



Universidade Federal do Pará
Centro Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

ROSETE FERREIRA DE LIMA

INFLUÊNCIA DO LEITO DE CONTATO NA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE FERRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Belém/PA
2006



Universidade Federal do Pará
Centro Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

ROSETE FERREIRA DE LIMA

INFLUENCIA DO LEITO DE CONTATO NA EFICIENCIA DE REMOÇÃO DE FERRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, com área de concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará.

Orientadora: Prof^a. Luiza Carla Girard Teixeira Machado

Belém/PA
2006

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP) –
Biblioteca Central/ UFPA, Belém-PA**

Lima, Rosete Ferreira de.

Influência do leito de contato na eficiência de remoção de ferro de águas subterrâneas / Rosete Ferreira de Lima; orientadora, Prof^a. Dr^a. Luiza Carla Girard Teixeira Machado. – Belém, 2006.
199 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pará, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2006.

1. Água - Tratamento. 2. Águas Subterrâneas. 3. Saneamento Ambiental. I. Título

CDD - 21. ed. 628.162



**Universidade Federal do Pará
Centro Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

INFLUENCIA DO LEITO DE CONTATO NA EFICIENCIA DA REMOÇÃO DE FERRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

AUTORA:

ROSETE FERREIRA DE LIMA

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, com área de concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará.

APROVADA EM: / /

BANCA EXAMINADORA:

Prof^a. Dr^a LUIZA CARLA GIRARD TEIXEIRA MACHADO
Orientadora

Prof. Dr^o NEYSON MARTINS MENDONÇA
Membro

Prof. Dr^o LINDEMBERG LIMA FERNANDES
Membro

Visto:

Prof. Dr^o ALCEBÍADES NEGRÃO MACEDO
Coordenador do PPGEC / CT / UFPA

Dedico este trabalho aos meus pais, por sempre me darem amor, carinho, incentivo, compreensão e contribuição nos momentos mais difíceis da minha vida e a meus irmãos pelo incentivo e carinho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pois somente pelas suas bênçãos imensuráveis poderia chegar onde estou hoje;

Aos meus pais Ruivaldo e Maria, pelos ensinamentos e por terem dado força em todos os momentos da minha vida e aos meus irmãos Rosana e Robson pelo incentivo;

A Professora Doutora Luiza Carla Girard Teixeira Machado pela sua orientação que contribui de forma excepcional para o desenvolvimento deste trabalho e principalmente por ter me possibilitado preciosas oportunidades;

Ao Prof. Dr. Miguel Imbiriba pela ajuda na pesquisa bibliográfica;

Aos funcionários e as empresas pelas informações e pela atenção valiosa nas visitas (COSANPA e SAAEB);

CAPES, pela bolsa de estudo que permitiu a realização dessa dissertação;

Aos funcionários da UFPA, principalmente ao Pedro Rosa pela estímulo e apoio dado, sem medidas;

A empresa Tigre pelo apoio na aquisição dos materiais necessários para implantação do sistema piloto;

Ao Engº Civil Reinaldo, por não medir esforços em me ajudar a qualquer momento;

A Prefeitura do Campus da UFPA pelo apoio na implantação do sistema e ajuda do material suporte;

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC;

Ao Engº Elétrico Marcos pelo incentivo, apoio e atenção nos momentos difíceis, a ele meu carinhoso agradecimento;

Ao Grupo de Pesquisa em Gerenciamento de Águas e Reuso de Efluentes – GESA pelo apoio financeiro para realização deste trabalho;

A Professora M.S.c Márcia Valéria e o Professor Doutor Neyson Martins pela colaboração e atenção a mim concedida na realização deste trabalho;

As amigas pelo incentivo e carinho, especialmente a Evelyn pela ajuda na implementação deste trabalho;

Em especial, a todos os meus amigos do GESA, sem exceções, pelo grande apoio , dado a este trabalho;

Ao Programa Pobreza e Meio Ambiente na Amazônia – POEMA, por ter dado apoio estrutural na execução deste trabalho;

Aos meus amigos William, Adriano, Silva, pela ajuda na obtenção dos dados nas análises físico-químicas;

Ao amigo Paulo Meirelles por sua atenção e apoio;

Ao meus avós (*Im memoriam*) Dionísio Alves e Hilda Vieira, pelas palavras de conforto e pela preciosas lições de vida, minha eterna gratidão.

E, finalmente, a todos aqueles que direta ou indiretamente dispuseram suas valiosas colaborações para a realização deste trabalho.

Ora, àquele que é poderoso para fazer infinitamente mais do que tudo quanto pedimos ou pensamos, conforme o seu poder que opera em nós.

(Efésios 3:20)

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT.....	12
LISTA DE FIGURAS.....	13
LISTAS DE FOTOGRAFIAS.....	14
LISTAS DE QUADROS.....	15
LISTAS DE GRÁFICOS.....	16
LISTAS DE TABELAS.....	19
LISTA DE ABREVIATURAS.....	20
1 INTRODUÇÃO.....	21
2 OBJETIVOS.....	23
2.1 GERAL.....	23
2.2 ESPECÍFICOS.....	23
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
3.1 ÁGUA SUBTERRÂNEA.....	24
3.2 GEOLOGIA REGIONAL.....	25
3.2.1 Formação Pirabas.....	26
3.2.2 Grupo Barreiras.....	27
3.2.3 Formação Pós-Barreiras.....	28
3.3 GEOLOGIA LOCAL.....	29
3.4 A PRESENÇA DE FERRO NA NATUREZA.....	31
3.5 OCORRÊNCIA DE FERRO EM ÁGUA SUBTERRÂNEA.....	32
3.5.1 Características Gerais.....	32
3.5.2 Problemática do ferro nas águas subterrâneas da RMB.....	33
3.6 INCONVENIENTES DA PRESENÇA DE FERRO EM ÁGUAS DE ABASTECIMENTO.....	35
3.7 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO.....	39
3.8 OXIDAÇÃO DO FERRO.....	42
3.8.1 Aeração.....	42
3.8.2 Flotação.....	49
3.8.3 Oxidação Química.....	52
3.9 FILTRAÇÃO.....	57
3.9.1 Mecanismo de Filtração.....	57
3.9.2 Classificação dos Filtros.....	62
3.9.3 Filtros Rápidos.....	63
3.9.4 Camada Suporte.....	72
3.9.5 Fundo Falso.....	74
4.0 LAVAGEM OPERACIONAL DE FILTROS RÁPIDOS.....	76
4.1 MÉTODOS DE LAVAGEM DE FILTROS RÁPIDOS.....	80
4.2 EXEMPLOS DE ETAS TIPO DESFERRIZAÇÃO DA RMB.....	86
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	93
5.1 SELEÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	93
5.2 ETAPAS DA PESQUISA.....	94
5.2.1 Dimensionamento da ETA - Piloto.....	94

5.2.2 Implantação da ETA - Piloto tipo desferrização	103
5.2.3 Determinação da eficiência de filtração em função do leito de contato.....	112
5.2.4 Avaliação dos dados.....	116
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	118
6.1 TAXAS COM E SEM LEITO DE CONTATO	119
6.1.1 Avaliação do Comportamento do Sistema para as Taxas em Função do Leito de Contato	170
6.1.1.1 Em Função da Presença do Leito de Contato	175
6.1.1.2 Em Função da Ausência do Leito de Contato	177
6.1.1.3 Em Função da Ausência e Presença do Leito de Contato.....	179
7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	182
REFERÊNCIAS.....	184
ANEXO A: DIMENSIONAMENTO DA ETA – PILOTO	190
ANEXO B: ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA PILOTO TIPO DEFERRIZAÇÃO	194
FERRO TOTAL.....	195
PROCEDIMENTO:.....	195
FERRO FERROSO	198
PROCEDIMENTO:.....	198

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência da unidade leito de contato na eficiência de remoção ferro em Estação de Tratamento de Água (ETA) tipo desferrização que trata água subterrânea. Os ensaios foram realizados em uma instalação piloto, composta por um aerador tipo tabuleiro, um leito de contato de fluxo ascendente e um filtro rápido de fluxo descendente, que tem capacidade para tratar cerca de $1,7\text{m}^3/\text{h}$. A ETA - piloto foi instalada no Setor Profissional do Campus Guamá da UFPA, sendo a água bruta proveniente de manancial subterrâneo, que contem ferro em teores elevados (em torno de 2mg/L). Na ETA - Piloto foram aplicadas taxas de filtração de $180\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$, $270\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ e $360\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ em triplicata em duas fases experimentais: a primeira com leito de contato e segunda sem leito de contato. Foram monitoradas a carreira de filtração, a perda de carga e as variáveis: pH, Cor Aparente, Ferro (Total e Ferroso) e Turbidez. Para a Fase I as eficiências de remoção de ferro total obtidas para as taxas de filtração de $180\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$, $270\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ e $360\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ foram de 93% a 94%, 85% a 95% e 91% a 92%, respectivamente. Para a Fase II as eficiências de remoção de ferro total ficaram em torno de 91% a 93%, 91% a 93% e 88% a 93%, respectivamente. As carreiras de filtração com leito de contato para as taxas de $180\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$, $270\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ e $360\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ apresentaram tempo de duração média de 41h, 30h e 22,7h, respectivamente, enquanto que na ausência de leito de contato a duração média foi de 16h, 12h e 4,7h, respectivamente. Dessa forma pode-se concluir que o leito de contato é uma unidade indispensável em uma ETA tipo desferrização, pois melhora o desempenho de sistema, produzindo efluente de boa qualidade e carreiras de filtração mais prolongadas.

Palavras – Chaves: Água Subterrânea. Leito de Contato. Remoção de Ferro. Taxas de Filtração. Filtro Rápido Descendente

ABSTRACT

The present work consisted on the evaluation of the acting of a Pilot Iron Removal Plant (**IRP**), regarding the presence or absence of contacting surface. The Pilot IRP is composed by an multiple tray aerator, a contact surface by ascending flow and a downflow rapid sand filter, sited at Federal University of Pará, using raw water from underground water deposits, containing high quantity of Iron, around 2mg/L, above the 0.3mg/L established on the 518/2004 law. During the monitoring two experimental phases were made, the first with the contact surface and the second without it, being adopted three filtration rates: 180m³/m²xday, 270m³/m²xday and 360m³/m²xday. In the experimental phases were appraised the following variables: pH, Color, Total Iron, Ferrous Iron and the turbidity. The efficiency of removal of total iron obtained for the rates of filtration of 180m³/m²xday, 270m³/m²xday and 360m³/m²xday with the contact surface was 93% to 94%, 85 % to 95% and 91% to 92%, respectively. Without the contact surface the efficiency of extracting of iron was around 91% to 93%, 91% to 93% and 88% to 93%, respectively. The filtration duration with contact surface for the rates of 180m³/m²xday, 270m³/m²xday and 360m³/m²xday presented duration of 41h, 30h and 22,7h, respectively, while with the absence of contact surface the medium duration was of 16h, 12h and 4,7h respectively. In that way it can be concluded that the contact surface is an indispensable unit in a IRP, because it improves the system acting, producing effluent of good quality effluent and lingers filtrat ons.

Keywords: underground water. Contact surface. Filtration rates. Iron extracting. Downflow rapid filter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição da Água na Natureza.....	24
Figura 2 – Perfil Litológico do Poço do Campus Guamá - RMB.....	30
Figura 3 - Estação de Tratamento de Água Distribuição da Água na Natureza	40
Figura 4 - Variação da concentração de ferro solúvel por aeração	44
Figura 5 - Aerador Tipo Cascata	45
Figura 6 - Aerador de Tabuleiros.....	46
Figura 7 - Aerador de ventilação Forçada	48
Figura 8 - Partícula Sólida em contato com bolha de ar no processo de flotação.....	49
Figura 9 - Ilustração dos mecanismos de agregação das bolhas de ar aos flocos ...	50
Figura 10 - Tipos de Flotação.....	51
Figura 11 - Mecanismos da filtração	58
Figura 12 – principais mecanismos de transporte	59
Figura 13 - Filtro rápido de Fluxo Descendente	64
Figura 14 - Diferentes Formas de Grãos.....	69
Figura 15 - Arranjo típico de camada suporte	73
Figura 16 - Placa porosa de bastonetes de polietileno.....	73
Figura 17- Esquemas de sistema de drenagem de filtros por meio de tubulações perfuradas	75
Figura 18 - Vigas Californianas	76
Figura 19 - Comportamento dos grãos durante a lavagem.....	78
Figura 20 - variação teórica da perda de carga em um meio granular limpo em função da velocidade ascensional	79
Figura 21 - lavagem superficial com torniquetes hidráulicos.....	82
Figura 22 – Subcamadas de seixos do leito de Contato da ETA - Piloto	99
Figura 23 - Pontos de monitoramento da ETA-Piloto	112
Figura 24 - Variação da concentração da turbidez da AF e distribuição da perda de carga em função do tempo de operação para $T_x - 180\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ com leito de contato	128
Figura 25 - Variação da concentração da turbidez da AF e distribuição da perda de carga em função do tempo de operação para $T_x - 180\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ sem leito de contato	137
Figura 26 - Variação da concentração da turbidez da AF e distribuição da perda de carga em função do tempo de operação para $T_x - 270\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ com leito de contato	146
Figura 27 -Variação da concentração da turbidez da AF e distribuição da perda de carga em função do tempo de operação para $T_x - 270\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ sem leito de contato	154
Figura 28 - Variação da concentração da turbidez da AF e distribuição da perda de carga em função do tempo de operação para $T_x - 360\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ com leito de contato	162
Figura 29 - Variação da concentração da turbidez da AF e distribuição da perda de carga em função do tempo de operação para $T_x - 360\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ sem leito de contato	170

LISTAS DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1-Inconvenientes da presença de ferro em águas- RMB	38
Fotografia 2 - Inconvenientes da presença de ferro em utensílios domésticos.....	38
Fotografia 3 - Aerador Tipo Cascata	45
Fotografia 4 - Aerador de Tabuleiros.....	47
Fotografia 5 - Aerador do tipo Repuxo	48
Fotografia 6 - Método de lavagem com aplicação de água em sentido ascensional.	81
Fotografia 7: lavagem independente de ar e água	84
Fotografia 8 - Painel de controle de adição de dióxido de cloro e filtro de pressão da ETA Infraero.....	87
Fotografia 9 - ETA - Tipo Desferrização, localizado na UFPA.....	88
Fotografia 10 - Aerador tipo tabuleiro e filtro, respectivamente, localizado no Bairro do tapanã na ETA Aldo Almeida	89
Fotografia 11 - Aerador tipo tabuleiro e Filtro Rápido, localizado no Bairro do Tapanã na ETA Cordeiro de Farias.....	90
Fotografia 12 - Aerador tipo tabuleiro, localizado no Bairro do Satélite na ETA do IPASEP	91
Fotografia 13 - Sistema Canarinho tipo desferrização, localizado no Bairro do Tapanã	92
Fotografia 14 - Local da instalação da ETA –Piloto – Campus Profissional Guamá UFPA.....	93
Fotografia 15 - Aerador tipo tabuleiro em fibra de vidro e estrutura em alumínio confeccionado para a ETA-Piloto.....	98
Fotografia 16 - Leito de Contato de fluxo ascendente.....	100
Fotografia 17 - Base de concreto para implantação da ETA-Piloto.....	103
Fotografia 18 - Estrutura de madeira do Aerador da ETA-Piloto.....	104
Fotografia 19 - Base de concreto para apoio do Leito de Contato da ETA-Piloto. ...	105
Fotografia 20 - Base de concreto para apoio do filtro da ETA-Piloto.....	106
Fotografia 21 - Base de sustentação de concreto da caixa d'água da ETA-Piloto. .	107
Fotografia 22 - Tubulações de AB que abastece o aerador da ETA-Piloto	107
Fotografia 23 -Tubulações de entrada do filtro sem passar pelo leito de contato ...	108
Fotografia 24 - descarga do leito de contato da ETA-Piloto	108
Fotografia 25 - tubulação de entrada do filtro após passar pelo leito de contato. ...	109
Fotografia 26 - tubulações de saída do filtro rápido descendente da ETA-Piloto....	109
Fotografia 27- Descarga do filtro rápido descendente da ETA-Piloto.....	110
Fotografia 28 - Entrada de água da tubulação da retrolavagem da ETA-Piloto.	110
Fotografia 29 - Tubulações da retrolavagem da ETA-Piloto.....	111
Fotografia 30 - piezômetros do filtro rápido descendente.	111
Fotografia 31 - Extravasor do Filtro Rápido Descendente.....	127

LISTAS DE QUADROS

Quadro 1- Algumas características dos padrões de potabilidade	36
Quadro 2 - Vantagens e Desvantagens das Estações de Tratamento de água Convencional e Não Convencional	41
Quadro 3 – Relação estequiométrica com a utilização de cloro para oxidação de 1mg de ferro.....	54
Quadro 4: Classificação dos filtros para tratamento de água	62
Quadro 5 - Características Granulométricas de material filtrante utilizados na filtração rápida	65
Quadro 6 - valores do coeficiente de esfericidade, fator de forma e porosidade típicos de grãos de areia.	69
Quadro 7 - Massa Específica dos materiais filtrantes usuais	71
Quadro 8 - Métodos de Lavagem de Filtros Rápidos	80
Quadro 9 - Etapas da pesquisa.....	94
Quadro 10- Características do aerador tipo tabuleiro.....	95
Quadro 11- Características de leito de contato	95
Quadro 12 Características do filtro rápido.....	96
Quadro 13 - Especificações granulométricas das camadas que constituem o leito de contato.	99
Quadro 14 - Material componente do leito filtrante do filtro de camada simples da ETA-Piloto.	101
Quadro 15 - Características da camada suporte e camada torpedo da ETA-Piloto.	102
Quadro 16 - Determinações laboratoriais realizados na etapa experimental	114
Quadro 17- Principais parâmetros físico-químicos da Água Bruta.....	118

LISTAS DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Curva Granulométrica.....	67
Gráfico 2 - Box-Plot do pH da AB, AL e AF para Tx – 180m ³ /m ² xdia.....	120
Gráfico 3 - Variação de cor aparente da AB, AL e AF em relação ao VMP na Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde para Tx - 180m ³ /m ² xdia com leito de contato	122
Gráfico 4 - Variação de turbidez da AB, AL e AF comparados com valores máximos permissíveis da Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde para Tx - 180m ³ /m ² xdia com leito de contato	123
Gráfico 5 - Variação da concentração do ferro total da AB, AL e AF comparados com valores máximos permissíveis da Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde para Tx - 180m ³ /m ² xdia com leito de contato.....	125
Gráfico 6 - Variação da concentração do ferro ferroso da AB, AL e AF para Tx – 180m ³ /m ² xdia com leito de contato	126
Gráfico 7 - Variação da eficiência em relação a concentração do ferro total da AB e AF para Tx – 180m ³ /m ² xdia com leito de contato	126
Gráfico 8 - Box-Plot do pH da AB e AF para Tx – 180m ³ /m ² xdia sem o leito de contato	130
Gráfico 9 -Variação de cor aparente da água bruta e água filtrada comparados com valores máximos permissíveis da Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde para Tx- 180m ³ /m ² xdia sem o leito de contato.....	132
Gráfico 10 - Variação de turbidez da água bruta e água após filtração comparados com valores máximos permissíveis da Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde para Tx- 180m ³ /m ² xdia sem o leito de contato.....	133
Gráfico 11 – Variação da concentração do ferro total da água bruta e água filtrada comparados com valores máximos permissíveis da Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde para Tx-180m ³ /m ² xdia sem o leito de contato	135
Gráfico 12 - Variação da concentração do ferro ferroso da AB e AF para Tx – 180m ³ /m ² xdia sem leito de contato	135
Gráfico 13 - Variação da eficiência em relação a concentração do ferro total da AF para Tx – 180m ³ /m ² xdia sem leito de contato	136
Gráfico 14 - Box-Plot do pH da AB , AL e AF Tx - 270m ³ /m ² xdia com leito de contato	139
Gráfico 15 - Variação de cor aparente da AB, AL e AF em relação ao VMP na Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde para Tx - 270m ³ /m ² xdia com leito de contato	141
Gráfico 16 - Variação de turbidez da AB, AL e AF comparados com valores máximos permissíveis da Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde para Tx - 270m ³ /m ² xdia com leito de contato.....	142
Gráfico 17 - Variação da concentração do ferro total da AB, AL e AF comparados com valores máximos permissíveis da Portaria nº 518/04 Ministério da Saúde para Tx - 270m ³ /m ² xdia com leito de contato.....	144
Gráfico 18 - Variação da concentração do ferro ferroso da AB, AL e AF para Tx – 270m ³ /m ² xdia com leito de contato.....	144
Gráfico 19 - Variação da eficiência em relação a concentração do ferro total da AB e AF para Tx – 270m ³ /m ² xdia com leito de contato	145
Gráfico 20 - Box-Plot do pH da AB, AL e AF para Tx – 270m ³ /m ² xdia sem o leito de contato	147

Gráfico 21 - Variação de cor aparente da água bruta e água filtrada comparados com valores máximos permissíveis da Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde para Tx- 270m ³ /m ² xdia sem o leito de contato.....	149
Gráfico 22 - Variação de turbidez da água bruta e água após filtração comparados com valores máximos permissíveis da Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde para Tx- 270m ³ /m ² xdia sem o leito de contato.....	150
Gráfico 23 - Variação da concentração do ferro total da água bruta e água filtrada comparados com valores máximos permissíveis da Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde para Tx-270m ³ /m ² xdia sem o leito de contato	152
Gráfico 24 - Variação da concentração do ferro ferroso da AB e AF para Tx – 270m ³ /m ² xdia sem leito de contato	152
Gráfico 25 - Variação da eficiência em relação a concentração do ferro total da AF para Tx – 270m ³ /m ² xdia sem leito de contato	153
Gráfico 26 - Box-Plot do pH da AB , AL e AF para Tx - 360m ³ /m ² xdia com leito de contato	155
Gráfico 27 - Variação de cor aparente da AB, AL e AF em relação ao VMP na Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde para Tx - 360m ³ /m ² xdia com leito de contato	157
Gráfico 28 - Variação de turbidez da AB, AL e AF comparados com valores máximos permissíveis da Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde para Tx - 360m ³ /m ² xdia com leito de contato	158
Gráfico 29 - Variação da concentração do ferro total da AB, AL e AF comparados com valores máximos permissíveis da Portaria nº 518/04 Ministério da Saúde para Tx - 360m ³ /m ² xdia com leito de contato.....	160
Gráfico 30 - Variação da concentração do ferro ferroso da AB, AL e AF para Tx – 360m ³ /m ² xdia com leito de contato	160
Gráfico 31 -Variação da eficiência em relação a concentração do ferro total da AB e AF para Tx – 360m ³ /m ² xdia com leito de contato	161
Gráfico 32 - Box-Plot do pH da AB e AF para Tx – 360m ³ /m ² xdia sem o leito de contato	163
Gráfico 33 - Variação de cor aparente da água bruta e água filtrada comparados com valores máximos permissíveis da Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde para Tx- 360m ³ /m ² xdia sem o leito de contato.....	165
Gráfico 34 - Variação de turbidez da água bruta e água após filtração comparados com valores máximos permissíveis da Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde para Tx- 360m ³ /m ² xdia sem o leito de contato.....	166
Gráfico 35 - Variação da concentração do ferro total da água bruta e água filtrada comparados com valores máximos permissíveis da Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde para Tx-360m ³ /m ² xdia sem o leito de contato	168
Gráfico 36 - Variação da concentração do ferro ferroso da AB e AF para Tx – 360m ³ /m ² xdia sem leito de contato	168
Gráfico 37 - Variação da eficiência em relação a concentração do ferro total da AF para Tx – 360m ³ /m ² xdia sem leito de contato	169
Gráfico 38 - Avaliação do comportamento para taxa de 180m ³ /m ² xdia	171
Gráfico 39 - Duração da carreira de 180m ³ /m ² xdia (hs).....	172
Gráfico 40 - Avaliação do comportamento para taxa de 270m ³ /m ² xdia	173
Gráfico 41 - Duração da carreira de 270m ³ /m ² xdia(hs).....	173
Gráfico 42 - Avaliação do comportamento para taxa de 360m ³ /m ² xdia	174
Gráfico 43 - Duração da carreira de 360 m ³ /m ² xdia(hs).....	175
Gráfico 44 - Variação das taxas 180m ³ /m ² xdia, 270m ³ /m ² xdia e 360m ³ /m ² xdia em função da presença do leito e contato	176

Gráfico 45 - Duração da Carreira em função da presença do leito de contato.....	177
Gráfico 46 - Variação das taxas $180\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$, $270\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ e $360\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ em função da ausência do leito e contato.....	178
Gráfico 47 - Duração da Carreira em função da presença do leito de contato.....	178
Gráfico 48 - Avaliação comparativa das taxas de $180\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$, $270\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ e $360\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ sem leito de contato.....	179
Gráfico 49 - Avaliação comparativa das taxas de $180\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$, $270\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ e $360\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ sem leito de contato.....	180
Gráfico 50 - Avaliação comparativa da duração de carreira das taxas de $180\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$, $270\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ e $360\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ sem leito de contato.....	181
Gráfico 51 - Avaliação comparativa da duração de carreira das taxas de $180\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$, $270\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ e $360\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ com leito de contato.....	181

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Estatística descritiva dos resultados de pH no Sistema de desferrização piloto para Tx – 180m ³ /m ² xdia com leito de contato	120
Tabela 2 - Estatística descritiva dos resultados de Cor Aparente no Sistema de desferrização piloto para Tx – 180m ³ /m ² xdia com leito de contato	121
Tabela 3 - Estatística descritiva dos resultados de Turbidez no Sistema de desferrização piloto para Tx – 180m ³ /m ² xdia com leito de contato	123
Tabela 4 - Estatística descritiva dos resultados de FerroTotal e Ferroso no Sistema de desferrização piloto para Tx – 180m ³ /m ² xdia com leito de contato	124
Tabela 5 - Estatística descritiva dos resultados de pH no Sistema de desferrização piloto para Tx - 180m ³ /m ² xdia sem o leito de contato	129
Tabela 6 - Estatística descritiva dos resultados de Cor Aparente no Sistema de desferrização piloto para Tx - 180m ³ /m ² xdia sem o leito de contato	131
Tabela 7- Estatística descritiva dos resultados de Turbidez no Sistema de desferrização piloto para Tx - 180m ³ /m ² xdia sem o leito de contato	132
Tabela 8 - Estatística descritiva dos resultados de Ferro Total e Ferroso no Sistema de desferrização piloto para Tx - 180m ³ /m ² xdia sem o leito de contato	134
Tabela 9 – Estatística descritiva dos resultados de pH no Sistema de desferrização piloto para Tx - 270m ³ /m ² xdia com leito de contato	138
Tabela 10 - Estatística descritiva dos resultados de Cor Aparente no Sistema de desferrização piloto para Tx - 270m ³ /m ² xdia com leito de contato	140
Tabela 11 - Estatística descritiva dos resultados de Turbidez no Sistema de desferrização piloto para Tx - 270m ³ /m ² xdia com leito de contato	141
Tabela 12 - Estatística descritiva dos resultados de Ferro Total e Ferroso no Sistema de desferrização piloto para Tx - 270m ³ /m ² xdia com leito de contato	143
Tabela 13 - Estatística descritiva dos resultados de pH no Sistema de desferrização piloto para Tx - 270m ³ /m ² xdia sem o leito de contato	147
Tabela 14 - Estatística descritiva dos resultados de Cor Aparente no Sistema de desferrização piloto para Tx - 270m ³ /m ² xdia sem o leito de contato	148
Tabela 15 - Estatística descritiva dos resultados de Turbidez no Sistema de desferrização piloto para Tx - 270m ³ /m ² xdia sem o leito de contato	149
Tabela 16 - Estatística descritiva dos resultados de Ferro Total e Ferroso no Sistema de desferrização piloto para Tx - 270m ³ /m ² xdia sem o leito de contato	151
Tabela 17 - Estatística descritiva dos resultados de pH no Sistema de desferrização piloto para Tx - 360m ³ /m ² xdia com leito de contato	154
Tabela 18 - Estatística descritiva dos resultados de Cor Aparente no Sistema de desferrização piloto para Tx - 360m ³ /m ² xdia com leito de contato	156
Tabela 19 - Estatística descritiva dos resultados de Turbidez no Sistema de desferrização piloto para Tx - 360m ³ /m ² xdia com leito de contato	158
Tabela 20 - Estatística descritiva dos resultados de Ferro Total e Ferroso no Sistema de desferrização piloto para Tx - 360m ³ /m ² xdia com leito de contato	159
Tabela 21 - Estatística descritiva dos resultados de pH no Sistema de desferrização piloto para Tx - 360m ³ /m ² xdia sem o leito de contato	163
Tabela 22 - Estatística descritiva dos resultados de Cor Aparente no Sistema de desferrização piloto para Tx - 360m ³ /m ² xdia sem leito de contato	164
Tabela 23 - Estatística descritiva dos resultados de Turbidez no Sistema de desferrização piloto para Tx - 360m ³ /m ² xdia sem leito de contato	166
Tabela 24 - Estatística descritiva dos resultados de Ferro Total e Ferroso no Sistema de desferrização piloto para Tx - 360m ³ /m ² xdia com leito de contato	167

LISTA DE ABREVIATURAS

AB	Água Bruta
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AF	Água Filtrada
AL	Água após o Leito
AWWA	American Water Works Association
CESAN	Companhia espírito Santense de Saneamento
COSANPA	Companhia de Saneamento do Pará
ETA	Estação de Tratamento de Água
FAD	Flotação por Ar Dissolvido
INFRAERO	Empresa Brasileira de Infraestrutura Portuária
RMB	Região Metropolitana de Belém
SAAEB	Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Belém
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
UFPA	Universidade Federal do Pará
VMP	Valor Máximo Permitido

1 INTRODUÇÃO

A água subterrânea faz parte integrante do ciclo hidrológico, representando mais de 95% das reservas de água doce disponível no planeta, tendo as mesmas um grande potencial de aproveitamento para o consumo doméstico e industrial, seja pela exploração de aquíferos freáticos ou artesianos. No entanto, estes aquíferos podem apresentar quantidades elevadas de elementos ou compostos químicos diversos. Um dos elementos encontrados com maior frequência é o ferro.

Na água, o ferro pode ocorrer sob a forma iônica (ferro II) se a água estiver livres de oxigênio ou em pH abaixo de 3. Em condições de aerobiose, íons ferrosos passam a íons férricos que, por sua vez, formam hidróxidos de ferro insolúveis que podem atingir fortemente a água (AZEVEDO; CHASIN, 2003).

Os elevados teores de ferro nas águas subterrâneas são bem mais elevados do que nas águas superficiais. Para Carvalho et al. (2005), os problemas com ferro em contato com as águas subterrâneas, decorrem por estarem mais intimamente expostas aos materiais solúveis presentes em solos e rochas.

Concentrações excessivas de ferro podem produzir efeitos prejudiciais como, por exemplo, problemas de sabor e odor, manchas em roupas, manchas em instalações sanitárias, depósitos em canalizações causando obstruções e redução de vazão, incrustações em caldeiras e em sistemas de refrigeração e além desses, a proliferação das “ferrobacterias”.

A presença de ferro nos aquíferos da região Amazônica e especificamente da Região Metropolitana de Belém, tem sido registrada em vários poços perfurados, em valores superiores ao recomendado pela Portaria nº 518/2004 do Ministério da Saúde. Esta Portaria estabelece os procedimentos e responsabilidades, relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, sendo o valor máximo de 0,3 mg/L de ferro permitido para água potável.

Para remoção de ferro das águas normalmente utilizam-se sistemas de desferrização, que consistem na oxidação das formas solúveis de sais ferrosos Fe^{+2} para as formas insolúveis de sais férricos Fe^{+3} . Normalmente o tratamento utilizado é a aeração seguida ou não de leito de contato com posterior retenção desse material particulado ou ainda o de ciclo completo (coagulação-floculação-sedimentação-

filtração), este aplicado com menor frequência. Segundo Di Bernardo e Dantas (2005) os agentes oxidantes como o oxigênio, o permanganato de potássio, dióxido de cloro são utilizados na oxidação química.

Assim, para estudar essa temática foi instalada no Campus Guamá da UFPA uma ETA-piloto, sendo constituída de um aerador tipo tabuleiro, um leito de contato de fluxo ascendente e um filtro rápido de fluxo descendente, cujo objetivo foi avaliar a eficiência da remoção de ferro em função da presença ou ausência do leito de contato, para otimização desses sistemas de tratamento na Região Amazônica.

Dessa forma, esse trabalho foi dividido em capítulos, sendo os primeiros direcionados ao levantamento bibliográfico dos aspectos gerais da água subterrânea, geologia da RMB e tipos de tratamento de água para remoção do ferro. E nos últimos capítulos são abordados os procedimentos experimentais para determinação da eficiência de filtração em função do leito de contato e os resultados, conclusões e recomendações que servirão como subsídios para outras ETAs tipo desferrização na Região Amazônica.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

- Estudar o desempenho da Estação de Tratamento de Água (ETA) Piloto tipo desferrização em função da presença ou ausência do leito de contato, para otimização de sistemas de remoção de ferro na Região Amazônica.

2.2 ESPECÍFICOS

- Implantar uma ETA piloto constituída de aerador, leito de contato e filtro rápido descendente no Campus do Guamá da UFPA
- Determinar a eficiência de remoção de ferro em função do leito de contato
- Avaliar o tempo de carreira de filtração em função do leito de contato

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ÁGUA SUBTERRÂNEA

Á água abrange quase 4/5 da superfície terrestre; desse total, 97,0% referem-se aos mares e os 3% restantes às águas doces. Dentre as águas doces, 2,7% são formados por geleiras, vapor de água e lençóis existentes em grandes profundidades, mais de 800m.

Em conseqüência, constata-se que somente 0,3 do volume total de água do planeta pode ser aproveitado para nosso consumo, sendo 0,01% encontrada em fontes de superfície (rios, lagos) e o restante, ou seja, 0,29%, em fontes subterrâneas (poços e nascentes). Na Figura 1 é representada a distribuição da água na natureza.

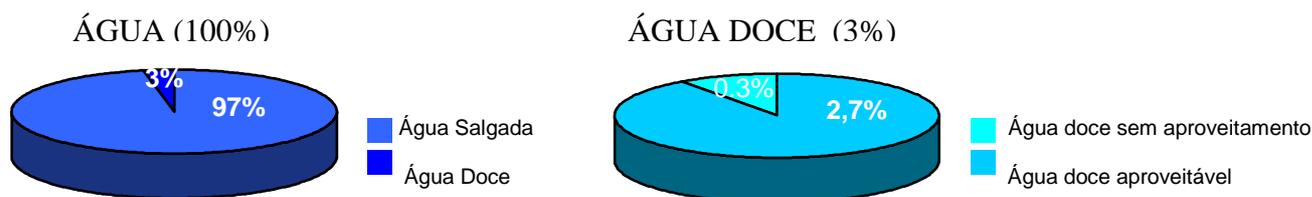


Figura 1 - Distribuição da Água na Natureza
Fonte: Adaptado de FNS (1991)

A água subterrânea faz parte do ciclo hidrológico, ocorrendo nos poros e interstícios das formações geológicas de caráter sedimentar, ou nos planos estrutural das formações geológicas de caráter ígneo ou metamórfico, representado por falhas, fendas, fraturas e fissuras.

A água subterrânea ocorre em materiais rochosos consolidados (rochas firmes), e em materiais desagregados não consolidados (rochas friáveis). As rochas sedimentares constituem 5% da crosta terrestre, porém contém 95% da água subterrânea (TSUTIYA, 2005).

Segundo Cavalcante e Sabadia (1992), a importância das águas subterrâneas é evidenciada pelo baixo custo de implantação da obra de captação, comparativamente as águas superficiais, com amortização dos investimentos em um

curto a médio espaço de tempo, boa qualidade da água, custo mínimo com aduções e, além de tudo, por estarem melhores protegidas dos agentes poluidores.

Para Feitosa e Manoel Filho (1997), a água subterrânea, na maioria das vezes, não apresenta problema de contaminação física ou biológica, porém, apesar de ser menos vulnerável em relação à água superficial, também pode ser afetada por contaminantes, provenientes de perdas em redes de esgotos, derramamentos de petróleo, intrusões de água de qualidade inferior, etc. A remoção de contaminantes neste tipo de água é, em geral, muito mais difícil de se fazer, comparativamente com a água superficial.

Segundo Ferreira (2003) apud Rebouças (1990) atualmente, a água subterrânea constitui a principal fonte de abastecimento público da Europa Ocidental, suprimindo de 50 a 100% das demandas. Estima-se em 1.500.000 o número de poços em Operação na América Latina e este número é muito pequeno se comparado com os Estados Unidos, onde são perfurados entre 800.000 a 900.000 poços por ano.

No Brasil a água subterrânea é largamente utilizada. A Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) utiliza mais de 1.000 poços para abastecimento público atendendo uma população de 3.000.000 de usuários (Tsutiya, 2005). No estado do Pará podemos citar o Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Belém (SAAEB) que, na sua área de atuação, utiliza 15 poços profundos de 180 a 270m, ao passo que a Companhia de Saneamento do Pará (COSANPA), opera com um sistema misto, sendo 70% por água superficial e 30% o abastecimento público por água subterrânea (OLIVEIRA, 2002).

Nos próximos itens será dado enfoque à formação geológica do solo, ressaltando a presença do ferro proveniente de águas subterrâneas, bem como seus inconvenientes.

3.2 GEOLOGIA REGIONAL

O conjunto de rochas que compõem o quadro litoestratigráfico da Região Metropolitana de Belém (RMB) e adjacências faz parte da Bacia Sedimentar do Amazonas, cuja área emersa é conhecida como Bacia Sedimentar do Marajó (OLIVEIRA, 2002).

Os litótipos que compõem a moldura geológica da região estão nos domínios das coberturas fanerozóicas e encontram-se representados por uma seqüência carbonática em subsuperfície, denominada Formação Pirabas, de idade miocênica, e por sedimentos clásticos do Grupo Barreiras (terciário), Coberturas Detrítico Lateríticas (quaternário), Cobertura Sub-Recente (quaternário) e Cobertura Aluvionar Recente (quaternário).

A RMB é representada geologicamente por três unidades geológicas: sedimentos Formação Pirabas, Grupo Barreiras e Pós-Barreiras.

3.2.1 Formação Pirabas

A Formação Pirabas, posicionada seguramente no Mioceno Inferior, litologicamente é constituída por calcários com níveis fotossilíferos, alternados com areias e argilas. Apresenta-se geralmente em camadas horizontais, com espessura muito variável, de alguns centímetros à metros e subordinadas às paleodepressões das rochas e constitui numa das faunas marinhas mais representativas do Cenozóico. Encontra-se sobre a plataforma continental norte brasileira e com as melhores ocorrências concentradas, principalmente, ao longo do litoral dos estados do Pará, Maranhão e Piauí (OLIVEIRA, 2002). No Pará sua melhor exposição em superfície é encontrada na Zona do salgado, tendo como localidade tipo a ilha de Fortaleza, próximo ao município de São João de Pirabas (PICANÇO, 2000).

A formação Pirabas, devido às suas variações litopaleontológicas, possui várias propostas de divisões faciológicas. Oliveira (2002) apud Ferreira (1988), definem três fácies¹:

- FÁCIES CASTELO: é caracterizado por calcários de composição variada, apresentando micritos, biohermitos e dolmicritos, que afloram na região de Salinópolis e Fortalezinha. O ambiente deposicional é caracterizado por mar aberto de águas agitadas e quentes, com salinidade normal.

- FÁCIES BAUNILHA GRANDE: caracteriza-se litologicamente por argilas negras apresentando vegetais piritizados e carcinólitos (nódulos de calcários

¹ Termo geral para indicar o aspecto (a "face") da rocha e, assim, caracterizar um tipo ou grupo de rochas em estudo.

escuros), encontrados em furos de sondagem nas regiões de Quatipuru e Primavera. Estes fácies contém fragmentos de crustáceos, caracterizando um ambiente redutor, sugerindo um ambiente típico de mangue.

- FÁCIES CAPANEMA: é constituído por margas (calcários argilosos), micritos, bioclásticos, folhetos rítmicos e arenitos calcíferos que afloram no município de Capanema. O seu ambiente deposicional é lagunar, de borda de bacia e estuarino.

3.2.2 Grupo Barreiras

O Grupo Barreiras, constitui-se dos mais variados tipos de depósitos continentais, com uma litologia extremamente variada. Trata-se de um conjunto estratigráfico dos mais complexos, afossífero e com suas camadas horizontalizadas, por vezes localmente inclinadas.

Apresenta-se litologicamente constituído por uma seqüência sedimental variando desde argilas a multicoloridas, observadas na sua porção mais inferior a sedimentos inconsolidados argilo – arenosos e areno – argilosos, em geral com tons amarelados, alarajandos e avermelhados, níveis e leitos de material grosseiro, com seixos de quartzo de tamanhos variados, arredondados e subarredondados, observando-se também freqüentemente, níveis descontínuos de um arenito ferruginoso “Grês do Pará” em blocos soltos, irregulares, e de tamanho variado, não faltando, por vezes leitos mais ou menos contínuos.

A determinação do grupo Barreiras foi proposto por Góes et al. (1990) baseada na divisão da base para topo: fácies argilo-arenosa, arenosa e conglomerática.

- FÁCIES ARGILO-ARENOSA: possui melhor expressão entre os municípios de Santa Maria do Pará e Capanema, caracterizando-se por apresentar interdigitação entre camadas argilosas, argilo-arenosas, areno-argilosas e arenosas estratificadas, com granulação variando de fina a média. A topografia característica é de morros suaves, com altitudes no máximo de 50 metros.

- FÁCIES ARENOSA: possui maior representatividade, é constituído por arenitos amarelados, de granulação média, e apresenta microcoglomerados moderadamente selecionados são característicos das partes basais e medianas.

- FÁCIES CONGLOMERÁTICA: é representado por seixos de rochas cristalinas com matriz areno-argilosa. Encontra-se sobreposta em discordância a rochas pré-cambrianas.

O Nordeste do Estado do Pará segue o modelo de leques aluviais-planície de areia-planície de lama, com influência de marés na porção mais distal.

Segundo Arai et al. (1988) a idade do Grupo Barreiras é relacionada ao Mioceno-Plioceno com base em palinomorfos. Góes et al. (1990) considera os sedimentos Barreiras em parte interdigitados com os da Formação Barreiras.

