UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**ESTUDO DO PROCESSO GEOQUÍMICO DE
OBSTRUÇÃO DE FILTRO DE BARRAGENS**

Carlos Leite Maciel Filho

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Estanislau do Amaral

TESE DE DOUTORAMENTO

Área de Concentração: Geologia Geral e de Aplicação

São Paulo
1982

DEDALUS - Acervo - IGC

30900005131

Aos meus pais Carlos e Maria

Ao Marcus, Rodrigo e Lucila

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ESTUDO DO PROCESSO GEOQUÍMICO DE
OBSTRUÇÃO DE FILTRO DE BARRAGENS

Carlos Leite Maciel Filho

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Estanislau do Amaral

TESE DE DOUTORAMENTO

COMISSÃO EXAMINADORA

	nome	ass.
Presidente:	Dr. Sergio E. do Amaral	<u>Sérgio E. do Amaral</u>
Examinadores:	Dr. Georg R. Sadowski	<u>Georg R. Sadowski</u>
	Dr. José E.S. Farjallat	<u>José E.S. Farjallat</u>
	Dr. Paulo Teixeira da Cruz	<u>Paulo Teixeira da Cruz</u>
	Dr. Aldo da C. Rebouças	<u>Aldo da C. Rebouças</u>

São Paulo
1982

SUMÁRIO

Esta tese apresenta o desenvolvimento dos estudos para explicar o processo de cimentação de filtros de barragens com a conseqüente diminuição de sua permeabilidade. Os casos que estavam preocupando o meio geotécnico e que motivaram este estudo são principalmente o da barragem do Rio Grande, em São Paulo capital, e o da barragem de Xavantes, no Rio Paranapanema.

As conclusões estão baseadas no tripé: revisão da teoria e publicações específicas; levantamentos de campo; experiências de laboratório. Para estas, foram desenvolvidos métodos e aparelhos próprios chegando-se a ensaios que permitiriam: primeiro, medir com aproximação o volume de ar contido nos poros de uma areia sob fluxo não saturado; segundo, verificar a absorção de oxigênio pela água sob fluxo não saturado e comprovar uma diminuição dessa absorção com o prolongamento do ensaio; terceiro, verificar a deposição de hidróxido férrico na franja capilar e zona aerada de uma areia sob fluxo aproximadamente horizontal após passar por camada de argila; quarto, verificar a mesma deposição em areia sob capa de argila e sob fluxo, de cima para baixo, não saturado. Em todos eles a água usada era deaerada e nos dois últimos continha bicarbonato ferroso. Preliminarmente desenvolveram-se ensaios que permitiram controlar a variação da permeabilidade a longo prazo, eliminando-se o desenvolvimento de seres vivos e evitando um rearranjo dos grãos de areia, pela aplicação de baixos gradientes.

As informações bibliográficas e os levantamentos de campo indicam que a principal substância cimentante é o hidróxido férrico.

O processo de cimentação é dividido em duas fases: a primeira é a de redução e solubilização do ferro com o conseqüente transporte, na forma de bicarbonato ferroso, através do maciço de terra, o qual é também o principal fornecedor daquele elemento, até o filtro; a segunda é a de oxidação e precipitação desse ferro no filtro.

A primeira fase encontra uma explicação fácil no ambiente redutor que se forma no fundo de um lago, o qual é representado pelo reservatório da barragem. Nesta fase, as bactérias prestam

uma importante contribuição. Esse ambiente está descrito na bibliografia especializada e foi confirmado pelos levantamentos de campo.

A segunda fase reveste-se de aspectos mais complexos e de maior interesse, pois é passível de ser evitada, enquanto a primeira é praticamente incontrolável.

A oxidação é provocada basicamente pelo oxigênio do ar absorvido pela água, podendo ser auxiliada ou não por seres vivos. Por isso, as condições de oxidação prendem-se à aeração do filtro. Esta pode ocorrer na franja capilar ou nas partes aeradas acima do nível freático, se o fluxo for aproximadamente horizontal, ou também em todo espaço do filtro, se o fluxo for essencialmente vertical, de cima para baixo. Esta situação ocorre com filtros horizontais ou inclinados para montante.

Estas condições inicialmente oxidantes podem, com o tempo, tornar-se redutoras, face à absorção seletiva do ar pela água, isto é, pelo consumo de oxigênio e permanência do nitrogênio. O próprio tubo de drenagem pode, no entanto, ser um caminho para o ar rico em oxigênio, como aconteceu na barragem de Rio Grande.

As soluções apontadas destinam-se a evitar a entrada de ar nos tubos de drenagem.

Chama-se a atenção, ainda, sobre as possibilidades de melhor aproveitamento da capacidade de aeração de um meio poroso sob fluxo não saturado.

ABSTRACT

The precipitation of iron hydroxide in a filter dam decreases its permeability and is a process that can be divided into two steps: the first one is the reduction, solubilization and transportation of iron through the clay core; the second one is the oxidation and precipitation of this chemical substance.

The precipitation of iron is caused, basically, by the free oxygen of air absorbed by water. The filter aeration can occur in the capillary fringe or in the part above the phreatic level if the flow is essentially vertical, that is, from top to bottom. The latter situation can occur in horizontal or inclined upstream filters. State that are oxidant to begin with, with time, can become a reducing state through consumption of the dissolved oxygen in water and remaining nitrogen. However, the tubes of drainage may be a way for air rich in oxygen.

The developed method in the laboratory allowed the volume of air in the pores of sand under non-saturated flow to be measured, and to check the absorption of oxygen by water, and to confirm both the deposition of iron hydroxide in the capillary fringe and in the aerated zone of sand under nearly horizontal flow, and in sand covered by clay with a top to bottom non-saturated flow. The used water was non aerated and with iron bicarbonate, in the latter situation.

Field work confirmed anticipated conditions in the literature, and contributed to explain the phenomenon. The Rio Grande dam, located in São Paulo, Brazil, is a good case in point.

AGRADECIMENTOS

Fica registrada aqui a gratidão do autor às seguintes pessoas e instituições:

À Universidade Federal de Santa Maria -UFSM- pela permissão de afastamento por três anos, com vencimentos integrais, para realização do curso de doutorado;

À Universidade de São Paulo -USP- Instituto de Geociências pelo curso de doutorado e especialmente aos professores que ministraram as disciplinas do curso realizado;

Aos orientadores, Prof. Dr. Sérgio Estanislau do Amaral, do Instituto de Geociências, USP, e Dr. José Eduardo Siqueira Farjallat, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo S.A., pelo aconselhamento, opiniões e incentivo, indispensáveis à realização desta tese;

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo S.A. -IPT nas pessoas do Dr. Alberto Pereira de Castro, Superintendente, do Dr. Luiz F.R. Saragiotto, Diretor da Divisão de Minas e Geologia Aplicada, Dr. Ricardo Fernandes, Diretor da mesma Divisão no período final, Dr. José E.S. Farjallat, orienrador e Diretor do Agrupamento de Petrologia, pela permissão de usar seus laboratórios;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES - pela bolsa de pós-graduação, pelo período de três anos, concedida dentro do Plano Institucional de Capacitação de Docentes - PICD-UFSM;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq - pelo auxílio de pesquisa que contribuiu para viabilizar este trabalho;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul - FAPERGS - pelo auxílio de pesquisa que, de modo semelhante contribuiu para tornar possível este trabalho;

À Companhia Energética de São Paulo - CESP - pela permissão, através do convênio CESP-IPT, de visitar e colher dados em suas barragens e, em especial, ao pessoal encarregado das barragens de Xavantes, Armando A. Laydner, Paraibuna, Armando de Salles Oli

veira e Euclides da Cunha;

À Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental -CETESB- nas pessoas da Dra. Maria Therezinha Martins e Dra. Petra S. Sanchez, da Divisão de Microbiologia, pela realização das análises bacteriológicas;

Ao Geol. Lindolfo Soares, Chefe do Agrupamento de Geologia Aplicada a Barragens, pelo aconselhamento e cuidadosa revisão do texto, ao Dr. Paulo T. Cruz, consultor do IPT, pelas informações e opiniões, a Eng. Eda Quadros Freitas, ao Geol. Carlos Tatamyia, Quim. Giuliana Ratti, Lab. Joaquim Ireno, Lab. Sonia Reis, Lab. Rui, Lab. Durvalino, estagiária Maria do Rosário, todos do IPT, ao Prof. Raphael Hypólito, do Instituto de Geociências da USP, ao Prof. Olavo Bortolotto, e ao Lab. Renato Costa, ambos do Departamento de Geociências da UFSM, pela correção e colaboração durante os ensaios de laboratório.

A todas as pessoas, impossíveis de serem enumeradas, que contribuíram com sua acolhida, com informações, com empréstimo de livros e outros favores para a realização desta tese, bem como a instituição, como o Instituto de Oceanografia da USP que colaborou com empréstimo de material.

ÍNDICE GERAL

	Pág.
SUMÁRIO.....	iii
ABSTRACT	v
AGRADECIMENTOS	vi
1. APRESENTAÇÃO DO TEMA	1
1.1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
1.2. PRINCÍPIOS BÁSICOS SOBRE O FLUXO DA ÁGUA SUBTER	
RÂNEA	3
Estados da água no solo e franja capilar	3
Lei de Darcy	4
1.3. O FLUXO DA ÁGUA NUMA BARRAGEM DE TERRA	5
Rede de fluxo	5
Erosão interna	8
1.4. OS FILTROS DE PROTEÇÃO	9
1.5. CASOS DE OBSTRUÇÃO DE FILTROS	13
1.6. PROBLEMAS GEOQUÍMICOS EM BARRAGENS DE TERRA ...	16
1.7. ESTUDOS ANTERIORES SOBRE O TEMA	18
1.8. CONCLUSÕES DO PRIMEIRO CAPÍTULO	19
2. FUNDAMENTOS DA GEOQUÍMICA E BIOGEOQUÍMICA DO FERRO..	21
2.1. INTRODUÇÃO	21
2.2. OXIDAÇÃO-REDUÇÃO E EQUAÇÃO DE NERNST	22
2.3. DIAGRAMA DE pH-Eh PARA O FERRO	24
2.4. FERRO NAS ÁGUAS NATURAIS	26
Compostos presentes	26
Origem do ferro ferroso nas águas	26
Deposição de compostos de ferro	27
Complexos e coloides de ferro	27
Concentrações esperadas	29
2.5. CONSIDERAÇÕES SOBRE O AMBIENTE LACUSTRE	32
Estratificação salina e térmica	32
Condições geoquímicas	33
2.6. BIOGEOQUÍMICA APLICADA AO FERRO	38
Generalidades	38

Processos	39
Redução do ferro por ação de microorganismos ..	41
Solubilização do ferro contido em rocha sob in- fluência de microorganismos	42
Oxidação e deposição do ferro por ação de mi- croorganismos	42
2.7. DEPOSIÇÃO DE FERRO EM CAMADAS ARENOSAS	45
2.8. CONCLUSÕES DO SEGUNDO CAPÍTULO	46
3. LEVANTAMENTOS DE CAMPO EM BARRAGENS	49
3.1. OBJETIVOS	49
3.2. METODOLOGIA	49
Sistemática do levantamento	49
Análises	52
3.3. LEVANTAMENTOS	55
Barragens de Euclides da Cunha e Armando de Salles Oliveira	55
Barragem Armando A. Laydner	56
Barragem de Xavantes	60
Barragens de Ponte Nova, Pedreira e Vacacaí-Mi- rim	63
Dique 5 de Paraibuna	66
3.4. CONCLUSÕES DO TERCEIRO CAPÍTULO	68
4. METODOLOGIA DOS ENSAIOS EM LABORATÓRIO	70
4.1. INTRODUÇÃO	70
4.2. APARELHAGEM BÁSICA	71
Montagem do aparelho básico	71
Equacionamento das pressões no aparelho	75
4.3. FATORES NÃO GEOQUÍMICOS	80
Experiências anteriores sobre percolação em areia	80
Montagem dos ensaios, Influências biológicas ...	81
Influência da força de percolação	86
Resistência à mobilização das partículas da ar- gila	88
4.4. METODOLOGIA PARA ESTUDO DOS FATORES GEOQUÍMICOS ..	91
Métodos para estudo do sistema argila-areia ...	91
Ensaio com o porta-amostras A	91
Ensaio com o porta-amostras H	94
Ensaio com o conjunto D-E-F-G	96

Preparação do bicarbonato ferroso e retirada do oxigênio dissolvido na água	99
4.5. CONCLUSÕES DO QUARTO CAPÍTULO	100
5. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ABSORÇÃO DE OXIGÊNIO PELA ÁGUA E DE CIMENTAÇÃO DA AREIA	103
5.1. EXECUÇÃO DOS ENSAIOS	103
Composição dos corpos de prova	103
Desenvolvimento dos ensaios	106
Observações sobre o fluxo	109
5.2. ABSORÇÃO DE OXIGÊNIO PELA ÁGUA	110
5.3. CIMENTAÇÃO DA AREIA PELO HIDRÓXIDO DE FERRO ...	115
6. ANÁLISE FINAL	121
6.1. SITUAÇÃO DOS CONHECIMENTOS E OS OBJETIVOS	121
6.2. ELUCIDAÇÃO DO PROBLEMA COM BASE NA BIBLIOGRAFIA..	122
6.3. CONFIRMAÇÕES DE CAMPO	123
6.4. DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA DE LABORATÓRIO....	124
Etapas do método	124
Os porta-amostras	126
Capacidade de aeração na areia	126
6.5. ABSORÇÃO DO OXIGÊNIO E CIMENTAÇÃO DO MEIO <u>PORO</u> <u>SO</u>	128
Absorção do oxigênio	128
Cimentação do meio poroso	129
Recomendações	130
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	131

ÍNDICE DAS ILUSTRAÇÕES FIGURAS

	Pág.
1.1. Rede de fluxo de Kozeny para barragens de terra com filtro horizontal (Taylor, 50)	6
1.2. Características da linha superior de fluxo (Taylor, 50)	7
1.3. Principais tipos de filtros (Caputo, 7)	10
1.4. Secção típica esquematizada da Barragem de Xavantes , com os níveis piezométricos de janeiro de 1973 (Abrahão, 1)	15
2.1. Diagrama Eh-pH para íons simples e hidróxidos de ferro a 25°C (Krauskopf, 26)	24
2.2. Atividade total do ferro em relação ao pH e Eh (Hem e Cropper, 20)	31
2.3. Termoclínio no açude Bodocongô, Campina Grande, Paraíba, em 12/4/1943, segundo dados de Stillman Wrigt (Kleerekoper, 24)	34
2.4. Termoclínio na represa de Santo Amaro, São Paulo, na estação G, em 1/12/1937 (Kleerekoper, 24)	34
2.5. Curvas indicando uma distribuição extremamente <i>orthograde</i> . θ = temperatura; $[O_2]$ = oxigênio observado; $[O_2]_s$ = saturação. (Hutchinson, 22)	35
2.6. Distribuições da temperatura, θ , oxigênio observado, O_2 , e teor de saturação em oxigênio, $[O_2]_s$, em lagos de 15 a 20 m de profundidade, no máximo de estratificação do verão. (Juday e Birge, Yoshimura, in 22)	36
3.1. Fotografia do coletor de água tipo Van Dorn com capacidade aproximada de 2 litros	51
3.2. Fotografia do detalhe do mecanismo de suporte e disparo do coletor tipo Van Dorn	51
3.3. Curvas granulométricas do material argiloso do maciço de terra e da areia do filtro da Barragem Euclides	

des da Cunha	55
3.5. Esquema da Barragem de Xavantes, em planta e em seção (Villanova, 57)	61
3.6. Gráfico dos valores de temperatura, pH, potencial redox (Eh), Fe^{++} e oxigênio dissolvido (OD) nas diversas profundidades do lago de Xavantes, em 11/04/1979.	
3.7. Curvas granulométricas do solo usado no maciço de terra e da areia usada no filtro da Barragem de Xavantes	65
4.1. Esquema do aparelho montado para os ensaios, sem escala. A linha pontilhada destaca a parte utilizada na terceira forma de uso, à direita.....	74
4.2. Gráfico de $A = f(Z)$ do aparelho montado para os ensaios	76
4.3. Gráfico de $H = f(Z)$ do aparelho montado para os ensaios	77
4.4. Gráfico de $N = f(Z)$ do aparelho montado para os ensaios	78
4.5. Porta-amostras A construído em acrílico transparente. Os tubos piezométricos de vidro só foram colocados durante o segundo ensaio com este equipamento..	82
4.6. Seção diametral do porta-amostras B	83
4.7. Seção diametral do porta-amostras C	83
4.8. Curva granulométrica da areia normal IPT usada nas amostras A-1 e B-1	84
4.9. Gráfico das variações dos coeficientes de permeabilidade (K) das amostras A-1 e B-1, onde as retas representam as regressões lineares de $\ln k$ versus tempo	87
4.10. Gráfico da variação do coeficiente de permeabilidade da amostra C-1, onde as retas mostram a regressão linear $\log K$ versus tempo. O comprimento do traço horizontal sobre o ponto indica o tempo de percolação na escala em dias. O número próximo ao ponto indica o gradiente	89
4.11. Esquema para o cálculo da permeabilidade de uma camada inclinada de argila entre outras de areia	93
4.12. Porta-amostras H construído em acrílico transparente.	95

4.13. Seção diametral do porta-amostras D. Os cilindros são de PVC e as telas de nylon têm malha de 150microns	97
5.1. Curvas granulométricas das areias (5) e (7) usadas nos ensaios	103

FOTOGRAFIAS

5.1. Aspecto da areia da amostra A-3 tingida com hidróxido férrico após o ensaio em que sofreu percolação com solução de bicarbonato ferroso. Note-se a conexão para entrada de água no lado esquerdo, os dois tubos piezométricos e o tubo de saída no lado direito	116
5.2. Aspecto da mesma areia da amostra A-3 mostrada na fotografia anterior, vista do outro lado. A entrada de água fica à direita e a saída à esquerda ..	117
5.3. Sinais de deposição de hidróxido férrico abaixo da camada de argila na amostra H-1	119
5.4. Crostas ferruginosas localizadas em certos pontos da areia imediatamente abaixo da camada de argila, na amostra H-1. Observe-se numa placa da camada de argila as encrustações ferruginosas	119

TABELAS

1.1. PERMEABILIDADES DA BARRAGEM DE XAVANTES DEDUZIDAS DOS ENSAIOS DE ELETRO-ANALOGIA (ABRAHÃO, 1)	14
2.1. COMPOSIÇÃO QUÍMICA MÉDIA DOS SOLUTOS NAS ÁGUAS DOS RIOS DA BACIA DO PARANÁ E DOS RIOS DA AMÉRICA DO SUL (SZIKSAY, 49)	30
2.2. GÊNEROS DE BACTÉRIAS ENVOLVIDOS NA OXIDAÇÃO E DE POSIÇÃO DO FERRO E DO MANGANÊS (48)	43
3.1. ANÁLISE DAS ÁGUAS COLETADAS JUNTO À BARRAGEM ARMANDO DE SALLES OLIVEIRA EM 20/01/1977	57

3.2. ANÁLISE DAS ÁGUAS COLETADAS JUNTO À BARRAGEM ARMAN DO A. LAYDNER (JURUMIRIM) EM 16/02/1978 E 10/04/1979	58
3.3. BACTÉRIAS PRESENTES NOS SEDIMENTOS DO FUNDO DA RE PRESA E NO DRENO DO DIQUE ARMANDO A. ALYDNER (JURU MIRIM)	59
3.4. ANÁLISE DAS ÁGUAS COLETADAS JUNTO A BARRAGEM DE XA VANTES EM 17/02/1978	62
3.5. ANÁLISE DAS ÁGUAS DO LAGO DE XAVANTES, COLETADAS EM 11/04/1979	63
3.6. PARÂMETROS DO MATERIAL ARGILOSO USADO NO MACIÇO E DA AREIA USADA NO FILTRO DA BARRAGEM DE XAVANTES (CRUZ, 9)	63
3.7. ANÁLISE DAS ÁGUAS COLETADAS NA REPRESA DE PONTE NO VA EM 8/3/1980	65
3.8. ANÁLISE DA ÁGUA SUPERFICIAL JUNTO À BARRAGEM DO RIO GRANDE EM 14/2/1980	66
3.9. ANÁLISE DAS ÁGUAS COLETADAS JUNTO AO DIQUE 5 DE PA RAIBUNA EM 9/6/1980	67
4.1. CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS USADAS NA PRIMEIRA SÉ RIE DE ENSAIOS	85
4.2. RESULTADO DO ENSAIO DE PERCOLAÇÃO NAS AMOSTRAS C-2, C-3, C-4, C-5	90
5.1. CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS USADAS NA SEGUNDA SÉ RIE DE ENSAIOS	104
5.2. PERMEABILIDADE DA ARGILA DA AMOSTRA A-2	105
5.3. DADOS HIDRÁULICOS DA PERCOLAÇÃO ATRAVÉS DA AMOS TRA A-3 EM POSIÇÃO HORIZONTAL	107
5.4. DADOS QUÍMICOS DO ENSAIO COM A AMOSTRA A-2	111
5.5. VAZÕES E DOSAGENS DE OXIGÊNIO DISSOLVIDO NA AMOS TRA A-3	111
5.6. RESULTADO DO ENSAIO COM AS AMOSTRAS D-1, E-1, F-1, G-1	112
5.7. RESULTADO DO ENSAIO COM AS AMOSTRAS D-2, E-2, F-2, G-2	112
5.8. ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE OXIGÊNIO PE LA ÁGUA NAS CONDIÇÕES DOS ENSAIOS	114
5.9. DADOS QUÍMICOS DO ENSAIO DE CIMENTAÇÃO DA AREIA DA AMOSTRA A-3 EM POSIÇÃO HORIZONTAL	115
5.10. DADOS DO ENSAIO DE CIMENTAÇÃO DA AREIA DA AMOSTRA H-1	118

CAPÍTULO 1

APRESENTAÇÃO DO TEMA

1.1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Aquinhoadado por enorme potencial hidráulico, o Brasil vem liderando a construção de grandes barragens especialmente as de terra e enrocamento, graças a condições geográficas e geológicas peculiares. O perfeito funcionamento de todos os elementos de uma barragem é condição indispensável para a segurança não só da obra a qual já representa investimento vultosíssimo, mas também de populações ou propriedades situadas a jusante. Assim, é natural que cada elemento da barragem mereça atenção especial e dentre os elementos importantes numa barragem de terra está o fil
tro.

Em barragens de enrocamento e zonadas, a maior parte do material que compõe a estrutura funciona como elemento filtra
nte e, portanto, mesmo que parte dessa função seja prejudicada por algum entupimento, dificilmente este fato prejudicaria a se
gurança da obra.

Numa barragem de terra maciça, no entanto, a situação é inversa. A quase totalidade do material que compõe a estrutura possui uma permeabilidade muito baixa, mas sofre a percolação da água a qual gera pressões hidrostáticas (neutras) no interior do maciço. Se não for devidamente controlada, pode brotar no para
mento de jusante carreando grãos do solo componente do maciço de terra, provocando erosão interna e, pela formação de sulcos no talude de jusante, também uma erosão externa.

Pressões neutras por demais elevadas e surgências no pa
ramento de jusante, colocam em risco a segurança da obra. Pode-se dizer, de outra maneira, que a água no maciço da barragem segue linhas de fluxo que devem ser controladas. Este controle é exer

cido pelo filtro o qual capta a água vinda de montante através do maciço de terra conduzindo-a aos drenos de jusante. A obstrução do filtro, seja por colmatção dos poros devida a material mais fino, seja por cimentação devida a alguma substância química, acarretaria um aumento das pressões neutras e, em casos mais extremos, surgências no paramento de jusante.

O filtro pode ser obstruído por processos físico-mecânicos, geoquímicos e petrológicos. Entre os primeiros situa-se a acumulação de material detrítico mais fino nos poros da areia constituinte do filtro; entre os segundos está a precipitação de certas substâncias nos poros dessa areia devido a reações químicas; entre os terceiros podem se situar os processos de alteração da rocha constituinte da areia artificial usada em alguns filtros, com conseqüências ainda pouco previsíveis.

A colmatção dos poros do filtro, devido a um processo mecânico de deslocamento das partículas do maciço de terra para o filtro, tem sido estudada por vários autores, como Terzaghi (51), Taylor (50), Bertram (in 44), Davidenkoff (in 44), Zweck (in 44), Cedergren (in 44), Silveira (44), Kjellman (in 45), Silva (43), enquanto que os processos geoquímicos de cimentação e as modificações na textura de areias artificiais, devido à alteração da rocha componente do grão, quase não têm sido pesquisados.

Infanti e Kanji (23) e informações verbais do Eng. Paulo T. Cruz atestam a existência de obstrução do filtro de barragens do Estado de São Paulo, sendo uma delas comprovadamente por cimento ferruginoso.

Em 1976, no XI Seminário Nacional de grandes Barragens realizado em Fortaleza, este assunto "colmatção de drenos e filtros" foi alvo das preocupações de um dos relatórios (Oliveira e Camargo, 36).

Em 1973 A. Casagrande sugeriu ao Eng. Paulo Cruz um programa de investigações sobre o assunto e, em 1976, por sugestão do Geol. José Eduardo S. Farjallat foi iniciada esta pesquisa sob sua orientação e do prof. Sérgio E. do Amaral.

O presente trabalho propõe-se, em primeiro lugar, a explicar o processo que leva à cimentação dos poros, através de experiências em laboratório, de estudo teórico, ou ainda, pelas observações de campo.

Pela indicação da literatura, desde o início as atenções se fixaram no ferro como principal elemento cimentante (Infanti e Kanji, 23; Xu, Guo e Chen, 59) ou mobilizável (Infanti e Kanji,

23; Anagnosti, 2; Knill e Best, 25). As outras substâncias que normalmente são encontradas como cimento nas rochas sedimentares, tais como carbonato de cálcio e sílica, deixaram de ser objeto deste estudo por não haver indicações de obstrução de filtro por esses materiais.

Dentro de um segundo objetivo procura-se desenvolver uma metodologia visando tanto comprovar o processo quanto fornecer elementos para o estudo de filtros existentes ou em projetos. Esta metodologia refere-se a levantamentos de campo e experiências de laboratório.

Atendendo a estes objetivos, espera-se dar uma contribuição para solucionar os problemas com a cimentação de filtros existentes, ou para o projeto desses elementos das barragens de terra. Neste primeiro capítulo destaca-se a função dos filtros e alguns casos de obstrução dos mesmos.

1.2. PRINCÍPIOS BÁSICOS SOBRE O FLUXO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

Estados da água no solo e franja capilar

A água, no solo, apresenta-se basicamente sob três estados: higroscópico, pelicular e livre. A água higroscópica envolve os grãos e a eles adere tão fortemente que se mantém imóvel, sendo somente retirada sob temperatura superior a 100°C. A água pelicular forma uma película recobrendo a higroscópica, podendo se deslocar em função da maior ou menor umidade do grão, não sendo praticamente regida pela gravidade e sim pela tensão superficial. Finalmente, a água gravitacional ou livre é a que se desloca através dos grãos na zona de aeração ou na de saturação, sob a ação da gravidade. É sobre a água neste estado que se aplicam as leis do movimento da água no sub-solo.

Capilar é a água que ocupa uma faixa acima do nível freático preenchendo os poros do solo até uma altura variável segundo o tamanho desses vazios. Experiências de laboratório, em canais de areia, realizados por Mavis e Tsui (in Todd, 52), demonstraram que ocorrem fluxos paralelos ao nível da água, na zona capilar. Numa barragem, a vazão total que passa pelo maciço de terra, corresponde à soma da vazão através da zona saturada com aquela da franja capilar.

Lei de Darcy

Em 1856, Henry Darcy enunciou, como resultados de experimentos a lei fundamental do movimento da água subterrânea, conhecida atualmente como lei de Darcy e expressa pela equação:

$$Q = \frac{K (h_1 - h_2) A}{L}$$

onde Q é a vazão ou quantidade de líquido que passa por um meio poroso por unidade de tempo, K o coeficiente de permeabilidade, o qual depende da natureza do meio poroso, h_1 e h_2 os níveis piezométricos de entrada e saída, L o comprimento do meio poroso atravessado pela água e A a área transversal ao fluxo e ocupada pela água. Frequentemente usa-se a letra i para substituir $(h_1 - h_2)/L$ ou dh/dL e é denominado gradiente hidráulico.

A velocidade média da água no meio poroso ou velocidade de Darcy obtém-se dividindo Q por A,

$$v = \frac{Q}{A}$$

$$v = K \frac{dh}{dL}$$

Esta lei é válida para fluxo laminar, tal como o escoamento da água em tubo capilar. Para fluxos turbulentos não pode ser usada. Normalmente a velocidade da água subterrânea é muito pequena, sendo seu fluxo laminar e, por isso, dentro dos limites de velocidade da citada lei.

O coeficiente K é sempre determinado em meios saturados. K é dado em cm/s e depende não só do meio poroso mas também do peso específico do líquido e de sua viscosidade. Como uma e outra propriedade dependem da temperatura, corrige-se o valor de K, medido a uma temperatura qualquer, mediante o uso de tabelas ou gráficos que contenham a relação K_t/K_{20} , para o valor teórico de K a 20°C.

Pode-se dizer que para a água atravessar um meio poroso tem de ser impulsionada por uma pressão ou carga. A carga total corresponde à soma algébrica da carga de pressão e da carga de altura. Assim ao percolar o solo a água sofre uma perda de carga, a qual pode ser de pressão ou de altura.

1.3. O FLUXO DA ÁGUA NUMA BARRAGEM DE TERRA

Rede de fluxo

A trajetória de uma partícula de água percolando num meio poroso corresponde a uma linha de fluxo. Linha equipotencial é aquela que une os pontos com mesma carga. Um sistema de linhas de fluxo e linhas equipotenciais constitui uma rede de fluxo. Em meios isotrópicos as linhas de fluxo interceptam as equipotenciais a 90° , significando que a direção do fluxo é perpendicular às equipotenciais (Lambe e Whitman, 30).

A partir de uma rede de fluxo pode-se determinar a taxa de fluxo, a carga e o gradiente.

A unidade mais simples de uma rede é um retângulo limitado por duas linhas de fluxo e duas equipotenciais. Uma terceira dimensão fica subentendida para poder se imaginar um prisma através do qual a água percola.

As soluções analíticas para a determinação da rede de fluxo numa barragem são normalmente muito difíceis e só aplicáveis a alguns casos particulares. Geralmente são usadas outras soluções, tais como, modelos elétrico analógicos, cálculos numéricos em elementos finitos, modelos hidráulicos e métodos gráficos. A analogia elétrica baseia-se no fato de que a lei de Ohm, que rege o fluxo elétrico, é semelhante ou análoga à de Darcy, pois ambas seguem a equação de Laplace, sendo a carga hidráulica comparada à voltagem. Para o cálculo numérico em elementos finitos divide-se a seção de uma barragem em certo número de quadrados e calcula-se o potencial e o fluxo em cada elemento. Este método exige, na prática, o emprego de computador. O método seguinte emprega um modelo reduzido de barragem para observações hidráulicas diretas. Por fim, o método gráfico baseia-se simplesmente em tentativas dirigidas de se desenhar as linhas de fluxo e equipotenciais que se configuram melhor.

Em barragens em funcionamento e instrumentadas, isto é, possuidoras de uma rede de piezômetros que indicam a pressão da água em diversos pontos no interior da barragem, pode-se obter um controle melhor e mais real da rede de fluxo. O controle por piezômetros é muito importante para se verificar se as pressões reais correspondem às de projeto ou exigem medidas corretivas para garantir a estabilidade da obra.

Há, no entanto, algumas soluções analíticas, que merecem

ser apreciadas. Uma dessas foi dada por Kozeny em 1933 (in 30) e é aplicável a barragens de terra com filtro horizontal. Neste caso tanto as linhas de fluxo quanto as equipotenciais são representadas por parábolas com focos conjugados, devendo o paramento de montante ser teoricamente uma das parábolas equipotenciais. Esta configuração pode ser vista na Figura 1.1 extraída de Taylor (50).

Figura 1.1. Rede de fluxo de Kozeny para barragens de terra com filtro horizontal. (Taylor, 50)

A. Casagrande (in 30) modificou essa solução teórica para aplicá-la a barragens com paramento de montante plano, como ocorre normalmente. O resultado mostra que as linhas de fluxo a montante tomam outra inclinação para depois se conformarem ao modelo parabólico.

Taylor (50) mostra as três condições que a linha superior de fluxo deve obedecer. Já que esta linha está sob pressão atmosférica, a única carga que pode existir ao longo da mesma será a carga de elevação. Por conseguinte, deverá haver quedas cons

tantes na elevação entre os pontos nos quais as equipotenciais encontram a linha superior de fluxo, como mostra a Figura 1.2.

Figura 1.2. Características da linha superior de fluxo. (Taylor, 50).

No ponto em que inicia, a linha superior de fluxo deverá ser normal ao talude de montante, o qual é uma linha equipotencial. Isto é mostrado na Figura 1.2(b). Há, no entanto, uma exceção, mostrada na Figura 1.2(c).

