, é obtida a partir das equações de equilíbrio da mistura (sólidos e líquidos) e de continuidade das partículas, do fluido e do conjunto. Além disso, usam-se o princípio das tensões efetivas, a lei de Darcy e as relações constitutivas do material (GIBSON *et al.*, 1967).

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{k(e)}{(1+e)\gamma_w} \cdot \frac{d\sigma'}{de} \cdot \frac{\partial e}{\partial z} \right] - \left( \frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) \cdot \frac{\partial \left[ \frac{k(e)}{1+e} \right]}{\partial e} \cdot \frac{\partial e}{\partial z} = \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.26)$$

A equação 2.27 pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ g(e) \cdot \frac{\partial e}{\partial z} \right] - f(e) \cdot \frac{\partial e}{\partial z} = \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.27)$$

em que  $g(e)$  igual a:

$$g(e) = \frac{k(e)}{(1+e)\gamma_w} \cdot \frac{d\sigma'}{de} \quad (2.28)$$

tem expressão semelhante à do coeficiente de adensamento.

E  $f(e)$  é o termo correspondente às forças devido ao peso próprio igual a

$$f(e) = \left( \frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) \cdot \frac{\partial \left[ \frac{k(e)}{1+e} \right]}{\partial e} \quad (2.29)$$

Durante o processo de sedimentação as tensões efetivas são nulas. Neste caso, a equação (2.27) fica:

$$\frac{\partial e}{\partial t} + f(e) \cdot \frac{\partial e}{\partial z} = 0 \quad (2.30)$$

Essa última equação é semelhante à equação (2.7), que governa a teoria de Kynch (1952). Nesse caso o fluxo de partículas  $V(c)$  é substituído por:

$$f(e) = \left( \frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) \cdot \frac{\partial \frac{k(e)}{1+e}}{\partial e} \quad (2.31)$$

E, além disso, a coordenada  $\xi$  é substituída pela coordenada material  $z$ .

A equação (2.31) pode ser resolvida da mesma forma que a equação (2.7) da teoria de Kynch, desde que se conheça a função  $f(e)$ , que depende da relação do coeficiente de permeabilidade com o índice de vazios do rejeito, e o peso específico das partículas.

## 2.4.2 Ensaios de laboratório

Existem vários ensaios de laboratório para determinação das propriedades compressibilidade e permeabilidade de rejeitos, por meio de métodos de medições diretas e indiretas.

As técnicas de medição direta mais importantes são o consolidômetro de lama (BROMWELL; CARRIER, 1979), a modelagem com centrífuga (SCULLY, 1984; MIKASA; TAKADA, 1984) e o ensaio de adensamento hidráulico (IMAI 1979; GOBARA *et al.*, 1995). Como nesta tese foi usado um equipamento de adensamento hidráulico por forças de percolação, somente os dois últimos equipamentos serão descritos com um pouco mais de detalhes.

O ensaio de adensamento hidráulico (HCT) proposto pioneiramente por Imai (1987, 1991) usa método direto para determinação das propriedades de adensamento de solos moles, no qual o adensamento da lama é realizado pelo próprio peso do material e pela percolação forçada, de cima para baixo, causada pela diferença de carga constante entre o topo e a base da amostra. O fluxo de água, inicialmente transiente, torna-se constante no final do processo de adensamento. Nessa altura, a vazão fica constante e as tensões efetivas variam de zero no topo a algum valor na base da amostra. Agulhas introduzidas no interior da amostra, em vários níveis, medem a poro-pressão por meio de transdutores externos. Ao final do ensaio, a amostra é retirada do equipamento e fatiada, possibilitando, então, a medição da distribuição dos teores de umidade na amostra.

O perfil de tensão efetiva pode ser determinado pela integração, de cima para baixo, das forças de percolação e do peso próprio submerso para diferentes profundidades, enquanto o perfil de índice de vazios é construído a partir dos resultados dos teores de umidade, conhecendo-se o peso específico dos sólidos e considerando o solo saturado.

A permeabilidade ao longo da amostra é obtida pela lei de Darcy, determinando-se o gradiente hidráulico a partir da distribuição de poro-pressão.

A vantagem desse ensaio sobre os demais está no menor tempo de ensaio.

Já a principal desvantagem é que a altura do corpo-de-prova varia após a interrupção do fluxo que adensou a amostra. Com isso, durante o procedimento de retirada das amostras para determinação dos teores de umidade a altura da amostra não corresponderá àquela do momento em que foram obtidas a distribuição de tensão efetiva e a de poro-pressão. Como resultado, a precisão das relações índice de vazios – tensão efetiva e índice de

vazios – e permeabilidade determinadas é questionada. Outra desvantagem é que o aparato utilizado por Imai (1979) é relativamente complexo.

Gobara *et al.* (1995) utilizaram ensaios de adensamento hidráulico como método direto para determinação das propriedades de adensamento em amostras de rejeitos de mineração de estanho e zinco.

O procedimento de ensaio e a obtenção das características de compressibilidade e permeabilidade foram semelhantes aos métodos empregados por Imai (1979).

Os resultados do ensaio de adensamento hidráulico foram comparados com os do ensaio de adensamento edométrico convencional para uma das amostras utilizadas, tendo sido obtida boa correlação, principalmente na região de altas tensões efetivas.

O equipamento utilizado por Gobara *et al.* (1995), relativamente simples, elimina uma das desvantagens do equipamento de Imai (1979), que é a sua complexidade. Entretanto, a outra desvantagem, a variação da altura do corpo-de-prova após a interrupção do fluxo, que resulta em valores questionáveis de teores de umidade, permanece.

As técnicas indiretas usam modelos analíticos para simular o ensaio de laboratório. Os parâmetros do modelo para o solo ensaiado são, então, obtidos por meio da minimização das diferenças entre os resultados experimentais e analíticos (problema inverso). Nesse grupo, as técnicas mais importantes foram desenvolvidas por Pane (1985), com ensaios em coluna; Cargill (1986), Znidarcic *et al.* (1986, 1992), Guimarães Filho (1990), Lima (1996) e Santos (2000), com ensaios em edômetros do tipo velocidade de deformação constante (CRD); e Abu-Hejleh *et al.* (1996), Silva e Azevedo (1999a, b) e Botelho (2001), com ensaios de adensamento por forças de percolação (HCT). Uma descrição detalhada desses equipamentos pode ser encontrada em Silva (1999). Alguns deles serão descritos a seguir, por sua importância em relação ao trabalho desenvolvido nesta tese.

Merece especial atenção para o escopo deste estudo o trabalho de Pane (1985), que desenvolveu um processo inverso para calcular a permeabilidade de argilas a partir de um ensaio de coluna de sedimentação. Além deste, destacam-se os trabalhos de Liu (1990), Abu-Hejleh *et al.* (1996), Botelho (2001) e Silva e Azevedo (1999a, b), que desenvolveram ensaios de

adensamento hidráulico nos quais, também por meio de um processo inverso, calculam-se os parâmetros das relações do índice de vazios com o coeficiente de permeabilidade e a tensão efetiva de solos argilosos moles para um amplo espectro de índice de vazios.

O equipamento desenvolvido por Silva e Azevedo (1999a, b) foi usado neste trabalho, e será detalhado no próximo capítulo.

## **2.5 Características geotécnicas de rejeitos de mineração**

Rejeitos de mineração apresentam características geotécnicas variáveis em função do tipo de minério e do processo de beneficiamento empregado, entre outras coisas.

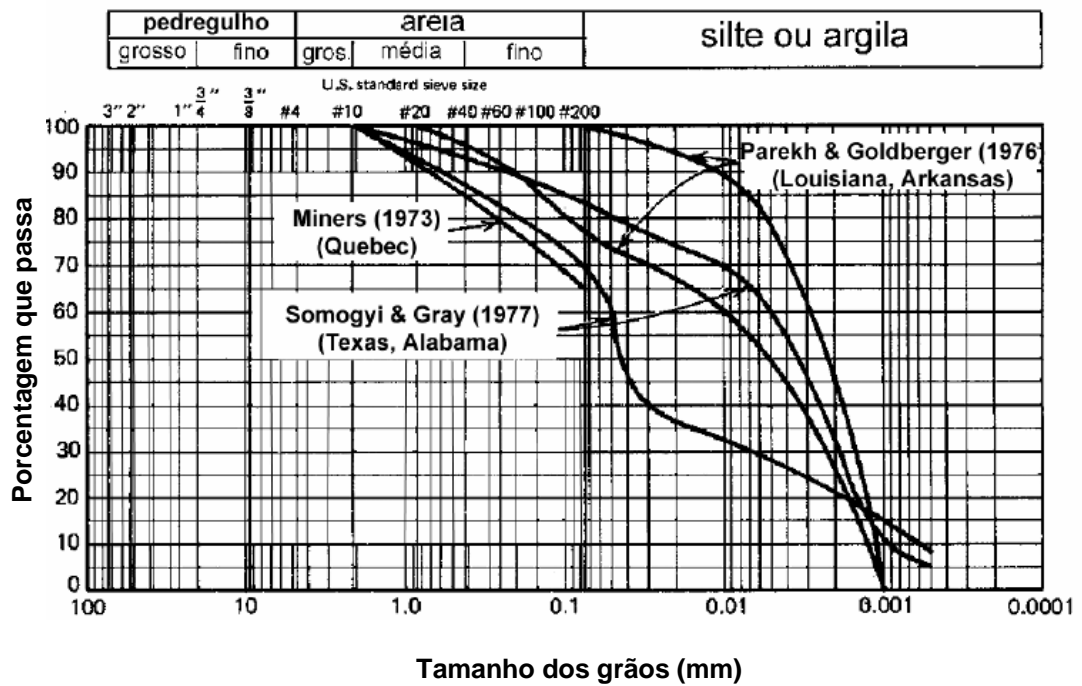
No que se refere à textura, a maioria dos rejeitos tem predominância de partículas do tamanho silte e areia fina. Nesse sentido, normalmente os rejeitos são materiais não ou pouco plásticos, no entanto podem ocorrer rejeitos de granulometria muito fina, que apresentam comportamento plástico (VICK, 1983).

Uma das observações ao investigar as curvas granulométricas dos diferentes trabalhos analisados foram os diâmetros usados para separar os diversos tamanhos das partículas.

Para uniformizar as análises, foram usados os critérios da ABNT (PINTO, 2006), ou seja: pedregulho  $d > 2,0$  mm; areias  $0,06$  mm  $< d < 2,0$  mm; siltes  $0,002$  mm  $< d < 0,06$  mm; e argilas  $d < 0,002$  mm, sendo  $d$  o diâmetro das partículas (NBR 6502/95).

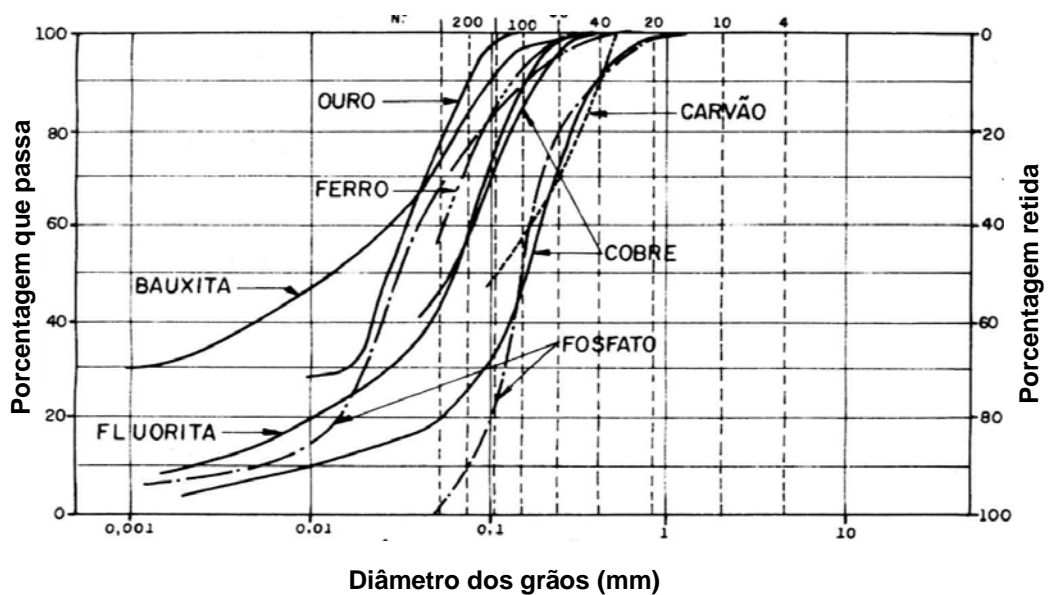
A Figura 2.11 apresenta curvas de distribuição granulométrica de rejeitos – lamas vermelhas, provenientes do beneficiamento de minerais para produção de alumínio - de diferentes procedências no mundo. Observa-se que, neste caso, o tamanho silte não predomina, alguns têm predominância de partículas do tamanho areia e outros do tamanho argila.

A Figura 2.12 ilustra as curvas granulométricas de alguns rejeitos brasileiros. Observa-se que a maior parte dos rejeitos tem predominância de partículas do tamanho areia, com exceção dos rejeitos de ouro, francamente siltoso, e de bauxita, no qual predominam as partículas do tamanho argila. Abrão (1987) não menciona se os rejeitos de bauxita são provenientes do



Fonte: Vick (1983), *apud* Villar (2002).

Figura 2.11 – Distribuição granulométrica de lamas vermelhas de diferentes procedências.



Fonte: Abrão (1987).

Figura 2.12 – Distribuição granulométrica de alguns rejeitos.

processo de lavagem ou de beneficiamento. Os dois rejeitos de fosfato têm distribuição granulométrica semelhante, no entanto um é francamente arenoso e o outro é predominantemente siltoso.

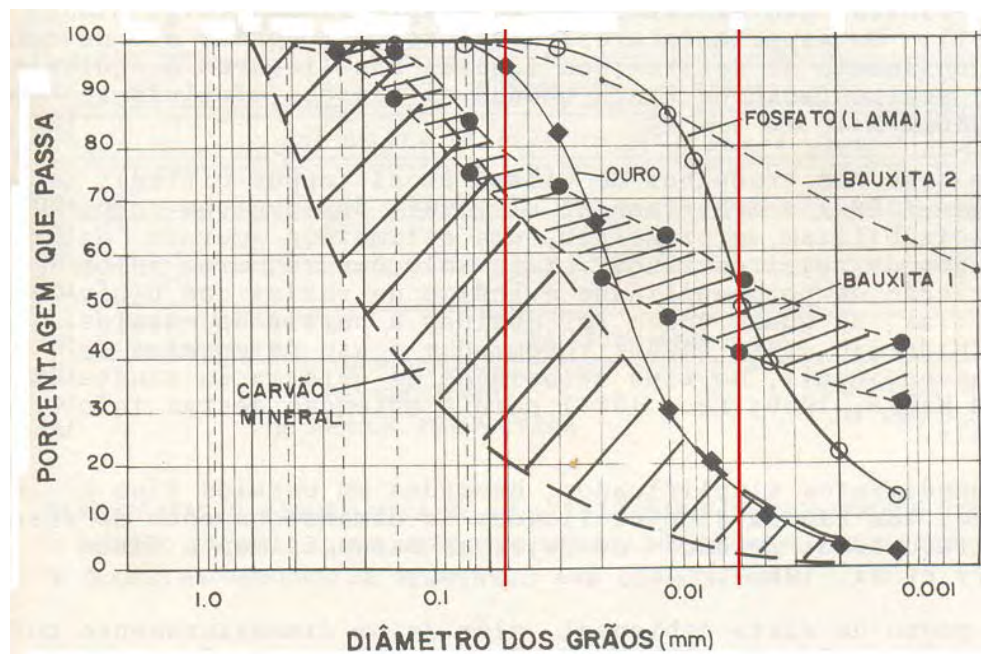
Campos (1986) também apresentou curvas granulométricas de vários rejeitos brasileiros. Observa-se na Figura 2.13 (a) que o rejeito de ouro é, na sua maior parte, siltoso e que os rejeitos de bauxita provenientes do processo de beneficiamento (lamas vermelhas) são argilosos. Além disso, o rejeito de fosfato (lama) tem aproximadamente metade das suas partículas do tamanho silte e a outra metade do tamanho argila, enquanto o rejeito de carvão é predominantemente arenoso. Na Figura 2.13 (b) observa-se que os rejeitos de cobre, titânio e fosfato (flotação) são predominantemente arenosos, enquanto o rejeito de zinco é francamente siltoso. Uma explicação para a diferença nas curvas granulométricas dos rejeitos de fosfato obtidas por Abrão (1987), embora o autor não a mencione, pode ser que um dos rejeitos fosse proveniente do processo de flotação e o outro fosse a lama proveniente do processo de beneficiamento.

Villar (2002) determinou as distribuições granulométricas de lamas de lavagem e processamento de bauxita, procurando avaliar: a) a influência do tipo de fluido usado nos ensaios: se água, como é usual em mecânica dos solos; soro não-neutralizado, usado no processo real, ou soro neutralizado pela adição de ácido clorídrico; b) o uso, ou não, de defloculante; e c) com os rejeitos integrais, ou separando a sua parte fina (passante na peneira nº 200).

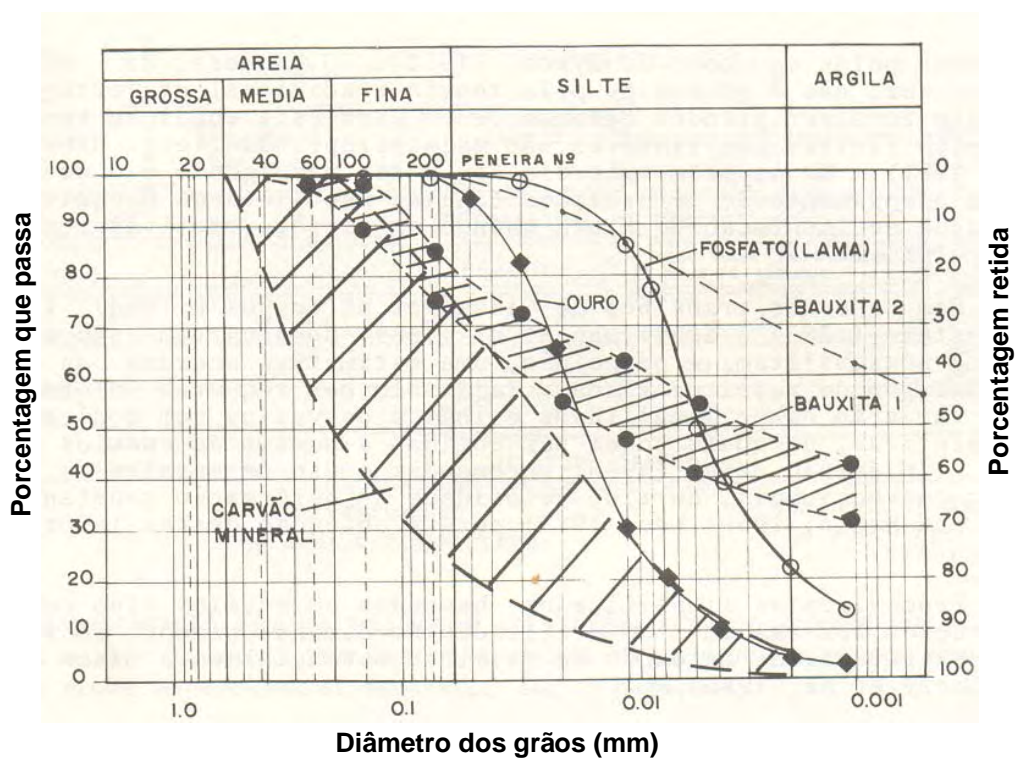
Na Figura 2.14 apresentam-se diferentes distribuições granulométricas de amostras de rejeitos do processo de beneficiamento retiradas no campo; em diferentes profundidades; e do processo de lavagem com os rejeitos com diferentes porcentagens de sólidos. Observa-se diferença importante entre as curvas obtidas para as lamas de lavagem e o beneficiamento, mas pouca influência, do ponto de vista prático, da profundidade e do teor de sólidos.

As faixas de variação encontradas nos ensaios de granulometria com a lama vermelha neutralizada e não neutralizada da ALCAN em Saramenha são apresentadas, respectivamente, nas Figuras 2.15 a 2.17.

Em resumo, conclui-se que as diferenças apresentadas nas Figuras 2.15 a 2.17 são significativas, o que certamente impõe a necessidade de padronização dos ensaios de granulometria em rejeitos, para que os resultados possam ser comparados.



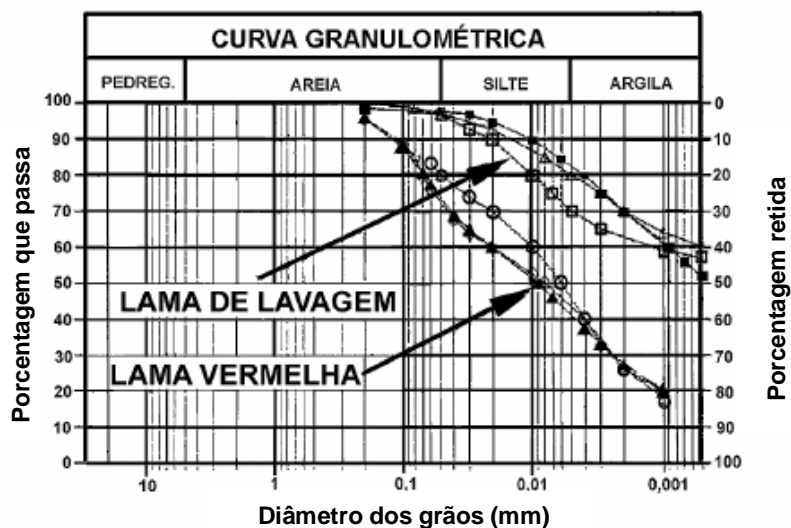
(a)



(b)

Fonte: Campos (1986).

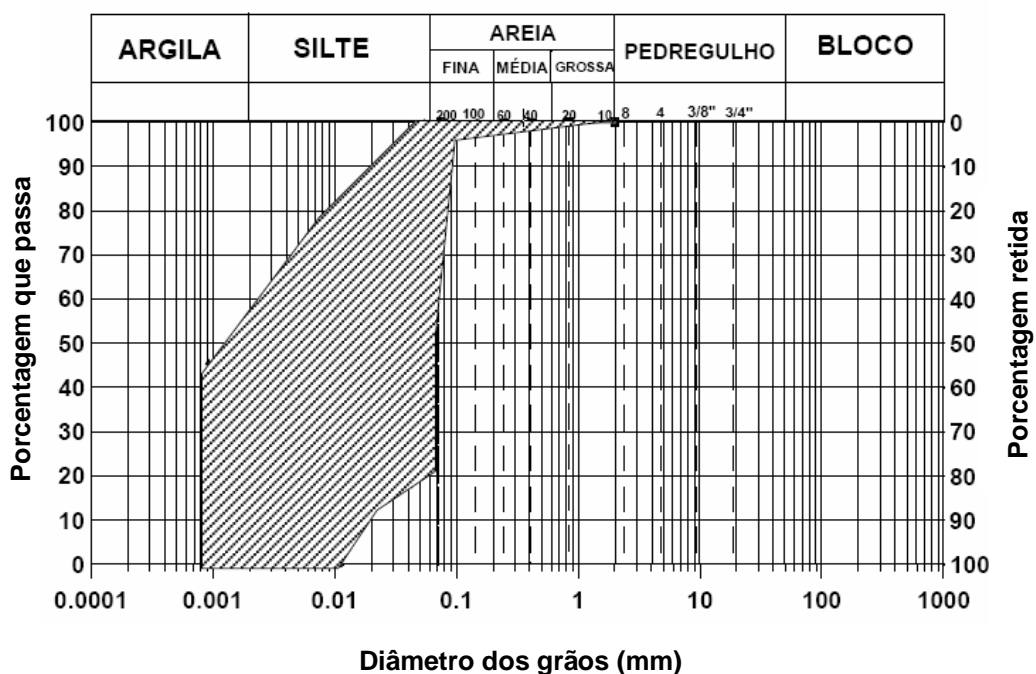
Figura 2.13 – Distribuição granulométrica de alguns rejeitos.



LAMA VERMELHA		LAMA DE LAVAGEM	
○	- lago 01 - superfície	□	- lago 01 - 20% de sólidos
▲	- lago 01 - 2,5 m de profundidade	■	- lago 02 - 40% de sólidos
◇	- lago 01 - 5,0 m de profundidade	△	- área de teste - 50% de sólidos

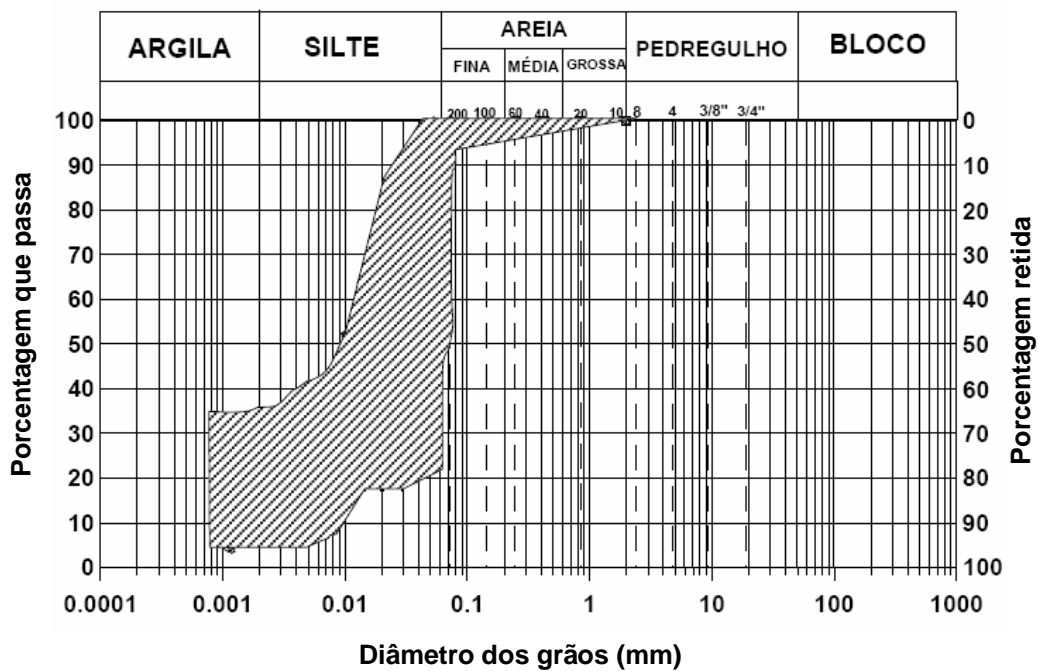
Fonte: Villar (2002).

Figura 2.14 – Distribuição granulométrica da Lama vermelha da Alumar-Norte, em São Luis do Maranhão.



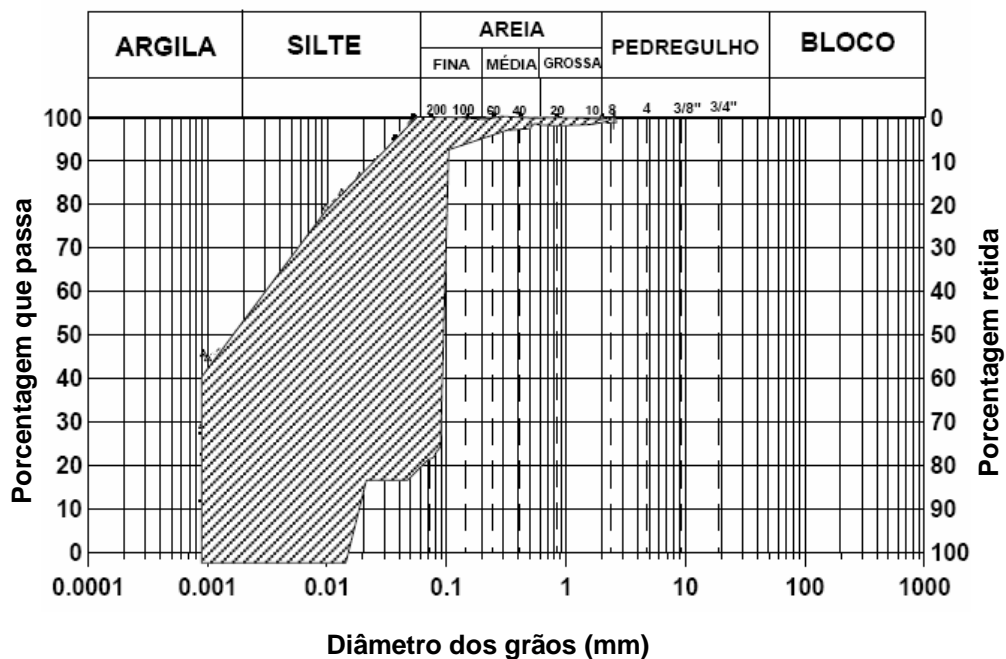
Fonte: modificado de Villar (2002).

Figura 2.15 – Faixa de variação da distribuição granulométrica da lama vermelha neutralizada da ALCAN, em Saramenha/Ouro Preto.



Fonte: modificado de Villar (2002).

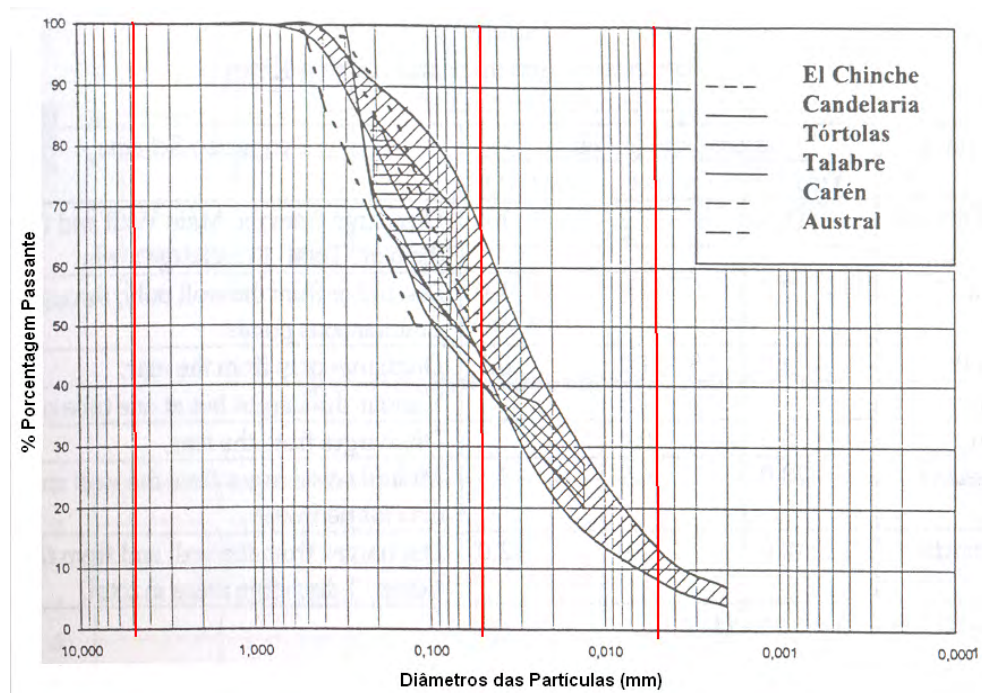
Figura 2.16 – Faixa de variação da distribuição granulométrica da lama vermelha não-neutralizada da ALCAN, em Saramenha/Ouro Preto.



Fonte: modificado de Villar (2002).

Figura 2.17 – Faixa de variação da distribuição granulométrica da lama vermelha neutralizada e não-neutralizada da ALCAN, em Saramenha/Ouro Preto.

Barrera (1998) apresentou as curvas granulométricas dos diferentes rejeitos de cobre minerados no Chile. Em média, esses rejeitos apresentam cerca de 10% de partículas do tamanho argila e o restante divide-se, quase que meio a meio, entre partículas do tamanho areia de média à fina e silte (Figura 2.18).



Fonte: Barrera (1998).

Figura 2.18 – Faixa de variação da distribuição granulométrica de rejeitos de cobre no Chile.

Botelho (2001) ensaiou amostras de rejeito de caulim extraído e comercializado pela BEMIL - Beneficiamento de Minérios S.A., situada na região de Cachoeira do Campo-MG, e de lamas vermelhas não-neutralizadas da ALCAN - Alumínio do Brasil, em Saramenha-MG e da Samarco Mineração S.A. localizada em Mariana-MG. Desta última foram ensaiadas três amostras, duas retiradas diretamente do espigote: uma, denominada de “bica-velha”, extraída meses antes da realização dos ensaios, e a outra, denominada de “bica-nova”, retirada pouco antes da realização dos ensaios. A terceira amostra, denominada “furo”, foi coletada do reservatório de rejeitos durante a campanha de ensaios realizados com uma sonda piezométrica. A Tabela 2.1 apresenta os resultados das curvas granulométricas desses materiais.

Tabela 2.1 – Resumo das características das amostras de rejeito

Rejeito	Caulim	Lama vermelha não neutralizada da ALCAN	Lama vermelha Samarco		
			Bica		Furo
			Velha	Nova	
Argila (%)	14	30	23	18,5	19
Silte (%)	82	20	45	66,5	77
Areia fina (%)	4	50	32	14	4
Areia média (%)	0	0	1	0	0
Areia grossa (%)	0	0	0	0	0
Pedregulho (%)	0	0	0	0	0

Fonte: Botelho (2001).

Observa-se que as porcentagens apresentadas na distribuição granulométrica da lama vermelha da ALCAN estão dentro da faixa de variação obtida por Villar (2002), apresentada na Figura 2.6.

Muitas informações sobre limites de consistência são encontradas para as lamas vermelhas, Na Tabela 2.2 está a compilação das informações obtidas. Pode-se observar que, com exceção dos resultados encontrados para o rejeito da SAMARCO, o valor do limite de liquidez situa-se entre 40 e 50% e o índice de plasticidade entre 10 e 20%. Consequentemente, no ábaco de Casagrande a maior parte desses rejeitos seria classificada como ML, ou seja, silte de baixa plasticidade.

Na Figura 2.19 estão os intervalos de variação de limites de consistência reportados por Bromwell (1984).

Na Tabela 2.3 estão os resultados de limites de consistência de alguns rejeitos encontrados na literatura.

A Tabela 2.4 apresenta os valores de peso específico das partículas de alguns rejeitos de mineração.

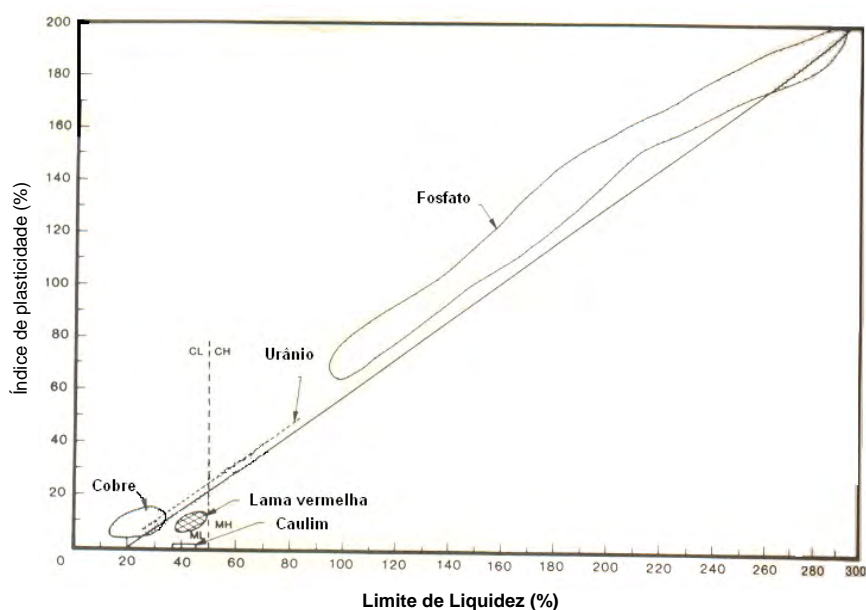
Nas Figuras 2.20 e 2.21 estão, respectivamente, os valores de compressibilidade e de permeabilidade reportados por Bromwell (1984).

Alguns autores apresentam resultados de curvas de compressibilidade e permeabilidade de rejeitos obtidos por meio de ensaios de laboratório. Alves (1992) realizou diversos ensaios na lama vermelha não-neutralizada da ALCAN em Saramenha. Os resultados encontrados estão na Figura 2.22.

Tabela 2.2 – Limites de consistência de amostras de rejeito de lamas vermelhas

Origem		LL (%)	LP(%)
Serra Leoa, Europa Oriental e Austrália (SOMOGYI; GRAY, 1977)		42	28
Carrier <i>et al.</i> (1983)		41-46	34-37
Européia (LOTZE, 1982, <i>apud</i> VILLAR, 2002)		37+/-5	27+ou-5
Estados Unidos (SOMOGYI; GRAY, 1977)	Alabama	46 a 41	39 a 37
	Texas	46 a 44	37 a 35
Samarco – Mariana-MG (BOTELHO, 2001)	Bica	Velha	NP
		Nova	NP
	Furo	NP	NP
Alumar-MA	Rodrigues e Moura (1992), <i>apud</i> Villar (2002)	41	30
	Villar (2002)	43	30
ALCAN – Saramenha-MG	Campos <i>et al.</i> (1994)	44	32
	Santos (2000)	48	31
	Botelho (2001)	48	31
	Seco ao ar (ALVES, 1992)	45	31
	Sem secagem ao ar (ALVES, 1992)	60	36

\* NP – não plástico.



Fonte: modificado de Bromwell (1984).