Normalmente, os sedimentos do Grupo Barreiras estão sobrepostos às camadas da Formação Pirabas, geralmente em contato concordante, podendo, na ausência desta, apresentar contato direto com unidades mais antigas (PROÁGUA, 2000).

3.2.3 Formação Pós-Barreiras

Silva e Loewenstein (1968) utilizaram a expressão Pós-Barreiras para designar os sedimentos de coloração amarelada encontrados acima do Grupo Barreiras.

Os sedimentos Pós-barreiras são depósitos do Quaternário, constituídos por areias, siltes e argilas aluviais de coloração amarelada (PEREIRA et al., 1994).

Estes sedimentos possuem um contato erosivo, limitado por uma superfície ressaltada por blocos de arenito ferruginoso e, algumas vezes, resultantes da fragmentação do Grupo Barreiras.

Rosseti et al. (1989) descreveram os fáceis areno-argiloso, como mal selecionados, com granulometria fina na fração areia e coloração amarelada, com tons avermelhados na porção mais inferior. Esta sub-unidade não apresenta estruturas sedimentares bem definidas.

O contato com o Barreiras se faz por superfície erosiva e marcada por níveis detríticos. Apresenta características deposicionais sugestivas da atuação de

movimentos gravitacionais, além de eólicos na faixa litorânea (ROSSETI et al., 1989). A idade mais aceita para esta unidade é halocênica, obtida a partir da datação de conchas (SIMÕES, 1981).

O Pós-Barreiras tem grande expressividade na área do município de Belém recobrimdo mais de 60% (SAUMA FILHO, 1996).

3.3 GEOLOGIA LOCAL

A RMB é representada geologicamente em três unidades: sedimentos arenosos da unidade Pós-Barreiras; sedimentos continentais halocênicos do grupo Barreiras e sedimentos da Formação Pirabas, com os quais foi montado o perfil litológico. Na Figura 2 é representado o perfil Litológico do Poço localizado no Campus da UFPA, típico do encontrado da RMB.

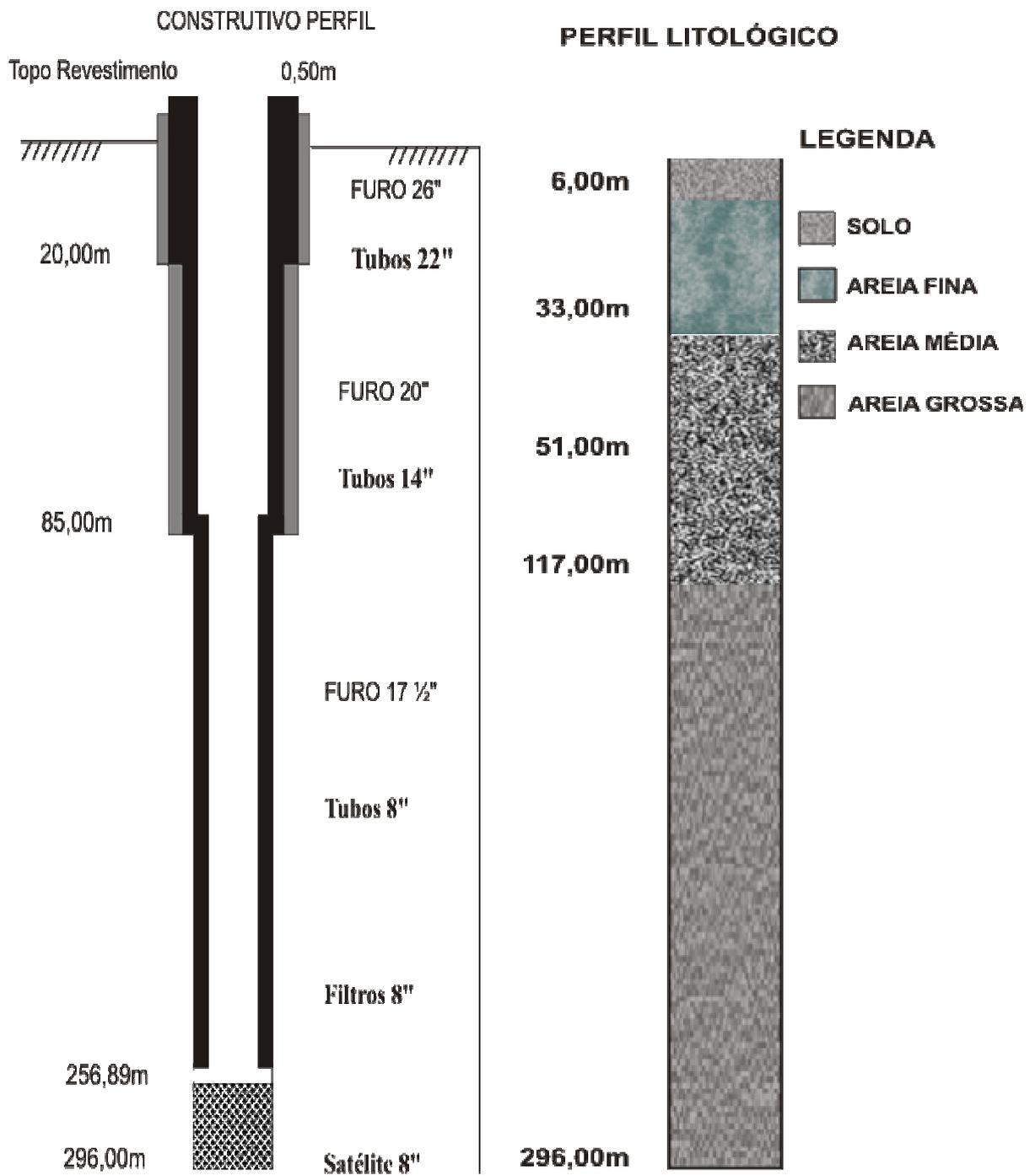


Figura 2 – Perfil Litológico do Poço do Campus Guamá - RMB
Fonte: Adaptado de Proágua Perfurações (2000)

O empilhamento litológico foi fundamentado em descrições de amostras de calha perfuradas pela PROÁGUA PERFURAÇÕES (Empresa de Perfuração de Poços Profundos), na perfuração de um poço de 296m de profundidade.

O intervalo perfurado consistiu de uma seqüência sedimentar bem definida, onde se destacam dois seguimentos deposicionais, distintos, os quais se referem as características geológicas.

O perfil inicia com um material muito mal selecionado, onde se tem um material grosseiro, subarredondado, composto de seixos de quartzo e laterita, e um material areno – argiloso, mosqueado de tons rosa avermelhado a esbranquiçado ocorrendo ainda subordinados grãos quartzosos, tamanho areia até os 36 m de profundidade.

Entre 36m e 51m de profundidade, ocorre argila plástica de coloração variando de cinza clara a escura, localmente esverdeada, sendo freqüente o registro de restos orgânicos, sob a forma de fibras.

A partir de 51m até a profundidade final do poço têm-se o Grupo Barreiras, o qual consta de uma seqüência litológica de caráter essencialmente arenoso, com leitões apresentando constantes variações no arranjo textural, com granulometria dos componentes variando de muito fina a média, vez por outra mais grosseira, com grãos angulosos a subangulosos, de coloração predominantemente cinzenta, contendo concreções ferruginosas. Verifica-se ainda neste segmento a intercalação de um fácies carbonático que poderia corresponder à Formação Pirabas.

3. 4 A PRESENÇA DE FERRO NA NATUREZA

O ferro é um sólido branco-acinzentado, elemento de transição de número atômico 26, massa atômica 55,85 e densidade $7,8\text{g/cm}^3$. Bastante dúctil e maleável e dentre os metais de emprego comum é também o principal metal magnético.

De acordo com Esteves (1980) o ferro é um elemento muito freqüente na superfície da terra. Dentre os minérios de ferro mais encontrados podemos citar a hematita (Fe_2O_3), a magnetita (Fe_3O_2), a calcopirita (CuFeS_2) e a pirita (FeS_2).

Na crosta terrestre o ferro é o terceiro elemento mais abundante nas rochas ígneas, o quarto mais abundante nas rochas sedimentares arenitos, o terceiro elemento mais abundante nas rochas sedimentáveis argilitos e o quinto elemento mais abundante nas rochas sedimentares carbonatos. Em regiões de climas tropical, a dissolução de sais minerais é acelerada nas zonas de solos e nas zonas subsaturadas, favorecendo o enriquecimento das águas subterrâneas em ferro, o mesmo não ocorre nas zonas saturadas (PIUCI; FENZL, 1978).

Na biosfera o ferro é um elemento químico especial no metabolismo das plantas e animais. Nas plantas é um micronutriente exigido em quantidade relativamente pequenas, mas é um fator essencial para o crescimento de todos os grupos: plantas superiores, algas, fungos e bactérias.

No corpo humano, o ferro participa com 0,012% de seu peso total, necessitando de cinco a seis miligramas por dia. O ferro estando presente em restos orgânicos em decomposição nos solos, principalmente nas coberturas vegetais e fazendo parte das atividades da biosfera, causa forte influência na ocorrência deste elemento nas águas subterrâneas, especialmente em climas tropicais (ESTEVEZ, 1998).

Na composição média da água do mar, o ferro é o vigésimo elemento químico mais abundante (0,01mg/L). Em águas de rios a concentração do ferro fica em torno de 0,04 à 0,67mg/L, apesar de não ser um elemento abundante nessas análises, o ferro aparece como terceiro elemento mais importante, ou seja, praticamente todas as águas potabilizadas são portadoras de ferro, embora muitas vezes em pequenas quantidades.

3. 5 OCORRÊNCIA DE FERRO EM ÁGUA SUBTERRÂNEA

3.5.1 Características Gerais

As águas subterrâneas geralmente apresentam teores de ferro bem mais elevados do que as águas superficiais, muitas vezes acima do valor máximo permitido para água potável, que é de 0,3mg/L, recomendada pelos padrões de potabilidade aplicados no Brasil pela Portaria nº 518, de 25 de março de 2004 do Ministério da Saúde. As águas subterrâneas são mais deficientes em oxigênio do que as superficiais. Observa-se em muitos aquíferos uma estratificação vertical dos teores de ferro, águas próximo do fundo do aquífero podem tornar-se esgotadas em oxigênio, alcançando assim um baixo pH (uma condição favorável para reter o ferro ferroso em solução).

O ferro é freqüentemente encontrado em águas subterrâneas, sendo a sua presença decorrente das interações da água com o solo, uma vez que o ferro é o constituinte natural do solo e das rochas.

O ferro é um elemento persistentemente presente em quase todas as águas subterrâneas em teores abaixo de 0,3mg/L. Suas fontes são minerais escuros (máficos) portadores de Fe: magnetita, biotita, pirita, piroxênios, anfibólios. Em virtude de afinidades geoquímicas quase sempre é acompanhado pelo Manganês. O ferro no estado ferroso (Fe^{2+}) forma compostos solúveis, principalmente hidróxidos. Em ambientes oxidantes o Fe^{2+} passa a Fe^{3+} dando origem ao hidróxido férrico, que é insolúvel e se precipita, tingindo fortemente a água.

Os sais de ferro encontrados em águas em contato com o oxigênio do ar dissolvido, estão na forma férrica e precipitam-se como hidróxido férrico- $Fe(OH)_3$, sendo essa precipitação instantânea quando o pH é superior a 7,5.

As águas subterrâneas, por não estarem em contato com o ar, encontram-se em um meio natural fortemente redutor, estando o ferro em solução.

Desta forma, águas com alto conteúdo de Fe, ao saírem do poço são incolores, mas ao entrarem em contato com o oxigênio do ar ficam amareladas, o que lhes confere uma aparência nada agradável.

3.5.2 Problemática do ferro nas águas subterrâneas da RMB

Segundo Sauma Filho (1996) o ferro é considerado a maior problemática das águas subterrâneas exploradas no município de Belém. Problema que se reflete, como exemplo, em poços como no Museu Emílio Goeldi; Universidade Federal do Pará; Edifícios e Indústrias. Este fato acaba por impedir, em parte, sua utilização para fins domésticos, além de levar complicações às instalações por onde circulam essas águas.

Com relação ao teor de ferro, algumas amostras coletadas dos poços de Belém e Ananindeua apresentaram anomalias de ferro total com valores acima de 0,3 mg/L e que não são recomendados pelo Ministério da Saúde (OLIVEIRA, 2002).

Segundo Ferreira (2003), foram realizadas análises físico-químicas na água do poço do Centro de Geociências da UFPA, sendo que os resultados obtidos demonstraram que o teor de ferro encontrava-se acima dos padrões de potabilidade, de 1,85mg/L.

No trabalho realizado no controle e recuperação da Estação de Tratamento de Água (ETA) da Universidade Federal do Pará (UFPA) foi verificado no

monitoramento valores de ferro acima do valor máximo estabelecido pela Portaria acima citada, em torno de 2mg/L.

Sauma Filho (1996) relata a presença de ferro em águas subterrâneas em Belém, considerando-se o fator geológico. O Grupo Barreiras oferece possibilidades de fornecer água com ferro por ser constituído de sedimentos continentais. Oliveira (2002) ressalta a associação de níveis lateríticos em ambiente oxidante, que possuem as maiores probabilidades de ferro acima do Valor Máximo Permitido - VMP. As areias da Formação Pirabas por serem sedimentos desprovidos de quantidades significativas de ferro têm menor possibilidades de fornecerem águas ricas deste elemento.

De acordo com Oliveira (2002) os poços que penetram o Grupo Barreiras, com profundidade de 60 m a 120 m geralmente contem teores excessivos de ferro, sendo necessário fazer o tratamento da água, utilizando a aeração e desferrização em sistema fechado ou oxidação química.

Segundo Damasceno, Bordalo e Vulcão (1993) dos 30 poços de Belém pesquisados e analisados com profundidade até 30 metros, 90% apresentam teor de ferro dentro dos padrões desejáveis e permissíveis. Já dos poços com profundidade variando de 30 a 99 metros, apenas 30% deles encontram-se dentro dos padrões desejáveis e permissíveis. Nos poços com profundidade superiores à 100 metros, 50% apresentam teor de ferro dentro dos padrões máximos desejáveis.

Em relação ao potencial hidrogeniônico da água, notou-se ser este um valor muito variável, mas pode-se associá-lo às condições redutoras do sub-solo de Belém. Em baixa profundidade, até 50 metros, onde ocorre sedimentação dos mangues², o pH é geralmente ácido. Já em grandes profundidades, a partir de 50 metros, o pH geralmente tende a neutralidade, ou seja, podemos afirmar de uma maneira geral, a presença do ferro se dá em pH ácido (DAMASCENO; BORDALO; VULCÃO, 1993).

Com relação à presença de ferro em meio ácido pode se considerar o caso do Poço da Estação de Tratamento de Água (ETA) de Piçarreira – bairro do Benguí com profundidade de 68 metros, onde foi realizado o monitoramento da incidência do ferro. Nesse poço foi constatado um dos maiores índices de teor de ferro em todo o

² é a vegetação alagadiça dos litorais quentes e das zonas pantanosas.

município de Belém (8,7 mg Fe/L), pois está localizado exatamente na faixa crítica (60 a 90m) de incidência e em meio ácido (pH=5,5).

Outro fator que pode influenciar no teor de ferro na água de poços tubulares de 50 metros é o regime de bombeamento, no qual pode ser verificada esta situação no município de Benevides. Neste caso a causa da presença do ferro, na água seria a intensificação da exploração (aumento na taxa e/ou do tempo de bombeamento diário) (PICANÇO, 2000).

Segundo informações adquiridas na COSANPA, a RMB utiliza água subterrânea com concentrações de ferro em torno de 0,2 a 0,5mg/L, entretanto nas águas superficiais a concentração fica entre 0,2 a 0,3mg/L. A Cosanpa tem 20 unidades de sistemas de abastecimento com poços que atendam uma população de 369.880 habitantes. Já o SAAEB opera um sistema integralmente de águas subterrâneas em quatro distritos de Belém para uma população estimada de 86.355 habitantes.

3.6 INCONVENIENTES DA PRESENÇA DE FERRO EM ÁGUAS DE ABASTECIMENTO

Teores excessivos de ferro em águas para consumo não prejudicam o ser humano. O ferro nas águas não é tóxico nem deletério à saúde.

No Brasil encontra-se em vigência a Portaria 518/04 fixada pelo Ministério da Saúde que estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano, bem como o padrão de potabilidade.

Tal padrão, adota critérios físicos, químicos, organolépticas, bacteriológicas e radiológicas, definindo os valores máximos permitidos (VMP) e estabelecendo a frequência mínima de amostragens. Tais valores e limites são definidos em função de problemas de aspectos estéticos pela presença de gosto e cor desagradáveis que as águas de consumo apresentam quando possuidoras de teores excessivos de ferro e de aspectos econômicos envolvidos. No Quadro 1 são apresentados alguns dos exemplos de VMP referentes a características físicas, químicas, organolépticas e bacteriológicas em águas para abastecimento público.

1- FÍSICAS E ORGANOLÉPTICAS		
PARÂMETRO	UNIDADE	VALOR MÁXIMO PERMITIDO (VMP)
Cor Aparente	UH ⁽¹⁾	15
Odor	-	Não objetável
Gosto	-	Não objetável
Sólidos dissolvidos totais	mg/L	1.000
Turbidez	UT ⁽²⁾	5 ^(obs.1)
2- QUÍMICAS		
2.1- Componentes inorgânicos que afetam a saúde		
Arsênio	mg/L	0,01
Cianeto	mg/L	0,07
Chumbo	mg/L	0,01
Cobre	mg/L	2
Cromo	mg/L	0,05
2.2- Componentes que afetam a qualidade Organolépticas		
Alumínio	mg/L	0,2
Cloreto	mg/L	250
Ferro	mg/L	0,3
Manganês	mg/L	0,1
Sulfato	mg/L	250
3- BACTERIOLÓGICAS		
Ausência de Escherichia coli ou coliforme termotolerantes em 100mL		
Ausência de Coliformes Totais em 100mL		

Quadro 1- Algumas características dos padrões de potabilidade

Fonte: Adaptado da Portaria nº 518 de 25 de março de 2004 do Ministério da Saúde.

(1) UH é a unidade de escala Hazen (de platina – cobalto)

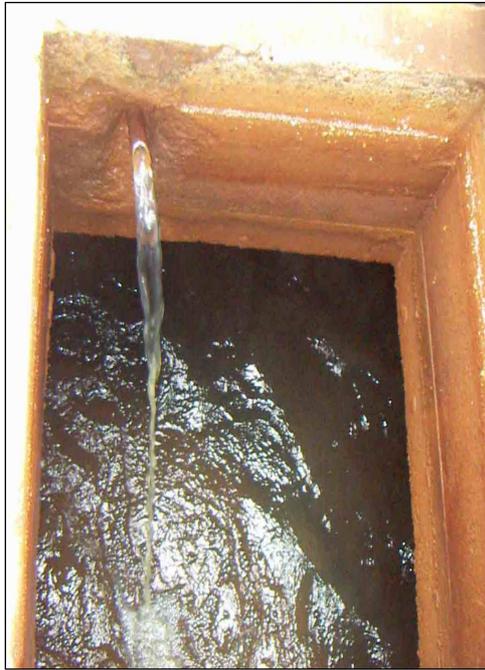
(2) UT é a unidade de turbidez, seja em unidade laekson ou nefelométrica.

Obs.1: Para a turbidez, o VPM é 1,0 UT, para a água no sistema de distribuição. O VPM de 5,0 UT é permitido em pontos de rede de distribuição, se for demonstrado que a desinfecção não é comprometida pelo uso desse valor menos exigente.

Teores de ferro acima de 0,3 mg/L podem causar cor na água, além de outros vários inconvenientes, como:

- Problemas de gosto (sabor metálico);
- Manchas em roupas lavadas nas lavanderias caseiras ou industriais;
- Manchas em instalações sanitárias (pias, tanques, bacias, azulejos, lajotas , pisos, torneiras, metais, etc...)
- Deterioração de todas as instalações técnicas que entrem em contato com essas águas;
- Depósitos em canalizações (tubulações, registros, filtros, caixas e reservatórios) causando obstruções e redução de vazão;
- Incrustações de filtros de poços causando redução da vazão;
- Obstruções de aquíferos reduzindo a transmissibilidade;
- Incrustações em caldeiras, funcionando como isolante térmico;
- Incrustações em sistemas de refrigeração e ar condicionado;
- Na presença de alimentos em cozinhas caseiras ou industriais concentrações acima de 1mg/L de ferro prejudicam a preparação de café, chá e cômodas em geral.
- Água ferruginosa torna o chá e o whiskey preto
- Podem possibilitar o desenvolvimento de certas bactérias (ferrobactérias).

Na Fotografia 1 e na Fotografia 2 pode-se verificar a presença de ferro no concreto de uma cisterna e em utensílios domésticos, respectivamente.



Fotografia 1 - Inconvenientes da presença de ferro em águas- RMB
Fonte: Direta



Fotografia 2 - Inconvenientes da presença de ferro em utensílios domésticos
Fonte: Lopes (2005)

As ferrobactérias promovem e aceleram a transformação do Fe^{+2} , presente em seu habitat aquoso, formando óxido de Fe^{+3} hidratado que precipita juntamente com as colônias bacterianas gelatinosas, levando ao acúmulo de lodo e à sedimentação (AZEVEDO; CHASIN, 2003).

Alem disso, são capazes de excretar polissacarídeos extracelulares, descritos como substâncias gelatinosas, mucilaginosas ou semelhantes a limo que revestem a superfície externa da parede ou bainha da célula do organismo, servindo de local para o acúmulo de hidróxido férrico precipitado. Com o passar do tempo, este material torna-se impregnado e incrustado com o óxido de ferro dando origem a uma massa lodosa de cor marrom avermelhada.

As ferrobactérias quando ocorrem em poços tubulares de sistemas de distribuição de águas, são chamadas de agentes incrustantes, devido à capacidade de precipitar hidróxido férrico que provoca mudanças na coloração, gosto e odores desagradáveis da água, bem como, a redução da vazão do poço e corrosão de tubulações. Este último efeito deve-se ao fato das bactérias proporcionarem a formação de um ambiente favorável ao aparecimento de organismos que promovem a corrosão de metais e desgaste de materiais utilizados nos poços.

Segundo Oliveira (2002) os problemas causados por essas ferrobactérias não podem ser definitivamente resolvidos, devendo ser controlados com a utilização de produtos químicos como o cloro, ácido clorídrico ou outras técnicas.

O desgaste dos constituintes metálicos dos poços, por exemplo, decorre do acúmulo de material proveniente da precipitação de carbonatos e sulfatos de cálcio e magnésio, de compostos de ferro e de manganês (Hidróxidos ou óxidos hidratados), da deposição de materiais como areia, silte e argila transportados em suspensão; das substâncias gelatinosas e massas flacosas produzidas pelas ferrobactérias (PICANÇO, 2000 Apud MENEZES, 1992)

Segundo Sauma Filho (1996) a água também pode adquirir ferro pelo contato com o revestimento dos poços, bombas e instalações hidráulicas, recomendando-se como prevenção a utilização quando possível de materiais não oxidantes.

3.7 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO

O Tratamento de água consiste em melhorar suas características organolépticas, físicas, químicas e bacteriológicas, a fim de garantir boa qualidade

da segurança higiênica. É importante salientar que a necessidade do tratamento e os processos exigidos deverão ser determinados em função dos padrões de potabilidade internacionalmente aceitos para água de abastecimento público, e com base em inspeções sanitárias e resultados representativos de exames e análises.

As águas superficiais que apresentam graus elevados de turbidez e cor, com presença de matéria coloidal, exigem processos convencionais de tratamento, que incluem a coagulação química. Enquanto que as águas subterrâneas, normalmente por não estarem poluídas em seu estado natural, dispensam maiores tratamentos (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 2003).

Segundo Di Bernardo (2003), as tecnologias de tratamento de águas para abastecimento são classificadas como convencionais, que incluem todas as etapas tradicionais do processo (coagulação, floculação, decantação e filtração), e não convencionais, incluindo a filtração direta ascendente e descendente, a dupla filtração e filtração lenta. Na Figura 3 é representado uma Estação de Tratamento de Água Convencional para consumo humano.

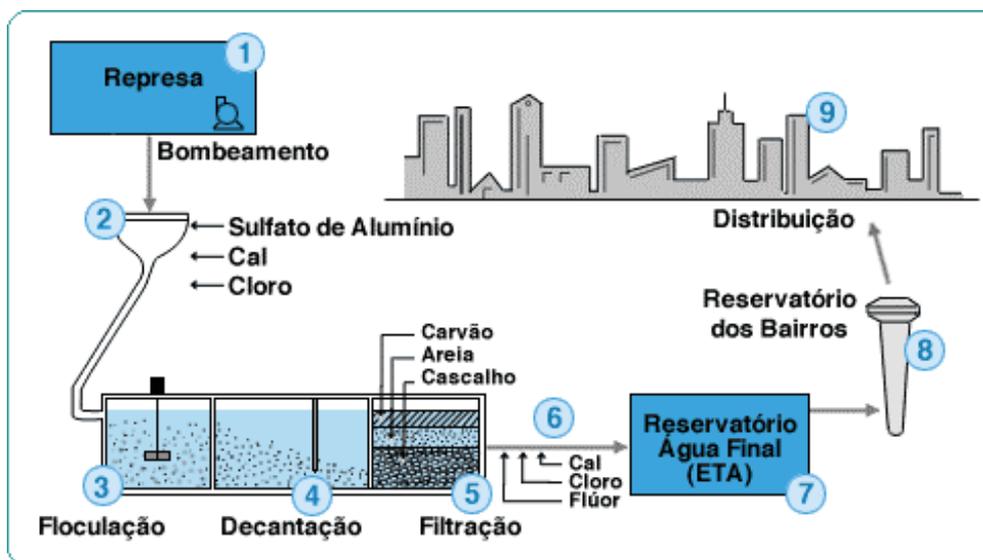


Figura 3 - Estação de Tratamento de Água Distribuição da Água na Natureza
Fonte: Sabesp (2005)

Apesar da predominância do tratamento convencional nas regiões brasileiras, os tratamentos não convencionais vêm se difundindo cada vez mais e já apresentam utilização significativa no País. No Quadro 2 é apresentada as vantagens e desvantagens dos tipos de tratamentos obtidos em literaturas brasileiras.

TRATAMENTO DE ÁGUA			
CONVENCIONAIS		NÃO CONVENCIONAIS	
Vantagens	Desvantagens	Vantagens	Desvantagens
-	Maior número de unidades de tratamento	Menor número de unidades de tratamento	-
-	Maior consumo de produtos químicos	Menor consumo de produtos químicos	-
Qualidade melhor quanto a teores elevados de turbidez e cor	-	-	Qualidade restritiva quanto a teores elevados de turbidez e cor
-	Maiores custos de construção e operação	Menores custos de construção e operação	-

Quadro 2 - Vantagens e Desvantagens das Estações de Tratamento de água Convencional e Não Convencional

Fonte: Direta

O tratamento objetiva assegurar a potabilidade da água distribuída à população. Entretanto é importante buscar alternativas de baixo custo que atendam a esse objetivo a fim de viabilizar a universalização do acesso d'água em quantidade e com qualidade necessária para satisfazer os fins a que se destina. Contudo, devem levar em consideração as características da água bruta para que disponha de elementos para escolher com maior segurança a tecnologia de tratamento de água.

Dentre as tecnologias simplificadas para tratamento de água, tem-se a utilização de sistemas para remoção de ferro objeto de estudo dessa dissertação. A seguir é descrito os tipos de unidades com essa finalidade.

3.8 OXIDAÇÃO DO FERRO

A oxidação química e a aeração podem ser utilizadas para reduzir a concentração de contaminantes orgânicos e inorgânicos, que normalmente não são removidos de modo satisfatório nas unidades de tratamento que usualmente compõem as ETAs de filtração direta, e também, para viabilizar o emprego dessa tecnologia de tratamento de água, em substituição ao tratamento de ciclo completo (DI BERNARDO, 2003).

A remoção de ferro envolve a oxidação da fórmula solúvel Fe^{+2} para a forma insolúvel Fe^{+3} , que pode ser realizada através aeração de seguida de leito de contato ou filtração; aeração seguida de coagulação, decantação e filtração; por introdução de produtos químicos seguidos por filtração ou flotação por ar dissolvido conjugada com oxidação química ou outras técnicas como: troca iônica, nano ou microfiltração, estas aplicadas com menor frequência devido aos maiores custos de operação e manutenção. Segundo Benefield; Morgan (1990), são raros os casos em que a remoção de ferro é realizada no tratamento de ciclo completo (coagulação, floculação, sedimentação e filtração).

Em condições apropriadas, o ferro e manganês são oxidados com produção de precipitados que em seguida podem ser removidas por decantação ou flotação e filtração (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Neste trabalho será abordado os tipos de oxidação de ferro, mais utilizados em nosso meio, tais como a aeração, flotação por ar e oxidação química por cloro, permanganato de potássio e dióxido de cloro.

3.8.1 Aeração

As águas naturais, normalmente apresenta gases dissolvidos, predominando os constituintes do ar atmosférico – nitrogênio e oxigênio – e o gás carbônico. O ser humano está habituado a utilizar águas nessas condições e estranhar a ausência de oxigênio. Além disso, na ausência de oxigênio dissolvido, podem ocorrer e manter-se nas águas impurezas dissolvidas de ferro e manganês, como, por exemplo, o bicarbonato ferroso ($Fe(HCO_3)_2$) (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 2003).

As águas com teores elevados de gás carbônico apresentam características de agressividade (corrosão) e as que contêm gás sulfídrico, ainda que em pequenas quantidades, são consideradas prejudiciais.

A aeração ou arejamento consiste no processo pelo qual uma fase gasosa – normalmente o ar – e a água são colocadas em contato estreito com a finalidade de transferir substâncias voláteis da água para o ar e substâncias solúveis do ar para a água, de forma a obter-se o equilíbrio satisfatório entre os teores das mesmas (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 2003).

O arejamento da água desempenha as seguintes funções: Elimina prontamente o sulfeto de hidrogênio; elimina odores produzidos pelos gases originados pela matéria orgânica; e oxida o ferro e precipitando-o.

Geralmente, o processo se aplica em águas que não estão em contato com o ar, como por exemplo:

- Águas subterrâneas (de poços);
- Águas captadas em galerias de infiltração; e
- Águas provenientes de partes profundas de grandes represas.

A oxidação de compostos inorgânicos está limitada, praticamente, à transformação do bicarbonato ferroso, que é solúvel, em precipitado de óxido férrico, posteriormente removido por sedimentação ou filtração (DACACH, 1975).

Alguns compostos orgânicos, resultantes da decomposição das algas e outras vegetações aquáticas, também podem ser oxidados através da aeração, que, desse modo, elimina gostos e odores ofensivos (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 2003).

A aeração da água que contém ferro traz muitos benefícios, pois, além da oxidação desses metais a aeração auxilia a remoção de outras substâncias voláteis.

Na Figura 4 tem-se as taxas de formação de precipitação de ferro em função do tempo de aeração para diferentes valores de pH. Com base nessa figura pode-se considerar que a taxa de oxidação de ferro aumenta consideravelmente quando pH cresce de 6,6 para 7,2. Geralmente, na oxidação por aeração, são conseguidos resultados satisfatórios, no campo do tratamento de água, em valores de pH maiores que 7,0 para ferro. (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

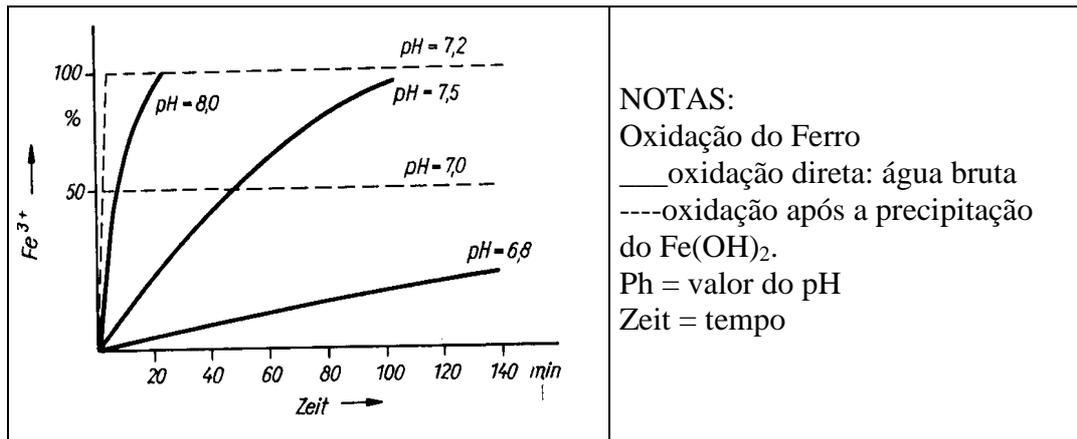


Figura 4 - Variação da concentração de ferro solúvel por aeração
Fonte: Lopes (2005)

Segundo Michalakos et al. (1997), uma forma dissolvida de ferro (Fe^{2+} ou $FeOH^+$) pode ser mudado a uma forma precipitada ($FeCO_3$, $Fe(OH)_2$ ou $Fe(OH)_3$) aumentando o potencial de oxidação, o pH, ou ambos.

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005) vários tipos de aeradores, tais como cascata, tabuleiro, bocais aspersores, ar difuso e agitadores mecânicos podem ser utilizados para promover a oxidação de ferro, além de gás sulfídrico (H_2S), de substâncias orgânicas voláteis e de outras causadoras de sabor e odor.

Nos aeradores de gravidade, como cascata, tipo tabuleiro e repuxo, a água é exposta ao ar atmosférico; nos aeradores de ar difuso e de ventilação forçada, faz-se passar o ar pela massa líquida.

A seguir serão descritos os tipos de aeradores citados:

- **Aerador tipo cascata:** Geralmente são utilizados para remoção de gás carbônico e substâncias voláteis, em instalações pequenas de vazões não muito elevadas (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 2003). Constituídos de pelo menos quatro plataformas superpostas, com dimensões crescentes de cima para baixo (NBR nº 12216/92), separados de 0,25 a 0,50m, com altura total de 0,75 a 3,00m (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 2003).

Segundo a mesma NBR nº 12.216/92 o aerador tipo cascata admite no máximo $100m^3$ de água por metro quadrado de área em projeção horizontal/dia, quando não são determinadas as taxas de aplicação por meio de ensaios. Richter e Azevedo Netto (2003) recomendam taxa de 800 até $1000m^3/m^2.dia$. Na Figura 5 e Fotografia 3 são apresentados aeradores tipo cascata.

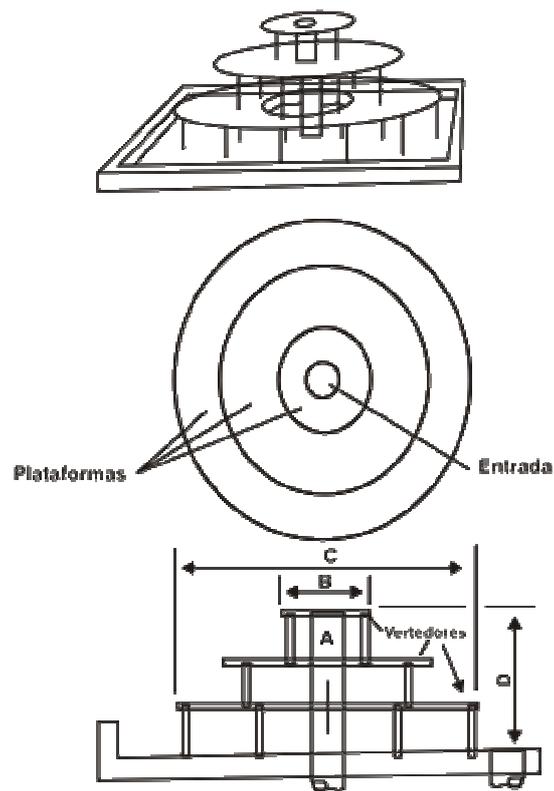


Figura 5 - Aerador Tipo Cascata
Fonte: Adaptado de Richter; Azevedo Netto (2003)



Fotografia 3 - Aerador Tipo Cascata
Fonte: Lopes (2004)

- **Aeradores tipo tabuleiro:** São os mais indicados para a adição de oxigênio e oxidação de compostos ferrosos ou manganosos. Os aeradores tipo tabuleiro são constituído no mínimo com quatro unidades superpostas (NBR 12.216/92), distanciados de 0,30 a 0,75m (em altura) através dos quais a água percola (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 2003).

O primeiro tabuleiro (mais alto) serve apenas para distribuir uniformemente a água, sendo executado com perfurações. Os demais tabuleiros são construídos com uma treliça, sobre a qual é disposta uma camada de pedras, ou seja, material granular, de preferência coque de ½" a 6". Essa camada oferece superfície de contato e concorre para acelerar as reações de oxidação.

O aerador tipo tabuleiro, quando não são realizados ensaios específicos, admite 100m³ de água por metro quadrado de área em projeção horizontal/dia (NBR 12.216/92). Já Richter e Azevedo Netto (2003) citam que a taxa de aeração deve ser dimensionada na base de 540 a 1630m³/m².dia.

Com esse tipo de aerador pode-se conseguir reduções de até 90% do gás carbônico contido na água (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 2003). Na Figura 6 e Fotografia 4 são representados e ilustrados os aeradores tipo tabuleiro.

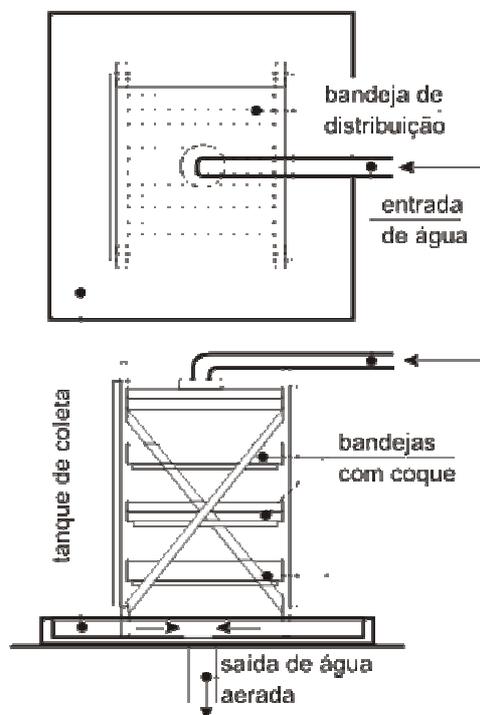


Figura 6 - Aerador de Tabuleiros
Fonte: Richter; Azevedo Netto (2003).



Fotografia 4 - Aerador de Tabuleiros
Fonte: Direta (2006)

- **Aeradores de repuxo:** São os mais eficientes para troca de gases e substâncias voláteis, podendo ser aplicados em instalações grandes. Frequentemente exigem pressão de água de 2 até 7m, dependendo da altura que se deseja para o jato e, portanto, do tempo de exposição especificado.

Um aerador de repuxo compreende tubulações sobre um tanque de coleta de água dotadas de uma série de bocais de aspersão. A água, distribuída uniformemente pelos bocais, sai através dos mesmos com uma velocidade alta em função da pressão inicial (carga hidráulica).

Esse tipo de aeradores é dimensionado para taxas entre 270 e 815 m³/m².dia e permite remoções de gás carbônico superiores a 70%. Na Fotografia 5 é representado o aerador tipo repuxo.



Fotografia 5 - Aerador do tipo Repuxo
Fonte: Lopes(2005)

- **Aeradores de ventilação forçada:** São constituídos de tanque hermeticamente fechados, providos de bandejas horizontais perfurados, como pode ser observado na Figura 7.

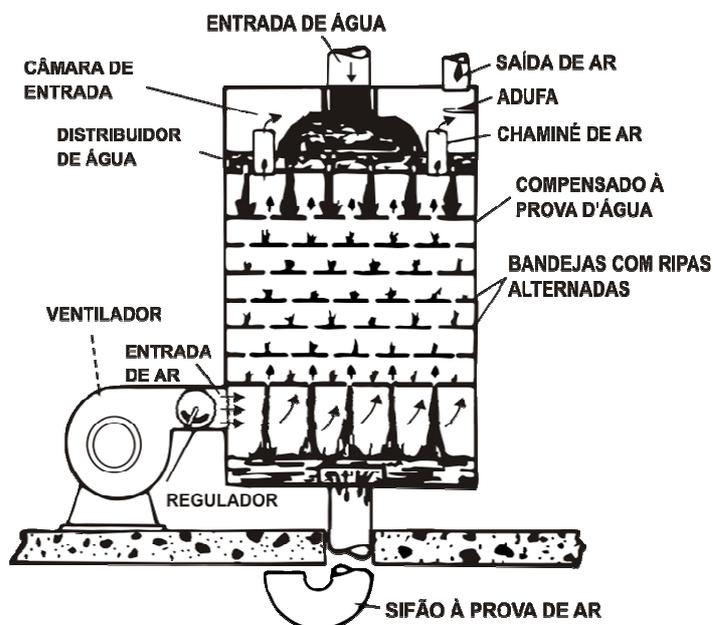


Figura 7 - Aerador de ventilação Forçada
Fonte: Dacach (1975)

A água é introduzida no compartimento superior, onde se espalha pela primeira bandeja perfurada para passar, sucessivamente, pelas demais sob a ação da gravidade, e graças aos orifícios que, em projeção horizontal, se alternam de uma para outra bandeja.

Por baixo da última bandeja existe um compartimento cujo fundo a água sai através de um conduto provido de sifão à prova de ar. É também no mesmo compartimento que o ar insuflado por um ventilador tem acesso para deslocar-se para cima através dos orifícios desencontrados das bandejas, entrando em contato com ar, para finalmente atingir o compartimento superior de onde escapa para a atmosfera.

3.8.2 Flotação

A flotação tem sido empregada, desde o início do século, nas indústrias de beneficiamento de minério e, de papel e com o tempo, passou a ser aplicada ao tratamento de águas residuárias. O seu uso em tratamento de águas de abastecimento é recente.

A separação das partículas naturais presentes na água bruta, coagulada ou floculada, mediante o uso de sais de alumínio ou de ferro e de polímeros ocorre na flotação pela introdução de bolhas de ar que aderindo à superfície das partículas aumentam seu empuxo e causam ascensão das mesmas. Quanto maior o ângulo θ de contato entre a bolha e a partícula, mais eficiente a resulta da aderência entre ambas. Na Figura 8 é representado o ângulo de contato entre bolha e partícula sólida.