No extremo de jusante da linha superior de fluxo, as partículas de água ao sair dos poros tendem a seguir os condutos de fluxo que se dispõem de maneira mais próxima possível à direção da gravidade. Isto é ilustrado na Figura 1.2(d), a qual mostra a linha superior de fluxo tangente ao talude no ponto de saída, e na Figura 1.2(e) que mostra a condição de saída vertical até o preenchimento rochoso no pé (50).

Na prática deve se prever que: primeiro, a linha superior de fluxo não atinja o talude de jusante, pois nesse caso haveria surgências com conseqüente erosão; segundo, as equipotenciais atinjam valores baixos, pois, caso contrário, a subpressão poderia desestabilizar a barragem.

Erosão interna

A erosão interna é um processo resultante da força de percolação da água. Pode ocorrer no solo de fundação, no corpo da barragem ou mesmo em outras obras ou ainda em ambientes naturais. O processo inicia-se com uma surgência de água e, através de erosão regressiva e carreamento das partículas do solo, forma uma cavidade que pode ter muitos metros de comprimento.

Em certas circunstâncias, o carreamento de partículas do maciço de terra para o filtro pode gerar esse tipo de erosão.

Terzagui e Peck (51) indicam que a capacidade erosiva de uma fonte aumenta com o comprimento da cavidade. A erosão interna leva à formação de cavidades que captam a água percolante através do meio poroso e, à medida que engrossam seu caudal, aumentam sua capacidade erosiva.

Zaslavsky e Kassiff (61) formularam uma teoria sobre o mecanismo de erosão interna (*pipíng*) que pode ocorrer no contato do solo do núcleo com a areia do filtro. É aplicável principalmente aos solos coesivos. São levadas em consideração as várias forças que agem sobre um elemento do solo, nomeadamente a força de percolação, o peso submerso e a resistência dos solos coesivos a erosão interna.

Admitem que

$$F_s = \frac{F_c}{F_g - F_d}$$

sendo F_s = fator de segurança; F_g = força de gravidade originada do peso efetivo das partículas do solo; F_d = força de arraste exercida sobre a partícula devido ao gradiente hidráulico; F_c = resultante das forças coesivas. F_g é uma componente perpendicular à superfície do solo. Ela pode ser somada ou subtraída de F_d , conforme a posição da superfície do solo.

Concluem, após analisar cada um dos fatores que influem nessas forças, que quanto menor o diâmetro da partícula e mais coeso for o solo, menor a probabilidade de haver erosão, cujo mecanismo se processa pelo deslocamento de partículas floculadas (agregado).

Os solos normalmente adensados comportam-se como solos arenosos em relação a erosão interna enquanto os pré-adensados são muito resistentes a esse fenômeno.

Nas concavidades onde há concentração de linhas de fluxo, a força de percolação é maior e, por isso, o perigo de erosão

interna é também maior.

1.4. OS FILTROS DE PROTEÇÃO

Tanto para evitar erosão do paramento de jusante, quanto para controlar a sub-pressão, são usados filtros, os quais captam a água que penetrou no maciço de terra e a conduzem aos drenos ou saídas devidamente protegidas contra a erosão. Para ter um bom funcionamento, é necessário que as partículas do solo compactado, a ser protegido, não sejam levadas para os poros do filtro pois, caso contrário, poderia se formar um túnel de erosão interna.

Assim, o material filtrante deverá ser suficientemente fino para evitar que passem, por seus poros, partículas do material a ser protegido e suficientemente grosso para que a carga de pressão seja dissipada pelo fluxo e, por conseguinte, as forças de percolação desenvolvidas dentro do mesmo sejam relativamente pequenas. A perda de carga de altura deve ser suficientemente grande.

No corpo da barragem a orientação favorável ao percurso da água é obtida pela posição de sistemas drenantes.

Em barragens de enrocamento ou de solo zonado com núcleo pouco permeável, o material filtrante constitui, muitas vezes, a maior parte do maciço. No entanto, a transição do solo fino até os blocos de pedra deve obedecer aos critérios previstos para filtros.

Em barragens homogêneas de terra, há três tipos principais de filtros segundo Caputo (7), cujas seções estão esquematizadas na Figura 1.3.: de pé ou banquetta de enrocamento; horizontal ou tapete drenante; em chaminé ou combinação do horizontal com outro vertical ou inclinado.

O último tipo, e também o mais usado, permite variações. A parede de areia pode estar em três posições: vertical, inclinada para montante e inclinada para jusante. A inclinação para montante, melhora a estabilidade do talude durante o rebaixamento rápido do reservatório e a inclinação para jusante alonga o caminho a ser percorrido pela água dentro da fundação até atingir o dreno horizontal.

A escolha do material a ser utilizado segue certos critérios dos quais o mais importante refere-se à granulação.

Figura 1.3. Principais tipos de filtro. (Caputo, 7).

Taylor (52) apresenta uma análise baseada em esferas perfeitamente e de tamanho uniforme. Se três esferas se tocam terão um diâmetro 6,5 vezes maior que o diâmetro da esfera pequena que apenas passaria através do orifício central. Se o orifício mostrado é o menor que possa existir entre as partículas, o bom senso dirá que para uma compactação solta, o tamanho do material filtrante deverá ser limitado a alguma coisa menor do que 6,5 vezes o tamanho do material a ser protegido. G.E. Bertram (in 50) demonstrou, através de investigações de laboratório, que o tamanho dos grãos para um material filtrante uniforme poderá ser até 10 vezes aquele do material uniforme a ser protegido, antes que possa ocorrer carreamento através do filtro.

Como a análise granulométrica é de fácil execução e correntemente realizada, um critério que utilize este parâmetro torna-se muito prático. "As experiências mostram que um material satisfaz os requisitos essenciais para um filtro se seu diâmetro correspondente a 15% (D_{15}) é, no mínimo, quatro vezes o da camada mais grossa do solo em contato com o filtro e não maior que quatro vezes o diâmetro correspondente a 85% (D_{85}) da camada adjacente mais fina do solo" (Terzagui e Peck, 51). Este critério é conhecido como o de Terzagui, tendo sofrido algumas variações conforme a apresentam os autores seguintes.

Taylor (50) e Caputo (7) apresentam como exigências as seguintes relações, quase iguais às de Terzagui:

$$\frac{D_{15} \text{ do filtro}}{D_{85} \text{ do solo base}} < 4 \text{ a } 5 < \frac{D_{15} \text{ do filtro}}{D_{15} \text{ do solo base}}$$

enquanto Lambe e Whitman (30) apresentam maiores especificações

$$\frac{D_{15} \text{ do filtro}}{D_{85} \text{ do solo base}} < 5$$

$$4 < \frac{D_{15} \text{ do filtro}}{D_{15} \text{ do solo base}} < 20$$

$$\frac{D_{50} \text{ do filtro}}{D_{50} \text{ do solo base}} < 25$$

Silveira (44) faz uma análise baseando-se no provável caminho pelo qual a partícula do solo base com determinado diâmetro entraria no filtro. Este caminho depende dos vazios das seções transversais que a partícula encontrará pela frente. Para estabelecer o comprimento deste caminho deve-se estimar quantos vazios a partícula de determinado diâmetro deverá atravessar, até que encontre um poro de diâmetro menor, e qual a probabilidade de esta condição ser alcançada após várias confrontações, dentro de um certo nível de confiança.

O método prevê o traçado de uma curva de distribuição dos vazios a partir de uma curva de distribuição dos tamanhos dos grãos. A seguir, por um cálculo de probabilidade, estima o quanto as partículas dos diversos tamanhos do solo base podem penetrar no filtro. A faixa penetrada estaria contaminada. O filtro projetado deverá possuir uma espessura maior para dispor de espaço não contaminado que garanta um bom funcionamento.

Silveira (45) comenta os trabalhos de Kjellman que lançou as bases para o estudo do que poderia ocorrer à montante da zona de contato entre o filtro e o solo base, tendo-se preocupado principalmente com os perigos de erosão interna. Sobre este assunto não serão tecidos maiores comentários uma vez que, nos trabalhos de laboratório ou mesmo em casos de campo, não ocorreram fenômenos de erosão interna nestas condições. Os comentários anteriores sobre o fenômeno parecem suficientes, pois nos traba

lhos destinados à tese lidou-se com solos coesivos aos quais se aplicam as conclusões de Zaslavsky e Kassiff sobre o fator de segurança a erosão interna.

Silva (43) considera os critérios de Terzaghi, geralmente usados, essencialmente aplicáveis no caso de proteção a materiais arenosos ou silto-arenosos. Devido principalmente à baixa permeabilidade da argila, o que implica em baixa velocidade de fluxo e em baixo poder erosivo, e à coesão desse material, conclui que:

"- Qualquer areia limpa seria adequada à proteção de maciços argilosos bem compactados e homogêneos;

- O maciço a ser protegido deve ser tanto quanto possível bem compactado e homogêneo, evitando-se ao máximo quaisquer heterogeneidades representadas por zonas de má compactação, trincas provenientes de super compactação ou defeituosa ligação entre camadas ou outras irregularidades que possam ensejar o aparecimento de caminhos preferenciais de fluxo.

- Se um maciço argiloso vier a apresentar os defeitos mencionados no item anterior, o problema dos filtros de proteção revestir-se-á de aspectos ainda pouco esclarecidos pela engenharia de solos".

Vargas e Hsu (56) citam exemplos de seis barragens, Terzaghi, Santa Branca, Ponte Coberta, Euclides da Cunha, Limoeiro e Graminha, onde se formaram fissuras através das quais houve alguma percolação que poderia colocar em risco a estabilidade da obra. Este fato é atribuído à natureza dos materiais empregados e provavelmente à compactação diferencial. Filtros verticais, existentes em todas elas, interceptaram a infiltração que do contrário teria emergido como minas de água no talude à jusante e/ou nas ombreiras, comprometendo assim a estabilidade da estrutura.

Do comportamento satisfatório dessas barragens providas com tais drenos verticais, concluem que esta é uma medida adequada, no caso de fissuras em barragens homogêneas de terra.

Silveira et alii (46) mostram que os filtros horizontais devem trabalhar com a menor carga hidráulica possível, para evitar sub-pressões na barragem e manter não saturada a parte de jusante da mesma. Disso resulta que os gradientes hidráulicos no filtro horizontal devem ser bastante pequenos.

A percolação através das fundações, aumentando o volume

de água a ser escoada pelo filtro horizontal, é outro fator que exige a adoção de maior capacidade de vazão que no filtro vertical.

No caso de funcionamento deficiente do filtro vertical, o filtro horizontal ou o tapete drenante funciona como defesa adicional, mas no caso de mau funcionamento do filtro horizontal de pouco adiantará o filtro vertical da barragem. Conseqüentemente, para o projeto de tapetes drenantes horizontais pode ser conveniente ou mesmo necessária a utilização de materiais de granulo metria graúda, como britas ou cascalhos, de modo a se obter o grau de segurança requerido.

Filtro dessa natureza, também chamado tapete drenante horizontal em camadas múltiplas ou tipo sanduiche, foi construído na barragem de Marimbondo e Água Vermelha.

1.5. CASOS DE OBSTRUÇÃO DE FILTROS

Há poucas descrições sobre casos deste gênero, sendo que a primeira publicação a relatar claramente uma situação destas foi a de Infanti e Kanji (23) em 1974, referindo-se a uma barragem de São Paulo que depois foi constatado ser a do Rio Grande, integrando o Sistema Billings.

Esta barragem possui um dreno subterrâneo (sub-dreno), além da canaleta de drenagem, paralelo ao sopé do paramento de jusante. Este dreno encontra-se envolto por um filtro constituído, do meio para as bordas, de brita, pedrisco e areia grossa.

"As investigações efetuadas incluíram ensaios realizados com o material coloidal encontrado no interior do tubo coletor de drenagem, bem como a execução de poços de investigação através do filtro de areia, os quais revelaram que o filtro apresentava porções fortemente cimentadas". Análises posteriores indicaram que o material cimentante era a goethita. Os outros casos citados por aqueles autores não comprovam a existência do problema, isto é, obstrução do filtro ou dreno.

Posteriormente, Guerra (15) em 1980 descreveu o mesmo caso, citando as seguintes ocorrências no histórico dessa barragem. Em 1940, três anos após a sua construção, houve um recalque de aproximadamente 30 cm, interpretado como resultante da saída de material siltsoso. Em abril de 1960 foi constatado que o sub-dreno se encontrava parcialmente entupido e foi localizada uma cavidade com cerca de 1,0 m de diâmetro por 1,5 m de pro

fundidade. À semelhança de 1952 e 1962, em 1963 foi verificado que a canaleta de drenagem que acompanha o pé do talude de jusante do aterro apresentava-se parcialmente obstruída, sendo observado material de aspecto ferruginoso carregado pela água do subdreno da canaleta. Nesse mesmo ano houve deslizamento do talude de jusante. Verificou-se então que a saturação do aterro havia sido causada por problemas do sub-dreno. Uma inspeção constatou então que o tubo coletor estava quebrado e as camadas de areia, pedrisco e brita apresentavam mau aspecto além de ser apontado também o carreamento e a colmatação do dreno. A exposição do sub-dreno, em 1967, revelou que não havia quebra de tubos, mas constatou o entupimento parcial do tubo coletor e a existência de material de "coloração alaranjada, aspecto ferruginoso, lodoso e adesivo" nas camadas de areia, pedrisco e brita.

X A barragem de Xavantes, pertencente a CESP, situada no Rio Paranapanema entre os municípios de Xavantes (SP) e, Ribeirão Claro (PR), após entrar em operação em fins de 1970, apresentava, já em janeiro de 1973, piezômetros indicando níveis acima daqueles previstos no projeto e próximos dos níveis calculados para filtros obstruídos. Abrahão (1) analisou a evolução dos níveis piezométricos e desenvolveu uma simulação através de um modelo eletro-analógico, ensaiando cinco distribuições dos valores correspondentes às permeabilidades nos diversos elementos da barragem e procurando a cada ensaio uma aproximação maior com a configuração obtida pelo estudo dos níveis piezométricos. Assim, tomando a seção típica esquemática apresentada na Figura 1.4, concluiu que os valores médios da permeabilidade são os mostrados na Tabela 1.1.

TABELA 1.1. PERMEABILIDADES DA BARRAGEM DE XAVANTES DEDUZIDAS DOS ENSAIOS DE ELETRO-ANALOGIA (ABRAHÃO, 1).

Material percolado	Valor médio de K
Basalto vesículo-amigdaloidal (fundação)	5×10^{-6} cm/s
Arenito eólico (fundação)	1×10^{-4} cm/s
Arenito aquoso	4×10^{-4} cm/s
Maciço de montante da barragem de terra	1×10^{-6} cm/s
Filtro inclinado	1×10^{-4} cm/s
Filtro horizontal	1×10^{-2} cm/s
Dique na posição vertical	impermeável

Figura 1.4. Secção típica esquematizada da Barragem de Xavantes, pertencente a CESP, com os níveis piezométricos de janeiro de 1973 (Abrahão, 1).

Em grande parte os níveis piezométricos elevados eram explicados pelo fluxo vindo da fundação sobrecarregando o filtro horizontal, problema este resolvido com a abertura de poços de alívio no pé de jusante. Mas de qualquer forma ficava evidenciada uma certa obstrução do filtro inclinado, o qual apresentava inicialmente permeabilidade maior.

Um levantamento realizado na China por Xu, Guo e Chem (59) revelou que "uma investigação de campo em 48 projetos e 40 poços escavados para teste mostrou que cerca de 80% das barragens de terra possuíam água ferruginosa em alguma extensão e isto levava a uma contaminação dos drenos do filtro que, em alguns casos, estavam mesmo parcialmente obstruídos. Geralmente ela influenciava as zonas onde o nível da água de percolação flutuava, ou próximo a seus limites superiores. Abaixo do nível de flutuação, como o ferro estava no estado de redução não havia sinal nem de precipitação nem de gelificação de óxido de ferro".

Verificaram também que o funcionamento das barragens de terra não foi afetado.

1.6. PROBLEMAS GEOQUÍMICOS EM BARRAGENS DE TERRA

Embora sem se referir à obstrução de filtros, existem alguns trabalhos sobre aspectos geoquímicos ocorridos em barragens que de alguma forma estão relacionados ao tema.

Haldane, Carter e Burton (18) relatam um ataque químico do revestimento de concreto do túnel de desvio da barragem de Corin, Austrália. A causa desse ataque era a água ácida, com pH 4,2, formada devido à presença de pirita na rocha usada para enrocamento. A participação desse mineral na formação de ácido sulfúrico era auxiliada pela ação de microorganismos.

Knill e Best (26) estudando o caso de fissuramento do núcleo da barragem de Shek Pik, em Hong Kong sugerem "que o fraturamento de núcleos em barragens de terra feitos de solos residuais podem estar associados com a ocorrência de cimentação temporária resultante da presença de goethita". A explicação dada seria a de que poderia haver uma dissolução e reprecipitação "de forma que nova cimentação pudesse se desenvolver rapidamente dentro de um solo compactado e, assim, levar ao fraturamento", provavelmente por tornar o solo mais rígido. Na explanação desses autores faltam justificativas químicas para essa dissolução e

reprecipitação no solo, mas a observação de que mesmo pequenas quantidades de goethita podem ter grande influência no comportamento do solo é interessante.

Anagnosti (2) descreve o caso ocorrido com a barragem de Kalé, na Guiné, do tipo enrocamento, a qual possui um núcleo de laterita finamente granulada. Quando de seu enchimento em 1963, a descarga nos drenos coletores atingiu 1 litro/segundo. No final de 1965 a descarga chegou a 31 l/s, houve surgências ao longo do paramento de jusante a 2 m abaixo do nível do reservatório e um sedimento coloidal avermelhado depositou-se nos coletores do dreno. A infiltração não foi provocada por erosão do solo, visto que a água que passava através da barragem era limpa e mesmo utilizada como potável. "Os testes realizados sobre os solos usados na barragem provaram a deterioração química dos finos que foram dissolvidos e levados da zona impermeável da barragem em um tempo relativamente curto. A água do reservatório não mostrava nem acidez nem alcalinidade, sendo neutra (pH = 7), mas na passagem através da barragem tornou-se alcalina".

O fato de uma dissolução colocar em perigo uma barragem a ponto de exigir medidas excepcionais, como relata aquele autor no mesmo artigo, é muito importante, mas a explicação merece ser discutida.

A última afirmação desse autor de que a água ao passar pela barragem torna-se alcalina a ponto de dissolver os óxidos, não parece muito aceitável. Consta que as amostras foram tratadas com diferentes valores de pH e foi observado que "entre pH=11,85 a pH=12,85 cerca de 60% das frações menores que 0,05 mm eram dissolvidas", sendo 25% SiO_2 e 35% óxidos de ferro e de alumínio. Ora este comportamento pode ser explicado pela presença do alumínio e sílica e não de ferro pois, segundo esse autor, os solos examinados possuíam 38% e 47% de óxidos de ferro e de alumínio. Porém é difícil e praticamente impossível formar-se, em ambientes naturais de uma barragem, pH dessa magnitude. Poder-se-ia pensar em reações de redução e oxidação para explicar a dissolução e posterior precipitação à jusante.

Outro aspecto interessante do caso ocorrido mas que esse autor não desenvolve é o do filtro. Conforme o desenho da seção da barragem, esta possui um filtro horizontal com enrocamento no pé de jusante. Ora, para haver surgências no paramento de jusante a 2 m abaixo do nível de montante, como relata esse autor, seria de se esperar que o filtro estivesse inoperante, mas infe

lizmente não é mencionado se houve ou não obstrução do filtro.

A solução encontrada para esse caso foi a construção de parede de estacas-prancha cravada no limite de montante do núcleo de material fino.

1.7. ESTUDOS ANTERIORES SOBRE O TEMA

Xu, Guo e Chen (59), além da constatação do problema, desenvolveram importantes estudos de campo e de laboratório. Verificaram na Barragem de Hedi que o teor de ferro total no reservatório era de 0,06 mg/l, nos poços de inspeção na barragem 0,25 a 4,5 mg/l e à jusante 0,75 a 7,5 mg/l. Através de medição do potencial elétrico verificaram que acima da linha freática o solo estava no estado de relativa oxidação e, abaixo, no de relativa redução. Em laboratório, tomaram pares de amostras, onde uma era tratada com glucose 0,5%, para a redução do ferro, e outra não. Após 3 a 4 meses foram comparadas as propriedades dos pares e constataram que as amostras que sofreram a redução do ferro diminuíram: os teores de partículas de argila e colóides em 1,5 % a 10% principalmente nos solos derivados de basalto e calcário; os limites de plasticidade e de liquidez em 1% a 7%; o ângulo de atrito interno em 2° a 4° ; de $(1 \times 10^{-5}$ a $1 \times 10^{-8})$ cm/s para $(1 \times 10^{-5}$ a $1 \times 10^{-7})$ cm/s o coeficiente de permeabilidade. O peso específico não variou muito. Consideraram ainda, que essas ordens de grandeza não eram significativas.

Importante também é o trabalho de Ferreira (10), apresentado em 1978, não só por representar a primeira tentativa de simulação em laboratório do processo de colmatação físico-química de filtros em barragens, mas também pela riqueza de detalhes da experiência realizada. Esse autor descreve uma experiência que simula o processo em questão, realizada no laboratório de Ilha Solteira pertencente a Companhia Energética de São Paulo (CESP). Os materiais ensaiados são os mesmos com que foi construída a Barragem de Xavantes. Três amostras de solo compactado, recoberto por areia e tendo cascalho fino por baixo, foram mantidas sob gradiente de aproximadamente 40, em temperatura constante, ficando uma sem luz e as outras com luz ambiente. O tempo de circulação foi superior a 500 dias. O fluxo era de baixo para cima, saindo a água em drenos laterais aproximadamente na metade da espessura da areia.

Os resultados obtidos que merecem destaque são: primeiro, que houve uma diminuição de permeabilidade com passar do tempo expressa pelas fórmulas empíricas ($\log K_{20} = -0,45821 \log T - 5,25256$) para o conjunto 1, ($\log K_{20} = -0,58316 \log T - 0,04556$) para o conjunto 2, ($\log K_{20} = -0,52847 \log T - 5,13097$) para o conjunto 3; segundo, que apesar do alto gradiente, a areia situada acima do solo não apresenta material fino, com diâmetro inferior a 0,074 mm; terceiro, que houve migração e deposição de ferro acima do nível de drenagem.

1.8. CONCLUSÕES DO PRIMEIRO CAPÍTULO

O item sobre princípios básicos referente ao fluxo de água subterrânea vem auxiliar a memória para aspectos que deverão estar em mente na interpretação dos casos apresentados, nos levantamentos de campo e, também, nas experiências de laboratório.

O item que se refere ao fluxo de água numa barragem determina auxilia o entendimento sobre a função dos filtros de proteção, que é o objeto do presente estudo. Sobre esses filtros, verifica-se que a tecnologia de sua construção está baseada em princípios físico-mecânicos, enquanto as possíveis reações geoquímicas não são consideradas.

Os casos de obstrução do filtro, que ficaram claramente evidenciados, são o da Barragem do Rio Grande, também conhecida como Pedreira, por constatação direta (Infanti e Kanji, 23; Guerra, 15), e o da Barragem de Xavantes, por constatação indireta (Abrahão, 1). As descrições sobre o caso ocorrido com a Barragem de Kalé, na Guiné, não permitem uma conclusão sobre a obstrução ou não do filtro (Anagnosti, 2). Xu, Guo e Chen (59) constataram obstrução parcial dos drenos e contaminação dos filtros, mas relatam que o funcionamento das barragens não foi afetado. Os outros problemas geoquímicos não permitem uma conclusão sobre a obstrução do filtro.

Os estudos de Xu, Guo e Chen (59) mostram: primeiro, o enriquecimento da água em ferro, durante o percurso pelo maciço de terra da barragem; segundo, o ambiente de relativa redução abaixo do lençol freático; terceiro, a alteração de algumas propriedades do solo em função da redução e conseqüente solubilização do ferro.

Sobre o trabalho de Ferreira (10) cabe comentários, primeiro, sobre a variação da permeabilidade, segundo, sobre a não contaminação da areia, terceiro, sobre a deposição de ferro.

A permeabilidade medida parece ser basicamente a do solo e não a da areia, pois a maior parte da perda de carga estaria ocorrendo na camada de solo, onde o coeficiente de permeabilidade inicial era de $9,3 \times 10^{-6}$ cm/s contra $3,6$ a $3,9 \times 10^{-2}$ cm/s da areia. O mesmo solo, após o ensaio, revelou valores de k de $1,6 \times 10^{-5}$ cm/s, $3,0 \times 10^{-5}$ cm/s e $3,0 \times 10^{-5}$ cm/s, mostrando, portanto, uma diminuição de permeabilidade, variação esta atribuída à lixiviação. É possível que algas, bactérias ou fungos tenham formado uma camada com tendência impermeabilizante no contato inferior do solo, correspondente à superfície de entrada da água. A favor desta hipótese é mencionada a existência de um gel perfeitamente transparente, em suspensão, na água coletada do conjunto 1 e acumulada para análise química, nos primeiros 100 dias de ensaio.

É importante salientar a não contaminação da areia sobre a camada de solo (argiloso) para evidenciar a resistência desse solo à mobilização de seus grãos ou à erosão interna, apesar do alto gradiente. A deposição do ferro ocorreu na zona de aeração, para onde poderia ter migrado por ascensão capilar.

Em vista destas considerações estabelece-se, como objetivo principal, a explicação do processo geoquímico de cimentação do filtro de barragem e, como objetivo intermediário e necessário, o desenvolvimento de uma metodologia de estudo das reações químicas e físicas que podem ocorrer no filtro.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS DA GEOQUÍMICA E BIOGEOQUÍMICA DO FERRO

2.1. INTRODUÇÃO

Ficou claro no primeiro capítulo a necessidade de um estudo geoquímico dos processos que podem levar à obstrução do filtro de uma barragem.

O ferro é um dos elementos mais comuns com uma abundância média na crosta de 5,6%, segundo Taylor (in Krauskopf, 26), só inferior ao oxigênio, silício e alumínio, advindo daí, em grande parte, a sua importância para os processos geoquímicos comuns, pois é difícil encontrar um meio, especialmente quando ocupa uma grande área, que não possua ferro. O meio ambiente de uma barragem não faz exceção. Dentre os solos, os de clima tropical e subtropical são os mais ricos em ferro. A simples abundância não ofereceria nenhum problema se esse elemento fosse totalmente inerte nas condições reinantes num reservatório e barragem, mas isto não acontece.

O objetivo desse capítulo é demonstrar que a precipitação de hidróxido férrico pode ocorrer no filtro de uma barragem sob determinadas condições físico-químicas e biológicas.

Para tanto, serão lembradas algumas teorias químicas, especialmente sobre as reações que controlam a solubilização e deposição do ferro, acompanhadas de um estudo geoquímico desse elemento em ambientes superficiais, mormente na água. "A geoquímica do ferro é, em grande parte, comandada pelas relações de oxidação e redução. Com efeito, a forma reduzida permite a mobilização, enquanto a forma oxidada, salvo em condições de pH muito ácido, é sinônimo de bloqueamento e precipitação" (Goñi et alii, 12). Como o reservatório de uma barragem é um lago artificial, buscar-se-ão conhecimentos de limnologia visando o entendimento da geoquímica nesses ambientes. Sendo ainda o ferro um elemento capaz de entrar no metabolismo de plantas ou animais, ou de sofrer as consequências das funções vitais, serão tecidas considerações so

bre a biogeoquímica aplicada ao ferro.

Esses conhecimentos, quando combinados, poderão explicar o mecanismo de solubilização do ferro contido no solo e a precipitação desse elemento nos poros do filtro de uma barragem.

2.2. OXIDAÇÃO-REDUÇÃO E EQUAÇÃO DE NERNST

A partir das reações de oxi-redução pode-se estabelecer uma série contendo os elementos metálicos e sua capacidade de reduzir íons de outros metais. Essa série é chamada de eletromotriz porque a tendência que um metal tem de reduzir os íons de outro pode ser medida pela força eletromotriz desenvolvida por uma pilha elétrica.

O valor E^0 para cada semi-reação é seu potencial em volts referido à semi-reação $H_2 = H^+$, à qual é atribuído, arbitrariamente, o valor zero. Os valores são dados a $25^{\circ}C$ e 1 atm de pressão, com todas as substâncias a uma atividade unitária. Algumas das semi-reações em que toma parte o ferro apresentam os seguintes potenciais (Krauskopf, 26).

O potencial de oxidação está relacionado à energia livre pela fórmula

$$\Delta F = nFE$$

sendo E = potencial de eletrodo ou diferença de potencial ou potencial de oxi-redução; n = número de eletrons que migram de um átomo para outro; f = constante de Faraday; ΔF = variação de energia livre, conceito este retirado da Termodinâmica e que expressa a capacidade de as substâncias reagirem e a intensidade com que essas reações têm lugar. A constante de Faraday é um número tal que multiplicando-o pela voltagem, dá a energia. A forma mais correta para esta constante é 96.500 coulombs, sendo a energia expressa em volts-coulombs ou joules. A energia pode ser expressa em calorias e o valor de f , é então, 23.066 cal/volt.

A variação de energia livre, por sua vez está relacionada à constante de equilíbrio pela equação

$$\Delta F = - RT \ln K_a + RT \ln \frac{[Y]^Y [Z]^Z}{[B]^b [D]^d}$$

onde o quociente do último termo refere-se a uma equação química geral $bB + dD + \dots = yY + zZ + \dots$ em que B, D, Y, Z, são fórmulas químicas e b, d, y, z são coeficientes; os colchetes indicam atividades e K_a é a constante de equilíbrio expressa em atividades.

No caso especial em que todas as substâncias estejam presentes a uma atividade unitária: 1 molar para substâncias em solução; 1 atmosfera de pressão para os gases; os sólidos e líquidos considerados como compostos puros, a equação toma uma forma mais simples. O quociente é então 1 e seu logaritmo é zero, de forma que

$$\Delta F^0 = - R T \ln K_a$$

sendo ΔF^0 a variação da energia livre padrão da solução.

Combinando-se as equações anteriores obtém-se a equação de Nernst:

$$E = \frac{\Delta F^0}{nf} + \frac{RT}{nf} \ln \frac{[Y]^Y [Z]^Z}{[B]^b [D]^d}$$

$$E = E^0 + \frac{2,303 RT}{nf} \log \frac{[Y]^Y [Z]^Z}{[B]^b [D]^d}$$

Para reações a 25°C, a combinação das constantes antes do logaritmo é igual a 0,059/n de forma que

$$E = E^0 + \frac{0,059}{n} \log \frac{[Y]^Y [Z]^Z}{[B]^b [D]^d}$$

Nas reações de oxidação do Fe^{++} para Fe^{+++} a 25°C esta equação fica sendo

$$E = E^0 + 0,059 \log \frac{[Fe^{+++}]}{[Fe^{++}]} \quad E^0 = + 0,77 \text{ V}$$

$$E = 0,77 + 0,059 \log \frac{[Fe^{+++}]}{[Fe^{++}]}$$

Os potenciais de oxi-redução de ambientes são representados pelo símbolo Eh (26).

Através desta equação entende-se facilmente que em pH baixo, onde o Fe^{+++} é solúvel, se a concentração de Fe^{+++} e Fe^{++} forem iguais o potencial de oxi-redução, Eh, será 0,77; se o primeiro estiver em maior proporção esse potencial será maior. Em pH neutro ou próximo desse, o Fe^{+++} precipita e, portanto, saindo do sistema de solução, ocasionando uma concentração de Fe^{++} sempre maior, tornando o último termo da equação negativo e o Eh inferior a 0,77. Por outro lado, entende-se, também, porque em meios com pH neutro e Eh superior a 0,77 praticamente não se encontra ferro em solução.

2.3. DIAGRAMA DE pH-Eh PARA O FERRO

Como a solubilidade do ferro em água está condicionada ao pH e as concentrações relativas do Fe^{+++} e Fe^{++} ao Eh, pode-se ter uma noção dessa situação no diagrama da Figura 2.1.

Figura 2.1. Diagrama Eh-pH para íons simples e hidróxidos de ferro a 25°C (Krauskopf, 26)

Convém situar nesse diagrama os limites de pH e Eh na natureza. O pH varia de 4,0 a 9,0 e o Eh de (1,22 - 0,059 pH) a (- 0,059 pH). Estes limites formam um paralelogramo num diagrama Eh - pH, conforme pode-se ver na Figura 2.1 em **negrito**. Esta figura mostra o método de diagramar algumas das reações de oxidação de ferro.