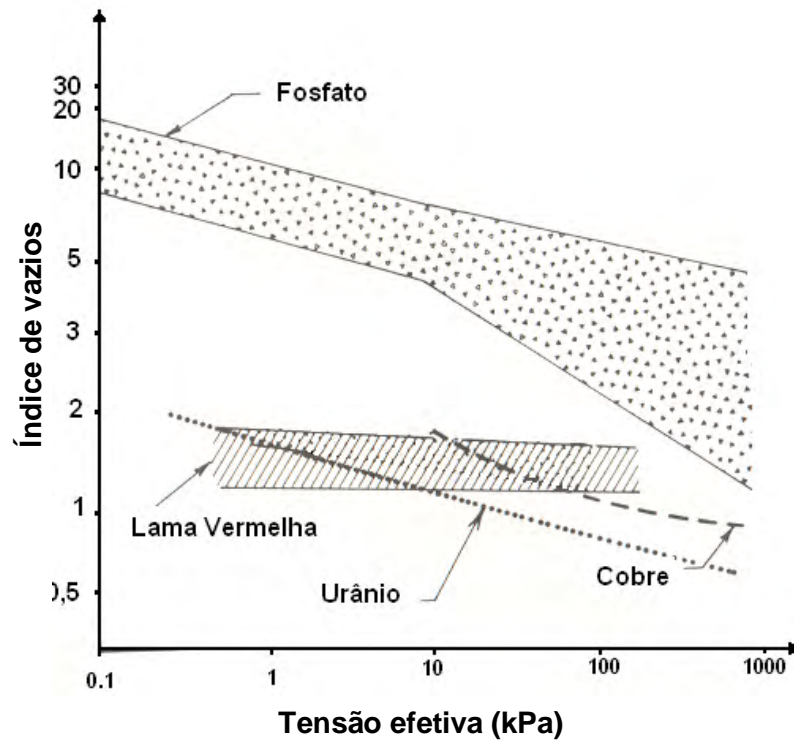
Figura 2.19 – Intervalos de limites de consistência de alguns rejeitos.

Tabela 2.3 – Limites de consistência de amostras de rejeitos

Rejeito	Origem	LL (%)	LP(%)
Caulim	Botelho (2001)	50	36
Cobre	Barrera (1998)	22	15
		22	18
			NP
			NP
			NP
Lavagem de bauxita	Melo (1985)	51	25
	Villar (2002)	62	33
Fosfato	Abu-Hejleh <i>et al.</i> (1996)	318	74
		233	49
		114	33
		198	50
	Carrier <i>et al.</i> (1983)	100-200	70-150

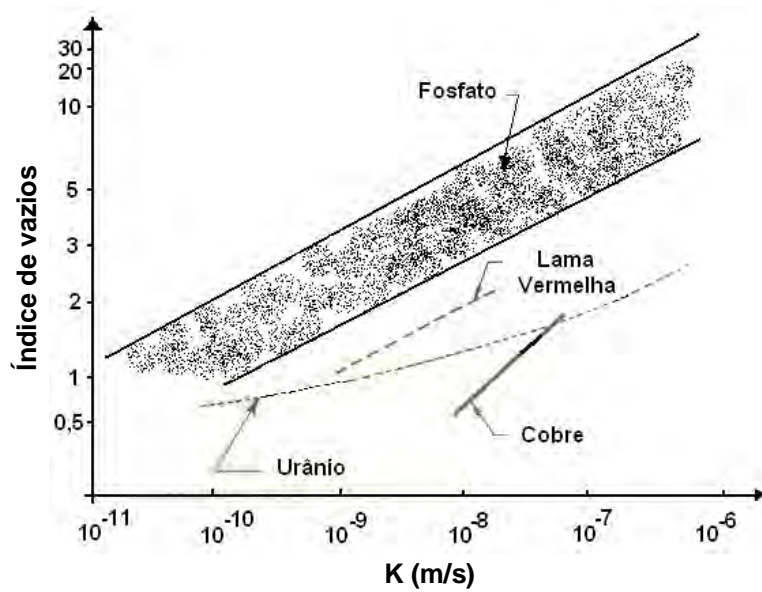
Tabela 2.4 – Peso específico das partículas

Rejeito	Origem	$\gamma_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	
Caulim	Bemil (BOTELHO, 2001)	2,68	
Lavagem de bauxita	ALCAN-Saramenha (VILLAR, 2002)	2,9	
Lama Vermelha	Poços de Caldas		2,95
	Alumar –SL/MA	Villar (2002)	3,1
		Rodrigues e Moura (1994)	3 a 3,7
	ALCAN-Saramenha-Neutralizada	Villar (2002)	3,5
		Campos <i>et al.</i> (1994)	3,47
		Santos (2002)	3,4 a 3,8 (no lago)
			3,42 (no lançamento)
		Alves (1992)	3,4 a 3,5
	Botelho (2001)	3,65	
Fosfato	A-1	2,6	
	A-9	2,82	
	C-1	2,92	
	S-1	2,71	



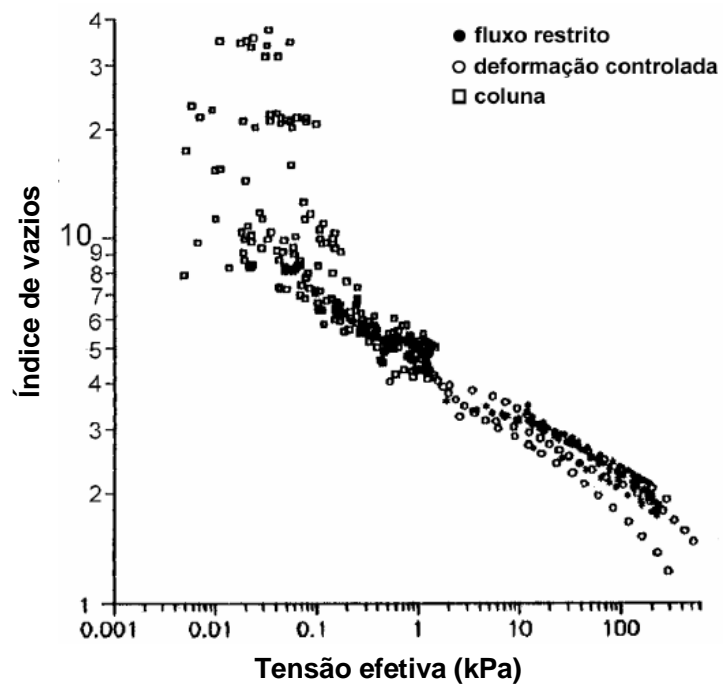
Fonte: modificado de Bromwell (1984).

Figura 2.20 – Compressibilidade de alguns rejeitos de mineração.

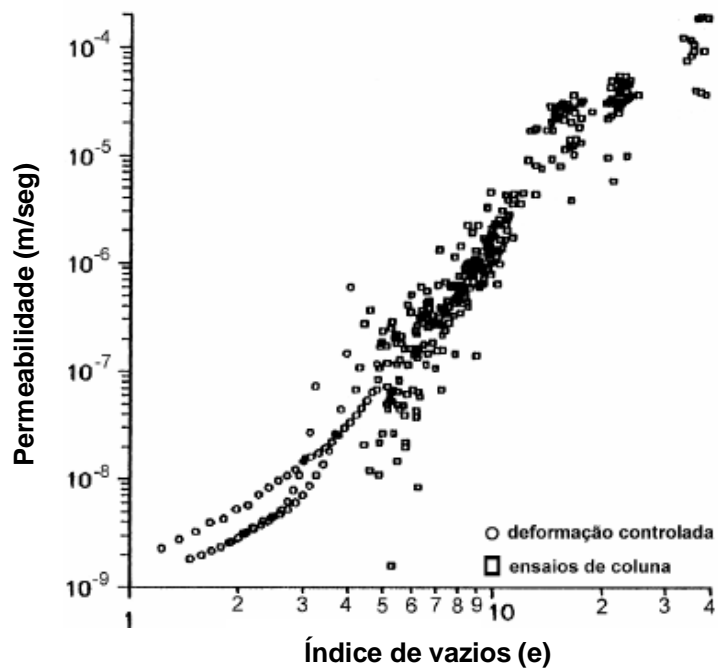


Fonte: modificado de Bromwell (1984).

Figura 2.21 – Permeabilidade de alguns rejeitos de mineração.



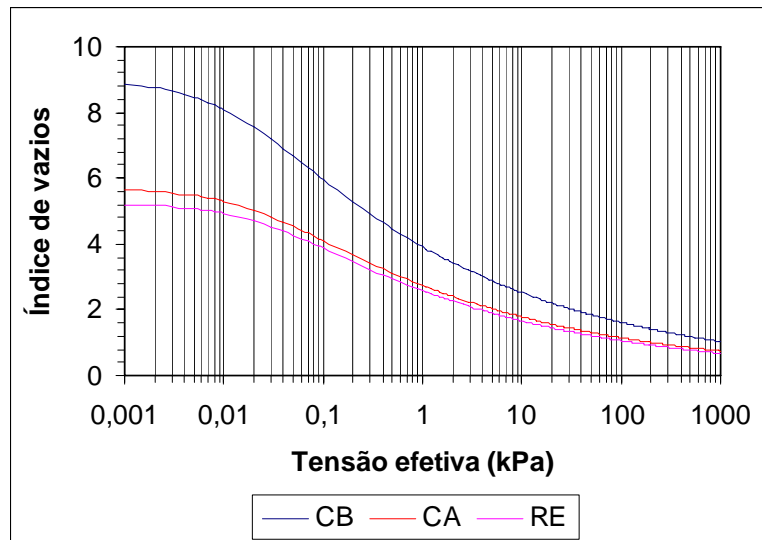
(a)



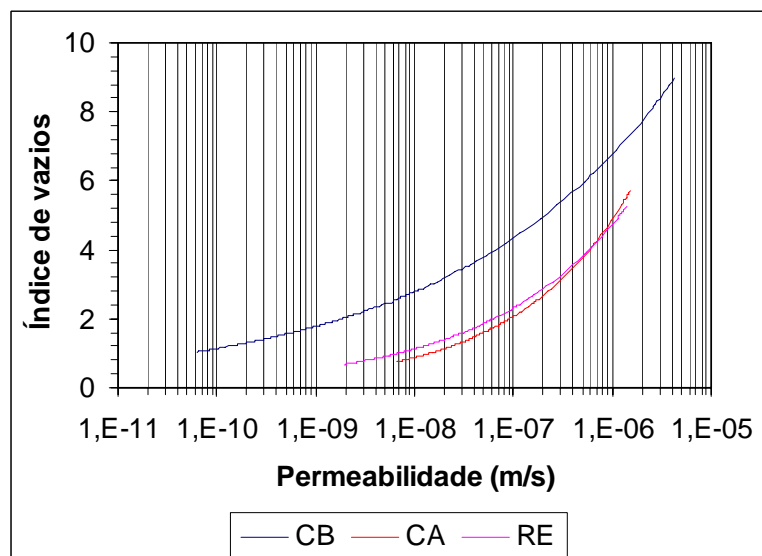
(b)

Figura 2.22 – Curvas de compressibilidade (a) e permeabilidade (b) obtidas por Alves (1992).

Silva (1999), de forma pioneira no Brasil, construiu um edômetro do tipo HCT e ensaiou três tipos de solos moles: um rejeito não-identificado (RE), um caulim (CA) e uma mistura de caulim com bentonita (CB). Os resultados obtidos estão na Figura 2.23.



(a)



(b)

Figura 2.23 – (a) Curvas de compressibilidade e (b) curvas de permeabilidade obtidas por Silva (1999).

Santos (2000) também realizou um ensaio com lama vermelha não-neutralizada de Saramenha. O trabalho consistiu em obter as curvas de compressibilidade e permeabilidade no laboratório e no campo. Foram selecio-

nados dois locais no reservatório de Marzagão, estações J13 e J8, nos quais foram retiradas amostras para os ensaios de laboratório e feitas amostragem e investigações com uma sonda piezométrica necessárias para determinação das curvas de compressibilidade e permeabilidade no campo. Nas Figuras 2.24 e 2.25 estão os resultados encontrados.

Nas Figuras 2.24 e 2.25, observam-se algumas diferenças entre os resultados obtidos nas duas estações, evidenciando que, ao longo do tempo, o rejeito depositado no reservatório varia devido a mudanças nos processos de deposição e de produção na planta de beneficiamento.

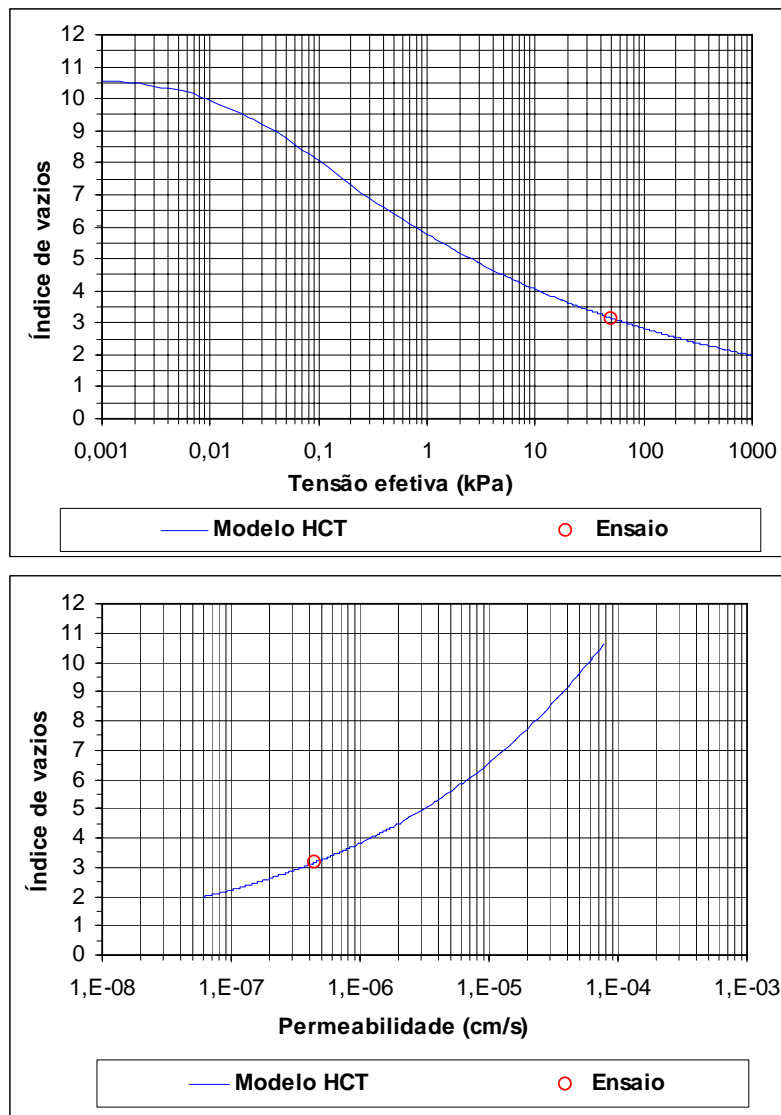


Figura 2.24 – Curvas obtidas na estação J13, por Santos (2000).

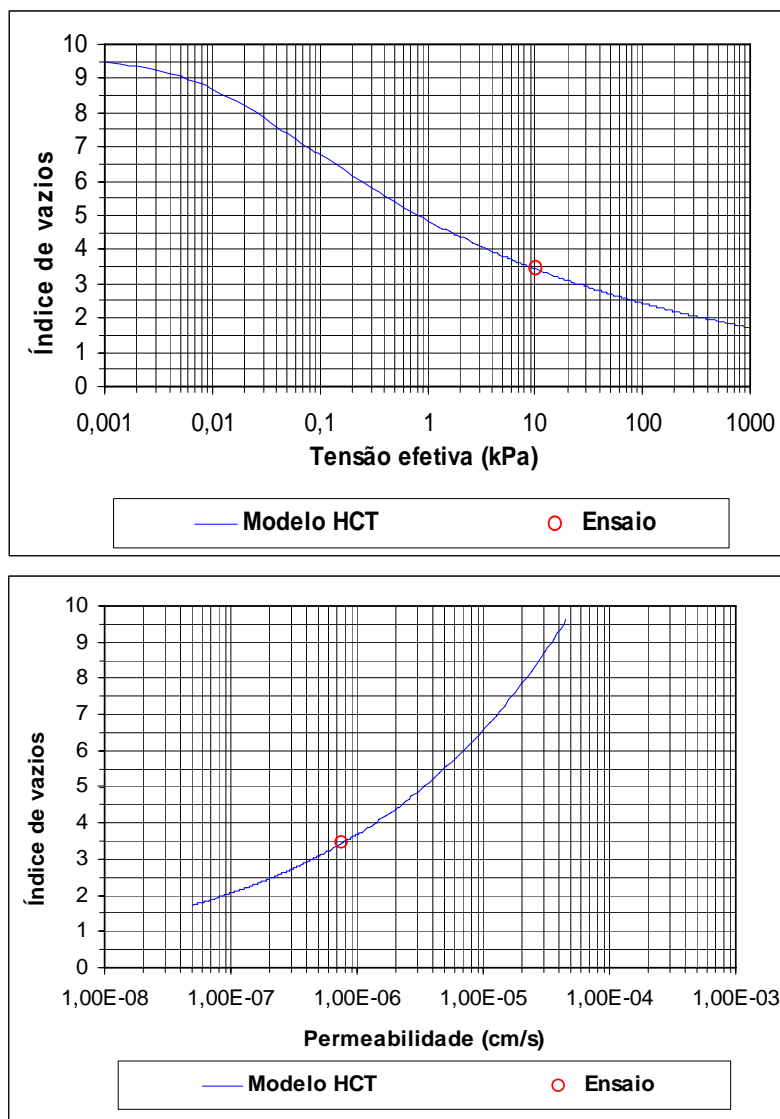
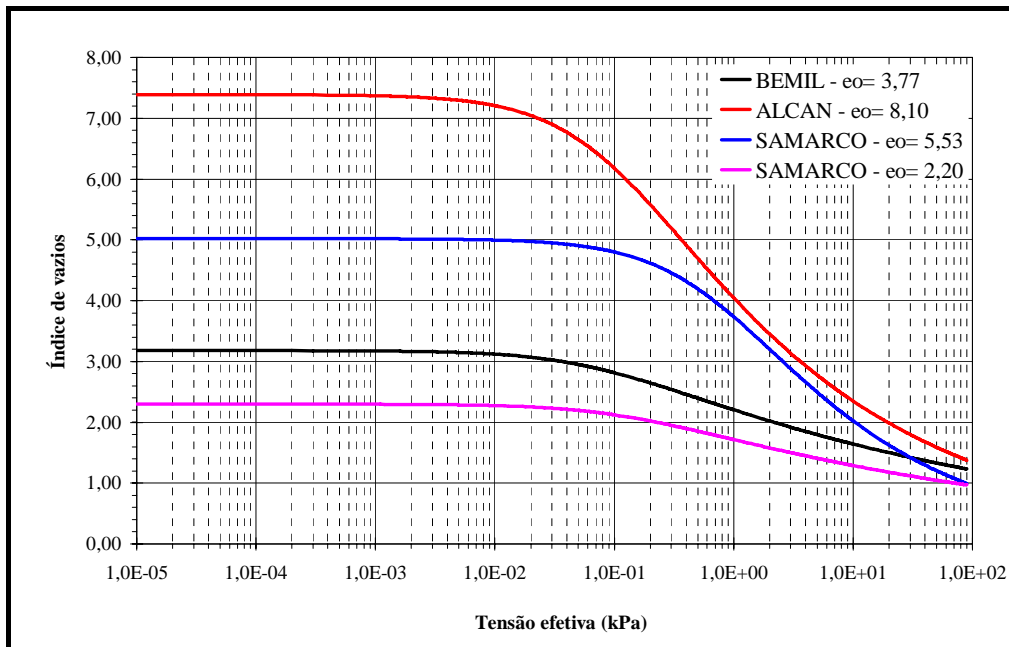


Figura 2.25 – Curvas obtidas na estação J8, por Santos (2000).

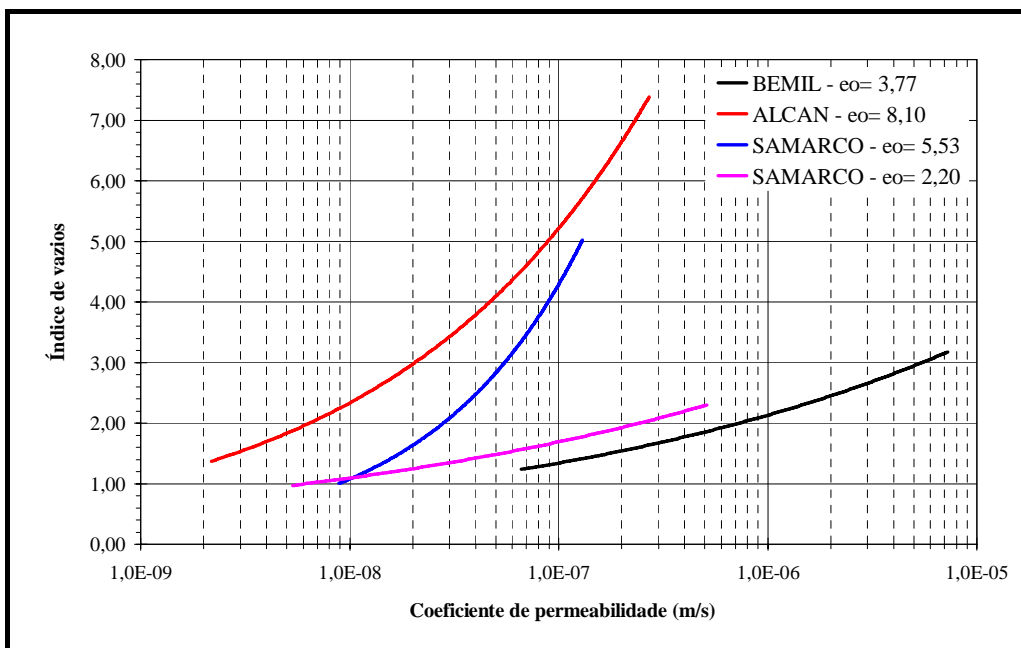
Botelho (2001) desenvolveu um edômetro do tipo HCT e ensaiou amostras de caulim, da lama vermelha não-neutralizada da ALCAN em Saramenha e da SAMARCO em Mariana. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 2.26.

Percebe-se grande influência do índice de vazios inicial no comportamento da lama da SAMARCO.

Villar (2002) apresentou comparações entre os resultados de compressibilidade e de permeabilidade obtidos no laboratório com o edômetro tipo CRD (taxa de deslocamento constante), para diferentes rejeitos de lavagem e processamento de bauxitas provenientes de diferentes locais no Brasil (Figura 2.27). Constata-se que as inclinações das diversas curvas de

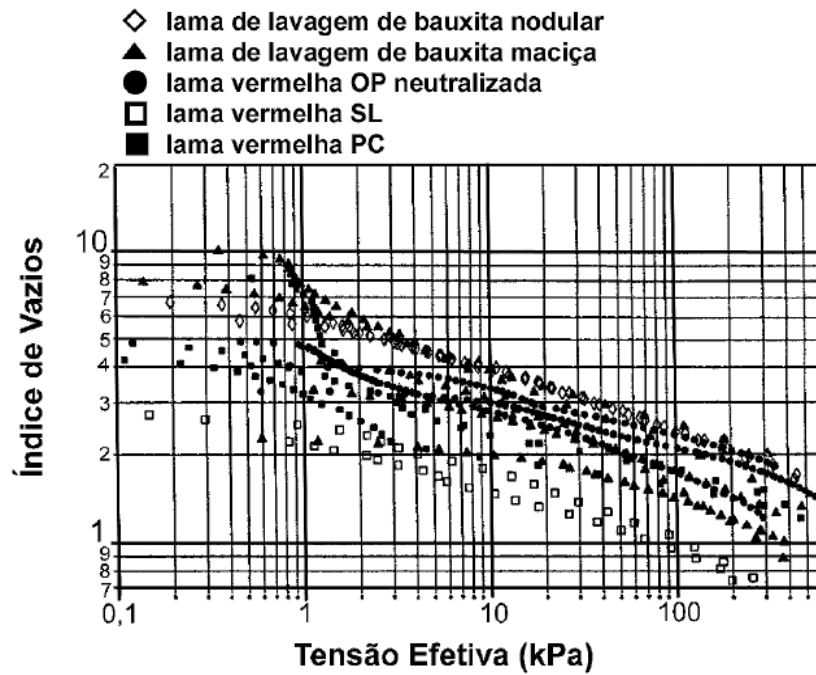


(a) Compressibilidade

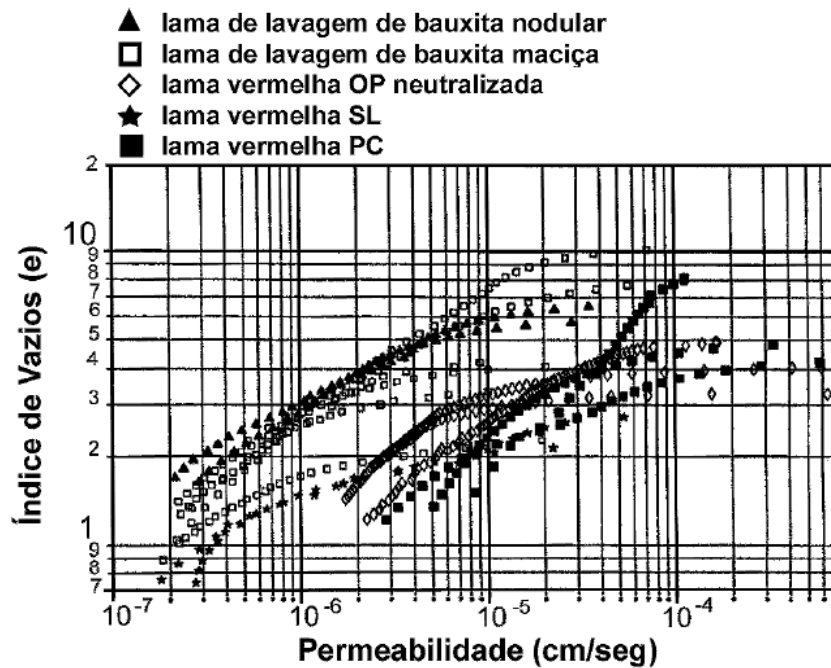


(b) Permeabilidade

Figura 2.26 – Curvas de compressibilidade e permeabilidade obtidas por Botelho (2001).



(a) Compressibilidade



(b) Permeabilidade

Fonte: Villar (2002).

Figura 2.27 – Resultados de ensaios edométricos do tipo CRD de resíduos de lavagem e processamento de bauxita.

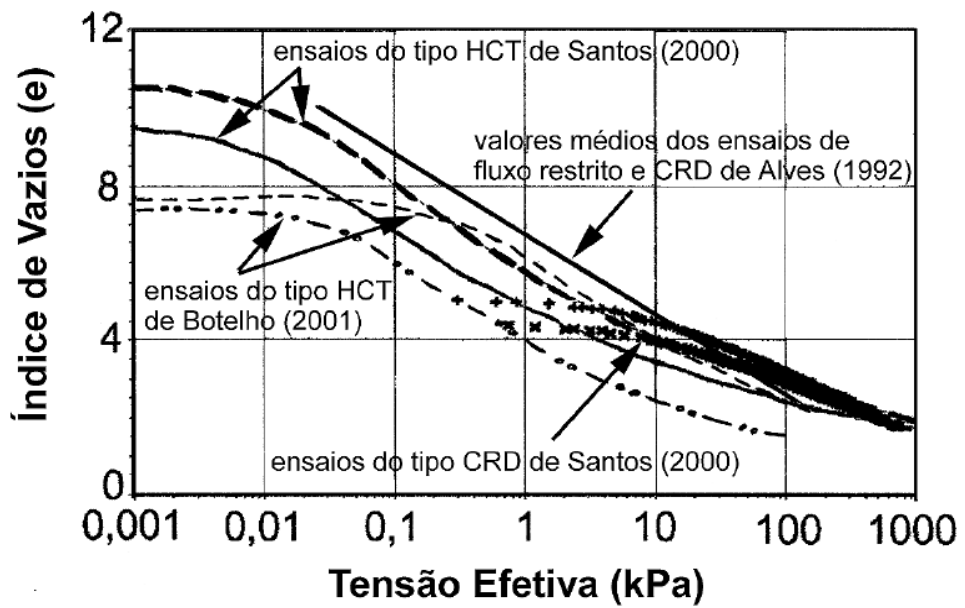
compressibilidade e permeabilidade são parecidas, o que parece indicar que se os resultados fossem normalizados em relação aos índices de vazios iniciais as curvas seriam praticamente únicas.

Na Figura 2.28 estão as comparações feitas por Villar (2002) entre os resultados de compressibilidade e permeabilidade obtidos pelos autores apresentados anteriormente, que estudaram o comportamento da lama vermelha neutralizada da ALCAN em Saramenha. Considerando os vários equipamentos usados, as diferentes épocas e os diferentes locais de amostragem, os resultados encontrados, tanto para a compressibilidade, quanto para a permeabilidade, estão razoavelmente próximos.

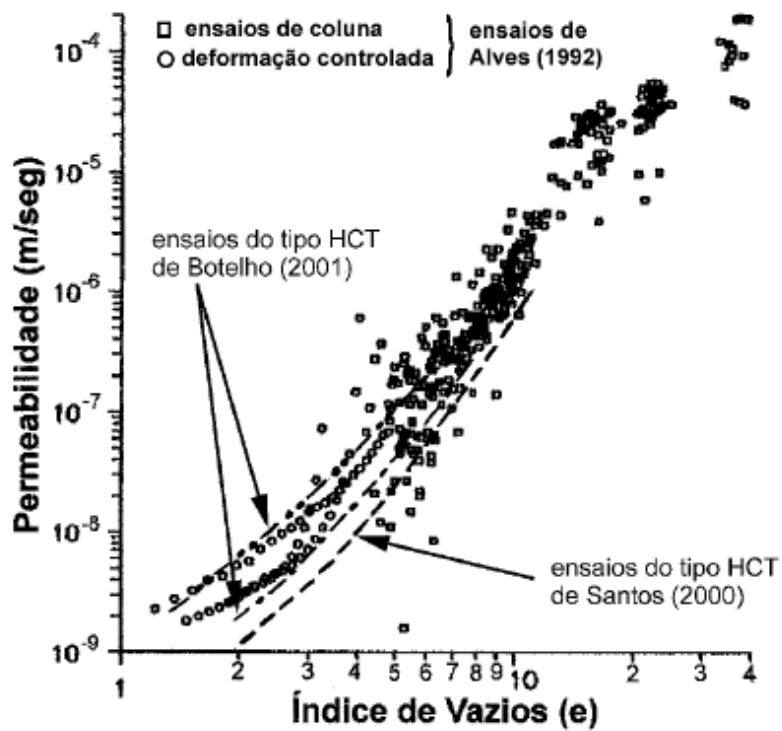
Na Figura 2.29 apresentam-se as curvas de compressibilidade e permeabilidade obtidas por Abu-Hejleh *et al.* (1996) com o ensaio HCT das lamas fosfáticas mencionadas nas Tabelas 2.3 e 2.4. Notam-se os elevados valores dos índices de vazios iniciais dessas lamas fosfáticas.

## 2.6 Síntese

Da pesquisa bibliográfica apresentada concluiu-se que as teorias de Kynch (1952) e Gibson *et al.* (1967) têm sido reconhecidas como apropriadas para estudar o enchimento de reservatórios de rejeito. Mas, como se sabe, para usá-las é necessário que se conheçam as curvas de compressibilidade e permeabilidade dos rejeitos. Por outro lado, na última década, entre os ensaios de laboratório, o ensaio HCT se destacou como o mais adequado para obtenção dessas curvas. No entanto, uma maneira mais simples de executá-lo e interpretá-lo facilitará o seu uso mais freqüente em projetos. Por fim, nos rejeitos de minerações brasileiros existe muita informação sobre o comportamento de lamas vermelhas, sobretudo da lama vermelha neutralizada da ALCAN, mas a ampliação de um banco de dados sobre o comportamento de outros rejeitos por meio do ensaio HCT é, também, uma tarefa interessante.



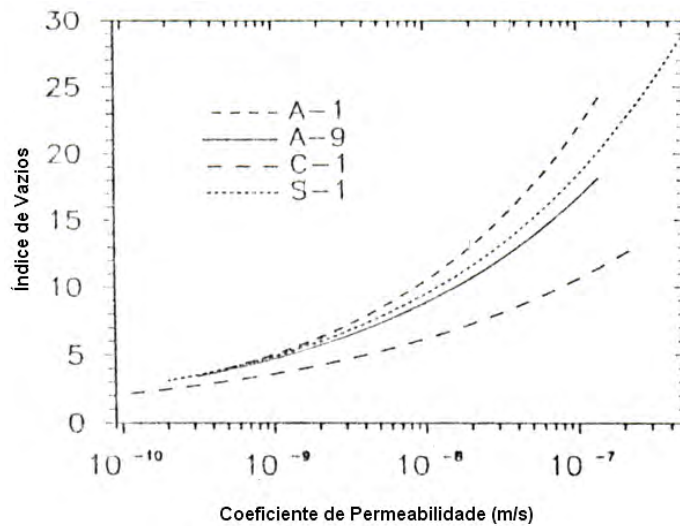
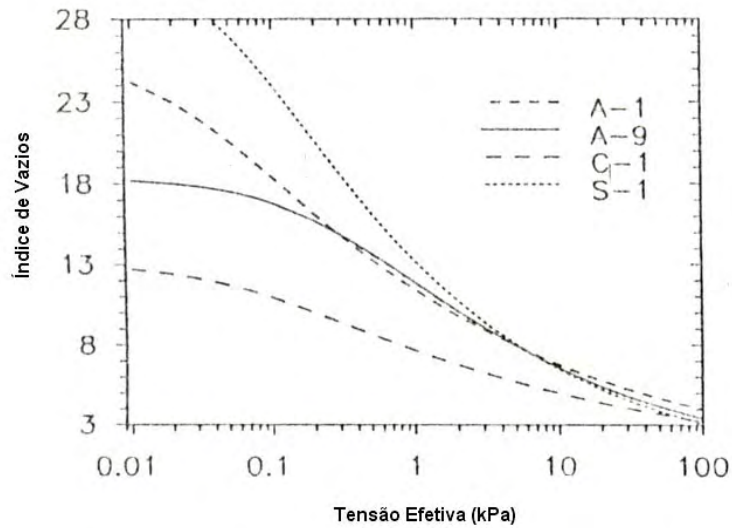
(a) Compressibilidade



(b) Permeabilidade

Fonte: Villar (2002).

Figura 2.28 – Comparações entre as curvas de compressibilidade e permeabilidade da lama vermelha neutralizada da ALCAN obtidas em diversos trabalhos.



Fonte: Abu-Hejleh et al. (1996).

Figura 2.29 – Curvas de compressibilidade e permeabilidade de lamas fosfáticas.

Como destacado no Capítulo 1, esta tese pretende contribuir nesses dois últimos aspectos.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Material**

##### **3.1.1 Rejeitos**

Foram estudados 15 rejeitos provenientes de processos de beneficiamento para produção dos seguintes produtos: quatro de ferro, três de bauxita, dois de ouro, dois de ácido fosfórico, um de cobre, um de monazita, um de níquel e um de zinco.

Com esses rejeitos foi executado um programa de laboratório, que constou de ensaios de caracterização (peso específico das partículas, limites de liquidez e plasticidade e granulometria conjunta), ensaios edométricos especiais do tipo HCT e ensaios de sedimentação em colunas.

A seguir serão apresentados os equipamentos usados na realização desse programa de ensaios e, posteriormente, as metodologias empregadas na sua interpretação.

##### **3.1.2 Ensaios de caracterização**

Os equipamentos utilizados para realização desses ensaios são comumente usados em laboratórios de mecânica dos solos. O peso específico das partículas foi determinado por meio de um picnômetro (balão volumétrico), enquanto os limites de liquidez e plasticidade foram obtidos usando-se, respectivamente, o aparelho de Casagrande e a placa de vidro esmerilhado.

Por fim, para determinação da distribuição granulométrica, foram utilizados um conjunto de peneiras, uma mesa de vibração e uma coluna de sedimentação.

### 3.1.3 Ensaio edométrico tipo HCT

#### 3.1.3.1 Descrição do equipamento

O ensaio edométrico do tipo HCT permite a obtenção das características de adensamento, compressibilidade e permeabilidade de uma amostra saturada de solo pouco consistente, como rejeitos de mineração, por meio da imposição de forças de percolação na amostra. Essas forças surgem como consequência de um fluxo imposto na base da amostra por meio de uma bomba de fluxo.

O edômetro tipo HCT utilizado neste trabalho foi inicialmente desenvolvido por Silva (1998). Entretanto, como nesta tese o equipamento sofreu diversas modificações, seus componentes, painel de controle, interface ar-água, bomba de fluxo e câmara de ensaio, serão descritos a seguir (Figura 3.1).