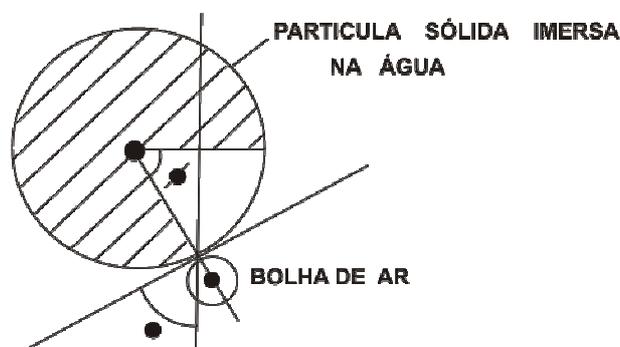


Figura 8 - Partícula Sólida em contato com bolha de ar no processo de flotação
Fonte: Di Bernardo (1993)

Segundo Di Bernardo & Dantas (2005) apud Hahn (1982), a formação de agregado estável entre uma ou mais bolhas de gás e uma partícula ou floco requer a colisão entre ambos e a subsequente aderência permanente entre as fases gasosa e sólida. Os mecanismos de contato entre as bolhas de ar e as partículas podem resultar nos seguintes efeitos: a) colisão da bolha com a partícula decorrente da turbulência ou da atração entre ambas e aderência; b) aprisionamento das bolhas nos flocos ou contato entre flocos sedimentados e bolhas de ar em ascensão, c) crescimento das bolhas de ar entre os flocos. Na Figura 9 são ilustradas as diferentes ações entre bolhas e partículas.

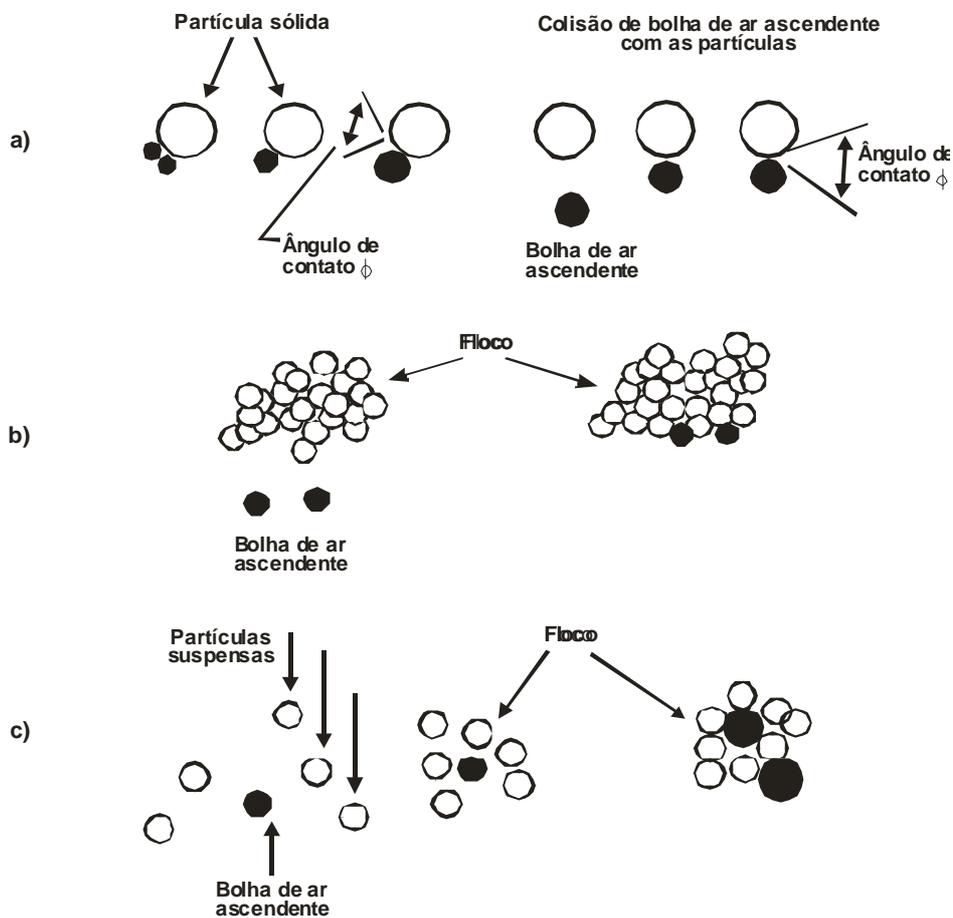


Figura 9 - Ilustração dos mecanismos de agregação das bolhas de ar aos flocos
Fonte: Adaptado de Di Bernardo & Dantas (2005)

Na flotação por ar dissolvido, geralmente empregada no tratamento de água de abastecimento, as bolhas são geradas pela redução de pressão de um fluxo de água saturado com ar. Os três principais tipos de flotação por ar dissolvido são: flotação a vácuo, microflotação e flotação pressurizada. Das três, a flotação pressurizada é a mais amplamente utilizada, onde o ar é dissolvido na água sob pressão. Os três processos básicos de flotação pressurizada que podem ser utilizados são: com pressurização parcial do afluente, com pressurização total do afluente e com pressurização de recirculação. Para aplicações em tratamento de água que requerem a remoção de flocos frágeis, o sistema com pressurização da circulação tem sido o mais recomendado. Na Figura 10 são apresentados os sistemas de flotação por ar dissolvido (DI BERNARDO,1993).

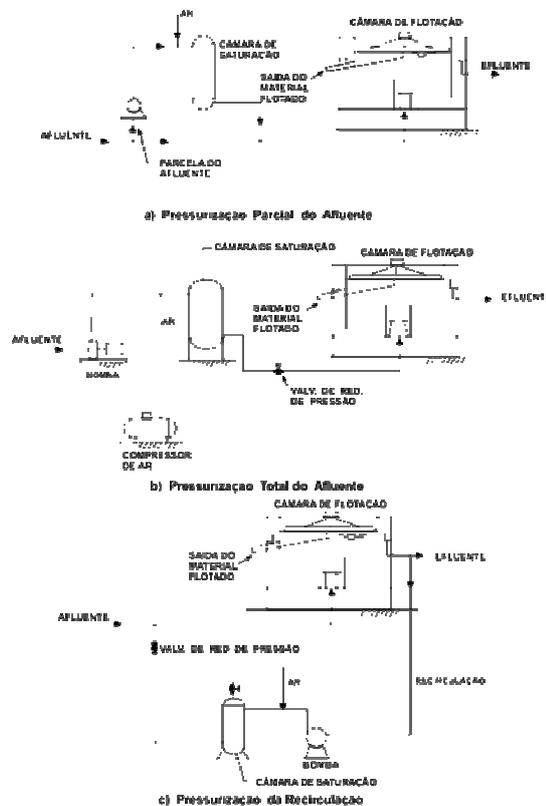


Figura 10 - Tipos de Flotação
Fonte: Di Bernardo (1993)

Segundo Realil e Aparecida(1996) no tratamento de água de abastecimento, a flotação por ar dissolvido (FAD) tem sido investigada como uma alternativa à sedimentação para determinados tipos de água. Bunker et al. (1995) comentam que a FAD na Europa é uma tecnologia comprovada no tratamento de água de abastecimento e na América do Norte é uma tecnologia emergente, recebendo

considerável interesse devido à sua maior eficiência de separação de partículas de baixa densidade comparada a processos de sedimentação.

Diversas variáveis controlam a eficiência da clarificação por flotação, tais como, quantidade de ar fornecida, tipo de coagulante, dosagem de coagulante e pH de coagulação e condições de floculação entre outros.

Segundo Morruzi et al. (2001) a flotação por ar dissolvido, sem a oxidação química com cloro apresentaram bons resultados de remoção de ferro, porém a associação com a oxidação química com cloro levou a excelentes resultados.

O trabalho realizado na ETA da Companhia Espírito Santense de Saneamento (CESAN) com a substituição do decantador pelo flotador por ar dissolvido, apresentou uma eficiência em conformidade aos padrões de qualidade consideravelmente aceitáveis para água bruta com concentração de algas em suspensão, cor, turbidez e teores elevados de ferro e manganês (LOBATO, 1997).

3.8.3 Oxidação Química

A maioria dos métodos de remoção de ferro das águas consiste na oxidação de compostos de ferro (II) solúveis à compostos de ferro (III) insolúveis. Os agentes oxidantes mais comuns, citados por Moruzzi et al. (2001), são o oxigênio, o cloro e o permanganato de potássio. Através da oxidação desses minerais formam-se precipitados que podem ser removidos pela filtração.

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005) as principais tecnologias de tratamento para remoção de ferro por oxidação química utilizam o permanganato de potássio, cloro, dióxido de cloro, (que serão descritos a seguir), além do ozônio ou peróxido de hidrogênio (com ou sem adição de alcalinizantes).

Quando os metais presentes nas águas encontram-se em estado solúvel, a sua remoção geralmente é conseguida ao se aumentar o pH. No caso do ferro, o uso de oxidantes causa a formação do precipitado em valores superiores a 6,5.

- **Oxidação com cloro**

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), nas condições atmosféricas normais o cloro é um gás amarelo esverdeado facilmente detectável pelo cheiro extremamente irritante e penetrante.

A cloração é usada no tratamento da água e esgotos para efetuar a desinfecção, visando a destruição ou inativação de organismos patogênicos, algas e bactérias de vida livre especialmente as ferro-redutoras do gênero *Crenotrix*, controle dos microorganismos e para a oxidação. Como agente oxidante, é usado na remoção de ferro e manganês, destruição de compostos causadores de gosto e odor e na eliminação do nitrogênio amoniacal (HAMMER, 1979).

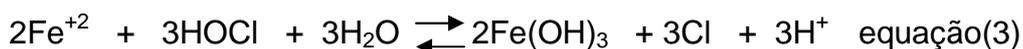
Quando o cloro (Cl₂) é adicionado em água, tem-se as seguintes reações:



O ácido hipocloroso (HOCl) dissocia-se instantaneamente em função do pH do meio:



A reação de oxidação do ferro pelo cloro (HOCl) pode ser expressa:



O hidróxido férrico Fe(OH)₃ por sua vez se hidroliza segundo a equação 4 formando óxidos de ferro (Fe₂O₃.n.H₂O). de acordo com a reação:



No Quadro 3 são apresentados, resumidamente, dados relativos à estequiometria das reações de oxidação de ferro quando o cloro é utilizado como oxidante.

Tipo de reação oxidação de ferro(II) com cloro	Relação estequiométrica (mg/L de oxidante para remover mg/L de ferro)
Cloro requerido(Cl ₂)	0,64
Íons hidrogênio produzidos (H ⁺)	0,05
Alcalinidade consumida (CaCO ₃)	2,70

Quadro 3 – Relação estequiométrica com a utilização de cloro para oxidação de 1mg de ferro
Fonte: (Adaptado de Di Bernardo, 1993)

A reação de oxidação de ferro é efetuada em uma larga faixa de pH (de 4 a 10), e é relativamente rápida no máximo uma hora (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 2003).

O ferro é quimicamente oxidado pelo residual de cloro livre, com taxas de oxidação muito superiores às do oxigênio dissolvido. Quando o cloro é empregado, um residual livre disponível é mantido durante todo o processo de tratamento. A dosagem específica requerida depende da concentração dos íons metálicos, pH, condições de mistura e outros fatores (HAMMER, 1979).

- **Oxidação com permanganato de potássio**

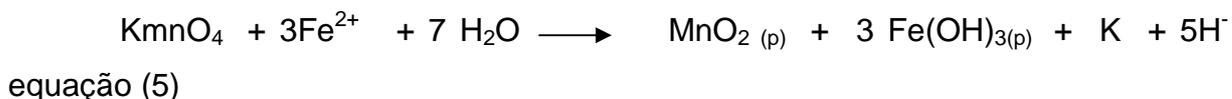
O permanganato de potássio (KMnO₄) pode ter a forma de um cristal ou pó vermelho-escuro, disponível comercialmente com pureza entre 97 e 99%. É fornecido somente na forma sólida. Tipicamente, a solução concentrada apresenta cerca de 40 g de KMnO₄/L, sendo preparada em tanques na própria estação de tratamento de água. A massa específica aparente do produto comercial é da ordem

de 1.600Kg/L e a solubilidade é de 6,4 Kg/L a 20° C (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Segundo Ferreira Filho (2005) uma das primeiras aplicações do permanganato de potássio no tratamento de águas de abastecimento foi efetuada pelo engenheiro GEORGE FULLER como coagulante no ano de 1898, tendo sido, em seguida, aplicado como agente oxidante na remoção de ferro no sistema de abastecimento de água da cidade de Providence em 1900 do Rhode Island dos Estados Unidos.

Atualmente, o permanganato de potássio tem sido largamente utilizado no tratamento de águas de abastecimento em substituição ao cloro livre como agente pré-oxidante, tendo por objetivos principais a oxidação de ferro e manganês, controle de biofilmes e crescimento microbológico em estruturas de captação e adutoras de água bruta, remoção de cor, minimização da formação de (trihalometanos) THM's e controle de gosto e odor em águas de abastecimento.

Quando o permanganato de potássio é adicionado a água em solução ferrosa, tem-se a seguinte reação de oxidação de ferro:



A dosagem de permanganato de potássio requerida para oxidação de 1 mg de ferro é de 0,94mg.

Bresaola Junior (2000) desenvolveu um estudo da utilização de reatores meio granular, de fluxo ascendente e o emprego de permanganato de potássio e cloro na remoção de ferro e manganês em águas de abastecimento, tendo verificado a eficiência do permanganato de potássio na remoção de ferro com concentrações de 10mg/L pra índices inferiores ao recomendado pela portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde.

- **Oxidação com Dióxido de Cloro (ClO₂)**

O dióxido de cloro (ClO₂) é um gás sintético, de cor amarelo esverdeado à 100° C. Abaixo desta temperatura, é condensado tornando-se vermelho, sendo cerca de 2,4 vezes mais pesado do que o ar .

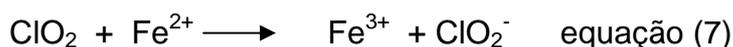
O dióxido de cloro é um composto neutro de cloro com estado de oxidação de +IV e que apresenta as propriedades físicas constantes. Em concentrações elevadas na água, reage violentamente com agentes redutores, entretanto, é relativamente estável em soluções diluídas em tanques fechados, sem a presença da luz (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

O Dióxido de cloro é produzido na própria estação de tratamento, em solução, fazendo-se combinar uma solução de clorito de sódio (NaClO_2) com cloro, conforme a reação a seguir:



Apesar do custo de produção do dióxido de cloro ser mais oneroso que o cloro, o dióxido de cloro é um forte poder oxidante, em torno de 250% a mais que o cloro (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 2003).

Di Bernardo e Dantas (2005) comentam que o dióxido de cloro reage com as formas solúveis de ferro para formar seus precipitados que poderão ser removidos na clarificação ou filtração. Cerca de 1,2mg ClO_2 são necessários para remover 1,0mg de Fe/L. As reações de oxidação do ferro a partir do uso de dióxido de cloro é apresentada a seguir:



Sua aplicação é comum em águas subterrâneas, cuja finalidade é contornar odores provenientes de algas, matéria orgânica, compostos fenólicos e remoção de ferro, além de ser útil na eliminação das ferrobactérias.

Segundo Ribeiro (2000) a utilização deste desinfetante e oxidante ainda é restrita no Brasil, devido a fatores como, o seu custo operacional, que é mais elevado do que a cloração por cloro gás e os hipocloritos, mas com vantagem de não formar subprodutos como os THMs.

3.9 FILTRAÇÃO

A filtração consiste na remoção de partículas suspensas e coloidais e de microrganismos presentes na água que escoam através de um meio poroso. Esta unidade de tratamento corresponde ao processo final de remoção de impurezas realizado em uma ETA, sendo, portanto, o principal responsável pela produção de água com qualidade, condizente com os padrões de potabilidade (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Richter e Azevedo Netto (2003) caracterizam a filtração como sendo o processo de separação sólido – líquido, envolvendo fenômenos físicos, químicos e, às vezes, biológicos, tendo como finalidade a remoção das impurezas da água durante a passagem através do meio filtrante.

Heller e Casseb (2001) ressaltam que a filtração é também considerada uma barreira sanitária, já que as partículas sólidas suspensas acabam servindo de proteção aos organismos patogênicos (vírus, bactérias, protozoários, fungos e vermes). Além disso, dificilmente é obtido o atendimento ao padrão de turbidez sem que a água bruta seja submetida à filtração.

A qualidade do efluente e a evolução da perda de carga são os principais parâmetros utilizados para avaliar o desempenho dos filtros em ETAs. No entanto, o comportamento das unidades de filtração é também relacionado a fatores como: qualidade do efluente, operação dos filtros, eficiência da lavagem, taxa de filtração, granulometria e espessura do material granular (PÁDUA, 2000).

3.9.1 Mecanismo de Filtração

O conhecimento dos efeitos produzidos na água que é filtrada através de um leito filtrante é de grande importância para a determinação das variáveis que interferem no processo e das medidas de controle da filtração (LEME, 1990).

Os principais mecanismos envolvidos na filtração resultam na combinação de operações físicas e químicas.

O processo de remoção de impurezas e posterior deposição nos grãos do meio filtrante é composto de pelo menos dois diferentes mecanismos: um mecanismo de transporte e um mecanismo de aderência. Na Figura 11 são apresentados os mecanismos da filtração.

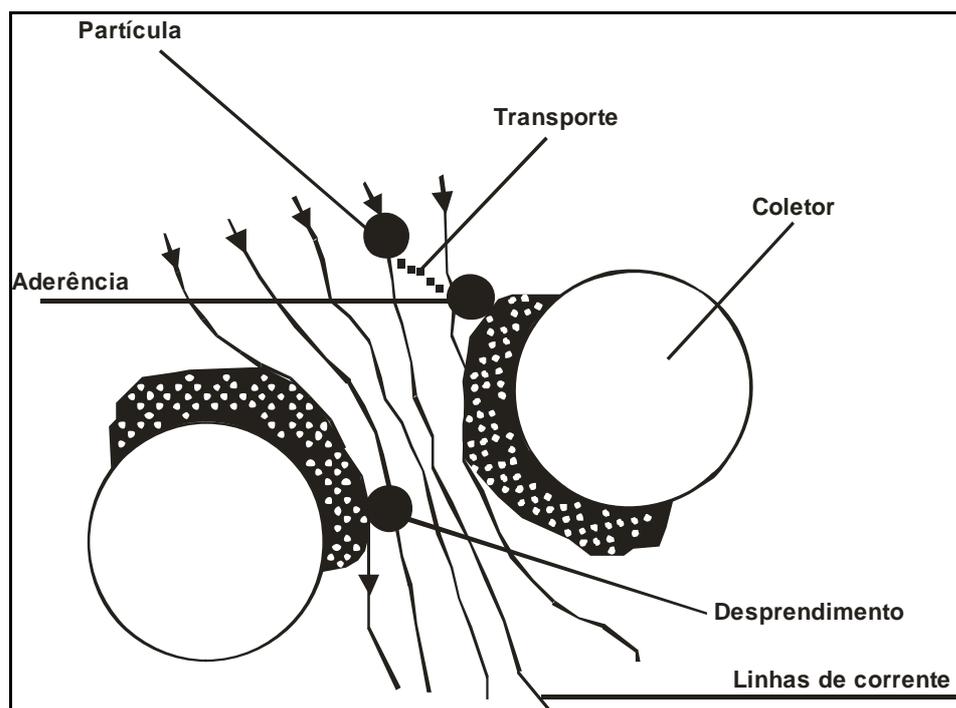


Figura 11 - Mecanismos da filtração
Fonte: Adaptado de Amirtharajah (1988)

Segundo Libânio et al. (2001) a retenção de partículas em meio poroso efetua-se por intermédio da conjunção dos mecanismos de transporte e aderência. A prevalência de um ou outro mecanismo é função das características da água bruta e dos grãos que constituem o meio poroso. As menores dimensões dos poros de um leito de areia são da ordem de $500\mu\text{m}$, enquanto os flocos apresentam dimensões de $0,1$ a $30\mu\text{m}$. Desta forma, somente nas estações nas quais a coagulação, floculação é ineficiente ou quando os decantadores estejam operando com sobrecarga significativa, a ação de coar adquire alguma relevância na retenção das partículas, culminando com a rápida colmatação da camada superior leito filtrante.

Quando a taxa de filtração ou velocidade de aproximação permanecer constante, a velocidade de escoamento nos poros, denominada velocidade intersticial, aumenta em decorrência das partículas retidas e causa o arrastamento das partículas para as subcamadas inferiores ou superiores do meio filtrante, o que pode ocasionar o fenômeno conhecido como transpasse, ou seja, a extrapolação da capacidade do meio filtrante em reter impurezas (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

MECANISMOS DE TRANSPORTE

Os mecanismos de transporte são responsáveis por conduzir as partículas suspensas para as proximidades da superfície dos coletores (grãos de antracito, areia ou outro material granular).

Os mecanismos de transporte são governados por parâmetros físicos, tais como taxa de filtração, características do meio filtrante e das partículas, entre outros.

Na Figura 12, estão apresentados os principais mecanismos de transporte: difusão, interceptação, impacto inercial, sedimentação e ação

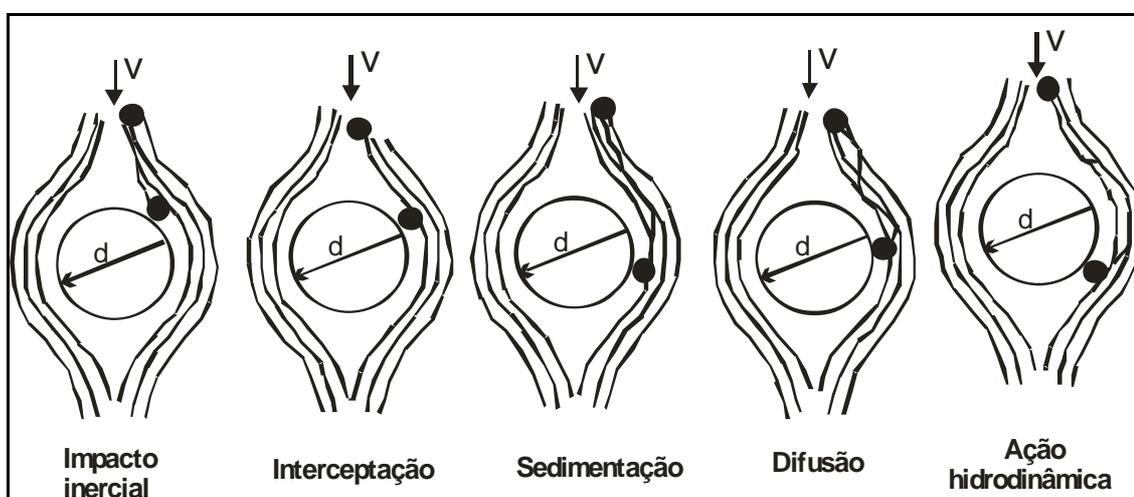


Figura 12 – principais mecanismos de transporte
Fonte: Ives (1975)

- **Difusão**

É um mecanismo de transporte que resulta do movimento browniano em que partículas pequenas apresentam movimento errático, quando suspensas em meio líquido, provocado pelo bombardeio das mesmas pelas moléculas de água. A intensidade do fenômeno é proporcional ao aumento da energia termodinâmica da água e à diminuição da sua viscosidade, e inversamente proporcional ao tamanho das partículas.

Valência (1992) ressalta ainda que a eficiência do filtro, devido ao movimento de difusão, é diretamente proporcional à temperatura e inversamente proporcional ao diâmetro da partícula e do grão do material filtrante, ou seja, quanto maior a temperatura maior a remoção de partículas e, quanto maior o diâmetro da partícula menor sua eficiência, respectivamente.

Ferreira Filho (1993) comenta que o mecanismo de difusão assume maior significância para as partículas de dimensões inferiores a $1\mu\text{m}$, enquanto para partículas maiores do que $1\mu\text{m}$, a sua importância pode ser considerada desprezível, quando comparados aos demais mecanismos de transporte.

- **Interceptação**

As partículas, com massa específica próxima à da água, são removidas da suspensão quando, em relação à superfície dos coletores, as linhas de corrente estiverem a uma distância inferior a metade do tamanho delas. Este mecanismo torna-se mais eficiente à medida que aumenta o tamanho das partículas e diminui o tamanho dos coletores.

Di Bernardo e Dantas (2005) citam que, na interceptação o regime de escoamento na filtração resulta laminar e, mesmo com o meio filtrante apresentando grau elevado de colmatação, as partículas se movem ao longo das linhas de corrente.

De acordo com Ferreira Filho (1993), o mecanismo de interceptação pode ser considerado como uma variante do mecanismo de ação de coar, com a diferença que este último ocorre na superfície do meio filtrante e o mecanismo de interceptação ocorre praticamente em toda a profundidade do meio filtrante.

- **Impacto Inercial**

Durante o escoamento, as linhas de corrente divergem nas proximidades dos grãos do meio filtrante, mas as partículas com quantidade de movimento suficiente conseguem manter suas trajetórias até no momento que colidem com os grãos (DI BERARDO; DANTAS, 2005).

Ferreira Filho (1993) ressalta que quanto maiores as velocidades de aproximação, o tamanho e massa específica das partículas e quanto menores a viscosidade da água e o tamanho dos grãos, mais eficiente é esse mecanismo de transporte. De acordo com o mesmo autor o efeito do impacto inercial é desprezível quando o consideram partículas suspensas de tamanhos compreendido entre $0,01\mu\text{m}$ e $0,10\mu\text{m}$.

- **Sedimentação**

Este mecanismo está associado à velocidade de sedimentação das partículas, que as leva a cruzar a linha de corrente e atingir o coletor. Este mecanismo, ocorre quando partículas muito menores que os espaços dos poros são introduzidos em um filtro, elas tem oportunidades de se sedimentarem sob a ação da gravidade na superfície do meio durante sua passagem através dele (LEME, 1990).

O mecanismo de sedimentação pode ser compreendido pela visualização dos vazios intersticiais como pequenas células de sedimentação, ou os caminhos porosos como pequenos tubos de sedimentação. Este mecanismo é mais importante para partículas maiores que $1\mu\text{m}$ (PÁDUA, 1999)

- **Ação Hidrodinâmica**

A remoção de partículas com tamanho relativamente grande ($\sim 10\mu\text{m}$) tem sido atribuída à ação hidrodinâmica. A compreensão desse mecanismo de transporte é facilitada quando se considera o escoamento com gradiente de velocidade constante.

Uma partícula suspensa na água, nessas condições, estará submetida a velocidades tangenciais diferentes na direção perpendicular ao escoamento. Ferreira Filho (1993) comenta que se for levado em consideração que as partículas transportadas em uma linha de corrente não são esféricas, e que não apresentam uniformidade e que os grãos também não são esferas perfeitas, é possível supor que movimento apresentado por determinada partícula tenderá a assumir caráter errático. A diferença entre as velocidades tende a fazer com que a partícula gire, produzindo uma diferença de pressão na direção perpendicular à do escoamento e dando origem a uma força que conduz a partícula para a região de menor velocidade.

MECANISMO DE ADERÊNCIA

A remoção das partículas suspensas efetua-se também por aderência aos grãos do leito filtrante ou às próprias partículas desestabilizadas anteriormente depositadas sobre os mesmos. A eficiência da aderência entre as partículas

transportadas e os grãos depende, principalmente, das propriedades das superfícies de ambos. Um vez que as forças de repulsão são minimizadas pela ação do coagulante pode ocorrer a prevalência das forças de atração de Van der Waals (LIBÂNIO et al., 2001).

O mecanismo de aderência é basicamente um fenômeno químico, que pode envolver interações eletrostáticas, forças de Van der Waals ou interações químicas de superfície, as quais sofrem influência do tipo e da dosagem de produtos químicos utilizados no pré-tratamento da água, além das características da água e do meio filtrante (PÁDUA, 1999).

Di Bernardo e Dantas (2005) ressaltam que é preciso ter em mente as dimensões envolvidas, como as partículas dos grãos, dos vazios intergranulares e das distâncias em que os mecanismos de aderência se tornam atuantes.

3.9.2 Classificação dos Filtros

Existem diversos tipos de filtros que atuam de diferentes formas no tratamento da água. Os filtros podem ser classificados em função dos parâmetros apresentados no Quadro 4.

PARÂMETROS	EXEMPLOS		
Com relação a taxa ou velocidade de filtração	Lentos	Rápidos	Altas Taxas
Com relação ao sentido de escoamento da água	Descendente	Ascendente	Misto (dois sentidos)
Com relação a disposição do material do meio filtrante no leito	Camada simples	Camada dupla	Camada tripla
Com relação ao tipo de material do meio filtrante	Areia	Carvão ou antracito	Granada
Com relação a carga d'água sobre o leito filtrante	Filtro de pressão	Filtro de gravidade	

Quadro 4: Classificação dos filtros para tratamento de água

Fonte: Direta

De acordo com Cunha Junior (1992), a taxa de filtração tem sido considerada de grande importância em relação à qualidade e quantidade de água produzida por carreira de filtração.

Segundo Ferraz e Paterniani (2000) a filtração lenta é um processo de tratamento que, através da passagem da água por um meio granular, geralmente areia, possibilita a melhoria de suas características químicas, físicas e bacteriológicas, a ponto de torná-la adequada para consumo humano, após desinfecção final.

Entretanto, por requerem águas brutas de boa qualidade, e por imporem áreas filtrantes muito grandes, isto é, por exigirem grandes áreas para sua implantação, os filtros lentos vêm caindo em desuso.

Os filtros lentos em relação ao escoamento de água podem ser descendentes (os mais utilizados no Brasil) ou ascendentes.

Segundo a NBR 12.216 a taxa de filtração a ser adotada deve ser determinada por experiências em filtros piloto, em período superior ao necessário para ocorrência de todas as variações da qualidade da água. Não sendo possível realizar essas experiências, a taxa de filtração não deve ser superior a $6\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{dia}$.

A lavagem do leito filtrante nos filtros lentos de fluxo descendentes é feita manualmente, através de remoção da areia da camada superficial (aproximadamente 2,5 cm de areia), onde se desenvolve praticamente toda comunidade microbiana responsável pela filtração (VIANNA, 2002).

Vianna (2002) comenta que os filtros rápidos são os mais utilizados em estações clássicas de tratamento de água, sendo, por esse motivos abordados a seguir:

3.9.3 Filtros Rápidos

Segundo Richter e Azevedo Netto (2003) os filtros rápidos podem ser constituídos de uma ou duas camadas filtrantes. De um modo geral, a taxa de filtração fica compreendida para filtros de uma única camada entre 120 a $360\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{dia}$ e para filtros de camada dupla entre 240 a $600\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{dia}$.

Segundo a NBR nº 12.216/92 é recomendado taxa máxima $180\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{dia}$ para filtros de camada simples e, para filtro de camada dupla, taxa de $360\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{dia}$, caso não seja possível proceder a experiências em filtros piloto.

Nos filtros rápidos de fluxo descendente, conforme é mostrado na Figura 13 a água é introduzida na parte superior do filtro; percola através do leito filtrante e, logo após, atravessa a camada suporte; para então ser encaminhada ao fundo falso e finalmente chegar, ao duto ou reservatório de água filtrada.

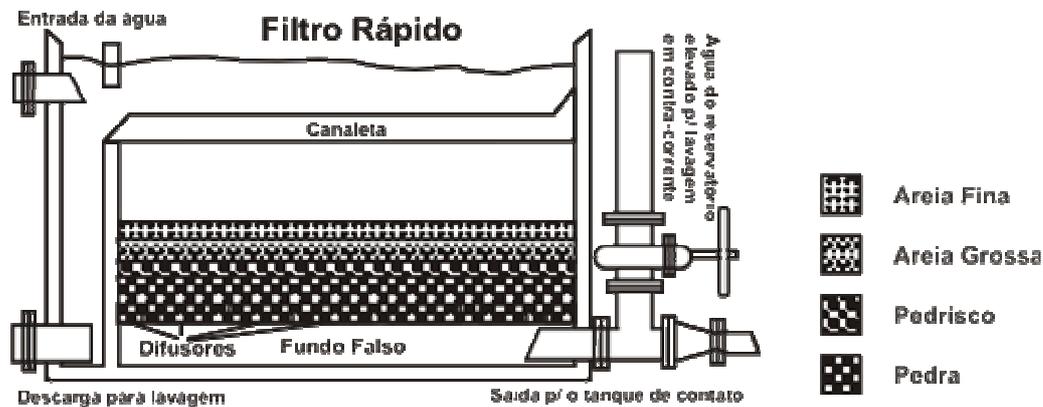


Figura 13 - Filtro rápido de Fluxo Descendente

Fonte: ocaminhodaagua

A filtração em areia talvez se constitua em um dos mais antigos métodos de purificação da água para o consumo humano, sendo uma forma extremamente simplificada de tratamento de água. Wiecheteck et al. (2005) comenta que a areia é usualmente empregada como material granular em filtros rápidos por apresentar alta resistência à abrasão, bem como por não causar preocupação de perda de material devido aos efeitos abrasivos que ocorrem entre os grãos durante a lavagem.

A areia utilizada em filtros de estações de tratamento de água pode ser obtida nos rios ou lagos, ou mesmo em praias de água salgada, devendo ser limpa, sem barro ou matéria orgânica, e não conter mais de 1% de partículas laminares ou micáceas partículas de mica ou malacacheta, sendo o peso específico da areia de $2,6 \text{ g/cm}^3$. Já o antracito é um carvão mineral (portanto, de origem fóssil) de cor negra, podendo ter aspecto brilhante, sendo pobre em substâncias voláteis, com massa específica da ordem de $1,4$ a $1,6 \text{ g/cm}^3$. O Quadro 5 mostra as características granulométricas de um filtro rápido de fluxo descendente para tratamento de água.

Características de Meio Filtrante de Filtro Rápido	REFERÊNCIAS						
	Dacach (1975)	Richter; Azevedo Netto (1991)	Vianna (1997)	NBR 12.216 /1992	Prezzoti (1990)		
					F1	F2	F3
Areia: espessura da camada filtrante(m)	0,75	0,20 a 0,25	0,25	0,25	-	-	-
Antracito: espessura da camada filtrante(m)		0,40 a 0,45	0,45	0,45	-	-	-
Areia: tamanho efetivo(mm)	045 a 0,55	0,35 a 0,45	0,40 a 0,45	0,40 a 0,45	0,86	1,00	1,30
Antracito: tamanho efetivo(mm)		0,9 a 1,0	0,8 a 1,0	0,8 a 1,0	-	-	-
Areia: coef. de uniformidade	1,3 a 1,7	<1,6	1,4 a 1,6	1,4 a 1,6	1,16	1,18	1,08
Antracito: coef. de uniformidade		<1,8	≤1,4	≤1,4	-	-	-

Quadro 5 - Características Granulométricas de material filtrante utilizados na filtração rápida
Fonte: Direta

Segundo Richter e Azevedo Netto (2003) para os filtros de uma única camada de areia, era usual a adoção de uma camada intermediária, de areia mais grossa, denominada camada torpedo com (espessura da camada de 0,08 a 0,125m, tamanho efetivo 0,8mm e coeficiente de uniformidade <1,7).

Na utilização do meio filtrante constituído de camada dupla de carvão antracitoso e areia, a penetração de impurezas é mais profunda, ocasionando carreiras de filtração mais longas e uso de taxas de filtração mais altas, quando em comparação como os filtros do meio filtrante constituído de camada simples (areia).

Após um determinado período de funcionamento, os meios filtrantes se obstruem concluindo assim a carreira de filtração, a qual corresponde ao tempo de funcionamento dos filtros, tornando-se necessário a sua limpeza. A limpeza dos filtros é efetuada normalmente invertendo o fluxo de filtração, sendo utilizada uma velocidade ascensional para provocar a expansão nos meios filtrantes, de forma a proporcionar a liberação das impurezas.

CARACTERÍSTICAS DOS MEIOS FILTRANTES

As características dos materiais que compõem um leito filtrante, devem ser objeto de uma boa definição e imprescindíveis para que se possa projetar um sistema de filtração.

Os principais parâmetros para caracterizar os materiais filtrantes são: o tamanho dos grãos e a distribuição de tamanhos que são obtidos pelo ensaio de distribuição granulométrica, utilizando peneiras com aberturas conhecidas. A ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – dispõe de normas, e métodos de ensaio para areia, antracito e pedregulho.

A determinação dos tamanhos dos grãos (análise granulométrica) é feita pela passagem de uma amostra seca por uma série de peneiras com aberturas padronizadas. As quantidades retidas em cada peneira são pesadas e relacionadas como percentagens de massa retida, esses valores permitirão determinar a curva granulométrica. Esta curva é traçada por pontos em um diagrama semilogaritmico, no qual, sobre o eixo das abscissas, são marcados os logaritmos das dimensões das partículas e sobre os eixos das ordenadas tem-se as porcentagens do material retido que passa, em escala aritmética (CAPUTO, 1988). No Gráfico 1 é representada a curva granulométrica de materiais filtrantes.

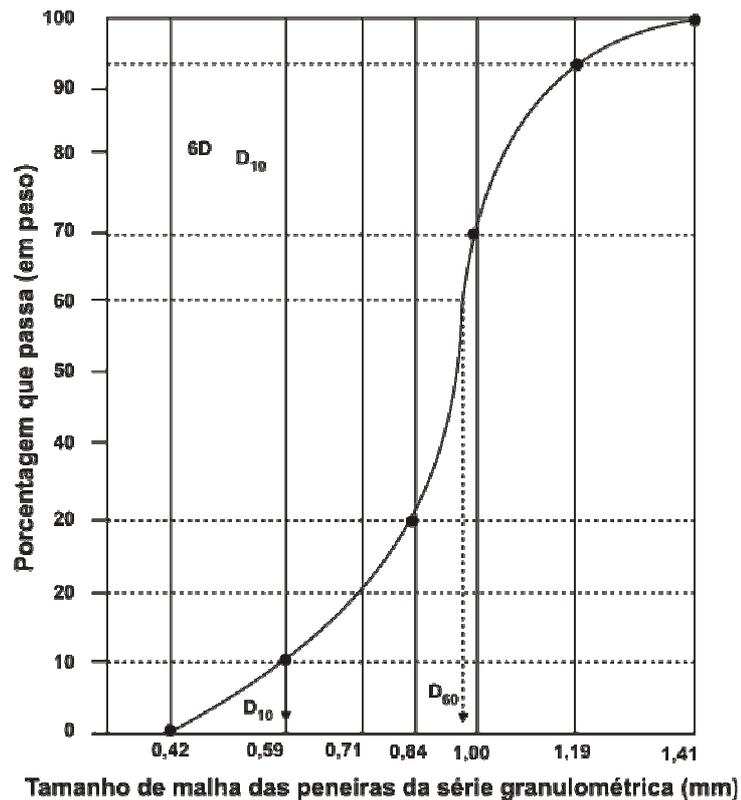


Gráfico 1 Curva Granulométrica

Fonte: Di Bernardo (1993)

De acordo com o mesmo autor, a curva de distribuição granulométrica determina dois parâmetros do material filtrante, o tamanho efetivo (T_e) e o coeficiente de desuniformidade (C_d), sendo o tamanho efetivo correspondente ao diâmetro a 10% em peso total das partículas menores que ele. Este valor, relacionado com o diâmetro a 60% em peso total das partículas menores que ele, define o coeficiente de desuniformidade.

Segundo WIECHETEK (1996) o coeficiente de desuniformidade está diretamente relacionado à penetração de impurezas ao longo do meio filtrante, sendo que quanto menor o C_d , mais uniforme será o material granular e, portanto, mais profunda resultará a penetração de impurezas e, conseqüentemente, maior será a duração da carreira de filtração.

Ferreira Filho (1993) comenta que o ideal é a realização de ensaios, em escala piloto, para a escolha correta do meio filtrante e a determinação de suas principais características.

Para completa caracterização de determinado material filtrante é necessário analisar alguns parâmetros essenciais: forma e geometria dos grãos; porosidade, massa específica; e dureza dos grãos.

- **Forma e Geometria dos Grãos**

A forma e a geometria dos grãos exercem grande influência na perda de carga no meio filtrante limpo, na velocidade mínima de fluidificação e no comportamento da expansão durante a lavagem. Quanto mais irregular a forma geométrica dos grãos, melhor será o desempenho durante a filtração, enquanto grãos de forma arredondada apresentam maior eficiência durante a lavagem, além de perda de carga final entre 20% e 30% inferior àquela desenvolvida em grãos de forma irregulares (FERREIRA FILHO, 1993).

A forma dos grãos é geralmente definida pelo coeficiente de esfericidade (C_e) ou pelo fator forma, sendo que o C_e é definido como a relação entre a área superficial de uma esfera de volume equivalente ao do grão e a área da partícula propriamente dita. Para a determinação do C_e pode ser utilizada lupa e escala de comparação visual para vários valores de coeficiente de esfericidade. Na Figura 14 é representado as diferentes formas dos grãos inseridos em círculo e no Quadro 6 têm-se os valores de coeficiente de esfericidade, fator de forma e porosidade típicos de grãos de areia relacionados com a formas dos grãos.