Considerando o par

sendo e = eletrón, verifica-se que esta equação é independente do pH, desde que nem o H^{+} nem o OH^{-} aparecem na equação, de modo que seu potencial pode ser representado como uma linha horizontal (A). Num ambiente em que Eh-ph estejam acima da linha, a relação $(\text{Fe}^{+++})/(\text{Fe}^{++})$ é maior que 1 e, noutro com Eh-ph abaixo da linha, menor que 1. A linha não pode ser muito prolongada no diagrama porque o $\text{Fe}(\text{OH})_3$ precipita quando o pH atinge valores próximos de 3. Para valores de pH maiores do que 3, a reação de eletrodo simples pode ser substituída por

Aqui a relação entre Eh e pH é dada por

$$\text{Eh} = E^{\circ} + 0,059 \log \frac{[\text{H}^{+}]^3}{[\text{Fe}^{++}]}$$

e as linhas B e C são calculadas pela equação

$$\text{Eh} = 1,06 \text{ pH para concentrações de } \text{Fe}^{++} \text{ de } 1\text{M}$$

$$\text{Eh} = 1,47 \text{ pH para concentrações de } \text{Fe}^{++} \text{ de } 10^{-7}\text{M}$$

Em soluções básicas a principal semi-reação é

$$\text{Eh} = - 0,56 + 0,059 \log \frac{1}{[\text{OH}^{-}]}$$

$$\text{Eh} = + 0,27 - 0,059 \text{ pH}$$

Esta última equação é a da linha D. Deve-se observar, no entanto, que a mesma será quase toda fora dos limites para ambientes naturais só sendo aplicável nos casos de altas concentrações de íons ferrosos.

Esse diagrama mostra o que já foi visto no ítem anterior analiticamente. Pode-se ver, portanto, que em pH próximo ao neu

tro, como ocorre na maior parte das águas naturais de rios ou barragens, só poderá existir ferro em solução em quantidades apreciáveis se o Eh for baixo, caso contrário, forma-se $\text{Fe}(\text{OH})_3$ que precipita e sai do sistema.

2.4. FERRO NAS ÁGUAS NATURAIS

Compostos presentes

As águas naturais podem conter ferro na forma de bicarbonato ferroso, $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$, fluoreto férrico, FeF_3 , hidróxido férrico, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, fosfato férrico, além de cloreto ferroso, FeCl_2 , carbonato ferroso, FeCO_3 , e sulfato ferroso, FeSO_4 . Os dois primeiros são incompletamente dissociados; o hidróxido férrico permanece na água como coloidal; o carbonato ferroso e o sulfato ferroso são instáveis na presença de oxigênio dissolvido, sendo prontamente convertidos em compostos férricos. A forma mais abundante, especialmente nas águas de fontes, é a de bicarbonato ferroso, aparecendo as outras em proporções bem menores, merecendo certo destaque, entretanto o hidróxido férrico. As águas de pântanos podem ser ricas em ferro, graças aos compostos húmicos estáveis desse elemento (Rankama e Sahama, 39).

Origem do ferro ferroso nas águas

Ferro férrico pode ser solubilizado após a redução ao estado ferroso. H_2S , produzido durante a decomposição de compostos orgânicos contendo enxofre, é um dos mais importantes redutores encontrados na natureza e está, muitas vezes, em pequenas quantidades em soluções de intemperismo. Em adição, soluções orgânicas contendo compostos húmicos também reduzem o ferro férrico a compostos solúveis. Complexos húmicos de ferro formam soluções coloidais que são estáveis e conseqüentemente tornam o ferro apto a migrar nesta forma (39).

Para Hem e Cropper (20) "a água abaixo da superfície da terra e sem contato com o ar provavelmente tem um valor de Eh de 0,20 volts ou menos e um pH relativamente baixo (menor que 6) se suficiente excesso de dióxido de carbono estiver presente. Sob estas condições, soluções ferrosas tão altas em ferro como 50ppm são permanentemente estáveis.

Se esta água surge numa fonte e se água com baixo Eh é fornecida com suficiente rapidez, o nível de concentração de íon ferroso permanecerá alto, mesmo que o Eh na superfície possa ser considerado acima do que os cálculos de equilíbrio indicam ser compatível com a presença de íon ferroso dissolvido".

Deposição de compostos de ferro

Quando o bicarbonato ferroso se oxida em contato com o oxigênio dissolvido, ocorre a seguinte reação com a consequente deposição de hidróxido férrico.

Relacionando os pesos moleculares, vê-se que

$$4 \times 177,886 + 2 \times 18,016 + 32,00 = 4 \times 106,874 + 8 \times 44,01.$$

Note-se que esta reação requer somente uma molécula de oxigênio para cada 4 moléculas de hidróxido férrico produzido, ou 1g de O_2 oxida 22,24g de $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$ produzindo 13,36g de $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Por isso, pequenas quantidades de ar podem provocar a precipitação de hidróxido férrico em amostras de águas naturais coletadas em garrafas (Hem, 19).

Há também precipitação de ferro como sulfeto em águas estagnadas na presença de sulfeto de hidrogênio. Por outro lado, sulfetos ferrosos podem também ser oxidados (39).

Complexos e colóides de ferro

Foi visto, nos itens anteriores, que o estado de oxidação que permite a solubilização e mobilização do ferro é o reduzido, com valência 2. Verifica-se, entretanto, que mesmo com valência 3, como hidróxido ou outros compostos, é possível manter-se o ferro em solução ou ao menos em suspensão por longo tempo, graças à formação de complexos e colóides.

A importância dos complexos inorgânicos de ferro ainda não é inteiramente explorada, mas complexos com substâncias orgânicas são importantes (19). Íons com cargas opostas ou íons e moléculas polares interagem muitas vezes um com outro muito fortemente. E esta forte interação é tratada como uma espécie dissol

vida independente com sua própria atividade e coeficiente de atividade (Berner, 3).

Há algumas regras gerais de Berner (3) para a complexação de íons nas soluções:

- 1) Quanto maior a carga de um íon, mais facilmente ele forma um forte (e abundante) complexo;
- 2) Quanto maior a concentração de uma espécie complexante, maior o grau de complexação;
- 3) Nenhuma apreciável associação de íons é encontrada entre Cl^- e cations alcalinos e alcalino-terrosos nas temperaturas sedimentares;
- 4) Íons trivalentes (e de valências maiores) são invariavelmente associados com OH^- (ou O^{--}) em pH neutro, isto é, eles reagem com a água;
- 5) Moléculas orgânicas neutras muitas vezes formam complexos fortes com íons metálicos de transição.

O ferro pode também estar contido em colóides.

Colóide é uma suspensão de qualquer material finamente granulado (26). A eficiência do sol como transportador do metal dependerá de sua estabilidade, pois é óbvio que um colóide que flocule facilmente não serviria para este fim. Por exemplo, o ferro, no estado férrico, forma um hidróxido muito insolúvel que freqüentemente permanece disperso sob a forma de um sol estável de $\text{Fe}(\text{OH})_3$. A quantidade deste sol nas correntes fluviais é maior do que no mar, uma observação que sugere (embora não prove) que o sol é floculado ao entrar em contato com os eletrólitos do mar.

Alguns colóides são suficientemente estáveis para permanecer indefinidamente em suspensão. Geralmente são precipitados por eletrólitos e alguns destes são melhores precipitantes do que outros. Esta regra, porém, está cercada de dificuldades. Assim mesmo, a regra que nos diz que os colóides são precipitados por eletrólitos é suficientemente válida para podermos afirmar que as partículas permanecem suspensas por mais tempo em água fresca do que em água do mar, e que a extraordinária limpidez da água, em muitos lagos cristalinos, é devida à rápida floculação dos materiais em suspensão despejados nesses lagos (26).

Uma observação curiosa sobre a estabilidade dos colóides é o fato de um certo colóide poder ser muito estável em presença de outro, mais do que quando sozinho. Este outro é chamado

colóide protetor. Em geral os colóides protetores são hidrófilos. Geologicamente, os colóides protetores têm particular importância no estudo das águas superficiais que contêm muita matéria orgânica, pois os colóides orgânicos hidrófilos agem como protetores de materiais inorgânicos tais como hidróxidos de ferro e hidróxidos de manganês, tornando-os mais estáveis e, conseqüentemente, mais facilmente transportáveis (26).

Melfi (33) concluiu que "os constituintes amorfos fêrricos ou ferrissilícicos encontrados em sedimentos ou solos, são instáveis e devem ser considerados transitórios no meio natural" e que "a priori, as condições operatórias utilizadas em suas experiências deveriam facilitar a formação de ligações Si - O - Fe, que favoreceria o transporte do ferro complexado pela sílica. Entretanto, exceto a reação de adsorção ocorrida na superfície do gel, nenhuma outra houve entre o hidróxido de ferro e a sílica, eliminando-se, portanto, a hipótese de a mobilidade do ferro no meio natural, encontrar-se ligada à formação de complexos ferrissilícicos pseudo-solúveis".

As partículas de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ permanecem em suspensão por muito tempo, dias e até meses, podendo ser removidas por sedimentação, por centrifugação e por filtração (20). O tamanho dessas partículas deve ficar entre 0,5 e 4 μ . Hem e Cropper (20) removeram o hidróxido fêrrico suspenso de amostras naturais e preparadas com um filtro molecular (Millipor Type HA) o qual é capaz de reter partículas de até 0,5 micron de diâmetro, enquanto que com outro filtro incapaz de reter partículas menores que 4 μ não obtiveram o mesmo resultado.

Pode-se admitir, portanto, que é praticamente impossível o transporte de ferro até o filtro de uma barragem por meio de colóide passando por um maciço de argila, não se pode dizer o mesmo com relação ao complexo de ferro.

Concentrações esperadas

O ferro está normalmente presente em água inteiramente aerada, de pH normal, em quantidades menores que 0,5 ppm e muitas vezes menores que 0,1 ppm, provavelmente na forma fêrrica. Em águas ácidas possuidoras de um pH inferior a 3,0, o ferro ferroso pode estar presente em quantidades que excedam 100 ppm, mas tais águas só são encontradas em algumas fontes termais e em

águas de superfície fortemente afetadas por despejos de esgotos contendo ácidos e ferro (19).

Sziksai (49), em levantamento das condições geoquímicas dos principais rios da Bacia do Paraná, apresenta uma tabela da composição química média dos solutos nas águas desses rios a qual é transcrita na Tabela 2.1.

TABELA 2.1. COMPOSIÇÃO MÉDIA DOS SOLUTOS NAS ÁGUAS DOS RIOS DA BACIA DO PARANÁ (BP) E DA AMÉRICA DO SUL (AS) (SZIKSAI, 49).

	Na	K	Ca	Mg	Si	Fe	Al	Cl	CO ₃	SO ₄	NO ₃	Total
B.P.	2,0	1,4	3,4	1,9	7,2	0,72	0,86	2,1	18,4	7,4	1,25	46,43
A.S.	4,4	2,0	7,2	1,5	5,5	1,4	-	4,9	15,1	4,8	0,7	47,1

teores em mg/l

Estas águas podem ser classificadas como carbonáticas, o que, aliás, é mais comum em climas tropicais e subtropicais, devido à abundância de água de precipitação rica em ácido carbônico (49).

Ferro ferroso pode ocorrer na água subterrânea sujeita a ambientes redutores. Raramente concentrações acima de 50mg/l podem ocorrer em águas com um pH de 5 a 8. Concentrações acima de 10 mg/l são comuns (19).

O ferro, nas amostras de água subterrâneas, geralmente não está em equilíbrio. A precipitação do hidróxido férrico não alcança o nível previsto pelo produto de solubilidade, e a reação entre o íon ferroso e o oxigênio não dispõe de tempo suficiente para estabelecer concentrações entre os íons férrico e ferroso (20).

Hem e Cropper (20), analisando uma fonte, verificaram que as condições de pH e Eh, combinadas com a solubilidade, não justificavam o teor de ferro encontrado. Concluíram, então, que nestas condições o ferro ferroso era instável. No aquífero devia ser estável enquanto que na fonte, devido ao suprimento rápido, conseguia manter-se em solução. O pH medido correspondia ao real devido ao efeito tampão do HCO₃⁻. Portanto o Eh medido não corresponderia às condições do equilíbrio do aquífero. Aplicaram, por isso, um método para estimar o Eh das condições

subterrâneas, a partir do pH medido e do teor de ferro, usando o ábaco da Figura 2.2 que relaciona a atividade total do ferro com o pH e Eh, ou calculando o valor do Eh a partir da equação de Nernst.

Figura 2.2. Atividade total do ferro em relação ao pH e Eh.
(Hem e Cropper, 20).

Admite-se, para computar Eh desta maneira, que: 1) existe um equilíbrio químico no aquífero; 2) o aquífero contém um excesso de ferro na fase sólida disponível para a solução; 3) a complexação por matéria orgânica ou outros materiais é ausente

ou desprezível; 4) o pH é mantido por um sistema tampão e a amostra representa o conteúdo de ferro em solução no aquífero. Deve-se considerar, ainda, que a água subterrânea não confinada pode diminuir seu Eh com a profundidade abaixo do topo da zona de saturação, especialmente se o nível de água flutua. Assim uma amostra pode não representar as condições do aquífero inteiro (20). As atividades do ferro dissolvido são, no entanto, menores que as concentrações reais.

Foram vistas até aqui as condições químicas de solubilização e precipitação do ferro, bem como as formas pelas quais pode ocorrer nas águas naturais, suas concentrações ambientais. Resta ver se as condições reinantes numa barragem são favoráveis à solubilização do ferro, transporte através do núcleo e posterior precipitação no filtro.

2.5. CONSIDERAÇÕES SOBRE O AMBIENTE LACUSTRE

Estratificação salina e térmica

O reservatório de uma barragem é um lago artificial e, por isso, convém fazer um estudo sobre as condições geoquímicas em ambientes lacustres.

Dentre as noções difundidas em geologia está a de ambiente euxínico, responsável pela origem do petróleo. Nesses ambientes, há uma estratificação da água devida especialmente às diferenças de salinidade. Em conseqüência, forma-se ambiente redutor nas camadas inferiores (Leinz e Amaral, 32; Gorshkov e Yakushova, 13; Holmes, 21; Landes, 31). Esta é uma estratificação salina. Em águas doces desenvolve-se, também, uma estratificação das águas com conseqüente ambiente redutor no fundo.

Em todos os lagos de suficiente profundidade, a água tende a se dividir em uma região superior de temperatura mais ou menos uniforme, com circulação e certa turbulência, denominada epilímnio, e outra região profunda, fria e relativamente não perturbada denominada hipolímnio. Estas definições são atribuídas a Birge (1910) (in 23). A região de rápida queda na temperatura separando o epilímnio do hipolímnio foi denominada de "sprungschicht" por Richter em 1892, de "Thermocline" por Birge em 1897 e de camada de descontinuidade por Wedderburn em 1907. Termoclínio é o

termo mais usado atualmente e deve ser redefinido como o plano de máxima taxa de decréscimo de temperatura (Hutchinson, 23).

A circulação da água nos lagos é devida ao vento. Uma vez estratificada termicamente, a água do epilímnio resiste a ser empurrada para dentro do hipolímnio pois este possui uma densidade maior em função da temperatura mais baixa.

Com relação aos modelos de estratificação há dois tipos de lagos, os dimícticos e os monomícticos. Os primeiros ocorrem nas regiões temperadas, onde a temperatura cai abaixo de 4°C e durante o outono, o epilímnio é resfriado até atingir a temperatura do hipolímnio. Nestas ocasiões o lago inteiro entra em circulação, chegando a água proveniente da superfície até as profundidades. Este fenômeno de circulação total é destacado por Twenhofel (53), Krumbein e Sloss (27) e Bradley (5) para explicar o regime químico do hipolímnio. Durante o inverno ocorre uma estratificação inversa ficando a água mais fria e abaixo de 4°C no epilímnio. Durante a primavera ocorre outra circulação devido ao aquecimento da superfície (5).

Nas regiões sub-tropicais, onde a temperatura da água não cai abaixo de 4°C , há geralmente apenas uma circulação durante o inverno, quando então a temperatura do epilímnio se iguala à do hipolímnio e por isso são chamados de monomícticos. Em invernos menos rigorosos o resfriamento da superfície pode não ser suficiente para causar uma circulação até o fundo do lago (22). A estratificação termal é aí mais durável e mais estável que nos lagos temperados, porque a água superficial aquecida é muito menos densa que aquela do hipolímnio, embora a diferença de temperatura não seja grande. Acontece que na faixa dos 20°C a diminuição da densidade com o aumento de temperatura é mais acentuada que em faixas mais baixas (5).

Nas regiões equatoriais, onde não existem estações de temperaturas definidas, os lagos tornam-se estratificados, mas podem ter sua água revolvida toda a vez que a temperatura permanecer uns poucos graus abaixo do normal, por vários dias (5).

As Figuras 2.3 e 2.4 mostram perfis de lagos brasileiros extraídos de Kleerekoper (24).

Condições geoquímicas

As condições no epilímnio dos lagos temperados e tropicais são favoráveis ao máximo desenvolvimento da vida e da oxidação.

Figura 2.3. Termoclínio no açude Bodocongô, Campina Grande, Paraíba, em 12/4/1943, segundo dados de Stillman Wrigt (Kleerekoper, 24).

Figura 2.4. Termoclínio na represa de Santa Amaro, São Paulo, na estação G, em 01/12/1937 (Kleerekoper, 24).

Há abundância de oxigênio para os animais e dióxido de carbono adequado para as plantas. O hipolímnio de pequenos lagos comumente tem água com maior teor de dióxido de carbono, menor teor de oxigênio e pH mais baixo que o epilímnio. Estas condições fa

vorecem a redução pela matéria orgânica, a solução dos carbonatos e a escassez de vida (53).

No hipolímnio, a respiração dos organismos e a ^adegradação da matéria orgânica usam o oxigênio dissolvido e aumentam a quantidade de dióxido de carbono dissolvido. Sendo consumido todo o oxigênio a água torna-se progressivamente mais carregada com sulfeto de hidrogênio (5).

O teor de oxigênio dissolvido, em função dos eventos físicos nos lagos estratificados, tem dois tipos de distribuição vertical: uma chamada de *orthograde* por Aberg e Rohde em 1942 (in 22) se for praticamente uniforme no hipolímnio, embora não o seja no epilímnio; e outra de *clinograde* (22) se os teores diminuírem no hipolímnio chegando a zero junto ao fundo. Exemplos de curvas dos tipos *orthograde* e *clinograde* são dados nas Figuras 2.5 e 2.6 respectivamente. O Lago Crystal é improdutivo e transparente, ocorrendo alguma fotossíntese no fundo. O Akagi Onoko possui curvas típicas de lagos dimícticos moderada e altamente produtivos com curvas *clinograde* de oxigênio (22).

Figura 2.5. Curvas indicando uma distribuição extremamente *orthograde*. θ = temperatura; $[O_2]$ = oxigênio observado; $[O_2]_s$ = saturação. (Hutchinson, 22).

Figura 2.6. Distribuições da temperatura, θ , oxigênio observado, O_2 , e teor de saturação em oxigênio, $[O_2]_s$ em lagos de 15 a 20 m de profundidade, no máximo de estratificação do verão. (Juday e Birge, Yoshimura, in 22).

Para os lagos mais rasos as curvas *clinograde* são mais características do que as *orthograde*.

Não há dúvida de que o déficit de oxigênio no hipolímnio é devido à oxidação da matéria orgânica que entra no lago em suspensão ou em solução. O oxigênio dissolvido pode diminuir no hipolímnio ou por consumo na interface lama-água ou por consumo na água livre. Seguindo o esquema de Thienemann (in 22) os agentes de desoxigenação podem ser classificados como: 1) respiração animal; 2) respiração das plantas à noite ou quando o organismo respirante foi sedimentado abaixo do ponto de compensação e está usando as reservas ou é heterotrófico; 3) respiração das bactérias na decomposição da matéria orgânica sedimentar; 4) oxidação puramente química da matéria orgânica em solução, seja produzida ali, seja a trazida para o lago.

O consumo de oxigênio na interface lama-água foi constatado por vários pesquisadores. Alsterberg em 1922 (in 22) verificou a formação de uma microzona com perda de oxigênio sobre a lama de lagos. Lönnerblad, em 1930 (in 22), verificou que sobre a lama de lagos produtivos mas transparentes o consumo de oxigênio poderia ser abolido colocando-se bactericida na lama e, noutro experimento com sedimentos turfosos de lagos húmicos marrons, determinou um consumo de oxigênio puramente químico.

A formação dessa microzona pela respiração microbiana foi também considerada por Grote em 1934 (in 22), que calculou a profundidade, na qual o oxigênio desaparece inteiramente. Admitindo uma taxa muito razoável de 400 cm^3 de O_2/cm^3 .dia para taxa de respiração das bactérias por unidade de volume na lama e um valor de 1/125 ou 0,8 para volume das bactérias por unidade de

volume na lama, a concentração de oxigênio será reduzida de 11,5 mg/l na superfície da lama para zero em 2 cm de profundidade.

Para manter este estado contínuo 9,2 mg de $O_2/cm^2.dia$ de vem passar da água para a lama. Enquanto o lago estiver em plena circulação isto é possível, mas tão logo a água se torne relativamente estagnada, formar-se-á uma microzona de desoxigenação (22). Esta microzona influencia o resto do hipolímnio.

Com relação ao CO_2 formado, pode-se dizer que a água do hipolímnio de um lago, com uma marcada curva *clinograde* de oxigênio, usualmente mostra um considerável aumento de CO_2 livre e de bicarbonato que pode ser demonstrado pela presença de $(NH_4)CO_3$. Usualmente, uma considerável quantidade de bicarbonato adicional, devido a bases não voláteis, tem também se acumulado.

Uma curva *clinograde* de oxigênio não implica por si mesmo numa curva *clinograde* do Eh. Em poucos casos uma curva Eh relativamente "orthograde" coexiste com uma curva marcadamente "clinograde" de oxigênio. Na maioria dos pequenos lagos com curvas de oxigênio *clinograde* e marcados déficits de oxigênio no hipolímnio, as curvas de Eh são marcadamente *clinograde* como demonstrou Kusnetzow em 1935 (22).

O potencial redox de sedimentos lacustres geralmente está em torno de 0,0 volt e, portanto, com exceção de casos especiais, possui propriedades redutoras. Alguns valores medidos por Kusnetzow, em lagos próximos a Moscou, dão valores de Eh = -0,122 até Eh = + 0,058 (22). Outros valores para lagos de Wisconsin variam de Eh = - 0,140 até Eh = + 0,200. Mas em vista da natureza complexa das mudanças verticais próximo à superfície da lama, estas variações tem pouco significado. Mortimer (in 22) instalou duas estações para medidas ao longo do tempo tendo constatado em ambas que a várias profundidades abaixo de 4 cm da interface lama-água o Eh permanece em valores cerca de 0,0 Volt.

O ferro é praticamente insolúvel na forma iônica nos valores normais de pH e potencial redox encontrados nas águas do epilímnio dos lagos.

Somente uma pequena parte do ferro é disponível para os organismos fitoplanctônicos. Nas águas húmicas há, muitas vezes, um enriquecimento considerável do ferro e a coprecipitação do hidróxido férrico e matéria orgânica pode ocorrer se a razão do ferro para o material húmico chegar a um valor crítico (22).

A distribuição vertical do ferro reflete a distribuição ver

tical do potencial redox. Quando a curva do oxigênio é *orthogra* *de* não existe grande enriquecimento no ferro, mesmo da água mais profunda. Sempre que uma microzona de déficit de oxigênio for bem desenvolvida e a superfície da lama estiver no estado *redu* zido, o ferro ferroso tende a se difundir para a água livre. Se as camadas mais baixas estiverem ainda recebendo alguma *quanti* dade apreciável de oxigênio, o hidróxido férrico pode se formar e permanecer por algum tempo nas águas profundas. Quando as águas inferiores forem essencialmente livres de oxigênio, *considera* *veis* quantidades de ferro ferroso usualmente se acumulam nas águas profundas do hipolímnio. Em alguns lagos, como o Esthwaite Water, os valores de potencial redox, de pH e conteúdos de *fer* ro ferroso são concordantes no hipolímnio.

2.6. BIOGEOQUÍMICA APLICADA AO FERRO

Generalidades

Os seres vivos que participam de processos biogeoquímicos de importância são as bactérias, fungos, algas e protozoários.

As pesquisas em biogeoquímica geralmente têm se dirigido para o aproveitamento de minerais de baixo teor, tanto no *exte* rior (Kusnetzow, 28; Goñi, 11), como no Brasil (Vaisbich; Pinto; Borzani, 54), onde está se estudando o processo de *biolixivia* *ção*.

Muitos desses estudos e conclusões partem de meios de *cul* tura altamente favoráveis ao desenvolvimento de microorganismos. Messineva (35) observou uma grande discrepância entre o *número* e taxa de desenvolvimento das bactérias nas culturas e nos *meios* naturais. Nestes, as células se dividem uma vez cada duas *sema* nas. A morte das bactérias tem a mesma taxa que sua *multipl* *cação*, pois a biomassa permanece a mesma.

Tomando-se um grupo de parâmetros selecionados, verifica-se que os micróbios crescem dentro de certos níveis máximo e *míni* mo. A faixa sobre a qual ocorre o crescimento, forma o contínuo biológico (Zajic, 60). Esses níveis são: -20°C e 104°C de *tempe* ratura; -450 mV e $+850\text{ mV}$ para o Eh; 1 a 10,1 para o pH; $70\text{ }\mu\text{g}$ de matéria orgânica por litro de água (água destilada) e $4,1\text{ M}$ de Mg SO_4 (quase 50% de sal para a salinidade); 0,1 e 1000 atm de pressão; existência de água. A dependência da água pelos *mi*

cróbios neste planeta deve estar diretamente ligada à sua abun
dância (60).

As bactérias que aparecem na água subterrânea a milhares de metros de profundidade podem ter a mesma idade que os sedi
mentos ou provir de infiltração a partir da superfície atual. Quase todas as águas subterrâneas na biosfera sofreram uma alte
ração singenética em sua composição química, em algum grau e a vários estádios em sua história geológica. O fator essencial mas
inadequadamente estudado é a transformação biogênica, isto é, mu
danças na composição iônica e gasosa através da atividade dos microorganismos (Gurevich, 16).

É forçoso constatar que as tentativas de explicação por via puramente química, de processos onde intervêm o ferro e o manganês na biosfera, são pouco convincentes. Assim observa-se os ciclos desses elementos sob um prisma biótico. Foi o que fi
zeram C.G.Ehrenberg, M.S.Vinogradsky, G. Bertrand, respective
mente em 1836, 1883 e 1905 (in 12).

Processos

Os processos pelos quais os microorganismos modificam os minerais foram resumidos por Silverman e Ehrlich (48) em enzimicos e não enzimicos.

Dentre os processos enzimicos há as reações redox repre
sentadas por transformações minerais em grande escala causadas por oxidações ou reduções enzimicas diretas. Processos autotrô
ficos quimiossintéticos oxidam os minerais para obter tanto a energia como o poder de redução requerido para a assimilação do CO_2 . Autotróficos fotossintéticos assimilam CO_2 com a ajuda da energia radiante da luz solar, sendo o poder necessário forneci
do pela oxidação dos minerais. A redução de minerais por certos heterotróficos fornece o poder de oxidação requerido para a oxi
dação anaeróbica de nutriente orgânico e a produção de energia usual. Por causa da magnitude das exigências relativas à energia e poder de redução ou oxidação desses organismos, grande quanti
dade de minerais precisa ser transformada (60). (11)

A digestão de complexos metálicos, outro processo enzími
co, atinge alguns íons inorgânicos em solução aquosa, particu
larmente íons de ferro, cobre, manganês, zinco, cálcio e magnê
sio que formam quelatos ou complexos com certos compostos quími

cos orgânicos e outros (60). Muitas bactérias heterotróficas e fungos são capazes de usar um ou outro dos agentes complexantes orgânicos como carbono, nitrogênio, ou outra fonte de energia, e com isso libertam o íon inorgânico complexado. Os íons liberados precipitam como hidróxidos insolúveis, óxidos ou sais, devido a reações espontâneas como a água ou outras substâncias dissolvidas, a um pH e Eh apropriado (60).

Agentes complexantes podem também auxiliar a dissolver substâncias inorgânicas parcialmente solúveis, complexando um ou mais produtos da dissociação, mudando assim o equilíbrio químico em favor da solução. Agentes complexantes formados por microbios podem, assim, levar à solubilização de minerais (60).

Dentre os processos não enzimáticos há a função dos produtos metabólicos. Transformações minerais podem ser efetuadas pela interação com os produtos finais do metabolismo. Microorganismos heterotróficos podem formar ácidos inorgânicos, tais como H_2S , H_2CO_3 , HNO_3 , ou H_2SO_4 , ácidos orgânicos, amônia, bases, orgânicas e íons inorgânicos, como sulfeto, sulfato, carbonato, fosfato e fosfito. Todas estas substâncias podem reagir não biologicamente com a matéria inorgânica dissolvida ou sólida. Os ácidos inorgânicos e orgânicos podem dissolver minerais insolúveis, tais como, calcário, gipsita, anidrita, silicatos e outros (60).

Adsorção na superfície das células é outro mecanismo não enzimático envolvendo microorganismos e pode reagir extensivamente com o ambiente mineral. Consiste na adsorção da matéria mineral à superfície da célula. Esta é considerada uma importante função das bactérias embainhadas (clamidobactérias) e certos flagelados. Supõe-se que a composição química destas células tenham uma afinidade singular para com o ferro e manganês, os quais se fixam à superfície da célula na forma de hidróxidos e de sais. De fato, as bainhas de algumas dessas bactérias foram descritas como consistindo de $Fe(OH)_3$ e óxidos inorgânicos. Sabe-se que os óxidos de ferro e manganês são bons adsorventes eles mesmos, óxidos de ferro para substâncias aniônicas e óxido de manganês para substâncias catiônicas, e que parte do processo de adsorção provavelmente não é atribuível à superfície da célula propriamente mas à precipitação inorgânica sobre ela. Entretanto, é interessante notar que são descritos organismos que acumulam ferro preferencialmente. Tem sido reivindicado, entretanto,

que a acumulação de ferro e manganês nas bainhas ou caules de algumas bactérias corresponde ao estabelecimento do produto final da oxidação enzimica do ferro e manganês, particularmente no caso da *Gallionella* (60).

Redução do ferro por ação de microorganismos

Para Silverman e Ehrlich (48) a redução enzimica do íon férrico para íon ferroso não tem sido inequivocamente demonstrada, embora evidências muito sugestivas de tais atividades tenham sido publicadas.

A redução do ferro foi observada em certo número de solos, favorecida pelo baixo pH e sendo mais comum onde há suficiente matéria orgânica (62). Kalakutskii (in 12) isolou uma cultura de pseudomonas de um solo gley-podzólico que produziu 10 a 15 g de Fe^{++} por litro, sob condições anaeróbicas.

Muitos pesquisadores observaram que óxidos de ferro e de manganês são usualmente destruídos pela redução microbiana para ferro ferroso e manganês manganoso (12). Organismos específicos que se têm mostrado ativos na redução do ferro e do manganês incluem membros do grupo *Bacillus macerans polymixa* e *Thiobacillus thiooxidans*. Outros organismos, no entanto, devem estar também envolvidos (12).

Através de uma ação indireta, ou não enzimática os microorganismos podem produzir um ambiente redutor pela formação de produtos finais metabólicos que podem agir como redutores do ferro e do manganês. Desta forma, as bactérias sulfato-redutoras tomam importância na biogeoquímica do ferro. As importantes são: *Desulfovibrio desulfuricans*, *Desulfovibrio aestuarii*, *Desulfovibrio rubentschikii*, *Desulfovibrio orientis*, *Clostridium nigrificans* (60).

Os sulfatos redutores utilizam sulfato como oxidante para numerosos substratos orgânicos, em adição ao hidrogênio. Os materiais orgânicos que proveem energia para a redução do sulfato não foram enumerados em detalhe. Ácidos orgânicos e carboidratos são utilizados rapidamente (60).

Para o desenvolvimento de bactérias redutoras é necessário um ambiente anaeróbico com hidrogênio e suprimento adequado de matéria orgânica. Normalmente estes micróbios toleram alta acidez, condições halofílicas, altas concentrações de sulfetos

e níveis tóxicos de metais. Quase todas as formas de matéria orgânica proporcionam o crescimento de um ou mais micróbios que caem neste grupo, por exemplo, celulose, lignina, despejos de esgoto, etc. Estes micróbios são bons limpadores dos produtos de despejos orgânicos de fontes naturais ou industriais (60).

O ambiente sulfato redutor deve ter um Eh de 600 a -400 mV. Os micróbios sulfato-redutores crescem sobre uma grande faixa de acidez e alcalinidade, embora as condições neutra ou levemente alcalina sejam preferidas (Bass-Becking et alii, in 60).

"O crescimento de redutores de sulfato nas águas de sub-superfície é favorecido pela baixa mineralização (Dostalek e Kvet, in 60)".

Solubilização do ferro contido em rocha sob influência de microorganismos

Ribeiro, Santos e Martelli (41) fizeram um ataque experimental sobre um diabásio com um líquido onde havia cultura de um fungo, *Aspergillus niger*, extraído do solo. Após 25 dias, o conteúdo de ferro das soluções com fungo era 26 vezes maior do que nas soluções estéreis. A solubilidade do ferro nesses minerais dependeu de sua natureza, da superfície de ataque e da concentração dos produtos metabólicos. Concluíram, ainda, que a ação do fungo sobre a rocha não é direta, mas resulta dos produtos do metabolismo e que o ferro iônico liberado dos minerais forma, com os produtos metabólicos do fungo, um complexo organo-metálico.