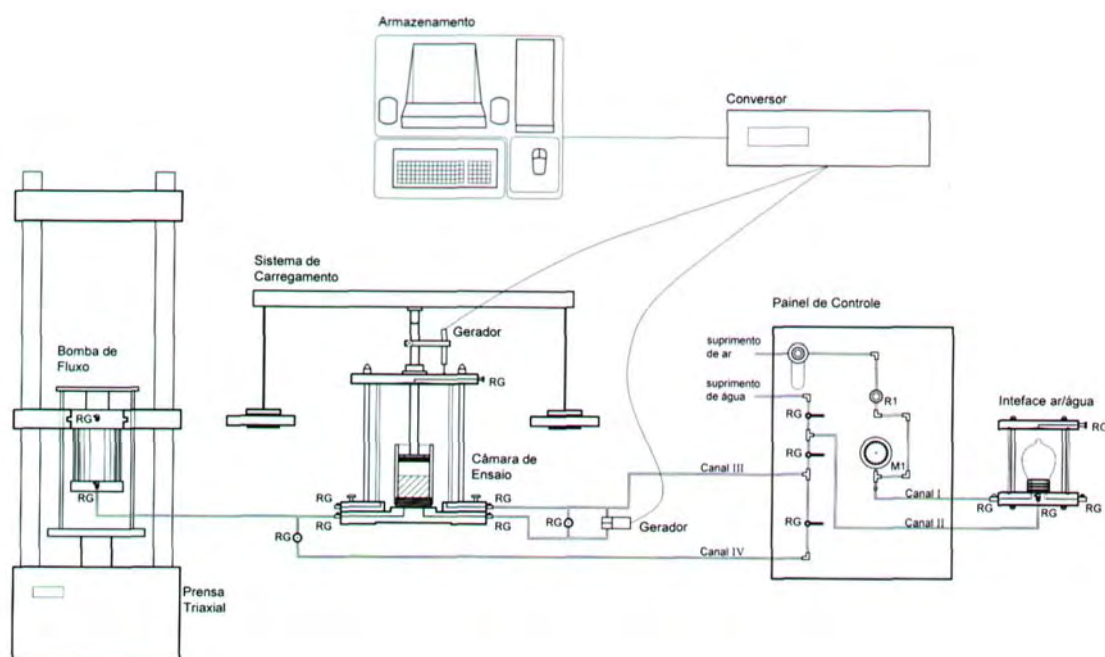


Figura 3.1 – Visão esquemática do sistema completo.

a) Interface ar-água

A interface ar-água tem a função de transferir as pressões do ar para água. Ela foi construída com um anel de cilindro de acrílico de 100 mm de diâmetro, uma base e uma tampa de alumínio. A base possui um pedestal central, no qual se instala uma membrana de borracha fixada por meio de um anel do tipo “*o’ring*”. Depois de a câmara ser totalmente preenchida com água, a membrana de borracha, ao ser pressurizada por meio de ar comprimido, infla e, desta forma, transfere pressão à água da câmara (Figura 3.2).

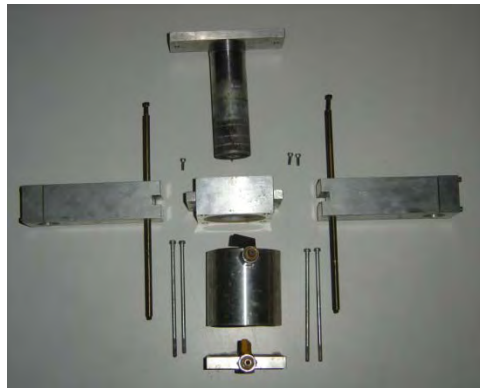


Figura 3.2 – Interface ar-água.

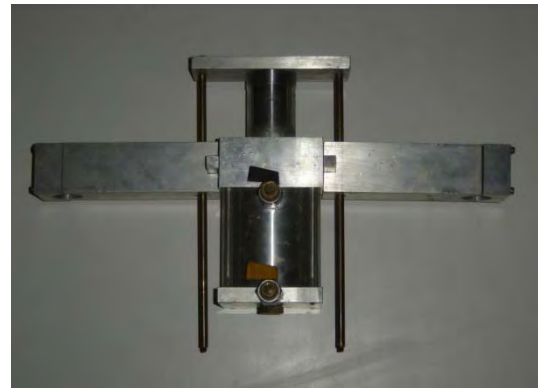
b) Bomba de fluxo

É o componente utilizado para produzir um fluxo constante de água tanto no sentido do topo para a base da amostra, quanto no sentido oposto. A bomba de fluxo desenvolvida neste trabalho utiliza uma seringa torneada em alumínio e uma prensa de velocidade constante ajustável (Figura 3.3).

Partindo das possíveis velocidades fornecidas pela prensa, as dimensões da seringa foram idealizadas de forma a atender às variações de fluxo necessárias por um período de tempo suficiente para realização do ensaio.



(a)



(b)



(c)

a) desmontada; b) semimontada; e c) instalada na prensa triaxial.

Figura 3.3 – Detalhes da bomba de fluxo.

A prensa de ensaios triaxiais usada tem capacidade de 5 kN e pode ser regulada para ter velocidades variando entre 0,00001 e 5,99999 mm/min.

A seringa dispõe de um êmbolo de 49,2 mm de diâmetro que se desloca pela câmara, gerando fluxos com valores proporcionais à velocidade imposta ao êmbolo pela prensa (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Vazões, seus respectivos tempos de curso e velocidades darcianas

q	Vel (mm/seg)	Vazão ml/min	Vazão cm³/seg	Tempo de percurso
1	0,0075	14,26	0,01426	155:33:36
2	0,015	28,52	0,02852	77:46:48
3	0,030	57,03	0,05703	38:53:24
4	0,045	85,55	0,08555	25:55:48
5	0,060	114,07	0,11407	19:55:48
6	0,075	142,59	0,14259	15:33:36
7	0,090	171,10	0,17110	12:57:36
8	0,105	199,62	0,19962	11:06:36
9	0,120	228,14	0,22184	09:43:12
10	0,135	256,66	0,25666	08:38:24
11	0,150	285,17	0,28517	07:46:48
12	0,165	313,69	0,31369	07:04:12
13	0,180	342,21	0,34221	06:28:48
14	0,195	370,73	0,37073	05:58:48
15	0,210	399,24	0,39924	05:33:36

### c) Câmara de ensaio

A célula de ensaio foi montada a partir de modificações feitas em uma célula convencional para realização de ensaios triaxiais.

A base da célula convencional foi alterada com a colocação de uma pedra porosa em toda a superfície da face superior do pedestal, conforme é mostrado na Figura 3.4. Além disso, na superfície lateral do pedestal foi torneada uma rosca para permitir a fixação de um tubo de acrílico com uma régua colada na sua superfície lateral, formando um compartimento onde é colocada, sobre a pedra porosa, a amostra a ser ensaiada (Figura 3.5).

Na ponta inferior da haste de carregamento foi colocada uma peça rígida cilíndrica, feita de acrílico, com o mesmo diâmetro da amostra (*top cap*) (Figura 3.6). Na parte inferior dessa peça colocou-se uma pedra porosa para permitir a dissipação dos poros-pressão gerada quando a amostra é submetida ao carregamento axial (Figura 3.7).

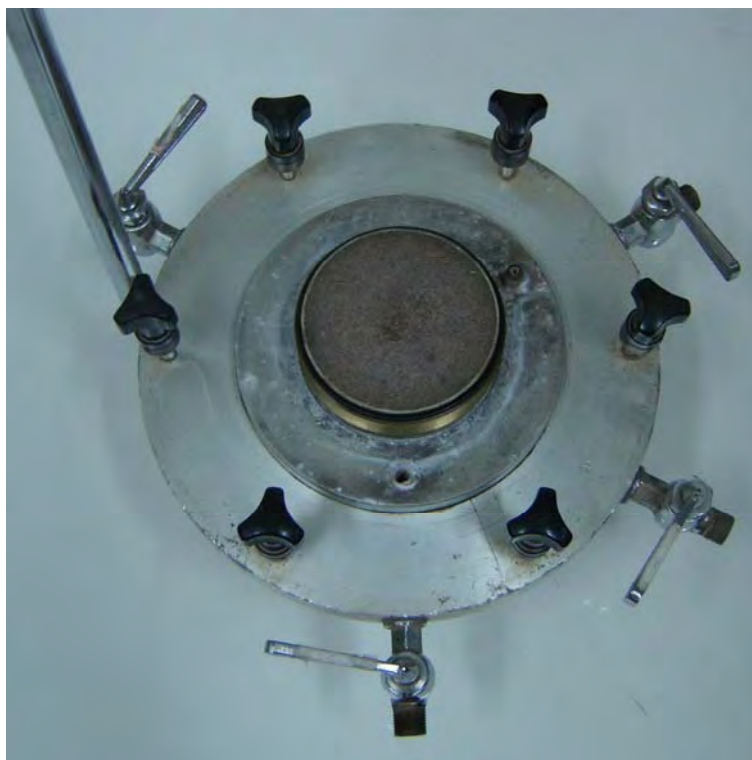


Figura 3.4 – Foto da pedra porosa instalada no pedestal da célula.

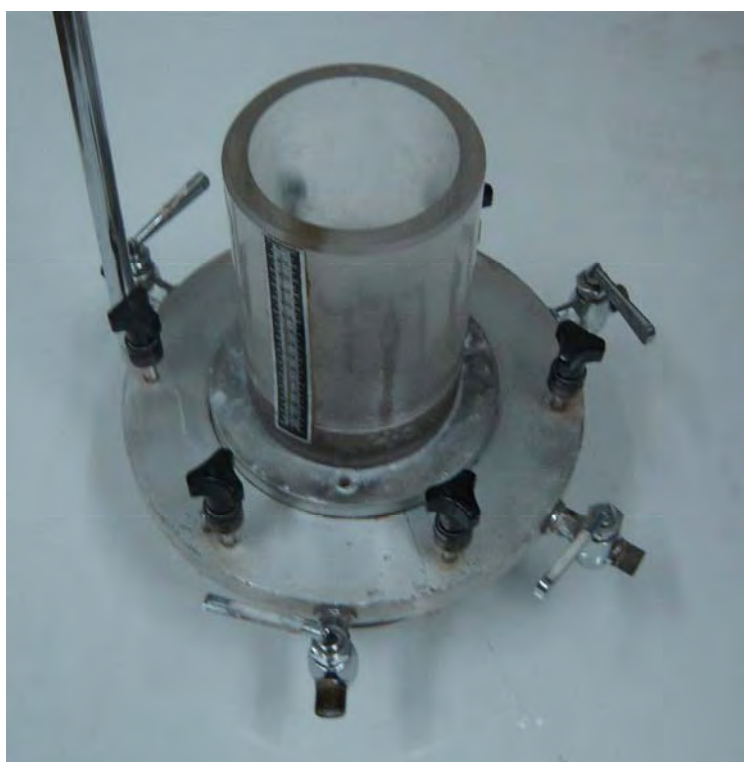


Figura 3.5 – Foto do tubo de acrílico rosqueado no pedestal.

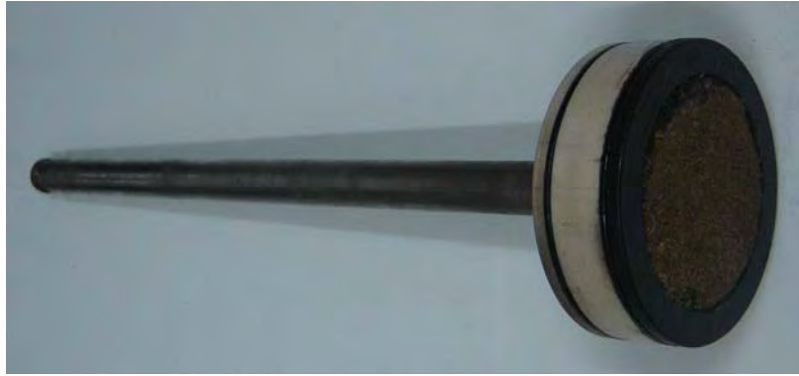


Figura 3.6 – Foto do *top cap* instalado na ponta do pistão.



Figura 3.7 – Foto mostrando pedra porosa instalada no *top cap*.

#### d) Sistema de carregamento

A tensão vertical é transmitida à amostra através de um sistema de carregamento estático, que consiste de um balanço com um apoio central e duas hastes laterais com bandejas em suas extremidades, nas quais podem ser colocados pesos de valor conhecido. O apoio central do sistema é instalado sobre o pistão, que transmite a força à amostra através do *top cap* (Figura 3.8). Naturalmente, o valor dessa força é função do valor dos pesos que se coloca na extremidade das hastes.



Figura 3.8 – Foto mostrando o sistema de carregamento.

e) Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados gera, converte, transmite e armazena os resultados obtidos durante a realização do ensaio. Esse sistema pode ser dividido em três módulos, de acordo com sua função.

- O módulo gerador de sinal é formado pelos transdutores de pressão e deslocamento. O transdutor diferencial de pressão usado é fabricado pela *Validyne Engineering Corporation*, modelo P300D, com um diagrama capaz de medir até 35 kPa de diferença de pressão, e é sensível a variações da ordem de 0,001 kPa (Figura 3.9). Para medir deslocamentos, é usado o transdutor de deslocamento fabricado pela *Wykeham Farrance*, com capacidade de 50 mm, sensível a variações da ordem de 0,01 mm (Figura 3.10).
- O módulo conversor é responsável pela filtragem e conversão dos sinais analógicos fornecidos pelos transdutores em sinais digitais, bem como pela transmissão desses sinais para o módulo de armazenamento. Foi utilizado um sistema fabricado pela *Wykeham Farrance* com 16 bits, capaz de ler até quatro canais simultaneamente. Esse sistema é capaz de receber um sinal elétrico, relacioná-lo a uma dada calibração

previamente definida, convertê-lo em sinal digital e fornecer seu valor por meio de um visor e, simultaneamente, transmiti-lo a um sistema de armazenamento de dados.

- O sistema de armazenamento consiste de um computador e um programa, escrito na linguagem CVI, desenvolvido na UFV, que armazena e trata os dados transmitidos pelo módulo de conversão.



Figura 3.9 – Transdutor diferencial de pressão.



Figura 3.10 – Transdutor de deslocamento.

Na Figura 3.11 estão o sistema de aquisição de dados e seus componentes.

#### f) Calibração

A calibração de transdutores foi feita com o módulo conversor, associando a resposta dos transdutores a solicitações conhecidas, ou seja, fornecida uma solicitação conhecida ( $S_{ci}$ ) a um transdutor, ele responde com uma corrente elétrica ( $R_{ei}$ ) e o conversor associa esses valores. Em seguida,



Figura 3.11 – Sistema de aquisição de dados.

fornecida outra solicitação conhecida ( $Sc_f$ ) ao transdutor, ele responde novamente com outra corrente elétrica ( $Ref$ ) e o conversor novamente associa esses valores. Como a variação da solicitação com a resposta elétrica, dentro dos limites especificados para cada transdutor, é considerada linear, as constantes que definem essas retas são obtidas durante a calibração (constantes de calibração). Com isso, durante o ensaio, o conversor consegue associar valores das respostas elétricas a valores de pressão e, ou, deslocamento.

Na calibração do transdutor diferencial de pressão o primeiro ponto tomado foi zero, quando as duas entradas foram expostas à pressão atmosférica. Para obtenção do segundo ponto, desenvolveu-se um sistema para aplicar pressão em uma das entradas do transdutor diferencial de pressão, por meio de uma coluna de mercúrio controlada por um êmbolo. Na Figura 3.12 está o sistema de aplicação de pressão.



Figura 3.12 – Sistema de aplicação de pressão utilizado na calibração dos transdutores.

### **3.1.4 Ensaio de sedimentação em coluna**

#### **3.1.4.1 Descrição dos equipamentos**

##### **a) Coluna de grandes dimensões**

Com o propósito de estudar a sedimentação de rejeitos com o tempo, tanto a movimentação da interface líquido sobrenadante-rejeito, quanto a variação ao longo da altura do índice de vazios do rejeito depositado, foi projetada e construída a coluna apresentada na Figura 3.13.

A coluna consiste de um tubo de acrílico de 0,20 m de diâmetro e 1 m de comprimento; de duas tampas, uma na base e outra no topo, fixadas ao tubo de acrílico através de três hastes metálicas; de um motor ligado a uma haste central provida de palhetas, posicionada no centro da base; e de três aberturas laterais, por onde se faz o recolhimento de amostras durante o ensaio. Além disso, uma régua milimetrada colada no tubo de acrílico serve para medir a posição da interface líquido sobrenadante com o rejeito (Figura 3.13).



Figura 3.13 – Coluna para ensaio de sedimentação.

Os dispositivos laterais para retirada de amostras são formados de uma peça circular de acrílico (volante) que, ao ser girada, permite posicionar a seringa em um orifício existente no tubo de acrílico, possibilitando a retirada de pequenas amostras, sem perturbar significativamente o material ensaiado (Figura 3.14).

b) Coluna convencional

Na Figura 3.15 pode-se ver a coluna convencional, comumente usada em laboratórios de mecânica dos solos para determinar a distribuição granulométrica da fração fina dos solos. Ela tem 10 cm de diâmetro, 60 cm de altura e capacidade de 1 dm<sup>3</sup>. Geralmente é feita de vidro e apresenta uma graduação volumétrica na sua superfície externa. Nesse ensaio só é possível acompanhar a movimentação da interface líquido sobrenadante-rejeito, não sendo possível monitorar a variação ao longo da altura do índice de vazios do rejeito depositado.



Figura 3.14 – Detalhe da régua de medição e do furo para retirada de amostra.



Figura 3.15 – Coluna para ensaio convencional de sedimentação.

## 3.2 Métodos

### 3.2.1 Ensaio de caracterização

Os ensaios de caracterização, peso específico das partículas, limites de consistência (LL e LP) e granulometria conjunta, foram realizados de acordo com as normas NBR 6508/84, NBR 6459/84, NBR 7180/94 e NBR 7181/84, respectivamente.

### 3.2.2 Ensaio edométrico tipo HCT

O ensaio começa com a preparação da amostra. Para isso, faz-se a homogeneização do rejeito (Figura 3.16), tendo-se o cuidado de acrescentar água, caso a amostra natural estiver com o teor de umidade muito baixo. Amostras dessa mistura devem ser separadas para determinação do teor de umidade inicial, com o qual se calcula o índice de vazios inicial da lama,  $e_0$ .



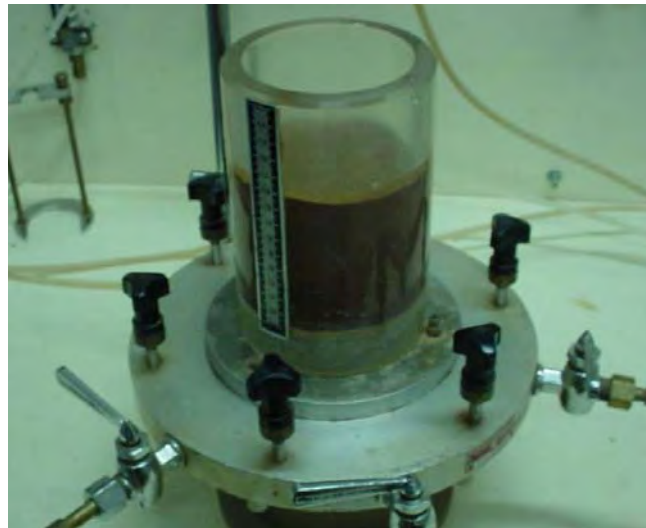
Figura 3.16 – Homogeneização da amostra.

Depois da etapa de homogeneização, a amostra é cuidadosamente colocada na câmara de ensaio (Figura 3.17).

Passa-se então ao fechamento da célula e, em seguida, à aplicação de uma contrapressão no sistema com valor normalmente igual a 200 kPa, por período de cerca de 24 horas, para garantir a completa saturação da amostra (Figura 3.18).



(a)



(b)

(a) amostra sendo colocada; e (b) amostra pronta.

Figura 3.17 – Preparação da amostra na câmara de ensaio.

Terminada a fase de aplicação da contrapressão, inicia-se o ensaio de adensamento por forças de percolação, submetendo-se a amostra a um fluxo descendente e constante imposto pela sua base. Esse fluxo gera diferença de pressão ( $\Delta P$ ) entre a base e o topo da amostra e diminuição na altura da amostra ( $\Delta H$ ), variáveis com o tempo. Quando ( $\Delta P$ ) e ( $\Delta H$ ) ficam constantes, o adensamento induzido por percolação para o valor do fluxo imposto está concluído. Nesse momento, registram-se o valor de diferença de pressão ( $\Delta P_A$ ) e a altura final da amostra ( $H_A$ ).

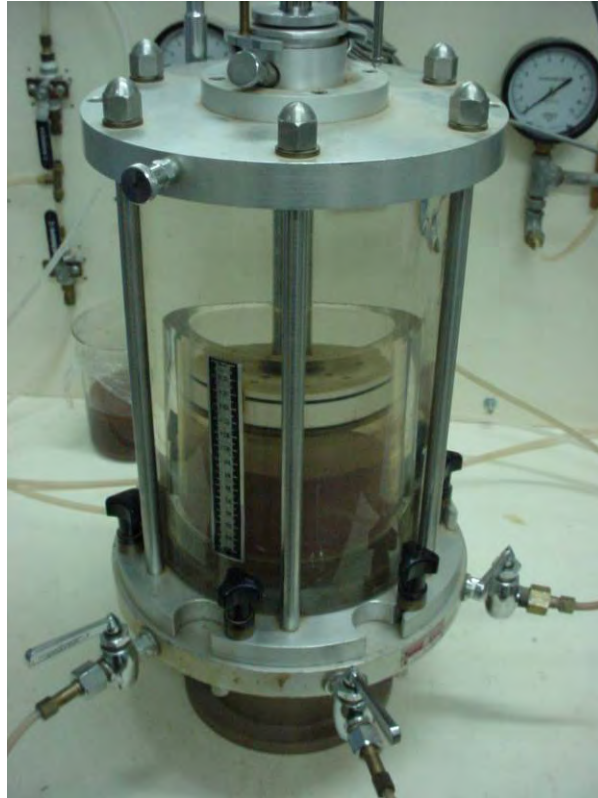


Figura 3.18 – Amostra dentro da câmara durante aplicação da contrapressão.

O valor de  $\Delta P_A$  permite o cálculo da tensão efetiva na base da amostra por meio da equação:

$$\sigma'_{bA} = H_s (\gamma_{sat} - \gamma_w) + \Delta P_A \quad (3.1)$$

A análise do teste supõe a curva de compressibilidade ( $e$  versus  $\sigma'_v$ ) expressa pela equação (LIU, 1990; LIU; ZNIDARCIC, 1991):

$$e = A(\sigma'_v + Z)^B \quad (3.2)$$

e a relação de permeabilidade escrita como:

$$k = Ce^D \quad (3.3)$$

em que  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  e  $Z$  são parâmetros dos modelos constitutivos citados anteriormente.

A metodologia de interpretação do ensaio requer, portanto, a determinação desses cinco parâmetros. A obtenção desses parâmetros é feita por meio de um processo inverso, através da minimização das diferenças entre os resultados de  $\sigma'_{bA}$  e  $H_A$  obtidos no laboratório e  $\sigma'_{bTeor}$  e  $H_{Teor}$  obtidos

analiticamente. No entanto, Liu (1990) e Liu e Znidarcic (1991) mostraram que esse procedimento não era adequado para obtenção de todos os parâmetros usando somente  $\sigma'_{bA}$  e  $H_A$ , obtidos do ensaio de adensamento induzido por forças de percolação. Por esse motivo, três novas etapas tiveram de ser acrescentadas ao ensaio para reduzir o número de parâmetros independentes e tornar possível a determinação dos parâmetros restantes por meio de um processo inverso (LIU, 1990; LIU; ZNIDARCIC, 1991; LAQUINI; AZEVEDO, 2003).

Primeiro realiza-se um ensaio para determinação do índice de vazios de formação do solo ou índice de vazios correspondente à tensão efetiva nula ( $e_{00}$ ). Na metodologia proposta por Abu-Hejleh e Znidarcic (1992), e seguida por Silva (1999), esse ensaio é realizado ao colocar o rejeito para sedimentar em um becker. Após um período de tempo, cerca de 24 horas, a água acumulada no topo da amostra é cuidadosamente removida. Em seguida, algumas amostras são retiradas da superfície do rejeito sedimentado no becker, onde a tensão efetiva é praticamente nula, para determinação do teor de umidade  $e$ , conseqüentemente, do índice de vazios  $e_{00}$  (SILVA, 1999).

Como esse procedimento é pouco preciso, a determinação de  $e_{00}$  é feita por meio do acompanhamento de um ensaio de sedimentação em coluna. Nesse ensaio, inicialmente, determinam-se o índice de vazios inicial ( $e_{0col}$ ) e a altura inicial ( $H_{0col}$ ) da mistura colocada na coluna. Desta forma, calcula-se a altura de sólidos na coluna ( $H_{Scol}$ ):

$$H_{Scol} = \frac{H_{0col}}{1 + e_{0col}} \quad (3.4)$$

Espera-se pela sedimentação, e quando ela cessa determina-se a altura final na coluna ( $H_{Fcol}$ ) (Figura 3.19). O índice de vazios  $e_{00}$  é, então, calculado pela expressão:

$$e_{00} = \frac{H_{Fcol}}{H_{Scol}} - 1 \quad (3.5)$$

Determinado o valor de  $e_{00}$  e considerando  $\sigma'_v = 0$  (equação 3.2), tem-se que:

$$A = \frac{e_{00}}{Z^B} \quad (3.6)$$

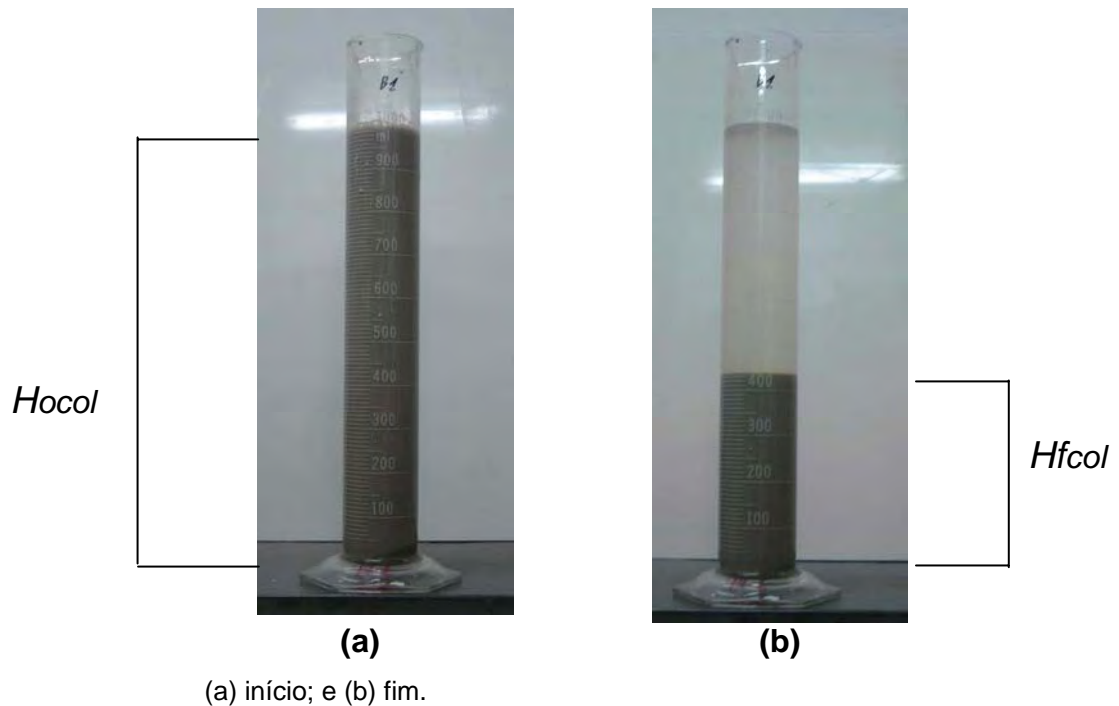


Figura 3.19 – Ensaio de sedimentação.

A segunda etapa, realizada após o ensaio de adensamento por percolação, consiste em submeter a amostra a um novo processo de carregamento, desta vez causado por um carregamento estático constante ( $\sigma'_c$ ). Durante o adensamento mede-se a variação da altura da amostra com o tempo, até se alcançar a estabilização do deslocamento, o que indica o fim do processo de adensamento para essa sobrecarga. Medindo-se a altura da amostra antes do carregamento  $H_A$  e a altura da amostra após o adensamento  $H_C$ , pode-se determinar o índice de vazios da amostra, suposto uniforme, correspondente à tensão vertical aplicada ( $\sigma'_c$ ):

$$e_C = \left( H_A / H_C \right) - 1 \quad (3.7)$$

Com isso determina-se um ponto da curva de compressibilidade do rejeito ( $e_C, \sigma'_c$ ).

Na terceira etapa ainda com o carregamento da etapa anterior aplicado, a amostra é novamente submetida ao fluxo descendente conhecido ( $v_k$ ). Entretanto, como após o carregamento a amostra já está bem mais consistente que no início do ensaio, as forças de percolação geram deslocamentos imperceptíveis. Por isso, é razoável considerar que o índice de vazios da etapa

anterior permanece constante. Assim sendo, medindo-se a diferença de pressão gerada entre o topo e a base da amostra ( $\Delta P_k$ ), pode-se calcular o coeficiente de permeabilidade por meio da lei de Darcy, como sendo:

$$k_P = (v_C H_C \gamma_w) / \Delta P_k \quad (3.8)$$

Com esse novo ensaio, determina-se um ponto da curva de permeabilidade do rejeito ( $e_C, k_P$ ).

Da etapa de carregamento com carga constante, determina-se um ponto da curva de compressibilidade ( $e_C, \sigma'_{vC}$ ). A partir da mesma equação (3.2), pode-se escrever:

$$e_C = A(\sigma'_{vC} + Z)^B \quad (3.9)$$

ou, usando a equação (3.6) nessa última equação:

$$Z = \frac{\sigma'_{vC}}{(e_C/e_{00})^{1/B} - 1} \quad (3.10)$$

Da etapa de percolação com fluxo constante, pela equação (3.3), pode-se escrever:

$$C = \frac{k_P}{(e_C)^D} \quad (3.11)$$

Dessa forma, só dois parâmetros,  $B$  e  $D$ , são independentes e necessitam ser otimizados, através da minimização das diferenças entre os resultados de  $\sigma'_{bA}$  e  $H_A$  obtidos no laboratório e  $\sigma'_{bTeor}$  e  $H_{Teor}$  obtidos analiticamente. Dessa forma o processo de otimização funciona adequadamente (LIU, 1990; LIU e ZNIDARCIC, 1991).

Os resultados teóricos necessários para o processo de otimização são obtidos por meio da teoria do adensamento unidimensional desenvolvida por Gibson et al. (1967), para analisar o ensaio HCT. A equação governante dessa teoria já foi apresentada no Capítulo 2, equação 2.26, repetida aqui para facilitar a leitura do texto:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{k}{\gamma_w(1+e)} \frac{d\sigma'_v}{de} \frac{\partial e}{\partial z} \right] - (G_s - 1) \left[ \frac{d}{de} \left( \frac{k}{1+e} \right) \right] \frac{\partial e}{\partial z} = \frac{\partial e}{\partial t} \quad (3.12)$$

em que  $z$  é a coordenada, no caso considerada positiva quando direcionada para baixo;  $t$  é o tempo;  $k$  é o coeficiente de permeabilidade do rejeito saturado;  $e$  é o índice de vazios; e  $\sigma'_v$  é a tensão efetiva vertical e  $G_s = \gamma_s/\gamma_w$  é a densidade das partículas.

No estado permanente  $\frac{\partial e}{\partial t} = 0$  e a equação (3.12) fica igual a:

$$\frac{d}{dz} \left[ \frac{k}{\gamma_w(1+e)} \frac{d\sigma'_v}{de} \frac{de}{dz} \right] - (G_s - 1) \left[ \frac{d}{de} \left( \frac{k}{1+e} \right) \right] \frac{de}{dz} = 0 \quad (3.13)$$

A equação (3.13) pode ser reescrita como:

$$\frac{d}{dz} \left[ (G_s - 1) \left( \frac{k}{1+e} \right) \right] = \frac{d}{dz} \left[ \frac{k}{\gamma_w(1+e)} \frac{d\sigma'_v}{dz} \right] \quad (3.14)$$

A integração dos dois lados do sinal de igualdade resulta em:

$$\frac{k}{1+e} (G_s - 1) = \frac{k}{\gamma_w(1+e)} \frac{d\sigma'_v(z)}{dz} + X \quad (3.15)$$

em que  $X$  é uma constante de integração, neste caso igual a  $-v$  (fluxo imposto), logo:

$$v = \frac{k}{\gamma_w(1+e)} \frac{d\sigma'_v(z)}{dz} - \frac{k}{1+e} (G_s - 1) \quad (3.16)$$

A integração da equação (3.16) resulta em:

$$\sigma'_v(z) = \gamma_w (G_s - 1) z + \int_0^z \frac{v \gamma_w}{k} (1+e) dz \quad (3.17)$$

O primeiro termo dessa equação representa a tensão efetiva devido ao peso próprio do rejeito, e o último representa a tensão efetiva devido às forças de percolação.

Da equação (3.17) obtém-se a tensão efetiva na base da amostra de rejeito:

$$\sigma'_{bTeor} = \gamma_w (G_s - 1) H_s + \int_0^{H_s} \frac{v \gamma_w}{k} (1+e) dz \quad (3.18)$$

Por outro lado, a altura da amostra pode ser calculada pela equação:

$$H_{Teor} = \int_0^H s (1 + e) dz \quad (3.19)$$

O cálculo dos parâmetros  $B$  e  $D$  é feito por meio de um método inverso no qual se arbitram valores de  $B$  e  $D$  e calcula-se, numericamente, o valor de  $\sigma'_{bTeor}$  da seguinte forma. Inicialmente, supõe-se uma distribuição uniforme de índice de vazios e calcula-se a distribuição de tensão efetiva com a equação (3.18). Com essa distribuição de tensão efetiva, calcula-se (equação 3.2) uma nova distribuição de índice de vazios, com a qual se calcula um novo valor para  $\sigma'_{bTeor}$  (equação 3.18). Esse processo iterativo prossegue até que a distribuição de índice de vazios arbitrada seja igual à calculada, ou, em outras palavras, que o valor de  $\sigma'_{bTeor}$  da iteração corrente seja igual ao valor da última iteração (dentro de uma tolerância pré-estabelecida). Nessa altura, a equação (3.19) é usada para calcular  $H_{Teor}$ .

Em seguida, com os valores obtidos experimentalmente  $\sigma'_{bA}$  (equação 3.1) e  $H_A$  medido visualmente na etapa de adensamento induzido por forças de percolação do ensaio, calcula-se o “erro” ( $Err$ ) dado por:

$$Err(B,D) = \left| 1 - \frac{\sigma'_{bA}}{\sigma'_{bTeor}} \right| + \left| 1 - \frac{H_A}{H_{Teor}} \right| \quad (3.20)$$

Um processo de otimização de segunda ordem (método de Newton), acoplado a uma estratégia de busca do mínimo em direção de maior declividade (VANDERPLAATS, 1984), é usado para calcular valores melhorados de  $B$  e  $D$  em sucessivas iterações. Esse processo de busca do mínimo continua até a função objetiva ( $Err$ ) alcançar valor menor que um pequeno valor fornecido como critério de convergência (SILVA, 1998).

O procedimento de otimização é feito automaticamente por meio de um programa denominado HCTPlus (LAQUINI; AZEVEDO, 2003).

### 3.2.3 Ensaio de coluna

#### a) Coluna de grandes dimensões

Inicialmente define-se o teor de sólidos da amostra a ser estudada, em geral igual ao do rejeito lançado na barragem. Homogeneiza-se uma amostra do rejeito com esse teor de sólidos e, em seguida, coloca-se, com um

funil, essa mistura no interior da coluna por um orifício existente na tampa superior. Simultaneamente, o motor é ligado, fazendo com que as paletas se movimentem, mantendo as partículas em suspensão, até que a amostra atinja a altura de 800 mm, medida pela régua fixada na lateral do tubo.

A partir daí, o motor é desligado e, com auxílio de um ajudante, o conjunto é balançado durante 1 minuto, semelhantemente ao que se faz na preparação do ensaio de granulometria conjunta, e, em seguida, é colocado em repouso.

A altura da interface líquido sobrenadante - lama é acompanhada com o uso de uma régua milimetrada, em função do tempo, até se estabilizar em uma altura constante.

Durante o ensaio, em tempos pré-definidos, são recolhidas amostras de lama em diferentes alturas, através dos orifícios laterais (Figura 3.20). Em seguida, a amostra úmida é colocada em uma folha de papel alumínio (Figura 3.21), levada para pesagem em balança de alta precisão (0,0001 g) (Figura 3.22) úmida e, após 24 horas na estufa, está seca. Com isso, é possível o acompanhamento do teor de sólidos (ou do índice de vazios) da lama durante o processo de sedimentação.



Figura 3.20 – Extração de amostra de rejeito durante ensaio de sedimentação.



Figura 3.21 – Colocação de amostra de rejeito para determinação do teor de umidade.

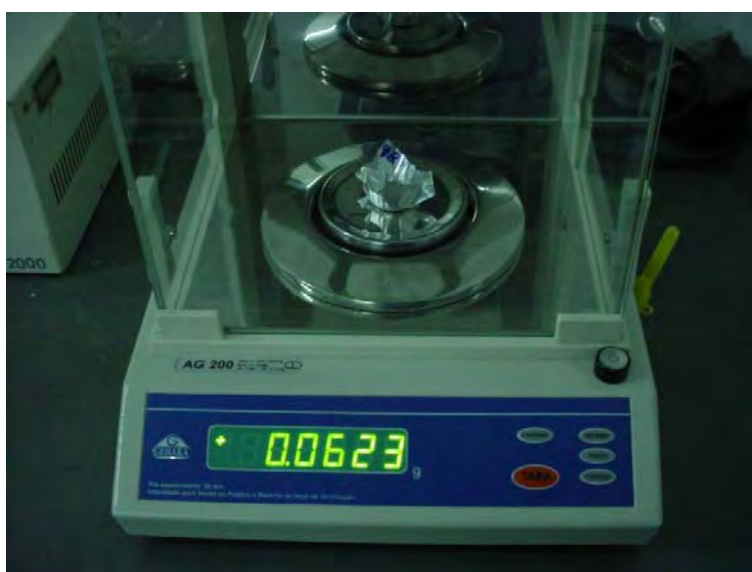


Figura 3.22 – Pesagem da amostra em balança de alta precisão.