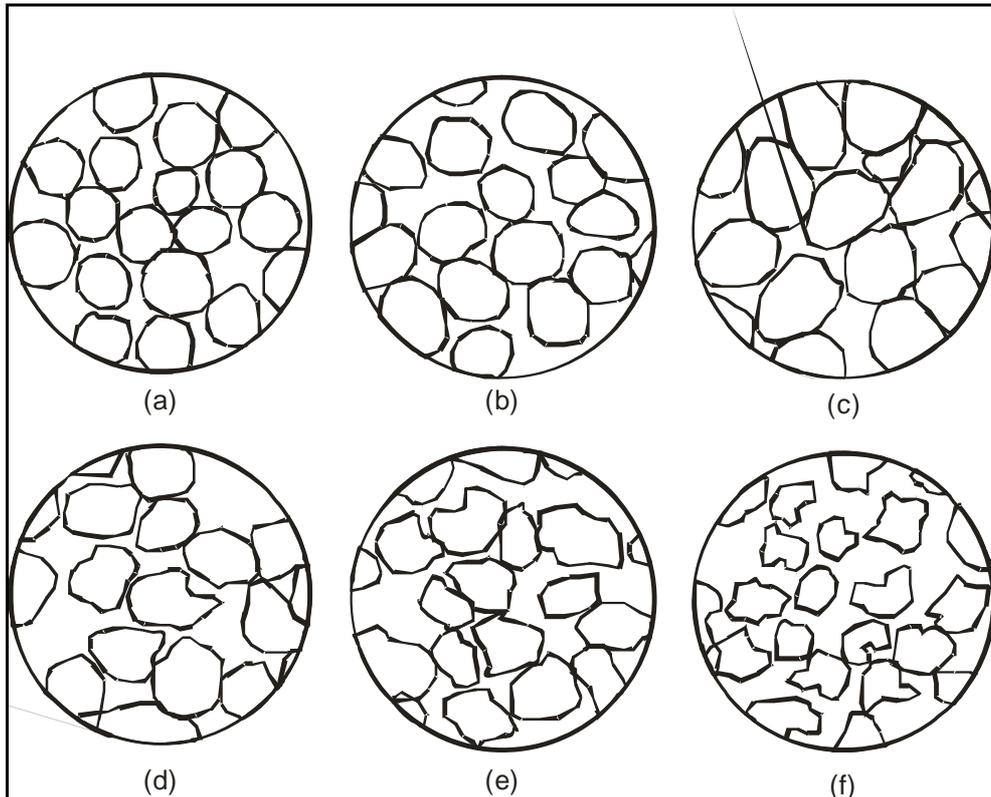


Figura 14 - Diferentes Formas de Grãos
 Fonte: Adaptado de Di Bernardo & Dantas (2005)

Forma do Grão	Coefficiente de esfericidade (Ce)	Fator de forma (FF)	Porosidade (ϵ)
Esférico (a)	1,00	6,0	0,38
Arredondado(b)	0,98	6,1	0,38
Desgastado (c)	0,94	6,4	0,39
Agudo (d)	0,81	7,4	0,40
Angular (e)	0,78	7,7	0,43
Triturado (f)	$\leq 0,70$	8,5	0,48

Quadro 6 - valores do coeficiente de esfericidade, fator de forma e porosidade típicos de grãos de areia.

Fonte: Di Bernardo e Dantas (2005)

- **Porosidade**

A Porosidade é definida como sendo a relação entre o volume de vazios e o volume total do meio filtrante. É um parâmetro muito importante na determinação da velocidade de água requerida para lavagem do meio filtrante, perda de carga no meio filtrante fixo e na capacidade do meio filtrante na retenção das impurezas (DI BERNARDO; DANTAS, 2003).

Conforme a AWWA (1990), a porosidade em meio filtrante fixo pode ser determinada colocando-se certa massa de amostra de material filtrante com massa específica conhecida em uma coluna transparente com diâmetro interno conhecido. Com a altura da camada de material filtrante pode-se determinar o volume total ocupado pelo material granular. O volume dos grãos é igual à massa total de material filtrante dividida pela sua respectiva massa específica. O volume de vazios é igual ao volume total ocupado pelo material menos o volume dos grãos.

Droste (1997) comenta que a porosidade está relacionada com a esfericidade dos grãos. Quando menos esféricas as partículas, maiores a porosidade e a área superficial. O mesmo autor ressalta que a porosidade do leito depende ainda da forma das partículas e de como elas estão juntas.

- **Massa Específica**

A massa específica é definida como a massa do material dividida pelo seu volume, sendo sua determinação fundamental para o cálculo de perda de carga, fluidificação, expansão do meio filtrante e velocidade ascensional da água. Para determinação da massa específica é utilizada a técnica do picnômetro, largamente utilizada na mecânica dos solos.

No Quadro 7 são representados os principais materiais granulares usados como meio filtrante e suas respectivas massas específicas.

Material	Massa específica (ρ_s) (Kg/m ³)
Areia	2650-2670
Antracito	1400-1700
Granada	4100-4500

Quadro 7 - Massa Específica dos materiais filtrantes usuais

Fonte: Di Bernardo e Dantas (2005)

Partículas com diâmetros iguais, mas com diferentes valores de massa específica, requerem diferentes velocidades ascensionais de água para a sua fluidificação (FERREIRA FILHO, 1993).

Valência (1992) ressalta que as forças de Van der Waals se incrementam com a densidade das partículas, de maneira que esta pode influir na agressividade dos grãos e conseqüentemente na profundidade de sua penetração dentro do leito e na resistência do desprendimento por esforços cortantes.

- **Dureza**

A dureza dos grãos está relacionada com a resistência mínima à abrasão, pois durante a fluidificação e a expansão do meio filtrante, decorrentes da lavagem, pode haver desgaste dos grãos, originando maior quantidade de material fino e alterando sua curva granulométrica, o que pode trazer prejuízos ao desempenho da filtração (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Segundo o mesmo autor, a lavagem dos filtros quando feita por ar, o efeito abrasivo que ocorre entre os grãos é maior, possibilitando maior redução em seus tamanhos, especialmente o antracito.

Ferreira Filho (1993) explica que durante o processo de fluidificação, expansão do meio filtrante, caso o material não possua resistência mínima a abrasão, ele tenderá a se desintegrar em grãos menores, alterando a sua curva de distribuição granulométrica, podendo ocasionar com isso problemas na filtração.

O mesmo autor explica que entre os materiais mais comumente utilizados como meio filtrante, apenas o antracito, o carvão antracito e o carvão ativado granular podem apresentar problemas relativos a sua baixa dureza.

3.9.4 Camada Suporte

Segundo Vianna (2002) e a NBR 12.216/92 a camada suporte é constituída de seixos rolados, colocados em camadas sucessivas, umas sobre as outras, de forma a possibilitar a transição entre o tamanho dos grãos do leito filtrante e o tamanho dos orifícios do fundo falso.

O número de subcamadas e diâmetros extremos dos grãos dos seixos rolados que constituem a camada suporte depende da granulometria do material filtrante a ser colocado sobre ela e do diâmetro dos orifícios do fundo falso sobre o qual ela se apóia.

A camada suporte normalmente atendem as seguintes características:

- Espessura mínima igual ou superior a duas vezes a distância entre os bocais do fundo do filtro, porém não inferior a 25cm;
- Material distribuído em estratos³ com granulometria decrescente no sentido ascendente, espessura de cada estrato igual ou superior a duas vezes e meia a dimensão característica dos seixos maiores que o constituem, porém não inferior a 5cm;
- Cada estrato deve ser formado por seixos de tamanho máximo superior ou igual ao dobro do tamanho dos menores;
- Os seixos maiores de um estrato devem ser iguais ou inferiores aos menores do estrato situado imediatamente abaixo;
- O estrato situado diretamente sobre os bocais deve ser constituído de material cujos seixos menores tenham o tamanho pelo menos igual ao dobro dos orifícios dos bocais e dimensão mínima de 1 cm;
- O estrato em contato direto com a camada filtrante deve ter material de tamanho mínimo igual ou inferior ao máximo do material da camada filtrante adjacente.

Na Figura 15 é ilustrado o arranjo convencional da camada suporte de um filtro rápido

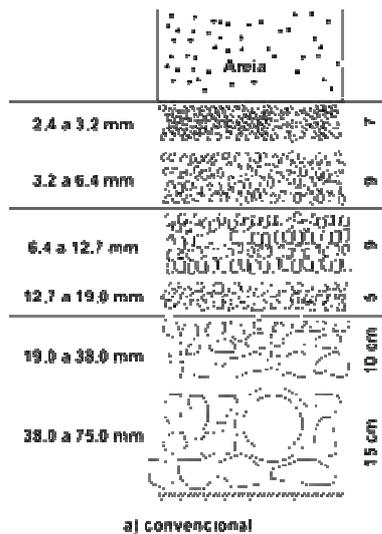


Figura 15 - Arranjo típico de camada suporte
Fonte: Di Bernardo & Dantas (2005)

Di Bernardo e Dantas (2005) citam que os principais problemas decorrentes do mau funcionamento do sistema de drenagem por ocasião da lavagem são o desarranjo da camada suporte e a formação de bolas de lodo.

Há no mercado internacional um tipo de aglomerado de pedregulho de pequenos bastonetes de polietileno, constituído de uma placa porosa que vem sendo empregada no fundo de filtros, eliminando a camada suporte, conforme a Figura 16 a seguir, mas que ainda não é muito utilizada.



Figura 16 - Placa porosa de bastonetes de polietileno
Fonte: Di Bernardo & Dantas (2005)

3.9.5 Fundo Falso

O sistema de drenagem dos filtros rápidos descendentes devem atender as seguintes condições:

- Coletar a água filtrada
- Distribuir uniformemente a água e, eventualmente, o ar para lavagem.

O sistema de drenagem está relacionado à constituição da camada suporte que, em alguns casos, pode deixar de existir, quando são empregadas lajes porosas para suportar o meio filtrante ou bocais com ranhuras pequenas ($\leq 0,35\text{mm}$).

Os bocais e blocos especiais que são utilizados para distribuir tanto ar para lavagem auxiliar como águas para lavagem ascensional, são também usados para coletar a água filtrada. A escolha de um tipo qualquer de fundo de filtro depende principalmente, de fatores econômicos, da qualidade da operação e manutenção e da forma com que a água para lavagem é fornecida (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Em tais casos, são utilizados fundos falsos que podem ser construídos no próprio canteiro de obras. Os mais utilizados no Brasil são: Tubulações Perfuradas e Vigas Pré – Fabricadas , os quais estão descritos a seguir:

- **Tubulações Perfuradas**

Um sistema de tubulações perfuradas, instaladas em Figura 17 paralelo (laterais), recolhe a água filtrada, dos filtros de fluxo descendente, e a encaminha até uma tubulação, ou duto de concreto, de maior seção (principal) e depois encaminhada ao seu destino final. Durante a lavagem a água percorre o caminho inverso, sendo o material dos tubos de plásticos para evitar a corrosão (VIANNA, 2002).

Valencia (1992) ressalta que este sistema de drenagem é o mais antigo utilizado em filtros.

Os orifícios dos tubos laterais e o principal possuem diâmetro entre 6,4 e 19,0 mm, são espaçados de 5 a 20 cm e devem ser projetados em função da perda de carga durante a lavagem com água, para que resulte entre 0,6 e 1,0m. A velocidade

de escoamento no tubo principal varia de 0,5 a 1,0m/s, nos laterais, de 1 a 2m/s e nos orifícios, entre 2 e 4 m/s por ocasião da lavagem. Na são mostrados esquemas de um sistema de tubulações providas de orifícios. Em geral, os tubos laterais possuem diâmetro de 50 a 75 mm e o tubo principal, de 100 a 300mm.

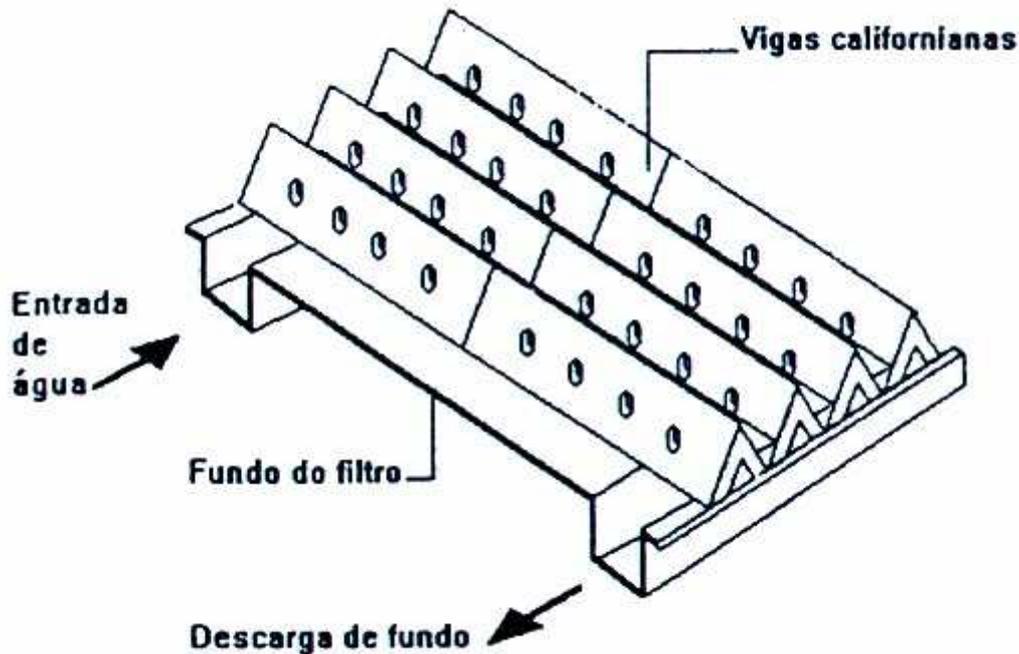


Figura 17- Esquemas de sistema de drenagem de filtros por meio de tubulações perfuradas
Fonte: Vianna (2002)

- **Fundos com Vigas Californianas**

Esse tipo de fundo é constituído de vigas em forma de V invertido, mostrado no esquema da Figura 18. Os orifícios superiores nas vigas são construídos de forma a evitar a permanência de ar, enquanto que os orifícios inferiores têm a função de distribuir água para lavagem e de coletar água filtrada (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

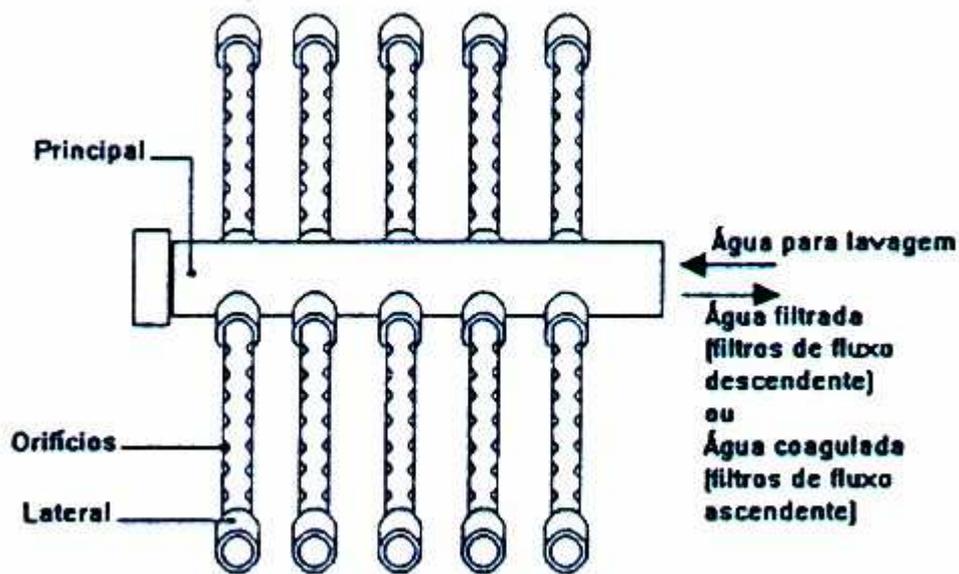


Figura 18 - Vigas Californianas
Fonte: Vianna (2002)

As vigas californianas podem ser fundidas no próprio canteiro de obras, utilizando o concreto armado para esse fim. Dentre as ETA existentes no Brasil que utilizam esse tipo de fundo, podemos destacar a ETA de Guarau em São Paulo com capacidade para 33 a 36 m³/s e ETA – Bolonha em Belém com capacidade estimada para 3,2 a 6,4 m³/s.

Di Bernardo e Dantas (2005) citam que os orifícios inferiores nas vigas, para distribuição de água para lavagem e coleta de água filtrada, cujos diâmetros variam de 9,6 a 19,0mm, são espaçados de 0,1 a 0,3m, enquanto os orifícios superiores, para saída de ar, cujos diâmetros variam de 4,8 a 9,6mm, são espaçados de 0,5 a 1,0m. O comprimento máximo das vigas tem sido limitado a 4m para que sejam evitados problemas nas juntas entre vigas vizinhas.

4.0 LAVAGEM OPERACIONAL DE FILTROS RÁPIDOS

Os filtros rápidos são lavados a alta velocidade, no sentido ascendente, de modo a causar uma expansão do leito filtrante e, deste modo, arrastar o material depositado através do leito expandido (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 2003).

Para que esse efeito seja obtido, tem sido recomendado que a velocidade da água para lavagem esteja entre 0,60 a 1,00 m/min, conforme a granulometria do leito e a temperatura da água.

O processo de lavagem de um meio filtrante, após o término de uma carreira de filtração é o período decorrente entre duas lavagens sucessivas de um mesmo filtro é uma das etapas mais importantes para que, no início da carreira subsequente, seja possível a produção de água com uma qualidade satisfatória (AMIRTHARAJAH, 1988).

Quando for atingida a perda de carga máxima suportada hidraulicamente pela instalação ou quando houver risco de deterioração da qualidade da água filtrada, caso esteja o filtro em operação. E necessário, portanto, que seja efetuada a lavagem do meio filtrante.

A limpeza do leito filtrante dependerá basicamente de dois parâmetros; a expansão da areia produzida pela velocidade ascensional e o tempo durante a operação.

Di Bernardo; Dantas (2005) citam que o aumento progressivo de velocidade ascensional da água ocasiona três situações diferentes nos grãos do meio filtrante:

a) velocidade ascensional (vasc) é baixa e a porosidade do leito continua inalterada;

b) Aumentando a vasc, as partículas tendem a ter sua posição modificada, porém sem ainda estarem fluidificada e;

c) continuando a aumentar a vasc ocorre a fluidificação³ do meio granular. Essas três situações distintas, porém seqüenciais pode ser visualizada na Figura 19.

³ ato de fluidificar, ou seja, reduzir-se a fluido

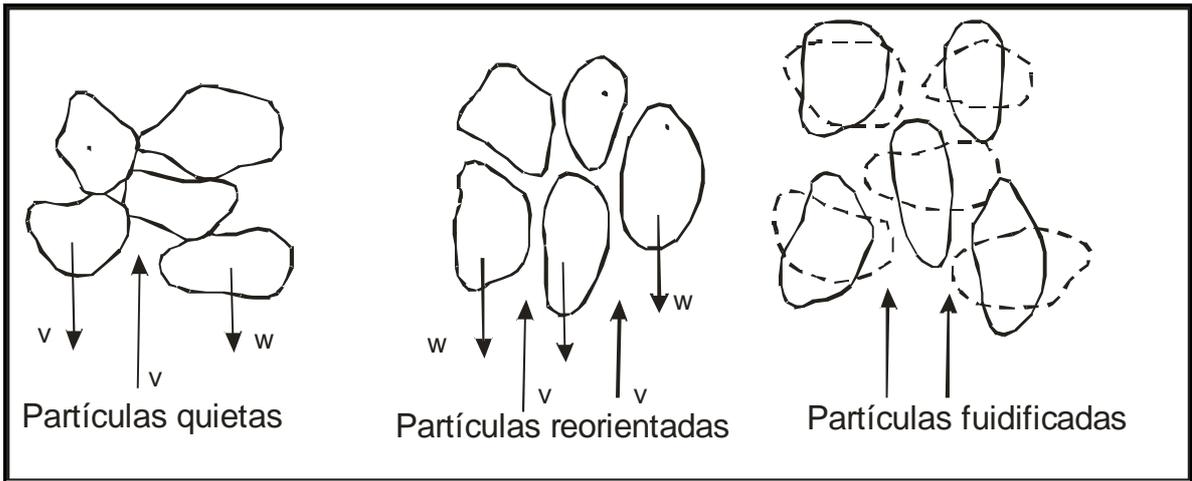


Figura 19 - Comportamento dos grãos durante a lavagem
Fonte: Adaptado de Di Bernardo (1993)

Logo após a fluidificação, a altura do meio granular expandido resulta proporcional ao aumento da velocidade.

Quanto aos mecanismos responsáveis pela limpeza dos meios filtrantes, Richter e Azevedo Netto (2003) comentam que a colisão e a abrasão das partículas durante a lavagem tem pouca ou nenhuma ação na limpeza do meio filtrante, sendo a ação das forças cortantes hidrodinâmicas, resultantes do fluxo ascensional da água entre as partículas, que produz o efeito desejado.

A remoção da camada de flocos ou de impurezas aderidas à superfície dos grãos só será efetivada a partir de certo valor da força cortante hidrodinâmica. Logo as características do meio, tais como o tamanho efetivo, coeficiente de uniformidade e o peso específico têm mais influencia do que a própria velocidade de lavagem, desde que ocorra a fluidificação do meio (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 2003).

De acordo com Cleasby e Fan (1981) a mudança teórica da perda de carga em função da velocidade ascensional, na qual a declividade da curva na fase inicial, aonde não há expansão depende do grau de compactação do meio granular. Enquanto que duas linhas cheias correspondem aos casos reais, a tracejada, a uma situação ideal, conforme é mostrado na Figura 20.

Na região do ponto B há curvas de dois meios granulares que, em decorrência da compactação estão situadas acima da ideal; pode ocorrer de a curva real se situar abaixo da ideal, em razão da não uniformidade dos grãos, da esfericidade ou da formação de caminhos preferenciais no escoamento ascensional. A partir do ponto C, a perda de carga permanece praticamente constante, independentemente

do aumento da velocidade ascensional, já que o meio granular se encontra totalmente fluidificado (CLEASBY; FAN, 1981).

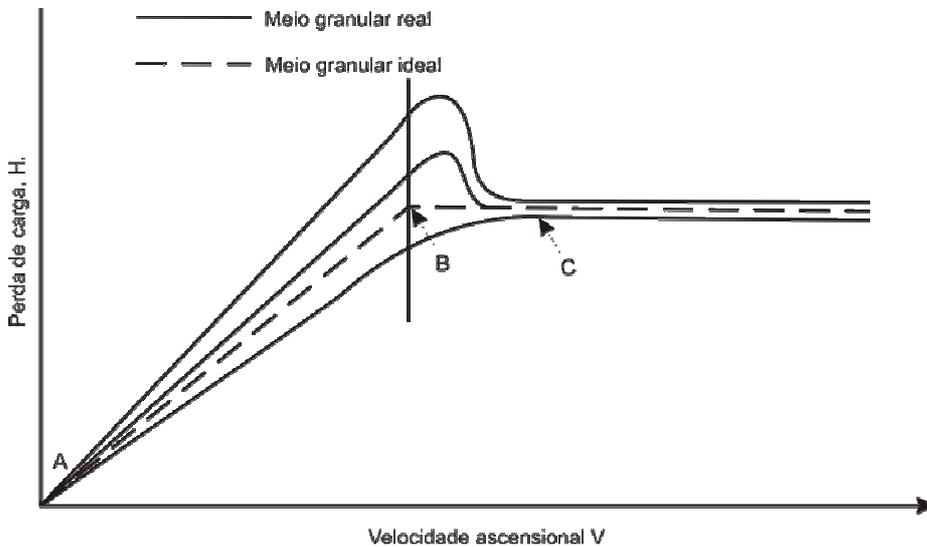


Figura 20 - variação teórica da perda de carga em um meio granular limpo em função da velocidade ascensional

Fonte: Adaptado de Cleasby & Fan (2005)

A água para lavagem é quase sempre armazenada em reservatórios específicos para esse fim. Segundo a NBR 12.216/92, o mesmo devem ter capacidade para armazenar água suficiente para efetuar a lavagem de dois filtros.

Em relação à quantidade de água consumida diariamente na lavagem dos filtros de uma ETA, Di Bernardo (1993) comenta que é variável, porém, sendo comumente considerado valor de 4% da quantidade da água que é filtrada.

De acordo com Di Bernardo e Dantas (2005) a lavagem inadequada do filtros apresenta diversos problemas tais quais: aparecimento de bolas de lodo no interior do meio filtrante; menor volume de água produzido por carreira de filtração; água filtrada de pior qualidade e aumento da perda de carga no meio filtrante.

Pádua e Di Bernardo(2000) explicam que “bolas de lodo” são agregados, formato aproximadamente esféricos, com diâmetro que pode superar a 5 cm sendo formados pelos grãos de areia e pelos sólidos não removidos durante a lavagem do filtro.

A NRB 12.216/92 preconiza que a vazão de água de lavagem em contracorrente deve promover a expansão do leito filtrante de 20 a 30%.

Richter e Azevedo Netto (2003) comentam que para possibilitar uma boa limpeza, a expansão não poderá ser muito pequena e também não deverá ser muito grande. Expansões acima de 50% são indesejáveis, porque reduzem o contato entre os grãos e facilitam a perda de material.

Na prática, consideram-se expansões entre 25 e 50% como satisfatórios, sendo 40% um valor comum.

O aumento da velocidade da água de lavagem a valores muito superiores à velocidade mínima de fluidificação do leito, não representa, praticamente, benefício algum. O efeito na lavagem, de uma expansão de 50 ou 60%, não é sensivelmente maior do que uma expansão de 10 ou 20%. Pelo contrário, as taxas de lavagem demasiadamente elevadas podem provocar o deslocamento da camada suporte (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 2003).

4.1 MÉTODOS DE LAVAGEM DE FILTROS RÁPIDOS

A lavagem do meio filtrante pode ser efetuada de diversas maneiras. Segundo Di Bernardo e Dantas (2005) são classificadas conforme o Quadro 8 a seguir:

MÉTODO DE LAVAGEM	MEIO FILTRANTE
Lavagem com água no sentido Ascensional	Areia convencional e em estações pequenas
Lavagem Auxiliar Superficial e Subsuperficial	Areia convencional e antracito e areia, e em estações com operação qualificada, respectivamente
Lavagem independente com ar e água	Antracito e areia ou areia praticamente uniforme e em estações com operação qualificada
Lavagem com ar e água simultaneamente	Antracito e areia ou areia praticamente uniforme e em estações com operação qualificada

Quadro 8 - Métodos de Lavagem de Filtros Rápidos

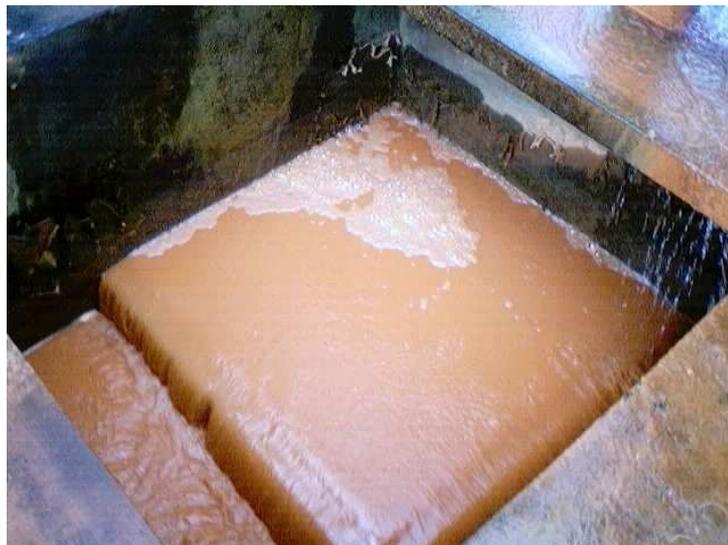
Fonte: Direta

- **Lavagem com Água no Sentido Ascensional**

Durante muito tempo a lavagem dos filtros apenas com água no sentido ascensional, foi o método mais empregado para lavagem do meio filtrante.

Com velocidade ascensional fixada, calcula-se a vazão de água para lavagem, o que permite determinar as perdas de carga nas tubulações e acessórios, sistema de drenagem, camada suporte e meio filtrante expandido, como também dimensionar as calhas de coleta de água de lavagem e posiciona-las em relação ao topo do meio filtrante em repouso.

Ferreira Filho (1996) cita que o principal mecanismo envolvido neste método é a ação de cisalhamento que a água aplica nos grãos do meio filtrante. No entanto, esse mecanismo não é muito efetivo no deslocamento dos sólidos previamente depositados nos grãos do meio filtrante, para a fase líquida. Na Fotografia 6 é mostrado a aplicação deste método na lavagem dos meios filtrantes.



Fotografia 6 - Método de lavagem com aplicação de água em sentido ascensional
Fonte: Direta

- **Lavagem Auxiliar Superficial e Subsuperficial**

A lavagem com água e sistema auxiliar foi desenvolvida pela ineficácia dos sistemas de lavagem de água no sentido ascensional no meio filtrante, com fim de se evitar a formação de bolas de lodo no interior do meio filtrante.



Figura 21 - lavagem superficial com torniquetes hidráulicos
Fonte: Direta

O Sistema de lavagem auxiliar é compreendido em sistemas superficial e subsuperficial que podem ser feitas por meio de tubulações fixas e providas de orifícios situados acima do topo do meio filtrante, ou por meio de torniquetes hidráulicos, como mostrado na Figura 21 (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Quanto ao funcionamento, a lavagem superficial consiste na introdução de água na camada superior do meio filtrante através de um sistema de tubulações ou bocais fixos, instalados a uma altura de 5 a 10 cm acima do topo do meio filtrante em repouso, sendo dotados de orifícios de 2 a 3mm de diâmetro, ou com braços rotativos situados, acima do meio filtrante.

A lavagem superficial inicia-se após o nível de água no interior do filtro ter baixado próximo à crista das calhas de coleta de água de lavagem, sendo mantida por um período de 2 a 4 minutos; a lavagem com água no sentido ascensional inicia-se após o encerramento da lavagem superficial, para produzir uma expansão de 25% a 35% no meio filtrante, e é mantida por um período de 7 a 10 minutos.

Segundo Vianna (2000) e Leme (1990) o sistema de lavagem superficial é utilizado para remover as bolas de lodo que possivelmente se formaram durante a operação dos filtros e que não foram quebrados na ação da água por fluxo ascendente.

As bolas de lodo surgem em decorrência dessas crostas superficiais, que se aderem aos grãos do leito filtrante.

O sistema de lavagem subsuperficial é acionada cerca de 1 minuto após a lavagem com água no sentido ascensional, de modo que o meio filtrante já se

encontra expandido. Portanto a lavagem subsuperficial, pode ser efetuada simultaneamente com a lavagem com água no sentido ascensional, a fim de produzir uma expansão de 25% a 35% no meio filtrante, com duração da ordem de 7 a 10 minutos.

A lavagem subsuperficial não é comumente usada no Brasil, pelas dificuldades encontradas na operação e manutenção dos dispositivos empregados.

Quando comparados ao sistema de lavagem que utiliza somente água, os sistemas fixos de lavagem auxiliar, apresentam de acordo com Ferreira Filho (1993), algumas vantagens e desvantagens, tais como:

- Sistema relativamente simples, em termos de operação e manutenção, principalmente por estar situado acima do meio filtrante, e por necessitar apenas de uma única fonte de água com pressão para seu bom funcionamento;
- Eficiência na eliminação de bolas de lodo;
- Redução da possibilidade de perturbação da camada suporte, uma vez que a introdução de água é realizada na camada superior do meio filtrante.

Em relação às desvantagens, podem ser ressaltadas as seguintes situações:

- Sistemas de Lavagem superficial, do tipo rotativos, podem não apresentar lavagens eficientes nos cantos, no caso de filtros de forma retangular.
- Ineficiência na remoção de bolas de lodo quando apresentam certo tamanho, uma vez que podem penetrar no fundo do meio filtrante.

- **Lavagem independente com ar e água**

O Sistema de Lavagem independente com ar e água se inicia após a diminuição do nível de água no interior do filtro (na ordem de 0,2 a 0,3m acima do topo do meio filtrante em repouso) com insuflação de ar, durante um período de 2 a 5 minutos e com taxa de 10 a 20 L/s.m². Após finalizado o processo de lavagem com ar, inicia-se a lavagem apenas com água, com velocidade ascensional que produza expansão de, no mínimo, 5% do D₉₀ do material granular, conforme visualizado na Fotografia 7 (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).



Fotografia 7: lavagem independente de ar e água

Wiecheteck (1996) cita que, nessa alternativa, a aplicação de ar na lavagem do meio filtrante cria um sistema de três fases (gasoso, líquido, sólido). O ar é introduzido no fundo do filtro, com propagação das bolhas para cima, e com isso transportando os sólidos retidos ao longo do meio filtrante para a superfície dos filtros.

De acordo com a AWWA (1991), existem diversas vantagens e desvantagens com a utilização deste método de lavagem, como as principais citadas a seguir:

- Esse método independe da geometria do filtro, sendo adaptável a qualquer dimensão;
- A ação do ar é efetiva ao longo de toda a profundidade do meio filtrante, portanto, pode agir na interface de meios constituídos de dupla camada e atingir as bolas de lodo de regiões profundas do meio filtrante.

- O sistema deve ser operado com muito cuidado, pois é grande a possibilidade de perda de material filtrante;
- Devido à intensa ação do ar é necessário cuidado especial com o dimensionamento da camada suporte, para que essa não venha a ser alterada na sua constituição granulométrica, o que poderia causar a penetração de material filtrante nos seus interstícios, causando possível obstrução no sistema de drenagem do filtro.

- **Lavagem com ar e água simultaneamente**

Vianna (2000) comenta que este tipo de sistema de lavagem é muito utilizado na Europa, onde filtros que utilizam leitos filtrantes de areia com grande espessura utilizam-na simultaneamente com lavagem ascensional com água. Enquanto que o ar revolve os grãos de areia, provocando, com isto, a remoção dos flocos aí retidos, a água lava os espaços entre os grãos, levando, consigo, os flocos removidos.

Desta maneira, em filtros desse tipo não é necessário expandir o leito filtrante para lavá-los.

Este tipo de lavagem com ar e água simultaneamente é realizada por insuflação de ar com taxa de 4 a 8 L/s.m² e água com velocidade ascensional de 0,15 a 0,40 m/min por um período de 2 a 5 min. A lavagem apenas com água compreendem velocidade ascensional entre 0,6 a 1,0m/min por um período de 3 a 7 minutos.

Segundo Valência (1992) esse tipo de lavagem é mais eficiente, pois dificulta a formação de bolas de lodo, embora sejam necessários sistemas de drenagem mais sofisticados.

A distribuição de ar para este tipo de lavagem pode ser feita por meio de bocais especiais, blocos especiais, blocos cerâmicos, vigas em forma de V invertido, bocais simples ou tubulações providas de orifícios.

Richter e Azevedo Netto (2003) comentam que existem algumas vantagens deste sistema utilizados em Estações de Tratamento de Água no Brasil, como mostrados a seguir:

- Lavagem mais uniforme;
- Lavagem mais completa, com melhor conservação do material filtrante;
- Menor consumo de água para lavagem;
- Eliminação do problema de localização ou de duplicidade de lavagem superficial nos filtros de dupla camada;
- Eliminação dos problemas mecânicos da lavagem superficial com torniquetes e dos problemas de manutenção que ocorrem no caso dos sistema fixo;
- Redução da altura da camada suporte, quando existente.

4.2 EXEMPLOS DE ETAS TIPO DESFERRIZAÇÃO DA RMB

Dentre algumas tecnologias de remoção de ferro existentes na RMB, a seguir são descritos alguns casos reais de sistema de desferrização.

- **ETA TIPO DESFERRIZAÇÃO INFRAERO**

O Aeroporto Internacional de Belém é administrado pela Empresa Brasileira de Infraestrutura Portuária (INFRAERO) que utiliza um sistema de abastecimento de água, constituído de captação, adução, tratamento e distribuição.

O sistema de abastecimento tem vazão de captação 25m³/h, em um poço de 120 m pertencente ao Grupo Barreiras. A concentração de ferro na água bruta é de 1 a 5 mg/L, sendo oxidado pela ação química de dióxido de cloro e encaminhada para dois filtros de pressão de fluxo descendente de camada simples (areia), resultando em um teor de ferro na água tratada de 0,2 mg/L. A retrolavagem ocorre de 8 e 8 horas com duração de 60 min. Essa água tratada é direcionada para o reservatório, no qual é realizado a desinfecção com hipoclorito de sódio. Na Fotografia 8 são visualizados o Painel eletrônico de controle para adição de dióxido de cloro (ETA-INFRAERO) e os filtros de pressão de fluxo descendente da ETA Infraero.



Filtro de Pressão

Fotografia 8 - Painel de controle de adição de dióxido de cloro e filtro de pressão da ETA Infraero
Fonte: Direta

A Universidade Federal do Pará localizada na RMB às proximidades do rio Guamá utiliza um sistema de abastecimento de água, constituído por captação, tratamento, reservação e distribuição.

- **ETA TIPO DESFERRIZAÇÃO UFPA**

O sistema de abastecimento de água do Campus Guamá possui uma ETA tipo desferrização utilizada para o abastecimento dos setores básico e profissional, sendo constituída por dois aeradores tipo tabuleiro, dois leito de contato de fluxo ascendente e quatro filtros rápidos de fluxo descendentes. A estação utiliza água de poço profundo de 256 m e funciona com vazão de projeto de 65,6 L/s.

Na Fotografia 9 é apresentada a ETA - tipo desferrização.



Fotografia 9 - ETA - Tipo Desferrização, localizado na UFPA
Fonte: Direta

- **ETA TIPO DESFERRIZAÇÃO ALDO ALMEIDA**

Localizada no bairro do Tapanã a ETA tipo desferrização Aldo Almeida utiliza água de poço profundo captada de manancial subterrâneo, sendo gerenciado pelo Sistema Autônomo de Água e Esgoto de Belém (SAAEB).

O sistema de água é usada para abastecimento do bairro, com presença de teor de ferro entre 2 e 3 mg/L acima do valor máximo permitido, que é de 0,3 mg/L. O sistema é constituído de aerador, leito de contato de fluxo ascendente, filtro de fluxo descendente e sistema de desinfecção por cloro. Na Fotografia 10 é mostrado o aerador tipo tabuleiro.



Fotografia 10 - Aerador tipo tabuleiro e filtro, respectivamente, localizado no Bairro do tapanã na ETA Aldo Almeida

Fonte: Direta

- **ETA TIPO DESFERRIZAÇÃO CORDEIRO DE FARIAS**

O sistema de abastecimento de água do Cordeiro de Farias possui uma ETA tipo desferrização que utiliza água subterrânea de três poços com profundidade 250 m pertencente ao Grupo Pirabas, sendo gerenciada pelo SAAEB.

O sistema apresenta ferro em água bruta de 0,5mg/L e funciona com capacidade estimada de 150m³/h. O sistema é constituído por aerador tipo tabuleiro e três filtros por fluxo ascendente. A retrolavagem dos filtros ocorrem de 20 e 20 horas com duração de 15 min.

Na Fotografia 11 é mostrado o aerador tipo tabuleiro



Fotografia 11 - Aerador tipo tabuleiro e Filtro Rápido, localizado no Bairro do Tapanã na ETA Cordeiro de Farias

Fonte: Direta

- **ETA TIPO DESFERRIZAÇÃO DO CONJUNTO SATÉLITE**

O sistema do Conjunto Satélite utiliza uma ETA, para tratar água com concentração de ferro em torno de 0,3 a 0,4mg/L proveniente de manancial subterrâneo, com vazão de 240m³/h, sendo constituída por dois aeradores tipo tabuleiro, dois leito de contato e dois filtros de fluxo descendente.

Na Fotografia 12 é mostrado o aerador tipo tabuleiro da ETA do Conjunto Satélite



Fotografia 12 - Aerador tipo tabuleiro, localizado no Bairro do Satélite na ETA do IPASEP

Fonte: Direta

- **ETA TIPO DESFERRIZAÇÃO CANARINHO**

O sistema Canarinho localizado no bairro do Tapanã, utiliza um poço profundo de 150m , com presença de ferro em água bruta de 0,5mg/L.

O sistema possui uma ETA constituída por aerador tipo tabuleiro e dois filtros russos. A lavagem dos filtros ocorre introduzindo água no sentido ascensional a cada 24 horas e tempo de duração de 15 minutos.

Na Fotografia 13 é mostrado o sistema tipo desferrização do Canarinho



Tapanã

Fotografia 13 - Sistema Canarinho tipo desferrização, localizado no Bairro do

Fonte: Direta

Baseado nos exemplos de sistemas de desferrização existentes na RMB, pode ser fazer algumas considerações:

O sistema de desferrização é uma tecnologia de tratamento de água para remoção de ferro de baixo custo de instalação operacional.

No entanto, verificou-se in loco que maior parte das ETAs não operavam adequadamente. Foram observados leitos filtrantes em quantidade insuficiente, bolas de lodos, falta de controle no encerramento das carreiras de filtração, além da ausência de controle de vazão, o que prejudica o desempenho da ETA como um todo.

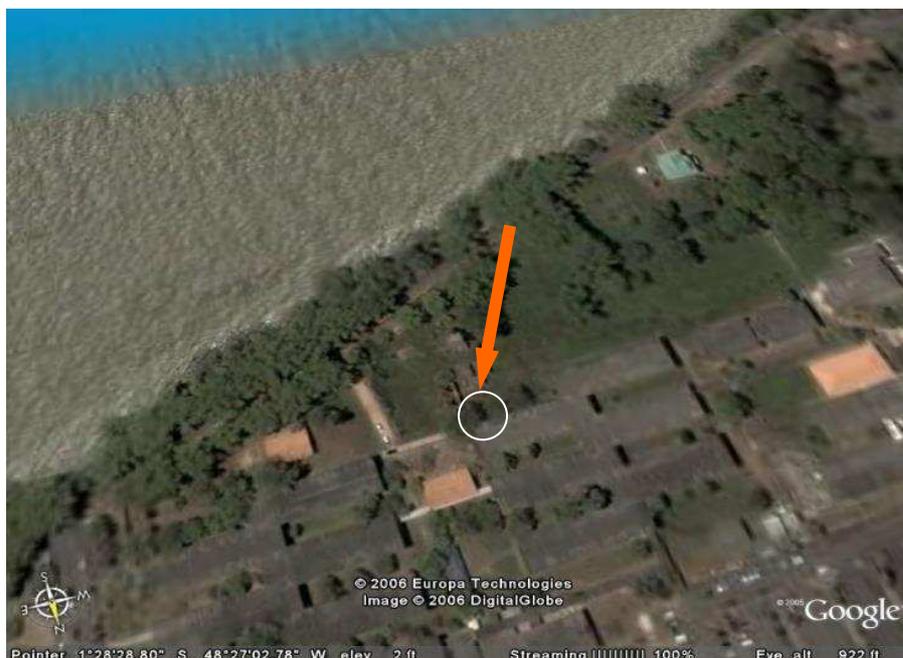
Dessa forma, já que essa tecnologia tem utilização tão difundida na região, maior atenção deve ser dado aos parâmetros de operação e projeto, sendo, por esse motivo, objeto de investigação dessa dissertação.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1 SELEÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Para o desenvolvimento da pesquisa foi dimensionada e implantada uma ETA - Piloto tipo desferrização no Campus Profissional do Guamá da UFPA, mais especificamente, no local da ETA do Campus Profissional, cujo sistema é constituído das unidades de aeração, leito de contato e filtração. Na Fotografia 14 é apresentado o local de instalação da ETA-Piloto.

O sistema de abastecimento de água do Campus Guamá da UFPA é constituído de captação em manancial subterrâneo que possui teores de ferro de cerca de 2mg/L.