Oxidação e deposição do ferro por ação de microorganismos

Os gêneros de bactérias envolvidas na oxidação e deposição de ferro e manganês e reconhecidas pelo "Bergey's Manual of Determinative Bacteriology" estão na Tabela 2.2. (extraída de 48).

Harder (18) fez extenso estudo sobre depósitos sedimentares de ferro do mundo e desenvolveu uma série de experiências em laboratório onde verificou que, nas soluções inoculadas com bactérias, havia precipitações de ferro, enquanto que nas esterilizadas não ocorria o mesmo.

TABELA 2.2. GÊNEROS DE BACTÉRIAS ENVOLVIDOS NA OXIDAÇÃO E DEPOSIÇÃO DO FERRO E DO MANGANÊS (48).

Gênero	Metal precipitado	Modo de nutrição
<i>Arthrobacter</i>	Mn	Heterotrófico
<i>Clonothrix</i>	Fe, Mn	Heterotrófico
<i>Clostridium</i>	Fe	Heterotrófico
<i>Crenothrix</i>	Fe, Mn	Heterotrófico
<i>Desulfovibrio</i>	Fe	Heterotrófico
<i>Ferribacterium</i>	Fe, Mn	Heterotrófico
<i>Ferro Bacillus</i>	Fe	Autotrófico
<i>Gallionella</i>	Fe	Autotrófico
<i>Leptothrix</i>	Fe, Mn	Heterotrófico, autotrófico
<i>Metallogenium</i>	Mn	Heterotrófico
<i>Micromonospora</i>	Fe	Heterotrófico
<i>Naumaniella</i>	Fe	Heterotrófico
<i>Ochrobium</i>	Fe	Heterotrófico
<i>Siderobacter</i>	Fe	Heterotrófico
<i>Siderocapsa</i>	Fe	Heterotrófico
<i>Sideromonas</i>	Fe, Mn	Autotrófico, heterotrófico
<i>Sideronema</i>	Fe, Mn	Heterotrófico
<i>Siderosphaera</i>	Fe	Heterotrófico
<i>Siderophacus</i>	Fe	Heterotrófico
<i>Sphaerotilus</i>	Fe	Heterotrófico
<i>Thiobacillus</i>	Fe	Autotrófico
<i>Toxothrix</i>	Fe	Heterotrófico

(Silverman e Ehrlich, 48)

A formação geoquímica de depósitos sedimentares e autigênicos tem sido defendida por vários autores. A base para essa defesa assenta em parte no achado de bactérias fósseis ou vivas ou algas nos depósitos de ferro e de manganês e, em parte, nas demonstrações de laboratório segundo as quais tais organismos podem causar a formação de óxidos de ferro e de manganês. Os tipos de minerais de óxidos de ferro e de manganês com os quais os microorganismos estão associados incluem limonita, goethita, -MnO_2 e óxido de manganês amorfo (48). Os micróbios catalizam

a oxidação e a redução do ferro através de todos seus estados de valência importantes (60).

Por ação indireta ou não enzimática, alguns microorganismos podem oxidar os compostos de ferro e de manganês, causando a precipitação desses elementos pela geração de um ambiente oxidante, através da geração de O₂ ou consumo de CO₂ (função dos produtos metabólicos). Algumas algas, *Cyanophyceae*, *Chrysophyceae*, *Volvocales*, *Chlorococcales*, *Eugleneae*, *Conjugales*, *Ulothricales*, são particularmente ativas desta maneira, precipitando óxidos de ferro e manganês, que podem incrustar a superfície das células. Por outro lado, os micróbios podem simplesmente acumular ferro e manganês já oxidados. A adsorção de óxidos de ferro e de manganês pré-formados pode ser devida a uma capacidade especial de ligação para esses compostos. Acha-se que muitas das bactérias laminadas (*Crenothrix*, *Clonothrix*, *Leptothrix*), uma das bactérias com caule (*Gallionella*), e alguns protozoários flagelados (*Anthophysa*, *Siderodendron*, *Bikosoeca*, *Siphomonas*) funcionem desta maneira, embora elas possam também participar na formação destes óxidos (48).

Em ação direta ou enzimática, os microorganismos podem interagir enzimaticamente com compostos de ferro e de manganês. Por exemplo, os *Thiobacilli* ferro oxidantes oxidam o ferro ferroso para ferro férrico sob pH ácido, onde a autooxidação do ferro é extremamente vagorosa. *Gallionella* pode oxidar o ferro enzimaticamente sob pH neutro, onde a autooxidação é rápida e difícil de distinguir de uma oxidação biológica. A prova da oxidação do ferro pela *Gallionella* repousa sobre a observação do seu crescimento na ausência de carbono orgânico, onde o ferro é a única fonte de energia possível para o crescimento. *Leptothrix ochracea* pode também oxidar o ferro na ausência de uma fonte de carbono orgânico; isto é descrito como uma autotrofia facultativa (50).

A interação enzimática com compostos de ferro e de manganês pode se manifestar também através de digestão de complexos contendo ferro ou manganês.

A eficiência na oxidação do ferro e fixação do CO₂ depende também das condições fisiológicas da cultura, decaindo em cul

turas velhas.

As deposições ferruginosas em poços de exploração de água subterrânea, por influência de bactérias, são bastante conhecidas. Apenas como exemplo citam-se casos relatados por Brown (6) e Grime (14).

O primeiro autor verificou que de 19 poços na Califórnia, 9 estavam afetados por organismos da família das ferro bactérias. O crescimento e desenvolvimento destas bactérias em grande quantidade é manifestado pela turbidez nos sistemas de distribuição e nos reservatórios, por massas floculentas que aderem às paredes e flutuam na água.

O segundo relata a obstrução de um poço profundo em Washington. Devido a uma época de retirada intensa, o nível dinâmico baixou a uma cota inferior à da bomba, provocando assim um bombeamento de ar e forte aeração da água. No tanque formou-se uma placa de mais ou menos 7,5 cm de cor vermelha amarelada flutuante e uma deposição de lama marrom avermelhada. A análise deste material mostrou 450.000 bactérias por ml. Relata ainda o caso de outro poço que teve seu filtro obstruído por bactérias sulfato redutoras, ferro-bactérias, como *Crenothrix*, e algas.

2.7. DEPOSIÇÃO DO FERRO EM CAMADAS ARENOSAS

Se existem condições químicas para deposição de hidróxido férrico na natureza, devem ocorrer camadas arenosas cimentadas com essa substância.

Todos os processos discutidos anteriormente citam reações num meio líquido, acima dos sedimentos. Pouco existe sobre a precipitação de compostos férricos nos poros das rochas. Berner (3) explica a difusão dentro dos sedimentos recobertos por água, devido à existência de gradientes químicos verticais, especialmente em sedimento anaeróbico cuja água dos poros seja alta em Mn^{++} ou Fe^{++} , recoberto por água aerada livre de Mn^{++} ou Fe^{++} . Estes íons, devido aquele gradiente, ascenderiam por difusão e precipitariam na interface solo-água.

Persons (37) explica a formação de "lateritas sedimentares" pela deposição ou cimentação de areia situada sobre substrato impermeável, situando os elementos alimentados dessa deposição tais como sais de ferro e alumínio acima dessa interface. Com a introdução de sais em solução, nesta situação, formar-se-iam

concreções ao redor de determinados grãos de areia e, pelo crescimento destas, uma camada fina e dura na interface com o estrato impermeável subjacente deixando, freqüentemente, interstícios de areia não cimentada.

Suguio e Barbour (47) descreveram as crostas limoníticas existentes na Bacia de São Paulo e encontraram esses materiais não só na situação mencionada acima, mas também em camadas arenosas, logo abaixo de outras argilosas, e em outras diversas posições dentro das camadas. Admitem como fatores básicos, as diferenças de permeabilidade e "controles ditados pelos equilíbrios físico-químicos (concentração, Eh, pH, etc) das soluções que transportam o ferro". As espessuras destas crostas são, em geral, de 10 a 20 cm, podendo chegar até 1 m.

Willig e Formoso (58) estudando a gênese das couraças de ferro da formação Rio Bonito, no Rio Grande do Sul, descrevem a existência de cimentação ferruginosa, de maior intensidade no topo das camadas arenosas daquela formação, numa espessura menor que 50 cm observando, ainda, que as partes mais permeáveis apresentam maior espessura. Essas camadas estão situadas imediatamente abaixo de outra argilosa da formação Palermo. A origem dessas crostas é interpretada como resultado de um processo em que a água satura os solos derivados da formação Palermo por serem argilosos e pouco permeáveis, carrega-se de íons ferrosos, devido ao ambiente redutor desses solos, depois cai nas camadas arenosas, permeáveis e aeradas da Formação Rio Bonito. Nelas o ferro se oxida e precipita como hidróxido férrico.

2.8. CONCLUSÕES DO SEGUNDO CAPÍTULO

Através desta revisão bibliográfica é possível estabelecer uma teoria sobre o processo de obstrução do filtro de uma barragem de terra e, assim, explicar os casos mencionados no primeiro capítulo.

Uma barragem barrando um rio, cria um ambiente de águas quase paradas que se comportam como num lago. Esse lago artificial deve desenvolver um hipolímnia, o qual teria um ambiente redutor.

As águas do hipolímnia podem conter ferro dissolvido proveniente ou dos rios ou da lama do fundo. Confirmando a primeira

ra origem, existem os dados sobre o conteúdo de ferro em rios da Bacia do Paraná que embora em pequena percentagem podem representar acumulação considerável após um período suficiente de tempo. Esse ferro fluvial pode estar sob a forma fêrrica, em partículas muito finas em suspensão, ou sob a forma de complexos. Na primeira forma seria incapaz de atravessar o maciço argiloso com poros muito finos (veja-se a experiência de Hem e Cropper, 20). Mas tanto numa como em outra forma pode se reduzir ao entrar no hipolímnio e encontrar condições de pH e Eh favoráveis conforme foi visto nos diagramas ou através da fórmula de Nernst. Esta fórmula explica as condições de equilíbrio entre Fe^{++} e Fe^{+++} a uma certa profundidade do lago. Passando ao estado reduzido, esse ferro entra em solução verdadeira e pode atravessar o maciço de terra. A outra origem do ferro no hipolímnio é explicada pela difusão dos íons ferrosos que se formam na lama do fundo. Nesta, com certa acumulação de matéria orgânica, desenvolve-se o ambiente favorável às bactérias redutoras, especialmente as redutoras de sulfatos, propiciando todos os processos biogeoquímicos de redução do ferro.

Foi visto ainda, no ambiente lacustre, que a poucos centí metros abaixo da superfície da lama, o Eh chega a zero. Essa lama existe tanto abaixo do hipolímnio quando do epilímnio, esperando-se que abaixo daquele seja mais redutora do que abaixo deste. A água do reservatório, ao penetrar no maciço de terra, tem de atravessar necessariamente aquela lama, levando consigo tanto o ferro dissolvido como os produtos metabólicos ou íons que poderão reduzir o ferro contido no solo do maciço de terra.

Tudo isto faz supor que a água que percola no maciço de terra, principalmente em sua parte inferior, está num estado reduzido e carrega-se gradativamente de ferro.

Se a primeira parte do processo foi a redução e solubilização, a segunda será de oxidação e precipitação, identificando-se o oxigênio do ar como principal oxidante. Esta deposição poderá ocorrer ou sobre a faixa de capilaridade, ou no filtro, ou na saída dos drenos e à jusante da barragem.

Se houver oxidação e precipitação dentro do maciço de terra esse fato não terá nenhuma importância prática, o mesmo ocorrendo se essa reação se der na saída dos drenos, parte fácil de ser limpa, e nas águas de jusante, ao menos para o funcionamento da barragem. Todo o problema se concentra na precipitação den

tro do filtro, o qual possui difícil acesso e se constitui elemento essencial da barragem. O início da oxidação no filtro ainda não constituiria problema desde que houvesse suficiente fluxo para impedir a precipitação, como foi visto no caso de fontes de água subterrânea em equilíbrio instáveis.

Pelo estudo em camadas naturais, foi visto que as cimentações ferruginosas podem situar-se na base de camadas arenosas, por descida de material cimentante (Persons, 37); no topo, devido à subida e posterior oxidação dos íons (Berner, 3) ou devido à descida de soluções provenientes de camada superior menos permeável e posterior oxidação abaixo da interface (Willig e Formoso, 58).

As condições de precipitação no filtro serão melhor estudadas nos capítulos seguintes.

CAPÍTULO 3

LEVANTAMENTO DE CAMPO EM BARRAGENS

3.1. OBJETIVOS

As barragens que comprovadamente apresentam sinais de obstrução do filtro são poucas. Como foi visto na Introdução, item 1.5, são conhecidos os casos da barragem de Xavantes, e o da Rio Grande. É natural portanto, que estas barragens tenham sido procuradas, mas devido a problemas administrativos da proprietária da segunda barragem, foi permitido fazer apenas um reconhecimento muito superficial na mesma.

Como se tentava caracterizar um processo natural que pudes se levar a obstrução aos filtros, era necessário empreender levantamentos semelhantes em barragens que não tivessem qualquer sinal de obstrução. Assim a barragem de Jurumirim mereceu especial atenção uma vez que, situada à montante de Xavantes, representa o mesmo tipo de água que aquela e foi construída com o mesmo tipo de solo, o residual dos derrames vulcânicos da Formação Serra Geral. Houve também uma oportunidade, pouco comum, de se observar visualmente o filtro de uma barragem que estava em funcionamento há alguns anos, o da Euclides da Cunha. As outras duas barragens visitadas, Limoeiro e Ponte Nova, o foram mais em função da oportunidade que de algum interesse especial.

O objetivo deste levantamento foi o de comprovar, em barragens brasileiras, as condições previstas na revisão bibliográfica e buscar elementos de análise para explicar porque alguns filtros estão sendo obstruídos e outros não.

3.2. METODOLOGIA

Sistemática do levantamento

Convém observar que é muito difícil uma inspeção direta em

filtro de barragem, não só em função dos custos, mas também em função de problemas técnicos. Em vista disso, procurou-se analisar algumas características que pudessem explicar o processo em foco.

Além de procurar conhecer a geologia local, foi programada a seguinte sistemática de coleta de amostras: água do reservatório retirada do fundo, de posições intermediárias e do topo; água que tivesse passado pelo filtro; sedimento do fundo do reservatório junto ao paramento de montante; areia da jazida com que foi construído o filtro ou do próprio filtro; terra da jazida usada para a construção do aterro compactado. Naturalmente esta sistemática sofreu modificações conforme as circunstâncias encontradas.

A coleta de água do reservatório foi realizada graças ao empréstimo, por parte do Instituto Oceanográfico da USP, do coletor tipo Van Dorn. Este coletor visto nas fotografias 3.1 e 3.2, foi idealizado para tomar amostras de água a qualquer profundidade no mar, lagos ou rios. Consiste de um tubo com duas tampas de borracha que descem abertas e fecham na profundidade em que se deseja coletar a amostra. Este aparelho é fixado a um cabo que se adapta a um sulco, observado na fotografia 3.2, e é apertado por uma "borboleta". As duas tampas que estão ligadas, uma a outra, por uma borracha tensionada através do tubo, permanecem abertas e presas a um gancho, durante a descida do coletor. Ao chegar a profundidade desejada, lança-se, através do cabo de aço, o "mensageiro", um peso metálico, o qual bate na "cabeça" da peça cilíndrica do mecanismo de sustentação e disparo, fotografia 3.2, baixando o pino e o gancho. Estes eram mantidos na posição elevada pela pressão de uma mola. Solta-se assim as cordas que prendiam as tampas e a borracha tensionada puxa-as para a posição de fechamento. A água assim aprisionada e trazida, representa a da profundidade do fechamento e é retirada através de uma mangueirinha próxima a parte inferior do tubo. Todas as vezes que foi usado este aparelho, ele funcionou perfeitamente, mantendo a amostra em boa vedação.

Para a tomada de sedimento foi usado o coletor de sedimento de fundo, pertencente ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo S.A. Este coletor consiste de duas conchas de ferro com bordos inferiores biselados que se fecham de modo semelhante a uma torquiza, cujos braços funcionam como um mecanismo

Figura 3.1 - Fotografia do coletor de água tipo Van Dorn com capacidade aproximada de 2 litros.

Figura 3.2 - Fotografia do detalhe do mecanismo de suporte e disparo do coletor tipo Van Dorn.

pantográfico. O aparelho desce aberto, assim mantido por uma haste que se encaixa num braço. Ao chegar no fundo, as conchas permitem que os braços descansem seu peso sobre elas, abrindo-os ainda mais e libertando a haste de seu encaixe. Ao ser novamente alçado, o coletor se fecha pelo próprio peso, "abocanhando" uma porção do sedimento. Nem sempre, entretanto, houve disponibilidade deste aparelho, funcionando bem na ocasião em que foi usado.

A coleta da água que tenha passado pelos filtros é muito fácil quando a saída dos drenos é acessível, possibilitando a coleta diretamente em garrafas, como em Jurumirim. Isto nem sempre acontece, como por exemplo, em Xavantes, onde esse tipo de água escoava pelo enrocamento. Outra maneira de se coletar esse tipo de água é através dos piezômetros. Mas por diversas razões de ordem prática, esta modalidade só foi possível em Xavantes onde a pressão permitia a surgência.

Nas outras barragens visitadas, também não foi coletada água que tivesse passado pelo filtro, porque as situações não permitiam.

Amostras dos materiais com que foram construídos o filtro e núcleo da barragem de Xavantes tinham sido enviadas pela CESP ao IPT e foram utilizadas para as análises e ensaios. Amostras desses materiais relativos à Euclides da Cunha foram coletados quando esta estava na fase de reconstrução.

Análises

Por se tratar de trabalho de campo, foi usado um método mais expedito, embora não seja dos mais precisos, cujos resultados, porém, podem ser considerados satisfatórios para os objetivos propostos.

Nas amostras de água, sempre que possível, foi determinado o pH, o potencial redox (após janeiro de 79), o teor de oxigênio dissolvido, o teor de ferro II e ferro total, a alcalinidade, o teor de sílica, imediatamente após a coleta.

Como ficou estabelecido na Introdução, item 1.1, o principal objetivo dessas análises é o conhecimento da presença do ferro, sua migração e fixação. Estando a geoquímica desse elemento muito condicionada ao teor de oxigênio dissolvido, ao pH e ao potencial redox, é natural que esses parâmetros fossem medi-

dos. A medida da alcalinidade permite calcular o teor em bicarbonato, o qual deve ser o principal ânion, enquanto a dureza permite o conhecimento do teor dos alcalinos terrosos que junto com o ferro constituem os principais cátions.

As substâncias dissolvidas foram dosadas com os reagentes e equipamentos do estojo Aquamerck.

Pelo método de análise usado, o ferro bivalente é determinado colorimetricamente após a reação com uma solução 2,2' bipyridina. Adiciona-se previamente nitrato de alumínio para prevenir a interferência dos fosfatos. O teor é medido, por comparação de cor, em uma proveta Merck, de 10 ml, contendo as tonalidades padrões para cada teor. O teor de ferro total é determinado da mesma maneira, desde que o ferro III seja reduzido com uma solução de cloridrato de hidroxilamina.

Para confirmação de alguns dados, foram realizadas determinações de ferro total no espectrofotômetro de absorção atômica, marca Perkin Elmer 503, pertencente ao IPT.

O oxigênio dissolvido na água foi dosado por titulação seguindo o método de Winkler. Usando o estojo Aquamerck, uma porção de 5 ml da amostra, tratada previamente com uma solução de soda iodeto de potássio, cloreto de manganês e ácido clorídrico, é titulada com hipossulfito de sódio, tendo como indicador goma de amido.

A dureza total que significa a soma dos teores nos alcalinos terrosos, magnésio, estrôncio e bário, revela praticamente a dosagem dos dois primeiros já que os outros são mais raros nas águas naturais. Os íons de ferro e cobre, que interferem na determinação, são indicados pelas variações de cor da amostra da água e por não se dar a viragem. O método de determinação da dureza é o de titulação de 5 ml com sal dissódico do ácido etileno-dinitrilotetraacético (EDTA) usando-se um indicador líquido estável. O resultado é dado em mval/l (miliequivalente por litro) ou dH° (grau alemão). 1 mval/l de dureza cálcio corresponde a 20,04 mg/l de Ca^{++} ; 1 mval de dureza magnésio corresponde a 12,16 mg/l de Mg^{++} .

A alcalinidade é dada pelo título alcalimétrico, TA, correspondente aos teores em alcalis livres e em carbonatos alcalinos cáusticos, e pelo título alcalimétrico completo, TAC, correspondente aos teores em alcalis livres, carbonatos e bicarbonatos. Estas determinações são baseadas na neutralização da água por um áci

do mineral. A titulação de 5 ml de amostra com ácido clorídrico 0,1N, tendo uma solução alcoólica de fenolftaleína como indicador do pH = 8,3, dá o valor de TA. Outra titulação com o mesmo ácido, tendo um indicador misto de pH = 4,3, dá o valor de TAC.

Para se determinar os teores, em mg/l, de bicarbonato, deve-se multiplicar ml de ácido clorídrico 0,1N (mval/l) por 61. Como os valores medidos de TA sempre foram iguais a zero, a interpretação de alcalinidade fica reduzida ao bicarbonato.

Os métodos são os indicados pelo fabricante dos produtos (Merck, 34) para as análises, os quais coincidem, após algumas adaptações, com os métodos expostos por Rodier (42).

O pH foi medido com um aparelho marca Schott-Mainz, modelo CG 717 portátil, com escala de 1 a 13 e divisões de 0,2 pH e eletrodo combinado de vidro e calomelano. Para as medidas de Eh foi usado o mesmo aparelho, porém com eletrodo de platina, fazendo-se as leituras numa escala de -600 mv a + 600 mv.

O eletrodo de platina é inerte e, assim, mede a diferença de potencial entre o ambiente e um eletrodo de hidrogênio ou um outro eletrodo de potencial conhecido. Mede, em outras palavras, a capacidade de o ambiente fornecer eletrons a um agente ou retirar eletrons de um agente redutor.

As medidas de potencial redox de um meio, por esta maneira, não podem ser consideradas muito exatas, pois algumas das reações que determinam os potenciais de oxi-redução são muito lentas e as leituras instantâneas, feitas com o eletrodo de platina, não mostram a verdadeira diferença de potencial de equilí**br**io. Isto é particularmente verdadeiro para as reações que envolvem oxigênio. Nestes casos os potenciais medidos são geralmente mais baixos que os valores de equilíbrio (26). Deve-se lembrar, também, as considerações expostas por Hem e Cropper (20) no item 2.3 - "concentração esperadas".

As poucas amostras de sedimentos de fundo foram descritos sumariamente no campo e depois de colocadas em vidro hermeticamente fechados, foram enviados ao CETESB para análise bacteriológica que incluísse as bactérias do ferro e as sulfato redutoras.

As amostras de solo do núcleo e da areia do filtro tiveram determinadas em laboratório, as suas curvas granulométricas e peso específico. A análise mineralógica visual indicou tratar-se de areias quartzosas com algum feldspato e limpas.

Em alguns casos, mais para contribuir para o conhecimento das águas dos rios, lagos ou subterrâneas, foi dosada a sílica. O teor de sílica é determinado por colorimetria, sendo a amostra de 10 ml tratada com molibdato de amônio em ácido sulfúrico, ácido tartárico, ácido amino-nafto-sulfônico. Os padrões de tonalidade relativas aos teores fazem parte da proveta Merck usada.

3.3. LEVANTAMENTOS

Barragens de Euclides da Cunha e Armando de Salles Oliveira

Nos dias 30/11 e 19/12/1977 foram visitadas as barragens Armando de Salles Oliveira e Euclides da Cunha, pertencentes a CESP. A barragem Euclides da Cunha, concluída em 1960, represa o Rio Pardo e situa-se no município paulista de São José do Rio Pardo construída com terra fundada sobre rochas gnáissicas, possui um filtro vertical e tem altura estrutural de 63m, comprimento da crista de 343 m e volume de 2,200.000 m³ (Construção Pesada, 8).

Figura 3.3. Curvas granulométricas do material argiloso do maciço de terra e de areia do filtro da Barragem Euclides da Cunha.

Em 20/01/1977, após fortes chuvas, 230 mm em 24 h, consideradas milenares, essa obra rompeu por causa do transbordamento da água pela crista. Em função desse desastre foi possível uma inspeção direta do filtro, verificando-se que o mesmo encontra-se em perfeitas condições.

Foram coletadas amostras do filtro e do maciço de terra. A granulometria está representada na Figura 3.3.

Não foram possíveis outras coletas nesta barragem, pois o ambiente natural havia sido perturbado pelo rompimento da obra.

Na mesma ocasião, foi visitada a Barragem Armando de Salles Oliveira, ex-Limoeiro. Esta barragem situa-se no mesmo Rio Pardo, à jusante da obra anteriormente inspecionada, localizando-se no município paulista de Mococa e apresentando uma seção homogênea de argila residual, altura estrutural de 41 m, comprimento de 660 m e volume de 600 m^3 (8).

Em consequência do transbordamento da barragem Euclides da Cunha, formou-se uma onda tal, que galgou a outra encontrada à jusante, rompendo-a por erosão. Nesta, porém, o filtro não ficou exposto.

Junto à tomada de água da usina, a qual estava fechada desde o desastre de 20/01/1977, havia água em relativo repouso, com 8 m de profundidade e apresentando-se turva, cor de tijolo. Representava mais a água do rio, em zona de pouca movimentação, do que de um lago ou represa. Dali foram coletadas duas amostras (1 e 2) com o coletor Van Dorn. Próximo à saída do túnel de desvio, onde a correnteza era intensa, foi coletada uma terceira amostra diretamente em garrafa de plástico, levando o nº 3. Todas representam ambiente fluvial. Os resultados das análises estão na Tabela 3.1.

Barragem Armando A. Laydner (Jurumirim)

Esta represa mereceu duas visitas em épocas diferentes, nos dias 16/02/78 e 10/4/79, e a razão deste interesse está exposta no início do capítulo.

A represa Armando A. Laydner, ou Jurumirim, de propriedade da CESP, barra o rio Paranapanema, formando um lago de $6,52 \text{ Km}^3$. A barragem propriamente dita é de concreto de gravidade, enquanto o dique situado próximo à ombreira é de terra. Situa-se no município paulista de Piraju, e destina-se à geração de ener

gia elétrica. A Figura 3.4. mostra o esquema dessas duas obras. A altura estrutural do dique de terra é de 17 m e o comprimento da crista, 459 m, sendo estas medidas de 55 m e 484 m, respectivamente para a barragem de concreto (8). A barragem e o dique assentam sobre a Formação Serra Geral, aflorando junto à barragem o granófiro cinza semelhante ao que ocorre no Sul do Brasil.

TABELA 3.1. ANÁLISE DAS ÁGUAS COLETADAS JUNTO À BARRAGEM ARMANDO DE SALLES OLIVEIRA EM 20/1/1977.

Nº da amostra	Profundidade (m)	pH	O.D. (mg/l)	Fe total (mg/l)	SiO ₂ (mvl/l)	Dureza (mal/l)
1	1	6,7	6,7	nada	12	0,6
2	7	6,8	6,3	nada	12	0,6
3	superfície	7,0	7,0	nada	10	0,3

O.D. = oxigênio dissolvido

Foi possível coletar água do reservatório, água que passou pelo filtro do dique e sedimento do fundo do lago. A água da represa foi retirada com o coletor Van Dorn, lançado da plataforma existente junto ao vertedouro da barragem. Do mesmo local, foi lançado o amostrador de sedimento de fundo. No sopé do paramento de jusante existe um dreno que recolhe a água passada pelo interior do maciço de terra, facilitando, assim, o coleta desse tipo de água. Notava-se, no poço onde esta água caía, uma acumulação de precipitado ocre de hidróxido de ferro. O resultado da análise dessas águas está na Tabela 3.2.

Por ocasião da primeira visita, a lâmina de água do reservatório, no local de coleta, era de 37,2 m e, na segunda visita, era de 25,9 m.

Usando-se o ábaco apresentado na Figura 2.2 (Hem e Cropper, 20) o potencial redox da água subterrânea do filtro do dique foi calculado em 300 mv, que parece ser um valor bem acima do real.

A água do dreno, coletada na segunda visita, foi enviada à CETESB - Divisão de Microbiologia, para determinação bacteriológica, cujos resultados estão na Tabela 3.3.

TABELA 3.2. ANÁLISE DAS ÁGUAS COLETADAS JUNTO A BARRAGEM ARMANDO A. LAYDNER (JURUMIRIM) EM 16/2/1978 E 10/04/1979.

Nº da amostra	Data	Local da coleta	Profund. m	Temp. °C	Eh mV	pH	Fe total* Mg/l	Fe ⁺⁺ mg/l	O.D. mg/l	Alcalinidade mval/l	Dureza mg/l de HCO ₃ ⁻	SiO ₂ mg/l	
4	16/2/78	Represa	1	-	-	7,8	0,0	-	5,9	-	-	0,6	8
5	16/2/78	"	18	-	-	7,5	0,0	-	4,9	-	-	0,6	9
6	16/2/78	"	36	-	-	7,0	0,2	0,0	2,0	-	-	0,6	12
7	16/2/78	Dreno	-	-	-	-	13,7	15	3,6**	-	-	-	7,5
8	10/4/79	Represa	1	24,8	230	6,4	0,0	-	6,9	0,5	30,5	0,6	-
9	10/4/79	"	15	22	200	6,2	0,0	-	6,3	0,7	42,7	0,6	-
10	10/4/79	"	25	22	185	6,0	0,0	-	6,7	0,9	54,9	0,8	-
11	10/4/79	Dreno	-	22	60	5,3	-	15	2,9**	1,0	61,0	0,5	-

Observações: * O ferro total foi determinado em laboratório no espectrofotômetro de absorção atômica, depois de a amostra ter sido atacada com ácido clorídrico e nítrico a quente.

** O teor de O.D. (oxigênio dissolvido) foi corrigido adicionando-se ao teor medido 0,14 x teor de Fe⁺⁺ em mg/l.

Figura 3.4. Esboço da barragem de concreto e dique de terra Armando A. Laydner (acima) e seção transversal do dique de terra (abaixo) (Gentileza da CESP).

TABELA 3.3. BACTÉRIAS PRESENTES NOS SEDIMENTOS DO FUNDO DA REPRESA E NO DRENO DO DIQUE ARMANDO A. LAYDNER (JURUMIRIM).

Tipo de bactéria examinado	Sed. fundo	Água do dreno
Bactérias redutoras do sulfato (Desulfovibrio) (NMP/100 ml)	$1,3 \times 10^5$	700
Ferrobactérias filamentosas	presentes	presentes
Colônias de bactérias que precipitam o ferro (Nº/ml)	$3,4 \times 10^5$	310

O sedimento do fundo, coletado apenas por ocasião da primeira visita, era constituído por areia média e fina, misturada

com material argiloso, em parte floculado, acrescido de restos vegetais como folhas. Este material foi enviado ao CETESB - Divisão de Microbiologia, como o anterior, e os resultados também estão na Tabela 3.3.

Uma informação adicional foi dada pelo encarregado de operações daquela usina, relatando que o pessoal que abriu o vertedor de fundo, verificou a formação de gás nesse local.

Barragem de Xavantes

Sendo uma das barragens que apresenta indícios de obstrução do filtro, foi alvo de investigações em duas ocasiões, a primeira em 17/02/1978 e a segunda em 11/04/1979.

Xavantes é uma barragem de terra zonada, situada no Rio Paranapanema, entre os municípios de Xavantes, SP e Ribeirão Claro PR, pertence à CESP. Iniciada em 1960 e concluída em 1970, possui a altura de 79,6 m, o comprimento do eixo de 500 m e o volume do lago de 8,75 Km³ (Villanova, 57). A Figura 3.5 mostra um esquema dessa barragem.

Esta barragem está fundada parte em arenito, parte em rocha vulcânica considerada basalto por Villanova (57) e granófiro por Sartori e Maciel Filho em trabalho ainda não publicado. O arenito de origem eólica está abaixo desse vulcanito e foi o responsável pela sobrecarga do filtro horizontal, caso este estudado por Abrahão (1) e já mencionado na introdução. Em situação inferior ainda jaz um arenito de origem fluvial e, mais abaixo, um derrame de basalto.

Durante a primeira visita, como não contávamos com barco, o único local acessível para coleta de água do lago com o coletor Van Dorn, era o muro que separa o vertedouro da tomada de água. A espessura de água era, no local, de aproximadamente 9m. Nesse mesmo ponto deveria ser coletado sedimento de fundo, mas a laje de concreto no fundo impossibilitou essa amostragem.

Outra amostra de água foi retirada de um piezômetro tipo Casagrande, PD2-D, instalado na cota 290 m, no arenito da fundação, e com a boca no paramento de jusante. Um terceiro tipo teve origem nos três poços de alívio que drenam o arenito da fundação. Os resultados das análises estão na Tabela 3.4.