#### b) Coluna convencional

Da mesma forma que na coluna anterior, na coluna convencional, inicialmente, definiu-se o teor de sólidos da amostra a ser estudada, em geral igual ao do rejeito lançado na barragem. Homogeniza-se uma amostra do rejeito com esse teor de sólidos e, em seguida, coloca-se essa mistura no interior da coluna, até que a amostra atinja altura correspondente a 1.000 ml.

Em seguida, a coluna é deixada em repouso e a descida da interface líquido sobrenadante-lama é acompanhada em função do tempo, até se estabilizar.

c) Interpretação dos ensaios de coluna pela teoria de Kynch (1952)

A interpretação dos ensaios de coluna, segundo a teoria de Kynch (1952), é feita por meio da equação (2.30), conhecendo-se a altura inicial da mistura ( $H_0$ ), o índice de vazio inicial ( $e_0$ ), a altura final da mistura ( $H_f$ ) e os parâmetros  $C$  e  $D$ , que definem a função de permeabilidade da lama (equação 3.3).

Inicialmente determina-se a altura de sólidos ( $H_s$ ) e o índice de vazios de formação do solo ( $e_{00}$ ) por meio das equações (3.4) e (3.5), respectivamente.

Em seguida, calculam-se as funções  $f(e)$  correspondentes a diferentes valores de índices de vazios  $e_i$  escolhidos, considerando-se as equações 2.31 e 3.3:

$$f(e_i) = \left( \frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) \left[ \frac{d \left( \frac{k(e)}{1+e} \right)}{de} \right]_{e=e_i} = \left( \frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) \frac{C}{(1+e_i)^2} \left[ D e_i^{(D-1)} + (D-1) e_i^D \right] \quad (3.22)$$

Conhecendo-se as funções  $f(e_i)$ , os tempos de chegada das linhas características na interface sólido líquido sobrenadante podem ser calculados em função do índice de vazios por meio das expressões (Figura 3.23). Notar que  $C$  e  $D$ , inicialmente, não são conhecidos:

$$t_0 = \frac{H_S}{VZ_0} \quad (3.23)$$

$$t_i = \frac{H_S}{VZ_i} \quad (3.24)$$

$$t_{i+1} = \frac{H_S}{VZ_{i+1}} \quad (3.25)$$

$$t_{00} = \frac{H_S}{VZ_{00}} \quad (3.26)$$

Além disso, ainda considerando a Figura 3.23, por semelhança de triângulo, pode-se escrever, para  $t < t_0$ :

$$\frac{t}{1} = \frac{H_S - Z_0}{VZ_0} \quad (3.27)$$

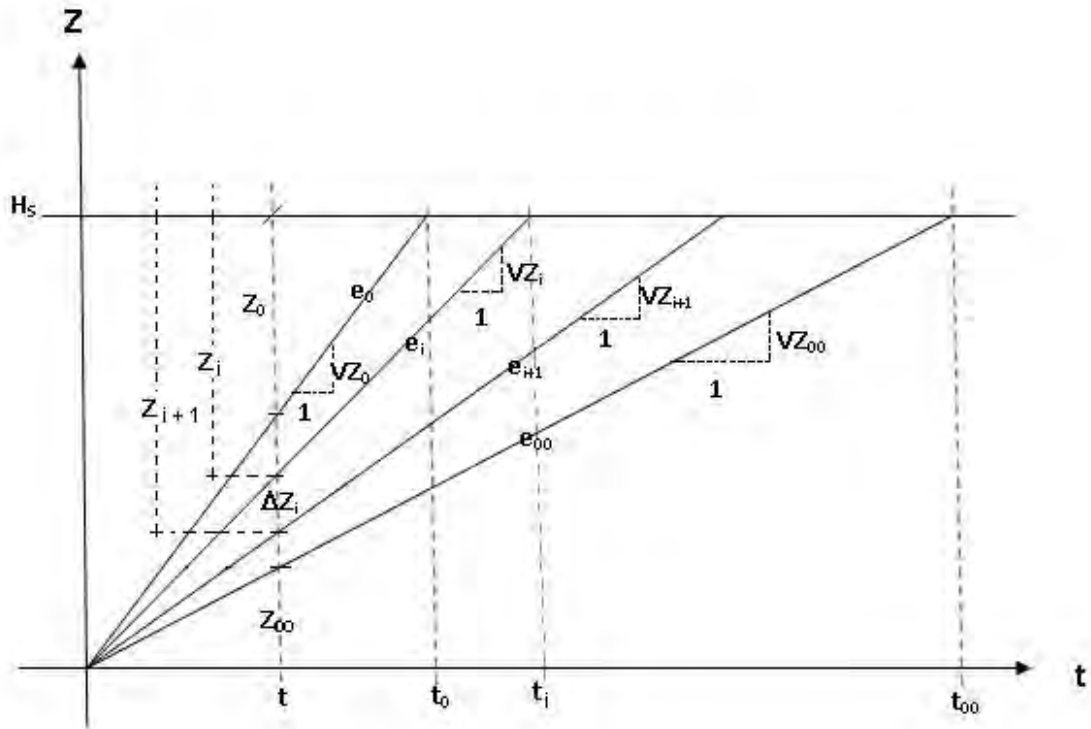


Figura 3.23 – Descida com o tempo da interface líquido sobrenadante-lama em coordenadas materiais.

A espessura  $Z_0$  é calculada substituindo-se o valor de  $VZ_0$  obtido na equação (3.23) na equação (3.27), daí resultando:

$$Z_0 = \left(1 - \frac{t}{t_0}\right) H_S \quad (3.28)$$

Por outro lado, a espessura  $Z_{00}$  é calculada pela expressão:

$$Z_{00} = \frac{H_S}{t_{00}} t \quad (3.29)$$

No trecho em que o índice de vazios varia de  $e_0$  até  $e_{00}$ , a espessura  $Z_{0-00}$  é calculada pela expressão

$$Z_{0-00} = \sum \Delta Z_i = \sum (Z_{i+1} - Z_i) \quad (3.30)$$

Em que

$$Z_i = \left(1 - \frac{t}{t_i}\right) H_s \quad (3.31)$$

$$Z_{i+1} = \left(1 - \frac{t}{t_{i+1}}\right) H_s \quad (3.32)$$

Para  $t > t_0$ ,  $Z_0$  é igual a zero e para  $t > t_{00}$ ,  $Z_0$  e  $Z_{0-00}$  são nulos e  $Z_{00}$  é igual a  $H_s$ .

Determinadas as alturas no sistema de coordenada material  $z$ , a altura da interface no tempo  $t$ , em coordenadas eulerianas  $H_\xi(t)$ , é calculada por:

$$H_\xi(t) = H_{\xi 0}(t) + H_{\xi 0-00}(t) + H_{\xi 00}(t) \quad (3.33)$$

em que  $H_{\xi 0}(t)$  é a espessura correspondente ao trecho no qual o índice de vazios é constante e igual a  $e_0$ ;  $H_{\xi 0-00}(t)$  é a espessura correspondente ao trecho em que o índice de vazios é variável; e  $H_{\xi 00}(t)$  é a espessura correspondente ao trecho no qual o índice de vazios é igual a  $e_{00}$  (Figura 3.24).

Considerando as transformações de coordenadas, equação 2.24, pode-se escrever:

$$H_{\xi 0}(t) = Z_0 (1 + e_0) \quad (3.34)$$

$$H_{\xi 0-00}(t) = \sum [Z_i (1 + e_i) - Z_{i+1} (1 + e_{i+1})] \quad (3.35)$$

$$H_{\xi 00}(t) = Z_{00} (1 + e_{00}) \quad (3.36)$$

A substituição destas três últimas equações na equação (3.33) permite o cálculo da posição da interface com o tempo,  $H_\xi(t)$ .

Nota-se que, a partir de  $t_0$ ,  $H_{\xi 0}(t)$  é nula e, a partir de  $t_{00}$ ,  $H_{\xi 0}(t)$  e  $H_{\xi 0-00}(t)$  são nulas e  $H_\xi(t) = H_{\xi 00}(t)$  fica constante.

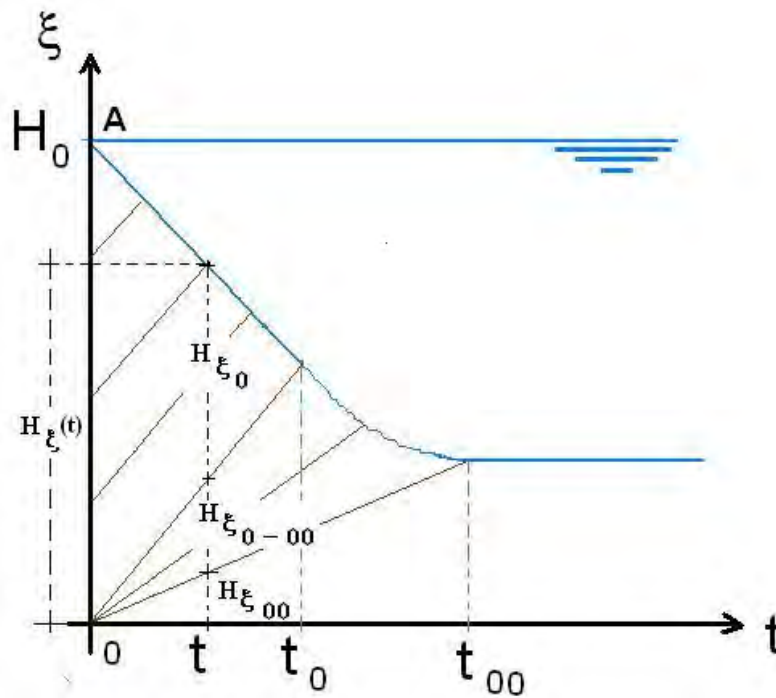


Figura 3.24 – Descida com o tempo da interface líquido sobrenadante-lama em coordenadas eulerianas.

### 3.3 Metodologia proposta para interpretação do ensaio HCT

A metodologia desenvolvida nessa tese propõe a utilização de um ensaio de coluna convencional e de um ensaio HCT somente com a fase de fluxo, ou seja, fase de adensamento induzido por forças de percolação. Se for o caso, esses dois ensaios podem ser realizados simultaneamente para determinar os parâmetros A, B e Z da curva de compressibilidade e os parâmetros C e D da curva de permeabilidade dos rejeitos.

O ensaio de coluna convencional é usado para a determinação da descida com o tempo da interface líquido sobrenadante-lama. A concentração de sólidos usada nesse ensaio tem de ser igual à usada no ensaio HCT e no campo, uma vez as características de compressibilidade e permeabilidade dependem disso (BOTELHO, 2001; VILLAR, 2002).

A partir da altura inicial da mistura na coluna de sedimentação e da altura final após a sedimentação determina-se o valor do índice de vazios de formação do solo ( $e_{00}$ ) pela equação (3.5).

Com o monitoramento da descida da interface durante a sedimentação, usa-se o procedimento descrito no item anterior para calcular os parâmetros  $C$  e  $D$ . Para isso, arbitram-se valores iniciais para esses parâmetros, a partir dos quais se calculam os valores ótimos de  $C$  e  $D$  que minimizam a diferença entre as curvas de descida da interface líquido sobrenadante-lama obtidas no laboratório e teoricamente. Esse processo de otimização é feito pelo comando SOLVER de uma planilha EXCEL especialmente preparada para isso.

Terminada a interpretação do ensaio de coluna, ficam conhecidos os parâmetros  $C$  e  $D$ , e o índice de vazios  $e_{00}$ . Nota-se que, considerando a equação (3.6), conhecido  $e_{00}$ , o parâmetro  $Z$  pode ser determinado a partir dos parâmetros  $A$  e  $B$ .

Paralelamente ao ensaio de coluna, realiza-se a fase de adensamento induzido por forças de percolação do ensaio HCT para determinar esses parâmetros ( $A$  e  $B$ ). Para isso, aplica-se um fluxo e, após a estabilização, se calcula  $\sigma'_{bA}$  a partir da diferença de pressão ( $\Delta P_A$ ), equação (3.1), e a altura final da amostra ( $H_A$ ).

A minimização da diferença, equação (3.20), entre esses resultados obtidos no laboratório,  $\sigma'_{bA}$  e  $H_A$ , e  $\sigma'_{bTeor}$  e  $H_{Teor}$  obtidos analiticamente pelas equações (3.18) e (3.19), respectivamente, proporciona o cálculo dos parâmetros  $A$  e  $B$ .

Para isso, utiliza-se um processo de otimização de segunda ordem e uma estratégia de busca do mínimo na direção de maior declividade para calcular os melhores valores de  $A$  e  $B$  em sucessivas iterações. Esse procedimento de otimização é feito automaticamente por meio do programa HCTPlus.

No próximo capítulo será mostrado que nos ensaios realizados na coluna de grandes dimensões, a teoria de Kynch (1952) modela adequadamente a descida da interface com o tempo, bem como a variação do índice de vazios com a profundidade e o tempo, apesar de o ensaio desenvolvido ser limitado em relação a essa medição.

Em seguida, será mostrado que as curvas de permeabilidade determinadas com o monitoramento das descidas das interfaces nas colunas grandes e convencional são muito parecidas. Portanto, na nova metodologia propõe-se

o uso da coluna pequena, convencional, muito usada em laboratório de Mecânica dos Solos.

Por fim, o novo procedimento será validado, mostrando-se que as curvas de compressibilidade e permeabilidade obtidas com o novo procedimento são semelhantes às obtidas no ensaio HCT, quando interpretado pelo procedimento convencional.

## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 Caracterização

Nas Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam-se os resultados dos ensaios de caracterização realizados com os rejeitos estudados. Observa-se que os rejeitos provenientes dos processos de beneficiamento para produção de ferro e níquel são os que têm as partículas mais pesadas e os de ouro e lavagem de bauxita são os mais leves.

Tabela 4.1 – Peso específico das partículas e limites de consistência dos rejeitos estudados

Rejeito	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	Limite de consistência (%)		
		LL	LP	IP
Lavagem de Bauxita I	26,40	51,12	28,97	22,15
Lavagem de Bauxita II	27,40	49,97	27,00	22,97
Lavagem de Bauxita III	27,80	63,00	31,51	31,49
Ferro/Itabirito	39,59	23,94	15,08	8,86
Ferro/Hematita	41,00	25,88	17,44	8,44
Ferro I	39,10	26,80	18,73	8,07
Ferro II	31,90	49,00	35,00	14,00
Ouro I	25,70		np	
Ouro II	25,40	33,00	19,00	14,00
Níquel	34,51		np	
Ácido Fosfórico I	28,17	53,80	30,30	23,50
Ácido Fosfórico II	30,35	57,90	26,30	31,60
Zinco	30,51	72,00	57,50	14,50
Monazita	30,02		np	
Cobre	28,82		np	

\* np – não plástico.

Tabela 4.2 – Distribuição granulométrica dos rejeitos estudados

Rejeito	Granulometria (%)		
	Areia	Silte	Argila
Lavagem de Bauxita I	11	11	78
Lavagem de Bauxita II	5	16	79
Lavagem de Bauxita III	8	19	73
Ferro/Itabirito	28	36	36
Ferro/Hematita	5	47	48
Ferro I	18	61	21
Ferro II	4	59	37
Ouro I	82	11	7
Ouro II	30	55	15
Níquel	32	60	8
Ácido Fosfórico I	0	5	95
Ácido Fosfórico II	1	19	80
Zinco	*		
Monazita	*		
Cobre	*		

\* Não ocorrem dispersão das partículas quando foi usado ou hidróxido de sódio ou hexametáfosfato de sódio.

Os rejeitos de zinco, lavagem de bauxita e ácido fosfórico apresentam os maiores índices de plasticidade e podem ser considerados como plásticos, enquanto que os rejeitos de ouro, monazita e cobre são não-plásticos.

Com relação à granulometria, coerentemente com o que foi observado nos índices de consistência, os rejeitos de lavagem de bauxita e ácido fosfórico apresentam grande quantidade de partículas do tamanho argila.

Cumprе salientar que esses ensaios foram realizados com água e não com o soro particular de cada rejeito, o que, certamente, modifica a curva de distribuição granulométrica, conforme salientado por Villar (2002).

## 4.2 Ensaios de sedimentação em coluna

### 4.2.1 Ensaios de sedimentação na coluna grande

#### 4.2.1.1 Rejeito de monazita

Na Tabela 4.3 e na Figura 4.1 apresentam-se os resultados do ensaio de sedimentação na coluna de grandes dimensões apresentada no Capítulo 3.

Tabela 4.3 – Ensaio de sedimentação em coluna grande – rejeito de monazita

Tempo (min)	Altura Interface (m)	Tempo (min)	Altura Interface (m)
0	0,800	169	0,416
2	0,799	173	0,411
6	0,792	177	0,406
10	0,788	184	0,398
16	0,778	192	0,390
20	0,771	200	0,385
25	0,764	208	0,382
30	0,752	215	0,378
35	0,745	224	0,375
41	0,733	232	0,372
45	0,727	242	0,368
50	0,716	252	0,365
59	0,698	282	0,357
63	0,691	317	0,349
67	0,683	350	0,343
72	0,672	432	0,333
79	0,657	573	0,321
83	0,646	600	0,319
90	0,631	672	0,316
97	0,614	792	0,311
107	0,582	900	0,309
117	0,552	1.459	0,301
127	0,514	1.857	0,299
142	0,465	2.117	0,298
149	0,448	3.517	0,294
160	0,428	5.797	0,289

Observa-se que após cerca de 2.000 minutos a altura da interface fica praticamente constante, indicando que o processo de sedimentação está concluído.

Na Figura 4.2 está a comparação entre as curvas de descida da interface líquido sobrenadante-rejeito *versus* o tempo, obtidas experimental e analiticamente pela teoria de Kynch (1952), com os parâmetros apresentados na Tabela 4.4. Observa-se concordância muito boa entre os resultados.

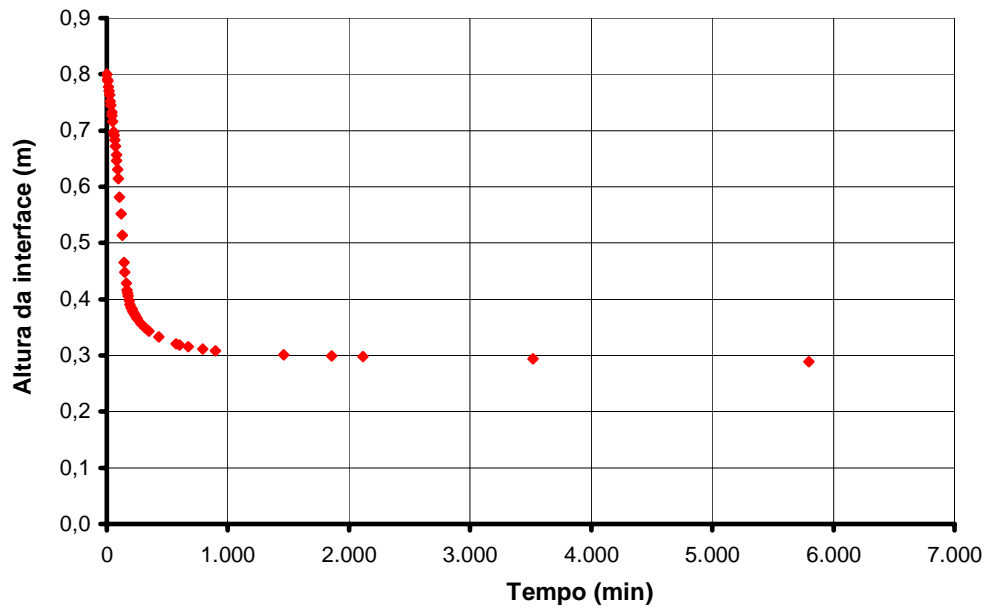


Figura 4.1 – Descida da interface com o tempo - rejeito de monazita.

Tabela 4.4 – Parâmetros do modelo analítico

<b>G</b>	<b>e<sub>0</sub></b>	<b>e<sub>00</sub></b>	<b>C(m/s)</b>	<b>D</b>
3,06	30,47	11,2	1,72E-08	3,07

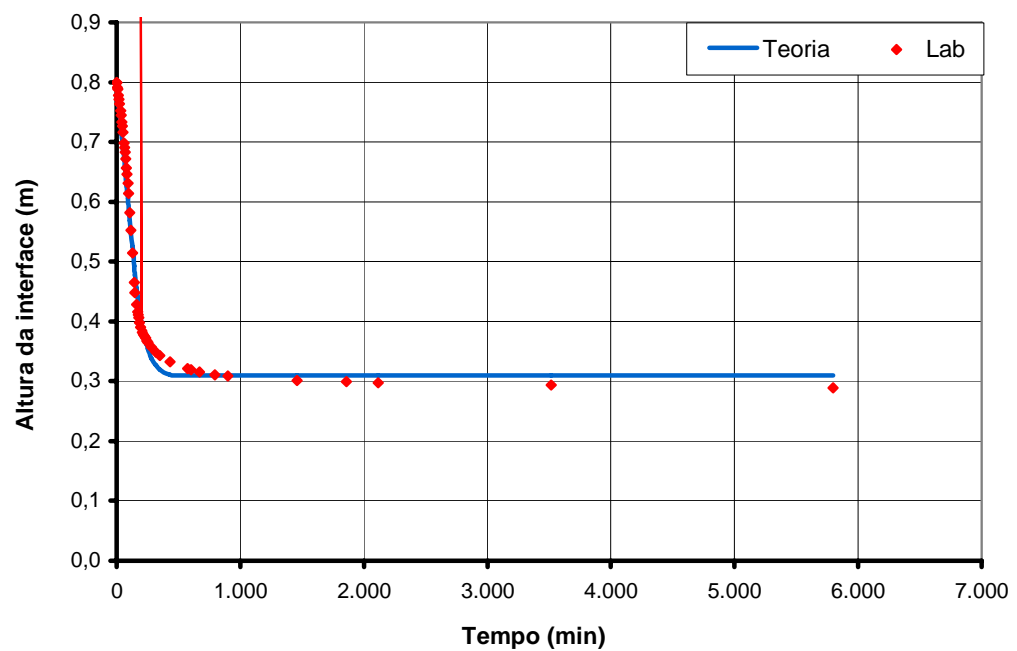


Figura 4.2 – Comparação entre as descidas da interface com o tempo, obtidas experimental e analiticamente - rejeito de monazita.

Na Figura 4.3 estão as variações do teor de umidade gravimétrico com o tempo nos pontos localizados a 50, 30 e 10 cm da base da coluna. Nota-se que a interface líquido sobrenadante-lama rapidamente ficou abaixo do ponto localizado a 50 cm, fazendo com que o teor de umidade nesse ponto tendesse para infinito.

Nas Figuras 4.4 a 4.6 apresentam-se as variações do teor de umidade gravimétrico com a profundidade, nos tempos 100, 200 e 600 minutos após o início do ensaio. Nota-se que no fundo da coluna vai se formando uma camada progressivamente mais espessa, com índice de vazios igual a  $e_{00}$  e, portanto, teor de umidade gravimétrico igual a 340%.

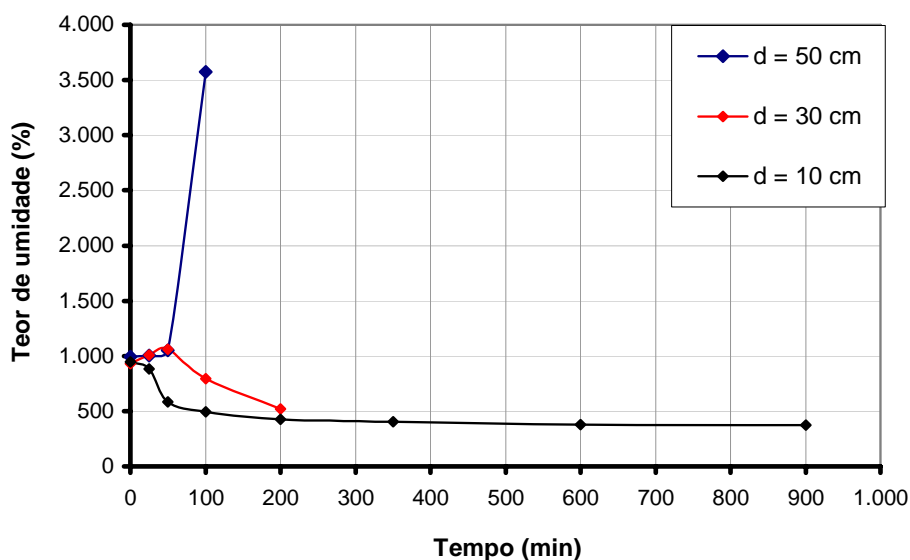


Figura 4.3 – Variações do teor de umidade com o tempo, obtidas experimentalmente.

Na Figura 4.7 está a comparação entre os resultados analíticos e experimentais da distribuição do teor de umidade com o tempo. Observa-se boa concordância entre os resultados no ponto localizado a 10 cm do fundo da coluna. No ponto correspondente a 30 cm do fundo da coluna a concordância é apenas razoável e no terceiro ponto, a concordância não é boa. Considera-se que o procedimento proposto é pouco preciso quando o teor de sólidos é muito pequeno, o que ocorre nos pontos mais elevados.

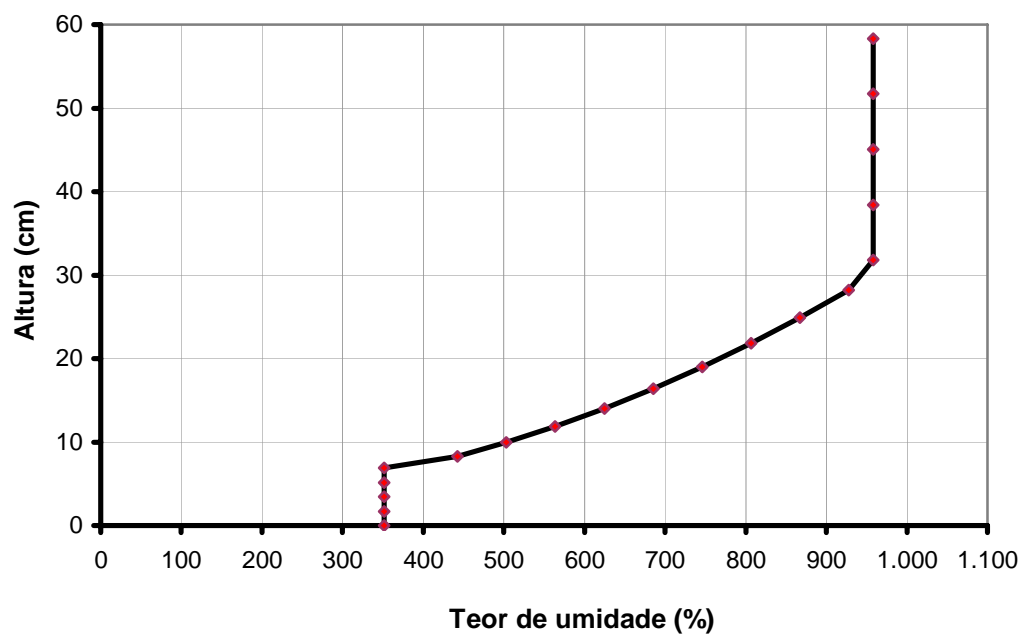


Figura 4.4 – Distribuição de teor de umidade na coluna para t = 100 minutos.

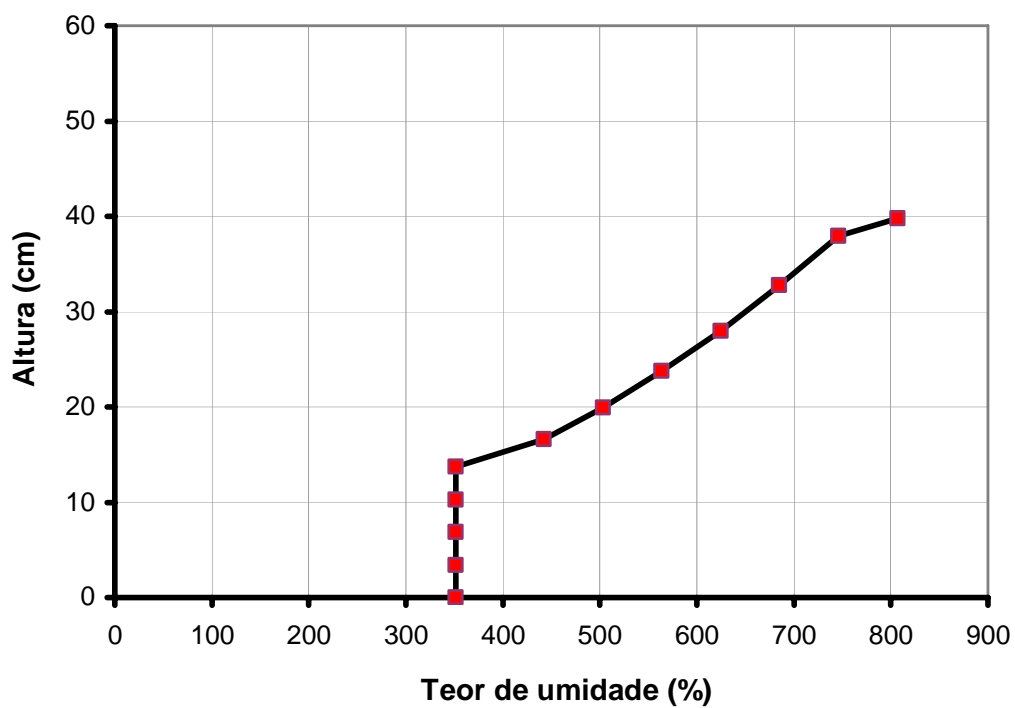


Figura 4.5 – Distribuição de teor de umidade na coluna para t = 200 minutos.

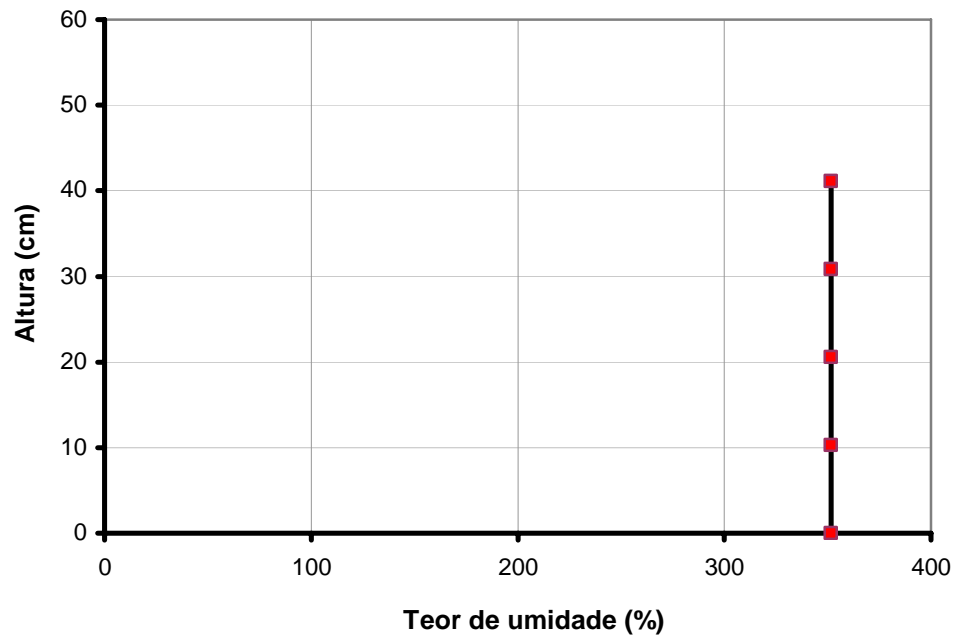


Figura 4.6 – Distribuição de teor de umidade na coluna para  $t = 600$  minutos.

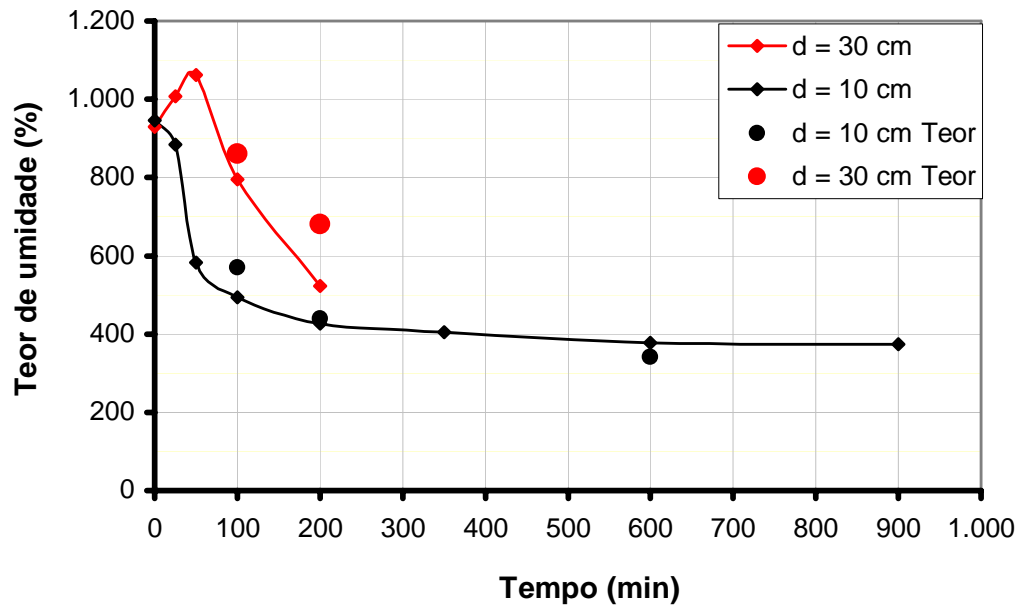


Figura 4.7 – Comparação entre as variações do teor de umidade com o tempo, obtidas experimental e analiticamente.

#### **4.2.1.2 Rejeito de ácido fosfórico I**

Na Tabela 4.5 e na Figura 4.8 apresentam-se os resultados do ensaio de sedimentação na coluna de grandes dimensões apresentada no Capítulo 3.

Observa-se que após cerca de 4.000 minutos a altura da interface permanece praticamente constante, indicando que o processo de sedimentação está concluído.

Na Figura 4.9 está a comparação entre as curvas de descida da interface líquido sobrenadante-rejeito *versus* tempo, obtidas experimental e analiticamente pela teoria de Kynch (1952), com os parâmetros apresentados na Tabela 4.6. Observa-se boa concordância entre os resultados.

Na Figura 4.10 estão as variações do teor de umidade gravimétrico com o tempo, nos pontos localizados a 50, 30 e 10 cm da base da coluna. Verifica-se que os primeiros pontos apresentaram aumento de concentração, o que é incoerente com o esperado e previsto pelo modelo. Mais uma vez, acredita-se que este fato ocorre em função de o procedimento proposto para determinação da umidade ser pouco preciso, quando a concentração é pequena.

Nas Figuras 4.11 a 4.13 encontram-se as variações do teor de umidade gravimétrico com a profundidade, nos tempos de 100, 200 e 900 minutos após o início do ensaio.

Na Figura 4.14 está a comparação entre os resultados analíticos e experimentais da distribuição do teor de umidade com o tempo. Observa-se concordância razoável entre os resultados no ponto localizado a 10 cm do fundo da coluna, principalmente nos tempos maiores, à medida que as concentrações ficam mais elevadas.

#### **4.2.1.3 Rejeito de zinco**

Na Tabela 4.7 e na Figura 4.15 encontram-se os resultados do ensaio de sedimentação na coluna de grandes dimensões, apresentado no Capítulo 3.

Observa-se que após cerca de 1.000 minutos a altura da interface fica praticamente constante, indicando que o processo de sedimentação está concluído.

Tabela 4.5 – Ensaio de sedimentação em coluna grande – rejeito de ácido fosfórico

Tempo (min)	Altura Interface (m)	Tempo (min)	Altura Interface (m)
0	0,800	175	0,430
1	0,799	181	0,418
2	0,796	185	0,411
4	0,792	190	0,402
6	0,787	196	0,390
8	0,782	200	0,383
10	0,777	205	0,373
15	0,765	213	0,358
20	0,754	215	0,354
25	0,743	220	0,345
30	0,730	225	0,335
35	0,719	230	0,327
40	0,710	235	0,318
45	0,699	241	0,308
50	0,689	245	0,301
55	0,677	250	0,293
60	0,667	255	0,286
65	0,657	260	0,282
70	0,646	265	0,279
75	0,636	270	0,277
80	0,626	277	0,274
85	0,615	285	0,272
90	0,605	300	0,268
95	0,595	330	0,261
100	0,585	360	0,256
107	0,570	420	0,247
110	0,565	480	0,239
115	0,554	606	0,228
120	0,544	920	0,205
125	0,533	972	0,202
130	0,523	1.980	0,162
135	0,513	2.627	0,149
140	0,502	3.233	0,142
145	0,492	4.065	0,137
150	0,482	4.677	0,135
155	0,471	5.602	0,133
160	0,460	6.467	0,133
165	0,451	7.567	0,132
170	0,441	8.362	0,132

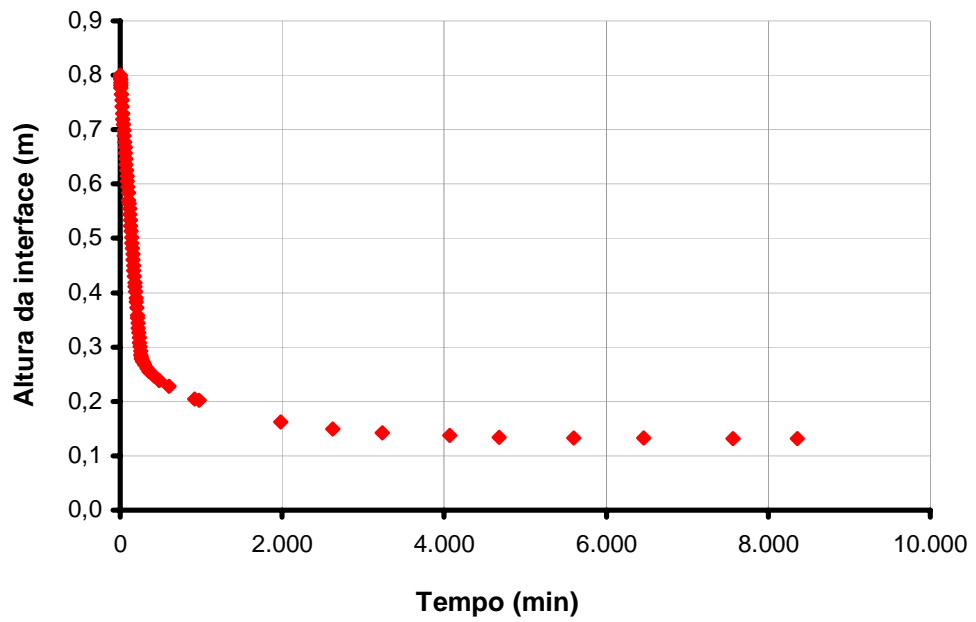


Figura 4.8 – Descida da interface com o tempo – ácido fosfórico I.