Fotografia 14 - Local da instalação da ETA –Piloto – Campus Profissional Guamá UFPA
Fonte: Direta

A escolha da área de estudo no Campus da UFPA foi devido à presença de poços com elevados teores de ferro em torno de 2mg/L, à proximidade da área dos laboratórios e, à possibilidade de utilização da ETA piloto para atividades acadêmicas dos cursos de graduação e pós-graduação.

A seguir são enfocadas as etapas e procedimentos experimentais utilizados nesta pesquisa.

5.2 ETAPAS DA PESQUISA

O delineamento experimental desse trabalho foi desenvolvido em 4 (quatro) etapas no período de 10/2004 a 06/2006, conforme relacionadas no Quadro 9.

ETAPAS
1- Dimensionamento da ETA-Piloto
2- Implantação da ETA-Piloto
3- Determinação da eficiência de filtração em função da existência de leito do contato
4-Avaliação dos Dados

Quadro 9 – Etapas da pesquisa

5.2.1 Dimensionamento da ETA - Piloto

A ETA piloto tipo desferrização foi projetada com aeradores tipo tabuleiro, leito de contato de fluxo ascendente e filtro rápido de fluxo descendente. O dimensionamento foi baseado na literatura existente e em normas técnicas.

No dimensionamento foram calculados os dados de cada unidade da estação piloto. No anexo A é apresentado o dimensionamento básico de ETA Piloto e nos Quadro 10, Quadro 11 e Quadro 12 e Projeto da planta da ETA-Piloto no anexo B.

AERADOR TIPO TABULEIRO		
Vazão	1,67	m ³ /h
Tipo de aerador	tabuleiro	-
Forma	quadrada	-
Taxa de aeração	600	m ³ /m ² *d
Lado da bandeja	0,26	m
Nº de bandejas	5	
Espaçamento entre as bandejas	0,2	m
Altura das bandejas	0,15	m
Altura útil do aerador	2,10	m
Diâmetro do furo	3	mm
Nº de furos	56	
Posicionamento dos furos	11	
Distância entre os furos	0,01	m
Diâmetro de entrada	0,032	m
Diâmetro de saída	Uma polegada > que o de entrada 0,040	m
Dimensões da bandeja distribuidora	0,30 x 0,30 x 0,15	m
Dimensões da bandeja coletora	0,80 X 0,80 x 0,40	m

Quadro 10: Características do aerador tipo tabuleiro

LEITO DE CONTATO		
Vazão	1,67	m ³ /h
Diâmetro do filtro	0,30	m
Diâmetro da tubulação de entrada do filtro	0,032	m
Diâmetro da tubulação de saída do filtro	uma polegada > que o de entrada 0,040	mm
Altura do leito de contato	3,85	m
Nº de furos	20	furos
Distância entre os furos	0,09	cm

Quadro 11: Características de leito de contato

FILTRO		
Vazão	1,67	m ³ /h
Diâmetro do filtro	0,30	m
Diâmetro da tubulação de entrada do filtro	0,032	m
Diâmetro da tubulação de saída do filtro	uma polegada > que o de entrada 0,040	m
Altura do filtro	3,4	m
Diâmetro de entrada da retrolavagem	0,06	m
Diâmetro de saída da retrolavagem	0,06	m
Volume gasto na descarga de fundo	0,56	m ³
Vazão da lavagem	0,100	m ³ /min
Duração da lavagem	5	min
Velocidade ascensional	0,90	m/s
Nº de furos	20	furos
Distância entre os furos	0,09	cm

Quadro 12 Características do filtro rápido

• Operação da ETA- Piloto Tipo Desferrização

A captação de água bruta para o sistema piloto tipo desferrização foi realizada através da derivação da tubulação de entrada da ETA – UFPA, com uma vazão de 1,67m³/h controlada por meio de hidrômetro, de maneira a permitir, que o sistema fosse operado com carga hidráulica disponível variável e taxa constante de 360m³/m²xdia. A seguir são descritos os procedimentos realizados:

- Fecha - se os registros de esfera de entrada de Ø 25mm da retrolavagem tanto do leito de contato quanto do filtro rápido;
- Abre-se o registro de esfera de Ø 25mm que permite a entrada de água à tubulação de Ø 32mm do aerador tipo tabuleiro.
- Após passar pelo aerador a água é encaminhada por gravidade ao leito de contato por fluxo ascendente através de uma tubulação de PVC junta soldável de Ø 32mm;
- Do leito de contato a água é conduzida por uma tubulação Ø 40mm ao filtro rápido por fluxo descendente. Ao atravessar em sentido descendente o leito filtrante e a camada suporte, a água é conduzida para o sistema de drenagem (fundo falso), sendo encaminhada para o dispositivo de coleta de água filtrada.

A água utilizada para retrolavagem era proveniente do reservatório elevado da ETA-UFGA, sendo utilizado velocidade ascensional de 0,9m/min, de modo a permitir a expansão de 25% do meio filtrante.

Essa lavagem ocorria sempre que atingia a perda de carga máxima ou quando a turbidez da água filtrada tinha valores de turbidez maiores que 1,0 uT. A seguir são descritas as etapas realizadas:

- Fecham-se os registros de esfera de Ø 25mm que permitem a entrada da água à tubulação de Ø 32mm do aerador tipo tabuleiro e mantem-se aberto o registro de saída Ø 60mm até que o nível de água em seu interior escoe através de descarga;
- Abre-se o registro de esfera de entrada de Ø 25mm da retrolavagem que permite o acesso da água tanto para o leito de contato quanto para o filtro rápido durante 10min;
- A água resultante da lavagem é coletada por meio de uma tubulação de descarga de Ø de 75mm.

- **Descrição da unidade de aeração**

O aerador tipo tabuleiro foi confeccionado em fibra de vidro, sustentado por estrutura de alumínio, com altura útil de 2,10 m, composto por cinco bandejas perfuradas e sobrepostas, distanciadas de 0,2 m, com seção quadrada de 0,26 x 0,15 m por onde a água percola, quando, então é encaminhada para o tanque coletor com lado de 0,80m e altura de 0,40m.

Na Fotografia 15 é apresentado o aerador tipo tabuleiro da ETA-Piloto.



Fotografia 15 - Aerador tipo tabuleiro em fibra de vidro e estrutura em alumínio confeccionado para a ETA-Piloto.

Fonte: Direta

- **Descrição do Leito de Contato**

A unidade de leito de contato foi confeccionado em tubo de PVC, com diâmetro interno de 0,30 m e altura de 3,85 m, perfazendo uma carga total de 641 kg. A unidade dispõe de três flanges ao longo do tubo, que permitem realizar procedimentos de introdução do leito, manutenção e operação. Nesta unidade, a água percorre as camadas de seixos em fluxo ascendente. As camadas de seixos nessa unidade foram dispostas da camada de maior para a camada de menor granulometria. Na Figura 22 são representadas as subcamadas e no Quadro 13 são apresentadas as especificações granulométricas, bem como as espessuras das subcamadas.

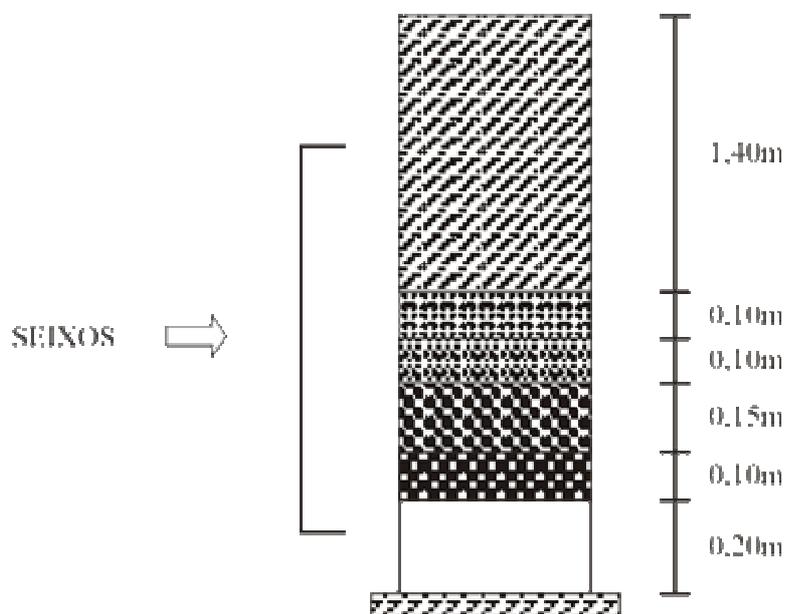
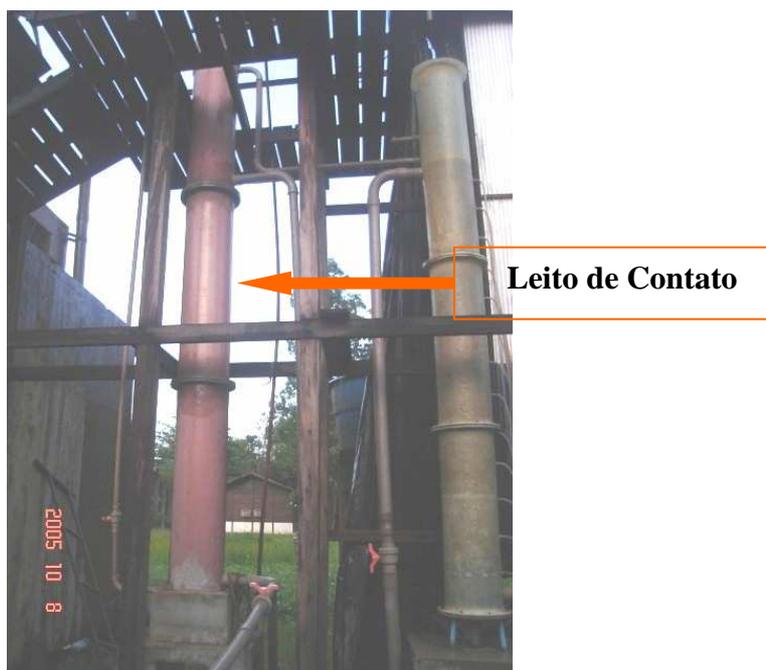


Figura 22 – Subcamadas de seixos do leito de Contato da ETA - Piloto

Camadas do leito de contato	Especificação	Espessura	Unidades
Seixo 1	$3,18 < D_f < 7,54$	1,4	m
Seixo 2	$7,94 < D_f < 9,53$	0,1	m
Seixo 3	$9,53 < D_f < 19,04$	0,1	m
Seixo 4	$19,05 < D_f < 38,10$	0,15	m
Seixo 5	$3,18 < D_f < 7,54$	0,1	m

Quadro 13 - Especificações granulométricas das camadas que constituem o leito de contato.

A limpeza da unidade de contato foi efetuada introduzindo-se água no sentido ascensional, com velocidade de 0,9 m/min durante 5 minutos, através de uma tubulação de \varnothing 75mm. Na Fotografia 17 pode ser observar a unidade do Leito de Contato.



Fotografia 16 - Leito de Contato de fluxo ascendente
Fonte: Direta

- **Descrição da unidade de filtração**

Na filtração de fluxo descendente foi utilizado um filtro rápido em série ao leito de contato, de forma circular de 0,30 m, perfazendo altura de 3,4 m e uma carga total de 513kg, composta por três flanges, para facilitar os procedimentos de montagem, operação e manutenção dessa unidade. Nessa unidade a filtração da água percorre a camada filtrante de cima para baixo e do material mais fino para o mais grosso.

Para seleção e caracterização do material filtrante da ETA – Piloto foram realizados ensaios granulométricos no laboratório de Engenharia civil, conforme a NBR 12.216/92.

Na determinação das características granulométricas foi utilizado o método do peneiramento mecânico, que segundo Di Bernado (1993), consiste na colocação de 1000 g de material em uma serie de peneiras com aberturas decrescentes de cima para baixo e com vibração automática. Vale ressaltar, que antes da realização de cada ensaio, as amostras foram previamente homogeneizadas e secas ao ar livre.

O tempo de agitação (vibração) adotado nos ensaios granulométricos foi de 7 (sete) minutos.

O material retido em cada uma das peneiras da serie foi cuidadosamente retirado das peneiras e pesado, para posterior cálculo das porcentagens e, com isso elaboração da curva de distribuição granulométrica. Em seguida, foram determinados o tamanho efetivo e o coeficiente de desuniformidade do material amostrado.

No Quadro 14 é apresentada a especificação do material componente do leito filtrante, baseado nos resultados obtidos por Contente (2005).

Filtro	Camada	Espessura (cm)	Diâmetro efetivo (mm)	Coeficiente de desuniformidade
Camada Simples	Areia	70	1,2	1,3

Quadro 14 - Material componente do leito filtrante do filtro de camada simples da ETA-Piloto.

Fonte: Direta

A camada suporte foi composta por subcamadas com materiais de granulometrias diferentes, previamente selecionadas, baseadas nas camadas utilizadas nos filtros da ETA - UFPA. O material foi distribuído em quatro camadas com 10 cm de espessura, com granulometria decrescente conforme o aumento da altura. A camada torpedo foi disposta acima da camada suporte com espessura de 0,10 m, afim de não permitir a intrusão dos materiais filtrantes. No Quadro 15 são apresentadas as características da camada suporte, baseado no projeto executivo da ETA da UFPA e a camada torpedo. Na Fotografia 17, pode-se observar a unidade de filtração utilizada nesse trabalho.

Camada	Material	Espessura (cm)	Diâmetro efetivo (mm)
Torpedo	Areia grossa	10	$1,59 < D_f < 3,18$
Suporte	Seixo 4 e 5	10	$19,05 < D_f < 38,10$ $38,10 < D_f < 50,80$
	Seixo 3	10	$9,53 < D_f < 19,04$
	Seixo 2	10	$7,94 < D_f < 9,53$
	Seixo 1	10	$3,18 < D_f < 7,54$

Quadro 15 - Características da camada suporte e camada torpedo da ETA-Piloto.



Fotografia 17 - Corte interno do filtro de camada simples da ETA - Piloto.
Fonte: Direta

5.2.2 Implantação da ETA - Piloto tipo desferrização

A implantação do Sistema ETA-Piloto foi realizada no período de 01 de Março a 31 de Abril de 2006. Para a instalação do sistema foi construída base de concreto 3 x 3 m² de área com 22 cm de altura para o sustentamento do sistema, conforme é apresentado na Fotografia 18.



Fotografia 18 - Base de concreto para implantação da ETA-Piloto.
Fonte: Direta.

Para a fixação do aerador tipo tabuleiro foi construída uma estrutura de madeira formado por uma base apoiada em 4 pilares perfazendo altura total de cerca de 6 metros, onde no topo dessa estrutura é apoiado o aerador, sendo a mesma constituída de base de madeira que permite a movimentação e as coletas das amostras da água após leito como apresentado na Fotografia 19.



Fotografia 19 - Estrutura de madeira do Aerador da ETA-Piloto.
Fonte: Direta

Pode-se observar na Fotografia 20 a base de concreto do Leito de Contato com dimensões de 43 x 43 x 28 cm construída, de modo a permitir o encaixe da tubulação de retrolavagem. Essa base foi apoiada em laje de concreto de 70 x 70 x 9 cm, que é sustentada por quatro pilares de concreto com dimensões 20 x 20 x 78 cm.



Fotografia 20 - Base de concreto para apoio do Leito de Contato da ETA-Piloto.
Fonte: Direta.

Na Fotografia 21 pode ser observada a estrutura de concreto para a sustentação do filtro rápido descendente constituído por laje de concreto com dimensões de 70 x 70 x 9 cm, a qual é sustentada por quatro pilares de concreto com dimensões de 20 x 20 x 79 cm. Acima dessa laje encontra-se o filtro rápido descendente sustentado por tripé de metal o qual serve de ligação entre o filtro rápido descendente e a base de concreto, e que permite também o encaixe da tubulação da água de lavagem.



Fotografia 21 - Base de concreto para apoio do filtro da ETA-Piloto.
Fonte: Direta.

Para colocação dos materiais filtrantes do filtro rápido preencheu-se o mesmo parcialmente com água, em seguida foram colocados na parte superior as sub-camadas de seixo para a formação da camada suporte, começando-se com a sub-camada de maior granulometria para a de menor granulometria. A colocação do material filtrante na coluna seguiram a mesma ordem da camada suporte. No entanto, no caso dos materiais filtrantes, foi realizada a compactação hidráulica sugerida por Contente (2005), a qual consistia na aplicação de determinada vazão de água no sentido ascendente, em pequenos intervalos de tempo, para que promovesse a acomodação dos grãos do material.

Na Fotografia 22 pode ser observada a estrutura que faz a sustentação da caixa d'água de armazenamento de água filtrada, sendo que a mesma é constituída de laje de concreto com dimensões de 1,05 x 1,10 x 0,8 metros, sendo ainda sustentada por quatro pilares que possuem dimensões de 0,2 x 0,2 x 2 metros.



Fotografia 22 - Base de sustentação de concreto da caixa d'água da ETA-Piloto.
Fonte: Direta.

A alimentação do sistema piloto foi realizada através de derivação na tubulação de água bruta que abastece a estação de tratamento de água da UFPA, onde foi realizada perfuração de orifício de aproximadamente de 0,2mm e posto colar de 200mm x 25mm em volta da tubulação da ETA-UFPA. Essa derivação de 25 mm é de PVC JS, sendo dotado de registro de esfera de 25 mm e o hidrômetro, no qual foi realizada a aferição da vazão. Posteriormente essa água abastece o aerador do tipo tabuleiro, conforme pode-se observar na Fotografia 23.



Fotografia 23 - Tubulações de AB que abastece o aerador da ETA-Piloto
Fonte: Direta.

Abaixo do aerador tem-se uma tubulação de 50mm que sofre redução para 32mm que possibilita a interligação para o leito de contato ou pra o filtro rápido, conforme se deseja operar o sistema. A tubulação de descarga do leito de contato é constituída por registro de esfera de PVC JS de 32mm provida de descarga. Esses detalhes podem ser observados nas Fotografias 24 e 25.



Fotografia 24 - Tubulações de entrada do filtro sem passar pelo leito de contato
Fonte: Direta



Fotografia 25 - descarga do leito de contato da ETA-Piloto
Fonte: Direta

Após passar pelo leito de contato a água é conduzida por uma tubulação 40 mm e alimenta o filtro rápido descendente, conforme pode ser visualizado na Fotografia 26.



Fotografia 26 - tubulação de entrada do filtro após passar pelo leito de contato.

Fonte: Direta.

Após a água passar pelo processo de filtração a mesma é conduzida para o reservatório de 500 litros por uma tubulação de 75 mm e sofre uma redução para 50mm através de um Tê de passagem lateral de 75m para 50mm, sendo que a mesma tubulação de saída do filtro rápido descendente é utilizada para a retrolavagem do mesmo que ainda possui uma tubulação de descarga que localiza-se no fundo do mesmo, conforme as Fotografia 27 e Fotografia 28.



Fotografia 27 - tubulações de saída do filtro rápido descendente da ETA-Piloto.

Fonte: Direta



Fotografia 28- Descarga do filtro rápido descendente da ETA-Piloto
Fonte: Direta

Após o reservatório a água filtrada é conduzida por uma tubulação de 25mm que possui ao final uma torneira.

A tubulação da retrolavagem do sistema ETA-Piloto é alimentada pela tubulação de retrolavagem da estação de tratamento de água da UFPA, onde foi realizada uma pequena perfuração de aproximadamente de 0,2 mm e posto um colar de 200 mm em volta da tubulação da ETA-UFPA. Essa tubulação de 25mm é dotada de registro de esfera de 25 mm e um hidrômetro para aferição da vazão, de acordo com as Fotografias 29 e 30.



Fotografia 29 – Entrada de água da tubulação da retrolavagem da ETA-Piloto.
Fonte: Direta.



Fotografia 30 - Tubulações da retrolavagem da ETA-Piloto.
Fonte: Direta

Ao lado do filtro rápido descendente foi construído uma estrutura de madeira, onde foram localizados os piezômetros para medição da perda de carga no sistema, conforme pode ser observado na Fotografia 21.



Fotografia 31 - Piezômetros do filtro rápido descendente.
Fonte: Direta.

5.2.3 Determinação da eficiência de filtração em função do leito de contato

A determinação da eficiência do Sistema em função do leito de contato foi realizada no período de 07/2006 à 10/2006. Esta etapa foi realizada em duas fases, a primeira com o leito de contato e a segunda sem o leito de contato, sendo adotadas taxas de filtração de $180 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$, $270 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ e $360 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$, como recomendam Richter, & Azevedo Netto (2003) e a NBR 12.216/92. O experimento foi constituído de coletas e determinações laboratoriais, referentes aos pontos de amostragem: Água bruta (AB), água após o leito (AL) e água filtrada (AF), conforme pode ser observado na Figura 23.

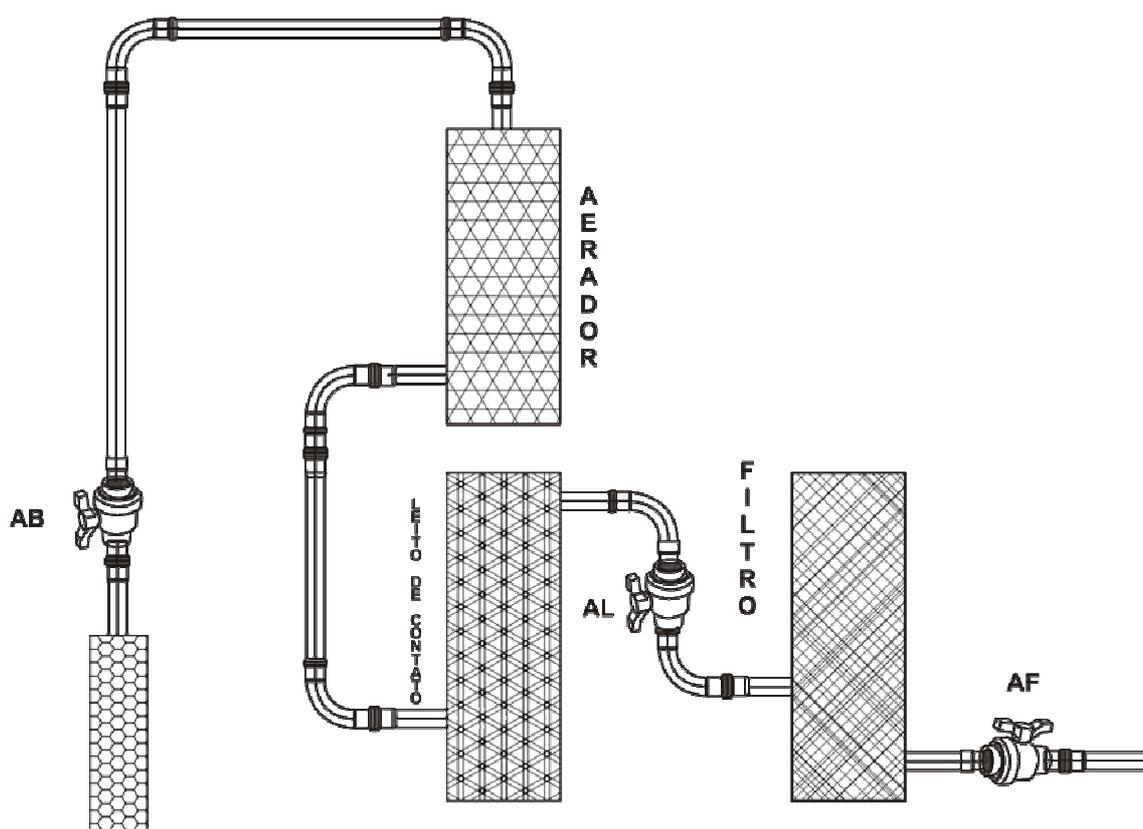


Figura 23 - Pontos de monitoramento da ETA-Piloto

As taxas de filtração foram adotadas de acordo com os seguintes critérios a seguir:

- 180 m³/m².d : Avaliação da taxa de filtração recomendada pela NBR 12.216/92 para camada simples, como é o filtro da ETA-Piloto;
- 270 m³/m².d: Avaliação da taxa de filtração recomendado de acordo as literaturas existentes (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 2003);
- 360 m³/m².d: Sendo, portanto, o dobro do recomendado para camada simples.

Para determinação da eficiência do processo de filtração na ETA-Piloto foram realizados 18 ensaios, nove na primeira fase (com o leito de contato) e nove na segunda fase (sem o leito de contato), sendo esses realizados em triplicada para cada taxa de filtração aplicada.

Na primeira fase as coletas e análises foram desenvolvidas a cada quatro horas na AB e a cada duas horas na AL e na AF. Na segunda fase as amostras foram coletadas a cada quatro horas na AB e a cada duas horas da AF. Em ambas as fases foram consideradas para efeito de planejamento 24horas, baseado em resultados de pesquisas existentes no Brasil.

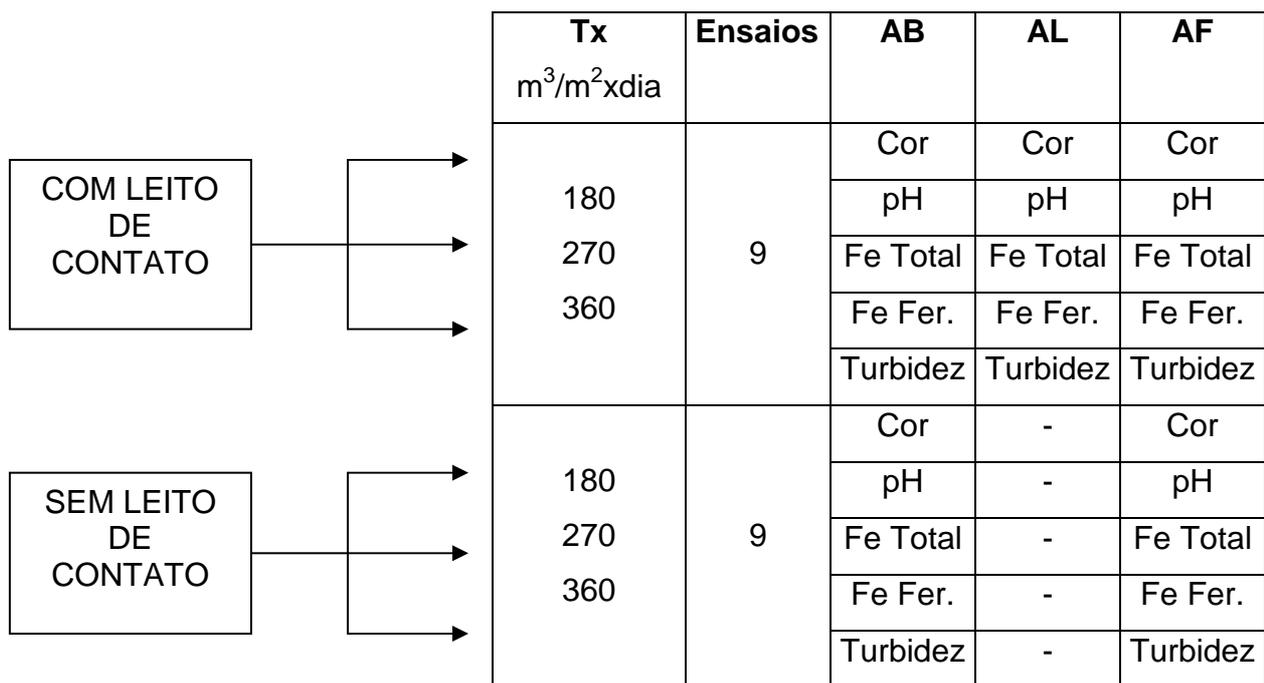
No monitoramento foram determinadas as seguintes variáveis: ferro total, ferro ferroso, cor aparente, turbidez e pH. No Quadro 16 é apresentado o número total de determinações laboratoriais realizadas para as etapas experimentais.

FASE	PONTOS DE COLETA	pH	TURBIDEZ (UT)	COR APARENTE (UC)	FERRO TOTAL (mg/L)	FERRO FERROSO (mg/L)
1- Com leite de contato	AB	63	63	63	63	63
	AL	121	121	121	121	121
	AF	121	121	121	121	121
2- Sem leite de contato	AB	31	31	31	31	31
	AF	57	57	57	57	57
Total Parcial		393	393	393	393	393
Total Geral		1965				

Quadro 16 - Determinações laboratoriais realizadas na etapa experimental

As determinações laboratoriais foram realizadas conforme as recomendações do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, 1995) e Normatizações Técnicas da Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB, L5,124 (1978); L5.126 (1978); L5.169 (1978). No anexo C é apresentada a metodologia das análises do ferro total e ferro ferroso.

Vale ressaltar que os pontos de amostragem foram caracterizados segundo os valores máximos permissíveis (VMP) recomendados pela Portaria nº 518 do Ministério da Saúde, publicado em 25 de março de 2004. No Fluxograma 1 é representado o planejamento de campo da pesquisa.



Fluxograma 1 - Planejamento de campo do trabalho

Para o cálculo do grau de eficiência da filtração em função do leito de contato na remoção do ferro foi adotada a fórmula, a seguir:

$$E\% = \frac{E_{AB} - E_{AL} \times 100}{E_{AB}}$$

Onde:

E= eficiência de filtração (%)

E_{AB}= Concentração de ferro na água bruta (mg/L)

E_{AL}= concentração de ferro após o leito de contato (mg/L).

5.2.4 Avaliação dos dados

Nesta etapa da avaliação e tratamento dos dados, foi utilizada a estatística descritiva, que é o conjunto de técnicas utilizado para resumir o conjunto de todos os dados coletados numa dada investigação à relativamente poucos números e gráficos.

Há situações em que, por motivos de concisão, o resumo obtido através da distribuição de freqüências de um conjunto de dados quantitativos não é suficiente e uma redução mais drástica se faz necessária, sendo utilizadas, então, as **medidas de posição**. Dentre todas as medidas de posição, foram utilizadas, no presente trabalho, as seguintes:

- **Média**, que corresponde à soma de todos os dados dividida pela quantidade de dados;
- **Mediana**, que equivale ao valor abaixo do qual se situam 50% dos dados e, conseqüentemente, acima do qual ficam os 50% restantes;
- **Quartis**, que corresponde aos valores que dividem a distribuição em 4 partes iguais.

Além de resumir os dados, também foi realizada a mensuração da variabilidade dos mesmos e, para isso, foram utilizadas as chamadas **medidas de dispersão**, que são medidas de variação de um conjunto de dados em torno da média, ou seja, da maior ou menor variabilidade dos resultados obtidos. Elas permitem identificarmos até que ponto os resultados se concentram ou não ao redor da tendência central de um conjunto de observações.

As medidas de dispersão que utilizaremos são as seguintes:

- **Variância**, que é definida como sendo a soma dos desvios em relação à média elevada ao quadrado e dividida pelo número total de observações;
- **Desvio padrão**, que é a raiz quadrada da variância;

Além dessas medidas, foram utilizados alguns gráficos que são recursos visuais muito importantes para verificarmos como os dados estão comportando-se.

Dentre os gráficos adotados, destacam-se os seguintes:

- **Gráfico de colunas**, que é formado por retângulos verticais de larguras iguais onde cada um deles representa a intensidade de uma modalidade ou atributo;

- **Gráfico de setores**, onde a variável em estudo é projetada num círculo, de raio arbitrário, dividido em setores com áreas proporcionais às frequências das suas categorias;
- **Gráfico Box-Plot**, que é extremamente importante na análise exploratória dos dados, e foi criado para apresentar a distribuição de dados quantitativos. É constituído a partir de cinco pontos: o menor valor (mínimo), o primeiro quartil, a mediana, o terceiro quartil e o maior valor (máximo).

Para a tabulação e tratamento dos dados, foi utilizado o Software SPSS 13 (Statistical Package for Social Sciences, versão 13).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

- Determinação da eficiência de filtração em função da existência de leito de contato

Durante o período de monitoramento para as taxas experimentais, a AB apresentou as seguintes características, conforme apresentados no Quadro 17.

ÁGUA BRUTA COM LEITO DE CONTATO					
Taxas m ³ /m ² xdia	Variáveis	pH	Cor uC	Ferro Total mg/L	Ferro Ferroso mg/L
180	Mínimo	6,69	17	2,03	2,03
	Máximo	6,96	28	2,23	2,20
270	Mínimo	6,60	19	1,45	1,42
	Máximo	7,70	33	2,30	2,30
360	Mínimo	6,68	11	1,85	1,69
	Máximo	7,75	43	2,14	2,07
ÁGUA BRUTA SEM LEITO DE CONTATO					
180	Mínimo	6,70	8	1,66	1,62
	Máximo	6,92	32	2,33	2,33
270	Mínimo	6,68	24	2,07	2,00
	Máximo	6,90	34	2,28	2,28
360	Mínimo	6,69	7	2,02	1,88
	Máximo	6,96	29	2,48	2,48

Quadro 17- Principais parâmetros físico-químicos da Água Bruta

No monitoramento do sistema de desferrização em função da presença do leito foi verificado na água bruta o ferro total para as taxas de 180m³/m²xdia, 270m³/m²xdia e 360m³/m²xdia, as concentrações entre 2,03 a 2,23mg/L, 1,45 a 2,30mg/L e 1,85 a 2,14mg/L, respectivamente, enquanto que taxas de filtração de 180m³/m²xdia, 270m³/m²xdia e 360m³/m²xdia, os resultados obtidos de ferro ferroso foram de 2,03 a 2,20mg/L, 1,42 a 2,30mg/L e 1,69 a 2,07mg/L, respectivamente sendo a maior parcela do ferro apresentado sob a forma solúvel.

No entanto na ausência do leito a água bruta para as taxas $180\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$, $270\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ e $360\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ apresentou teores de ferro entre 1,66 a 2,33mg/L, 2,07 a 2,28mg/L e 2,02 a 2,48mg/L, respectivamente quanto para as taxas de filtração de $180\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$, $270\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ e $360\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ os valores obtidos de ferro ferroso ficaram entre 1,62 a 2,33mg/L, 2,00 a 2,28mg/L e 1,88 a 2,48mg/L, respectivamente.

Para as taxas de filtração de $180\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$, $270\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ e $360\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ com leito de contato o pH variou na faixa de 6,69 a 6,96, 6,60 a 7,70 e 6,68 a 7,75 , respectivamente, enquanto que para as taxas de filtração sem o leito de contato os valores ficaram entre 6,70 a 6,92, 6,68 a 6,90 e 6,69 a 6,96, respectivamente, sendo observados em alguns casos valores obtidos em desacordo com o recomendado por Manahan (2005) para a faixa ótima de pH (7-8) de oxidação, o qual favorece a oxidação rápida.

6.1 TAXAS COM E SEM LEITO DE CONTATO

- TAXA DE $180\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ COM O LEITO DE CONTATO

- pH

Na Tabela 1 é apresentada a estatística descritiva dos resultados obtidos no monitoramento do sistema de desferrização piloto.

Tabela 1 - Estatística descritiva dos resultados de pH no Sistema de desferrização piloto para Tx – 180m³/m²xdia com leito de contato

AMOSTRAS	VARIÁVEL		
	pHAB	pHAL	pHAF
Número de amostras	23	44	44
Media	6,77	7,69	7,93
Mediana	6,73	7,70	7,92
Desvio padrão	0,08	0,08	0,11
Variância	0,01	0,01	0,01
Mínimo	6,69	7,53	7,72
Máximo	6,96	7,84	8,24
Quartis	25	6,72	7,63
	50	6,73	7,70
	75	6,79	7,75

No Gráfico 2 são representados os valores mínimos e máximos, os quartis 25% e 75% e a mediana do pH da água bruta - AB, água após o leito - AL e água filtrada - AF.

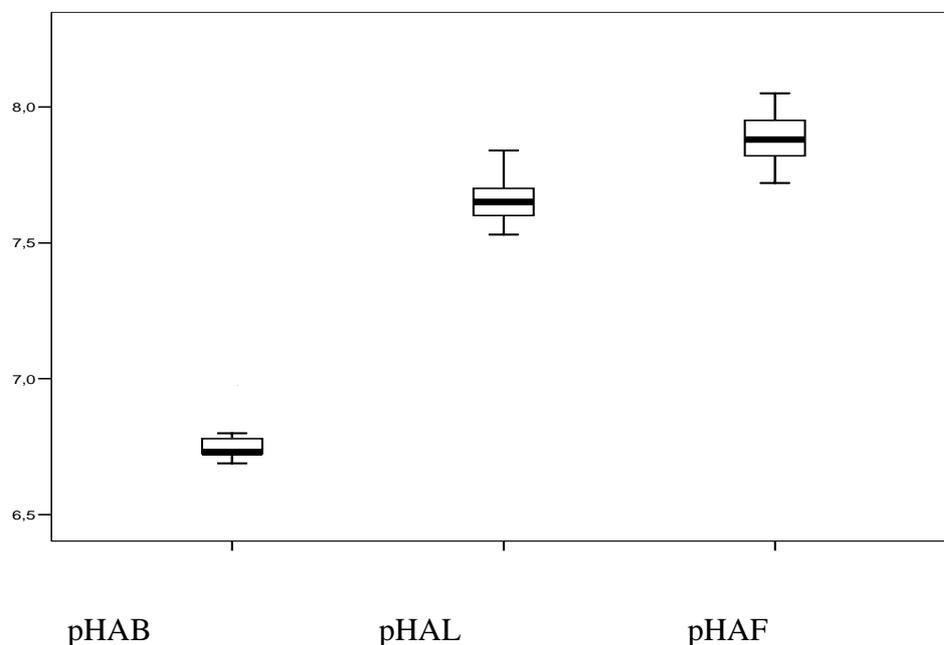


Gráfico 2 - Box-Plot do pH da AB, AL e AF para Tx – 180m³/m²xdia

Observando-se os valores de pH da AB, verificou-se resultados entre 6,69 a 6,96 com valor médio 6,77 e desvio padrão de 0,08, respectivamente, sendo a variância de 0,01. Os valores obtidos apresentaram-se adequados à faixa ótima de oxidação de ferro no processo de aeração (pH 6 a 8), conforme apresentado no item 4.8.1.

Para o pH da AL os valores tiveram entre 7,53 a 7,84, média de 7,69 e variância de 0,01 e enquanto que o desvio padrão foi de 0,08, o que comprova uma baixa dispersão. Em relação ao pH da AF os valores apresentaram-se entre 7,72 a 8,24, média de 7,93, com desvio de 0,11 e variância de 0,01.

Observa-se que os valores para o pH da AF estão de acordo com legislação vigente da Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde que estabelece o pH da água na faixa de 6 a 9,5 para consumo humano.

- **Cor Aparente**

Na Tabela 2 é apresentada a estatística descritiva dos resultados obtidos no monitoramento do sistema de desferrização piloto.

Tabela 2 - Estatística descritiva dos resultados de Cor Aparente no Sistema de desferrização piloto para Tx – 180m³/m²xdia com leito de contato

AMOSTRAS	VARIÁVEL	
	Cor Aparente AF (uC)	
Número de amostras	44	
Média	12	
Mediana	12	
Desvio Padrão	10	
Variância	98	
Mínimo	0	
Máximo	32	
Quartis	25	2
	50	12
	75	19

Observa-se que para os valores para Cor aparente da AF, verificou-se resultados entre 0 a 32 uC, com valor médio de 12uC e desvio padrão de 10uC, respectivamente, enquanto que a variância foi de 98uC representando uma grande

variabilidade dos resultados. Observa-se ainda que o valor máximo ficou acima do VMP pela Portaria que é de 15uC, o que pode ser atribuído à qualidade da AB.

Os valores de cor aparente na AF apresentaram-se entre 12 a 13 uC, sendo estes valores, inferiores ao limite estabelecido pela Portaria 518/04 do Ministério da Saúde, o que é de 15uC.

No Gráfico 3 são apresentados os valores de cor aparente da AB, AL e AF, e a comparação dos resultados com os valores recomendados pela Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde.

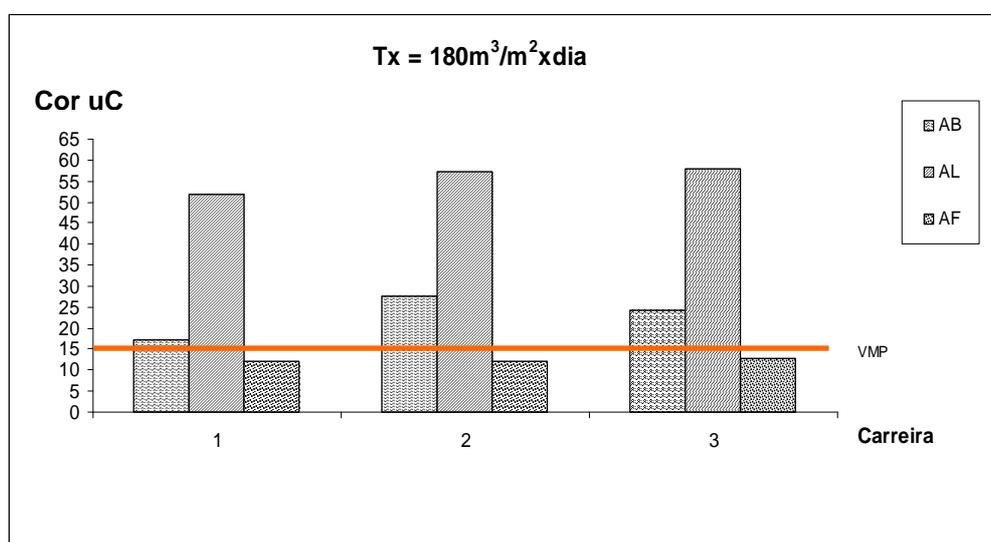


Gráfico 3 - Variação de cor aparente da AB, AL e AF em relação ao VMP na Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde para Tx - $180\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ com leito de contato

Para a AL, a variável cor aparente apresentou valores entre 52 a 58 uC, em relação a AB atribuído a oxidação do ferro no aerador e no leito de contato.

- **Turbidez**

Na Tabela 3 é apresentada a estatística descritiva dos resultados obtidos no monitoramento do sistema de desferrização piloto.

Tabela 3 - Estatística descritiva dos resultados de Turbidez no Sistema de desferrização piloto para Tx – 180m³/m²xdia com leito de contato

AMOSTRAS		VARIÁVEL
		Turbidez AF (uT)
Número de amostras		44
Média		0,59
Mediana		0,48
Desvio Padrão		0,48
Variância		0,23
Mínimo		0,00
Máximo		3,30
Quartis	25	0,40
	50	0,48
	75	0,65

Observando-se os valores de turbidez para AF, verificou-se valores entre 0 e 3,30 uT, com média de 0,59 uT, desvio padrão de 0,48 uT e variância de 0,23 uT.