Figura 3.5. Esquema da barragem de Xavantes, em planta e em seção (Villanova, 57).

Na segunda visita foi possível contar com o barco da CESP, mas não com o amostrador de fundo. Nessa segunda visita, o local escolhido para descer o coletor Van Dorn foi um ponto no lago, situado a cerca de 1 Km da barragem, onde o pessoal daquela usina admite ser dos mais profundos, com 68 m, executando-se aí um perfil de amostragem cujos resultados constam da Tabela 3.5 e Figura 3.6. Como a água que passa pelo filtro sai através do enrocamento de jusante, não foi possível coletar este tipo de água.

TABELA 3.4. ANÁLISE DAS ÁGUAS COLETADAS JUNTO A BARRAGEM DE XAVANTES EM 17/02/1978.

Nº da amostra	Prof.(m) ou local	pH	O.D. mg/l	Fe total* mg/l	Fe mg/l	SiO ₂ mg/l	Dureza mval/l
12	1	8,1	6,5	0,0	0,0	12	0,5
13	8,5	7,8	5,2	0,1	0,0	11	0,5
14	PD2-D	8,6	1,7	0,2	0,0	0,7	0,6
15	Poço(1)	7,4	6,4	0,1	0,0	60	3,0
16	Poço(2)	7,2	6,8	0,1	0,0	60	2,3
17	Poço(3)	7,5	5,5	0,1	0,0	60	3,2

O.D. = oxigênio dissolvido

* - A determinação de ferro total foi feita em laboratório no espectrofotômetro de adsorção atômica após as amostras terem sido tratadas, cada uma, com 5 ml., de HCl 1N por 50 ml de água a frio e a quente. O resultado constante da tabela, corresponde a maior dosagem obtida a frio ou a quente.

- (1) Este poço situa-se próximo à ombreira direita com inclinação de 17° para montante.
- (2) Este poço situa-se entre o anterior e o seguinte, com inclinação para montante.
- (3) Este poço situa-se aproximadamente no meio da barragem, com inclinação de 27° para montante.

É interessante observar que a amostra de água nº 23, analisada novamente em 10/7/1979, apresentava um teor de 5,5 mg/l de oxigênio dissolvido e nada de ferro em solução, certamente devido à influência de pequena quantidade de ar aprisionado na garrafa.

Por outro lado, amostras das jazidas que forneceram material para o maciço de terra (área "G") e para o filtro (Porto Novo Horizonte), tinham sido enviadas pela CESP ao IPT e foram aproveitadas para este trabalho. A granulometria destes materiais está representada na Figura 3.7 e outros parâmetros de caracterização estão na Tabela 3.6 obtidos de Cruz (9).

TABELA 3.5. ANÁLISE DAS ÁGUAS DO LAGO DE XAVANTES, COLETADAS EM 11/04/1979.

Nº da amostra	Prof. m	Temp. °C	pH	Eh mV	Fe total mg/l	Fe ⁺⁺ mg/l	O.D. mg/l	HCO ₃ mval/l	mg/l	Dureza mval/l
18	0,5	24,2	6,7	+150	0,0	0,0	7,6	0,7	42,7	0,6
19	14	24,0	6,6	+150	0,0	0,0	7,7	0,8	48,8	0,6
20	27	20,0	6,1	+180	0,0	0,0	3,8	0,7	42,7	0,6
21	40	19,0	6,0	+190	0,0	0,0	5,2	0,6	36,6	0,6
22	53	18,2	6,0	+ 40	1,5	1,5	1,9*	0,9	54,9	0,6
23	66	18,2	5,8	- 10	2,5	2,5	1,9*	0,9	54,9	0,6

O.D. = oxigênio dissolvido

* = o valor enunciado corresponde ao medido acrescido da correção de 0,14 x teor de Fe⁺⁺ em mg/l.

TABELA 3.6. PARÂMETROS DO MATERIAL ARGILOSO USADO NO MACIÇO E DA AREIA USADA NO FILTRO DA BARRAGEM XAVANTES (CRUZ, 9).

Parâmetros	Mat. argiloso	Areia
Peso específico dos grãos (g/cm ³)	2,78	2,65
Umidade ótima de compactação (%)	19,8	
Peso específico de compactação (t/m ³)	1,7	
Teor de hidróxido de ferro livre (%)	8	

Barragens de Ponte Nova, Rio Grande e Vacacaí Mirim

No dia 08/03/1979, em companhia de geólogos do IPT, foi visitada a barragem de Ponte Nova, não por esta apresentar algum problema especial, mas para caracterizar mais um lago artificial situado no Estado de São Paulo.

A barragem de Ponte Nova pertence ao Departamento de Águas e Energia Elétrica, DAEE; foi construída com terra e concluída em 1972; tem 41 m de altura estrutural e 934 m de comprimento; barra o rio Tietê e situa-se próximo a Biritiba Mirim.

Figura 3.6. Gráfico dos valores de temperatura, pH, potencial redox (Eh), Fe^{++} e oxigênio dissolvido (O.D.) nas diversas profundidades do lago de Xavantes, em 11/04/1979.

Uma das constatações feitas foi a de pequena surgência de água ferruginosa no paramento de jusante e junto à ombreira esquerda, formando pequena crosta de hidróxido de ferro próximo a esse "olho d'água", enquanto a alguns metros à jusante a água era limpa.

Além dessas observações foram coletadas amostras de água do lago e de um poço que recolhe a água de vários pontos das encostas e da barragem. Mais tarde ficou-se sabendo que a água percolada através do filtro sai no enrocamento de jusante. A análise das águas coletadas está na Tabela 3.7.

Figura 3.7. Curvas granulométricas do solo usado no maciço de terra e da areia usada no filtro da Barragem Xavantes.

TABELA 3.7. ANÁLISE DAS ÁGUAS COLETADAS NA REPRESA DE PONTE NOVA EM 8/3/1979.

Nº da amostra	Prof.(m) ou local	pH	Fe to tal mg/l	Fe ⁺⁺ mg/l	O.D. mg/l	HCO ₃ mval/l	Dureza mg/l	SiO ₂ mval/l	mg/l
24	0,0	7,0	0,0	0,0	6,6	0,2	12,2	0,3	0,3
25	14	5,5	3,0	3,0	1,4	0,4	24,4	0,3	0,5
26	poço dr.	5,0	2,5	2,0	3,1	0,4	24,4	0,6	-

O.D. = oxigênio dissolvido

* = C valor da tabela corresponde ao valor medido acrescido de 0,14 x teor de Fe⁺⁺ em mg/l.

Merece destaque também a percepção do cheiro de H₂S próximo ao vertedor de fundo e por volta do meio-dia, sendo que as válvulas tinham sido abertas às 9 horas da manhã.

A barragem do Rio Grande pertence a Eletropaulo, ex Light Serviços de Eletricidade, é construída em terra, possui 25m de altura e 1500m de comprimento, foi concluída em 1928, situa-se em São Paulo, capital, e barra o Rio Grande, sendo a principal obra do reservatório Billings.

Nesta barragem foi possível apenas uma observação superficial, no dia 14/2/80, e uma coleta junto à superfície. A água apresentava um aspecto escuro e mau cheiro. A análise de água revelou os dados da Tabela 3.8.

TABELA 3.8. ANÁLISE DA ÁGUA SUPERFICIAL JUNTO A BARRAGEM DO RIO GRANDE EM 14/2/1980.

Nº da amostra	27
pH	6,1
Ferro total	1,0 mg/l
Fe ⁺⁺	1,0 mg/l
Oxigênio dissolvido	0,6 mg/l (valor corrigido)

A Barragem do Vacacaí-Mirim, pertencente atualmente a Companhia Riograndense de Saneamento e anteriormente ao Departamento Nacional de Obras e Saneamento, tem 22 m de altura e 550 m de comprimento, situa-se em Santa Maria, RS, e barra o rio Vacacaí-Mirim. Possui um filtro inclinado para jusante e continuado por outro horizontal que termina nos tubos de drenagem. A inspeção desde mostrou que a maior parte apresenta uma crosta ferruginosa na sua extremidade sem, no entanto, causar qualquer problema.

Cabe mencionar, também, a existência de gel ferruginoso junto às nascentes de água (fontes) que ocorrem em vários locais e foi observada nos arredores de São Paulo.

Dique 5 de Paraibuna

As barragens de Paraibuna e Paraitinga barram os rios dos mesmos nomes, formadores do Rio Paraíba, compondo um único lago. O sistema Paraibuna possui 5 diques.

Dois anos após o enchimento ocorrido em 1974, foram notados níveis piezométricos muito elevados no dique 5 de Paraibuna. Em dezembro de 1977, entraram em funcionamento 7 poços na berma de jusante, puxando água do filtro e da fundação, com a finalidade de baixar a pressão hidrostática interna. Havendo suspeita de obstrução do filtro ou do dreno do filtro, a Companhia Energética de São Paulo, proprietária da obra, resolveu realizar uma escavação, chegar até a extremidade jusante do filtro, e substituir o antigo dreno por outro de dimensões maiores.

O filtro é do tipo chaminé vertical, terminando a camada horizontal em "lingueta" de 6 m de largura por 1 m de altura, descarregando a água sobre uma "caixa" contendo areia, pedrisco e brita envolventes ao tubo perfurado que conduz a água para o exterior.

Na ocasião em que a extremidade jusante do filtro em "lingueta" ficou exposta, foi verificada a sua situação nos dias 6, 7 e 9/6/1980. A areia do filtro estava limpa a não ser em pequena porção próxima à base. A areia, pedrisco e brita da "caixa" que envolve o tubo perfurado foram amostradas através de um furo de trado, o qual atingiu apenas a parte superior da referida caixa devido à dificuldade natural de perfurar a brita. Todos esses elementos mostravam-se limpos, isto é, sem qualquer sinal de hidróxido de ferro. Por fim, procedeu-se a análise das águas colhidas na saída do dreno, de uma surgência da ombreira esquerda situada a uns 200 m a jusante da escavação, do sistema de rebaixamento do lençol freático durante a escavação, dos 5 poços da berma de jusante e do poço de visitas do novo tubo de drenagem. Os resultados estão na Tabela 3.9.

TABELA 3.9. ANÁLISE DAS ÁGUAS COLETADAS JUNTO AO DIQUE 5 DE PA RAIBUNA EM 9/6/1980.

Nº da amostra	Local	pH	Fe total mg/l	Fe ⁺⁺ mg/l	O.D. mg/l	Eh mV	Temperatura °C
28	dreno	5,5	2,0	2,0	6,1	130	22
29	surgência	4,8	12,0	12,0	0,4	110	21
30	S.rebaixamento	5,5	1,0	0,8	4,7	150	26,5
31	poço 2	4,4	0,0	0,0	1,5	220	23
32	poço 3	4,4	0,0	0,0	2,3	220	23
33	poço 7	5,0	1,5	1,5	9,6	220	23
34	poço 5	4,5	0,3	0,2	1,9	190	22
35	poço 6	4,5	0,0	0,0	1,8	180	22
36	poço visit.	4,7	2,0	2,0	4,7	130	22

O sistema de rebaixamento para escavação tem as ponteiros cravadas no filtro e na fundação (nas duas ombreiras), provindo a vazão de 35 litros por minuto ($583 \text{ cm}^3/\text{s}$) na proporção de 60%

da fundação e de 40% do filtro. O poço 2 está situado próximo à ombreira direita e retira $245 \text{ cm}^3/\text{s}$ de água do filtro, baixando o nível da água automática e intermitentemente da profundidade de 13,9 m até 16,9 m; o poço 3, situado entre o anterior e o centro do dique, com a mesma vazão, mesma posição de instalação e na mesma modalidade, baixa o nível de 15,14m para 18,14m; o poço 7, situado aproximadamente no centro, extrai $490 \text{ cm}^3/\text{s}$ da água da fundação baixando, na mesma modalidade, o nível da profundidade de 20,65 m até 22,65 m; o poço 5, situado a seguir, extrai a água do filtro na velocidade de $187 \text{ cm}^3/\text{s}$, mantendo o nível na profundidade de 13,3 m; o poço 6, em local mais próximo da ombreira esquerda, extrai água, também do filtro, na vazão de $196 \text{ cm}^3/\text{s}$ mantendo o nível a 13,75 m de profundidade.

3.4. CONCLUSÕES DO TERCEIRO CAPÍTULO

As análises da água dos reservatórios visitados confirmaram as condições químicas esperadas pelos estudos de limnologia, verificando-se a estratificação térmica e química especialmente em Jurumirim, Xavantes e Ponte Nova. Nestes dois últimos e no de Pedreira destaca-se a existência de ferro dissolvido mas em baixos teores.

O reservatório da Barragem de Pedreira apresenta as condições mais favoráveis para a existência de ferro em soluções, bem como dissolução do ferro contido na maciço de terra, pois recolhe o esgoto da cidade de S. Paulo, o que o torna rico em matéria orgânica favorecendo o ambiente redutor. Note-se que nem a camada superficial apresentava ambiente oxidante, tendo apenas $0,5 \text{ mg/l}$ de oxigênio dissolvido.

O reservatório da barragem de Xavantes, um dos mais profundos, possui um hipolímnio de grande espessura, cerca de 50 m na ocasião da segunda visita, contra uns 20 m de epilímnio, e mostrando portanto, a maior parte de sua água em estado de redução relativa. Esta situação favorece um processo de maior lixiviação do ferro do maciço de terra. Infelizmente não é possível coletar amostra de água que tenha passado pelo maciço e pelo filtro para se tirar maiores conclusões.

O caso do dique 5 da barragem de Paraibuna deve ser explicado pelo dimensionamento insuficiente do filtro em lingueta. O fato de os níveis piezométricos só subirem após dois anos de

funcionamento pode ser explicado por analogia com os ensaios apresentados nos próximos capítulos.

É interessante o caso de Jurumirim, que não tendo ferro dissolvido na água do reservatório, mostra esse elemento com certa abundância (15 mg/l) na saída dos drenos do dique de terra, comprovando, assim, que o referido elemento é basicamente retirado do solo constituinte do maciço de terra. A surgência de água ferruginosa na Barragem de Ponte Nova, em fontes de água subterrânea ou mesmo na saída dos drenos da barragem sobre o Vacaí-Mirim em S. Maria, observadas pelo autor, ou ainda muitos casos de água ferruginosa mencionadas no capítulo 1 mostram que esse fenômeno deve ser considerado normal, pois se a água subterrânea (e a que passa pelo maciço da barragem deve ser considerada como tal) contiver ferro II dissolvido, ao encontrar um meio aerado vai precipitá-lo. Água ferruginosa na saída dos drenos de uma barragem não é indício de que o filtro esteja sendo cimentado por hidróxido de ferro. Por outro lado, a ausência de água ferruginosa na saída dos drenos não exclui a possibilidade de um processo cimentante.

Finalmente a constatação das condições do filtro da Barragem Euclides da Cunha comprovam que mesmo havendo um possível fluxo de água com ferro dissolvido, o filtro pode permanecer limpo desde que não hajam condições de precipitação do ferro.

CAPÍTULO 4

DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA DESTINADA A SIMULAÇÕES EM LABORATÓRIO

4.1. INTRODUÇÃO

Foi visto, através da revisão bibliográfica (capítulo 2) e dos levantamentos de campo (capítulo 3), que a água que atravessa o núcleo argiloso de uma barragem de terra deve ser uma água redutora, carregada de bicarbonato ferroso e, nestas condições, deve chegar ao filtro. Se este oferecer condições oxidantes poderá haver uma oxidação do bicarbonato ferroso para hidróxido férrico e posterior precipitação dessa substância. Se as condições geoquímicas do filtro forem semelhantes ao do núcleo argiloso, o bicarbonato ferroso atravessará essa parte da barragem sem qualquer problema de cimentação.

Cabia, portanto, um estudo de laboratório para verificar os condicionantes que levam à oxidação durante o percurso no filtro. Neste sentido procurou-se desenvolver uma metodologia destinada a simulações dos vários condicionamentos possíveis.

Este capítulo apresenta as etapas que foram desenvolvidas para se chegar a um modelo que reproduzisse as condições geoquímicas de uma barragem de terra. Assim, os resultados dos ensaios apresentados neste capítulo têm valor apenas como testes do método que estava sendo desenvolvido.

As condições que o método deveria satisfazer era a de manter em circulação certa quantidade de água carregada de bicarbonato ferroso e, por isso, com um Eh baixo. Como o oxigênio é o principal oxidante, deveria se manter essa água fora do contato com o ar. Essa, deveria ainda passar primeiro pela argila e depois pela areia, a qual poderia estar em três posições: acima, abaixo e ao lado do material argiloso.

Os parâmetros indicativos de alguma obstrução da areia representativa do filtro seriam a variação de permeabilidade, o

controle químico ou mesmo a observação visual.

Sabe-se, no entanto, por experiências anteriores, que, se não houver certos cuidados, a permeabilidade da areia baixa. Por isso, como finalidade intermediária, procurou-se um método que não modificasse a permeabilidade de areia, senão pela precipitação de hidróxido de ferro.

Para se compreender o processo de cimentação no filtro, era necessário estudar primeiramente as condições em que essa parte da barragem provoca a aeração da água e posteriormente a oxidação e precipitação do ferro ferroso.

Para se atingir os objetivos propostos neste capítulo foi montado um aparelho para as simulações e foram realizados ensaios de dois tipos: os primeiros para se estudar o controle sobre fatores não geoquímicos, como os seres vivos e a força de percolação; os segundos para estabelecer a metodologia para estudo dos fatores geoquímicos no sistema argila-areia, tanto os de aeração da água quanto os de precipitação do hidróxido fêrrico.

4.2. APARELHAGEM BÁSICA

Montagem do aparelho básico

Estabelecidas as finalidades e condicionamentos, foi projetado e construído, em fases sucessivas e determinadas pelas observações relativas à eficiência do sistema, o equipamento que será descrito.

Na primeira fase, tentou-se verificar se o sistema previsto seria capaz de deaerar e filtrar a água. A deaeração da água oferecia uma vantagem adicional, a de impedir a formação de bolhas de ar na areia, diminuindo, aparentemente, sua permeabilidade. Este efeito é demonstrado em gráfico por Lambe (29). Um filtro, tipo "de parede", de uso doméstico, teve sua entrada ligada à água de um frasco em nível mais baixo e sua saída, voltada para baixo, ligada à parte superior de uma câmara que continha ainda duas outras saídas. Uma delas, situada também na parte superior, era usada para se fazer vácuo, enquanto a outra, situada na parte inferior, para se tirar a água acumulada. O princípio de funcionamento é o seguinte: Em face à baixa pressão

criada na câmara e no interior da vela do filtro, pela bomba de vácuo, a pressão atmosférica impele a água a subir pela mangueira e passar pela vela, a qual, em seu interior, oferece uma grande superfície de contato entre a água e a atmosfera em baixa pressão. Nessa filtragem, formam-se bolhas de ar na água, que são sugadas e desfeitas pelo vácuo. É essencial, por isso, que a parte interna da vela não esteja saturada de água.

Um teste para verificar a eficiência do sistema foi realizado através da dosagem do oxigênio dissolvido na água. Esta, antes de passar pela vela do filtro, continha um teor de 6 mg/l e após, 2 mg/l.

Testada e comprovada uma das funções do equipamento imaginado, era necessário resolver outros problemas, como o de retirar a água da câmara sem desfazer o vácuo e manter essa água em circulação e em circuito fechado. O primeiro problema foi resolvido com uma bomba hidráulica rotativa modelo Km 42A Kohl ~~bach~~, provida de motor de 1/3 HP. Esta bomba sugava a água da câmara de vácuo e jogava-a num reservatório situado em nível superior (inicialmente uma caixa de cimento amianto de 50 lt.) Daí poderia passar aos corpos de prova e cair num reservatório inferior (inicialmente outra caixa semelhante à anterior), donde seria sugada, através de uma mangueira, para a vela do filtro, reiniciando todo o circuito. Basicamente, os problemas mecânicos estavam assim resolvidos.

Para evitar que a água nos reservatórios reabsorvesse ar, foi usado, inicialmente, uma camada de óleo sobre a mesma. Antes dos primeiros ensaios, a primeira câmara usada para se fazer vácuo e acumular água, por ser pequena, frágil e com frequentes vazamentos, foi substituída por um tubo de PVC, com 5cm de diâmetro interno, em posição vertical. Outro tubo de vidro, paralelo àquele, permitia o controle do nível da água. A operação de ligar o motor da bomba hidráulica, quando o tubo PVC estivesse cheio, e desligá-lo, quando estivesse quase vazio, foi automatizada através de dois eletrodos, um superior e outro inferior, que emitiam sinal para um controlador automático de nível, marca PEXTRON, modelo TCN-40, secundado por um relê, marca SCHRACH. Como a água, no reservatório superior, estava sujeita a uma grande variação de nível, havia necessidade de um sistema que mantivesse esse nível constante para que fosse mantida uma pressão igual sobre as amostras. Inicialmente, foi usada uma cai

xa de cimento amianto, semelhante às anteriores, e intermediária entre a superior e as amostras, munida, na entrada de água, de uma torneira com bôia.

Este dispositivo permitiu manter uma variação máxima de nível de aproximadamente 1 cm.

Assim como descrito, este equipamento foi usado nos primeiros ensaios e corresponde à primeira forma do aparelho.

Posteriormente, achou-se conveniente eliminar a camada de óleo como isolante entre a água e o ar e adotar outro sistema de manter a pressão de percolação constante sobre os corpos de prova.

As duas caixas de cimento amianto, a superior e a intermediária, foram substituídas por uma caixa de PVC, em forma de paralelepípedo, com tampa de acrílico transparente, hermeticamente fechada, contendo água e ar. Este estava confinado em um saco de material plástico flexível (PVC) ligado, mediante uma mangueira, ao fole. Após alguns ensaios, entretanto, verificou-se que esse material oferecia certa resistência à deformação, influenciando no equilíbrio do sistema. Por isso, foi substituído por uma atmosfera de nitrogênio ou CO_2 conforme a experiência. Um fole construído também com PVC flexível foi colocado sob uma caixa de cimento amianto que recebe a água percolada pelos corpos de prova, de tal forma que o peso do líquido ao se acumular fosse aumentando a pressão no fole, a qual era prontamente transmitida ao gás (ar, nitrogênio ou CO_2) situado sobre a água na caixa de PVC. Para compensar a variação do volume d'água no sistema pela acumulação na câmara de vácuo, foi colocado um balão de PVC flexível (balão de compensação) para receber as descargas da bomba hidráulica e liberá-las gradativamente para o reservatório, através de um registro de gaveta. Um esquema dessa segunda forma do aparelho é exibido na Figura 4.1.

A terceira forma do aparelho utiliza um sentido único de fluxo, da caixa superior para os corpos de prova e daí para a caixa sobre o fole. A água colocada na caixa superior (de PVC) é antes deionizada e fervida e depois tratada para eliminação do oxigênio.

A pressão sobre as amostras é mantida constante graças a compensações demonstradas no item seguinte.

- (1) caixa d'água de cimento amianto;
- (2) filtro tipo doméstico;
- (3) câmara de vácuo;
- (4) bomba hidráulica centrífuga;
- (5) balão de compensação;
- (6) reservatório de água deaerada e filtrada;
- (7) balão de ar em PVC flexível ou camada de nitrogênio ou CO_2 localizado dentro de (6);
- (8) fole cuja atmosfera interna está interligada com (7);
- (9) bomba de vácuo;
- (10) retentor de unidade do ar, imerso em caixa com gelo seco;
- (11) controlador automático de nível;
- (12) relé que distribui a corrente para o motor da bomba de vácuo;
- (13) eletrodo na posição de nível máximo;
- (14) eletrodo na posição de nível mínimo;
- (15) tubo piezométrico da câmara de vácuo;
- (16) contrapeso para diminuir o peso sobre o fole;
- (17) mola movimentada pelo giro do eixo;
- (18) tubo piezométrico da amostra;
- (19) amostra de ensaio.

Figura 4.1. Esquema do aparelho montado para os ensaios, sem escala. A linha pontilhada destaca a parte utilizada na terceira forma de uso, à direita.

Equacionamento das pressões no aparelho

Seja "N" a altura do nível piezométrico da água no reservatório superior (caixa de PVC) acima do nível máximo da água nesse reservatório; "H" a diferença entre a altura da água no reservatório e o nível máximo da mesma; "B" a área da seção horizontal do reservatório; "A" a área de contato entre os gomos do fole; "P" o peso sobre o fole; "D" a densidade da água.

Foi constatado que a pressão do ar dentro do fole é igual ao peso existente sobre esse fole dividido pela área de contato entre os gomos do mesmo. À medida que esse fole enche ou esvazia, essa área de contato diminui ou aumenta, variando ao mesmo tempo a pressão do ar. Chamando de σ essa pressão, tem-se:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (4.1)$$

Esta pressão é integralmente transmitida à água no reservatório de PVC, pois o fole e a camada de ar ou nitrogênio sobre aquela água formam um circuito fechado. Portanto

$$(N + H) D = \sigma \quad (4.2)$$

Por outro lado, o valor de P varia conforme uma constante acrescida do peso da água que saiu do reservatório de PVC, passou pelos corpos de prova e se acumulou na caixa sobre o fole.

Logo:

$$P = \text{Constante} + BHD \quad (4.3)$$

Outrossim, o valor de "A" depende do grau de enchimento do fole, ou mais propriamente, de sua altura, aqui convencionalmente por "Z". Conseqüentemente:

$$A = f(Z) \quad (4.4)$$

Essa função foi determinada experimentalmente. Sem circulação de água e peso constante sobre o fole, fez-se variar o volume de ar no sistema e mediu-se a sua pressão em termos de coluna de água $(N + H) D/B$. A divisão do peso constante pela pressão dava a área de contato entre os gomos, a cada altura do fole.

O resultado está expresso no gráfico da Figura 4.2.

Figura 4.2. Gráfico de $A = f(Z)$ do aparelho montado para os ensaios.

Pode-se observar que para alturas do fole de 3 a 16 cm, a relação entre "A" e "Z" é praticamente linear e, portanto:

$$A = a - bZ \quad (4.5)$$

sendo a e b coeficientes.

Pode-se também determinar experimentalmente o valor de H em função de Z. Para tanto foi mantido um peso constante sobre o fole e o reservatório enchido gradativamente, ao mesmo tempo em que eram medidas as alturas do fole. A relação $(\text{Constante} - V_0 \text{ lume}/B)$ dá o valor de H, o qual é correlacionado a Z medido. O gráfico na Figura 4.3 mostra esta correlação.

Como esta relação é linear pode-se considerar

$$H = m - nZ \quad (4.6)$$

sendo m e n coeficientes.

Relacionando agora as equações (4.1) e (4.2) e fazendo as devidas substituições, tem-se

$$(N + H)D = \frac{P}{A} ;$$

$$N = \frac{\text{Const.} + mBD}{AD} - HD$$

$$N = \frac{\text{Const.} + mBD - nBDZ}{D(a-bZ)} - mD + nZD \quad (4.7)$$

Figura 4.3. Gráfico de $H = f(Z)$ do aparelho montado para os ensaios.

Como mBD significa uma constante em termos de peso pode ser juntado à outra Constante, passando a "C", e portanto a expressão fica:

$$N = \frac{C - nDBZ}{D(a-bZ)} + nZD \quad (4.8)$$

No aparelho utilizado os coeficientes das equações lineares para $A = f(Z)$ e $H = f(Z)$ foram determinados por regressão linear pelo método dos mínimos quadrados, sendo r^2 (coeficiente de correlação ao quadrado) da primeira equação 0,98 e da segunda 1,00 e os coeficientes $a = 1.646,36$, $b = 34,87$, $m = 9,1$ e $n = 0,70$. B mede 2.121 cm^2 e para D admite-se o valor de 1 g/cm^3 .

Substituindo-se as constantes da fórmula (4.8) pelos seus valores, tem-se:

$$N = \frac{C - 1484,7 Z}{1646 - 34,87 Z} + 0,7 Z - 9,1 \quad (4.9)$$

A constante C é composta de um peso inicial que corresponderia ao peso da caixa de cimento amianto sobre o fole acrescido da expressão "mBD", a qual, pelos parâmetros acima, teria um valor de 20786 g. A Figura 4.4 mostra a curva de variação de N para $C = 35.000$ g; $C = 30.000$ g; $C = 25.000$ g.

Figura 4.4. Gráfico de $N = f(Z)$ do aparelho montado para os ensaios.

Estas equações pressupõem que não haja variação no volume de água nem de ar, portanto, não pode haver vazamentos, nem retiradas de água e nem acréscimos. Um acréscimo de água provoca um aumento de nível piezométrico, pois significaria criar um novo nível máximo teórico que serve de referência para "N" e "H", da mesma forma que uma retirada provoca um abaixamento do nível. Um acréscimo ou retirada de ar, ou nitrogênio, ou CO_2 , no sistema, também provoca um desequilíbrio pois, "A" depende do estado de enchimento do fole ou mais propriamente de "Z".

Quando se retira água para as análises químicas, deve-se recolocar a mesma quantidade no sistema. O vácuo, por outro lado, favorece a evaporação, mas como toda quantidade evaporada fica retida sob a forma de gelo, no retentor de proteção à bomba de vácuo pode-se verificar que a perda por esta modalidade é desprezível.

O volume de água que se acumula na câmara de vácuo deixa de contribuir para a compensação das pressões que mantêm o nível da água constante e, como é uma quantidade variável, influi

ria nesse equilíbrio dinâmico. Por isso, esse volume é jogado ao balão de compressão e liberado lentamente.

Regulando-se convenientemente o registro de gaveta situado na entrada da caixa de PVC, consegue-se introduzir, no sistema que mantém o equilíbrio das pressões, a mesma quantidade que está saindo daquele sistema e se acumulando na câmara de vácuo.

O movimento do fole deve se desenvolver com um atrito praticamente nulo. Observou-se que mantendo-se horizontalizadas as superfícies inferior e superior do fole, o funcionamento é satisfatório.

O peso inicial sobre o fole, "Constante", pode ser modificado para mais ou para menos, com a finalidade de um melhor ajuste das curvas de calibração. Para diminuir esse peso, suspende-se outro em uma cordinha que, passando por um eixo e uma roldana, tende a suspender o primeiro peso.

O eixo referido no parágrafo anterior tem ainda outra finalidade. À medida em que o fole sobe ou desce por ação da cordinha que suspende o contrapeso, esse eixo gira e enrola ou desenrola seis linhas as quais podem esticar molas que, por sua vez, introduzirão uma força de torque em sentido contrário ao contrapeso, podendo melhorar a estabilização do nível. Este ajuste requer muitas tentativas. Como as variações de nível eram insignificantes, esse ajuste com molas foi dispensado.

Segundo a lei de Boyle-Mariotti, a variação de pressão do ar no fole acarreta uma variação de volume, que poderia representar outro fator na equação de equilíbrio, pois $A = f(Z)$. Em vista disso, calculou-se a variação máxima de pressão e consequentemente a variação máxima de volume. A variação de pressão é dada por

$$\Delta\sigma = \frac{C - nDBZ_{\max}}{D(a - bZ_{\max})} D - \frac{C - nDBZ_{\min}}{D(a - bZ_{\min})} D \quad (4.10)$$

Tomando-se $C = 30.000 \text{ g}$ (faixa de valor mais usada);

$Z_{\max} = 16 \text{ cm}$; $Z_{\min} = 3 \text{ cm}$, ter-se-á:

$$\Delta\sigma = 5,739 \text{ g/cm}^2 - 16,573 \text{ g/cm}^2$$

$$\Delta\sigma = 10,834 \text{ g/cm}^2 \text{ ou } 0,01 \text{ Kg/cm}^2$$

Com a pressão do ar introduzido já está sob 1 atmosfera, as pressões máximas e mínimas serão:

$$P_{\max} = 1,0334 \text{ Kg/cm}^2 + 0,0166 \text{ Kg/cm}^2 = 1,05 \text{ Kg/cm}^2$$

$$P_{\min} = 1,0334 \text{ Kg/cm}^2 + 0,0574 \text{ Kg/cm}^2 = 1,04 \text{ Kg/cm}^2$$

Pela lei de Boyle Mariotti:

$$\frac{\text{Vol. max.}}{\text{Vol. min.}} = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} = 0,99 \quad (4.11)$$

Portanto, haverá uma variação máxima de 1% que pode ser desprezada, uma vez que a variação de "A" seria menor ainda.

4.3. FATORES NÃO GEOQUÍMICOS

Experiências anteriores sobre percolação em areia

A orientação dos ensaios realizados para esta pesquisa é devida, em parte, às observações sobre ensaio realizado no IPT, com a finalidade de testar o comportamento de areia artificial a ser usada como filtro. Pretendia-se verificar se os fragmentos de rocha, constituintes dessa areia, se alterariam sob determinadas condições, e, com isso, modificariam a permeabilidade do material filtrante. Foram usados dois corpos de prova com areia artificial e um com areia quartzosa, este último para servir de comparação.