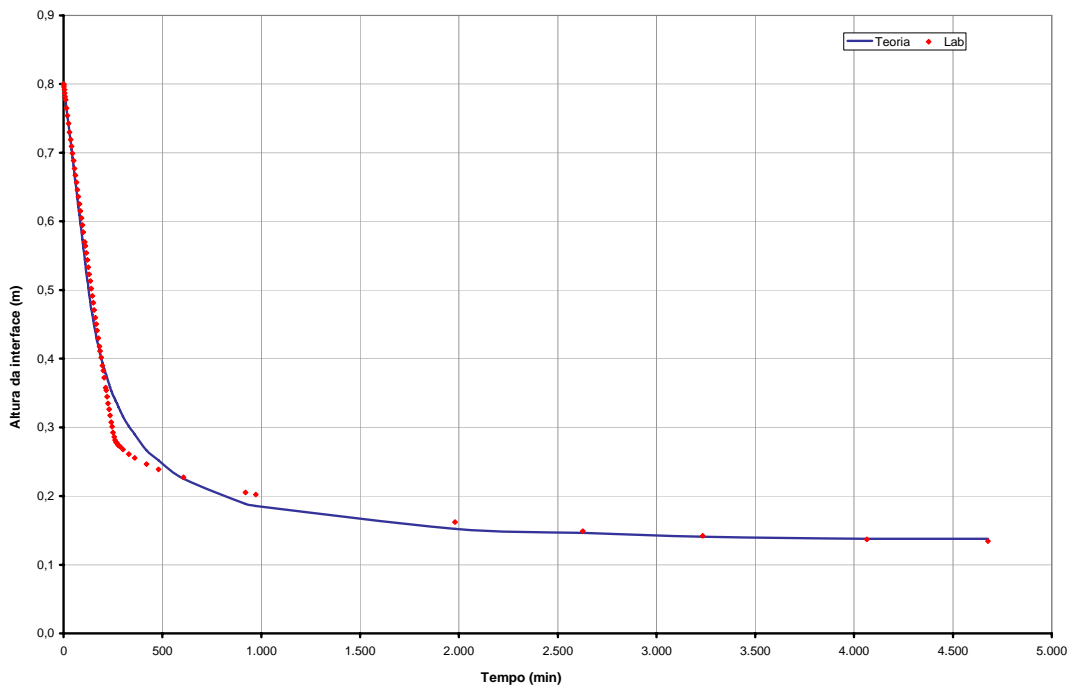


Figura 4.9 – Comparação entre as descidas da interface com o tempo, obtidas experimental e analiticamente – ácido fosfórico I.

Tabela 4.6 – Parâmetros do modelo analítico

G	$\epsilon_0$	$\epsilon_{00}$	C(m/s)	D
3,094	28,06	4,45	2,28E-08	3,00

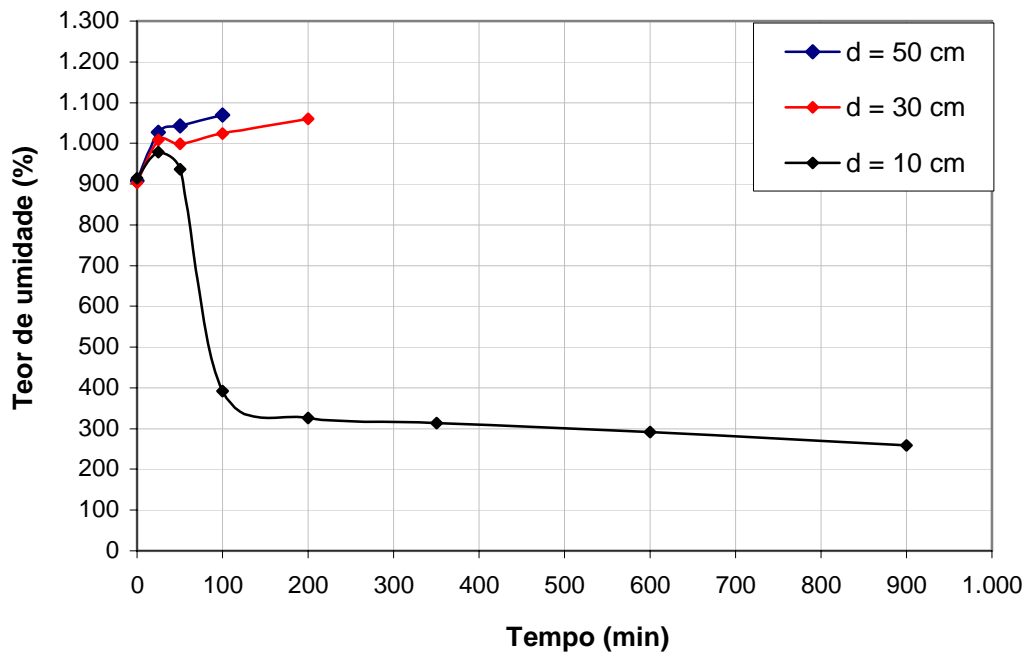


Figura 4.10 – Variações do teor de umidade com o tempo, obtidas experimentalmente.

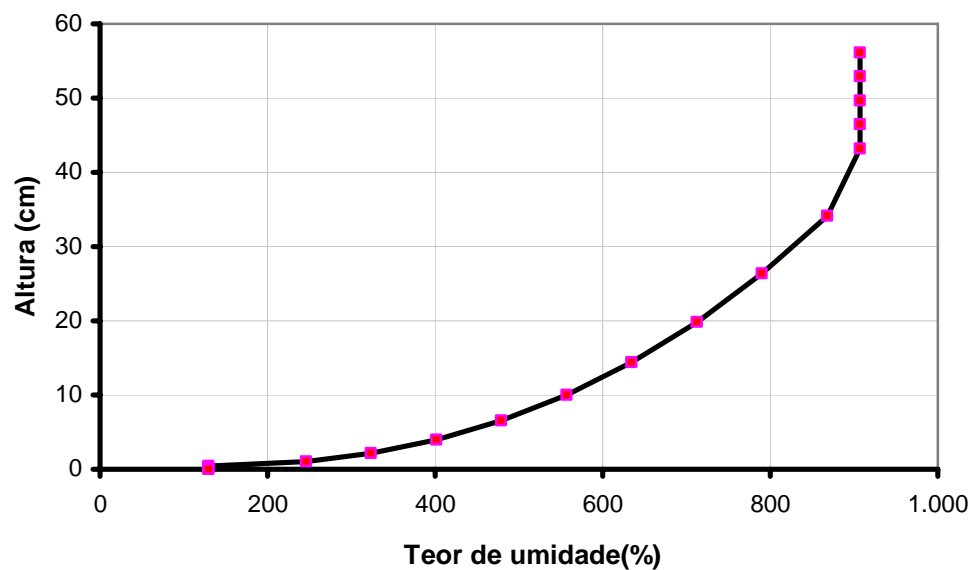


Figura 4.11 – Distribuição de teor de umidade na coluna para t = 100 minutos.

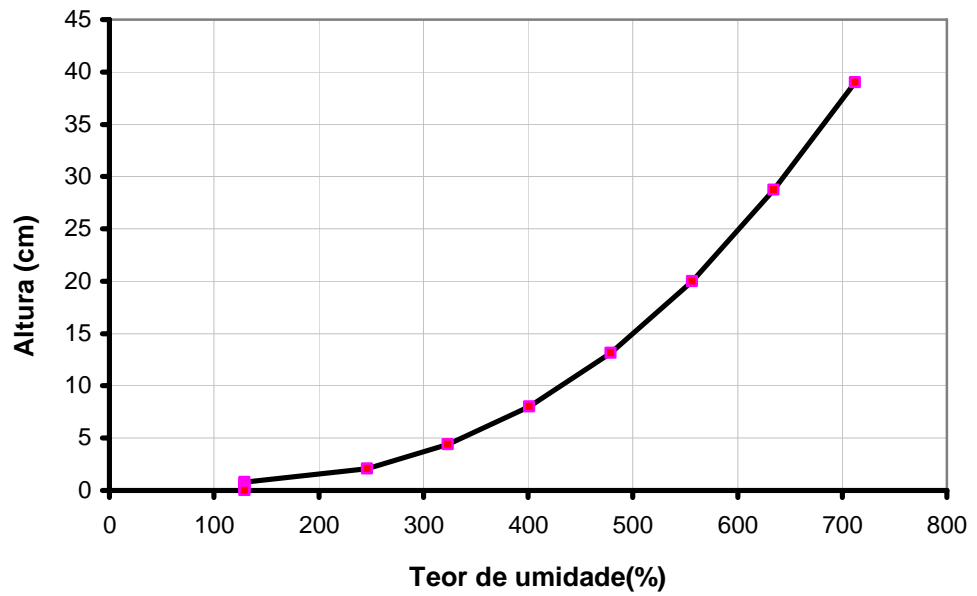


Figura 4.12 – Distribuição de teor de umidade na coluna para t = 200 minutos.

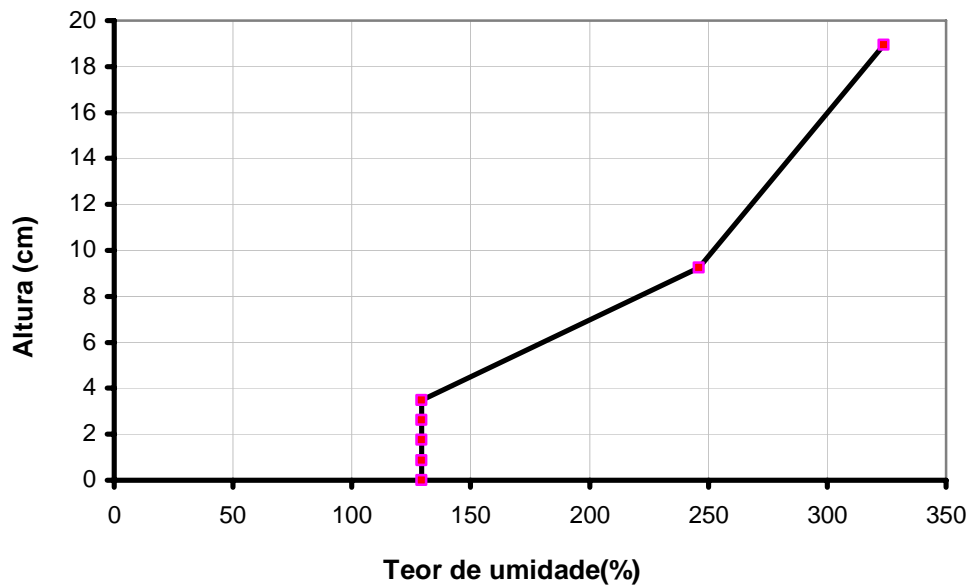


Figura 4.13 – Distribuição de teor de umidade na coluna para t = 900 minutos.

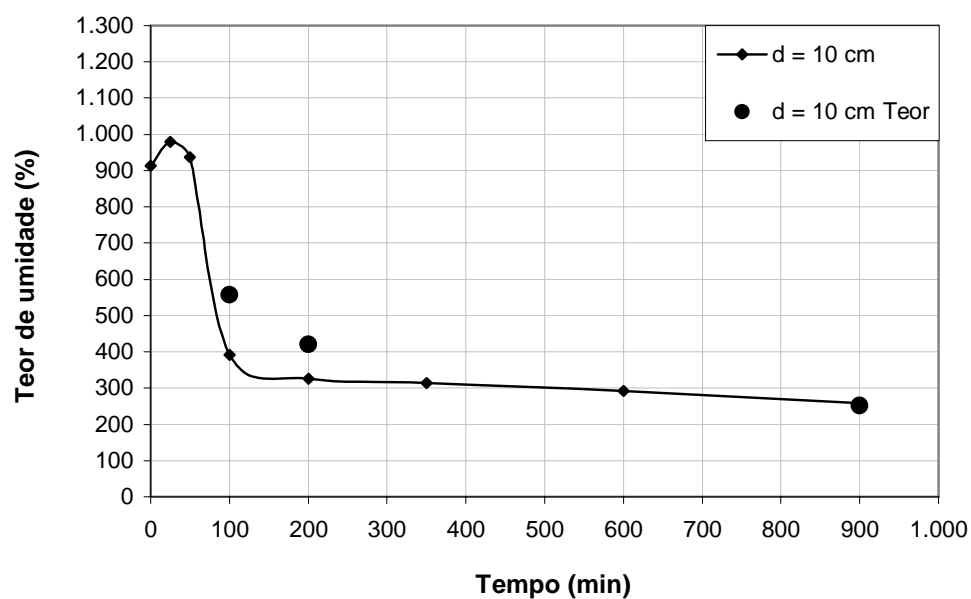


Figura 4.14 – Comparação entre as variações do teor de umidade com o tempo, obtidas experimental e analiticamente.

Tabela 4.7 – Ensaio de sedimentação em coluna – rejeito de zinco

Tempo (min)	Altura Interface (m)	Tempo (min)	Altura Interface (m)
0	0,800	105	0,448
1	0,797	120	0,426
2	0,795	150	0,403
4	0,791	180	0,389
6	0,787	240	0,368
8	0,778	300	0,353
10	0,770	360	0,335
15	0,755	480	0,312
20	0,738	600	0,295
25	0,721	900	0,267
30	0,705	1.070	0,260
35	0,690	1.158	0,258
40	0,677	1.237	0,256
45	0,661	1.356	0,253
50	0,646	1.680	0,250
55	0,631	1.931	0,248
60	0,615	2.430	0,246
75	0,567	3.351	0,244
90	0,512	5.478	0,244

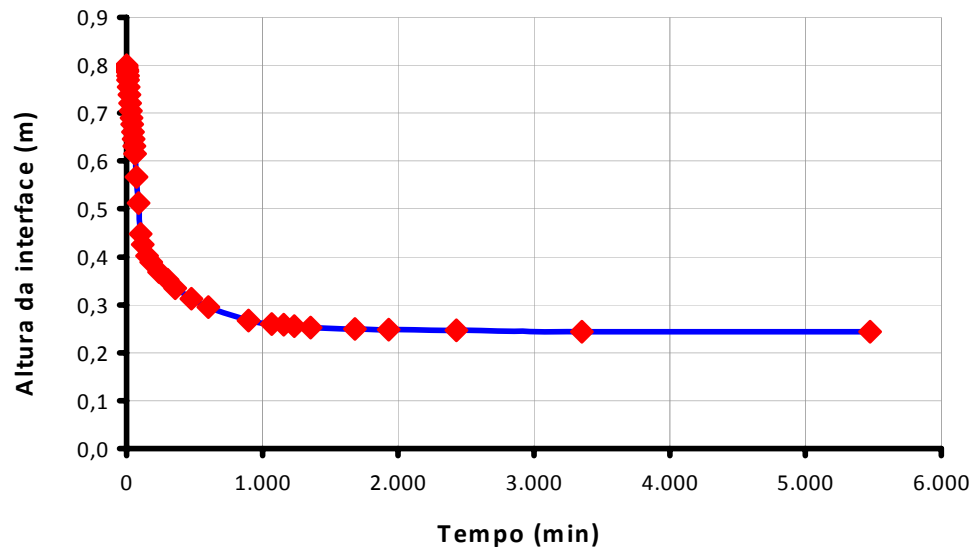


Figura 4.15 – Descida da interface com o tempo – zinco.

Na Figura 4.16 está a comparação entre as curvas de descida da interface líquido sobrenadante-rejeito *versus* tempo, obtidas experimental e analiticamente pela teoria de Kynch (1952), com os parâmetros apresentados na Tabela 4.8. Observa-se boa concordância entre os resultados.

Tabela 4.8 – Parâmetros do modelo analítico

<b>G</b>	<b><math>e_0</math></b>	<b><math>e_{00}</math></b>	<b>C(m/s)</b>	<b>D</b>
3,11	32,23	9,47	2,24E-10	4,37

Na Figura 4.17 estão as variações do teor de umidade gravimétrico com o tempo, nos pontos localizados a 50, 30 e 10 cm da base da coluna. Constata-se que os primeiros pontos apresentaram aumento de concentração, o que é incoerente com o esperado e previsto pelo modelo. Mais uma vez, acredita-se que este fato ocorre em função de o procedimento proposto para determinação da umidade ser pouco preciso quando a concentração é pequena.

Nas Figuras 4.18 a 4.20 estão as variações do teor de umidade gravimétrico com a profundidade, nos tempos de 100, 200 e 900 minutos após o início do ensaio.

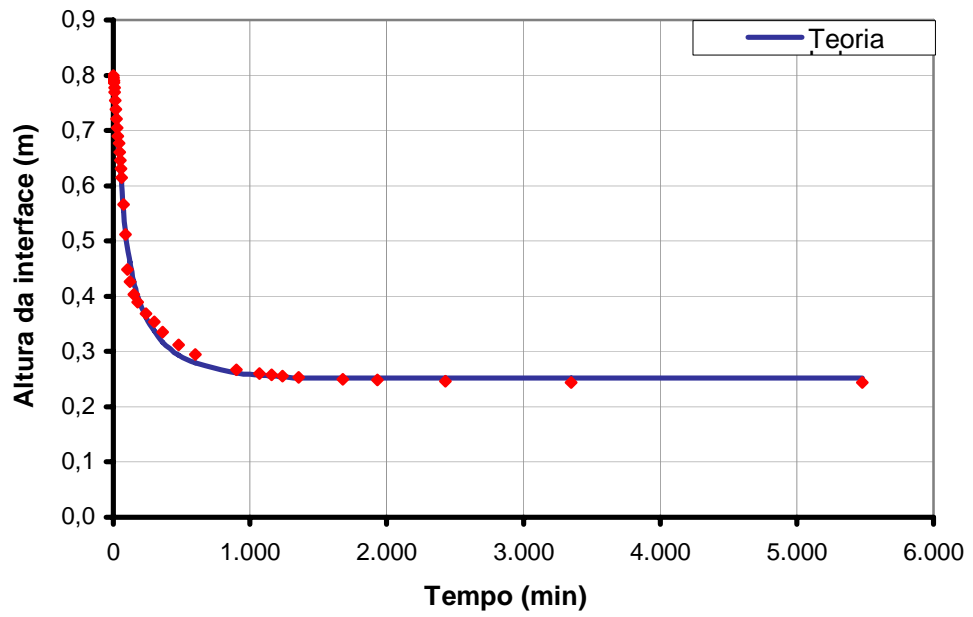


Figura 4.16 – Comparação entre as descidas da interface com o tempo, obtidas experimental e analiticamente – zinco.

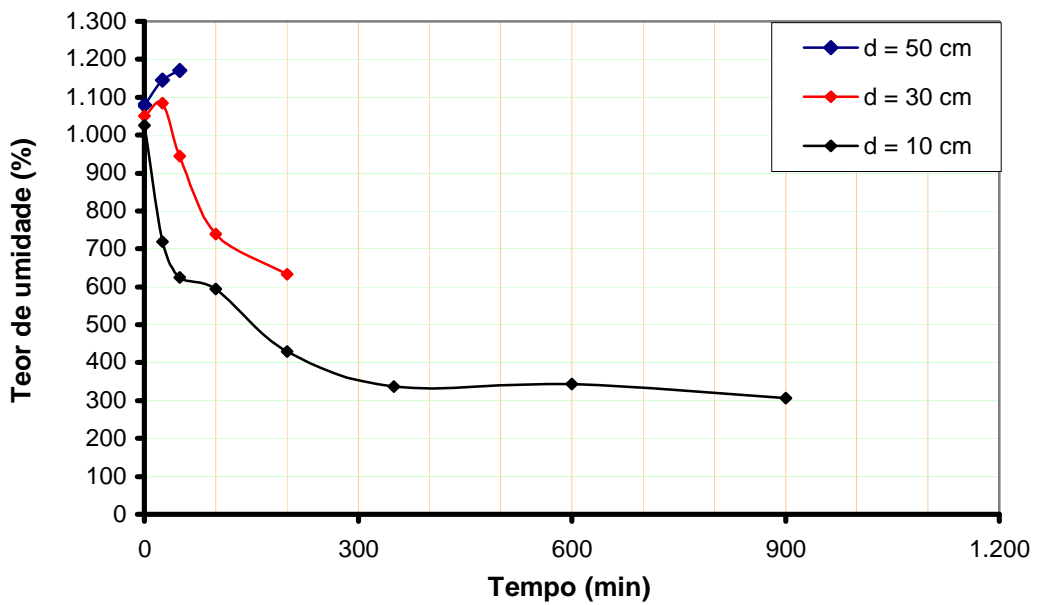


Figura 4.17 – Variações do teor de umidade com o tempo, obtidas experimentalmente.

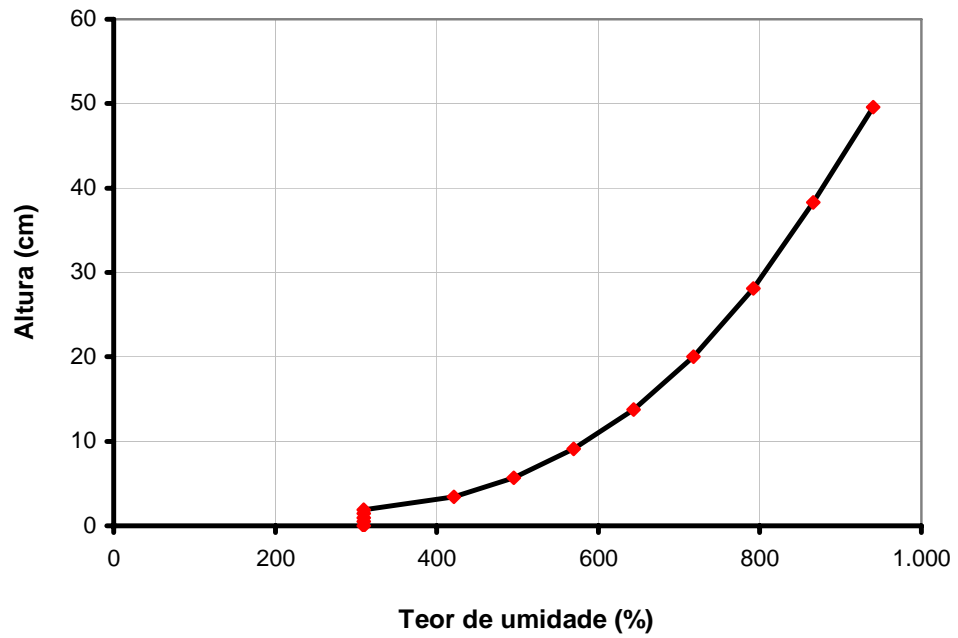


Figura 4.18 – Distribuição de teor de umidade na coluna para t = 100 minutos.

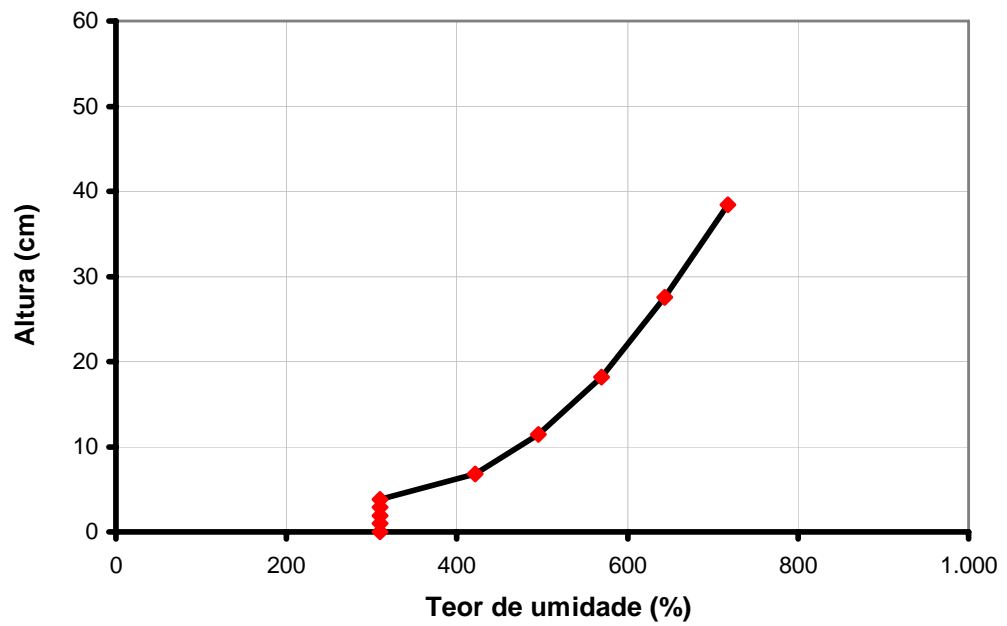


Figura 4.19 – Distribuição de teor de umidade na coluna para t = 200 minutos.

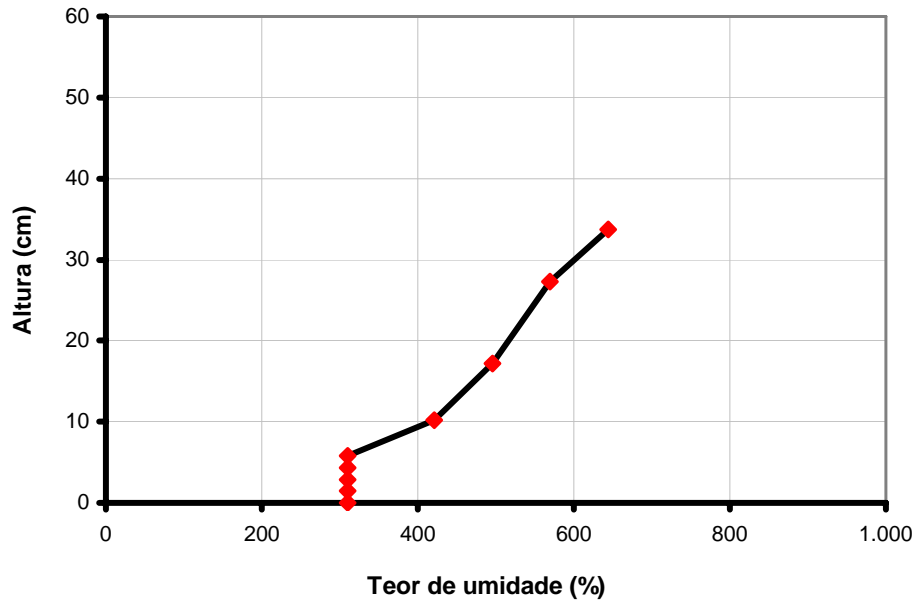


Figura 4.20 – Distribuição de teor de umidade na coluna para  $t = 300$  minutos.

Na Figura 4.21 estão a comparação entre os resultados analíticos e experimentais da distribuição do teor de umidade com o tempo. Observa-se concordância razoável entre resultados no ponto localizado a 10 cm do fundo da coluna, principalmente nos tempos maiores, à medida que as concentrações ficam mais elevadas.

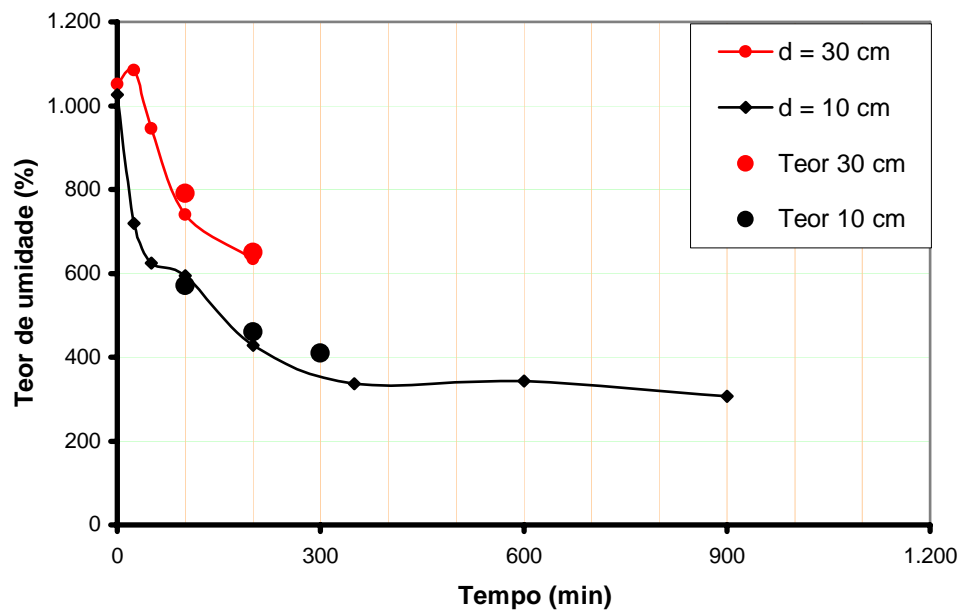


Figura 4.21 – Comparação entre as variações do teor de umidade com o tempo, obtidas experimentalmente e analiticamente.

#### 4.2.1.4 Rejeito de lavagem de bauxita I

Na Tabela 4.9 e na Figura 4.22 estão os resultados do ensaio de sedimentação na coluna de grandes dimensões, apresentado no Capítulo 3.

Tabela 4.9 – Ensaio de sedimentação em coluna – lavagem de bauxita I

Tempo (min)	Altura Interface (m)	Tempo (min)	Altura Interface (m)
0	0,800	750	0,523
3	0,800	900	0,509
5	0,798	1.070	0,498
6	0,796	1.226	0,489
8	0,794	1.406	0,479
10	0,793	1.625	0,468
12	0,792	1.790	0,461
16	0,791	1.936	0,455
18	0,790	2.240	0,443
20	0,789	2.540	0,432
25	0,787	2.780	0,425
30	0,785	3.183	0,412
35	0,783	3.560	0,402
40	0,781	4.226	0,386
45	0,779	4.654	0,377
50	0,777	4.946	0,371
55	0,775	5.742	0,359
60	0,773	6.478	0,347
75	0,768	7.214	0,339
90	0,761	7.990	0,331
105	0,755	8.601	0,324
120	0,747	9.372	0,318
150	0,720	10.123	0,312
180	0,682	10.503	0,310
240	0,629	11.387	0,305
300	0,601	12.124	0,302
360	0,582	13.020	0,299
420	0,568	14.413	0,295
480	0,557	15.003	0,293
540	0,548	15.903	0,292
600	0,540		

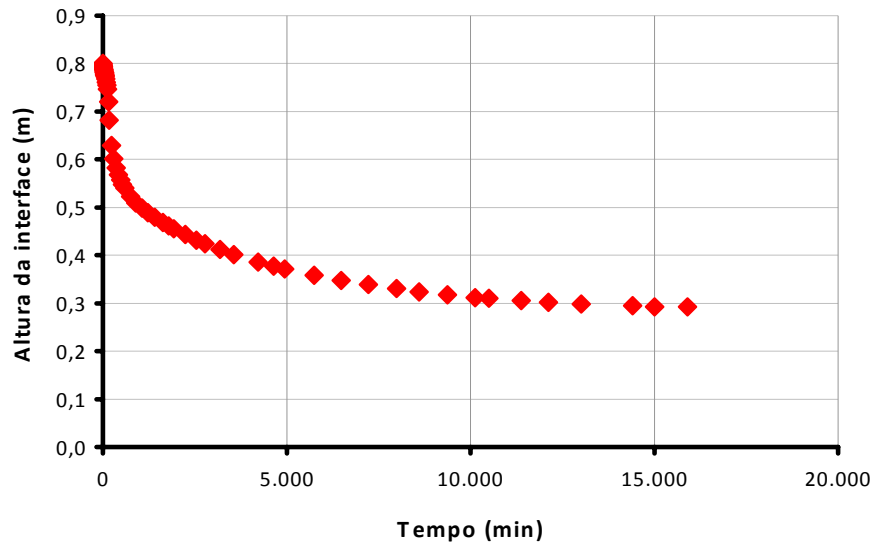


Figura 4.22 – Descida da interface com o tempo – lavagem de bauxita I.

Observa-se que após cerca de 4.000 minutos a altura da interface fica praticamente constante, o que indica que o processo de sedimentação está concluído.

Na Figura 4.23 está a comparação entre as curvas de descida da interface líquido sobrenadante-rejeito com o tempo, obtidas experimental e analiticamente pela teoria de Kynch (1952), com os parâmetros apresentados na Tabela 4.10. Observa-se boa concordância entre os resultados.

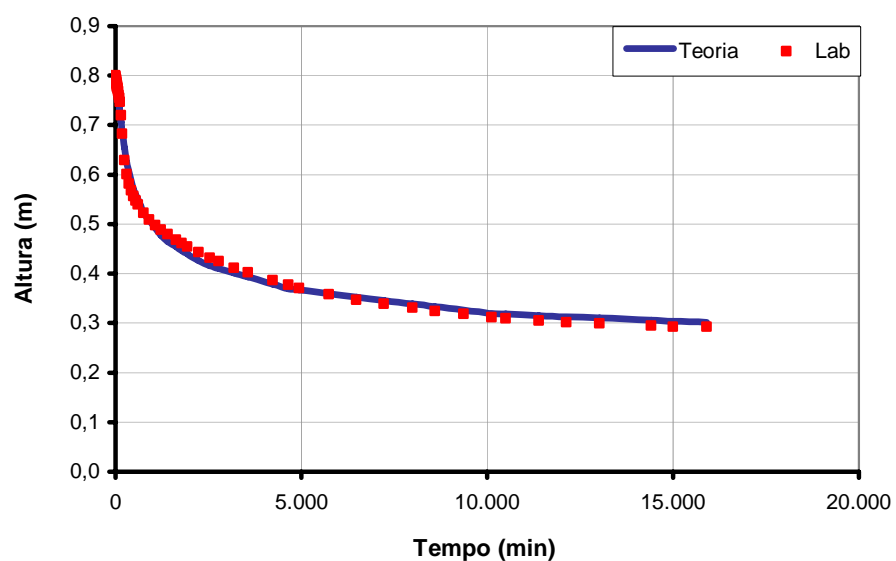


Figura 4.23 – Comparação entre as descidas da interface com o tempo, obtidas experimental e analiticamente – lavagem de bauxita I.

Tabela 4.10 – Parâmetros do modelo analítico

<b>G</b>	<b>e<sub>0</sub></b>	<b>e<sub>00</sub></b>	<b>C(m/s)</b>	<b>D</b>
2,69	30,0	6,95	1,02E-14	6,95

Na Figura 4.24 estão as variações do teor de umidade gravimétrico com o tempo, nos pontos localizados a 50, 30 e 10 cm da base da coluna. Verifica-se que os primeiros pontos apresentaram aumento de concentração, o que é incoerente com o esperado e previsto pelo modelo. Mais uma vez, acredita-se que esse fato ocorre em função de o procedimento proposto para determinação da umidade ser pouco preciso quando a concentração é pequena.

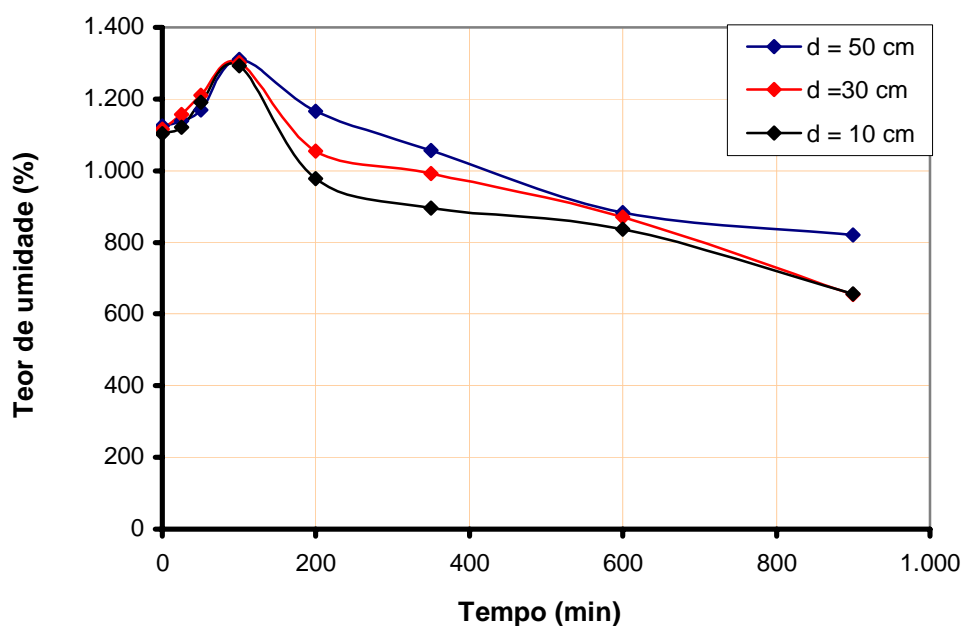
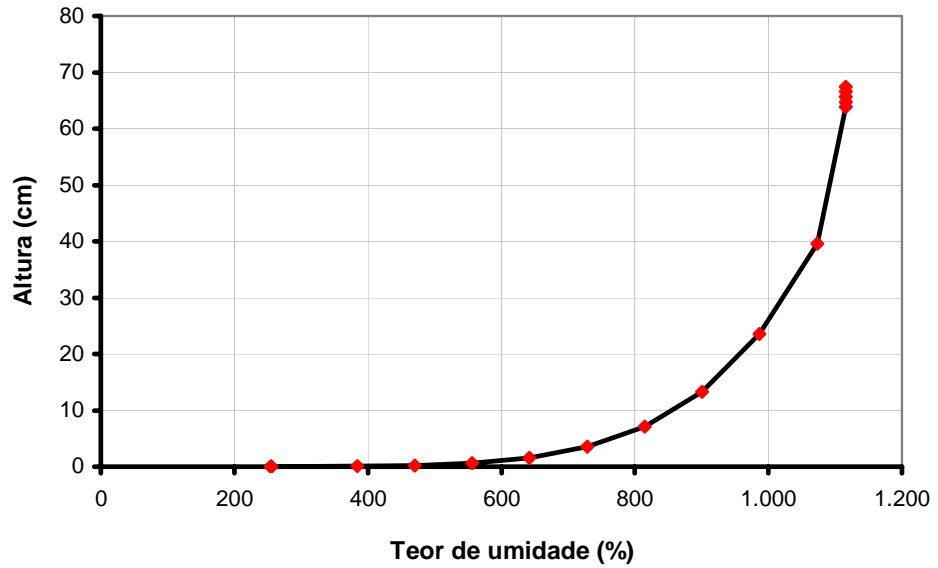


Figura 4.24 – Variações do teor de umidade com o tempo, obtidas experimentalmente.