Os valores de turbidez na AF apresentaram-se de acordo com a legislação vigente que estabelece o valor máximo permissível - VMP de 1 uT após filtração para o consumo humano, conforme Portaria 518/04 do Ministério da Saúde.

No Gráfico 4 pode-se verificar o comportamento da variável turbidez para AB, AL e AF do sistema piloto.

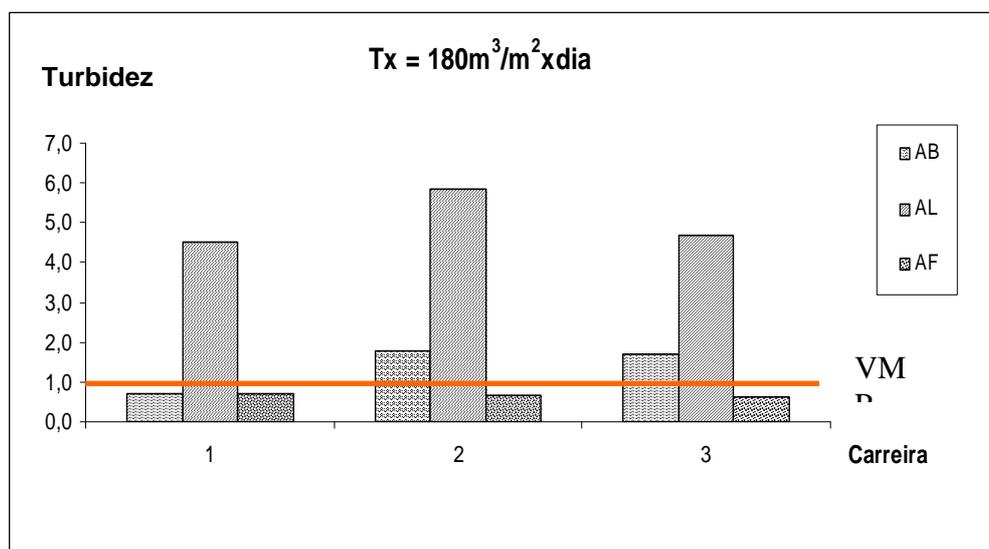


Gráfico 4 - Variação de turbidez da AB, AL e AF comparados com valores máximos permissíveis da Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde para Tx - 180m³/m²xdia com leito de contato

Valores de turbidez na AB apresentaram-se baixos em função da presença de ferro na forma solúvel

Nota-se também o aumento da turbidez na AL, em função da oxidação do ferro.

- **Ferro Total e Ferroso**

Na Tabela 4 - apresentada a estatística descritiva dos resultados obtidos no monitoramento do sistema de desferrização piloto.

Tabela 4 - Estatística descritiva dos resultados de FerroTotal e Ferroso no Sistema de desferrização piloto para Tx – 180m³/m²xdia com leito de contato

AMOSTRAS	VARIÁVEL		
	Ferro Total AF (mg/L)	Ferro Ferroso AF (mg/L)	
Número de amostras	44	44	
Média	0,14	3,9x10 ⁻²	
Mediana	0,12	3,0x10 ⁻²	
Desvio Padrão	8,5x10 ⁻²	2,9x10 ⁻²	
Variância	7,2x10 ⁻³	8,3x10 ⁻⁴	
Mínimo	0,04	0	
Máximo	0,50	0,12	
Quartis	25	9,0x10 ⁻²	2,0x10 ⁻²
	50	0,12	3,0x10 ⁻²
	75	0,15	5,0x10 ⁻²

No monitoramento da AF foi observado que o ferro total esteve entre 0,04 a 0,50 mg/L, com valor da média de 0,14 e desvio padrão e variância de 8,5x10⁻² e 7,2x10⁻², respectivamente. Nota-se que os valores ficaram abaixo ao limite estabelecidos na Portaria 518/2004.

O ferro ferroso nas amostras coletadas de AF variou entre 0 a 0,12mg/L, com valor médio e desvio padrão de 3,9 x 10⁻² mg/L e 2,9x10⁻², respectivamente e variância de 8,3x10⁻⁴.

O ferro total na AB apresentou valores entre 2,03 a 2,23 mg/L e o ferro ferroso, valores entre 2,03 a 2.20mg/L. Pode-se notar que a maior parcela encontra-se na forma solúvel devido a ausência de oxigênio na água subterrânea.

Os valores de ferro total da AL variaram de 0,33 a 0,68mg/L. Enquanto que para o ferro ferroso para AL, pode-se inferir valores entre 0,07 a 0,11mg/L. Pode-se perceber que a maior parcela de ferro já se encontra na forma insolúvel, além de se verificar já uma expressiva remoção de ferro nesta unidade.

Pode-se observar que os valores de ferro total para AF foram adequados ao consumo humano, de 0,13 a 0,16 mg/L, ou seja, inferiores ao limite estabelecido pela Portaria nº 518/2004 do Ministério da Saúde, que é de 0,3mg/L.

No Gráfico 5 são mostrados os valores de ferro total da AB, AL e AF para carreiras de filtração com leito de contato com taxa de $180\text{m}^3/\text{m}^2 \times \text{dia}$.

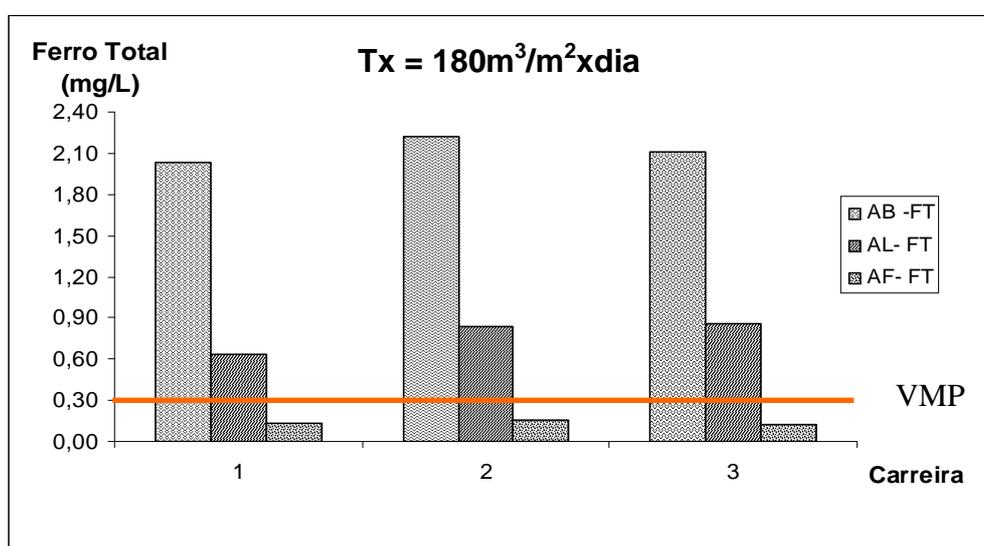


Gráfico 5 - Variação da concentração do ferro total da AB, AL e AF comparados com valores máximos permissíveis da Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde para Tx - $180\text{m}^3/\text{m}^2 \times \text{dia}$ com leito de contato.

No Gráfico 6 são mostrados os valores de ferro ferroso da AB, AL e AF para carreiras de filtração com leito de contato com taxa de $180\text{m}^3/\text{m}^2 \times \text{dia}$.

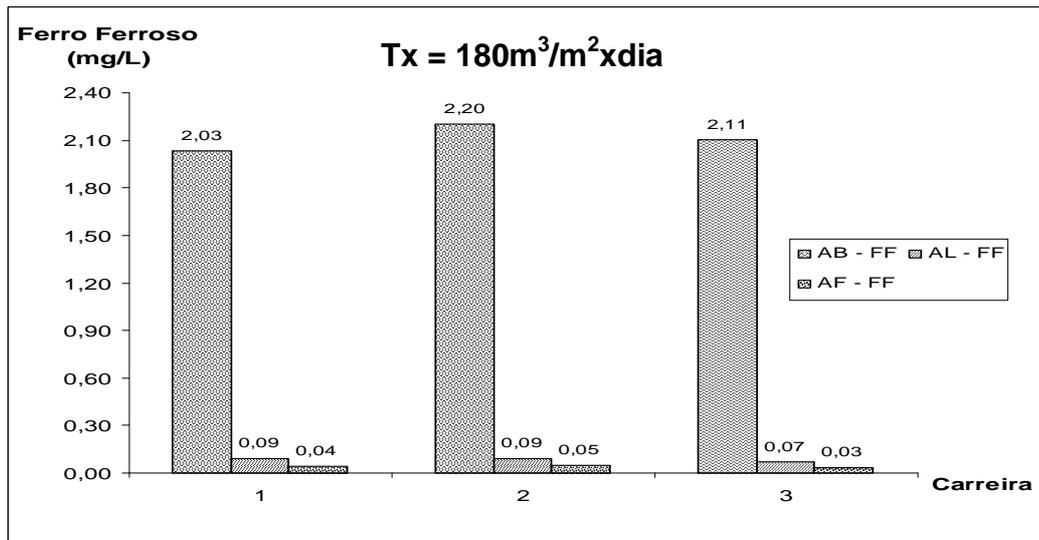


Gráfico 6 - Variação da concentração do ferro ferroso da AB, AL e AF para Tx – 180m³/m²xdia com leito de contato

- **Eficiência da remoção do ferro**

Os valores de eficiência de remoção do ferro total para taxa de filtração de 180m³/m²xdia na ETA piloto para AL e AF, concentraram-se em duas faixas: 59% a 69% e 93% a 94%, respectivamente.

Portanto verificou-se uma boa eficiência do filtro rápido descendente com leito de contato na remoção de ferro para taxa de operação de 180m³/m²xdia.

No Gráfico 7, verifica-se o comportamento da eficiência de remoção de ferro AL e AF.

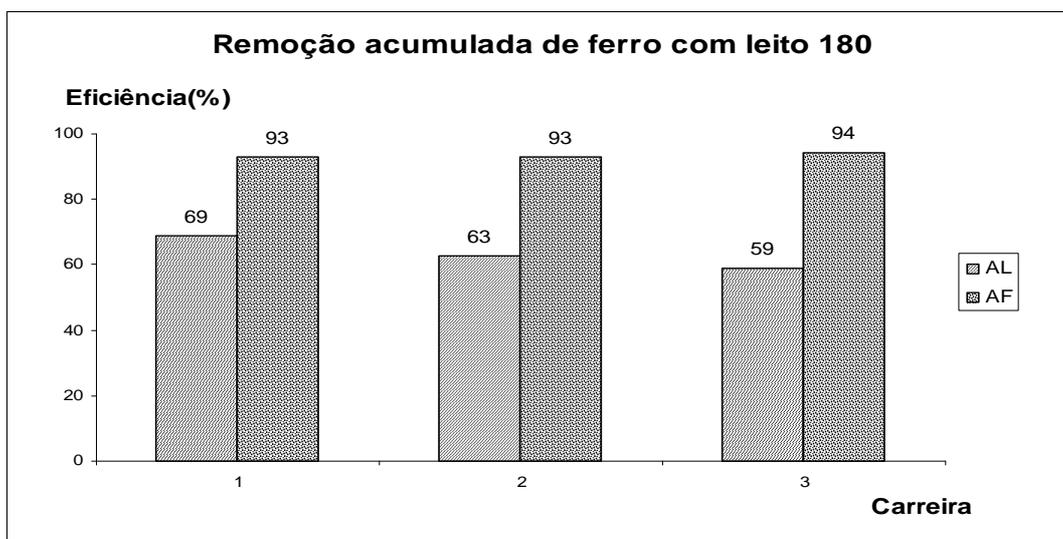


Gráfico 7 - Variação da eficiência em relação a concentração do ferro total da AB e AF para Tx – 180m³/m²xdia com leito de contato

O leito de contato foi responsável por cerca de 59 a 69% da remoção de ferro, restando um percentual 31 a 41% para remoção no filtro rápido, o que certamente contribui para o melhor desempenho da unidade.

- **Carreira de Filtração**

Durante as três carreiras de filtração, os resultados demonstraram o encerramento da mesma por perda por carga, quando ocorria extravasamento do filtro, conforme a Fotografia 32.



Fotografia 32 - Extravasor do Filtro Rápido Descendente

As carreiras de filtração tiveram duração de 48h (Figura 24b), 27h (Figura 24d) e 48h (Figura 24f) e média de 41 h. Nota-se ainda o aumento médio de 37% para a perda de carga, conforme a Figura 24 durante o monitoramento do sistema da ETA piloto, representados pela diferença na leitura dos piezômetros P7 e P1, conforme item 5.2.2.

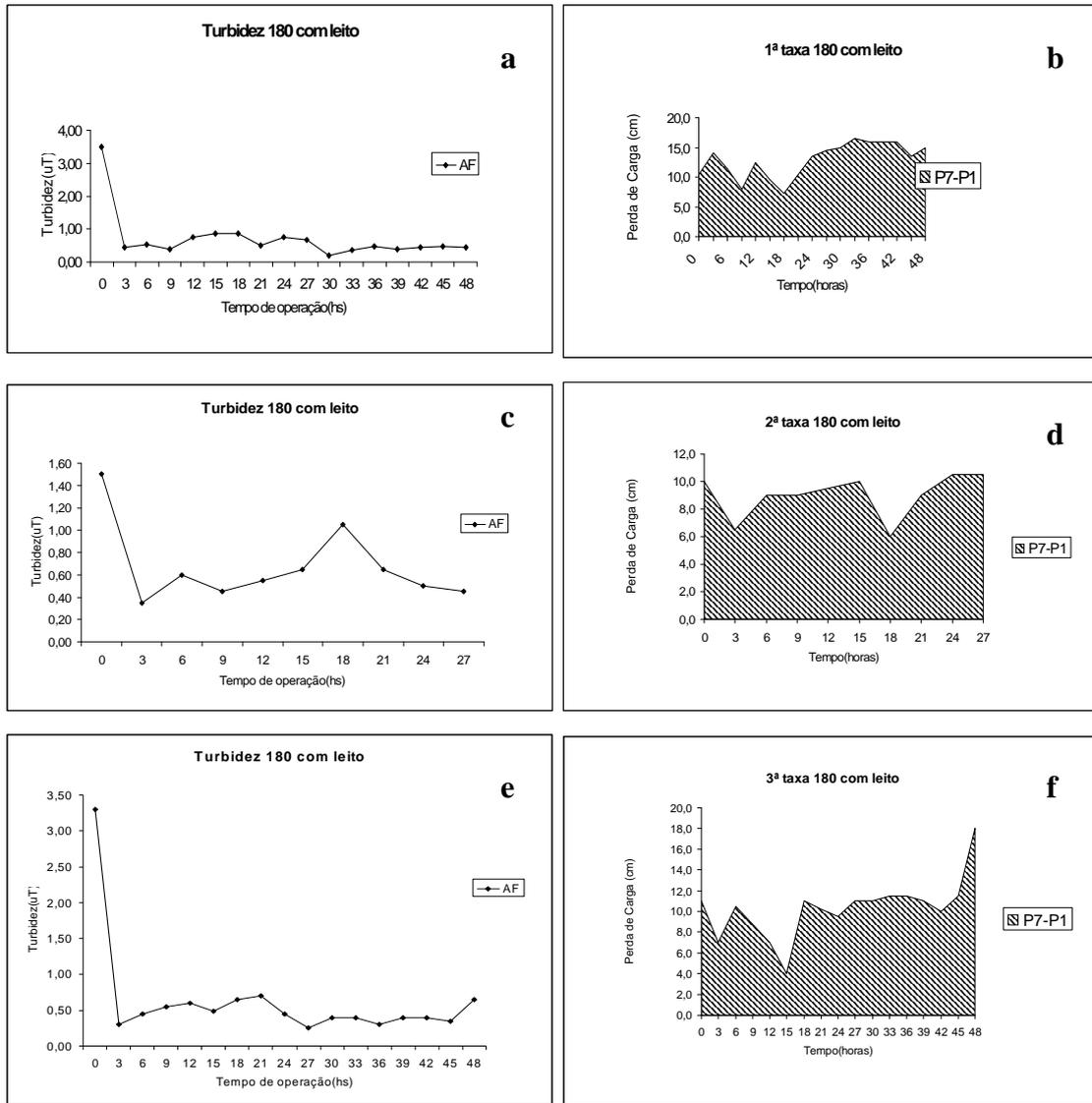


Figura 24 - Variação da concentração da turbidez da AF e distribuição da perda de carga em função do tempo de operação para Tx – 180m³/m²xdia com leito de contato

Observou-se remoção acentuada do ferro no topo do meio filtrante, características da filtração rápida descendente por ação superficial. Pode-se deduzir que a ação física de cor foi o mecanismo de filtração dominante, embora outros fenômenos pudessem ter influenciado na retenção das impurezas no meio filtrante.

- TAXA DE 180 m³/m²xdia SEM O LEITO DE CONTATO

- **pH**

Na Tabela 5 é apresentada a estatística descritiva dos resultados obtidos no monitoramento do sistema de desferrização piloto.

Tabela 5 - Estatística descritiva dos resultados de pH no Sistema de desferrização piloto para Tx - 180m³/m²xdia sem o leito de contato

AMOSTRAS	VARIÁVEL		
	pHAB	pHAF	
N	14	27	
Media	6,79	7,92	
Mediana	6,75	7,90	
Desvio padrão	0,08	0,09	
Variância	0,01	0,01	
Mínimo	6,70	7,81	
Máximo	6,92	8,20	
Quartis	25	6,73	7,86
	50	6,75	7,90
	75	6,88	7,95

No Gráfico 8 são representados os valores mínimos e máximos, os quartis 25 e 75% e a mediana do pH da AB e AF.

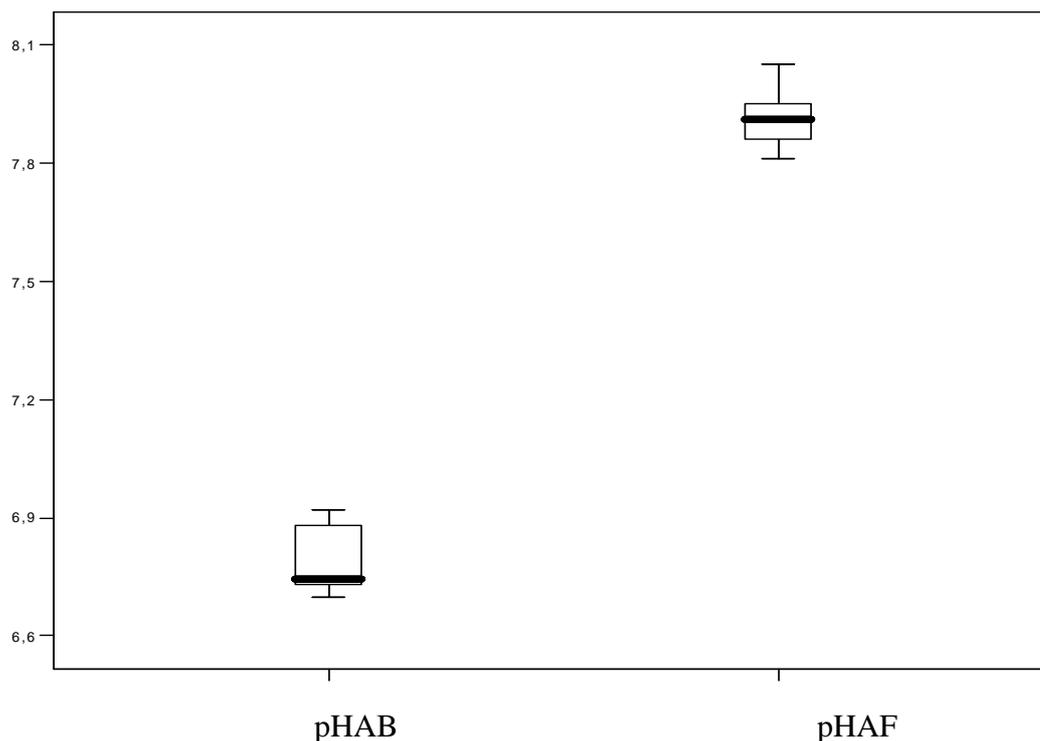


Gráfico 8 - Box-Plot do pH da AB e AF para Tx – 180m³/m²xdia sem o leito de contato

Os valores de pH da AB, apresentaram-se resultados entre 6,70 a 6,92 com valor médio 6,79 com desvio padrão de 0,08, respectivamente, tendo o valor de variância de 0,01.

Para o pH da AF apresentaram-se valores entre de 7,81 a 8,20. Em média o pH da AF foi de 7,92 com um desvio padrão de 0,09.

Mais uma vez os valores para o pH da AF atenderam a Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde na faixa de 6 a 9,5.

- **Cor Aparente**

Na Tabela 6 é apresentada a estatística descritiva dos resultados obtidos no monitoramento do sistema de desferrização piloto.

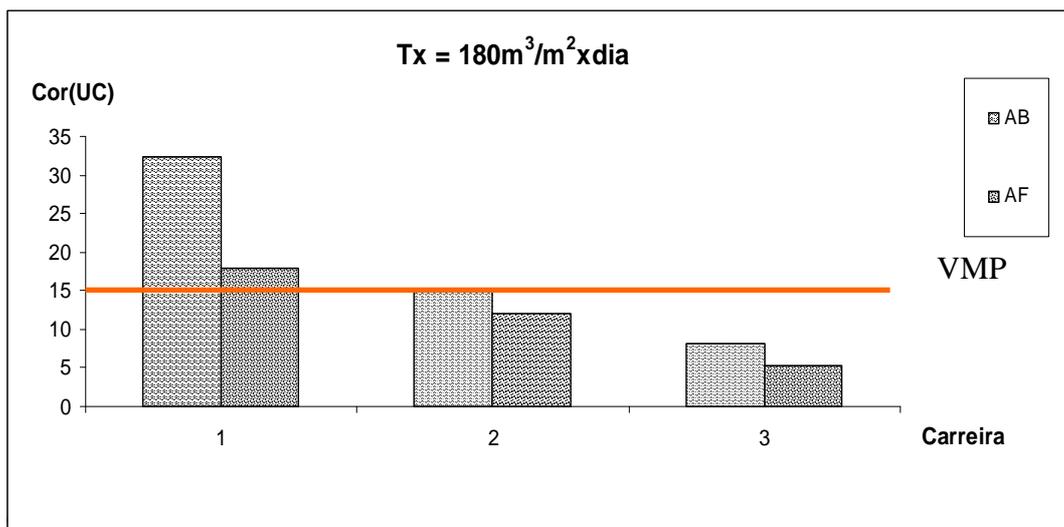
Tabela 6 - Estatística descritiva dos resultados de Cor Aparente no Sistema de desferrização piloto para Tx - 180m³/m²xdia sem o leito de contato

AMOSTRAS		VARIÁVEL
		Cor AF (uC)
Número de amostras		27
Média		11
Mediana		9
Desvio Padrão		10
Variância		105
Mínimo		0
Máximo		31
Quartis	25	0
	50	9
	75	17

Os valores para Cor aparente da AF, apresentaram-se entre 0 a 31 uC, com valor médio de 11 uC e desvio padrão de 10 uC, respectivamente, enquanto que a variância foi de 105 uC representando uma grande variabilidade dos resultados. Observa-se ainda que o valor máximo ficou acima do VMP pela Portaria que é de 15uC, o que pode ser atribuído à qualidade da AB.

Os valores de cor aparente na AF variaram na faixa de 5 a 18 uC, podendo-se verificar nas carreiras de filtração 1 e 2 aumento em média de 20% em relação ao VMP que é de 15 uC.

No Gráfico 9, são apresentados os valores de cor aparente da AB e AF e a comparação dos resultados com os valores recomendados pela Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde.



em valores máximos permissíveis da Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde para Tx- 180m³/m²xdia sem o leito de contato

- **Turbidez**

Na

Tabela 7 é apresentada a estatística descritiva dos resultados obtidos no monitoramento do sistema de desferrização piloto.

Tabela 7- Estatística descritiva dos resultados de Turbidez no Sistema de desferrização piloto para Tx - 180m³/m²xdia sem o leito de contato

AMOSTRAS		VARIÁVEL
		Turbidez AF (uT)
Número de amostras		27
Média		0,95
Mediana		0,67
Desvio Padrão		0,86
Variância		0,75
Mínimo		0,43
Máximo		4,05
Quartis	25	0,56
	50	0,67
	75	0,90

Os valores de turbidez para AF, verificaram valores entre 0,43 e 4,05uT, com média de 0,95uT, desvio padrão de 0,86uT e variância de 0,75uT.

No Gráfico 10 pode-se verificar o comportamento da variável turbidez para AB e AF do sistema piloto durante as três carreiras, que atenderam o VMP de 1uT.

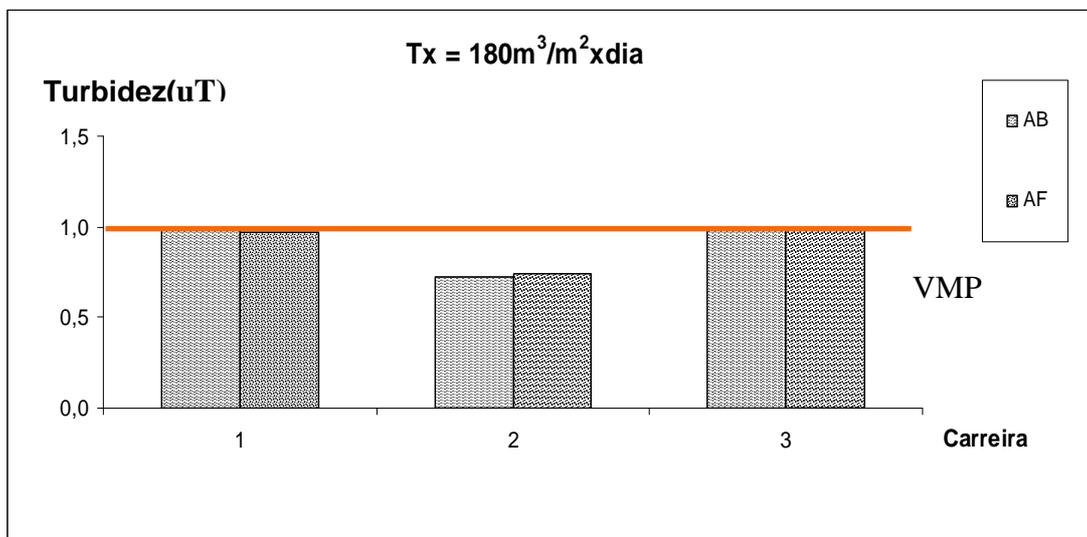


Gráfico 10 - Variação de turbidez da água bruta e água após filtração comparados com valores máximos permitíveis da Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde para Tx- 180m³/m²xdia sem o leito de contato

- **Ferro Total e Ferroso**

Na Tabela 8 é apresentada a estatística descritiva dos resultados obtidos no monitoramento do sistema de desferrização piloto.

Tabela 8 - Estatística descritiva dos resultados de Ferro Total e Ferroso no Sistema de desferrização piloto para Tx - 180m³/m²xdia sem o leito de contato

AMOSTRAS	VARIÁVEL	
	Ferro Total AF (mg/L)	Ferro Ferroso AF (mg/L)
Número de amostras	27	27
Média	0,15	2,9x10 ⁻²
Mediana	1,3x10 ⁻¹	2,0x10 ⁻²
Desvio Padrão	0,12	3,0x10 ⁻²
Variância	1,4x10 ⁻²	8,8x10 ⁻⁴
Mínimo	0,05	0,00
Máximo	0,63	0,10
Quartis	25	9,0x10 ⁻²
	50	0,13
	75	0,15

No monitoramento da AF foi observado que o ferro total esteve entre 0,63 a 0,05 mg/L, com valor da médiodo 0,15 e desvio padrão e variância de 0,12 e 1,4x10⁻², respectivamente. Nota-se que os valores ficaram abaixo do limite estabelecido pela Portaria 518/2004.

O ferro ferroso nas amostras coletadas de AF variou entre 0 a 0,10mg/L, com valor médio e desvio padrão de 2,9 x 10⁻² mg/L e 3,0x10⁻², respectivamente e variância de 8,8x10⁻⁴.

Os valores de ferro total para AB apresentaram-se entre 1,66 a 2,33mg/L, e para ferro ferroso, entre 1,62 a 2,33 mg/L.

Nota-se que os valores de ferro total para AF foram adequados ao consumo humano, ou seja, inferiores a 0,3 mg/L.

No Gráfico 11 são mostrados os valores de ferro total para AB e AF com taxa de 180m³/m²xdia sem leito.

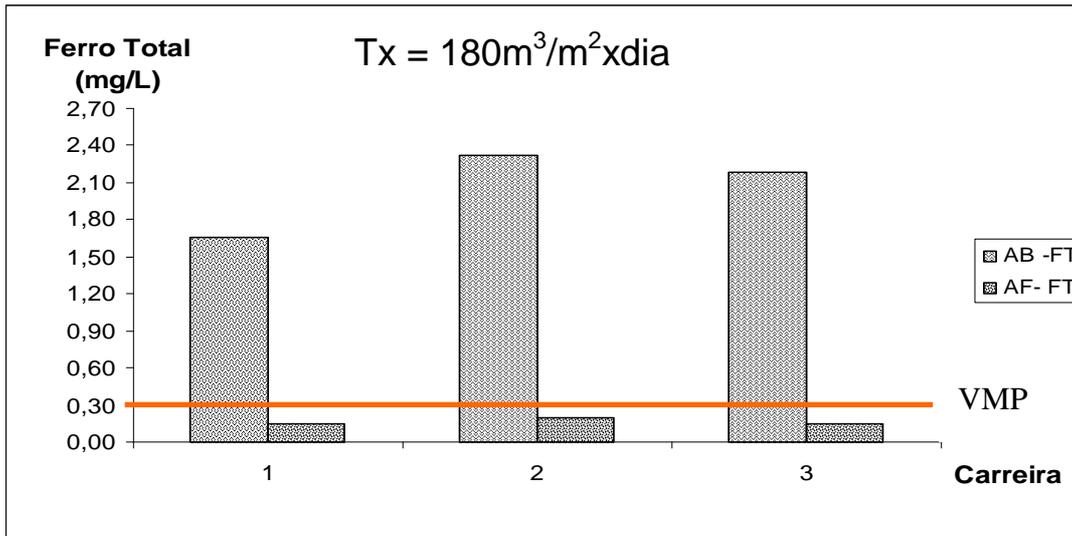


Gráfico 11 – Variação da concentração do ferro total da água bruta e água filtrada comparados com valores máximos permitíveis da Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde para Tx-180m³/m²xdia sem o leito de contato

No Gráfico 12 são mostrados os valores de ferro ferroso para AB e AF com taxa de 180m³/m²xdia sem o leito.

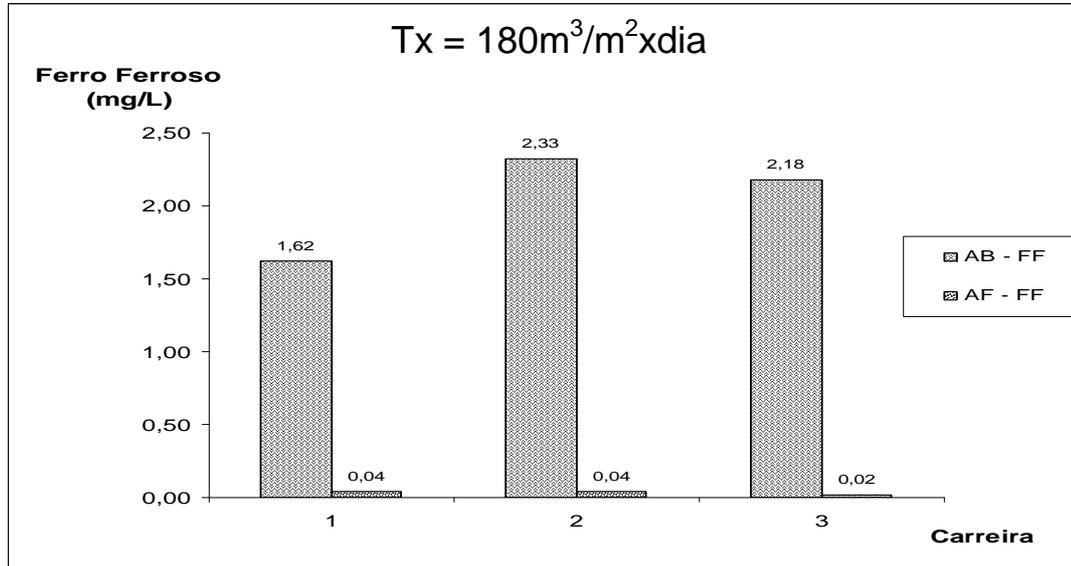


Gráfico 12 - Variação da concentração do ferro ferroso da AB e AF para Tx – 180m³/m²xdia sem leito de contato

- **Eficiência da remoção do ferro**

A eficiência de remoção do ferro total no filtro, sem a utilização de leito de contato, foi de 91 a 93%, significando boa eficiência do filtro rápido descendente para taxa de operação de $180\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ sem o leito.

No Gráfico 13 verifica-se o comportamento da eficiência de remoção de ferro para AF.

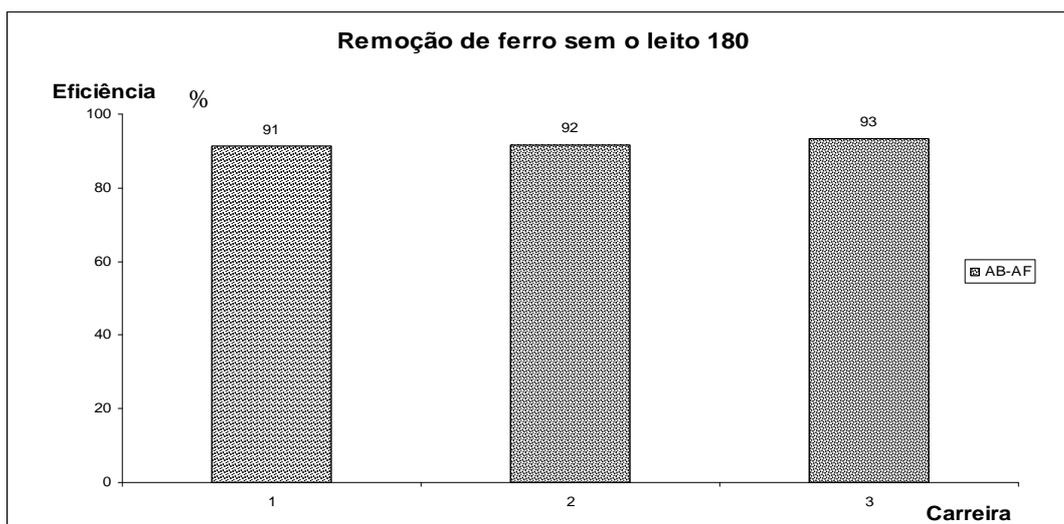
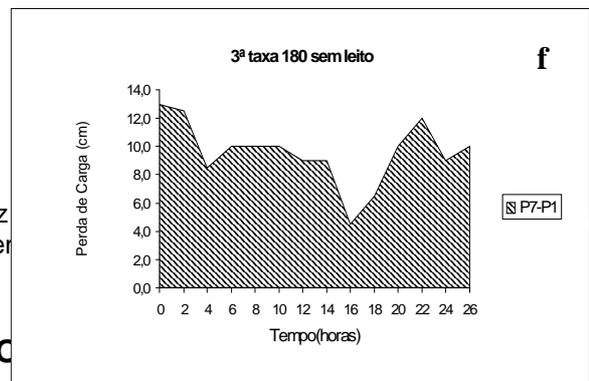
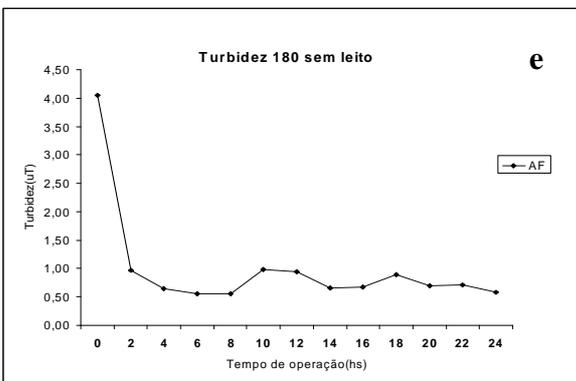
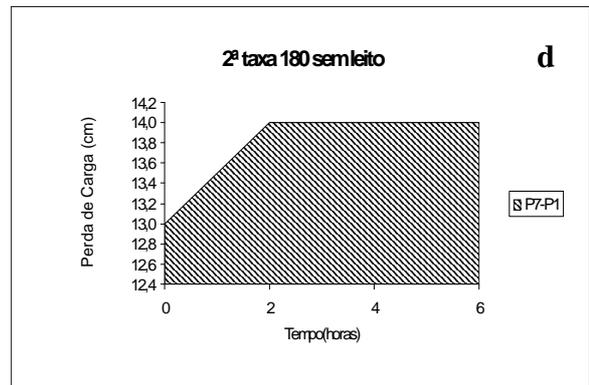
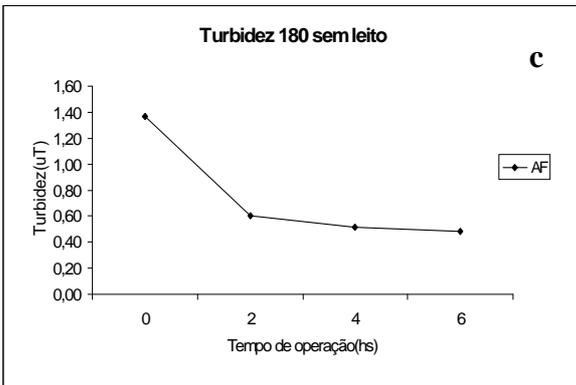
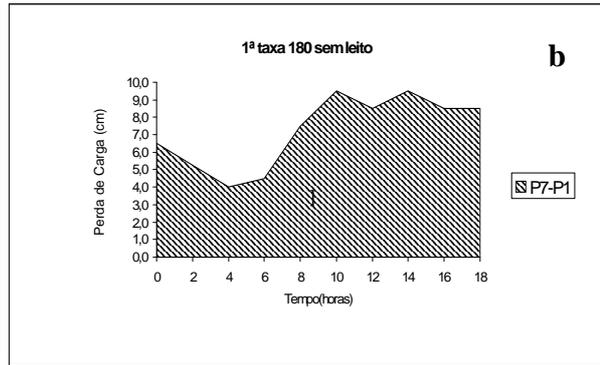
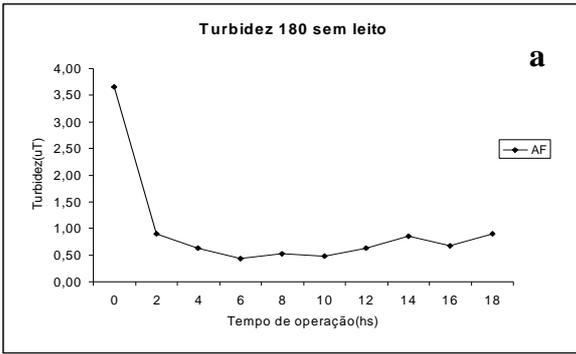


Gráfico 13 - Variação da eficiência em relação a concentração do ferro total da AF para Tx – $180\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ sem leito de contato

- **Carreira de Filtração**

Dos resultados obtidos durante as carreiras de filtração, verificou-se que o encerramento das mesmas ocorreu por perda de carga, com turbidez do efluente inferiores ao limite de 1uT , no entanto, nesta fase, as carreiras de filtração tiveram menor duração de 18h (Figura 25b), 6h (Figura 25d) e 26h (Figura 25f) com média de 16,7 horas. Pode-se ainda observar um aumento médio de 20% para a perda de carga na Figura 25 são apresentados os resultados obtidos nas análises experimentais de turbidez e distribuição de perda de carga.



• pH

Na Tabela 9 é apresentada a estatística descritiva dos resultados obtidos no monitoramento do sistema de desferrização piloto.

Tabela 9 – Estatística descritiva dos resultados de pH no Sistema de desferrização piloto para Tx - 270m³/m²xdia com leito de contato

AMOSTRAS		VARIÁVEL		
		pHAB	pHAL	pHAF
Número de amostras		20	40	40
Media		6,80	7,57	7,85
Mediana		6,78	7,61	7,85
Desvio padrão		0,11	0,26	0,11
Variância		0,01	0,07	0,01
Mínimo		6,60	6,30	7,69
Máximo		7,70	7,80	8,17
Quartis	25	6,72	7,56	7,78
	50	6,78	7,61	7,85
	75	6,90	7,67	7,88

No Gráfico 14 são representados os valores mínimos e máximos, os percentis 25% e 75% e a mediana do pH da AB, AL e AF.