Estes corpos de prova foram montados em tubos de vidro de 5,8 cm de diâmetro interno e 15 cm de comprimento, tendo na base uma tela de nylon e as paredes revestidas de resina epoxy para evitar caminho preferencial de percolação. Sobre esta tela foram colocados e compactados 3 cm de areia IPT grossa (retidas nas peneiras 4,8 mm e 2,4 mm de abertura) e neutra para impedir a passagem dos grãos mais finos contidos na areia problema. Sobre esta camada foram compactadas 300 g. de areia em cada corpo de prova, sendo dois com a artificial e um terceiro com normal IPT. Os volumes ocupados foram de 171,6 cm³, determinando um peso específico de 1,74 g/cm³. Após receber água, este parâmetro passou a 1,70 g/cm³.

O permeâmetro, montado para este ensaio, constou de um tanque com três saídas através de tubos de plástico que se ligavam hermeticamente aos tubos de vidro contendo os corpos de prova. Estes tinham as suas extremidades mergulhadas em cubas, com saída lateral, que mantinham a água em nível constante. A água percolada era conduzida por tubos plásticos ao outro tanque inferior.

Para se medir a vazão, coletava-se a água destes tubos em provetas graduadas. Do tanque inferior, a água era conduzida ao superior através de uma bomba hidráulica, escoando o excesso por um ladrão que mantinha o tanque superior em nível constante.

A água usada neste circuito foi sempre a mesma, e, inicialmente, foi deionizada, indo para ensaio com pH 6,5 a 25°C.

O fluxo era de cima para baixo, sob gradiente de 15,4. Medidas as vazões periodicamente e conhecendo-se a área normal ao fluxo de cada corpo de prova, 26,4 cm², foi possível determinar as permeabilidades e suas variações.

Para acelerar o processo de alteração, essas amostras sofreram duas séries de ciclos no aparelho Soxhlet, sendo o primeiro 27 ciclos e o segundo de 14. Se as ciclagens tivessem influido sensivelmente na alteração do material lítico, com reflexos em sua textura, logo após cada série de ciclos dever-se-ia notar uma queda de permeabilidade nos corpos de prova de areia artificial.

Verificou-se, no resultado, uma grande queda na permeabilidade não só na areia artificial como também na areia quartzosa, considerada inerte, independentemente das séries de ciclos no Soxhlet, atestando que essa queda era mais função das condições de ensaio que do material. Havia, certamente, influência de vários fatores que precisavam ou ser eliminados ou ter sua influência conhecida. A formação de bolhas de ar na areia, pois a água não era deaerada, a obstrução por algas, fungos ou bactérias, a remobilização da areia devido à grande força de percolação, a obstrução por material fino contido na água de abastecimento, seriam alguns dos fatores que poderiam ter influido na permeabilidade.

Montagem dos ensaios

Em vista da observação anterior, foi montada uma série de ensaios no intuito de responder àquelas questões sobre as causas da diminuição da permeabilidade.

Graças ao aparelho descrito anteriormente e montado para esse fim, iniciava-se com a vantagem de usar água deaerada na percolação. Ocorre que a água contendo ar dissolvido pode liberá-lo, formando bolhas de ar, se houver diminuição da pressão confinante ou aumento da temperatura. Se esse fenômeno se der na

areia, baixará a saturação desta e, por extensão, a sua permeabilidade aparente, como foi visto anteriormente.

O sentido do fluxo para esses ensaios deveria ser de baixo para cima ou horizontal e o gradiente inferior ao crítico para a condição de areia movediça. Segundo a teoria de Zaslavski e Kassif (61), a situação mais favorável ao desprendimento de partículas pequenas, em materiais não coesivos, é a de fluxo de cima para baixo e será tanto mais favorável quanto maior for o gradiente.

Nesta primeira série de ensaios foram usados os porta-amostras A, B e C, cujas representações estão nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7, respectivamente. Nestes, foram preparadas as amostras A-1, B-1, C-1, C-2, C-3, C-4, C-5, cujas características estão na Tabela 4.1 completadas pelas Figuras 4.8 e 3.3. A forma de uso do aparelho durante os ensaios com as amostras A-1 e B-1 foi a primeira (ver item 4.2, primeiro item) e com as restantes foi a segunda.

Figura 4.5. Porta-amostras "A" construído em acrílico transparente. Os tubos piezométricos de vidro só foram colocados durante o segundo ensaio com este equipamento.

Figura 4.6. Seção diametral do porta-amostras "B".

Figura 4.7. Seção diametral do porta-amostras "C".

Figura 4.8. Curva granulométrica da areia normal IPT usada nas amostras A-1 e B-1.

A sistemática para a determinação do coeficiente de permeabilidade previa que se recolhesse diariamente água saída da amostra, com proveta graduada, e se anotasse: dia, hora da coleta, tempo de coleta (t), volume coletado (V), diferença de nível de água (Δh) e temperatura da água.

Para o valor de L era tomado o comprimento percorrido no material de menor permeabilidade, ou seja, na areia fina, se a amostra contivesse apenas esta e areia grossa, ou na argila, se esta estivesse presente, pois a perda de carga no material mais grosseiro é desprezível. A permeabilidade calculada na temperatura ambiente pela fórmula de Darcy era recalculada para 20°C .

Influências biológicas

No ensaio destinado a verificar a influência biológica, foi usada água do abastecimento público sem qualquer tratamento químico.

TABELA 4.1. CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS USADAS NA PRIMEIRA SÉRIE DE ENSAIOS.

C.P.	Camada	Espessura cm	e	γ_{as} g/cm ³
A-1	Areia IPT(2)	2,5	0,845	1,420
	Areia IPT(1)	34,2	0,810	1,459
	Areia IPT(2)	2,5	0,845	1,420
B-1	Areia IPT(2)	2,5	0,901	1,378
	Areia IPT(1)	11,5	0,900	1,389
	Areia IPT(2)	1,0	0,901	1,378
C-1	Areia E.C.*	2,5	-	-
	Areia E.C.	10,0	0,609	1,647
	Areia E.C.*	2,5	-	-
C-2	Areia E.C.*	1,5	0,530	1,732
	Areia E.C.	7,5	0,556	1,703
	Solo E.C.	3,0	0,779	1,593
	Areia E.C.	1,5	0,572	1,684
	Areia E.C.*	1,5	0,652	1,604
C-3	Areia E.C.*	1,5	0,769	1,498
	Areia E.C.	7,5	0,588	1,669
	Solo E.C.	3,0	0,779	1,593
	Areia E.C.	1,5	1,094	1,265
	Areia E.C.*	1,5	0,246	2,126
C-4	Areia E.C.*	1,5	0,708	1,551
	Areia E.C.	9,0	0,613	1,643
	Solo E.C.	1,0	0,504	1,885
	Areia E.C.	2,0	0,405	1,735
	Areia E.C.*	1,5	0,785	1,484
C-5	Areia E.C.*	1,5	0,735	1,527
	Areia E.C.	9,0	0,633	1,622
	Solo E.C.	1,0	0,759	1,612
	Areia E.C.	2,0	0,644	1,693
	Areia E.C.*	1,5	0,558	1,733

e = índice de vazios

 γ_{as} = peso específico aparente

Areia IPT(1) = areia normal IPT, quartzosa e algo feldspático com peso específico de grãos de 2,64 g/cm³, cuja curva granulométrica encontra-se na Figura 4.8.

Areia IPT(2) = areia semelhante à anterior, da qual foram retiradas as frações inferiores a 2,0 mm, tendo para peso específico dos grãos o valor de $2,62 \text{ g/cm}^3$.

Areia E.C.* = areia proveniente da Barragem Euclides da Cunha, da qual tomou-se apenas os grãos maiores que 1mm.

Areia E.C. = areia proveniente da Barragem Euclides da Cunha, cuja curva granulométrica encontra-se na Figura 3.3.

Solo E.C. = solo residual utilizado na maciço da Terra da Barragem Euclides da Cunha, tendo para peso específico dos grãos o valor de $2,834 \text{ g/cm}^3$.

A circulação da mesma água durante 26 dias no corpo A-1 e durante 21 dias no B-1 provocou uma diminuição da permeabilidade, como pode ser visto na Figura 4.9. As regressões lineares pelo método dos mínimos quadrados, para os valores dos coeficientes de permeabilidade modificados para $\ln K$, indicam que essa queda de permeabilidade segue uma lei logarítmica.

Observou-se, ainda, que as partes do aparelho que ficaram em contato com a água continham uma substância viscosa, principalmente nos filtros, os quais exigiam freqüentes limpezas.

Uma amostra de areia de A-1 foi enviada à CETESB - Divisão de Microbiologia, para análise bacteriológica onde foram detectadas bactérias redutoras do sulfato, gênero *Desulfovibrio*, NPM/100 ml:2400.

Influência da força de percolação

Em vista dos resultados obtidos com o ensaio anterior, concluiu-se que não bastava a deaeração da água e a manutenção de um fluxo de baixo para cima sob baixos gradientes para conseguir a condição de permeabilidade invariável. Seria necessário um tratamento de água de percolação para evitar o crescimento de algas, fungos ou bactérias.

Para o ensaio descrito a seguir foi usada a amostra C-1.

Para o tratamento da água houve uma tentativa de uso combinado de hipoclorito de sódio, como bactericida, de pentaclo-rofenato de sódio, como fungicida, e de sulfato de cobre, como algicida. No entanto, o hipoclorito de sódio libera cloro, que sendo gás, seria sugado pela bomba de vácuo. O sulfato de cobre

com pentaclorofenato dá um precipitado e, além disso, baixa o pH, o que era inconveniente. Optou-se, então, pelo uso de pentaclorofenato de sódio C_6Cl_5ONa , exclusivamente. Este produto destina-se a uso industrial e possui, conforme boletim técnico do fabricante, (Rhodia, 40), 86% de clorofenatos calculados em pentaclorofenato de sódio, 11% de outros sais sódicos e 3% de ingredientes inertes. É solúvel em água e é aceito como bactericida - fungicida - algicida para tratamento de águas industriais. É geralmente recomendada uma concentração inicial de 150 ppm. A cada 3 a 6 semanas devem ser feitos novos tratamentos podendo aí diminuir o teor para 100 ppm e 50 ppm depois do terceiro tratamento.

Figura 4.9. Gráfico das variações dos coeficientes de permeabilidade (K) das amostras A-1 e B-1, onde as retas representam as regressões lineares de $\ln k$ versus tempo.

Durante o ensaio realizado sob este método, foram colocados, em aproximadamente 25 litros de água, 6 g do produto escolhido no início, produzindo uma concentração de, aproximadamente,

240 ppm. Depois de muita perda de água foi adicionado, uma semana após, mais 3 g; depois de um mês, e após renovação de quase toda água e precipitação de pentaclorofenato, foi adicionado 7,0g da mesma substância.

Logo após a solubilização do pentaclorofenato de sódio, observa-se uma coloração vermelho púrpura. Com a circulação, o material colorido é retido nas velas do filtro, enquanto a água fica límpida. Sob $\text{pH} = 4,0$, esse produto se transforma totalmente em produto orgânico insolúvel. Verificou-se que a água deaerada, com $\text{pH} = 7,6$, quando exposta ao ar, passa a absorvê-lo baixando o pH e mostrando precipitado em forma de fiapos brancos. Por isso, foi adicionado, ao circuito do aparelho, um filtro adicional, cujo elemento filtrante era uma camada de Bidin. Com isto tentou-se prevenir prejuízos ao ensaio, quando, devido à necessidade de reparos, a água em circulação entrasse em contato com o ar.

Durante todo o período de ensaio não foi notado qualquer sinal de formação de algas.

Controlado o crescimento de fungos, algas ou bactérias, buscou-se, através deste método, verificar a influência do gradiente na permeabilidade. Por isso, durante certo período, os gradientes foram mantidos baixos e depois aumentados e diminuídos, sendo seus efeitos controlados pelas medidas de permeabilidade da mesma forma que no método anterior.

O ensaio realizado para verificação do gradiente tem seus resultados na Figura 4.10. Observa-se ali, um certo período de tempo, marcado pela reta horizontal, em que a permeabilidade permaneceu constante. Durante este tempo os gradientes permaneceram baixos. As quedas iniciais de permeabilidade devem-se, provavelmente, a um arranjo em uma textura pouco organizada ainda. Após o período de estabilização, foram aumentados os gradientes e o resultado foi nova baixa de permeabilidade.

Resistência à mobilização das partículas de argila

O sistema argila-areia foi testado com as amostras C-2, C-3, C-4, C-5. Estas foram saturadas com fluxo de baixo para cima e após essa operação, tiveram sua permeabilidade medida.

Figura 4.10. Gráfico da variação do coeficiente de permeabilidade da amostra C-1, onde as retas mostram a regressão linear log K versus tempo. O comprimento do traço horizontal sobre o ponto indica o tempo de percolação na escala, em dias. O número próximo ao ponto indica o gradiente.

As amostras C-2 e C-3 foram ensaiadas simultaneamente. Como apresentavam uma vazão muito pequena foram substituídas pelas C-4 e C-5. Persistindo o problema, esse ensaio foi interrompido não chegando a atingir sua finalidade que seria a de circular água da argila para a areia de cima para baixo.

Os dados obtidos estão na Tabela 4.2 e serviram para demonstrar que, mesmo sob altos gradientes, o material argiloso manteve permeabilidade praticamente constante, demonstrando a resistência imposta pela coesão do material argiloso que impediu a mobilização dos grãos.

TABELA 4.2. RESULTADO DO ENSAIO DE PERCOLAÇÃO NAS AMOSTRAS C-2, C-3, C-4 e C-5.

Dias	Amostra	Gradiente	Vazão (cm ³ /s)	K _{20°C} (cm/s)	Amostra	Gradiente	Vazão (cm ³ /s)	K _{20°C} (cm/s)
0	C-2	3,16	0,075	1,0x10 ⁻³	C-3	3,30	0,001	2,6x10 ⁻⁵
1		3,67	0,034	4,3x10 ⁻⁴		3,67	0,002	2,7x10 ⁻⁵
5		1,53	0,023	7,3x10 ⁻⁴		1,53	0,004	1,4x10 ⁻⁴
6		2,23	0,029	6,4x10 ⁻⁴		2,00	0,005	1,2x10 ⁻⁴
8		5,50	0,068	5,9x10 ⁻⁴		1,50	0,002	7,9x10 ⁻⁵
0	C-4	9,10	0,007	3,1x10 ⁻⁵	C-5	9,30	0,004	1,7x10 ⁻⁵
1		11,00	0,009	3,5x10 ⁻⁵		9,40	0,007	3,5x10 ⁻⁵
4		11,60	0,010	3,8x10 ⁻⁵		10,40	0,011	4,8x10 ⁻⁵
5		9,50	0,013	5,7x10 ⁻⁵		8,50	0,007	3,4x10 ⁻⁵
6		6,70	0,007	4,3x10 ⁻⁵		5,20	0,007	5,6x10 ⁻⁵
7		5,90	0,004	3,1x10 ⁻⁵		4,50	0,003	3,3x10 ⁻⁵
8		6,70	0,005	3,5x10 ⁻⁵		5,80	0,006	5,0x10 ⁻⁵
11		5,00	0,002	2,2x10 ⁻⁵		3,80	0,002	2,3x10 ⁻⁵
13		1,80	0,002	5,1x10 ⁻⁵		3,10	0,002	3,6x10 ⁻⁵
14		5,50	0,003	2,9x10 ⁻⁵		4,20	0,007	8,2x10 ⁻⁵
18		3,70	0,006	8,6x10 ⁻⁵		3,30	0,001	1,3x10 ⁻⁵
19		5,30	0,004	3,6x10 ⁻⁵		4,70	0,013	1,4x10 ⁻⁴
21		5,30	0,019	1,7x10 ⁻⁴		4,20	0,009	1,0x10 ⁻⁴
29		4,40	0,098	9,7x10 ⁻⁴		2,90	0,009	1,6x10 ⁻⁴
34		4,90	0,048	4,7x10 ⁻⁴		4,20	0,008	9,7x10 ⁻⁵

K_{20°C} = Coeficiente de permeabilidade a 20°C.

A segunda parte da experiência, isto é, a circulação de cima para baixo, não chegou a ser realizada com essas amostras por apresentar os seguintes inconvenientes. O tempo de percolação no material argiloso era tal que só permitia a passagem de pequena quantidade de água no período destinado ao ensaio, não justificando um aparelho de circulação contínua, o qual está preparado para uma realimentação elevada. Por outro lado, o tratamento químico para a obtenção do bicarbonato ferroso, indispensável para os estudos em questão, dificilmente seria controlado nesse sistema de circulação.

Em vista destes motivos, decidiu-se abandonar o porta-amostras C e a segunda forma de operar o aparelho, para introduzir os porta-amostras H, D, E, F e G e a terceira forma de operação.

4.4. METODOLOGIA PARA ESTUDO DOS FATORES GEOQUÍMICOS

Métodos para estudo do sistema argila-areia

Estes métodos consistem em fazer passar a água deaerada ou sem oxigênio dissolvido e, conforme o caso, com bicarbonato ferroso, primeiramente por material argiloso e depois pela areia. A finalidade é a de verificar as reações que se dão na passagem do material argiloso para a areia. A quantidade de água e, portanto, de solução podem ser avaliados pelo tempo de percolação multiplicado pela vazão.

As reações a serem estudadas no sistema argila-areia são duas: a aeração da água e a precipitação de hidróxido férrico na areia. As duas reações podem ser estudadas na mesma amostra, embora isto nem sempre tenha sido possível. A verificação da influência da cimentação por hidróxido férrico, na permeabilidade, corresponde a uma finalidade complementar dos ensaios.

Tendo em vista estas finalidades, a metodologia foi desenvolvida em etapas, para os quais foram construídos os porta-amostras, adiante apresentados, e adaptados os métodos de ensaio.

Ensaio com o porta-amostras A

O porta-amostras para este tipo de ensaio é apresentado na

Figura 4.5.

Monta-se o corpo de provas em camadas verticais, as quais são preenchidas e compactadas concomitantemente uma com as outras. Por conveniência, no sentido de diminuir o tempo de ensaio, a camada de argila é sempre de pequena espessura, ficando mais espaço para a areia. A argila representa o núcleo de terra de uma barragem, enquanto a areia o seu filtro.

O fluxo de água deve passar primeiro pela argila e depois pela areia. O porta-amostra pode ser usado na posição horizontal como mostra a Figura 4.5 ou na posição inclinada.

A posição normal do porta-amostras A é para fluxo horizontal, ficando sua parte superior sem vedação. Para se conseguir um fluxo o mais possível vertical, de cima para baixo, inclina-se esse porta-amostra até onde a água não extravase por sua parte superior. Nesta é superposta uma tampa para evitar o desmoronamento da areia e a passagem da água por cima da argila, vedada depois com parafina. Em consequência, o gradiente tem valores variáveis, bem como a velocidade de fluxo. A equação para a determinação de permeabilidade da argila foi deduzida a partir do esquema da Figura 4.11. O tubo piezométrico 1 marca o nível da água na entrada da camada de argila e o tubo 2 o nível na saída. Como este permaneceu sempre em zero e a perda de carga através da areia colocada antes da argila foi considerada nula, montou-se as equações abaixo para cálculo da permeabilidade da camada argilosa.

Através de uma fatia de espessura dx passará uma vazão dQ que, segundo a Lei de Darcy, será:

$$dQ = K \left(\frac{h}{L} + \frac{x \cdot \text{sen} \alpha}{L} + \frac{L \cdot \text{cos} \alpha}{L} \right) F \cdot dx \quad (4.12)$$

sendo F o lado da fatia perpendicular a dx . A vazão através de toda a área da amostra, como x varia de 0 a X , será

$$Q = \frac{K \cdot h \cdot F}{L} \int_0^X dx + \frac{K \cdot F}{L} \text{sen} \alpha \int_0^X x \cdot dx + K \cdot F \cdot \text{cos} \alpha \int_0^X dx + C \quad (4.13)$$

Substituindo os valores das integrais na equação 4.13 fica

$$Q = K \frac{h}{L} F \cdot X + K \cdot F \frac{\text{sen} \alpha \cdot X^2}{2L} + K \cdot F \cdot X \cdot \text{cos} \alpha + C$$

$$Q = K.F.X \left(\frac{h}{L} + \cos \alpha + \frac{X \cdot \text{sen} \alpha}{2L} \right) + C \quad (4.14)$$

F.X é a área (A) na fórmula de Darcy.

Nas condições limites, para $\alpha=0$, $\text{sen} \alpha=0$, $\cos \alpha=1$,

$$Q = K \left(\frac{h}{L} + 1 \right) A + C \quad (4.15)$$

e para $\alpha=90^\circ$, $\text{sen} \alpha=1$, $\cos \alpha=0$,

$$Q = K \left(\frac{h}{L} + \frac{X}{2L} \right) A + C \quad (4.16)$$

Mas verifica-se facilmente que para $\alpha=0^\circ$, $Q=K \left(\frac{h+L}{L} \right) A$ e, portanto, $C = 0$.

Pode-se dizer, assim, que a equação geral fica sendo

$$Q = K \left(\frac{h}{L} + \cos \alpha + \frac{X \cdot \text{sen} \alpha}{2L} \right) A \quad (4.17)$$

Figura 4.11. Esquema para o cálculo da permeabilidade de uma camada inclinada de argila entre outras de areia.

O gradiente máximo sendo $x = X$, será

$$i_{\max} = \frac{h}{L} + \cos\alpha + \frac{X \cdot \sin\alpha}{L} \quad (4.18)$$

e o gradiente mínimo, sendo $x = 0$, será

$$i_{\min} = \frac{h}{L} + \cos\alpha \quad (4.19)$$

Conclui-se também que, no caso do fluxo na horizontal, portanto $\alpha=90^\circ$, X fica sendo o desnível entre os dois tubos piezométricos, ou seja, a altura da argila com pressão hidráulica positiva acima do nível de entrada e saída de água; h passa a valer zero, pois não poderá haver coluna de água acima de x . Chamando Y à coluna de água entre o fundo do porta-amostra e o nível de entrada e saída, a área para a fórmula de Darcy será $(X + Y)$ e as fórmulas para cálculo de vazão e permeabilidade serão

$$Q = K \frac{X}{2L} (X + Y) F$$

$$K = \frac{2 \cdot Q \cdot L}{X \cdot F(X + Y)} \quad \text{ou} \quad \frac{2 \cdot V \cdot L}{t \cdot X \cdot F(X + Y)}$$

Para o controle de ensaio, assim como nos anteriores, são anotados: dia, hora da coleta, tempo de coleta (t), volume coletado (V), diferença de nível da água (Δh), temperatura da água, teor de oxigênio dissolvido na água, teor em ferro, dureza, teor de HCO_3^- e pH. Para as análises químicas a água é coletada antes e depois de percolar pela amostra em estudo.

A água, ao entrar na amostra deve estar isenta de oxigênio dissolvido e poderá conter ou não bicarbonato ferroso.

Os resultados esperados nesse ensaio são: primeiro, que ao sair do corpo de provas, a água tenha absorvido algum oxigênio e, segundo, que se estiver carregada de bicarbonato ferroso, deixe uma tintura de hidróxido férrico na areia.

Ensaio com o porta-amostras H

Em vista das dificuldades com o porta-amostras A, foi cons

truido outro modelo denominado de H, cujo desenho está na Figura 4.12. Pode ser aberto em duas extremidades e possui três orifícios: um para entrada de água, outro para sua saída e outro, no meio, para a entrada de ar. A tela que fica próxima às duas extremidades tem uma malha de 150μ .

Figura 4.12. Porta-amostra H, construído em acrílico transparente.

A preparação da amostra inicia com a compactação da argila na umidade ótima sobre a tela, estando o outro lado aberto. A mesma operação é repetida com a areia sobre a argila. Coloca-se depois a outra tela e as duas tampas de acrílico.

A finalidade deste ensaio é a de comprovar a existência de uma zona de aeração na areia abaixo da argila.

Para a saturação da amostra na água do ensaio, provoca-se um fluxo de baixo para cima passando primeiramente na argila e depois na areia, mantendo-se o orifício do meio fechado. A se

guir, o porta-amostras, juntamente com o dispositivo de entrada de água é girado, passando a parte de baixo para cima. Abre-se, então, o orifício do meio para a entrada de ar e mede-se o volume que penetra na amostra com uma bureta. Esta é munida de uma bolinha que se desloca em seu interior, indicando o fluxo de ar, e está conectada à mangueira que dá acesso àquele orifício. A camada de argila fica na horizontal e o fluxo de água tem sentido de cima para baixo. As medidas tomadas são as mesmas indicadas no ítem anterior com relação ao fluxo líquido. Cabe ressaltar que a permeabilidade medida corresponde, basicamente, a da argila.

A mesma amostra serve para percolação com solução de bicarbonato ferroso.

Os resultados esperados são os seguintes. Ao girar o corpo de provas e abrir o orifício de saída d'água, espera-se que haja uma sucção de ar pelo orifício do meio, pois o fluxo pela camada de argila não alimentará a areia com a mesma velocidade que a água pode sair desta. Com isso, propiciar-se-á uma zona não saturada na areia, o que provocará uma absorção de oxigênio pela água. Se houver bicarbonato ferroso haverá, provavelmente, precipitação de hidróxido férrico.

Ensaios com o conjunto D-E-F-G

O porta-amostras D, representado na Figura 4.13, e os de letras E, F e G, só diferem entre si pelo comprimento dos cilindros destinados à areia, os quais medem 30 cm, 15 cm, 8 cm e 2 cm respectivamente. Eles permitem determinar a permeabilidade tanto na argila quanto na areia, circular água em qualquer sentido e gotejá-la sobre a areia.

A amostra é preparada em duas partes, a argila é compactada no anel a ela reservado e isoladamente do restante do porta-amostras. Da mesma forma, a areia é compactada no anel ou cilindro a ela reservada.

As medidas tomadas são as mesmas que as dos ensaios com o porta-amostras A.

Em condições normais, a permeabilidade medida é a da argila. No entanto, se se quiser medir a permeabilidade só da areia, passa-se água pela entrada lateral e pelo furo inferior.

Os quatro tamanhos dos porta-amostras são destinados a aplicação da fórmula para a capacidade de oxigenação.

Figura 4.13. Seção diametral do porta-amostras D. Os cilindros são de PVC e as telas de nylon têm malha de 150μ .

A capacidade de oxigenação de um sistema de tratamento de esgoto é medida a partir da equação abaixo (Ramalho, 38)

$$\frac{dC_1}{dt} = K_1 a(C_s - C_1) \quad (4.22)$$

sendo C_1 = a concentração do oxigênio no corpo do líquido (mg/l);

C_s = concentração de saturação de oxigênio (mg/l)

t = tempo;

K_1 = coeficiente da película líquida (g de O_2 (dia) (cm^2) (unidade C);

a = área de interface por unidade de volume (cm^2/cm^3).

Neste ensaio o tempo foi calculado da seguinte maneira:

$$t = \frac{L(\text{areia})}{v(\text{argila})} \quad (4.23)$$

$$v(\text{argila}) = \frac{Q}{A} \quad (4.24)$$

$$t = \frac{L(\text{areia}) \cdot A}{Q} \quad (4.25)$$

Admite-se que a argila controle a velocidade de fluxo, en quanto a areia a extensão desse fluxo.

A explicação para a transferência de um gás para um líquido é dada pela teoria de duas películas, uma gasosa e outra líquida. Para gases de baixa solubilidade no líquido, como o oxigênio, a resistência controladora da transferência é exercida pela película líquida. Em águas paradas, a absorção de oxigênio é controlada pela difusão molecular. Onde há mistura das duas fases, a transferência é controlada pela difusão e convecção.

As determinações fornecem K_1a sem separar o fator K_1 . A adiferença ($C_s - C_1$) é denominada de déficit de oxigênio.

Integrando a equação anterior e assumindo K_1a como independente do tempo de amostragem, tem-se:

$$\ln (C_s - C_1) = K_1at + \text{constante} \quad (4.26)$$

As medidas de déficit de oxigênio podem ser plotadas num gráfico semi-log contra o tempo. A inclinação da reta obtida pela regressão dos pontos dará K_1a .

A capacidade de oxigenação é definida como a taxa de transferência do oxigênio dC/dt a uma concentração inicial de oxigênio igual a zero e condições standad (20°C de temperatura).

A água introduzida na câmara de cima atravessa a camada argilosa e pinga sobre a areia. Quanto maior for o percurso neste material, maior a probabilidade de absorver, pois o último meio não está saturado.

Os resultados esperados são de que a água ao sair do porta-amostras, mostre um déficit de oxigênio inversamente proporcional ao tempo de percolação através da areia.

Preparação do bicarbonato ferroso e desoxigenação na água

O bicarbonato ferroso, sendo muito instável, tem de ser preparado na ocasião da experiência. O modo de preparação, em vista das facilidades disponíveis, foi o de se fazer reagir gelo seco (CO_2) com água e pó de ferro dentro de um balão volumétrico de 500 ml e um erlenmayer de 500 ml. O pó de ferro (ferro reduzido MERCK P.A.) era colocado na água, tanto no erlenmayer quanto no balão. A seguir colocava-se gelo seco no balão com água, fechando-se com uma rolha de borracha atravessada por uma mangueira que conduzia os gases exalados ao erlenmayer com entrada lateral. Este tinha a sua saída estrangulada. O gelo seco sublimava, borbulhando n'água, formando uma atmosfera de CO_2 no balão, borbulhando também no erlenmayer, tendo antes expulso o oxigênio. As reações são as seguintes:

Uma determinação sobre uma das soluções resultantes revelou os seguintes teores: 250 a 300 mg/l de Fe^{++} e 7,8 mval/l ou 475,8 mg/l de íon bicarbonato no balão volumétrico e 100 mg/l de Fe^{++} e 4,0 mval/l ou 244 mg/l do íon bicarbonato no erlenmayer. O pH no primeiro era de 6,1 e no segundo 6,0.

Como o isolamento do ar no erlenmayer não era perfeito, havia, com o passar dos dias, a formação de um precipitado ocre de hidróxido de ferro finamente dividido e suspenso na água. Por isso, posteriormente usou-se apenas a solução do balão.

A solução de bicarbonato ferroso, inicialmente, era lançada à caixa com água deaerada, mas como essa água continha certa quantidade de oxigênio dissolvido, este reagia com o ferro dando grande quantidade de precipitado naquela caixa e deixando pouco metal em solução. Mais tarde, foi introduzida através de um funil, dotado de papel de filtro e colocado numa mangueira junto à entrada da amostra. Dessa forma, o oxigênio dissolvido que existia na água da mangueira era logo saturado podendo, o corpo de prova, ser atingido por teores mais elevados de bicarbonato ferroso. ~~Mesmo~~ com a introdução desse líquido adicional, o nível piezométrico era mantido praticamente inalterado pelo sistema auto regulável do aparelho. Este sistema foi usado no corpo de provas A-2.

Por fim, o método que deu melhores resultados é o seguinte: introduz-se CO_2 na caixa de acrílico do aparelho, através do cano de saída d'água, fazendo com que esse gás borbulhe na água e saia durante certo tempo pelo respiro dessa caixa para expulsar o ar. Fechado esse respiro, o CO_2 enche o fole e cria uma atmosfera desse gás, o qual reage lentamente com a água formando H_2CO_3 que, por sua vez, reage com o pó de ferro espalhado no fundo da caixa segundo a reação já mencionada anteriormente.

A retirada do oxigênio dissolvido na água pode ser obtida de três maneiras: a primeira, através de vácuo que se forma no aparelho de ensaio (1ª e 2ª forma de uso); a segunda, pela fervura da água; a terceira por reações com Na_2SO_3 . Neste caso, para cada 1,0 mg/l de oxigênio dissolvido, adiciona-se 7,9 mg/l de Na_2SO_3 e 1,5 mg/l de Co^{++} (38) ou 4,96 mg/l de $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ como catalizador. Os dois primeiros métodos não eliminam totalmente o oxigênio dissolvido, ficando seu teor em torno de 2 mg/l. O mais recomendável é a combinação do primeiro ou segundo com o terceiro método.

4.5. CONCLUSÕES DO QUARTO CAPÍTULO

A metodologia destinada a simulações foi desenvolvida em etapas. Na primeira etapa, foi construída a aparelhagem que permitiu alimentar o corpo de provas com água sob pressão constante e ainda isolada do contato com o ar, ou mais propriamente, do oxigênio. Este contato deveria ocorrer no corpo de provas. As pequenas variações nas pressões, cerca de 1 cm de coluna d'água, nas três formas de uso do aparelho, foram consideradas insignificantes, como pode ser visto, por exemplo, no gráfico da Figura 4.4.

Na primeira e segunda forma de uso, a deaeração era feita no próprio aparelho, sob circuito fechado, e na terceira forma, a água era fervida, mantida fora do contato com o ar e tratada quimicamente para a retirada do oxigênio dissolvido, pois as primeiras formas não permitiam a retirada total desse gás.

Na segunda etapa, e primeira série de ensaios foram testados alguns métodos para se verificar o comportamento do sistema. Nos primeiros ensaios com as amostras A-1 e B-1 os fatos observados permitiram interpretar a diminuição de permeabilidade co

mo consequência principalmente do surgimento de matéria orgânica, devido ao crescimento de seres vivos, provavelmente algas, fungos e bactérias, nos poros da areia.