Nas Figuras 4.25 a 4.27 estão as variações do teor de umidade gravimétrico com a profundidade, nos tempos de 100, 200 e 900 minutos após o início do ensaio.



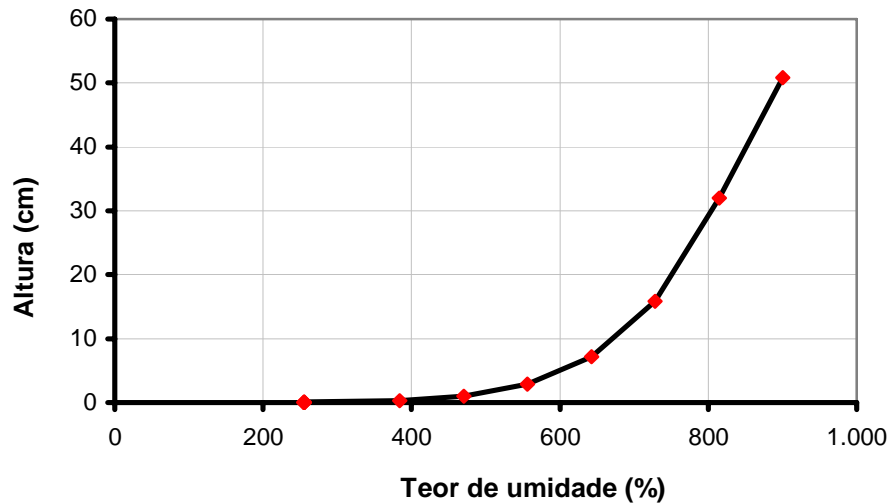


Figura 4.27 – Distribuição de teor de umidade na coluna para  $t = 900$  minutos.

Na Figura 4.28 tem-se a comparação entre os resultados analíticos e experimentais da distribuição do teor de umidade com o tempo. Observa-se concordância razoável nos resultados no ponto localizado a 10 cm do fundo da coluna, principalmente nos tempos maiores, à medida que as concentrações ficam mais elevadas.

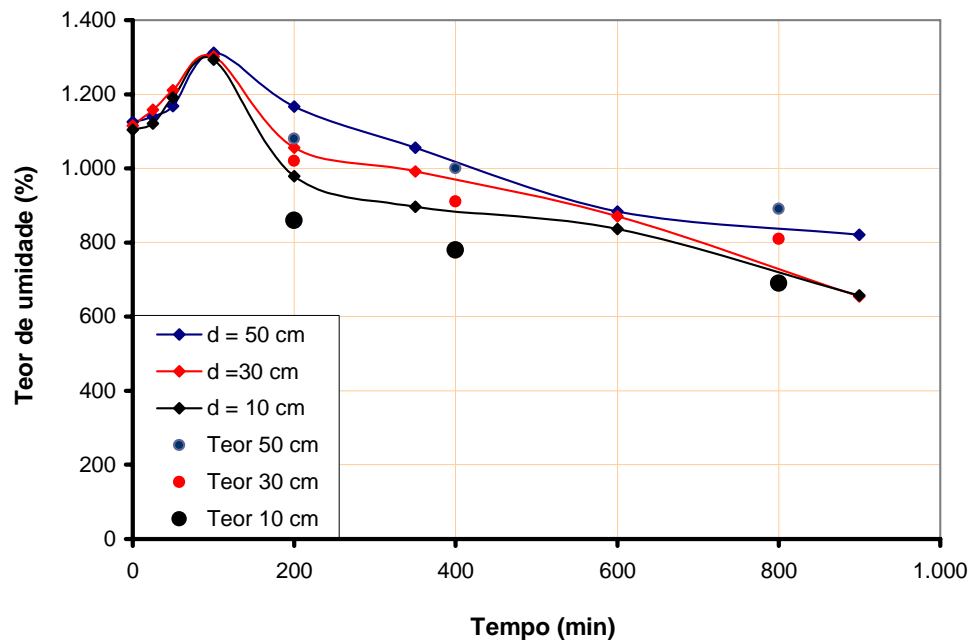


Figura 4.28 – Comparação entre as variações do teor de umidade com o tempo obtidas experimental e analiticamente.

#### 4.2.1.5 Rejeito de ferro II

Na Tabela 4.11 e na Figura 4.29 estão os resultados do ensaio de sedimentação na coluna de grandes dimensões, apresentado no Capítulo 3.

Tabela 4.11 - Ensaio de sedimentação em coluna – rejeito de ferro II

Tempo (min)	Altura Interface (m)	Tempo (min)	Altura Interface (m)
0	0,800	90	0,381
2	0,799	105	0,369
4	0,797	120	0,359
6	0,790	144	0,348
8	0,790	188	0,332
10	0,769	210	0,326
15	0,740	258	0,315
20	0,705	350	0,299
25	0,679	472	0,285
30	0,649	600	0,273
36	0,613	900	0,252
40	0,590	1.404	0,229
45	0,560	2.080	0,210
50	0,530	2.850	0,199
55	0,500	3.275	0,195
60	0,468	4.295	0,190
65	0,439	4.635	0,189
70	0,412	5.745	0,187
75	0,401	7.140	0,187

Observa-se que após cerca de 3.000 minutos a altura da interface fica praticamente constante, o que indica que o processo de sedimentação está concluído.

Na Figura 4.30 tem-se a comparação entre as curvas de descida da interface líquido sobrenadante-rejeito *versus* o tempo, obtidas experimental e analiticamente pela teoria de Kynch (1952), com os parâmetros apresentados na Tabela 4.12. Observa-se boa concordância entre os resultados.

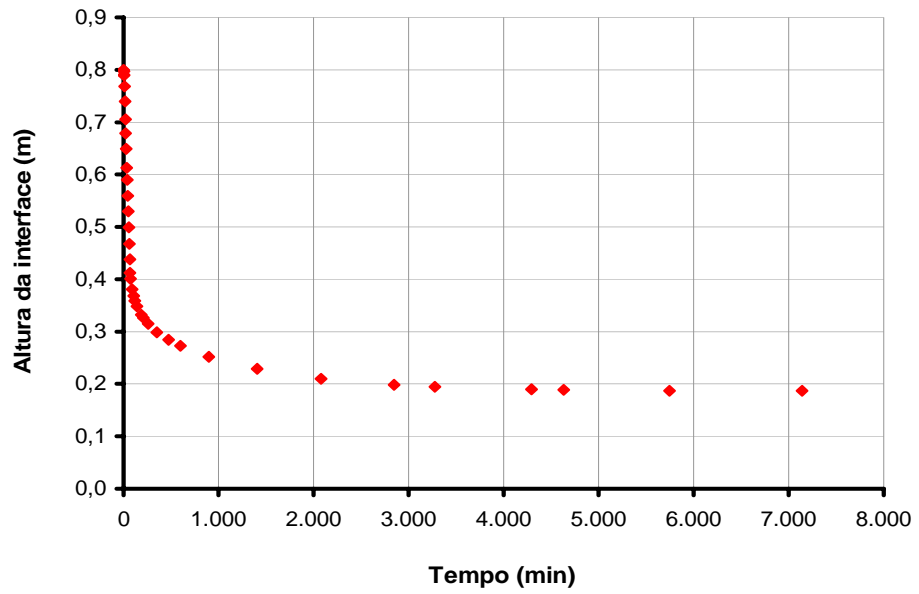


Figura 4.29 – Descida da interface com o tempo – rejeito de ferro II.

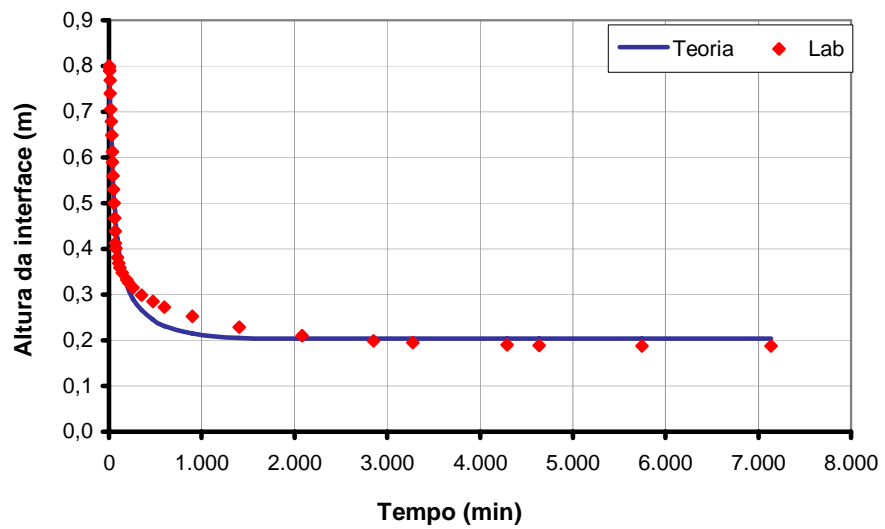


Figura 4.30 – Comparação entre as descidas da interface com o tempo, obtidas experimental e analiticamente – rejeito de ferro II.

Tabela 4.12 – Parâmetros do modelo analítico

<b>G</b>	<b><math>e_0</math></b>	<b><math>e_{00}</math></b>	<b>C(m/s)</b>	<b>D</b>
3,25	32,23	7,46	2,74E-10	4,45

Na Figura 4.31 estão as variações do teor de umidade gravimétrico com o tempo, nos pontos localizados a 30 e 10 cm da base da coluna.

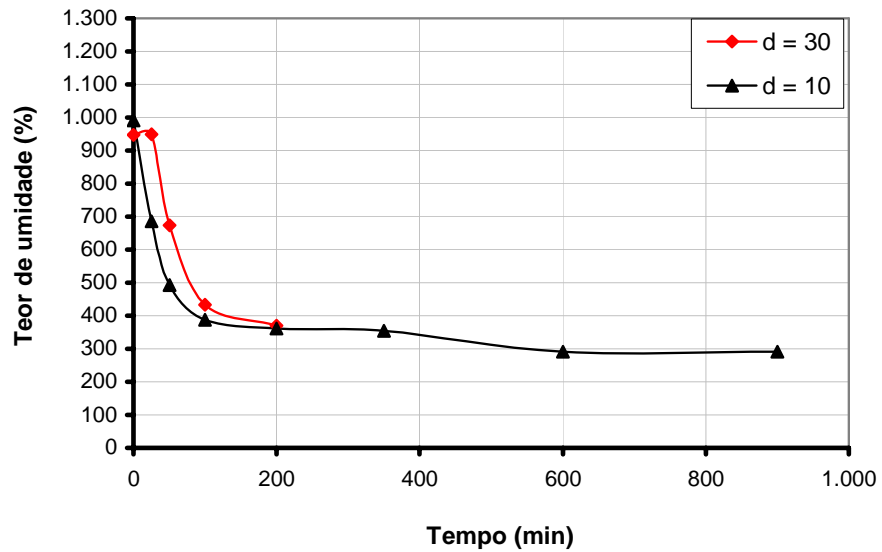


Figura 4.31 – Variações do teor de umidade com o tempo, obtidas experimentalmente.

Nas Figuras 4.32 a 4.34 têm-se as variações do teor de umidade gravimétrico com a profundidade, nos tempos de 100, 200 e 900 minutos após o início do ensaio.

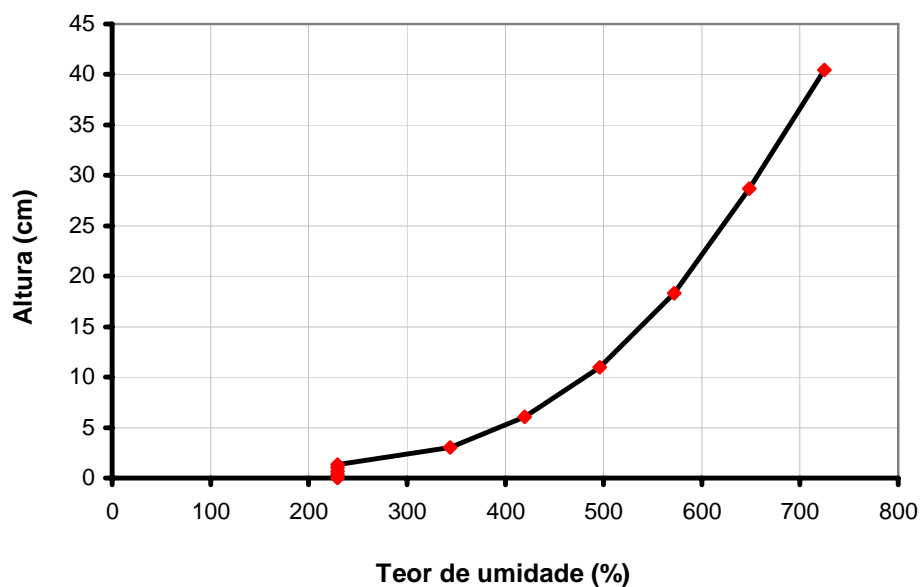


Figura 4.32 – Distribuição de teor de umidade na coluna para t = 100 minutos.

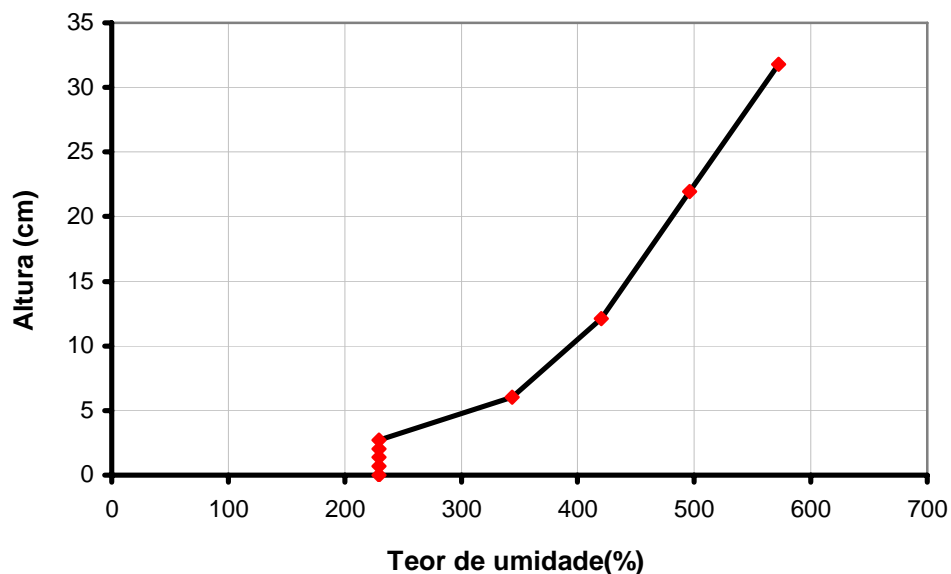


Figura 4.33 – Distribuição de teor de umidade na coluna para t = 200 minutos.

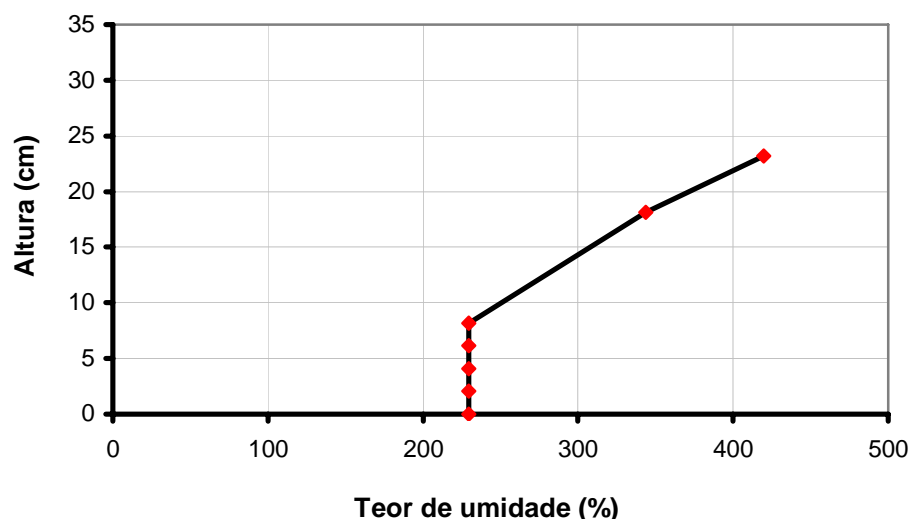


Figura 4.34 – Distribuição de teor de umidade na coluna para t = 600 minutos.

Na Figura 4.35 tem-se a comparação entre os resultados analíticos e experimentais da distribuição do teor de umidade com o tempo. Observa-se concordância razoável entre os resultados no ponto localizado a 10 cm do fundo da coluna, principalmente nos tempos maiores, à medida que as concentrações ficam mais elevadas. No ponto localizado a 30 cm, as comparações foram apenas razoáveis.

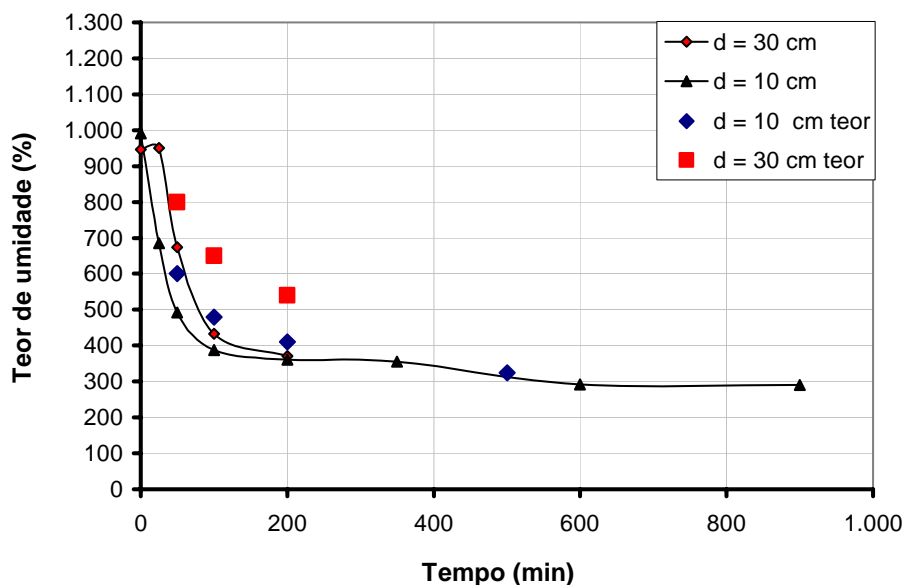


Figura 4.35 – Comparação entre as variações do teor de umidade com o tempo, obtidas experimental e analiticamente.

## 4.2.2 Ensaios de sedimentação na coluna pequena

### 4.2.2.1 Rejeito de monazita

Na Tabela 4.13 e na Figura 4.36 encontram-se os resultados do ensaio de sedimentação na coluna de pequenas dimensões, apresentado no Capítulo 3.

Observa-se que após cerca de 600 minutos a altura da interface fica praticamente constante, o que indica que o processo de sedimentação está concluído.

Na Figura 4.37 está a comparação entre as curvas de descida da interface líquido sobrenadante-rejeito *versus* o tempo, obtidas experimental e analiticamente pela teoria de Kynch (1952), com os parâmetros apresentados na Tabela 4.14. Observa-se ótima concordância entre os resultados.

Na Figura 4.38 comparam-se as curvas de permeabilidade obtidas nos ensaios com as colunas grande e pequena. Observa-se boa concordância entre os resultados.

Tabela 4.13 – Ensaio de sedimentação em coluna – monazita

Tempo (min)	Altura Interface (m)	Tempo (min)	Altura Interface (m)
0	0,362	120	0,186
0,5	0,361	135	0,167
1	0,360	150	0,153
2	0,359	165	0,148
4	0,357	180	0,144
6	0,354	195	0,141
8	0,351	210	0,139
10	0,349	240	0,135
15	0,342	270	0,132
20	0,336	300	0,130
25	0,329	330	0,129
30	0,323	383	0,126
35	0,317	420	0,124
40	0,311	450	0,122
45	0,304	480	0,122
50	0,296	570	0,119
55	0,290	640	0,118
60	0,282	725	0,116
75	0,259	905	0,114
90	0,235	1.145	0,111
105	0,209	1.344	0,110

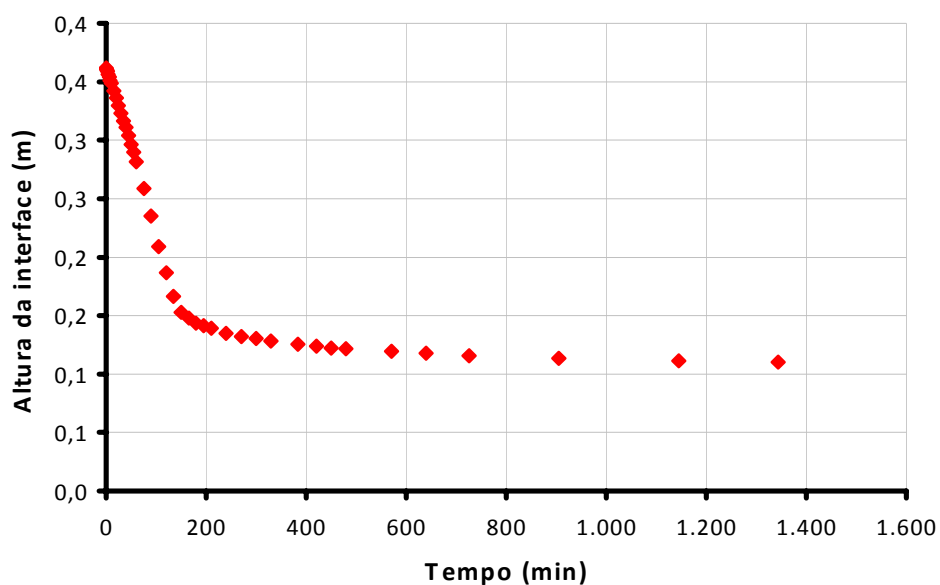


Figura 4.36 – Descida da interface com o tempo – monazita.

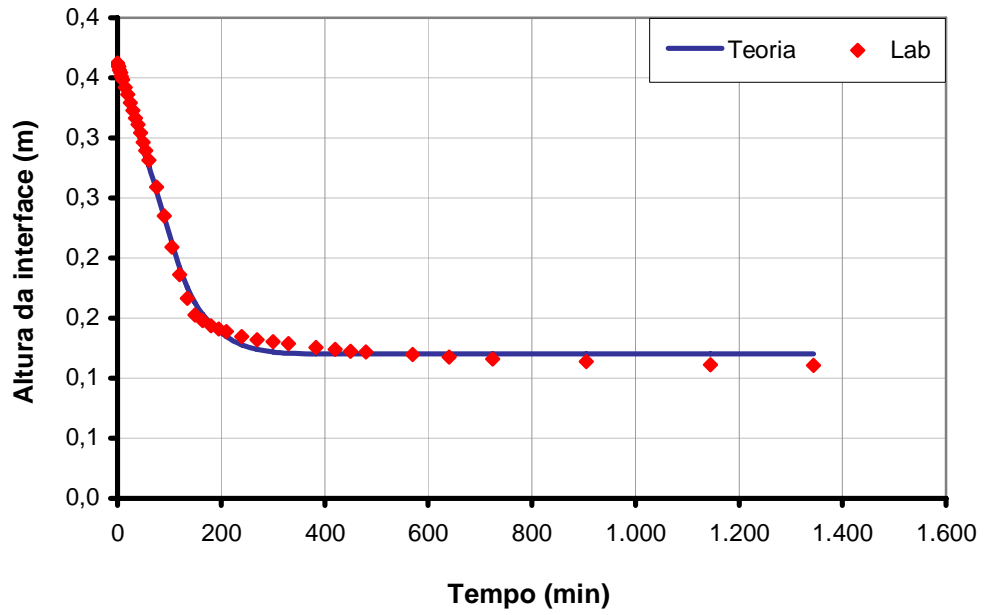


Figura 4.37 – Comparação entre as descidas da interface com o tempo, obtidas experimental e analiticamente – monazita.

Tabela 4.14 – Parâmetros do modelo analítico

$e_0$	$e_{00}$	$C(m/s)$	$D$
33,4	10,4	1.54E-08	2,92

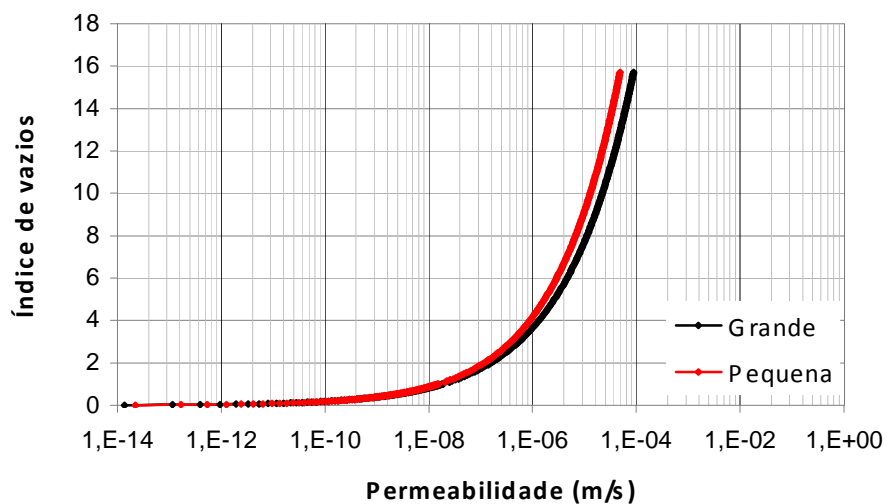


Figura 4.38 – Comparação entre as permeabilidades obtidas através do ensaio em coluna grande e em coluna pequena, em função do índice de vazios – monazita.

#### 4.2.2.2 Rejeito de zinco

Na Tabela 4.15 e na Figura 4.39 têm-se os resultados do ensaio de sedimentação na coluna de pequenas dimensões, apresentado no Capítulo 3.

Tabela 4.15 – Ensaio de sedimentação em coluna – zinco

Tempo (min)	Altura Interface (m)	Tempo (min)	Altura Interface (m)
0	0,362	120	0,174
0,5	0,361	135	0,170
1	0,360	150	0,167
2	0,359	165	0,163
4	0,358	180	0,160
6	0,357	195	0,157
8	0,352	210	0,154
10	0,347	240	0,149
15	0,329	270	0,145
20	0,311	300	0,142
25	0,296	330	0,139
30	0,279	383	0,135
35	0,261	420	0,133
40	0,241	450	0,131
45	0,219	480	0,130
50	0,212	570	0,127
55	0,207	640	0,127
60	0,202	725	0,125
75	0,193	905	0,124
90	0,185	1.145	0,123
105	0,180	1.344	0,123

Observa-se que, mais uma vez, após cerca de 600 minutos a altura da interface fica praticamente constante, o que indica que o processo de sedimentação está concluído.

A Figura 4.40 está a comparação entre as curvas de descida da interface líquido sobrenadante-rejeito *versus* o tempo, obtidas experimental e analiticamente pela teoria de Kynch (1952), com os parâmetros apresentados na Tabela 4.16. Observa-se boa concordância entre os resultados.

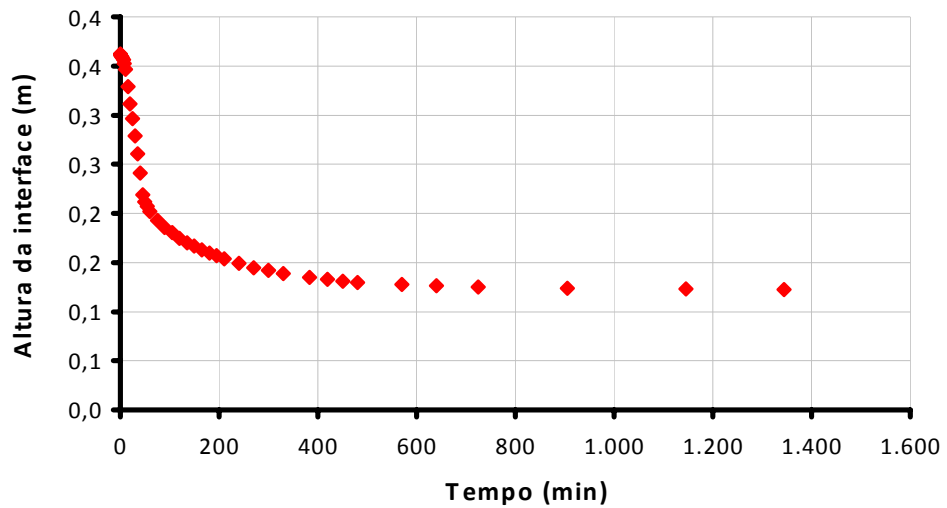


Figura 4.39 – Descida da interface com o tempo – zinco.

Tabela 4.16 – Parâmetros do modelo analítico

$e_0$	$e_{00}$	C(m/s)	D
32,3	12	4,24E-11	4,71

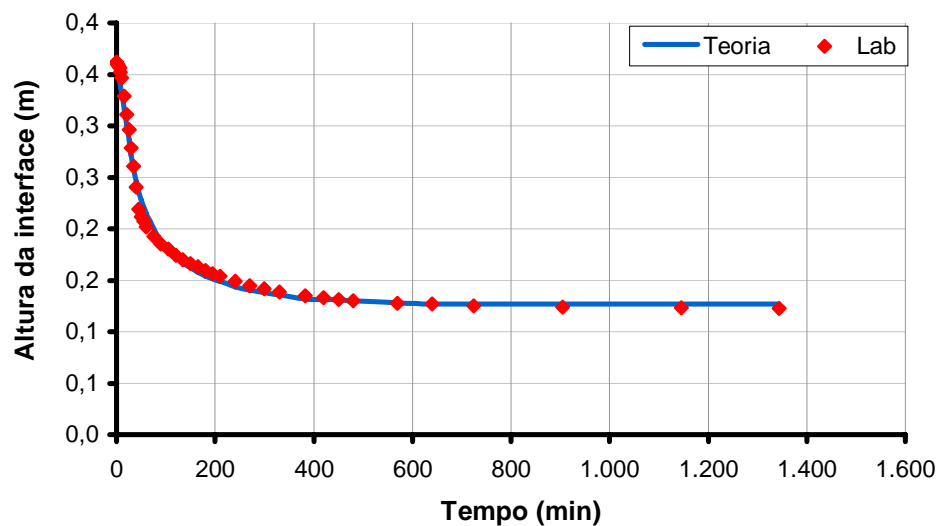


Figura 4.40 – Comparação entre as descidas da interface com o tempo, obtidas experimental e analiticamente – zinco.

Na Figura 4.41 comparam-se as curvas de permeabilidade obtidas nos ensaios com as colunas grande e pequena. Observa-se razoável concordância entre os resultados.

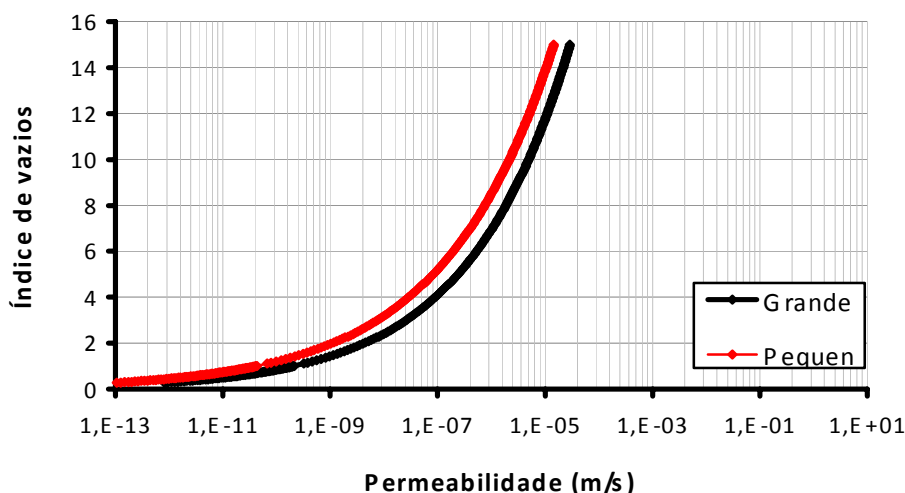


Figura 4.41 – Comparação entre as permeabilidades obtidas através do ensaio em coluna grande e em coluna pequena, em função do índice de vazios - zinco

#### 4.2.2.3 Rejeito de ferro II

Na Tabela 4.17 e na Figura 4.42 encontram-se os resultados do ensaio de sedimentação na coluna de pequena dimensões, apresentado no Capítulo 3.

Observa-se que após cerca de 1000 minutos a altura da interface fica, praticamente constante, indicando que o processo de sedimentação está concluído.

Na Figura 4.43 está a comparação entre as curvas de descida da interface líquido sobrenadante-rejeito *versus* o tempo, obtidas experimental e analiticamente pela teoria de Kynch (1952), com os parâmetros apresentados na Tabela 4.18. Observa-se boa concordância entre os resultados.

Na Figura 4.44 comparam-se as curvas de permeabilidade obtidas nos ensaios com as colunas grande e pequena. Observa-se concordância muito boa entre os resultados.

Tabela 4.17 – Ensaio de sedimentação em coluna – ferro II

Tempo (min)	Altura Interface (m)	Tempo (min)	Altura Interface (m)
0	0,362	120	0,135
0,5	0,360	135	0,132
1	0,359	150	0,130
2	0,358	165	0,127
4	0,355	180	0,125
6	0,348	195	0,123
8	0,337	210	0,121
10	0,325	240	0,117
15	0,295	270	0,115
20	0,266	300	0,112
25	0,237	330	0,110
30	0,207	383	0,108
35	0,180	420	0,105
40	0,169	450	0,104
45	0,164	480	0,102
50	0,160	570	0,098
55	0,156	640	0,096
60	0,154	725	0,094
75	0,148	905	0,090
90	0,142	1.145	0,087
105	0,138	1.344	0,087

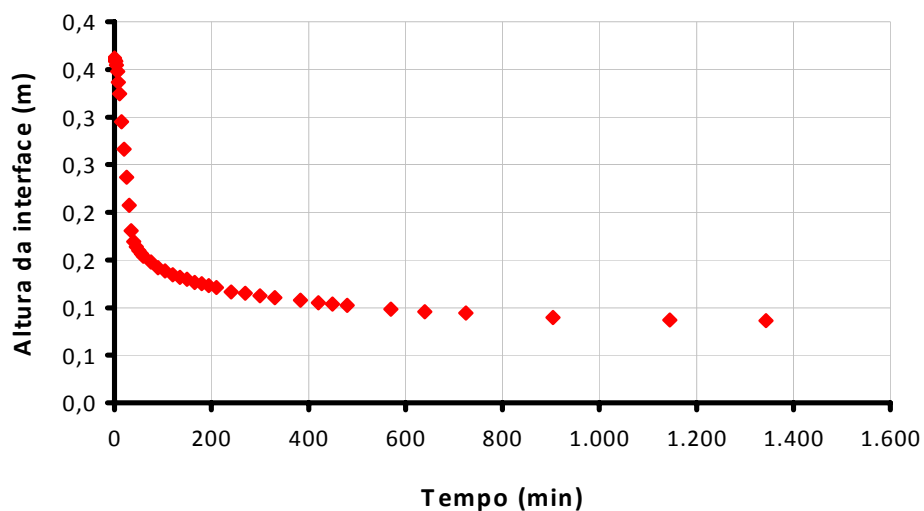


Figura 4.42 – Descida da interface com o tempo – ferro II.