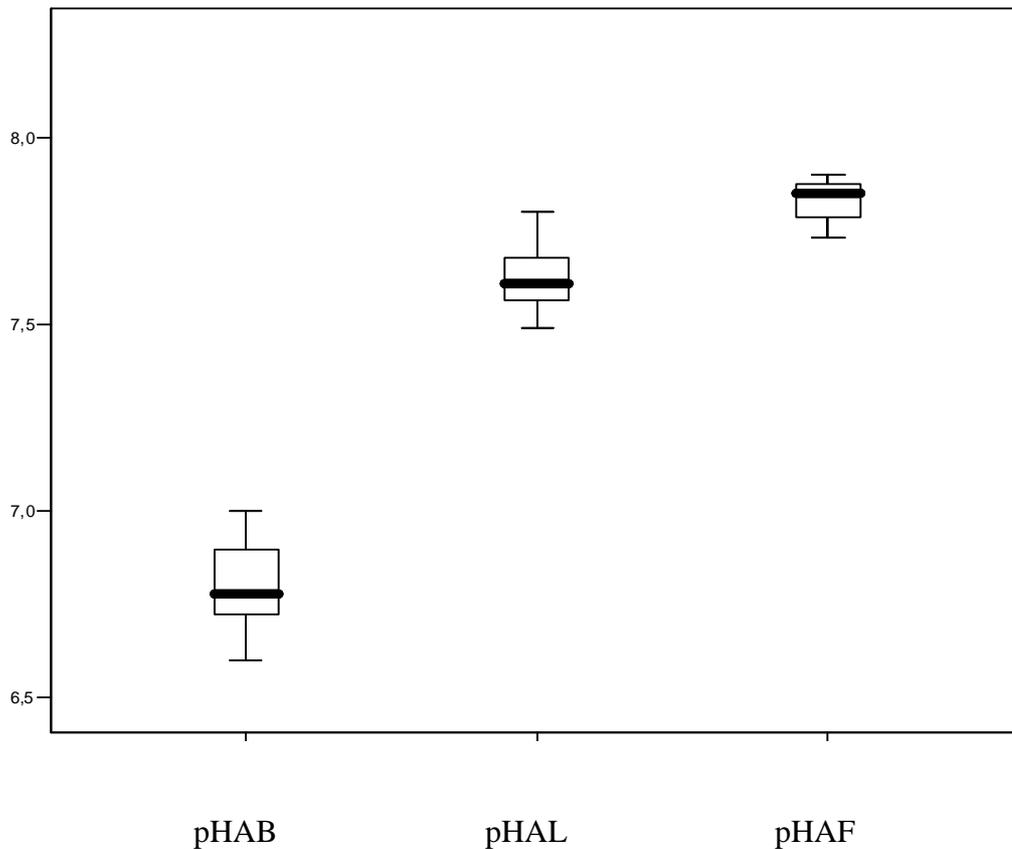


Gráfico 14 - Box-Plot do pH da AB , AL e AF Tx - 270m³/m²xdia com leito de contato

Analisando-se os valores de pH da AB, verificou-se resultados entre 6,60 a 7,70, com valor médio 6,80 e desvio padrão de 0,11, respectivamente, sendo a variância de 0,01. Para o pH da AL pode-se inferir valores entre 6,30 a 7,80, média de 7,57, e variância de 0,07 e desvio padrão de 0,26. Em relação ao pH da AF os valores apresentaram-se entre 7,69 a 8,17, com desvio de 0,11 e variância de 0,01, representando baixa variabilidade e menor dispersão dos resultados.

- **Cor Aparente**

Na Tabela 10 - é apresentada a estatística descritiva dos resultados obtidos no monitoramento do sistema de desferrização piloto.

Tabela 10 - Estatística descritiva dos resultados de Cor Aparente no Sistema de desferrização piloto para Tx - 270m³/m²xdia com leito de contato

AMOSTRAS		VARIÁVEL
		Cor AF (uC)
Número de amostras		40
Média		25
Mediana		22
Desvio Padrão		15
Variância		233
Mínimo		3
Máximo		66
Quartis	25	13
	50	22
	75	35

Os valores para Cor aparente da AF, apresentaram-se entre 0 a 66 uC, com valor médio de 25uC e desvio padrão de 15uC, respectivamente, enquanto que a variância foi de 233uC representando uma grande variabilidade dos resultados. Observa-se ainda que o valor máximo ficou acima do VMP pela Portaria que é de 15uC, o que pode ser atribuído à qualidade da AB.

Os valores encontrados da AF variaram entre 19 a 35 uC, tendo aumento em média de 87%, superiores ao limite estabelecido pela a Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde, sendo estes valores atribuído a qualidade da AB.

No Gráfico 15 são apresentados os valores de cor aparente da AB, AL e AF a comparação dos resultados com os valores recomendados pela Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde.

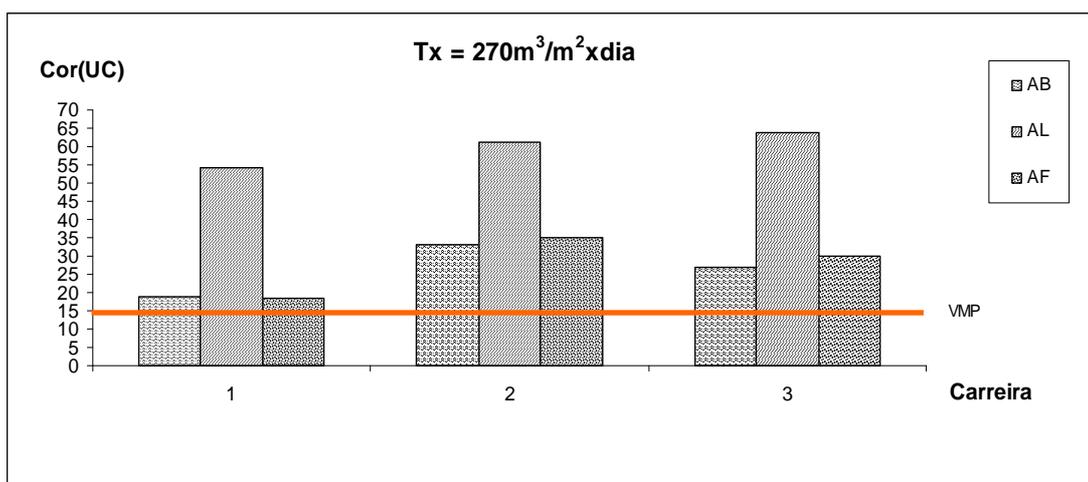


Gráfico 15 - Variação de cor aparente da AB, AL e AF em relação ao VMP na Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde para Tx - $270\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ com leito de contato

Para a AL, a variável cor aparente apresentou valores entre 54 a 64 mg Pt-Co/L.

- **Turbidez**

Na Tabela 11 - é apresentada a estatística descritiva dos resultados obtidos no monitoramento do sistema de desferrização piloto.

Tabela 11 - Estatística descritiva dos resultados de Turbidez no Sistema de desferrização piloto para Tx - $270\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ com leito de contato

AMOSTRAS	VARIÁVEL	
	Turbidez AF (uT)	
Número de amostras	40	
Média	0,74	
Mediana	0,55	
Desvio Padrão	0,82	
Variância	0,67	
Mínimo	0,00	
Máximo	5,30	
Quartis	25	0,45
	50	0,55
	75	0,75

Analisando-se os valores de turbidez para AF, verificou-se valores entre 0 e 5,30uT, com média de 0,74uT, desvio padrão de 0,82uT e variância de 0,67uT.

No Gráfico 16 pode-se verificar o comportamento da variável turbidez para AB, AL e AF do sistema piloto a comparação dos resultados com os valores recomendados pela Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde.

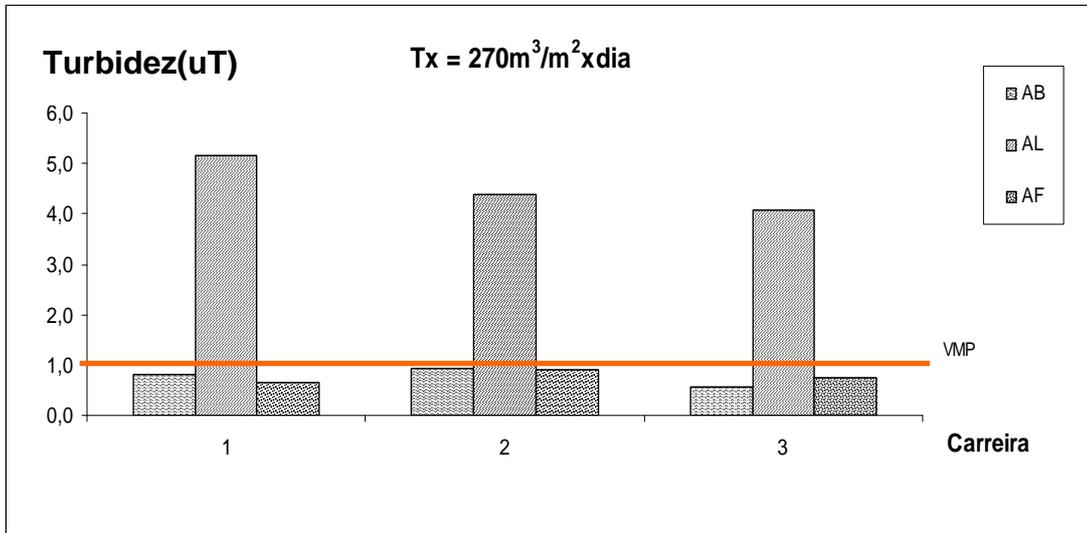


Gráfico 16 - Variação de turbidez da AB, AL e AF comparados com valores máximos permissíveis da Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde para $T_x = 270\text{m}^3/\text{m}^2\text{x dia}$ com leito de contato.

- **Ferro Total e Ferroso**

Na Tabela 12 é apresentada a estatística descritiva dos resultados obtidos no monitoramento do sistema de desferrização piloto.

Tabela 12 - Estatística descritiva dos resultados de Ferro Total e Ferroso no Sistema de desferrização piloto para Tx - 270m³/m²xdia com leito de contato

AMOSTRAS		VARIÁVEL	
		Ferro Total AF (mg/L)	Ferro Ferroso AF (mg/L)
Número de amostras		40	40
Média		2,8x10 ⁻²	0,16
Mediana		2,0x10 ⁻²	0,12
Desvio Padrão		2,7x10 ⁻²	0,15
Variância		7,4x10 ⁻⁴	2,3x10 ⁻²
Mínimo		0	0,07
Máximo		0,12	1,05
Quartis	25	0	0,11
	50	2,0x10 ⁻²	0,12
	75	4,0x10 ⁻²	0,16

Para a AF foi observado que o ferro total esteve entre 0,04 a 0,50 mg/L, com valor médio de 0,14 e desvio padrão e variância de 8,5x10⁻² e 7,2x10⁻²mg/L, respectivamente. Nota-se que os valores ficaram abaixo do limite estabelecido pela portaria 518/2004.

Os valores de ferro ferroso nas amostras coletadas de AF variou entre 0 a 0,12mg/L, com valor médio e desvio padrão de 2,8 x 10⁻² mg/L e 2,7x10⁻²mg/L, respectivamente e variância de 7,4x10⁻⁴mg/L.

O ferro total na AB apresentou valores entre 1,45 a 2,30 mg/L e para o ferro ferroso os valores apresentaram-se entre 1,42 a 2,30mg/L.

Os valores de ferro total da AL variaram de 0,62 a 0,80mg/L e valores de ferro ferroso apresentaram-se entre 0,08 a 0,09mg/L.

No Gráfico 17 são mostrados os valores de ferro total da AB, AL e AF para carreiras de filtração com taxa de 270m³/m²xdia com leito de contato, adequados quando comparados aos valores da legislação que estabelece VMP para o consumo humano.

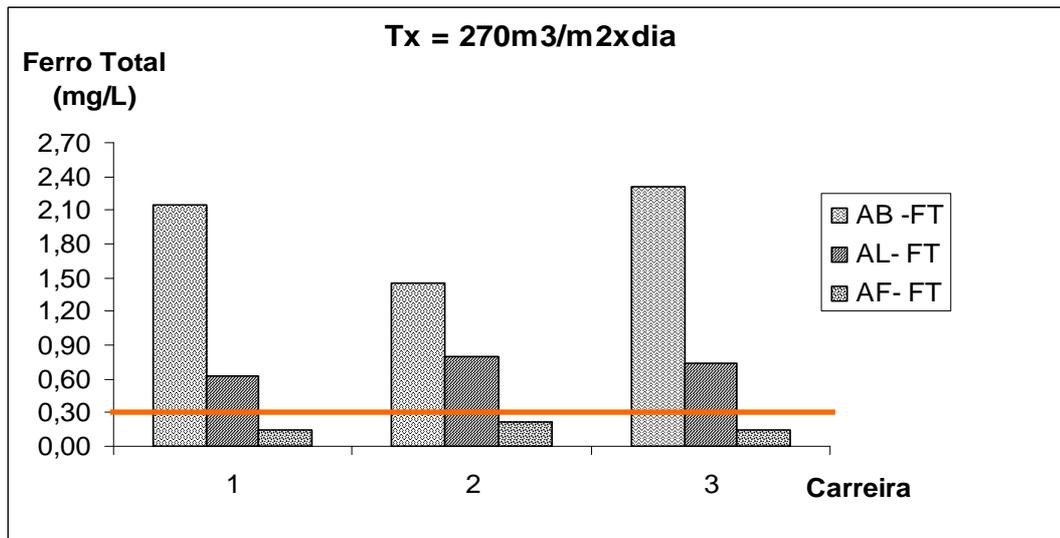


Gráfico 17 - Variação da concentração do ferro total da AB, AL e AF comparados com valores máximos permissíveis da Portaria nº 518/04 Ministério da Saúde para Tx - 270m³/m²xdia com leito de contato.

No Gráfico 18 são mostrados os valores de ferro ferroso da AB, AL e AF para carreiras de filtração com taxa de 270m³/m² x dia com leito de contato.

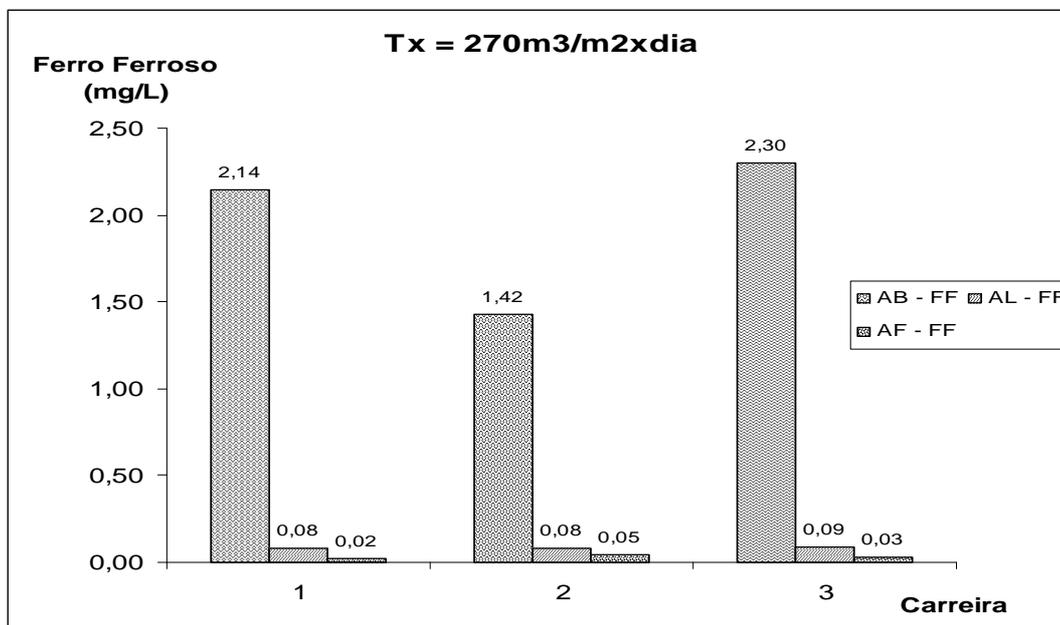


Gráfico 18 - Variação da concentração do ferro ferroso da AB, AL e AF para Tx – 270m³/m²xdia com leito de contato.

- **Eficiência da remoção do ferro**

Os valores de eficiência de remoção do ferro total na ETA piloto para AL e AF, concentraram-se em duas faixas: 45% a 71% e 85% a 94%, respectivamente.

No Gráfico 19 verifica-se o comportamento da eficiência de remoção de ferro AL e AF.

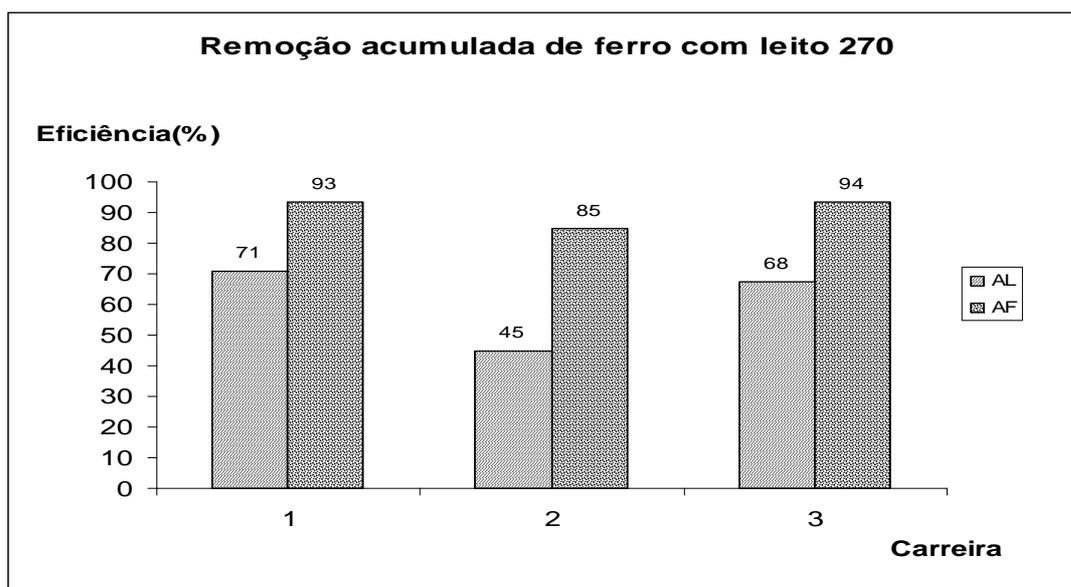


Gráfico 19 - Variação da eficiência em relação a concentração do ferro total da AB e AF para Tx – 270m³/m²xdia com leito de contato

- **Carreira de Filtração**

Os valores obtidos na fase experimental durante as carreiras de filtração, observou-se o encerramento da mesma por perda de carga, ou seja, após o nível de água ter atingido o extravasamento do filtro.

As carreiras de filtração tiveram duração de 42h (Figura 26b), 27h (Figura 26d) e 21h (Figura 26f) e média de 30 h. Pode-se ainda observar um aumento médio de 350% para perda de carga conforme a Figura 26 são apresentados os resultados obtidos nas análises experimentais de turbidez e distribuição de perda de carga.

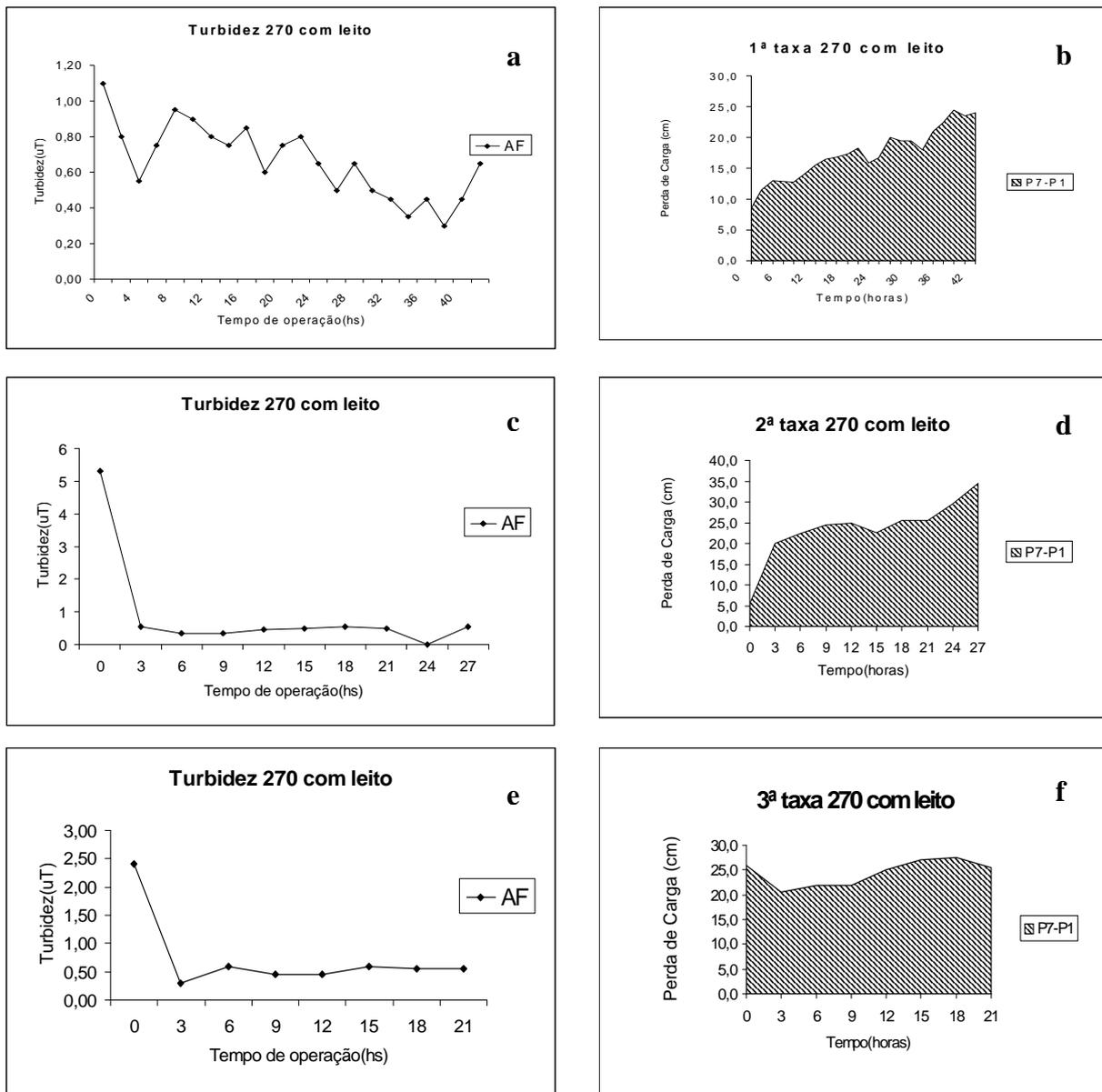


Figura 26 - Variação da concentração da turbidez da AF e distribuição da perda de carga em função do tempo de operação para Tx – 270m³/m²xdia com leito de contato

-TAXA DE 270 m³/m²xdia SEM O LEITO DE CONTATO

- pH

Na Tabela 13 é apresentada a estatística descritiva dos resultados obtidos no monitoramento do sistema de desferização piloto.

Tabela 13 - Estatística descritiva dos resultados de pH no Sistema de desferrização piloto para Tx - 270m³/m²xdia sem o leito de contato

AMOSTRAS		pHAB	pHAF
N		11	20
Media		6,76	7,85
Mediana		6,75	7,85
Desvio padrão		0,06	0,14
Variância		0,00	0,02
Mínimo		6,68	7,65
Máximo		6,90	8,23
Quartis	25	6,73	7,75
	50	6,75	7,85
	75	6,76	7,93

No Gráfico 20 são representados os valores mínimos e máximos, os quartis 25 e 75% e a mediana do pH da AB e AF.

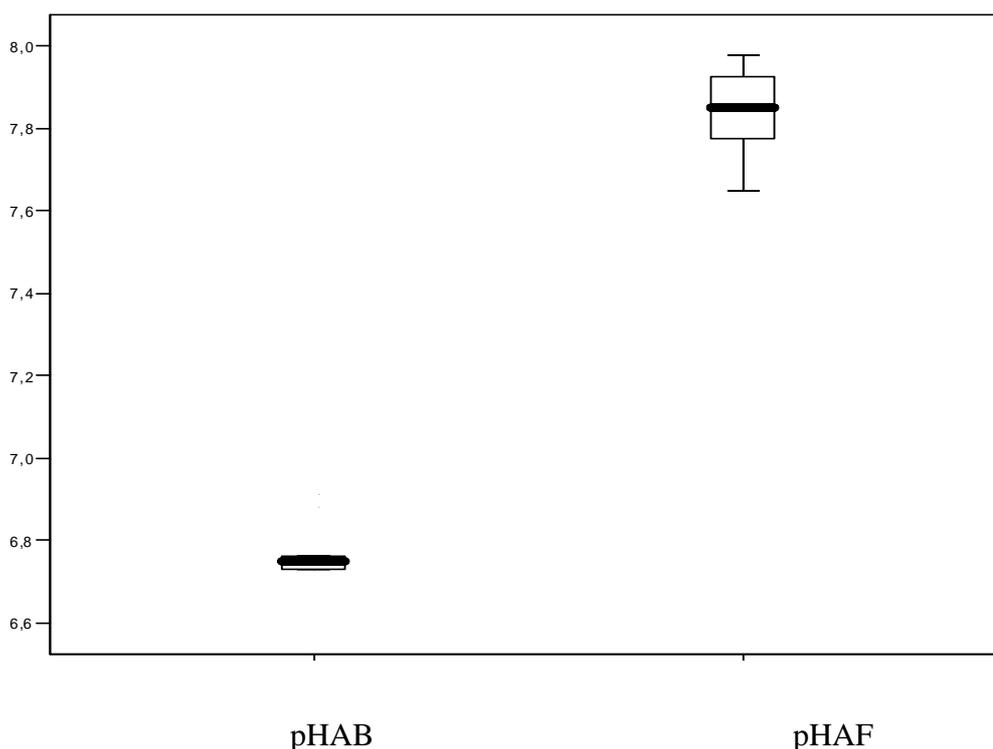


Gráfico 20 - Box-Plot do pH da AB, AL e AF para Tx – 270m³/m²xdia sem o leito de contato

Observando os valores de pH da AB, verificou-se resultados entre 6,68 a 6,90 com valor médio 6,76 e desvio padrão de 0,06, respectivamente.

Para o pH da AF apresentaram-se valores entre de 7,65 a 8,23. Em média o pH da AF foi de 7,85 com um desvio de 0,14 e enquanto que a variância foi de 0,02.

- **Cor Aparente**

Na Tabela 14 é apresentada a estatística descritiva dos resultados obtidos no monitoramento do sistema de desferrização piloto.

Tabela 14 - Estatística descritiva dos resultados de Cor Aparente no Sistema de desferrização piloto para Tx - 270m³/m²xdia sem o leito de contato

AMOSTRAS		VARIÁVEL
		Cor Aparente AF (uC)
N		20
Média		16
Mediana		18
Desvio Padrão		12
Variância		155
Mínimo		0
Máximo		43
Quartis	25	5
	50	18
	75	26

Os valores para Cor aparente da AF, apresentaram-se entre 0 a 31 uC, com valor médio de 11uC e desvio padrão de 10uC, respectivamente, enquanto que a variância foi de 105uC representando uma grande variabilidade dos resultados. Observa-se ainda que o valor máximo ficou acima do VMP pela Portaria que é de 15uC, o que pode ser atribuído à qualidade da AB.

Os valores dos resultados da AF ficaram na faixa de 11 a 23mg Pt - Co/L, tendo esses valores um aumento em média de 53%, superiores ao limite estabelecidos ao VMP da portaria.

No Gráfico 21 são apresentados os valores de cor aparente da AB e AF e a comparação dos resultados com os valores recomendados pela Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde.

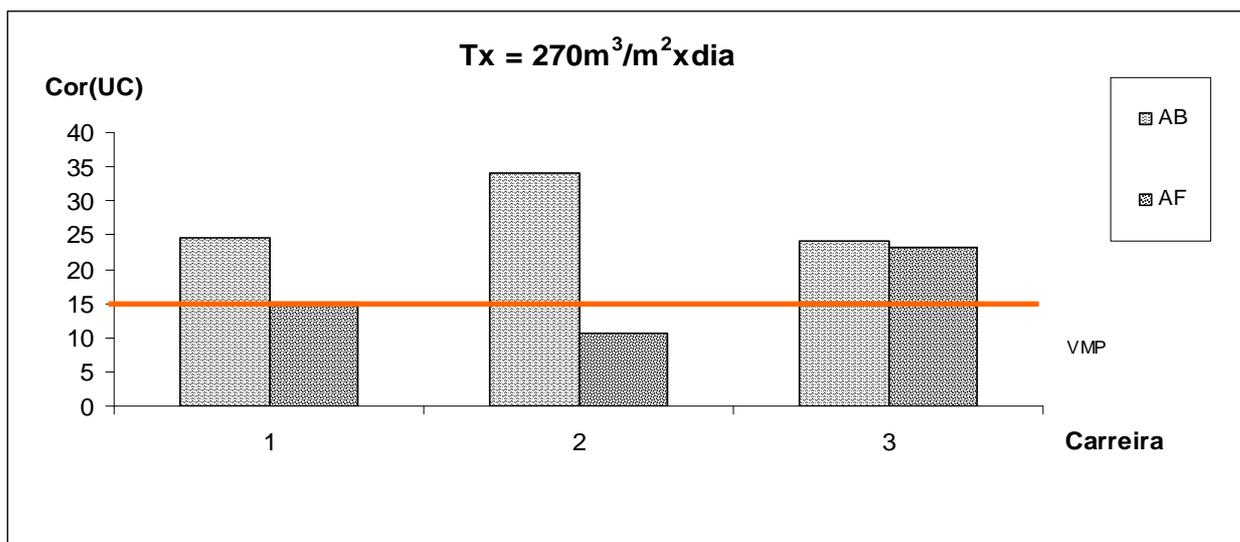


Gráfico 21 - Variação de cor aparente da água bruta e água filtrada comparados com valores máximos permissíveis da Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde para Tx- 270m³/m²xdia sem o leito de contato

- **Turbidez**

Na Tabela 15 é apresentada a estatística descritiva dos resultados obtidos no monitoramento do sistema de desferrização piloto.

Tabela 15 - Estatística descritiva dos resultados de Turbidez no Sistema de desferrização piloto para Tx - 270m³/m²xdia sem o leito de contato

AMOSTRAS	VARIÁVEL	
	Turbidez AF (uT)	
N	20	
Média	1,02	
Mediana	0,66	
Desvio Padrão	0,99	
Variância	0,98	
Mínimo	0,45	
Máximo	3,97	
Quartis	25	0,61
	50	0,66
	75	0,78

Os valores de turbidez para AF, ficaram entre 0,45 e 3,97uT, com média de 1,02uT, desvio padrão de 0,99uT e variância de 0,98uT.

Os valores de turbidez para AF apresentaram um acréscimo em média de 17,5%, superiores ao VMP de 1uT, sendo que estes valores podem estar associados a não utilização do leito de contato.

No Gráfico 22 pode-se verificar o comportamento da variável turbidez para AB e AF do sistema piloto durante o monitoramento do sistema da ETA piloto.

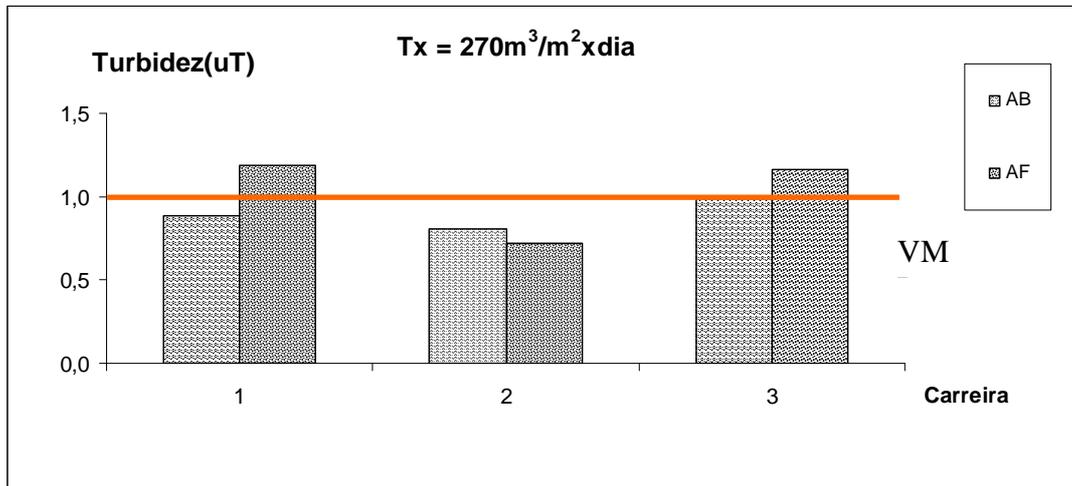


Gráfico 22 - Variação de turbidez da água bruta e água após filtração comparados com valores máximos permissíveis da Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde para Tx- 270m³/m²xdia sem o leito de contato

- **Ferro Total e Ferroso**

Na Tabela 16 é apresentada a estatística descritiva dos resultados obtidos no monitoramento do sistema de desferrização piloto.

Tabela 16 - Estatística descritiva dos resultados de Ferro Total e Ferroso no Sistema de desferrização piloto para Tx - 270m³/m²xdia sem o leito de contato

AMOSTRAS	VARIÁVEL	
	Ferro Total AF (mg/L)	Ferro Ferroso AF (mg/L)
N	20	20
Média	0,17	3,6x10 ⁻²
Mediana	0,13	3,0x10 ⁻²
Desvio Padrão	9,8x10 ⁻²	2,7x10 ⁻²
Variância	9,7x10 ⁻³	7,3x10 ⁻⁴
Mínimo	0,09	0
Máximo	0,44	0,12
Quartis	25	0,10
	50	0,13
	75	0,20

Analisando-se os valores na AF foi observado que o ferro total esteve entre 0,09 a 0,44 mg/L, com valor médio de 0,17 e desvio padrão e variância de 9,8x10⁻² e 9,7x10⁻³mg/L, respectivamente. Nota-se que os valores ficaram abaixo do limite estabelecido pela portaria 518/2004.

Os valores de ferro ferroso nas amostras coletadas de AF variou entre 0 a 0,12mg/L, com valor médio e desvio padrão de 3,6 x 10⁻² mg/L e 2,7x10⁻²mg/L, respectivamente e variância de 7,3x10⁻⁴mg/L.

Os valores de ferro total para AB apresentaram-se entre 2,07 a 2,28mg/L e para o ferro ferroso variaram entre 2,07 a 2.28mg/L.

Pode-se observar que os valores de ferro total para AF foram adequados ao consumo humano de 0,16 a 0,19mg/L, ou seja, inferiores ao limite estabelecido pelo padrão de potabilidade.

No Gráfico 23 são mostrados os valores de ferro total para AB e AF com taxa de 270m³/m²xdia sem o leito.

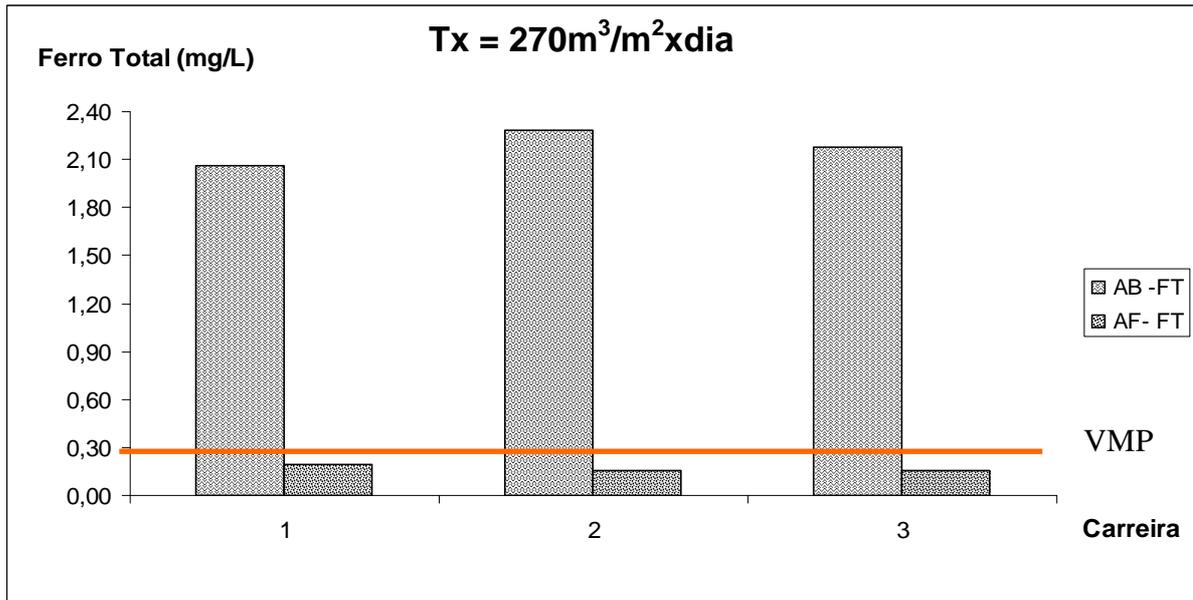


Gráfico 23 - Variação da concentração do ferro total da água bruta e água filtrada comparados com valores máximos permitíveis da Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde para Tx-270m³/m²xdia sem o leito de contato

No Gráfico 24 são mostrados os valores de ferro ferroso para AB e AF com taxa de 270m³/m²xdia sem o leito.

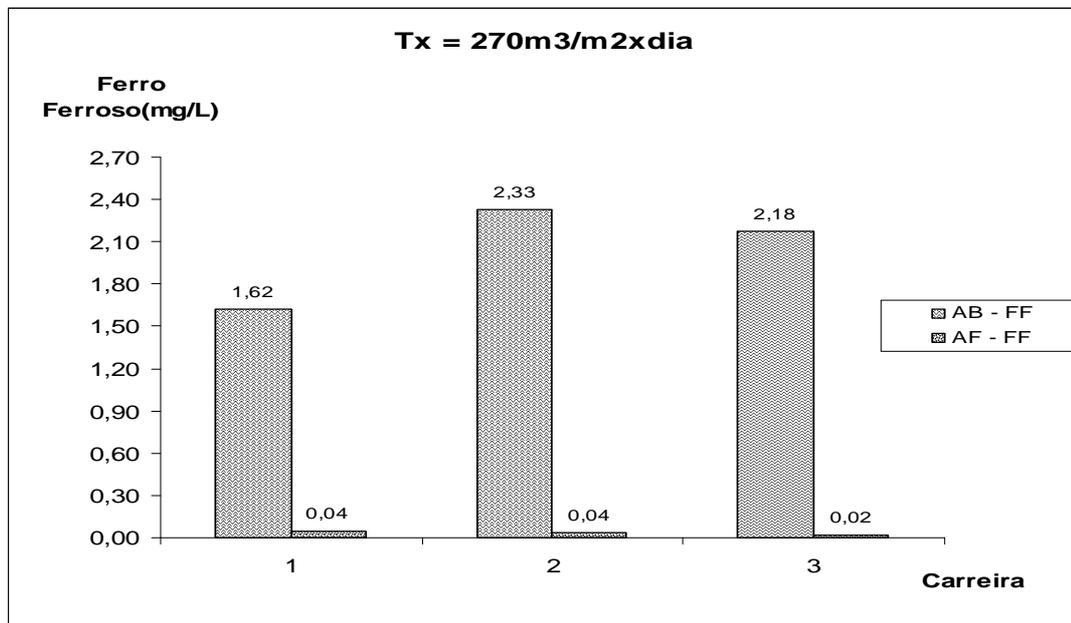


Gráfico 24 - Variação da concentração do ferro ferroso da AB e AF para Tx – 270m³/m²xdia sem leito de contato

- **Eficiência da remoção do ferro**

A remoção do ferro total no filtro, sem a utilização de leito de contato foi de 91 a 93%.

No Gráfico 25 verifica-se o comportamento da eficiência de remoção de ferro para AF.

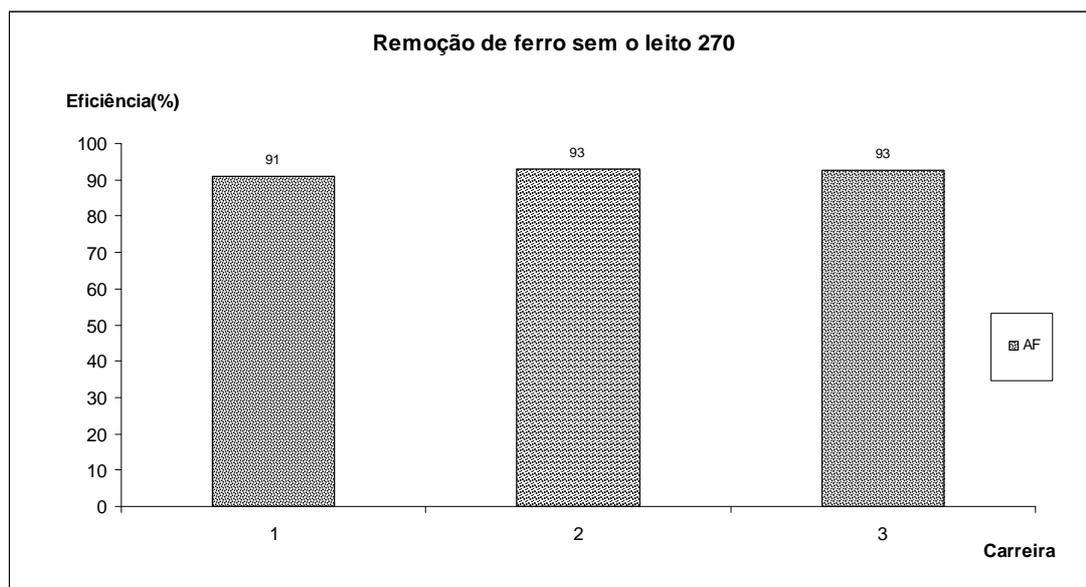


Gráfico 25 - Variação da eficiência em relação a concentração do ferro total da AF para Tx – $270\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ sem leito de contato

- **Carreira de Filtração**

Verificou-se que encerramento das carreiras de filtração também ocorreu por perda de carga, com turbidez do efluente inferiores ao limite de 1uT.

As carreiras de filtração tiveram duração de 12h (Figura 27b), 12h (Figura 27d) e 12h (Figura 27f) e média de 12 h. Observa-se ainda o aumento médio de 33% para perda de carga conforme a Figura 27 são apresentados os resultados obtidos nas análises experimentais de turbidez e distribuição de perda de carga.