No ensaio com a amostra C-1 ficou comprovado que a permeabilidade das areias é influenciada por fluxos sob altos gradientes. Admite-se que esse fluxo mobilize os grãos, provocando um arranjo mais compacto onde os grãos menores penetrariam nos poros maiores e, em consequência, diminuiriam a permeabilidade. No período em que o gradiente permaneceu baixo, a permeabilidade manteve-se constante.

A partir desses testes, passou-se a admitir que ensaios em areia, com a finalidade de se estudar influências geoquímicas, deveriam ser realizados sob baixos gradientes e com água tratada para evitar o crescimento de seres vivos, ao menos quando o ensaio fosse demorado. Por outro lado, o ensaio com os corpos de prova C-2, C-3, C-4, C-5 serviu para demonstrar que, mesmo em fluxos sob altos gradientes, a argila mantém a permeabilidade quase constante, demonstrando a resistência imposta pela coesão à força de percolação.

Na terceira etapa e segunda série de ensaios foram experimentados os métodos para se estudar as transformações químicas no sistema argila-areia, pois é o que reflete a situação existente numa barragem. Nessas experiências foram usados os porta-amostras "A", "H" e o conjunto D,E,F,G. Usando-se o porta-amostras "A" na posição inclinada, a equação para determinação da permeabilidade da argila teve de sofrer uma adaptação, como ficou demonstrado nas equações (4.12) a (4.21). O conjunto D,E,F,G foi construído para se aplicar as fórmulas utilizadas para medida da oxigenação de lodos provenientes de esgotos, conforme estão expressas de (4.22) a (4.25). Com estas equações procurava-se determinar a capacidade de absorção de oxigênio de um sistema com fluxo de água deaerada, passando da argila para a areia, de cima para baixo. Admitia-se que a transferência de oxigênio para a água se desse a partir de bolhas de ar existentes na areia.

O tratamento da água sofreu algumas modificações a medida que se iam acumulando as experiências. Nos últimos ensaios, o tratamento, para evitar o desenvolvimento de seres vivos, ficou reduzido apenas à fervura da água uma vez que o tempo de ensaio era geralmente pequeno.

Embora a deaeração realizada no aparelho descrito ou a

fervura diminua bastante o teor de oxigênio dissolvido, o pouco que permanece é suficiente para oxidar e precipitar o íon ferroso. Por isso considera-se necessário o tratamento químico com Na_2SO_3 para se chegar à ausência daquele gás em solução.

A preparação do bicarbonato ferroso separadamente, como foi feito nas primeiras experiências, não deu bom resultado porque, entrando em contato com o oxigênio do ar ou com o dissolvido na água, transforma-se em hidróxido férrico e precipitava. Mesmo que a água estivesse isenta desse gás, aquela não é a maneira mais prática. Os melhores resultados foram obtidos com o borbulhamento de CO_2 na água e formação de uma atmosfera deste gás o qual, aos poucos, foi reagindo com a água e, a partir dele, com o ferro em pó introduzido no líquido.

CAPÍTULO 5

RESULTADO DOS ENSAIOS DE ABSORÇÃO DE OXIGÊNIO PELA ÁGUA E DE CIMENTAÇÃO DA AREIA

5.1. EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

Composição das amostras

A composição das amostras usadas nos ensaios descritos neste capítulo está na Tabela 5.1, bem como algumas características de cada camada, seguidas das observações que se fazem necessárias. A Tabela 5.2 completa a anterior com os dados de permeabilidade da amostra A-2 medidos por longo período e a Figura 5.1 caracteriza a areia cuja curva granulométrica ainda não tinha sido mostrada.

Figura 5.1. Curvas granulométricas das areias (5) e (7) usada nos ensaios.

TABELA 5.1. CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS USADAS NA SEGUNDA SÉRIE DE ENSAIOS.

C.P.	Camada	Espessura cm	γ _{as} g/cm ³	K g/cm ³
A-2	Areia (1)	2,0	-	-
	Areia (2)	2,0	-	-
	Solo (3)	4,0	0,943	1,458 (tabela 5.2)
	Areia (2)	29,2	0,597	1,659
	Areia (1)	2,0	0,690	1,568
A-3	Solo (4)	1,5	0,986	1,400
	Areia (5)	37,7	0,549	1,704
D-1	Solo (4)	1,0	0,671	1,663
	Areia (6)	30,0	0,684	1,574
E-1	Solo (4)	1,0	0,667	1,668
	Areia (6)	15	0,609	1,647
F-1	Solo (4)	1	0,651	1,683
	Areia (6)	8	0,475(8)	1,796(8)
G-1	Solo (4)	1	0,679	1,655
	Areia (6)	2	0,311(8)	2,020(8)
D-2	Areia (6)	30	0,596	1,660
E-2	Areia (6)	15	0,626	1,629
F-2	Areia (6)	8	0,637	1,619
G-2	Areia (6)	2	0,542(8)	1,718(8)
D-3	Areia (6)	30	0,516	1,748
E-3	Areia (6)	15	0,498	1,768
F-3	Areia (6)	8	0,465(8)	1,808(8)
G-3	Areia (6)	2	0,323(8)	2,002(8)
H-1	Solo (4)	0,8	0,918	1,649
	Areia (7)	39,3	0,531	1,737
4,8 x 10 ⁻⁵				

(1) areia proveniente da barragem Euclides da Cunha, da qual to-
mou-se apenas os grãos maiores que 1 mm.

(2) areia proveniente da barragem euclides da Cunha.

- (3) solo residual utilizado no maciço de terra da barragem Euclides da Cunha.
- (4) solo argiloso proveniente da barragem de Xavantes já caracterizado.
- (5) areia normal IPT, quartzosa, com peso específico dos grãos de $2,64 \text{ g/cm}^3$ e curva granulométrica na Figura 5.1.
- (6) areia proveniente da jazida que forneceu material para o filtro da barragem de Xavantes, já caracterizada.
- (7) areia normal IPT com peso específico dos grãos $2,66 \text{ g/cm}^3$ e curva granulométrica na Figura 5.1.
- (8) estes valores foram calculados considerando-se a espessura indicada, mas como devido a pressão interna a tela ficava abaulada, permitindo um volume maior. Tais valores devem ser considerados irreais.

TABELA 5.2. PERMEABILIDADES DA ARGILA DA AMOSTRA A-2.

Fluxo		$K_{20^\circ\text{C}}$		
Aproximadamente horizontal	19	$1,1 \times 10^{-3}$	419	$6,5 \times 10^{-5}$
	59	$8,2 \times 10^{-4}$	429	$8,3 \times 10^{-5}$
	69	$4,7 \times 10^{-4}$	439	$6,9 \times 10^{-5}$
	79	$9,2 \times 10^{-4}$	449	$7,1 \times 10^{-5}$
	99	$5,1 \times 10^{-4}$	479	$5,5 \times 10^{-5}$
	309	$1,5 \times 10^{-4}$	499	$7,3 \times 10^{-5}$
	349	$1,2 \times 10^{-4}$	509	$2,8 \times 10^{-5}$
	369	$9,6 \times 10^{-5}$	549 (1)	$8,7 \times 10^{-5}$
	379	$8,2 \times 10^{-5}$	569	$9,0 \times 10^{-5}$
	409	$6,4 \times 10^{-5}$	649	$8,1 \times 10^{-5}$
Vertical com amostra inclinada	659	$1,2 \times 10^{-4}$	739	$1,4 \times 10^{-4}$
	659	$1,6 \times 10^{-4}$	779	$9,6 \times 10^{-5}$
	669	$3,4 \times 10^{-4}$	809	$1,1 \times 10^{-5}$
	699	$2,5 \times 10^{-4}$	829	$2,4 \times 10^{-5}$
	709	$2,0 \times 10^{-4}$	859	$1,2 \times 10^{-5}$
	729	$1,6 \times 10^{-4}$		

(1) As medidas do 549 ao 649 dia, com fluxo aproximadamente horizontal, são as mais exatas, pois contaram com o auxílio dos tubos piezométricos. Entretanto a vibração da broca perfurando o acrílico causou uma modificação no arranjo do material, o que deve ter se refletido na permeabilidade.

Os corpos de prova D-2, E-2, F-2, G-2, D-3, E-3, F-3 e G-3, correspondem a simplificações dos similares de nº 1, pois em vez da camada de argila distanciada de 2,5 cm de areia, foram colocadas folhas de papel-filtro diretamente em contato com a areia de tal forma que havendo uma filtração lenta ao longo de toda a superfície do papel, a alimentação de líquido na areia também fosse uniforme. A área da base dessas amostras é de $34,21 \text{ cm}^2$. As permeabilidades não foram determinadas devido à impossibilidade prática em função do tipo de montagem. Houve o cuidado de se colocar certo número de filtros de papel que permitissem um fluxo bem inferior àquele que saturaria a areia.

Desenvolvimento dos ensaios

Com o corpo de provas A-2 foi usada a segunda forma de operar (ver Ítem 4.2) o aparelho antes descrito e a deaeração da água foi realizada, portanto, pelo vácuo. Durante o ensaio de percolação foram introduzidas quantidades variáveis de bicarbonato ferroso. Neste caso, houve tentativa de observar simultaneamente a absorção de oxigênio e a cimentação. Pretendia-se manter uma circulação constante, mas devido a dificuldades de diversas ordens, essa foi intermitente, cerca de uma hora por dia, antes de inclinar o porta-amostras. Na posição inclinada, a circulação foi praticamente constante.

Com a amostra A-3 havia intensão de estudar a absorção de oxigênio e posteriormente a precipitação de hidróxido de ferro. A forma de operar o aparelho foi a terceira (ver Ítem 4.2). Em aproximadamente 28 litros de água fervida com 2,2 a 2,5 mg/l de oxigênio dissolvido foi adicionado, em duas parcelas, a quantidade total de 0,62 g de Na_2SO_3 e alguns grãos de $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Após um dia o teor de oxigênio dissolvido era nulo.

Inicialmente o porta-amostras A com o corpo de provas A-3 foi colocado numa posição inclinada com $\alpha=11,74$ (ver Figura 4.11). Quando o corpo de provas foi preparado, o teor de umidade era de 6,63% e ao iniciar o ensaio a aparência era de areia seca.

Para evitar contato da água com o ar, antes da entrada, foi colocada uma película de óleo sobre a mesma. Como não havia vedação junto a tampa, logo de início a água transbordou por cima da areia, sem passar pela argila, acelerando assim o umedecimento daquela.

Posteriormente, aquele porta-amostra foi colocado na posição horizontal, estando, no entanto, a areia umedecida pela experiência anterior, realizada um dia antes, mesmo sofrendo jato de ar. Em consequência desse jato de ar, as primeiras coletas de água mostraram uma cor leitosa, provocada provavelmente pela emulsão de ar e água. Sobre a coluna de água de entrada foi colocada uma gota de óleo para isolamento do ar.

Na outra experiência realizada com a mesma amostra para estudar a precipitação de hidróxido férrico, foram usados cerca de 11 litros de água deionizada, fervida e tratada com 0,16 g de NaSO_3 , uma pitada de $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, ferro em pó e CO_2 em forma de gelo seco. O porta-amostra foi colocado na posição horizontal e, sobre a água situada antes da entrada da amostra, um pingo de óleo para evitar o contato daquela com o ar. A percolação iniciou às 8:25 h de um dia e findou às 13 h do dia seguinte. Durou 28 h e 35 minutos.

Os dados hidráulicos das duas experiências, na posição horizontal, estão na Tabela 5.3. As permeabilidades calculadas por esses ensaios estão na Tabela 5.1.

TABELA 5.3. DADOS HIDRÁULICOS DA PERCOLAÇÃO ATRAVÉS DA AMOSTRA A-3 EM POSIÇÃO HORIZONTAL.

Ensaio	Nível entrada cm	Nível 1º piez. cm	Nível 2º piez. cm	Nível saída cm	Vazão cm^3/s	Temp. $^{\circ}\text{C}$	Veloc. média cm/s	Tempo passagem min.
1º	16,20	1,240	1,025	0,0	0,0969	16	0,0045	145
	12,94	0,885	0,750	0,0	0,080	15,5	0,0050	131
2º					0,059	18	0,0037	177
	13,19	1,73	1,54	0,0	0,063	20	0,0039	168

Para o ensaio com o corpo de provas H-1, foi usado o aparelho em sua terceira forma (item 4.2) e borbulhado na água N_2 para retirar parte do oxigênio dissolvido e formar uma atmosfera inerte em contato com a água. Para retirar os 4,1 mg/l de oxigênio dissolvido que restaram, foi adicionado 1254 mg de Na_2SO_3 e 197 mg de $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ em 33 litros de água. Após 1 dia, o teor de oxigênio dissolvido era de 2,5 mg/l. A uma temperatura de

25°C o tempo de percolação, através do corpo de provas, foi calculado em 16 horas e 54 minutos (16,9 h).

Após girar o porta-amostras para permitir o fluxo de cima para baixo, foi fechada a entrada superior, aberta a inferior e permitida a entrada de ar pelo orifício lateral, sob controle, abrindo-se levemente a torneira da bureta colocada em posição horizontal e ligada à mangueira. O deslocamento de uma bolinha, na bureta, indicava a quantidade de ar deslocado. Como havia um "te" para permitir nova entrada de ar na bureta, a bolinha era recolocada em sua posição original e medido novo volume de ar. As medidas prosseguiram até serem notadas bolhas acima da camada argilosa. Uma proveta recolhia a água deslocada pelo ar. A partir da observação das bolhas acima da argila, deixou-se a entrada de água aberta.

Na outra experiência realizada com o mesmo corpo de provas, foram colocados 7,5 g de ferro puro em pó, no restante da água, e substituída a atmosfera de N_2 por CO_2 (no início, por uma falha, SO_2). Após um dia para permitir a reação foi iniciada a percolação.

O conjunto D,E,F,G serviu para três ensaios. Em todos eles o aparelho foi usado em sua terceira forma (Ítem 4.2). No primeiro com as amostras D-1, E-1, F-1, G-1, o abastecimento foi realizado com água apenas fervida em contato com atmosfera de nitrogênio ficando o teor de oxigênio dissolvido em 2,4 mg/l, o que impedia de aplicar a fórmula da capacidade de oxigenação. Mas esperava-se alguma proporção compatível com a fórmula. Antes de fazer as dosagens de oxigênio dissolvido na água de saída, houve percolação o tempo suficiente para que houvesse uma estabilização do fluxo, sendo o menor tempo de 4 horas para o G-1 e o maior de 24 horas para o D-1.

Para os ensaios com as amostras D-2, E-2, F-2 e G-2, a água de percolação foi tratada com Na_2SO_3 e $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ para a retirada total do oxigênio dissolvido.

A amostra E-2 apresentou problemas que não permitiram as últimas coletas para análise. Para coleta de água da amostra F-2, foi necessário o gotejamento dentro de um becher com película de óleo sobrenadante, para evitar que houvesse uma oxigenação na água já coletada, em função da demora para se obter um volume necessário para análise. Este gotejamento iniciou após 2 horas e 10 minutos de ensaio, indo até o final. Da amostra G-2 de

veria se coletar a água diretamente dos pingos da tela inferior, mas foi usado um dispositivo coletor que aumentou o percurso da água e, conseqüentemente, a absorção de O_2 .

Foi realizada, ainda, uma nova tentativa de determinação da capacidade de aeração da água nas amostras D-3, E-3, F-3 e G-3. Nesta nova tentativa procurou-se obter uma vazão igual nos quatro corpos de prova, mas como foram muito desiguais, em G-3 foi cerca de 10 vezes maior que em D-3, não foi possível aquela determinação.

O mesmo conjunto de amostras foi ensaiado com solução de bicarbonato ferroso. A concentração inicial de Fe^{++} era de 30 mg/l e o oxigênio dissolvido de zero mg/l. Como houve contaminação das amostras com o óleo colocado para isolar do contato com o ar a solução de bicarbonato ferroso, a coloração final não foi tomada como comprovante de deposição de ferro, embora pudesse se notar leves manchas de hidróxido férrico.

Observações sobre o fluxo

É interessante observar, também, que o tempo calculado para a água atravessar a amostra A-3 em posição inclinada, onde o gradiente era maior, era de 35.701 segundos, cerca de 10 horas, sendo nas outras partes sempre mais prolongado. Apesar disso, em três horas já havia um fluxo quase constante e em três horas e meia a areia apresentava um aspecto de umedecimento uniforme.

A mesma amostra, em posição horizontal e ao iniciar novo ensaio estando já umedecida, precisou de apenas cinco minutos, após a formação da coluna de água na entrada, para iniciar o gotejamento na saída.

Na posição horizontal observou-se que houve um aumento gradativo do fluxo até uma vazão aproximadamente constante como mostra a Tabela 5.3. Na posição inclinada, o aumento da vazão pode ser verificado na Tabela 5.5. É provável que, neste caso, depois de algum tempo chegasse a estabilização.

Isto permite supor que a sucção exercida pelo material seco ou levemente umedecido atua de modo a acelerar o fluxo de água pelicular até sua capacidade de campo e, a partir deste ponto, toda a água que cair no topo da camada tem uma resposta imediata pela queda de outro tanto que cai na sua base.

Contudo, devem existir caminhos preferenciais que facilitem as primeiras saídas d'água.

Esta situação pode ter uma analogia com o que ocorreu no Dique 5 de Paraibuna (capítulo 3), onde só após 3 anos de funcionamento os níveis piezométricos chegaram a valores preocupantes, assim permanecendo até a ocasião das obras de reparo.

5.2. ABSORÇÃO DE OXIGÊNIO PELA ÁGUA

No ensaio com a amostra H-1, cronologicamente o último, foi medida a penetração de 314 cm^3 de ar na areia, antes que fosse aberta a entrada superior para a circulação de água. A areia ocupava um volume de 5.600 cm^3 . Após a abertura da entrada superior para a circulação de água, continuou a penetração de ar a uma velocidade de $0,038 \text{ cm}^3/\text{s}$. Posteriormente foi impedida aquela penetração e o fluxo de água continuou normalmente.

Ficou provado, assim, que um certo volume de ar ocupou o espaço antes preenchido pela água, criando uma zona aerada abaixo da argila.

As bolhas de ar que passaram acima da argila foram consequência da paralização do fluxo de água, pois, com o retorno desse fluxo, aquelas bolhas pararam de se desenvolver. Admite-se que haja necessidade de fluxo descendente de água para impedir a ascensão do ar, à semelhança do que ocorre com os traps hidrodinâmicos de petróleo.

Essa experiência explica a situação verificada anteriormente com a amostra A-3 em posição inclinada, onde o piezômetro inferior mostrava uma pressão de água nula e o instalado acima da argila certa pressão positiva.

A absorção de oxigênio por água deaerada percolando através de areia não saturada ficou demonstrada nos ensaios com as amostras A-2, A-3, D-1, E-1, F-1, G-1, D-2, E-2, F-2, G-2. Em todas, a água entrou com teor baixo ou nulo de oxigênio e saiu com teor bem mais elevado.

Os resultados do ensaio com a amostra A-2 estão na Tabela 5.4 onde se pode constatar, no 77º dia, a absorção de oxigênio.

Com a amostra A-3 foram realizados dois ensaios, um com água sem oxigênio dissolvido (O.D. = zero) e outro com bicarbonato ferroso. No primeiro, estando o porta-amostras em posição

inclinada, foi possível constatar a absorção de oxigênio pela ve rificação dos teores de oxigênio dissolvido na saída da amostra, indicados na Tabela 5.5.

TABELA 5.4. DADOS QUÍMICOS DO ENSAIO COM A AMOSTRA A-2.

Dia	Adição de Fe^{++} (mg)	Antes do corpo de provas			Depois da percolação			
		O.D. mg/l	Dureza mval/l	Ferro (1) mg/l	pH	HCO_3^- mval/l	O.D. mg/l	Ferro mg/l
1º		2,6	0,4	0,0	7,3	-	-	-
39º		2,3	0,5	0,0	7,6	-	-	-
58º	8	-	-	-	-	-	-	-
64º		-	-	0,2	7,6	1,9	-	-
65º (2)		2,0	0,6	0,3	7,0	1,8	-	0,2
70º	300	-	-	0,3	-	-	-	0,1
73º		2,6	-	0,1	6,5	-	-	0,1
77º				12				
77º	indet (3)	2,6	-	50	6,0	-	7,2	0,4

- (1) Normalmente o ferro determinado era o ferro total. Em apenas uma ocasião foi verificado o ferro II que coincidia com o ferro total em solução.
- (2) A partir do 65º dia, o porta-amostras foi colocado numa po_{si}ção inclinada.
- (3) No 77º dia houve uma alimentação contínua de bicarbonato fer_{ro}so através de funil colocado próximo à entrada do corpo de provas.

TABELA 5.5. VAZÕES E DOSAGENS DE OXIGÊNIO DISSOLVIDO NA AMOSTRA A-3.

Tempo de ensaio minutos	Vazão cm^3/s	O.D. na saída mg/l	Temperatura $^{\circ}\text{C}$
210	0,120	-	-
240	-	8,3	-
345	-	7,8	16,8
420	-	7,4	17,5
435	0,165	-	-
465	-	7,4	-
475	0,335	-	-

No ensaio com as amostras D-1, E-1, F-1 e G-1, a partir de um déficit de oxigênio dissolvido não total, esperava-se uma proporção daqueles déficits na água percolada, em função das dimensões de cada amostra que determinariam os tempos de permanência da água em contato com o ar nos poros da areia, desde que as velocidades de percolação fossem iguais em todas as amostras. Os resultados desse ensaio estão na Tabela 5.6.

TABELA 5.6. RESULTADOS DO ENSAIO COM AS AMOSTRAS D-1, E-1, F-1, G-1.

Amostra	Velocidades cm/s	Tempo de contato s	O.D. mg/l	Temperatura °C	Deficit O.D. mg/l
E-1	0,0064	4 665	8,4	16,5	1,06
E-1	0,0020	7 653	8,8	16,7	0,63
F-1	0,0019	4 220	8,0	16,8	1,41
G-1	0,0009	2 300	8,3	17,0	1,07

As velocidades foram diferentes em cada amostra, mas comparando-se os tempos de contato com os déficits de oxigênio dissolvido (O.D.), verifica-se que não houve a proporção esperada, talvez porque os teores de oxigênio dissolvido se aproximassem da saturação.

Com as amostras D-2, E-2, F-2 e G-2 foram medidos os déficits de oxigênio dissolvido em duas etapas, uma com as primeiras gotas até a quantidade suficiente para a dosagem, e outra depois de decorrido certo período de percolação. Estes dados estão na Tabela 5.7.

TABELA 5.7. RESULTADO DO ENSAIO COM AS AMOSTRAS D-2, E-2, F-2, G-2,

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	cm/s	min	min	mg/l	mg/l	min		mg/l	mg/l
E-2	0,0230	21,43	20	9,0	0,76	115	5,4	3,1	6,66
E-2	0,0021	117,86	45	9,5	0,26	-	-	-	-
F-2	0,0012	114,65	45	9,2	0,56	225	2,0	8,3	1,46
G-2	0,0190	1,73	5	4,0	5,76	105	61,0	2,7	7,06

1, amostra;

- 2, velocidade média (vazão média/área da amostra);
- 3, tempo teórico de passagem da água pela amostra (comprimento da amostra/velocidade média);
- 4, tempo decorrido entre o início do ensaio e início do gotejamento;
- 5, oxigênio dissolvido na água das primeiras gotas;
- 6, déficit de oxigênio dissolvido na água das primeiras gotas, na temperatura de ensaio, 15°C ;
- 7, tempo de duração do ensaio até a última coleta;
- 8, vezes que a amostra foi atravessada por nova quantidade de água (tempo de duração do ensaio/tempo teórico de passagem da água pela amostra);
- 9, teor de oxigênio dissolvido na última coleta;
- 10, déficit de oxigênio dissolvido na última coleta, na temperatura de ensaio, 15°C .

É interessante notar que o tempo para início de gotejamento (coluna 4) não coincide, nem por aproximação, com o tempo teórico previsto para a água atravessar a amostra (coluna 3). Havia a hipótese de que as primeiras quantidades de água umedeceriam a areia até sua capacidade de campo e só depois passariam a escoar na mesma medida que entrassem novas quantidades. Mas isto não aconteceu, permitindo supor a existência de caminhos preferenciais.

Observa-se, também, que o déficit de oxigênio dissolvido é maior no final do ensaio. Este fato parece estar ligado ao número de vezes que novas quantidades de água atravessam a amostra, admitindo-se que pela absorção do oxigênio, o ar intersticial vai ficando cada vez mais pobre, porquanto não há circulação de ar. A maior saturação da amostra deve contribuir também para esse fato.

Por fim, verifica-se, como no ensaio anterior, uma certa relação entre os teores de oxigênio (colunas 5 e 9) ou seus inversos, os déficits (colunas 6 e 10) com o tempo de oxigenação ou tempo teórico de passagem da água pela amostra (coluna 3).

Não foi possível medir, ainda, a capacidade de oxigenação do sistema argila-areia aerada. A taxa de transferência de oxigênio dC/dt para um certo volume não pode ser determinada devido à interferência de fatores não computados no método desenvol-

vido para ação de aeradores de lodos de esgotos. Para permitir uma estimativa da capacidade de oxigenação das amostras ensaiadas foram relacionados os valores contidos na Tabela 5.8, extraídos das Tabelas 5.5, 5.6 e 5.7. O volume de água que absorveu oxigênio foi calculado multiplicando-se a velocidade de fluxo pela área e pelo tempo no conjunto D,E,F,G ou a vazão pelo tempo na amostra A-3. Como o tempo foi contado a partir do início do ensaio, subentende-se, daí, que a vazão computada corresponde a da entrada da amostra e, portanto, o volume calculado corresponde ao da água que já tinha saído e da existente na amostra. Logicamente isto representa uma imprecisão.

TABELA 5.8. ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE OXIGÊNIO PELA ÁGUA NAS CONDIÇÕES DOS ENSAIOS.

Amostra	Volume de água	Tempo	Elevação no teor de O.D.	
	cm ³	minutos	mg/l	
D-1	18.918	1.440	2,4	a 8,4
E-1	2.956	720 aprox.	2,4	a 8,8
F-1	2.808	720 aprox.	2,4	a 8,0
G-1	443	240	2,4	a 8,3
D-2	944	20	0,0	a 9,0
D-2	5.430	115	0,0	a 3,1
E-2	194	45	0,0	a 9,5
F-2	111	45	0,0	a 9,2
F-2	554	225	0,0	a 8,3
G-2	195	5	0,0	a 4,0
G-2	4.095	105	0,0	a 2,7
A-3	1.728	240	0,0	a 8,3
A-3	2.898	345	0,0	a 7,8
A-3	4.158	420	0,0	a 7,4
A-3	4.603	465	0,0	a 7,4

Em todos esses ensaios o fluxo teve a direção vertical e o sentido de cima para baixo, passando primeiro na argila saturada e depois em areia não saturada.

Com fluxo horizontal também há absorção de oxigênio, o qual só pode ser medido na amostra A-3, que revelou um aumento de zeu

ro para 5,3 mg/l no teor de oxigênio dissolvido (ver Tabela 5.9). Possivelmente essa absorção tenha se realizado na franja de capilaridade.

5.3. CIMENTAÇÃO DA AREIA PELO HIDRÓXIDO DE FERRO

Foram executados 4 ensaios para comprovação das condições de precipitação de hidróxido férrico na areia.

O primeiro foi com a amostra A-2 onde se procurou verificar a oxigenação da água e a precipitação do hidróxido férrico simultaneamente e cujas análises constam da Tabela 5.4. Verificou-se aí, pela análise química, alguma fixação de ferro na amostra.

Após o ensaio foi observada uma película muito fina, de cor ocre, recobrando a face de entrada da água na camada argilosa. Isto demonstra que houve uma oxidação antes da entrada na amostra e o material coloidal resultante teve a capacidade de migrar através da areia, sendo retido na entrada da camada argilosa.

Os melhores resultados foram obtidos com a amostra A-3. O ensaio teve a duração de 28 horas e 35 minutos. Os resultados das análises de controle químico estão expressos na Tabela 5.9.

TABELA 5.9. CONTROLE QUÍMICO DO ENSAIO DE CIMENTAÇÃO DA AREIA NA AMOSTRA A-3 EM POSIÇÃO HORIZONTAL.

Dia	Local coleta	O.D. mg/l	Bicarbonato mval/l	pH	Eh mV	Fe ⁺⁺ mg/l	Fe total mg/l
1º	Entrada	0,0*	3,8	5,1	- 45	75	-
	Saída	5,3*	1,5	5,3	70	15	15
2º	Entrada	0,0*	4,9	5,6	-490	100	140**
	Saída	0,0*	3,0	5,7	205	50	60**

* A determinação feita pelo método de Winkler é influenciada pelo Fe⁺⁺ dissolvido. A determinação do "1º dia - saída" já está corrigida, mas onde consta "0,0" sabe-se apenas que os teores reais não ultrapassam o teor de Fe⁺⁺ multiplicado por 0,14.

**Determinações realizadas no espectrofotômetro de absorção atô

mica Perkin Elmer 503 em amostras coletadas sete horas após às destinadas a Fe^{++} que, como as anteriores, foram analisadas pelo método colorimétrico.

As amostras para determinação de ferro no espectrofotômetro, tanto de "Entrada" quanto de "Saída", ao serem coletadas às 16:50 h de um dia totalmente isoladas do ar, mostravam um aspecto límpido, enquanto no outro dia pela manhã, a amostra de "Saída" mostrava precipitado ocre no fundo. Este precipitado não foi redissolvido para a determinação. Este fato mostra a lentidão da reação do oxigênio dissolvido com o bicarbonato ferroso.

Em consequência desta percolação formou-se, na faixa de areia correspondente aproximadamente à faixa de capilaridade, uma coloração ocre típica do hidróxido de ferro que pode ser vista nas fotografias 5.1 e 5.2.

Fotografia nº 5.1 - Aspecto da areia da amostra A-3 tingida com hidróxido férrico após o ensaio em que sofreu percolação com solução de bicarbonato ferroso. Note-se a conexão para entrada d'água no lado esquerdo, os dois tubos piezométricos e o tubo de saída no lado direito.

O ensaio com a amostra A-3 apresentou a prova visual mais conclusiva, além da confirmação química evidenciada na Tabela 5.8.

A precipitação se deu na parte não saturada da faixa de capilaridade e pode representar uma migração iônica devido a um gradiente químico, à semelhança do que escreve Berner (3), e também ao que Xu, Guo e Chen (59) observaram nas zonas onde o nível da água de percolação flutuava (capítulo 1).

Fotografia nº 5.2 - Aspecto da mesma areia mostrada na fotografia anterior vista do outro lado da amostra A-3. A entrada d'água fica à direita e a saída à esquerda.

A percolação de bicarbonato ferroso, através da amostra H-1, apresentou o comportamento químico expresso na Tabela 5.10. A água foi mantida sem oxigênio dissolvido durante essas medidas.

Pela análise da Tabela 5.10 verifica-se que houve alguma fixação de ferro na amostra. Após o ensaio notava-se apenas uma tênue cor ocre na areia próximo à camada de argila, conforme mostra a fotografia 5.3.

Cabem algumas ressalvas a este ensaio. Até o 4º dia foi usado um tubo de gás que supostamente deveria ser de CO_2 , mas continha SO_2 . No 5º dia houve a substituição por CO_2 puro. Além desse fato, em várias ocasiões houve necessidade de adicionar CO_2 ,

TABELA 5.10. CONTROLE QUÍMICO DA PERCOLAÇÃO DE BICARBONATO FERROSO ATRAVÉS DA AMOSTRA H-1.

Dia	Ponto de coleta	Vazão cm ³ /s	Bicarbonato mval/l	pH	Temperatura °C	Fe ⁺⁺ mg/l
1º	Entrada		1	5,1		10
2º	Entrada		1,2	4,9		20
	Saída		1,1	6,2	21	0
3º	Entrada		0,6	4,8		20
	Saída		1,7	7,4	20,4	0
4º	Entrada		0,6	4,7		12,5
	Saída		2,0	7,1	22	00
5º	Entrada		0,7	4,5	-	20
6º	Entrada		0,9	4,7		25
	Saída		-	-	26,0	0
18º	Entrada		3,0	5,2	21,5	45
21º	Entrada		2,6	5,2	23,4	50
	Saída		3,0	7,5		0
22º	Entrada		2,7	5,1	22,2	50
29º	Entrada	0,0016	3,8	5,2	20,5	50
30º	Entrada		3,8	5,2	21,8	50
	Saída		2,8	7,3	-	0
31º	Entrada		3,8	5,2	22,5	50
	Saída		2,5	7,6		0
32º	Entrada	0,0018	3,9	5,2	20,8	50
	Saída		2,6	7,8		0
45º	Entrada	0,0016	3,3	5,4	22,7	50
46º	Entrada	0,0020	0,7	5,3	23,2	50
	Saída		1,5	7,3		0
49º	Entrada	0,0019	0,2	5,3	19,8	50
	Saída		1,6	7,7		00
78º	Entrada		5,2	5,5		> 50
79º	Entrada	0,0016	5,5	5,4		50
	Saída		1,0	9,4		0,1
84º	Entrada	0,0012	4,7	7,0	19,7	> 50
	Saída		1,0	7,0		0
99º	Entrada		7,6	5,4		> 50
	Saída		1,0	4,6		0

devido a um provável vazamento. Em todas essas operações houve certamente alguma entrada de ar e, conseqüentemente, precipitação de hidróxido férrico, o qual podia ser visto pela coloração da caixa e mangueira.