Tabela 4.18 – Parâmetros do modelo analítico

$e_0$	$e_{00}$	C(m/s)	D
36,00	7,5	1.23E-10	4,56

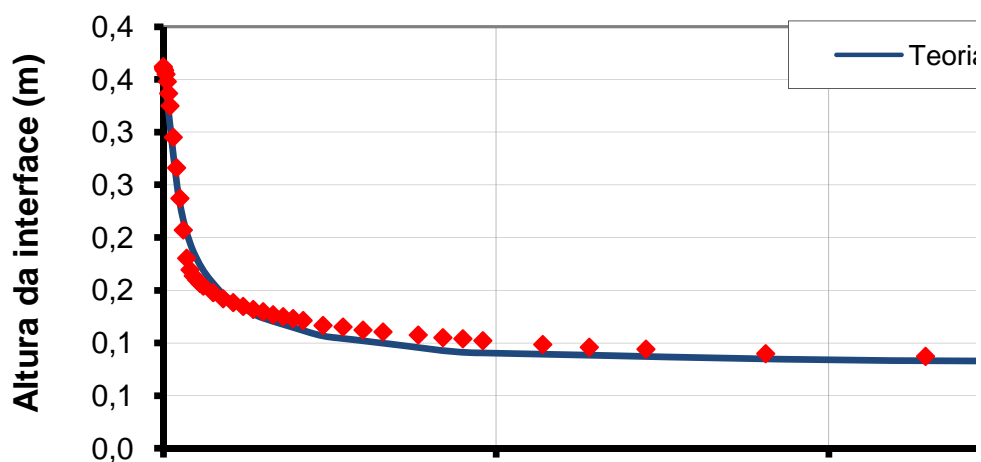


Figura 4.43 – Comparação entre as descidas da interface com o tempo, obtidas experimentalmente e analiticamente – ferro II.

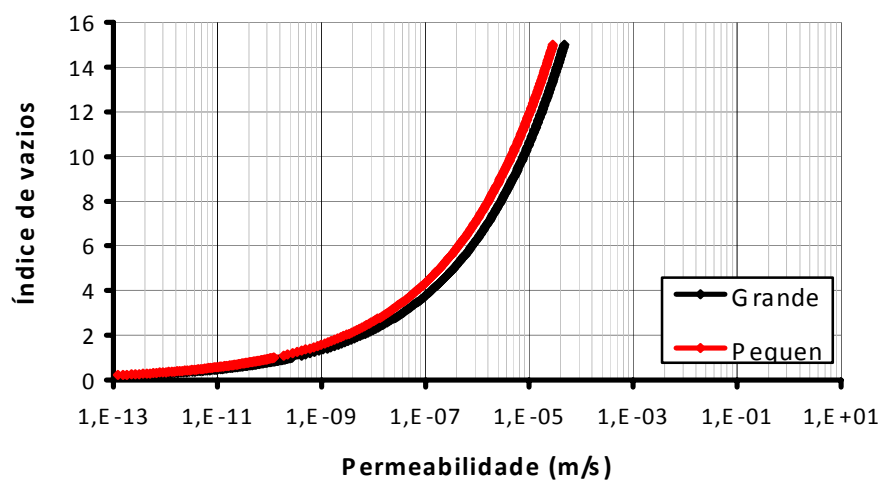


Figura 4.44 – Comparação entre as permeabilidades obtidas através do ensaio em coluna grande e em coluna pequena, em função do índice de vazios – ferro II.

### 4.3 Ensaio edométrico Tipo HCT

#### 4.3.1 Rejeitos de lavagem de bauxita

Na Tabela 4.19 apresentam-se os valores dos parâmetros de compressibilidade e permeabilidade, A, B, Z, C e D, equações 3.2 e 3.3, fornecidos pelo programa HCTPlus, a partir dos resultados dos ensaios HCT.

Tabela 4.19 – Parâmetros obtidos pelo programa HCTPlus – lavagem de bauxita

Parâmetro	Rejeito de lavagem de bauxita		
	I	II	III
A	6,65	4,05	5,56
B	-0,166	-0,252	-0,271
Z	1,29E-01	6,50E-02	3,73E-02
C(m/s)	3,13E-10	9,97E-10	1,69E-10
D	3,319	3,069	4,095

As Figuras 4.45 e 4.46 apresentam, respectivamente, as curvas de compressibilidade e permeabilidade dos rejeitos de lavagem de bauxita.

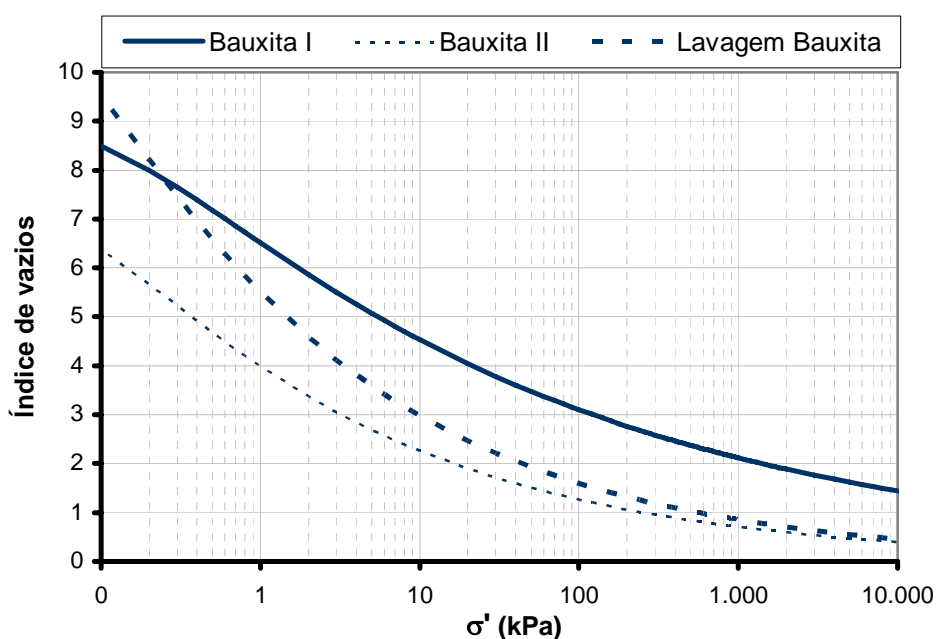


Figura 4.45 – Curvas de compressibilidade dos rejeitos de lavagem de bauxita.

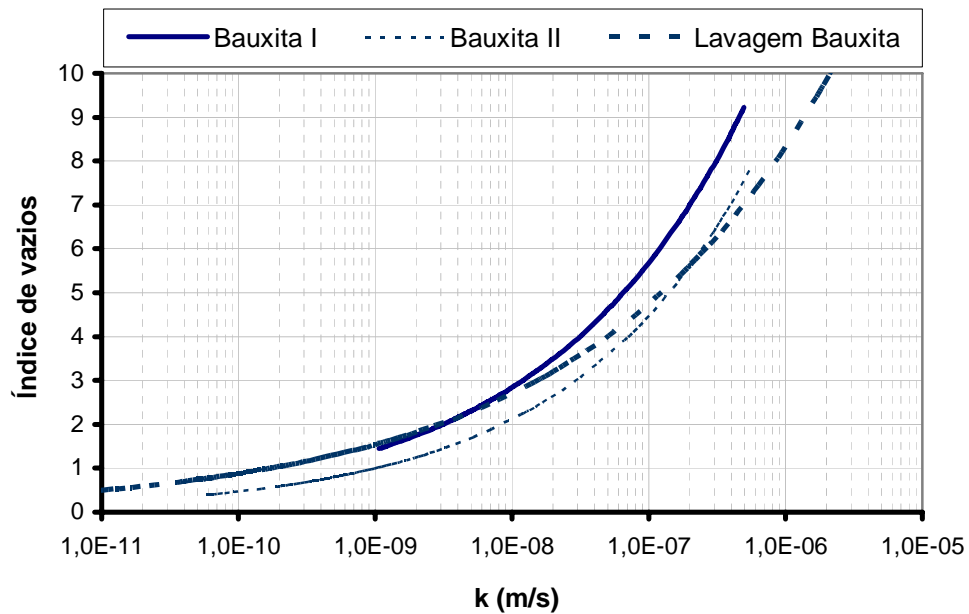


Figura 4.46 – Curvas de permeabilidade dos rejeitos de lavagem de bauxita.

Observa-se na Figura 4.45 que os três rejeitos de lavagem de bauxita apresentam curvas de compressibilidade parecidas, apenas com índices de vazios iniciais diferentes.

Na Figura 4.46 observa-se que os índices de permeabilidade são razoavelmente próximos.

### 4.3.2 Rejeitos de ferro

Na Tabela 4.20 apresentam-se valores dos parâmetros de compressibilidade e permeabilidade A, B, Z, C e D, equações 3.2 e 3.3, fornecidos pelo programa HCTPlus a partir dos resultados dos ensaios HCT.

As Figuras 4.47 e 4.48 apresentam-se, respectivamente, as curvas de compressibilidade e permeabilidade dos rejeitos de ferro.

Nas Figuras 4.47 e 4.48 é possível observar que as curvas de compressibilidade são razoavelmente próximas, mas têm índices de vazios iniciais diferentes. Já as curvas de permeabilidade apresentam grande variação nos valores.

Tabela 4.20 – Parâmetros obtidos pelo programa HCTPlus – ferro

Parâmetro	Rejeito de ferro			
	Itabirito	Hematita	I	II
A	2,23	2,65	2,08	4,25
B	-0,168	-0,205	-0,108	-0,167
Z	3,51E-02	1,17E-02	1,47E-02	4,60E-02
C(m/s)	8,89E-11	7,91E-12	5,63E-09	1,51E-09
D	3,201	3,755	4,996	4,284

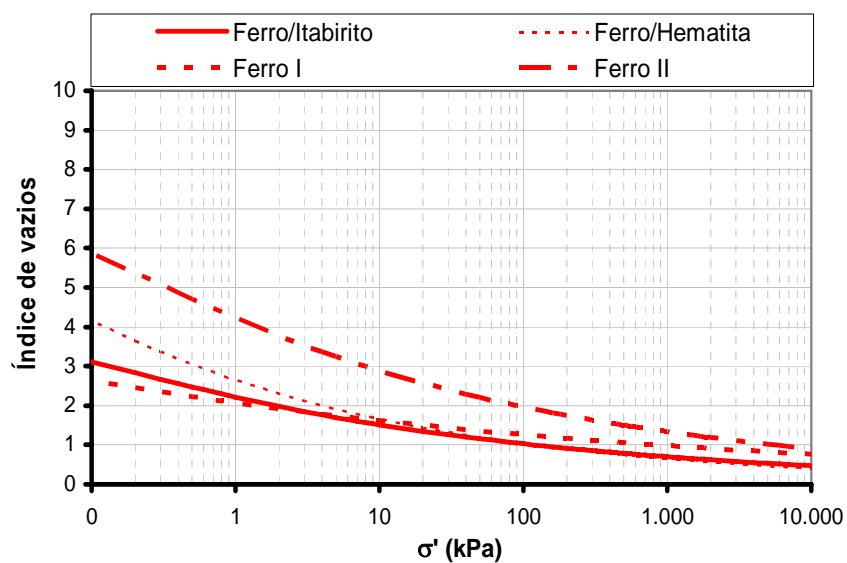


Figura 4.47 – Curvas de compressibilidade dos rejeitos de ferro.

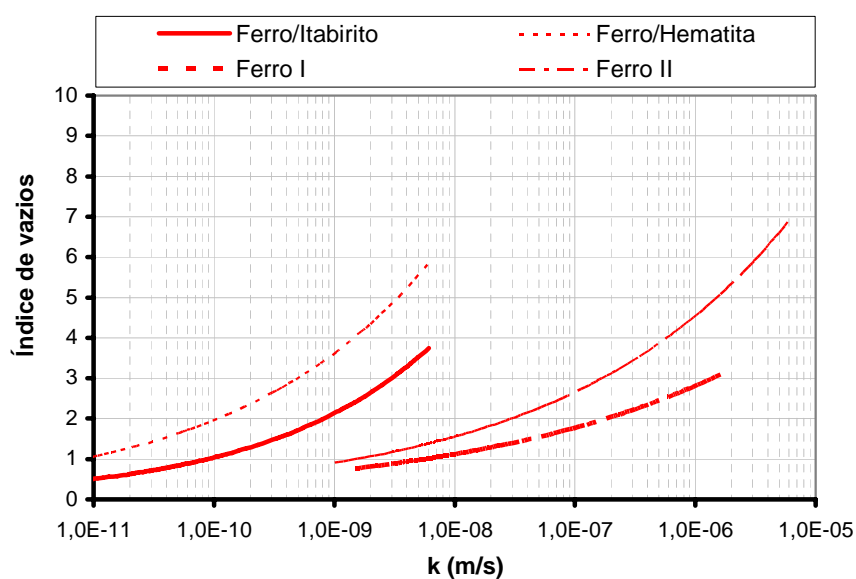


Figura 4.48 – Curvas de permeabilidade dos rejeitos de ferro II.

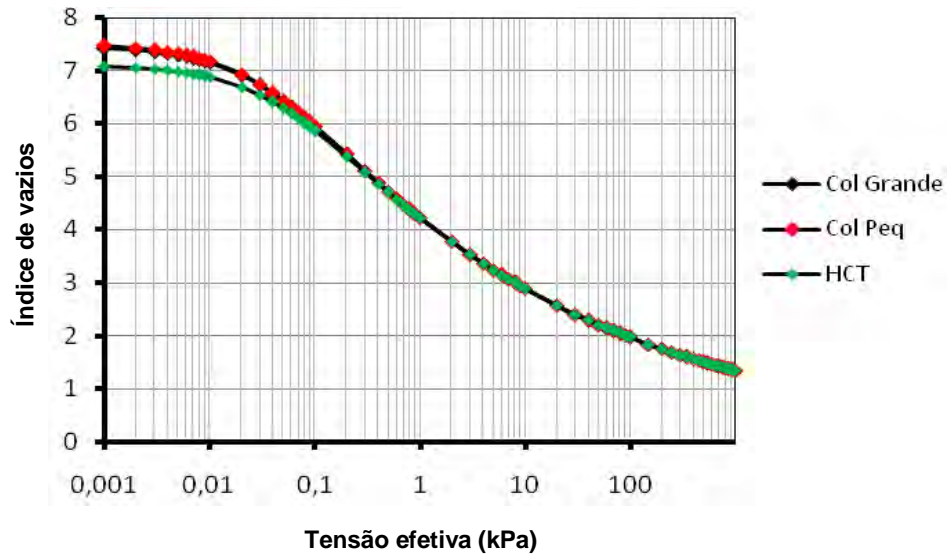


Figura 4.49 – Comparação entre as permeabilidades obtidas através do ensaio em coluna grande e em coluna pequena, em função do índice de vazios – ferro II.

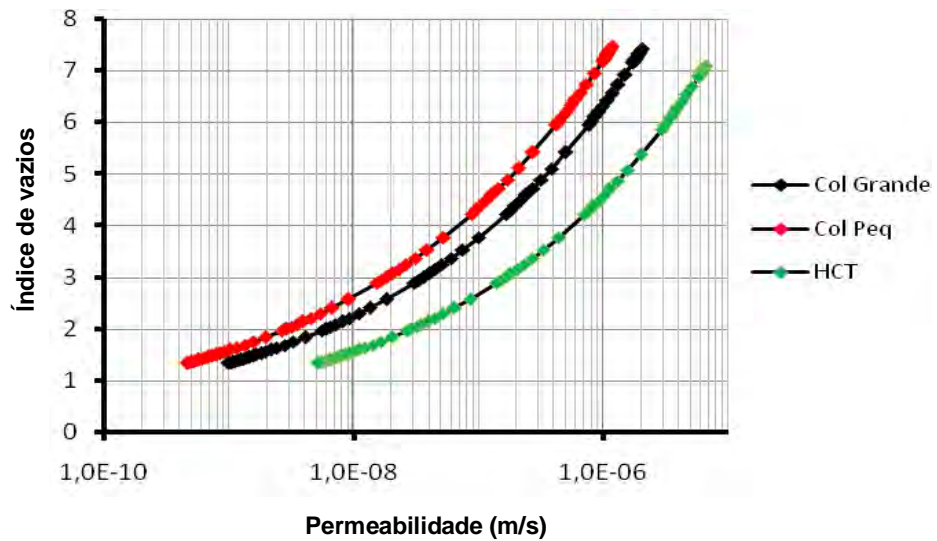


Figura 4.50 – Comparação entre as permeabilidades obtidas através do ensaio em coluna grande e em coluna pequena, em função do índice de vazios – ferro II.

### 4.3.3 Rejeitos de ouro

A Tabela 4.21 apresenta os valores dos parâmetros de compressibilidade e permeabilidade A, B, Z, C e D, equações 3.2 e 3.3, fornecidos pelo programa HCTPlus a partir dos resultados dos ensaios HCT.

Tabela 4.21 – Parâmetros obtidos pelo programa HCTPlus – ouro

Parâmetro	Rejeito de ouro	
	I	II
A	1,024	1,123
B	-0,125	-0,129
Z	4,50E-03	8,90E-04
C(m/s)	6,90E-07	5,41E-07
D	3,53	1,897

Nas Figuras 4.51 e 4.52 estão, respectivamente, as curvas de compressibilidade e permeabilidade dos rejeitos de ouro, que são bastante próximas.

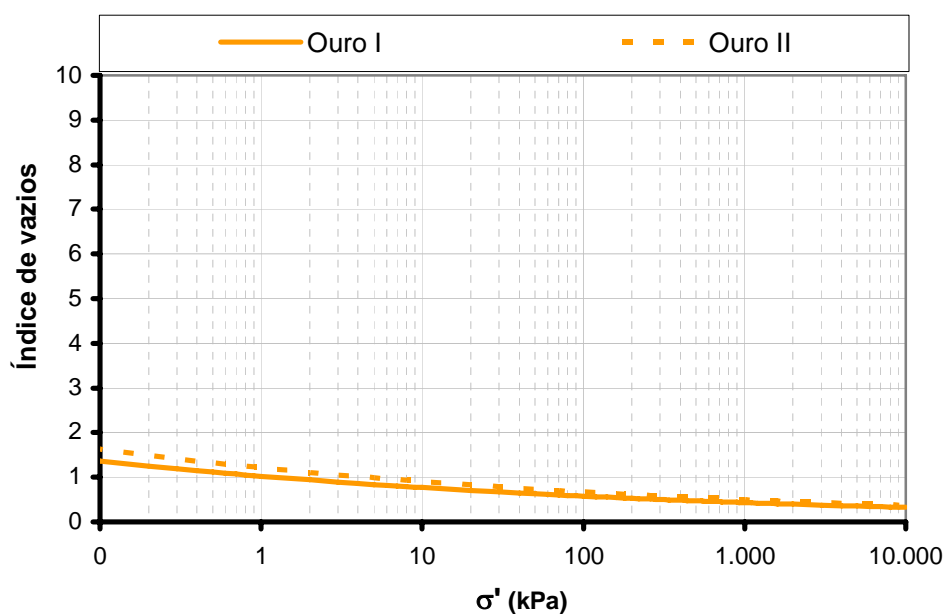


Figura 4.51 – Curvas de compressibilidade dos rejeitos de ouro.

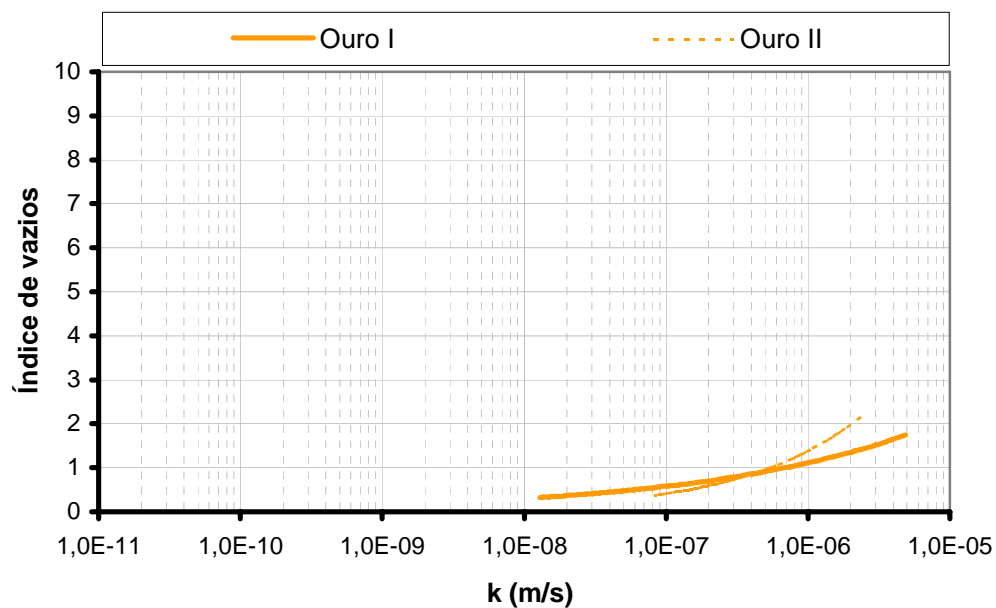


Figura 4.52 – Curvas de permeabilidade dos rejeitos de ouro.

#### 4.3.4 Rejeito de níquel

A Tabela 4.22 apresenta os valores dos parâmetros de compressibilidade e permeabilidade A, B, Z, C e D, equações 3.2 e 3.3, fornecidos pelo programa HCTPlus a partir dos resultados dos ensaios HCT.

Tabela 4.22 – Parâmetros obtidos pelo programa HCTPlus – níquel

Parâmetro	Rejeito de níquel
	I
A	1,32
B	-0,052
Z	9,32E-06
C(m/s)	1,36E-06
D	4,737

Nas Figuras 4.53 e 4.54 apresentam-se, respectivamente, as curvas de compressibilidade e permeabilidade do rejeito de níquel.

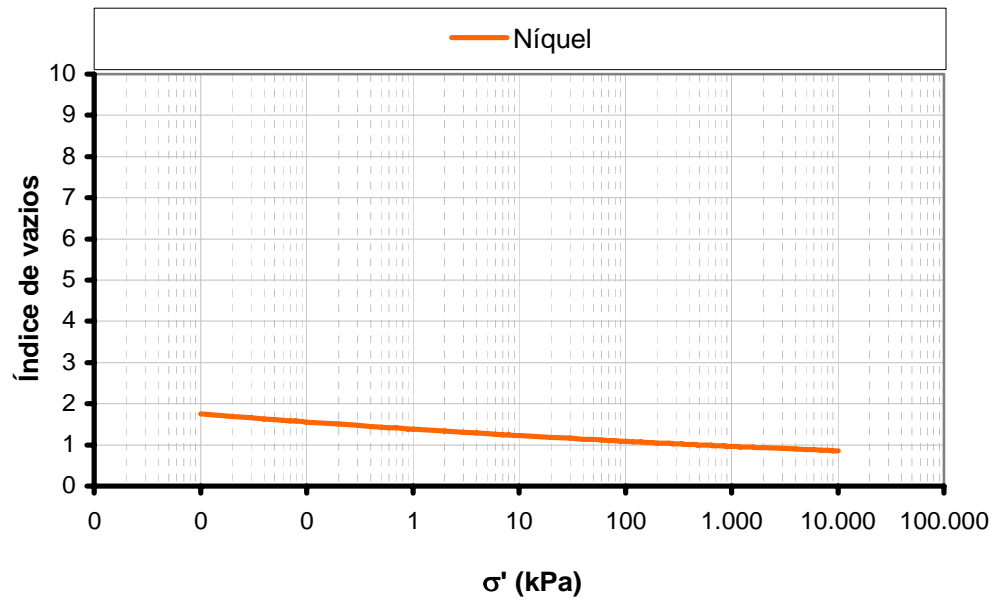


Figura 4.53 – Curvas de compressibilidade dos rejeito de níquel.

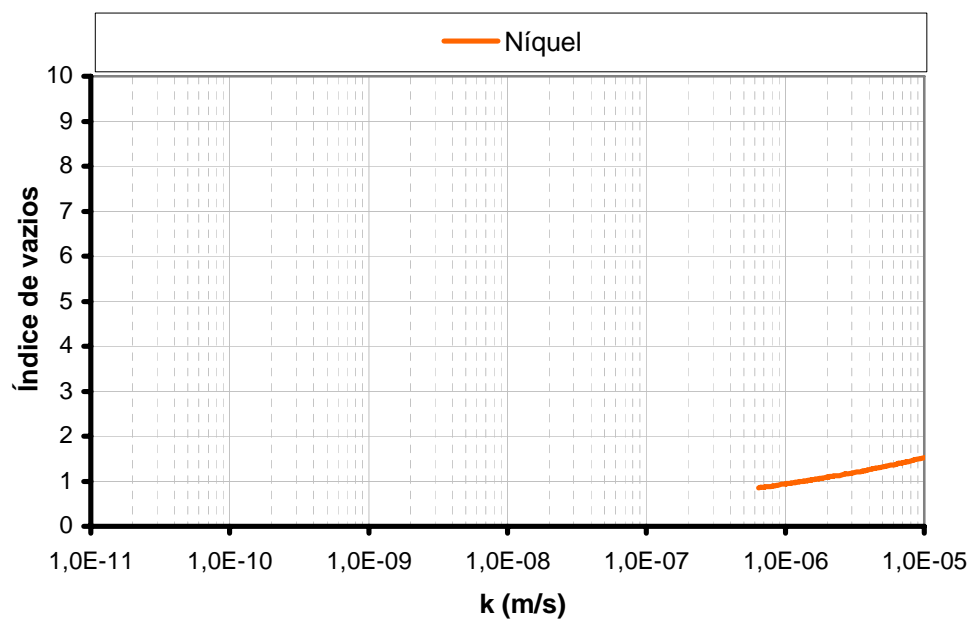


Figura 4.54 – Curvas de permeabilidade do rejeito de níquel.

### 4.3.5 Rejeitos de ácido fosfórico

A Tabela 4.23 apresenta os valores dos parâmetros de compressibilidade e permeabilidade A, B, Z, C e D, equações 3.2 e 3.3, fornecidos pelo programa HCTPlus a partir dos resultados dos ensaios HCT.

Tabela 4.23 – Parâmetros obtidos pelo programa HCTPlus – ácido fosfórico

Parâmetro	Rejeito de ácido fosfórico	
	I	II
A	3,58	3,312
B	-0,194	-0,167
Z	1,53E-01	3,50E-02
C(m/s)	3,94E-09	8,35E-10
D	3,34	4,994

Nas Figuras 4.55 e 4.56 estão, respectivamente, as curvas de compressibilidade e permeabilidade dos rejeitos de ácido fosfórico. As duas curvas de compressibilidade são bastante próximas, como também as de permeabilidade também.

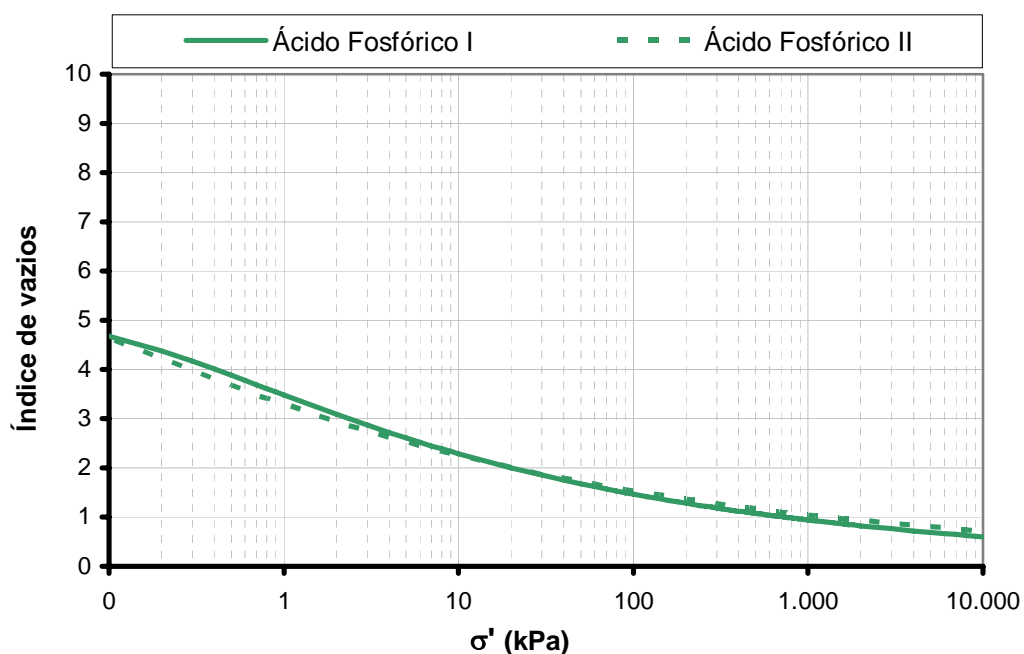


Figura 4.55 – Curvas de compressibilidade dos rejeitos de ácido fosfórico.

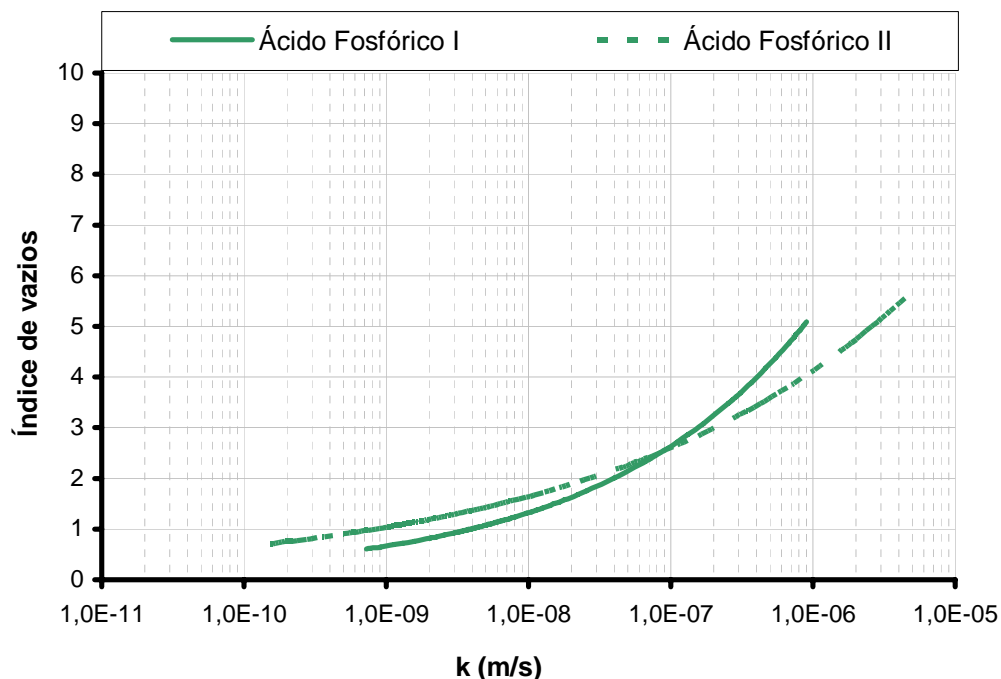


Figura 4.56 – Curvas de permeabilidade dos rejeitos de ácido fosfórico.

#### 4.3.6 Rejeito de zinco

A Tabela 4.24 apresenta os valores dos parâmetros de compressibilidade e permeabilidade A, B, Z, C e D, equações 3.2 e 3.3, fornecidos pelo programa HCTPlus a partir dos resultados dos ensaios HCT.

Tabela 4.24 – Parâmetros obtidos pelo programa HCTPlus – zinco

Parâmetro	Rejeito de zinco
	I
A	7,07
B	-0,112
Z	4,80E-02
C(m/s)	1,25E-10
D	5,243

Nas Figuras 4.57 e 4.58 têm-se, respectivamente, as curvas de compressibilidade e permeabilidade do rejeito de zinco.

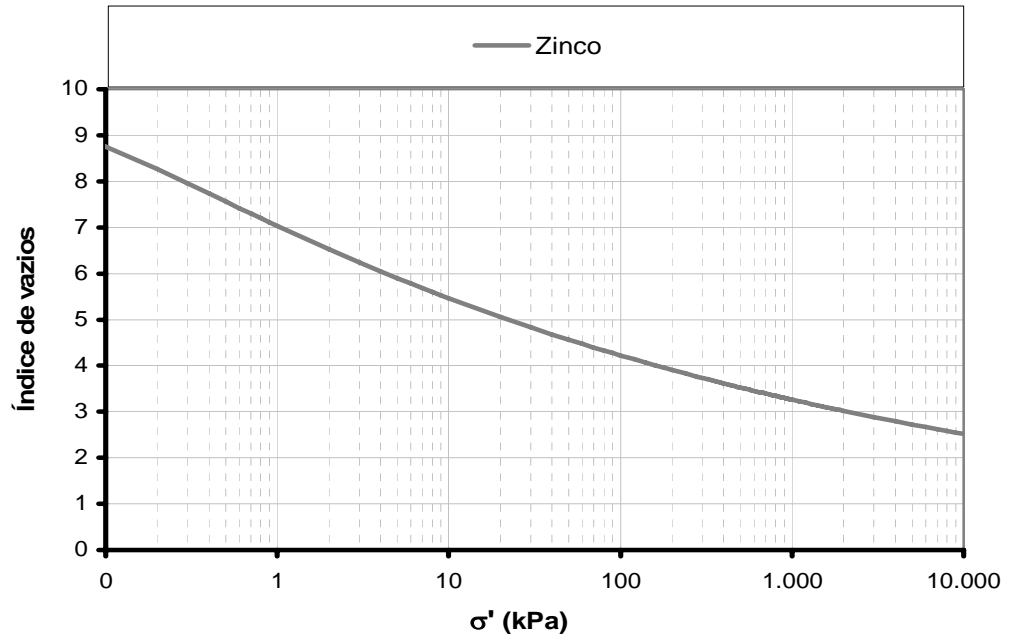


Figura 4.57 – Curvas de compressibilidade do rejeito de zinco.

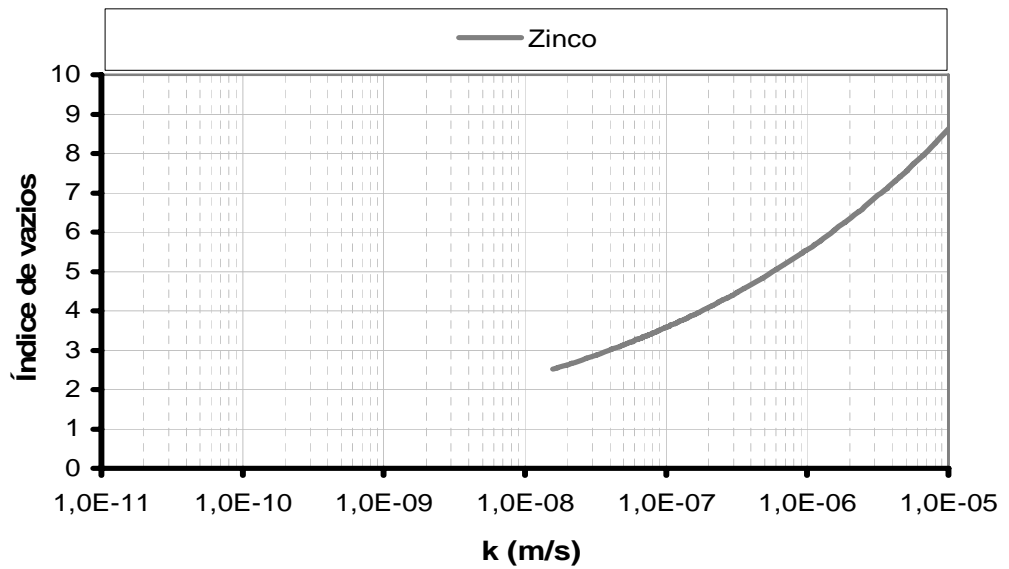


Figura 4.58 – Curvas de permeabilidade do rejeito de zinco.

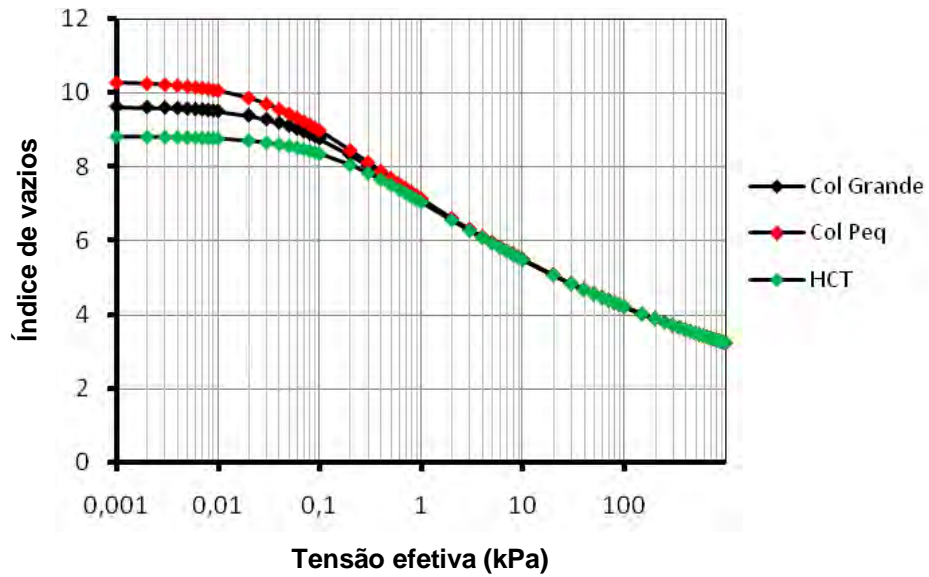


Figura 4.59 – Comparação entre as permeabilidades obtidas no ensaio em coluna grande e em coluna pequena, em função do índice de vazios – zinco.