Fotografia nº 5.3 - Sinais de deposição de hidróxido férrico abaixo da camada de argila na amostra H-1.

Fotografia nº 5.4- Crostas ferruginosas localizadas em certos pontos da areia imediatamente abaixo da camada de argila na amostra H-1. Observe-se numa placa da camada de argila as incrustações ferruginosas.

Apesar das deficiências apontadas, houve percolação de bicarbonato ferroso através da camada de argila e posterior oxidação na areia com deposição de hidróxido férrico. Ao desmontar o corpo de provas pode-se constatar a existência de crostas ferruginosas muito delgadas no contato da argila com a areia, como pode ser visto na fotografia 5.4.

CAPÍTULO 6

ANÁLISE FINAL

6.1. SITUAÇÃO DOS CONHECIMENTOS E OS OBJETIVOS

Duas barragens brasileiras chamam a atenção do meio geotécnico para o problema da diminuição da capacidade do filtro, Xavantes e do Rio Grande. A primeira por constatação indireta (Abrahão, 1) e a segunda por constatação direta (Infanti e Kanji, 23; Guerra, 15). Na China, é verificado problema semelhante, mas sem prejudicar o funcionamento das barragens. O caso da Barragem de Kalê (2) deixa dúvidas sobre a obstrução do filtro.

As primeiras interpretações apontam para um processo geoquímico envolvendo o ferro como elemento cimentante.

Os estudos de Xu, Guo e Chen (59), publicados em 1976, concluem que abaixo do lençol freático há um ambiente de relativa redução e que a água se enriquece em ferro durante o percurso pelo maciço de terra da barragem.

Em vista dos conhecimentos da época, ficou estabelecido , como objetivo principal, a explicação do processo geoquímico de cimentação do filtro de barragem e, como objetivo intermediário e necessário, o desenvolvimento de uma metodologia de estudo das reações químicas e físicas que podem ocorrer no filtro.

Durante o desenvolvimento desta pesquisa, que durou de 1976 (segundo semestre) até 1982, foram publicados dois trabalhos importantes, o primeiro, de Ferreira (10) em 1978, apresentando a primeira tentativa de simulações em laboratório do processo de colmatação físico-química de filtros, e o segundo, de Guerra(15) em 1980, descrevendo detalhadamente o caso da Barragem do Rio Grande e apontando uma solução de engenharia para aquela obra.

Na experiência de Ferreira (10) ficou constatada a deposi^{ção} de material ferruginoso na zona de aeração. Restaria saber se se formou um micro ambiente redutor para solubilizar o ferro

e permitir seu transporte na forma iônica e posterior oxidação e precipitação, ou se aquele elemento teria migrado como ferro fêrrico complexado ou se em solução coloidal e se fixado na zo na aerada.

A reação correlata que ocorre no maciço de terra quando há uma migração do ferro, ou seja, a perda desse elemento e suas conseqüências nas propriedades do solo, já apontadas por Xu, Guo e Chen (59) não foi pesquisada e fica como questão em aberto. Tão pouco foi estudada a deposição de outras substâncias cimen tantes que não o ferro.

6.2. ELUCIDAÇÃO DO PROBLEMA COM BASE NA BIBLIOGRAFIA

No segundo capítulo, foram lembradas as teorias químicas, principalmente as relativas aos processos de oxidação - redução, (2.2) os dados geoquímicos sobre o ferro nas águas naturais (2.3) e sobre ambientes lacustres (2.4), alguns conceitos e fatos bio geoquímicos especialmente ligados a ação de bactérias sobre o ferro (2.5) e finalmente exemplos de deposição de ferro em cama das arenosas (2.6).

Através dessa revisão já foi possível tirar algumas conclu sões sobre o processo pelo qual seria possível uma cimentação do filtro por hidróxido fêrrico, substância esta considerada desde o início dos estudos como a de maior probabilidade de inciden cia. Como premissa, deveria se procurar o meio geoquímico que pu desse fornecer ferro em solução na água que vai aos filtros e, em segundo lugar, o processo que pudesse precipitar esse ferro nos filtros.

O ambiente geoquímico que se forma no lago artificial ex plica cabalmente a possibilidade de existência de ferro em solu ção no estado reduzido. O ferro oxidado e em suspensão nos rios e lagos, dificilmente pode chegar até o filtro. O ferro fêrrico complexado poderia atingir esse elemento e, para precipitar, pre cisaria então ser descomplexado. No entanto, o ferro ferroso é o que tem maior probabilidade de chegar aos filtros.

Como o ambiente ã jusante da barragem ou em partes aera das desta é oxidante, aquele ferro ferroso deverá se oxidar e precipitar em algum momento e em alguma parte. Sem dúvida, o prin cipal oxidante é o oxigênio do ar dissolvido na água, podendo o

processo de oxidação ser auxiliado ou não por seres vivos, especialmente bactérias.

Pode-se considerar vários locais para essa deposição, tais como: água de jusante, saída dos drenos, faixa capilar no interior da barragem de terra e interior do filtro. Apenas este último local traria problemas para o funcionamento da barragem, pois todos os outros casos são inócuos ao bom desempenho da estrutura.

Cabe lembrar aqui, que a absorção de oxigênio pela água, a oxidação do ferro e sua precipitação não são simultâneas. Poderia assim haver uma absorção de oxigênio e oxidação inicial dentro do filtro, sem haver precipitação. Verificando-se, no entanto, pela lei de Darcy, a velocidade com que a água atravessa um maciço de terra e seu filtro, medida em valores da ordem de 1×10^{-6} cm/s ou menores, e calculando-se daí o tempo que a água permaneceria no filtro até chegar a saída dos drenos, contado em meses ou até anos, conclui-se que dificilmente aquela sequência de reações não se completaria. Somente em casos onde a absorção se dá muito próximo à saída do filtro a precipitação poderia ocorrer fora desse.

Ainda no capítulo dois, foram revistos alguns estudos sobre deposições ferruginosas em camadas arenosas em função da semelhança destas com os filtros de areia. A explicação que melhor se coaduna com as conclusões adiante apresentadas é a de Willig e Formoso (58) para as crostas ferruginosas da Formação Rio Bonito subjacentes a camadas argilosas da Formação Palermo.

6.3. CONFIRMAÇÕES DE CAMPO

Os levantamentos de campo apresentados no terceiro capítulo são importantes para confirmação, em reservatórios brasileiros, das condições geoquímicas descritas como modelo no capítulo dois, e também para demonstrar que a principal fonte de ferro pode ser o solo compactado do maciço de terra, como em Juru mirim. Ficou comprovada, assim, a existência de condições de fornecimento de ferro ferroso, necessária para a primeira fase do processo de cimentação de um filtro. Visando a segunda fase, a de precipitação, não foi possível constatar pelos levantamentos de campo, nenhuma precipitação em algum filtro. Água ferrugino

sa com a coloração característica do ferro férrico pode se encontrar com certa facilidade em surgências no paramento de jusante de barragens, como no de Ponte Nova, na saída dos drenos, como na de Vacacaí-Mirim, na caixa coletora dos drenos, como em Jurumirim, ou mesmo em surgências de água subterrânea. Estas situações comprovam apenas que aquelas águas continham anteriormente ferro ferroso, mas nada provam sobre a precipitação em um filtro interno se houver. Por outro lado, a inexistência de água ferruginosa na saída dos drenos de uma barragem, não comprova a inexistência de precipitação do filtro. É possível até que a precipitação do filtro "limpasse" a água, pois foi visto que o hidróxido tende a se incrustar deixando a água limpa (exemplo da Barragem de Ponte Nova).

Assim sendo, as condições de precipitação em um filtro de barragem deveriam ser constatadas por meios indiretos. Para tanto foi desenvolvida uma metodologia de laboratório, a qual está descrita no quarto capítulo, ficando a interpretação de seus resultados para o quinto capítulo.

6.4. DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA DE LABORATÓRIO

Etapas do método

Para melhor se entender o quarto capítulo, é necessário ter em mente as hipóteses de trabalho e seus desdobramentos durante o desenrolar dos ensaios.

O modelo de ensaio inicialmente buscado era o de uma imitação, o mais próxima possível, do que ocorre numa barragem. Assim se procurava um método que permitisse a percolação de água, por longo espaço de tempo, através de um corpo de provas composto de argila e areia, esta representativa do filtro e aquela do maciço de terra, tendo sempre o sentido de percolação da primeira para a segunda. Corpos de prova assim construídos deveriam tomar várias posições e a água deveria mostrar uma composição química semelhante a do interior de uma barragem.

Imaginava-se que a criação de um ambiente redutor na água, com a retirada do oxigênio dissolvido e talvez com a adição de algum composto orgânico, seria capaz de reduzir e dissolver o ferro, contido no solo argiloso usado, e transportá-lo até a areia.

As dificuldades a serem vencidas situavam-se, primeiro, em retirar o oxigênio dissolvido na água e em manter esta fora do contato com o ar, segundo, em manter, dentro das condições acima, uma circulação constante e por longo prazo, contado em semanas ou meses, terceiro, em eliminar ou controlar todos os outros fatores que pudessem influir na permeabilidade da areia, quarto, em avaliar a deposição de hidróxido férrico pela diminuição da permeabilidade da areia.

As dificuldades e as observações dos ensaios determinaram a evolução dos métodos usados.

A primeira e segunda forma do aparelho montado eram destinadas a uma circulação contínua por longo período de tempo. Entretanto, o vácuo isoladamente é incapaz de retirar todo o oxigênio dissolvido na água, havendo, portanto, necessidade de um tratamento químico de toda a água a ser usada e, por isso, todo o sistema de vácuo e sucção da água com bomba foi abandonado, passando o aparelho a sua terceira forma, mais simplificada. Com isso o sistema perdia a sua capacidade de funcionar em circuito fechado, e por prazo indefinido. Ao mesmo tempo, em vez de se tentar criar um ambiente redutor para assim solubilizar o ferro contido no solo, partiu-se para a preparação de bicarbonato ferroso que é, sem dúvida a principal substância portadora do ferro. Com a preparação dessa substância diretamente no aparelho, em sua terceira forma, depois de um tratamento prévio da água para a retirada total do oxigênio dissolvido, conseguiu-se um sistema viável e eficaz de manter a água ou solução fora do contato com o ar e com uma composição química semelhante, naquilo que interessa, à da que percola no interior de uma barragem, porém com concentração mais elevada. Agora a duração dos ensaios passava a depender da capacidade do reservatório do aparelho e da velocidade de percolação do corpo de provas.

A impossibilidade de realizar ensaios em circuitos fechados não foi uma perda considerável, uma vez que as velocidades de percolação no sistema argila-areia são muito baixas e as reações de absorção de oxigênio pela água, oxidação do ferro e sua precipitação são relativamente rápidas. As reações podem ser perfeitamente observadas.

O terceiro objetivo, o de eliminar ou controlar os outros fatores que influem na permeabilidade, foi atingido ficando como uma contribuição a futuros ensaios de percolação, O crescimen

to de seres vivos pode ser controlado com a adição de pentaclorofenato de sódio e o rearranjo da textura arenosa pode ser controlada usando-se baixos gradientes.

Esse controle perdeu, no entanto, parte de sua finalidade porque o quarto objetivo, o de avaliar a deposição de hidróxido férrico pela diminuição da permeabilidade, não foi atingido por vários motivos. Primeiro, a eliminação de ensaios por prazo longo eliminou também a possibilidade de deposição de volumes apreciáveis de hidróxido férrico; segundo, as avaliações passaram a ser feitas qualitativamente pela coloração muito viva deixada na areia pelo hidróxido férrico, terceiro, os tipos de porta-amostras que permitiam uma medida de permeabilidade da camada de areia independentemente da argila, o D-E-F-G, não apresentaram o desempenho esperado. Mesmo não sendo atingido, esse quarto objetivo influiu nos ensaios, pois sempre houve uma preocupação com o controle da permeabilidade.

Os porta-amostras

Sobre os porta-amostras cabe algumas observações. Os modelos A e H, construídos em acrílico transparente, permitem a visualização das deposições ferríferas e comportam um volume maior de material ensaiado. O modelo A é apropriado a um fluxo horizontal, podendo ser usado em posição inclinada desde que feitas as devidas adaptações nos cálculos de permeabilidade. Nesta posição deve-se considerar o fluxo na areia como essencialmente vertical.

Os porta-amostras B e C foram usados apenas nos ensaios preliminares, em preparação à metodologia de trabalho em busca do objetivo principal da tese, e são precursores da série D-E-F-G. A razão desta série está num certo desvio do objetivo principal e merece ser explicado no item seguinte.

Capacidade de aeração na areia

Se o bicarbonato ferroso necessita de oxigênio dissolvido na água para passar a hidróxido férrico e precipitar, coloca-se a pergunta: tem uma camada de areia, constituinte de um filtro de barragem, capacidade de permitir o contato água-ar e facili

tar a absorção de oxigênio pela água, em escala considerável, desencadeando as reações já conhecidas?

O ensaio com o porta-amostra H executado apenas com água deaerada foi montado para responder essa pergunta, embora a resposta afirmativa já tivesse sido tomada como premissa para o início dos ensaios com a série D-E-F-G. Esse ensaio permitiu medir o volume de ar existente nos poros, durante a percolação, quando a água passa de um meio menos permeável para outro mais permeável, num fluxo descendente. Esse volume de ar naturalmente é o responsável pela aeração da água e suas conseqüências.

Assim, a hipótese inicial e posteriormente comprovada com o porta-amostras H era a de que o filtro, em determinadas situações, facilitaria a absorção de oxigênio pela água. As situações que mais facilitariam essa absorção eram a de um fluxo vertical, de cima para baixo, na areia em estado não saturado, e, secundariamente, o fluxo na franja capilar. A medida dessa absorção passou então a ser um objetivo.

Com a série D-E-F-G reproduzia-se a primeira situação e pretendia-se medir essa absorção. A equação escolhida foi a usada para medida de oxigenação de esgotos e exposta por Ramalho (38). Esta, por sua vez, mostra que a absorção é proporcional à área de contato água-ar, a qual fica enormemente aumentada com a formação de bolhas na água, e ao tempo de contato. No caso dos filtros, essas bolhas existiriam nos poros da areia não saturada.

Há algumas diferenças entre a situação de oxigenação de um lodo e a passagem de água em areia, diferenças essas que viariam dificultar e mesmo invalidar as medidas de capacidade de oxigenação de uma areia nas condições citadas. Primeiro, em um lodo de esgoto é introduzido ar atmosférico com um teor em oxigênio praticamente constante, enquanto numa areia os poros de ar vão diminuindo seu teor em oxigênio à medida que a água o vai absorvendo; segundo, na oxigenação dos lodos a contagem do tempo corresponde ao período de funcionamento do aerador em condições uniformes, enquanto no ensaio discutido, o tempo era contado como o período em que a água se mantinha dentro da areia, mas com velocidades de percolação diferente, pois não foi possível manter uma velocidade igual nos quatro porta-amostras da série, como era intenção. Não se sabe como essa segunda diferença influi nos resultados. As conseqüências da primeira diferença se

rão discutidas adiante.

As medidas da quantidade de oxigênio absorvido pela água podem ser afetadas pelo consumo desse gás por um possível excesso de Na_2SO_3 .

Finalmente sobre os métodos de ensaio deve-se dizer que todas as amostras que servem para medidas de absorção de oxigênio servem também para verificação da precipitação de hidróxido férrico.

6.5. ABSORÇÃO DO OXIGÊNIO E CIMENTAÇÃO DO MEIO POROSO

Absorção de oxigênio

Fora algumas conclusões de caráter localizado, como a que se refere ao caso do dique 5 de Paraibuna, o quinto capítulo se detém em dois aspectos principais: a absorção de oxigênio pela água e a cimentação da areia, sendo que o primeiro explica o segundo.

O estudo da absorção de oxigênio pela água, através da percolação em um meio não saturado, tem importância em si mesmo, pois poderá servir de subsídio para outros aproveitamentos, tal como purificação da água.

Pode-se concluir que esse tipo de fluxo proporciona uma grande área de contato entre a água e o ar facilitando a absorção deste por aquela. A capacidade de oxigenação de um meio, nestas condições, não pode ser medida, mas pode ser avaliada pela análise da Tabela 5.8, principalmente pelos valores de oxigênio dissolvido nos menores tempos de percolação.

Uma questão fundamental nesse processo que deve ser cabalmente respondida no futuro é a renovação do ar nos poros da areia. Se a água absorvesse todo o ar (nitrogênio e oxigênio) a renovação seria automática pois a dinâmica do processo não permite que a água sature o meio poroso mais permeável abaixo de outro menos permeável, a não ser que se trate de um sistema fechado ou que o nível piezométrico geral esteja acima desse meio.

Mas se a água absorver apenas aquele gás do qual tem deficiência, no caso o oxigênio, a renovação do ar para repor o volume do oxigênio consumido irá progressivamente empobrecendo a mistura, pois no lugar do oxigênio entrará nitrogênio e oxigênio.

Além disso a água absorve naturalmente mais oxigênio que nitrogênio. Esta conclusão pode ser tirada pela comparação, na Tabela 5.8 dos teores de oxigênio dissolvido na saída de uma mesma amostra após períodos de tempo diferentes. Um fator que poderia alterar essa situação seria a da circulação do ar devido a diferença de temperatura ou outras variações que pudessem influir na pressão interna do meio.

Esse empobrecimento da mistura nitrogênio-oxigênio pode explicar o fato de o filtro de uma barragem ter inicialmente uma grande capacidade de oxigenação e, com o passar do tempo, ir perdendo essa capacidade até chegar a um ambiente incapaz de uma oxidação e, portanto, tão redutor quanto ao que deu origem àquela água que o percola. Talvez este seja o caso do filtro inclinado para montante da barragem de Xavantes. Faltam mais informações para uma conclusão definitiva sobre este caso.

Cimentação do meio poroso

Resolvido o problema da capacidade de oxidação de um meio, a questão da deposição de cimento ferruginoso na areia de um filtro torna-se muito simples. O fornecimento de bicarbonato ferroso, pela água que atravessa o maciço de terra de uma barragem, é um fato normal em vista das condições ambientais do lago artificial criado por ela e, dificilmente, poderia ser alterado esse quadro, podendo variar as concentrações principalmente em função do maior ou menor poder redutor do lago. O ferro é fornecido basicamente pelo maciço de terra.

A cimentação do filtro por hidróxido férrico dependerá de aquele apresentar condições oxidantes, considerando-se ainda que quanto maior for o conteúdo em ferro, maior a precipitação, pois basta uma molécula de oxigênio para formar quatro de hidróxido férrico.

Com o passar do tempo, o filtro que era oxidante pode passar a redutor, conforme a explicação dada acima, e a precipitação se daria nas águas de jusante ou na saída dos drenos. O caso do filtro que envolve o dreno da barragem de Rio Grande (Guerra, 15) é facilmente explicado, pois o tubo de drenagem era o canal aberto para fornecimento de oxigênio ao filtro.

As experiências realizadas fornecem também uma resposta ao

fenômeno geoquímico da deposição de crostas ferruginosas.

O ensaio com a amostra A-2 mostrou que houve uma migração das partículas de hidróxido férrico através da areia até serem barradas no contato com a argila. Este processo parece se asse_{me}lhar ao que deve ter ocorrido com as crostas ferruginosas situa_{da}s na areia sobre o contato com camadas argilosas assim como as descritas por Suguio e Barbour (47), por Persons (37) e tam_bém verificadas pelo autor na região de São Paulo.

O que ocorreu com a amostra H-1 assemelha-se ao processo de formação de crostas sob capas pouco permeáveis, como descre_{ve}ram Willig e Formoso (58).

A experiência com a amostra A-3 reflete situações como a descrita por Xu, Guo e Chen (59) sobre as deposições no nível de flutuação do lençol freático.

Recomendações

Entendido o processo que leva a cimentação e obstrução do filtro de uma barragem, as soluções para este problema poderão ser facilmente adotadas, como aliás já vêm sendo, a exemplo da barragem de Rio Grande (Guerra, 15) e do dique 5 de Paraibuna. Em essência, consistem em evitar a aeração do filtro, seja por afogamento, seja por um sistema de caixas com anteparos que im_{pe}çam a entrada do ar atmosférico para dentro do tubo de drena_{gem}. Neste caso, seria interessante, ainda a eliminação do oxi_gênio que fica dentro dos tubos.

Além disso, recomenda-se o desenvolvimento de estudos pa_{ra} o aproveitamento da capacidade de aeração e oxidação de meios porosos sob fluxo não saturado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABRAHÃO, R.A. Barragem de Xavantes análise de percolação pelo método da eletro-analogia integrada a medidas piezométricas. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 10, Curitiba, 1975. *Anais ...* Curitiba, Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, 1975. p.1-16.
2. ANAGNOSTI, P. A lateritic soil as watertight dam core. In: CONGRÈS DES GRANDS BARRAGES, 2, Montréal, 1970. *Anais ...* Montréal, Commission Internationale des Grands Barrages, 1970. p.225-32.
3. BERNER, R.A. *Principles of chemical sedimentology*. New York, Mc Graw-Hill, 1971. 240 p.
4. BERGEY'S Manual of determinative bacteriology. 8.ed, Baltimore, Williams & Wilkins, 1974. 1268 p.
5. BRADLEY, W.H. Limnology and the eocene lakes of the Rocky Mountain region. *Bulletin of the Geological Society of America*, Boulder, 69:635-48, 1948.
6. BROWN, K.W. The occurrence and control of iron bacteria in water supplies. *Journal of America Water Works Association*, New York, 10(11):1648-1700, 1934.
7. CAPUTO, H.P. *Mecânica dos solos e suas aplicações*. 3.ed, Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1974. v.2.
8. CONSTRUÇÃO pesada. São Paulo, v.6, n.61, 1976.
9. CRUZ, P.T. Shear strength characteristics of some residual compacted clays. In: CONGRESSO PANAMERICANO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 11, São Paulo, 1963. *Anais ...* São Paulo, International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1963. p.73-102.
10. FERREIRA, R.C. Colmatação físico-química de filtros tentativa de simulação em laboratório. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 6, Rio de Janeiro, 1978. *Anais ...* Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, 1978. v.1, p.81-100.

11. GOÑI, J. Aperçu sur les études poursuivies au B.R.G.M. en mi
crobiologie. *Bulletin du Bureau de Recherches Geologiques
et Minieres*, Orléans, (1):27-9, 1973. Deuxième série. Section
IV.
12. GOÑI, J. et alii. La géomicrobiologie et la biominéralurgie.
Bulletin de la Société Française de Minéralogie et de Cris
tallographie, (96):252-66, 1973.
13. GORSHKOV, G. & YAKUSHOVA, A. *Geologia general*. Moscou, Mir,
1970.
14. GRIME, E.M. Problems with iron in deep well supplies. *Journal
of American Water Works Association*, New York, 37:1173-7,
1945.
15. GUERRA, M.O. Ação química e biológica na colmatação de fil
tros e drenos implicações no comportamento da barragem do
Rio Grande. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 13,
Rio de Janeiro, 1980. *Anais...* Rio de Janeiro, Comitê Bra
sileiro de Grandes Barragens, 1980. p. 257-89.
16. GUREVICH, The role of microorganisms in producing the chemical
composition of ground water. In: *Geological activity of
microorganisms*. New York, Institute of Microbiology, 1961,
p. 65-75.
17. HALDANE, A.P.; CARTER, E.K.; BURTON, C.M. The relationship
of pyrite oxidation in rock-fill to highly acid water at
Corin dam A.C.T. Australia. In: CONGRÉS INTERNATIONAL DE
L'ASSOCIATION INTERNATIONALE DE GEOLOGIE DE L'INGENIEUR, 1,
Paris, 1970. *Rapports...* Paris, Association Internationale
de Geologie de L'Ingenieur, 1970, p. 1113-24.
18. HARDER, E.C. Iron-depositing bacteria and their geologic re
lations. *Professional Paper*, Washington, (113):1-89, 1919.
19. HEM, J.D. Study and interpretation of the chemical characte
ristics of natural water. *Water-Supply Paper*, Washin
(1473):1-363, 1979.
20. HEM, J.D. & CROPPER, W.H. Survey of ferrous-ferric chemical
equilibria and redox potentials. *Water-Supply Paper*. Washin
gton (1459A): 1-31, 1959.
21. HOLMES, A. La vida como productora de combustibles hulla y
petróleo. In: --- . *Geologia física*. 4. ed. Barcelona, Ome
ga, 1962. Cap. 16, p.323-50.

22. HUTCHINSON, G.E. *A Treatise on Limnology*. geography physics and chemistry. New York, John Wiley & Sons, 1957. V.1, 1015 p.
23. INFANTI Jr, N.R. & KANJI, M.A. Preliminary considerations on geochemical factors affecting the safety of earth dams. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 2, São Paulo, 1974. *Proceedings...* São Paulo, International Association of Engineering Geology, 1974. Tema 4, p. 33. 1-11.
24. KLEERECOPER, H. *Introdução ao estudo da limnologia*. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura - Departamento Nacional de Produção Animal, 1944. 329 p. (Série Didática, 4).
25. KNILL, J.L. & BEST, R. Mineralogical chemical and geotechnical studies of core materials in the Kainji and Shek Pik dams. In: CONGRÈS INTERNATIONAL DE L'ASSOCIATION INTERNATIONALE DE GÉOLOGIE DE L'INGÉNIEUR, 1, Paris, 1970. *Rapports ...* Paris, Association Internationale de Geologie de L'Ingenieur, 1970, Tome 2, p. 1247-57.
26. KRAUSKOPF, K.B. *Introdução à geoquímica*. São Paulo, Universidade de São Paulo, 1972. v. 1, 294 p.
27. KRUMBEIN, W.C. & SLOSS, L.L. Sedimentary environments. In: *Stratigraphy and sedimentation*. San Francisco, W.H. Freeman, 1959. p. 186-223.
28. KUZNETSOV, S.I. Principal trends in the investigation of geological activity of microorganisms. In: *Geological activity of microorganisms*. New York, Institute of Microbiology, 1961, p. 1-5.
29. LAMBE, T.W. Permeability test. In: *Soil test for engineers*. New York, John Wiley e Sons, 1951. Cap. 4, p. 52-60.
30. LAMBE, T.W. & WHITMAN, R.V. *Soil mechanics*. New York, John Wiley & Sons, 1969. 533 p.
31. LANDES, K.K. Origen y evolución del petróleo y el gas. In: *Geología del petróleo*. Barcelona, Omega, 1963. Cap. 5, p. 150-195.
32. LEINZ, V. & AMARAL, S.E. Atividades geológicas dos organismos. In: *Geologia geral*. 3. ed. São Paulo, Editora Nacional, 1966. p. 269-307.

33. MELFI, A.J. *Influência da sílica na evolução dos geles amorfos de ferro (III): estudo experimental simulando condições tropicais úmidas e bem drenadas*. São Paulo, Instituto de Geociências e Astronomia da USP, 1971. Tese de Livre Docência em geologia.
34. MERCK. *Análisis de águas; una selección de métodos químicos para la práctica*. Darmstadt, s.d. 11 p.
35. MESSINEVA, M.A. The geological activity of bacteria and its effects on geochemical process. In: *Geologic activity of microorganisms*. New York, Institute of Microbiology, 1961. p. 6-14.
36. OLIVEIRA, H.G. & CAMARGO, W.M. Observação do desempenho e recuperação de barragens obras anexas e reservatórios. In: *SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS*, 11, Fortaleza. *Anais ... Fortaleza, Comitê Brasileiro de Grandes Barragens*, 1976. Tema 3, p. 18-20.
37. PERSONS, B.S. *Laterite genesis location use*. New York, Plenum, 1970. 103 p.
38. RAMALHO, R.S. Theory and practice of aeration in wastewater treatment. In: _____. *Introduction to wastewater treatment processes*. New York, Academic, 1977. Cap. 4, p. 127-41.
39. RANKAMA, F. & SAHAMA, T.G. *Geochemistry*. Chicago, The University of Chicago, 1950. 912 p.
40. RHODIA. Indústrias Químicas e Textéis. Departamento Penta. *Gilopen-ol (pentaclorofenol) geilopen-na (pentaclorofenato de sódio)*. São Paulo, 1976. 8p. (Boletim técnico, 1-A).
41. RIBEIRO, R.M.; SANTOS, A.M.; NARTELLI, H.L. Alterações microbianas em rochas; solubilização do ferro por ações de fungos em diabásios. *Revista Brasileira de Geociências*. São Paulo, 6:146-55, 1976.
42. RODIER, J. *L'analyse chimique et physico-chimique de l'eau*. 3. ed. Paris, Dunod, 1966.
43. SILVA, F.P. Considerações sobre filtros de proteção. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES*, 3, Belo Horizonte, 1966. *Anais ... Belo Horizonte, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos*, 1966. v.1. tema 5, p. 48-53.

44. SILVEIRA, A. An analysis of the problem of washing through in protective filters. *Boletim da ABMS*. São Paulo. (1): 29-47, 1965.
45. _____. Novas considerações sobre filtros de proteção. *Jornal dos Solos*. São Paulo, 3(1):1-20, 1965.
46. SILVEIRA, E.B.S. et alii. Problemas relativos ao projeto e construção da drenagem interna de barragens de terra. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 9, Rio de Janeiro, 1973. *Anais ...* Rio de Janeiro, Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, 1973. Tema 2, p. 1-52.
47. SUGUIO, K. & BARBOUR, A.P. Morfologia e gênese das estruturas limoníticas dos sedimentos da bacia de São Paulo. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. São Paulo, 41(2):p.161-80, 1969.
48. SILVERMAN, M.P. & EHRLICH, H.L. Microbial formation and degradation of minerals. *Advances in Applied Microbiology*, New York, 6:153-206, 1964.
49. SZIKSZAY, M. Dados hidrogeoquímicos de rios da bacia do Paraná. São Paulo, Instituto de Geociências da USP, 1973. Separata do *Boletim IG*, São Paulo, 4:97-108, 1973.
50. TAYLOR, D.W. Filtration. In:.... *Fundamentos de la mecanica de suelos*. México, Continental, 1969. p. 189-245.
51. TERZAGHI, K. & PECK, R.B. *Mecânica dos solos na prática da engenharia*. Rio de Janeiro, Ao Livro Técnico, 1969. 659 p.
52. TODD, D.K. *Hidrologia de águas subterrâneas*. São Paulo, Edgard Blücher, 1959. 319 p.
53. TWENHOFEL, W.H. Classification of environments. In:.... *Principles of sedimentation*. New York, Mc Graw-Hill, 1939.
54. VAISBICH, S.; PINTO, M.L.M.; BORZANI, W. Lixiviação bacteriana de rejeito de minério de cobre de Camaquã pela ação bacteriana isolada do próprio rejeito. *Revista Brasileira de Tecnologia*. São Paulo, 10:289-302, 1979.
55. VARGAS, M. Fissuramentos em barragens de terra. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 6, Rio de Janeiro, 1970. *Anais ...* Rio de Janeiro, Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, 1970. p. 1-14.
56. VARGAS, M. & HSU, S.J.C. O emprego de filtros verticais nas barragens de terra. *O Empreiteiro*. São Paulo (33):41-7, 1970.

57. VILLANOVA, C.A.E. Xavantes hydroelectric powerplant. *Construção Pesada*. Topmost Dams of Brazil. São Paulo, S.d., p.148-59. (Número especial).
58. WILLIG, D.D. & FORMOSO, M.L.L. Estudo geoquímico e gênese das couraças de ferro da formação Rio Bonito - Rio Grande do Sul - Brasil. *Pesquisas*. Porto Alegre (2):37-48, 1973.
59. XU, J.K.; GUO, B.J.; CHEN, D.C. Experience in using residual soils for earth dam construction in Guangdong Province, China. In: CONGRÈS INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES, 12, México, 1976. *Rapports ...* México, Comité Internationale des Grands Barrages, 1976. p. 821-38.
60. ZAJIC, J. *Microbial biogeochemistry*. New York, Academic, 1969. 345 p.
61. ZASLAVSKY, D. & KASSIFF, G. Theoretical formulation of piping mechanism in cohesive soils. *Géotechnique*, Londres, 15(3): 305-16, 1965.
62. VACHAUD, G. Transferts hydriques entre sol et atmosphere. COURS DE III^e CYCLE DES UNIVERSITES ROMANDES, Neuchatel, 1976. *Résumé de séminaire*. Neuchatel, Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1976. p. 1-28. Section Sciences de la Terre.
63. WIEST, R.J.M. de *Geohydrology*. New York, John Wiley & Sons, 1965. 366 p.