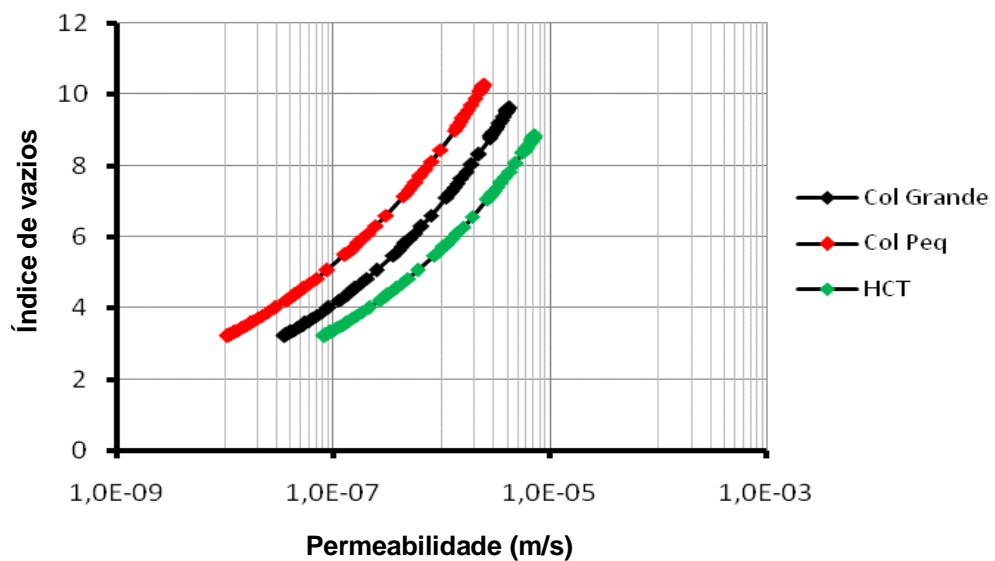


Figura 4.60 – Comparação entre as permeabilidades obtidas no ensaio em coluna grande e em coluna pequena, em função do índice de vazios – zinco.

#### 4.3.7 Rejeito de monazita

A Tabela 4.25 apresenta os valores dos parâmetros de compressibilidade e permeabilidade A, B, Z, C e D, equações 3.2 e 3.3, fornecidos pelo programa HCTPlus a partir dos resultados dos ensaios HCT.

Tabela 4.25 – Parâmetros obtidos pelo programa HCTPlus – monazita

Parâmetro	Rejeito de monazita
	I
A	6,11
B	-0,165
Z	1,81E-01
C(m/s)	6,86E-09
D	2,706

Nas Figuras 4.61 e 4.62 estão, respectivamente, as curvas de compressibilidade e permeabilidade do rejeito de monazita.

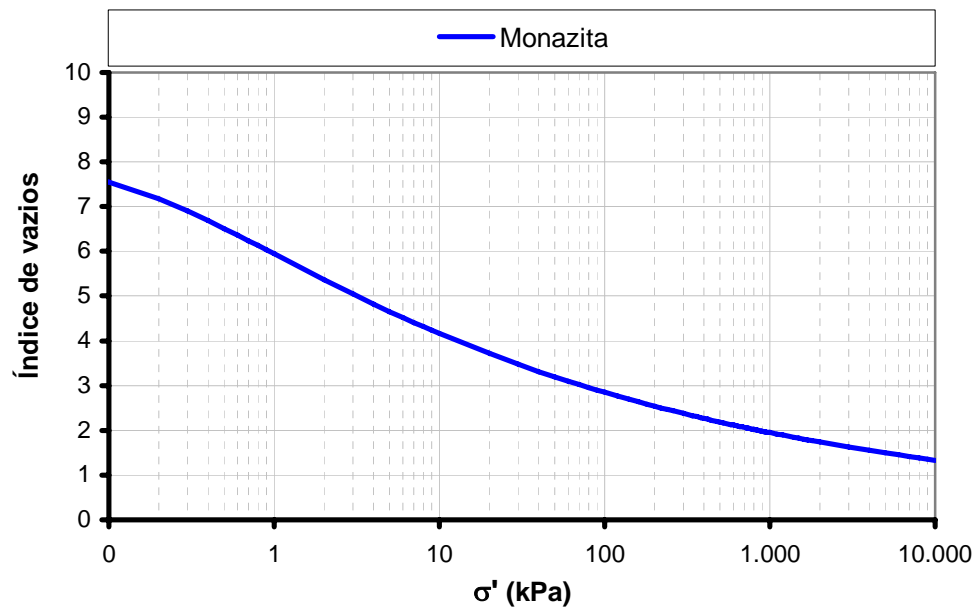


Figura 4.61 – Curvas de compressibilidade do rejeito de monazita.

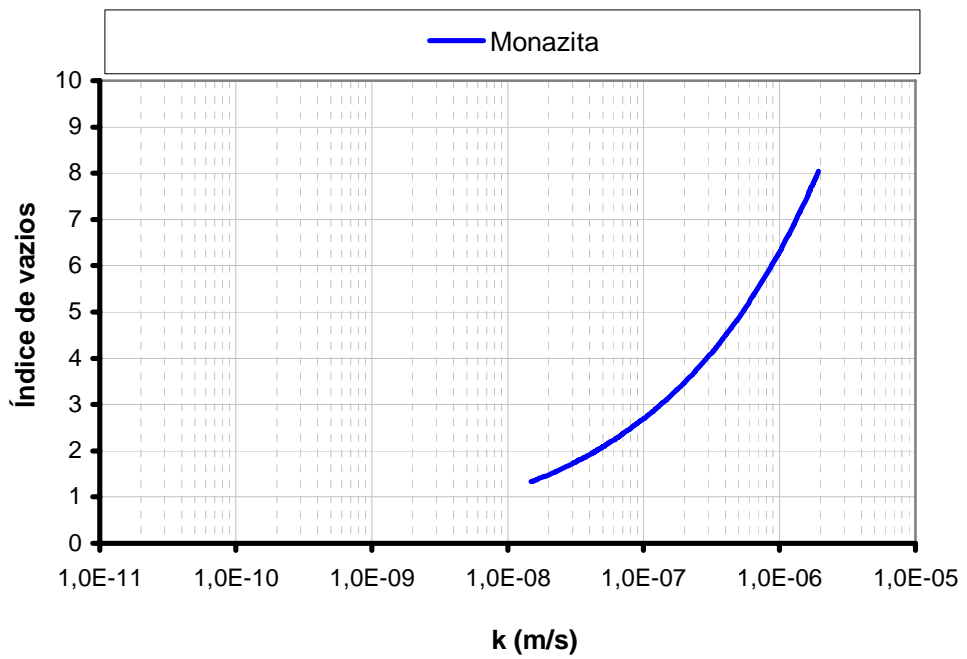


Figura 4.62 – Curvas de permeabilidade do rejeito de monazita.

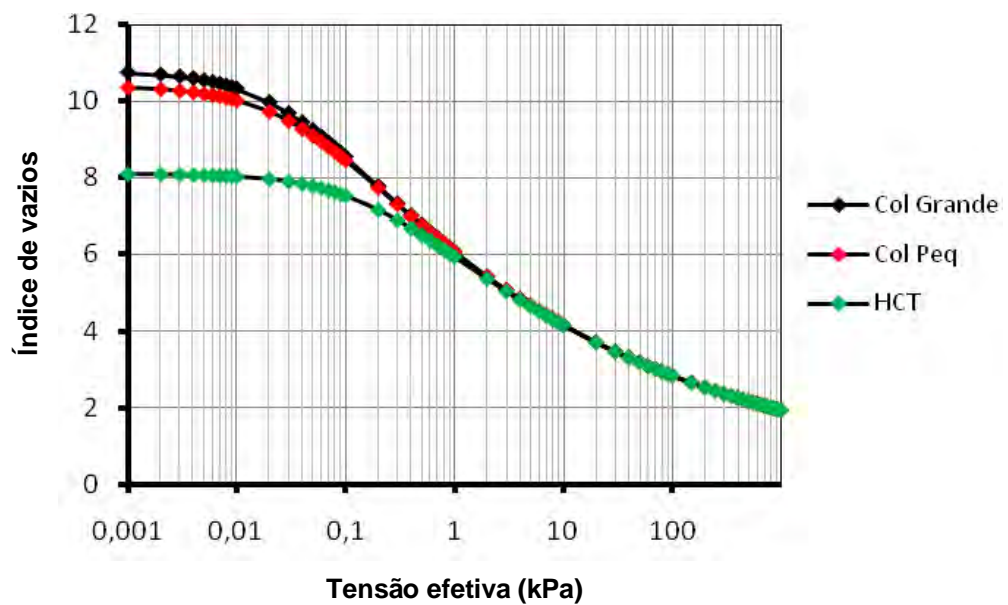


Figura 4.63 – Comparação entre as permeabilidades obtidas no ensaio em coluna grande e em coluna pequena, em função do índice de vazios – monazita.

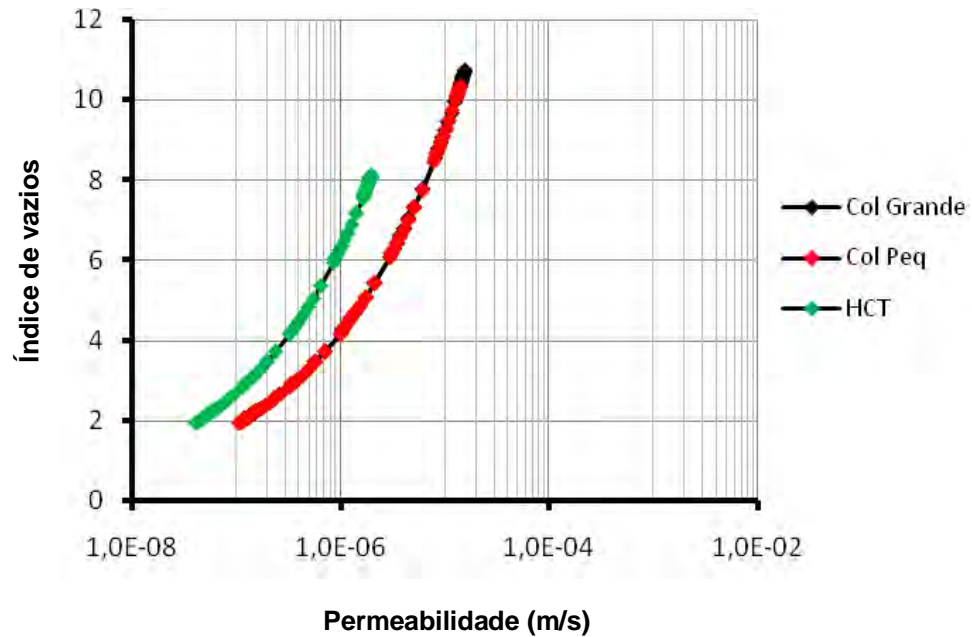


Figura 4.64 – Comparação entre as permeabilidades obtidas no ensaio em coluna grande e em coluna pequena, em função do índice de vazios – monazita.

#### 4.3.8 Rejeito de cobre

Na Tabela 4.26 estão os valores dos parâmetros de compressibilidade e permeabilidade A, B, Z, C e D, equações 3.2 e 3.3, fornecidos pelo programa HCTPlus a partir dos resultados dos ensaios HCT.

Tabela 4.26 – Parâmetros obtidos pelo programa HCTPlus – cobre

Parâmetro	Rejeito de cobre
	I
A	2,93
B	-0,166
Z	2,45E-02
C(m/s)	4,29E-10
D	5,466

Nas Figuras 4.65 e 4.66 apresentam-se, respectivamente, as curvas de compressibilidade e permeabilidade do rejeito de cobre.

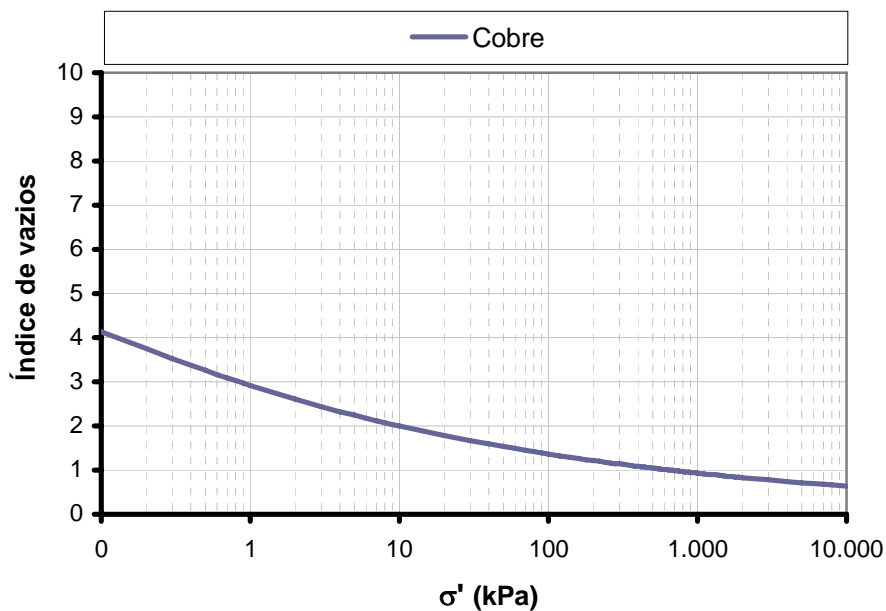


Figura 4.65 – Curvas de compressibilidade do rejeito de cobre.

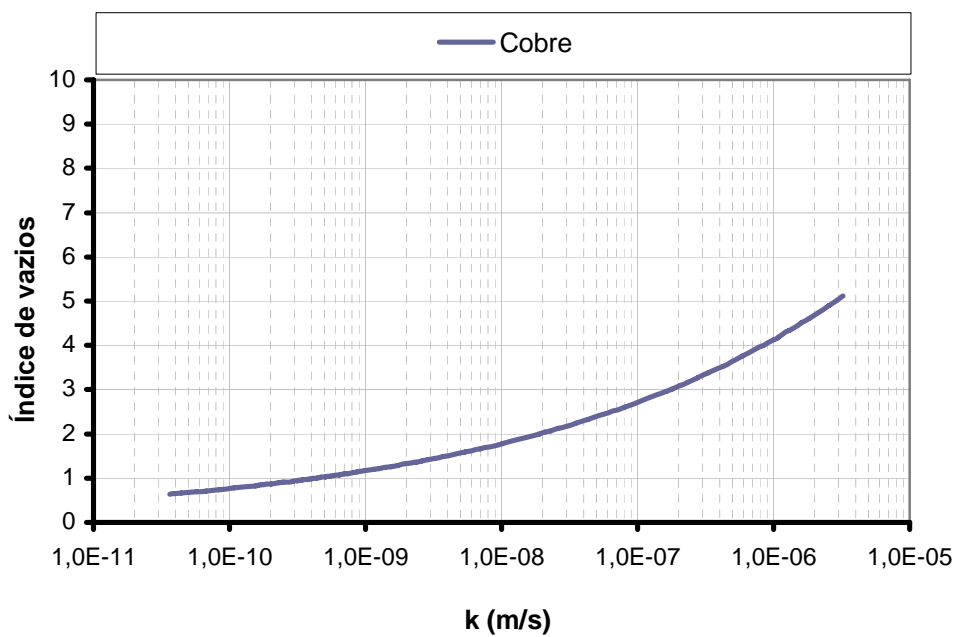


Figura 4.66 – Curvas de permeabilidade do rejeito de cobre.

Nas Figuras 4.65 e 4.66 observam-se, respectivamente, as curvas de compressibilidade e permeabilidade obtidas com todos os rejeitos ensaiados. A análise das figuras leva à constatação que os rejeitos de ouro e níquel são os menos compressíveis, enquanto o rejeito de lavagem de bauxita é o mais compressível. Da mesma forma, nota-se que os rejeitos de ouro e níquel são os mais permeáveis e os que apresentam menor variação do coeficiente de permeabilidade com o índice de vazios. Enquanto os rejeitos de ferro, em particular o rejeito de ferro/hematita, foram os que apresentaram menores permeabilidades, os rejeitos de monazita, zinco e lavagem de bauxita I foram os que apresentaram as maiores variações do coeficiente de permeabilidade com o índice de vazios.

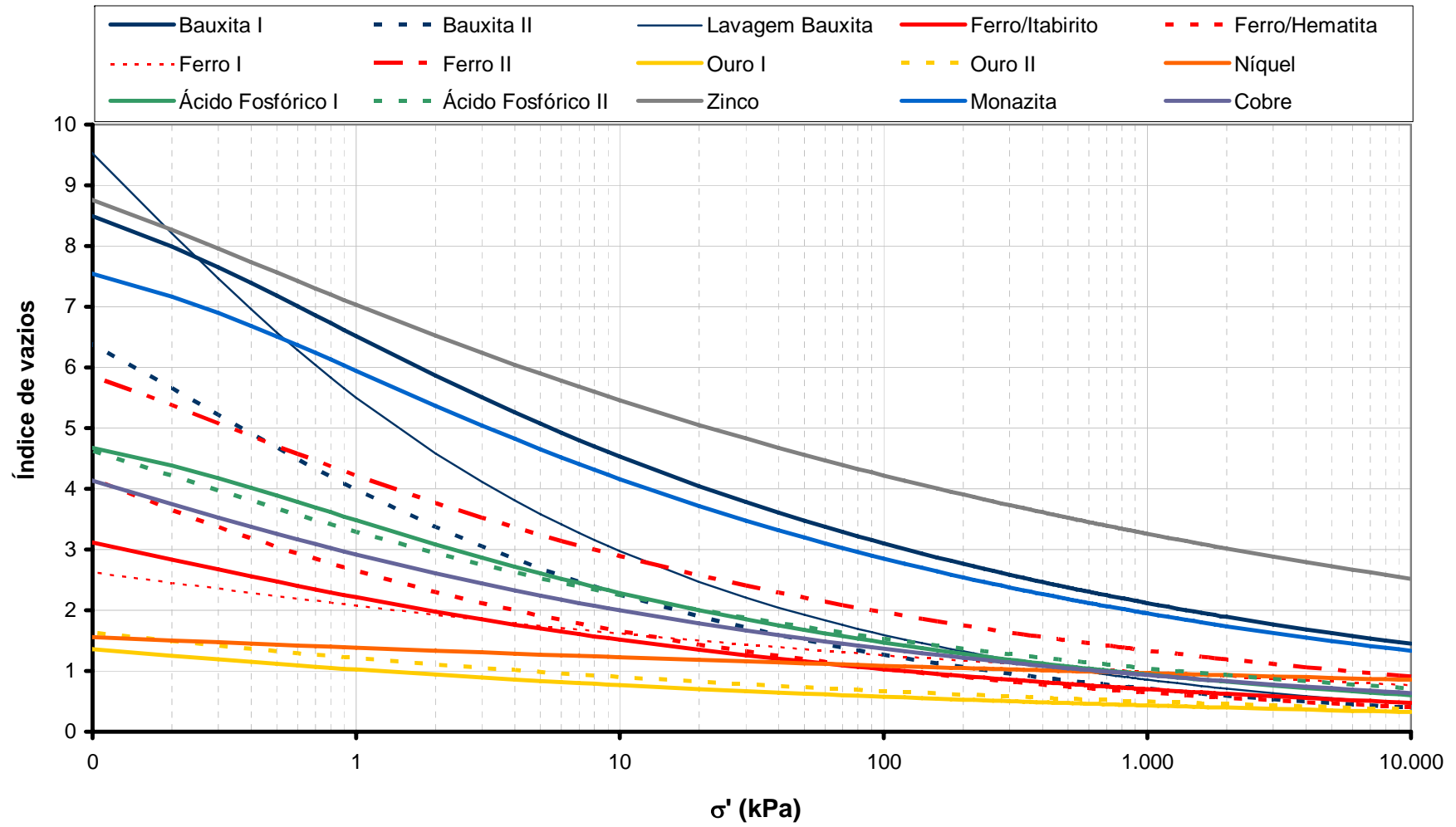


Figura 4.67 – Curvas de compressibilidade de rejeitos.

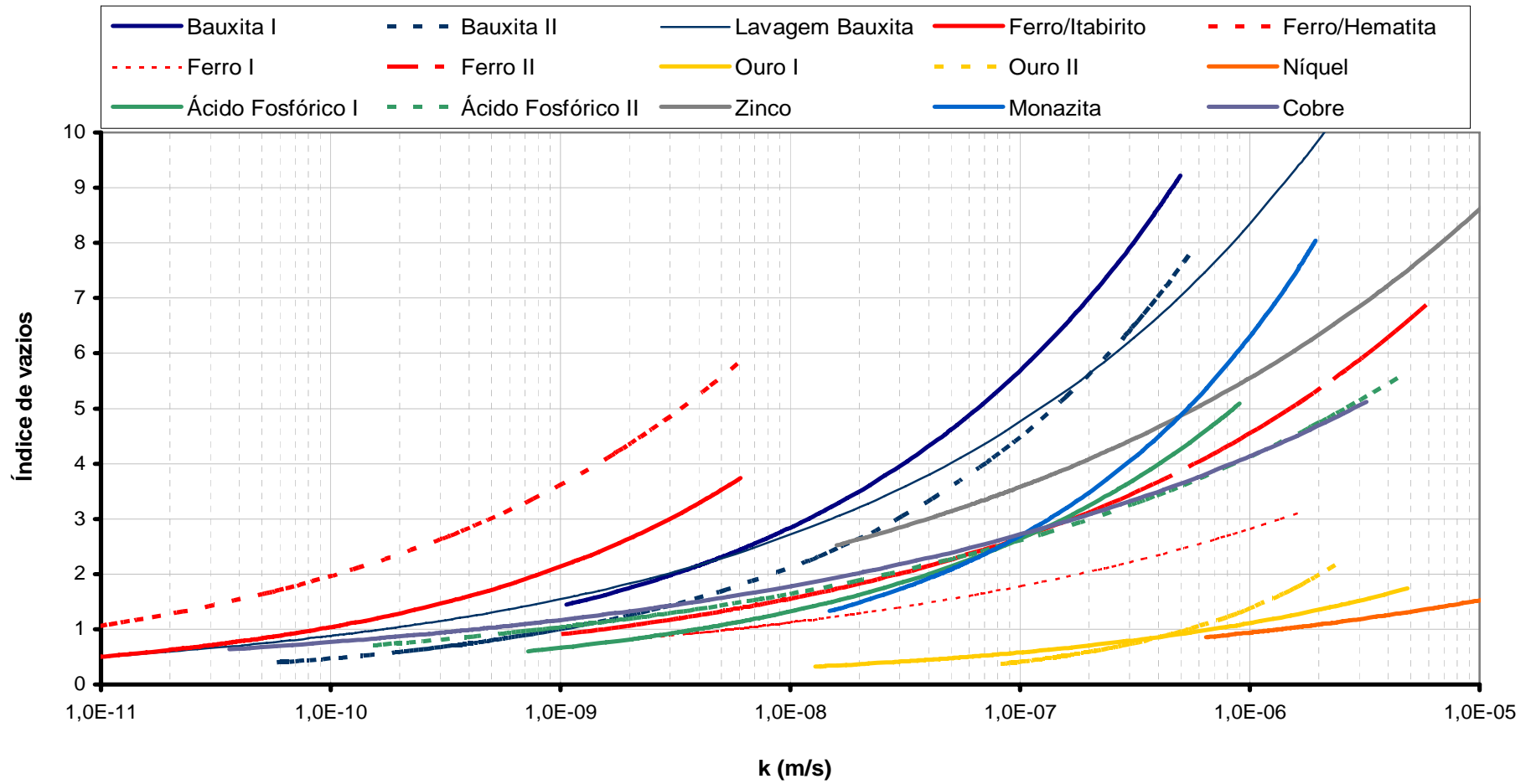


Figura 4.68 – Curvas de permeabilidade de rejeitos.

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como principais objetivos, primeiro, desenvolver uma nova forma de determinar as curvas de compressibilidade e permeabilidade de rejeitos com o ensaio HCT e, segundo, ampliar o banco de dados com resultados de ensaios em diferentes rejeitos de mineração brasileiros. As principais conclusões obtidas são:

### ***a) Em relação aos equipamentos***

- a bomba de fluxo desenvolvida a partir de uma seringa projetada e usinada na UFV, usando-se uma prensa triaxial convencional, facilitou bastante o ensaio HCT nas fases de aplicação de fluxo, além de ter sido muito mais resistente e barata que a bomba de fluxo importada usada por Silva (1999);
- o edômetro tipo HCT é, de fato, um equipamento adequado para obtenção da compressibilidade e permeabilidade de rejeitos de mineração; e
- as colunas de sedimentação funcionaram muito bem para medir a descida com o tempo da interface líquido sobrenadante-lama. Entretanto, o sistema desenvolvido para medir a umidade na coluna grande por meio da extração de amostras da mistura não funcionou de forma satisfatória, principalmente nos pontos mais altos da coluna e no início do ensaio. Isto porque, nessas circunstâncias, a mistura tinha teor de sólidos muito pequeno e a precisão

na medição do teor de umidade era insuficiente. Certamente as colunas equipadas com sistemas de medição com raio X (BEEN; SILLS, 1981) ou com raio gama (SANTOS, 2001) são melhores e mais precisas, porém bem mais caras e difíceis de ser operadas.

***b) Em relação à nova metodologia proposta***

- as curvas de descida da interface líquido sobrenadante-lama foram muito bem representadas pela teoria de sedimentação restringida de Kynch (1952);
- apesar das dificuldades mencionadas nas medições do teores de umidade nos ensaios realizados com a coluna grande, os valores de índices de vazios obtidos experimentalmente concordaram, razoavelmente bem, com os fornecidos pela teoria de Kynch (1952);
- a teoria de Kynch é capaz de representar a sedimentação que ocorre nos ensaios em coluna, portanto os parâmetros de permeabilidade do rejeito podem ser obtidos nesses ensaios;
- os parâmetros da curva de permeabilidade dos rejeitos obtidos por otimização nos ensaios das colunas grandes e convencional são um pouco diferentes, mas dão origem a curvas de permeabilidade muito parecidas. Portanto, conclui-se que a coluna convencional pode ser usada para determinação dessas curvas;
- as curvas de compressibilidade obtidas com a metodologia proposta e a metodologia convencional são praticamente idênticas a partir de tensões efetivas maiores que 1 kPa. Para valores menores, as diferenças ocorrem por causa das diferenças encontradas no índice de vazios de formação do solo, ou índice de vazios à tensão efetiva nula. Na nova metodologia a obtenção desse índice de vazios parece ser mais correta; e
- as curvas de permeabilidade obtidas com a metodologia proposta e a metodologia convencional têm a mesma forma, mas valores um pouco diferentes. Primeiro, porque os teores de sólidos nos ensaios de coluna e HCT não foram os mesmos e, segundo, porque as curvas de permeabilidade assim obtidas com a nova metodologia são válidas desde a fase de sedimentação até a fase de adensamento dos rejeitos.

***c) Em relação ao comportamento dos rejeitos ensaiados***

- entre os rejeitos ensaiados, somente os de lavagem de bauxita, ácido fosfórico e zinco são plásticos (LL maior que 50%). Coerentemente, esses mesmos rejeitos apresentaram grande porcentagem de partículas do tamanho argila (menor que 0,005 mm);
- os rejeitos de cobre, ouro e níquel foram os menos compressíveis, enquanto os de lavagem de bauxita, zinco e monazita foram os mais compressíveis;
- os rejeitos de ouro e níquel foram os mais permeáveis;
- os rejeitos de lavagem de bauxita apresentaram compressibilidades diferentes, porém permeabilidades semelhantes;
- os rejeitos de ferro apresentaram compressibilidades semelhantes, porém permeabilidades consideravelmente diferentes;
- de maneira geral, os ensaios realizados nesta tese forneceram parâmetros geotécnicos (caracterização, compressibilidade e permeabilidade) na mesma ordem de grandeza que os encontrados na pesquisa bibliográfica realizada.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRÃO, P. C. Sobre a deposição de rejeitos de mineração no Brasil. In: SIMPÓSIO DE BARRAGENS DE REJEITO E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS E DE MINERAÇÃO, 1987, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABMS, 1987. p. 1-9.

ABREU F. R. S. **Estudo teórico e experimental da sedimentação de solos.** 1989. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 1989.

ABREU, F. R. S.; AZEVEDO, R. F.; CAMPOS, T. M. P. Modelo numérico para cálculo da sedimentação de rejeitos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 1., 1990. Porto Alegre, **Anais...** ABMS, 1990. p. 21-27.

ABU-HEJLEH, A. N.; ZNIDARCIC, D. **User manual for computer program SICTA.** Boulder, CO: University of Colorado, 1992. 101 p.

ABU-HEJLEH, A. N.; ZNIDARCIC, D.; BARNES, B. L. Consolidation characteristics of phosphatic clays. **J. of Geotech Eng. ASCE**, v. 122, n. 4, p. 295-301, 1996.

ALVES, M. C. M. **Comportamento de sedimentação e adensamento de uma lama vermelha.** 1992. 213 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica, 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, REGEO'95, 3., 1995. Ouro Preto. **Anais ...** Ouro Preto: [s. n.], v. 1, 1995. p. 37-43.

ARAÚJO, C. B. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro**. 2006. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

AZEVEDO, R. F.; ALVES, M. C. M.; CAMPOS, T. M. P. Analysis of sedimentation and consolidation of a neutralized red mud. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS, 1994. Edmonton. **Proceedings...** Edmonton: Balkema, 1994. p. 433-439.

AZEVEDO, R. F.; SILVA, E. C.; AZEVEDO, I. C. D. A model for deposition of sediments. in reservoirs. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NUMERICAL MODELS IN GEOMECHANICS (NUMOG), 6., 1997. Montreal. **Proceedings...** Montreal: Balkema, 1997, v.1. p.733-738.

AZEVEDO, R. F.; SILVA, W. S.; SANTOS, D. C. D. Disposição de resíduos na forma de lama: modelos e parâmetros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 4., 1999. São José dos Campos. **Anais...**, São José dos Campos: ABMS, 1999. p. 217-224.

AZEVEDO, R. F.; LAQUINI, J. P.; SILVA, W. R.; AZEVEDO, I. C. D. Análise numérica de ensaios de adensamento induzidos por forças de percolação. In: IBERIAN LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING, 24.; CILAMCE, 26., 2003. Ouro Preto, 2003. CD-ROM.

BENN, K.; SILLS, G. C. Self-weight consolidation of soft soils: an experimental and theoretical study. **Geotechnique**, v. 31, n. 4, p. 519-535, 1981.

BARRERA, S. V. Deposition densities of tailings in chilean deposits. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TAILINGS AND MINE WASTE, 5., 1998. Fort Collins. **Proceedings...** Fort Collins, 1998. p. 109-116.

BOTELHO, A. P. D. **Implementação de metodologias de ensaios para determinação de relações constitutivos de processos de fluxo em solos com a utilização da bomba de fluxo**. 2001. 254 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2001.

BROMWELL, L. G. Consolidation of mine wastes. In: SYMPOSIUM ON SEDIMENTATION AND CONSOLIDATION MODELS. YONG, R. N.; TOWNSEND, F. C. (Ed.). **Predictions and validation**. San Francisco. **Proceedings...** San Francisco: ASCE Convention, 1984. p. 275-295.

BROMWELL, L. G.; CARRIER, W. D. Consolidation of fine-grained mining wastes. In: PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 6., 1979, Lima. **Proceedings...** Lima: [s. n.], 1979. v. 1, p. 293-304.

CAMPOS, T. M. P. Geotecnia e meio ambiente: relato do estado da arte. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 8., 1986. **Anais...** Porto Alegre: ABMS, 1986. p. 123-157.

CAMPOS, T. M. P.; ALVES, M. C. M.; AZEVEDO, R. F. Laboratory settling and consolidation of a neutralized red mud. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS, 1994. Edmonton. **Proceedings...** Edmonton: Balkema, 1994. p. 461-466.

CARGILL, K. W. Prediction of consolidation of very soft soil. **J. of Geotech Eng. ASCE**, v.110, n. 6, p. 775-796, 1986.

CARRIER, W. D.; BROMWELL, L. G.; SOMOGYI, F. Design capacity of slurry mineral waste. **J. of Geotech Eng. ASCE**, v. 109, n. 5, p. 699-716, 1983.

CONSOLI, N. C. **Numerical modelling of the sedimentation and consolidation of tailings**. 1990. 163 f. (Thesis (Ph.D.) – Concordia University, Montreal, Canada, 1990.

GIPSON, A. H. Tailing disposal – the last 10 years and future trends. INTERNATIONAL CONFERENCE ON TAILINGS AND MINE WASTE, 5., 1998. **Proceedings...** Fort Collins: Colorado, 1998. p. 127-135.

GIBSON, R. E.; ENGLAND, G. L.; HUSSEY, M. H. L. The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays, I. Finite nonlinear consolidation of thin homogeneous layers, **Géotechnique**, v. 17, n. 3, p. 261-273, 1967.

GOBARA, W., PINTO, C. S., DE SÍLVIO, E. Obtenção de parâmetros para dimensionamento de reservatórios para disposição de rejeitos pelo ensaio HCT. In: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITO E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS, REGEO'95, 1995, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: [s. n.], 1995. v. 2, p.1-14.

GUIMARÃES FILHO, J. L. R. **Desenvolvimento de um edômetro para ensaios com taxa constante de deslocamento: aplicação a rejeitos industriais depositados sob forma de lama**. 1990. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 1990.

IMAI, G. Development of a new consolidation test procedure using seepage force. **Soils and Foundation**, v.19, n.3, p.45-60, 1979.

IMAI, G. Experimental studies on sedimentation mechanism and sediment formation of clay minerals. **Soils and Foundations**, v. 21, n. 1, p. 7-20, 1981.

KYNCH, G. A Theory of sedimentation. **Transaction of the Faraday Society**, v. 48, p. 168-176, 1952.

LIMA, P. P. **Ensaio oedométricos com taxa de deslocamento constante em solos muito moles**. 1996. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1996.

LIU, J. C. **Determination of soft soil characteristics**. 1990, 297 f. Thesis (Ph.D. - Environmental and Architectural Engineering) – University of Colorado, Boulder, 1990.

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.

McNABB, A. A mathematical treatment of one-dimensional soil consolidation. **Quarterly of Applied Mathematics**, v. 17, n. 4, p. 337-347, 1960.

MIKASA, M. The consolidation of soft clay. A new theory and its application, **Japanese Society of Civil Engineering**, p.21-26, 1963.

MIKASA, M.; TAKADA, N. Self weight consolidation of very soft clay by centrifuge. In: SYMPOSIUM ON SEDIMENTATION-CONSOLIDATION MODELS: PREDICTIONS AND VALIDATION, 1984, São Francisco. **Proceedings...** São Francisco: ASCE, 1984. p. 121-140.

ORTENBLAD, A. Mathematical theory of process of consolidation of mud deposits. **Journal of Mathematical and Physics**, v. 9, n. 2, p. 73-149, 1930.

PACHECO, E. B.; MELO, C. E. Sedimentação, drenagem e compressibilidade de rejeitos em testes de grandes dimensões. SIMPÓSIO DE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS E DE MINERAÇÃO, Rio de Janeiro. **Anais...** ABMS, v.1, 1987. p. 24-37.

PANE, V. **Sedimentation and consolidation of clays**. 1985. 302 f. Thesis (Ph.D. - Civil Engineering) – Universidade do Colorado, Boulder, 1985.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 353 p.

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 campo**. 2000. 121 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2000.

SANTOS, C. B. A. **Avaliação do acréscimo de polímeros na disposição de sedimentos dragados**. 2001. 197 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

SCHIFFMAN, R. L. **Short course on the consolidation of soft clays**. Rio de Janeiro: Dep. de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica (PUC), 1987. [p.ir.]. (Coletânea de artigos CA 01/87).

SCULLY, R. W. **Determination of consolidation properties of phosphatic clay at very high void ratios**. 1984. 126 f. Dissertação (M.Sc. – Civil Engineering Civil) – University of Colorado, Boulder, 1984.

SILVA, E. C.; GONZALEZ, M. F.; AZEVEDO, R. F. Um modelo para o transporte, sedimentação e adensamento de sedimentos em reservatórios. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 11., 1998, Brasília. **Anais...** Brasília: ABMS, v.1, 1998. p.393-400.

SILVA, W. S. **Desenvolvimento de um edômetro para ensaios de adensamento induzido por forças de percolação**. 1999. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1999.

SILVA, W. S.; AZEVEDO, R. F. Ensaio oedométrico de adensamento induzido por forças de percolação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 4., 1999. São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos, 1999a. p. 210-216.

SILVA, W. S.; AZEVEDO, R. F. Hydraulic consolidation test: equipment description and testing analysis. In: PANAMERICAN CONFERENCE OF SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 11., Fóz do Iguassu. **Proceedings...** Foz do Iguaçu: ABMS, 1999b. p. 283-290,

TERZAGHI, K. **Theoretical soil mechanics**. New York: John Wiley and Sons, 1943. 509 p.

TOORMAN, E. A. Sedimentation and self-weight consolidation: general unifying theory. **Geotechnique**, v. 46, n. 1, p. 103-113, 1996.

TOORMAN, E. A. Sedimentation and self-weight consolidation: general unifying theory. **Geotechnique**, v. 48, n. 2, p. 103-113, 1998. (Discussion).

TOORMAN, E. A. Sedimentation and self-weight consolidation: constitutive equations and numerical modeling. **Geotechnique**, v. 49, n. 6, p. 709-726, 1999.

VANDERPLAATS, G. N. Numerical optimization techniques for engineering design: with applications. New York: McGraw-Hill, 1984. 333 p.

VICK, S. G. **Planning, design, and analysis of tailing dam**. New York: John Wiley and Sons, 1983. 369 p.

VILLAR, L. F. S. **Estudo do adensamento e ressecamento de resíduos de mineração e processamento de bauxita**. 2002. 511 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2002.

VILLAR, L. F. S. **Análise do comportamento de resíduos industriais de bauxita: desenvolvimento de facilidades experimentais de campo e laboratório**. 1990. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 1990

WYLIE, C. R. **Advanced engineering mathematics**. New York: McGraw-Hill, 1975. 937 p.

ZNIDARCIC, D.; ABU-HEJLEH, A. N.; ROBERTSON, A. **Seepage induced consolidation test**: equipment description and users manual. Boulder, CO: University of Colorado; Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, 1992. 51 p.

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. 227-237, 1986.