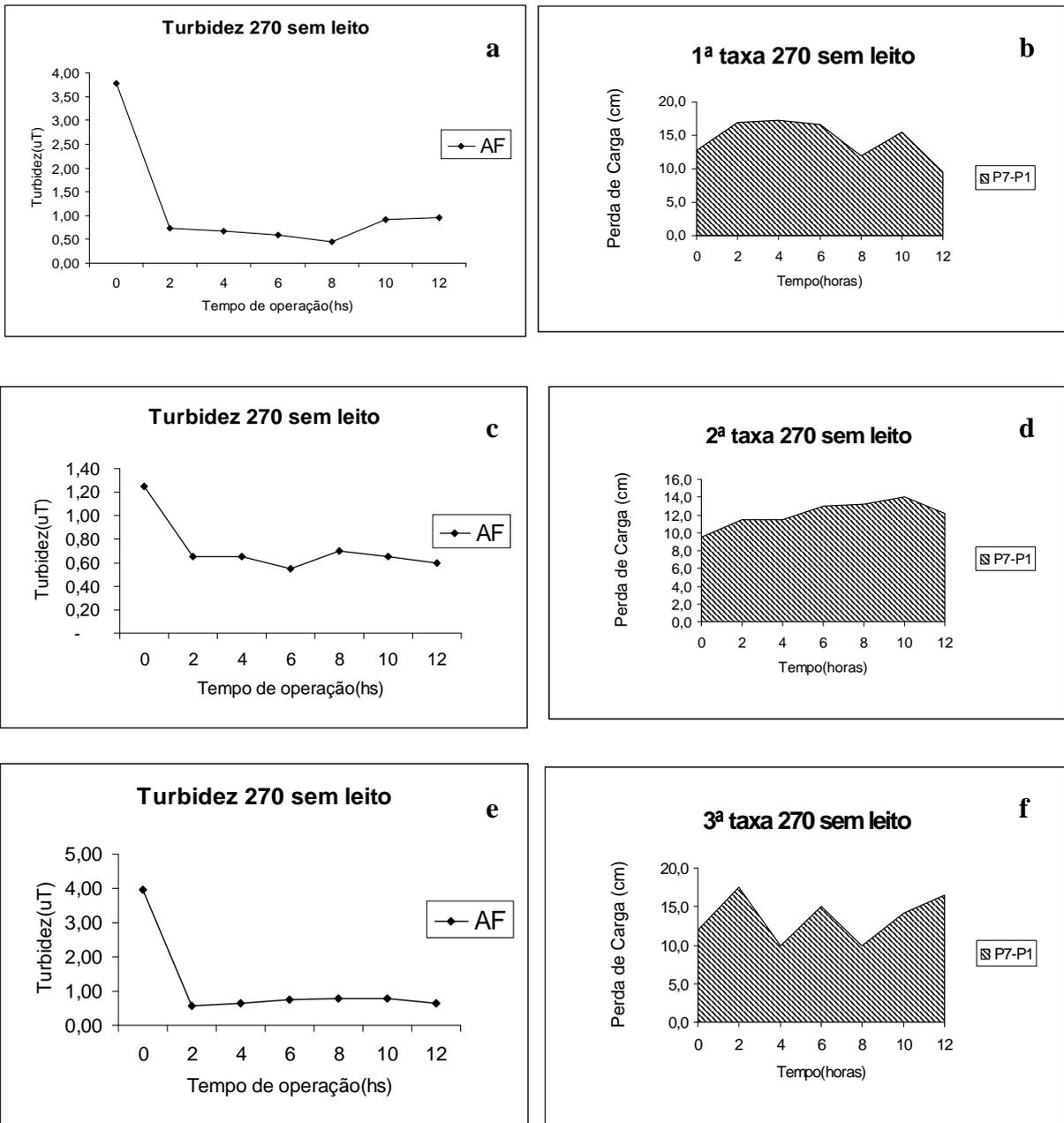


Figura 27 -Variação da concentração da turbidez da AF e distribuição da perda de carga em função do tempo de operação para Tx – 270m³/m²xdia sem leito de contato

- TAXA DE 360 M³/M²XDIA COM O LEITO DE CONTATO

• pH

Na Tabela 17 é apresentada a estatística descritiva dos resultados obtidos no monitoramento do sistema de desferrização piloto.

Tabela 17 - Estatística descritiva dos resultados de pH no Sistema de desferrização piloto para Tx - 360m³/m²xdia com leito de contato

AMOSTRAS	VARIÁVEL		
	pHAB	pHAL	pHAF
N	20	37	37
Media	6,87	7,57	7,78
Mediana	6,76	7,57	7,78
Desvio padrão	0,31	0,11	0,10
Variância	0,10	0,01	0,01
Mínimo	6,68	7,37	7,60
Máximo	7,75	7,75	8,02
Quartis	25	6,73	7,48
	50	6,76	7,57
	75	6,81	7,67

No Gráfico 26 são representados os valores mínimos e máximos, os quartis 25% e 75% e a mediana do pH da AB, AL e AF.

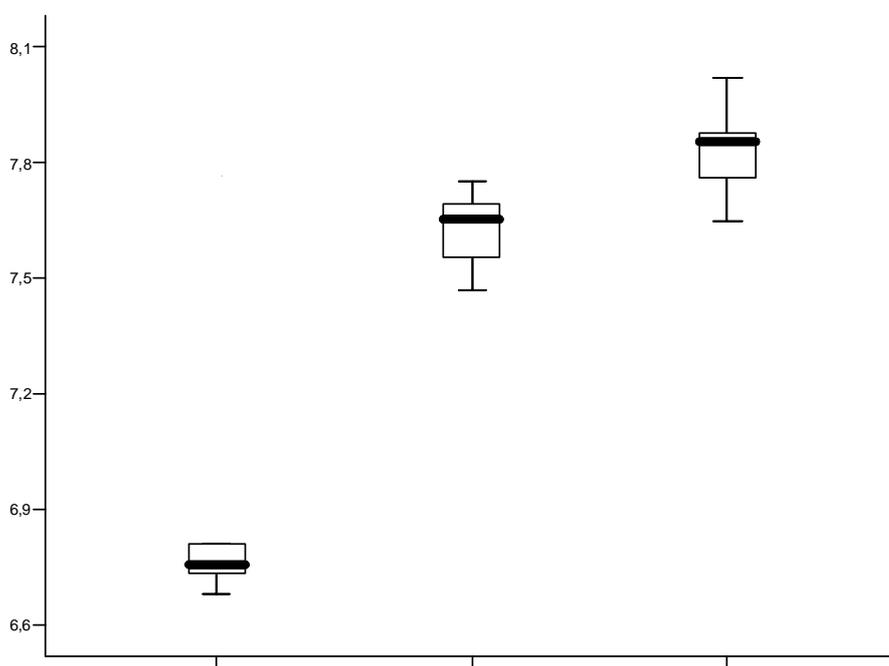


Gráfico 26 - Box-Plot do pH da AB , AL e AF para Tx - 360m³/m²xdia com leito de contato

pHAB

pHAL

pHAF

Analisando-se os valores de pH da AB, verificou-se resultados entre 6,68 a 7,75, com valor médio 6,87 e desvio padrão de 0,31, respectivamente, sendo a variância de 0,1.

Para o pH da AL pode-se inferir valores entre 7,37 a 7,75, média de 7,58, e variância de 0,01. Enquanto que o pH da AF apresentou valores semelhantes ao pH da AL e valor de dispersão ligeiramente menor, representando uma maior homogeneidade dos resultados.

- **Cor Aparente**

Na Tabela 18 é apresentada a estatística descritiva dos resultados obtidos no monitoramento do sistema de desferrização piloto.

Tabela 18 - Estatística descritiva dos resultados de Cor Aparente no Sistema de desferrização piloto para Tx - 360m³/m²xdia com leito de contato

AMOSTRAS		VARIÁVEL
		Cor Aparente AF (uC)
N		37
Média		24
Mediana		17
Desvio Padrão		22
Variância		468
Mínimo		0
Máximo		86
Quartis	25	6
	50	17
	75	35

Observa-se que para os valores para Cor aparente da AF, verificou-se resultados entre 0 a 86 uC, com valor médio de 24uC e desvio padrão de 22uC, respectivamente. No entanto a variância foi de 468uC, representando uma grande variabilidade dos resultados. Observa-se ainda que o valor máximo ficou acima do VMP pela Portaria que é de 15uC, o que pode ser atribuído à qualidade da AB.

Os valores de cor aparente na AF apresentaram significativa variação entre si. Os valores encontrados variaram entre 10 a 35 uC. No entanto, a média da cor apresentou-se mais acentuadas nas carreiras 2 e 3, fato que pode ser atribuído a

qualidade da água bruta que também possui em média cor mais elevada, uma vez houve um aumento em média de 110% em relação a portaria.

No Gráfico 27 são apresentados os valores de cor aparente da AB, AL e AF a comparação dos resultados com os valores recomendados pela Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde.

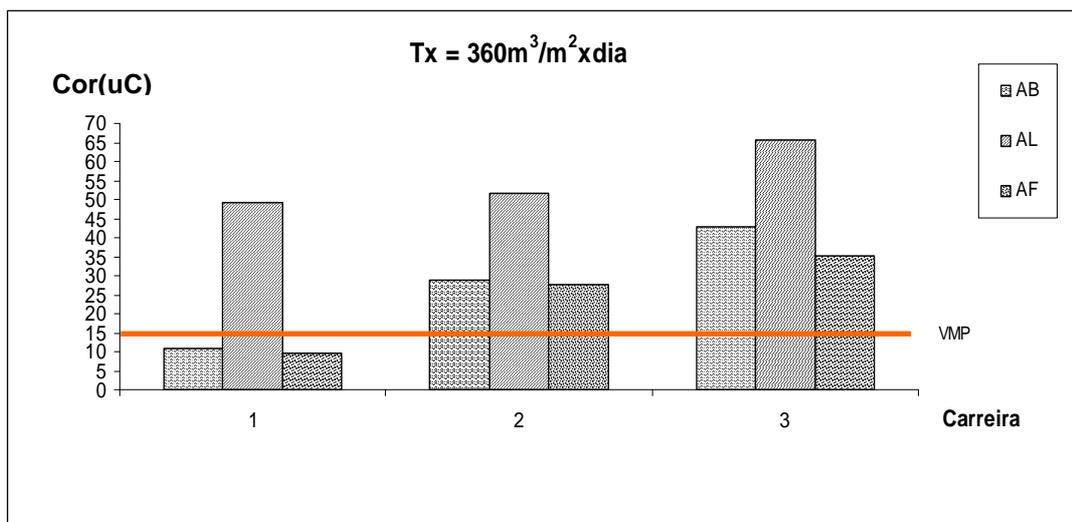


Gráfico 27 - Variação de cor aparente da AB, AL e AF em relação ao VMP na Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde para Tx - $360\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ com leito de contato

Para a AL, a variável cor aparente apresentou valores entre 44 a 69 mg Pt-Co/L.

- **Turbidez**

Na Tabela 19 é apresentada a estatística descritiva dos resultados obtidos no monitoramento do sistema de desferrização piloto.

Tabela 19 - Estatística descritiva dos resultados de Turbidez no Sistema de desferrização piloto para Tx - 360m³/m²xdia com leito de contato

AMOSTRAS		VARIÁVEL
		Turbidez AF (uT)
N		37
Média		0,80
Mediana		0,76
Desvio Padrão		0,31
Variância		9,5x10 ⁻²
Mínimo		0,38
Máximo		2,07
Quartis	25	0,61
	50	0,76
	75	0,89

Analisando-se os valores de turbidez para AF, verificou-se valores entre 0,38 e 2,07uT, com média de 0,80uT, desvio padrão de 0,31uT e variância de 9,5x10⁻²uT.

No Gráfico 28 pode-se verificar o comportamento da variável turbidez para AB, AL e AF do sistema piloto.

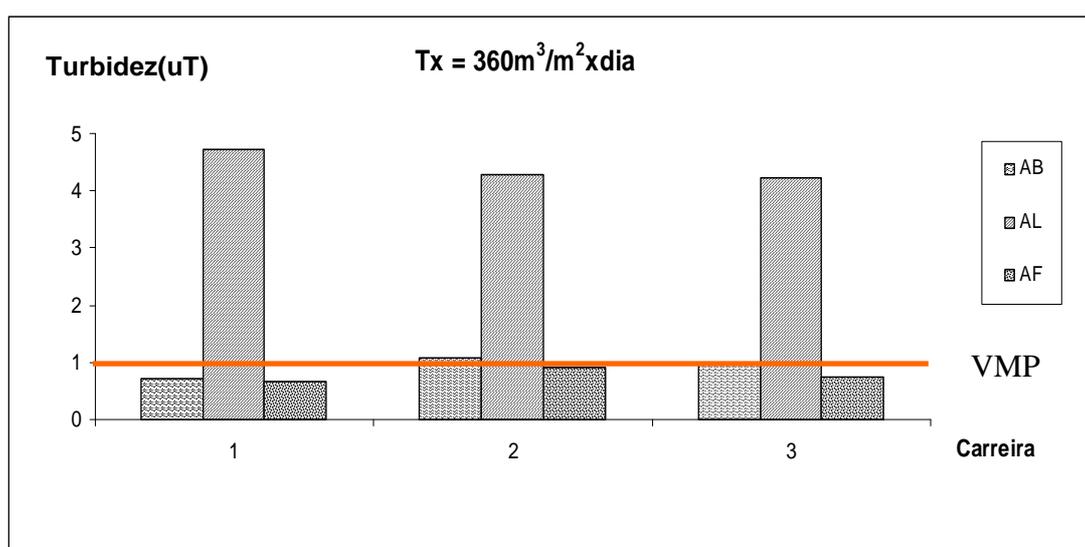


Gráfico 28 - Variação de turbidez da AB, AL e AF comparados com valores máximos permitidos da Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde para Tx - 360m³/m²xdia com leito de contato

- **Ferro Total e Ferroso**

Na Tabela 20 é apresentada a estatística descritiva dos resultados obtidos no monitoramento do sistema de desferrização piloto.

Tabela 20 - Estatística descritiva dos resultados de Ferro Total e Ferroso no Sistema de desferrização piloto para Tx - 360m³/m²xdia com leito de contato

AMOSTRAS		VARIÁVEL	
		Ferro Total AF (mg/L)	Ferro Ferroso AF (mg/L)
N		37	37
Média		0,16	3,2x10 ⁻²
Mediana		0,14	2,0x10 ⁻²
Desvio Padrão		0,12	2,8x10 ⁻²
Variância		1,4x10 ⁻²	8,0x10 ⁻⁴
Mínimo		0	0
Máximo		0,63	0,10
Quartis	25	0,11	1,0x10 ⁻²
	50	0,14	2,0x10 ⁻²
	75	0,16	4,5x10 ⁻²

Na AF foi observado que o ferro total esteve entre 0 a 0,63 mg/L, com valor da média de 0,16 e desvio padrão e variância de 0,12 e 0,014mg/L, respectivamente. Nota-se que os valores ficaram abaixo do limite estabelecido ao VMP da portaria.

Os valores de ferro ferroso da AF variaram entre 0 a 0,10mg/L, com valor médio e desvio padrão de 3,2 x 10⁻² mg/L e 2,8x10⁻²mg/L, respectivamente e variância de 8,0x10⁻⁴mg/L.

O ferro total na AB apresentou valores entre 1,85 a 2,02 mg/L e ferro ferroso entre 1.69 a 2.02mg/L.

Os valores de ferro total da AL variaram de 0,33 a 0,68mg/L, enquanto que para o ferro ferroso, verificou-se resultados entre 0,07 a 0,11mg/L.

Pode-se observar que os valores de ferro total para AF estão de acordo ao padrão de potabilidade.

No Gráfico 29 são mostrados os valores de ferro total da AB, AL e AF para carreiras de filtração com taxa de 360m³/m² x dia com leito de contato.

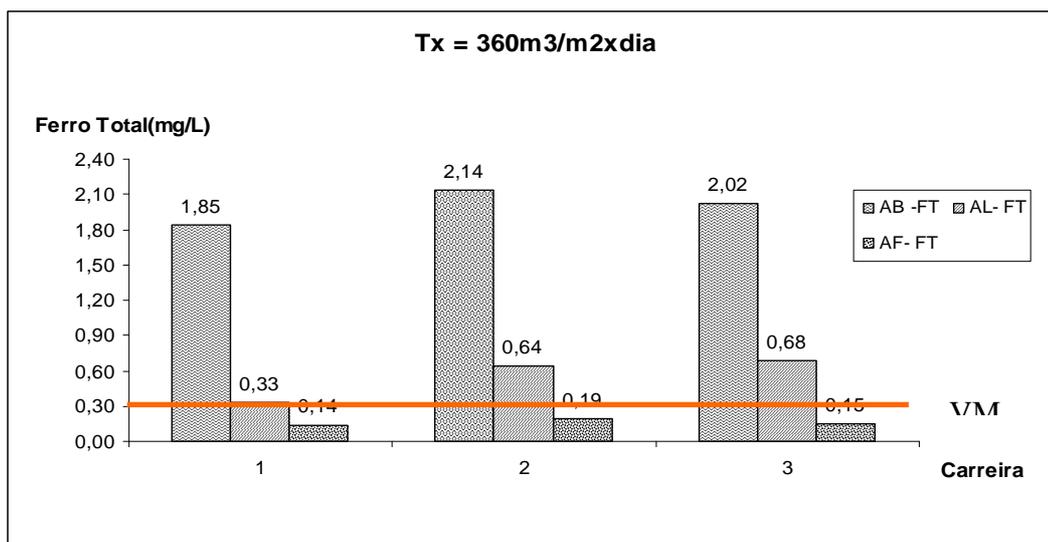


Gráfico 29 - Variação da concentração do ferro total da AB, AL e AF comparados com valores máximos permissíveis da Portaria nº 518/04 Ministério da Saúde para Tx - 360m³/m²xdia com leito de contato.

No Gráfico 30 são mostrados os valores de ferro ferroso da AB, AL e AF para carreiras de filtração com taxa de 360m³/m² x dia com leito de contato.

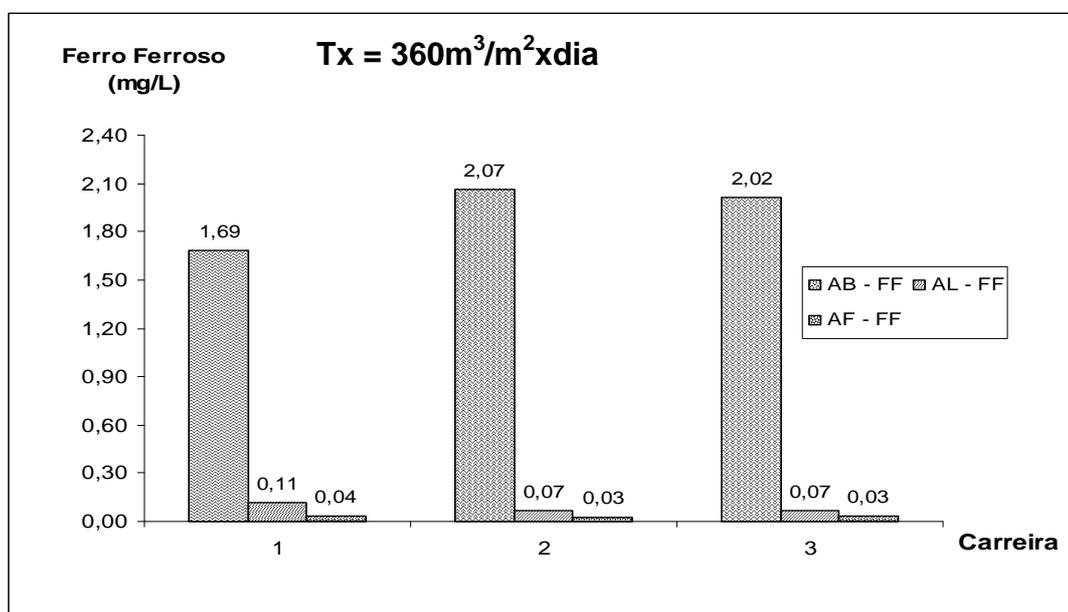


Gráfico 30 - Variação da concentração do ferro ferroso da AB, AL e AF para Tx - 360m³/m²xdia com leito de contato

- **Eficiência da remoção do ferro**

Observa-se resultados de remoção do ferro total na ETA piloto para AL e AF, variaram entre duas faixas: 66% a 82% e 91% a 92%, respectivamente.

No Gráfico 31 verifica-se o comportamento da eficiência de remoção de ferro para AF.

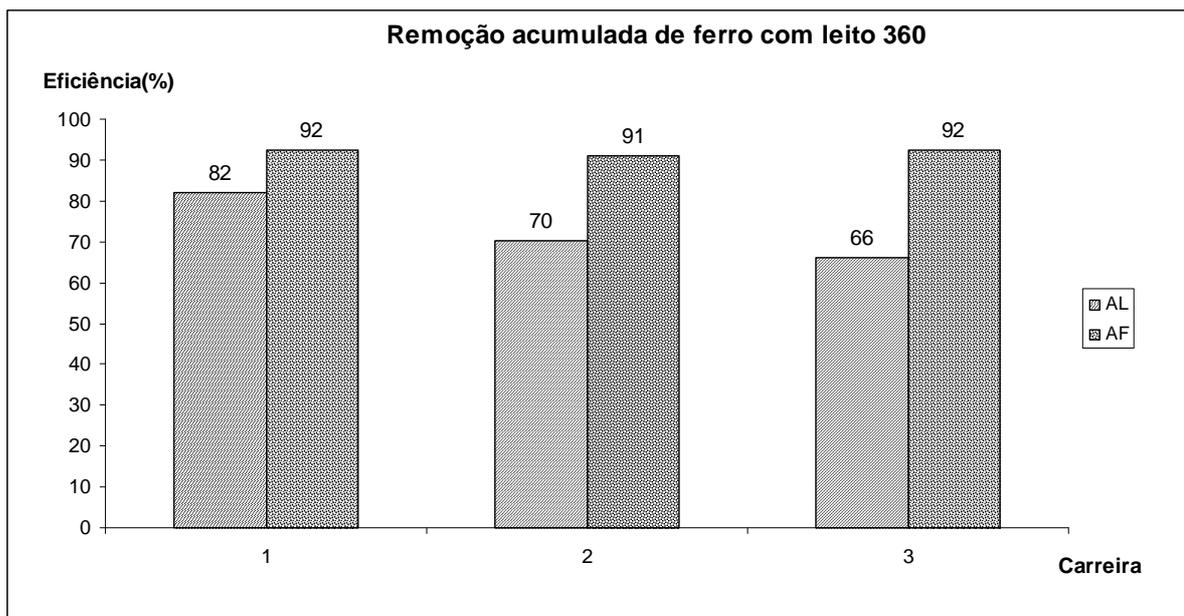


Gráfico 31 -Variação da eficiência em relação a concentração do ferro total da AB e AF para Tx – 360m³/m²xdia com leito de contato

- **Carreira de Filtração**

O encerramento das carreiras de filtração ocorreu por perda de carga, ou seja, após o nível ter atingido o extravasor do filtro.

O encerramento das carreiras de filtração ocorreu por perda de carga, ou seja, após o nível ter atingido o extravasor do filtro.

As carreiras de filtração tiveram duração de 24h (Figura 28b), 24h (Figura 28d) e 20h (Figura 28f) e média de 22,7h.

Na Figura 28 são apresentados os resultados obtidos nas análises experimentais durante o monitoramento do sistema da ETA-Piloto.

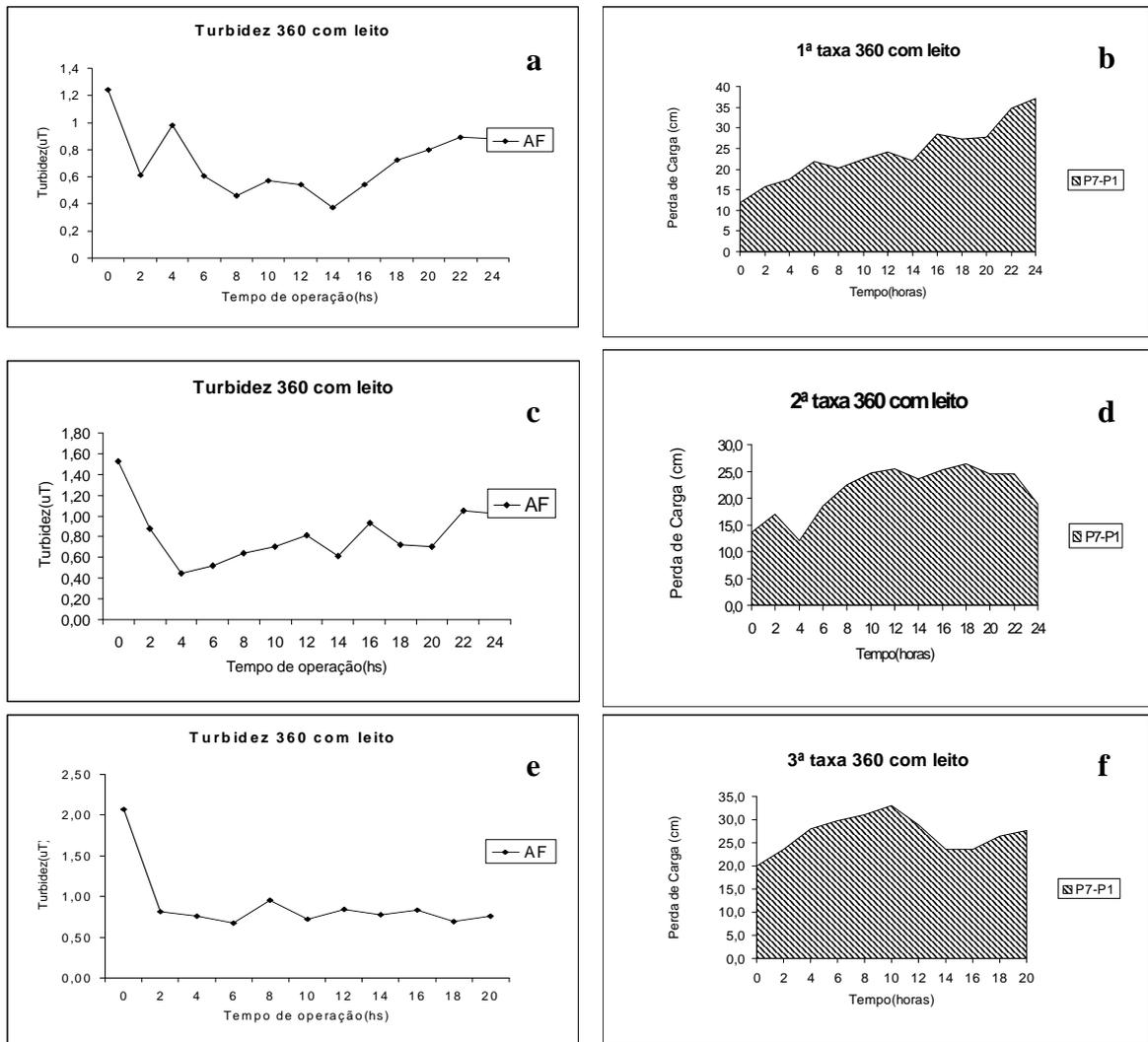


Figura 28 - Variação da concentração da turbidez da AF e distribuição da perda de carga em função do tempo de operação para Tx – 360m³/m²xdia com leito de contato

- TAXA DE 360 m³/m²xdia SEM O LEITO DE CONTATO

- pH

Na Tabela 21 é apresentada a estatística descritiva dos resultados obtidos no monitoramento do sistema de desferização piloto.

Tabela 21 - Estatística descritiva dos resultados de pH no Sistema de desferrização piloto para Tx - 360m³/m²xdia sem o leito de contato

AMOSTRAS	VARIÁVEL	
	pHAB	pHAF
N	6	10
Media	6,81	7,87
Mediana	6,76	7,88
Desvio padrão	0,11	0,08
Variância	0,01	0,01
Mínimo	6,69	7,70
Máximo	6,96	7,96
Quartis	25	6,74
	50	6,76
	75	6,95
		7,84
		7,88
		7,91

No Gráfico 32 são representados os valores mínimos e máximos, os quartis 25 e 75% e a mediana do pH da AB e AF.

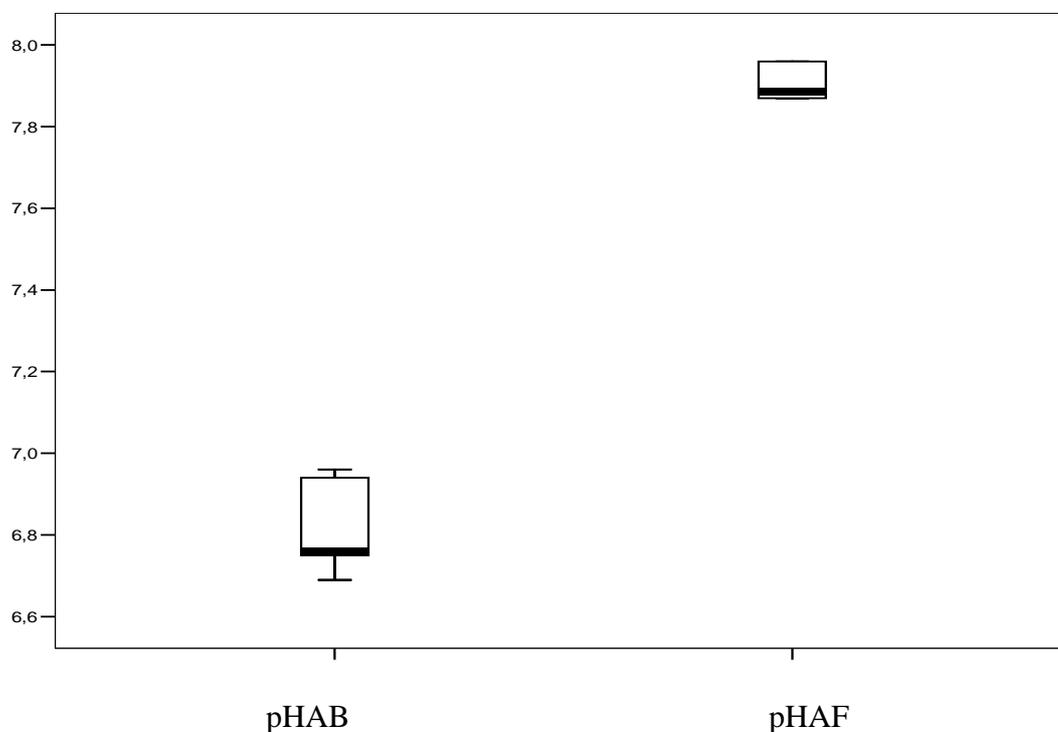


Gráfico 32 - Box-Plot do pH da AB e AF para Tx - 360m³/m²xdia sem o leito de contato

Observando os valores de pH da AB, verificou-se resultados entre 6,69 a 6,96 com valor médio 6,81 e desvio padrão de 0,11, respectivamente, tendo o valor de variância de 0,01.

Para o pH da AF apresentaram-se valores entre de 7,70 a 7,96. Em média o pH da AF foi de 7,87 com um desvio de 0,08.

Observa-se que os valores para o pH da AF, atenderam a referida Portaria 518/2004.

- **Cor Aparente**

Na Tabela 22 é apresentada a estatística descritiva dos resultados obtidos no monitoramento do sistema de desferrização piloto.

Tabela 22 - Estatística descritiva dos resultados de Cor Aparente no Sistema de desferrização piloto para Tx - 360m³/m²xdia sem leito de contato

AMOSTRAS		VARIÁVEL
		Cor Aparente AF (uC)
N		10
Média		17
Mediana		13
Desvio Padrão		14
Variância		190
Mínimo		0
Máximo		45
Quartis	25	7
	50	13
	75	26

Os valores para Cor aparente da AF ficaram entre 0 a 86 uC, com valor médio de 24uC e desvio padrão de 22uC, respectivamente. No entanto, a variância foi de 468uC representando uma grande variabilidade dos resultados. Observa-se ainda que o valor máximo ficou acima do VMP pela Portaria que é de 15uC, o que pode ser atribuído à qualidade da AB

Os valores de cor aparente na AF apresentaram significativa variação entre si. Os valores encontrados variaram na faixa de 3 a 17 uC. No entanto a cor da AF nas carreiras de filtração 2 e 3 apresentaram aumento de 53%, superiores em relação ao VMP da portaria.

No Gráfico 33 são apresentados os valores de cor aparente da AB e AF e a comparação dos resultados com os valores recomendados pela Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde.

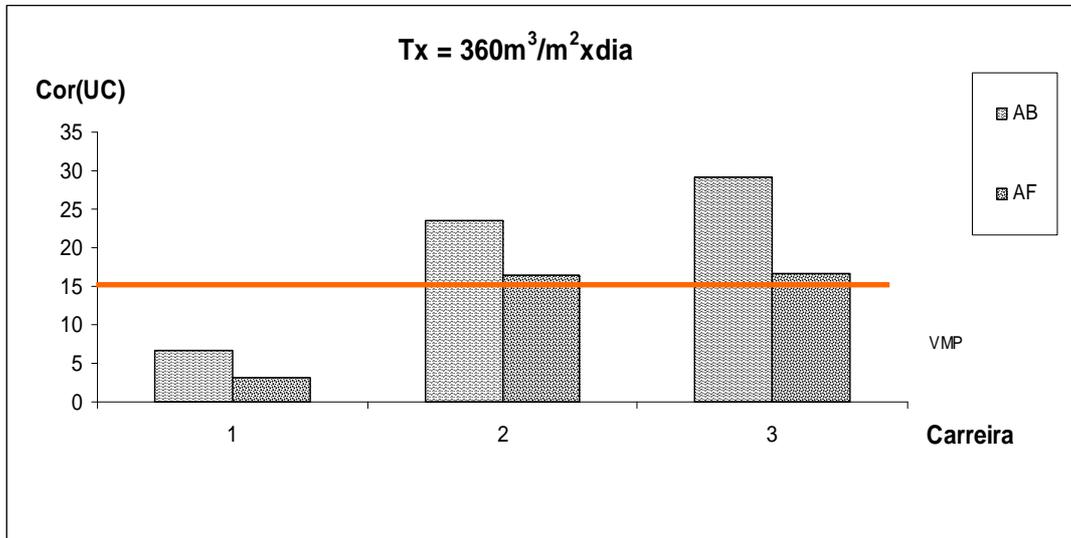


Gráfico 33 - Variação de cor aparente da água bruta e água filtrada comparados com valores máximos permissíveis da Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde para Tx- 360m³/m²xdia sem o leito de contato

- **Turbidez**

Na Tabela 23 é apresentada a estatística descritiva dos resultados obtidos no monitoramento do sistema de desferrização piloto.

Tabela 23 - Estatística descritiva dos resultados de Turbidez no Sistema de desferrização piloto para Tx - 360m³/m²xdia sem leito de contato

AMOSTRAS		VARIÁVEL
		Turbidez AF (uT)
N		10
Média		0,36
Mediana		0,34
Desvio Padrão		0,35
Variância		0,12
Mínimo		0,02
Máximo		0,94
Quartis	25	0,04
	50	0,34
	75	0,64

Analisando-se os valores de turbidez para AF, verificou-se valores entre 0,38 e 2,07uT, com média de 0,80uT, desvio padrão de 0,31uT e variância de 9,5x10⁻²uT.

No Gráfico 34 pode-se verificar o comportamento da variável turbidez para AB e AF do sistema piloto durante as três carreiras.

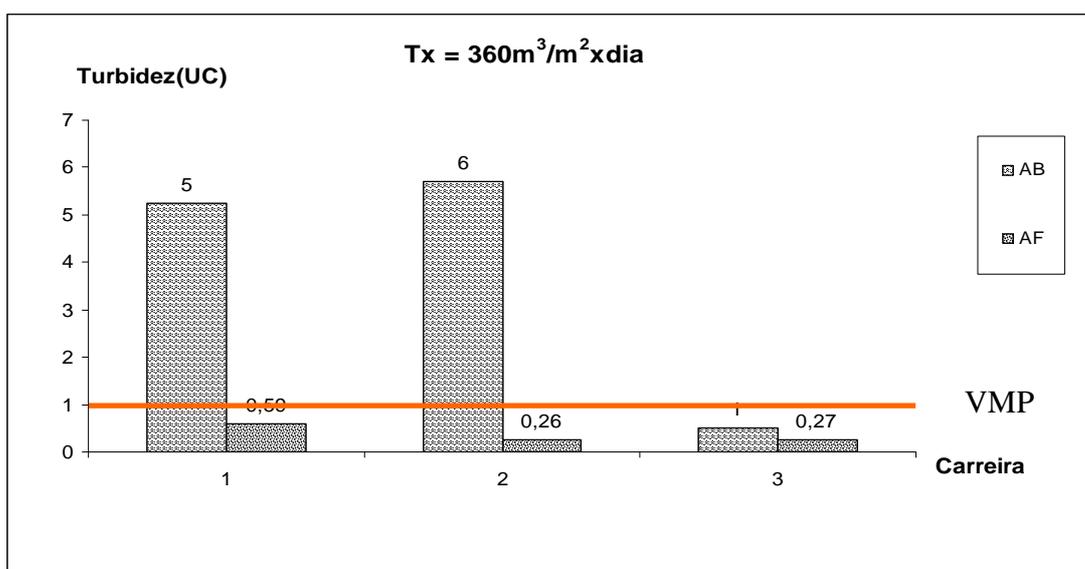


Gráfico 34 - Variação de turbidez da água bruta e água após filtração comparados com valores máximos permissíveis da Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde para Tx- 360m³/m²xdia sem o leito de contato

- **Ferro Total e Ferroso**

Na Tabela 24 é apresentada a estatística descritiva dos resultados obtidos no monitoramento do sistema de desferrização piloto.

Tabela 24 - Estatística descritiva dos resultados de Ferro Total e Ferroso no Sistema de desferrização piloto para Tx - 360m³/m²xdia com leito de contato

AMOSTRAS	VARIÁVEL		
	Ferro Total AF (mg/L)	Ferro Ferroso AF (mg/L)	
N	10	10	
Média	0,19	3,1x10 ⁻²	
Mediana	0,14	3,5x10 ⁻²	
Desvio Padrão	0,11	2,0x10 ⁻²	
Variância	1,3x10 ⁻²	3,9x10 ⁻⁴	
Mínimo	0,09	0	
Máximo	0,43	0,05	
Quartis	25	0,10	1,0x10 ⁻²
	50	0,14	3,5x10 ⁻²
	75	0,28	5,0x10 ⁻²

Na AF foi observado que o ferro total esteve entre 0,09 a 0,43 mg/L, com valor da média de 0,19 mg/L e desvio padrão e variância de 0,11 e 0,013mg/L, respectivamente. Nota-se que os valores ficaram abaixo do limite estabelecido pela portaria 518/04, que é de 0,3mg/L.

Os valores de ferro ferroso da AF variaram entre 0 a 0,10mg/L, com valor médio e desvio padrão de 3,2 x 10⁻² mg/L e 2,8x10⁻²mg/L, respectivamente e variância de 8,0x10⁻⁴mg/L.

Os valores de ferro total para AB apresentaram-se entre 2.02 a 2.48mg/L e para o ferro ferroso variaram entre 1.88 a 2.48mg/L.

No Gráfico 35 são mostrados os valores de ferro total para AB e AF com taxa de 360m³/m²xdia sem o leito.

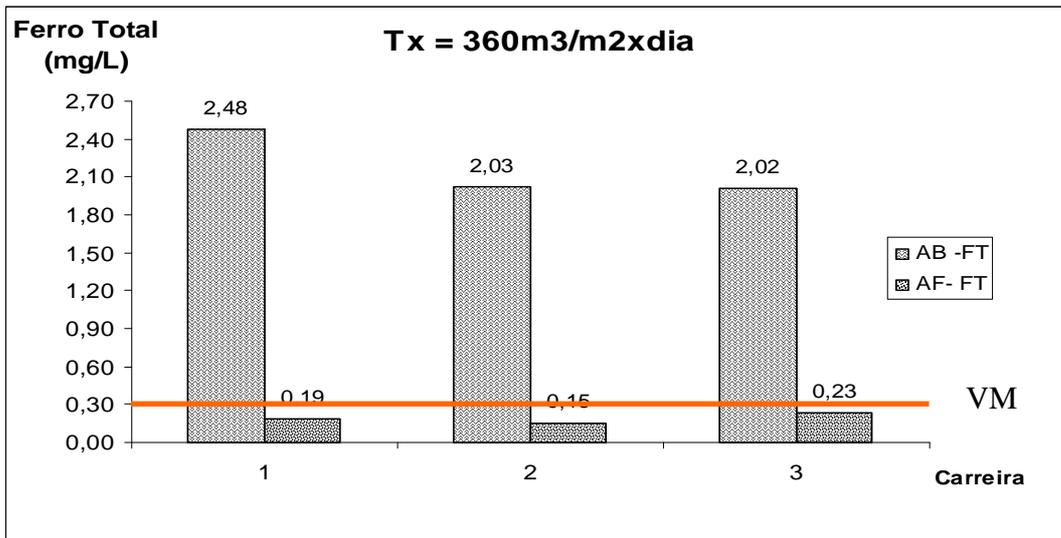


Gráfico 35 - Variação da concentração do ferro total da água bruta e água filtrada comparados com valores máximos permissíveis da Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde para Tx-360m³/m²xdia sem o leito de contato

No Gráfico 36 são mostrados os valores de ferro ferroso para AB e AF com taxa de 360m³/m²xdia sem o leito.

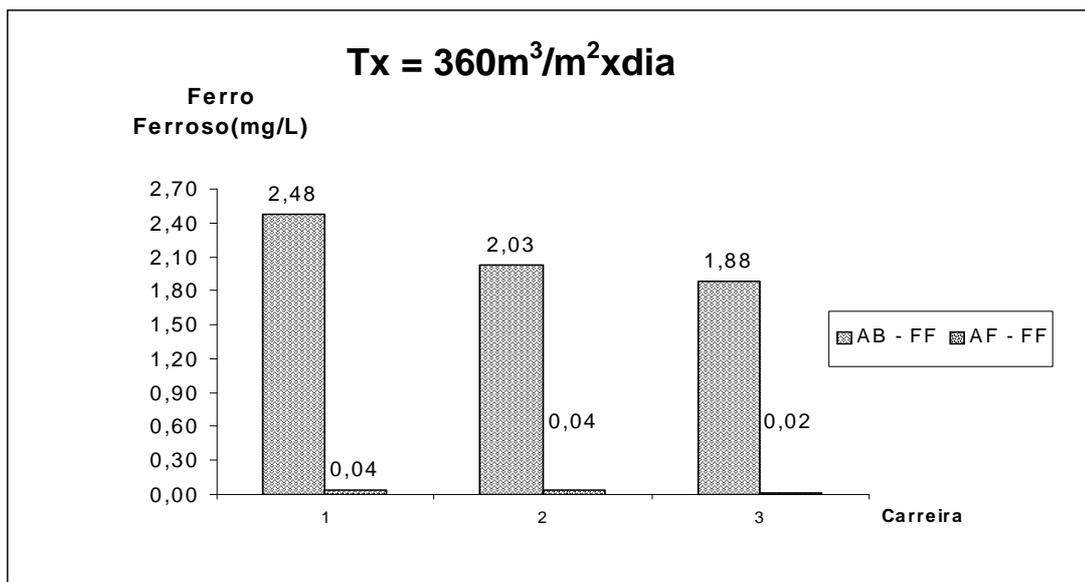


Gráfico 36 - Variação da concentração do ferro ferroso da AB e AF para Tx – 360m³/m²xdia sem leito de contato

- **Eficiência da remoção do ferro**

No Gráfico 37 verifica-se o comportamento da eficiência de remoção de ferro para AF.

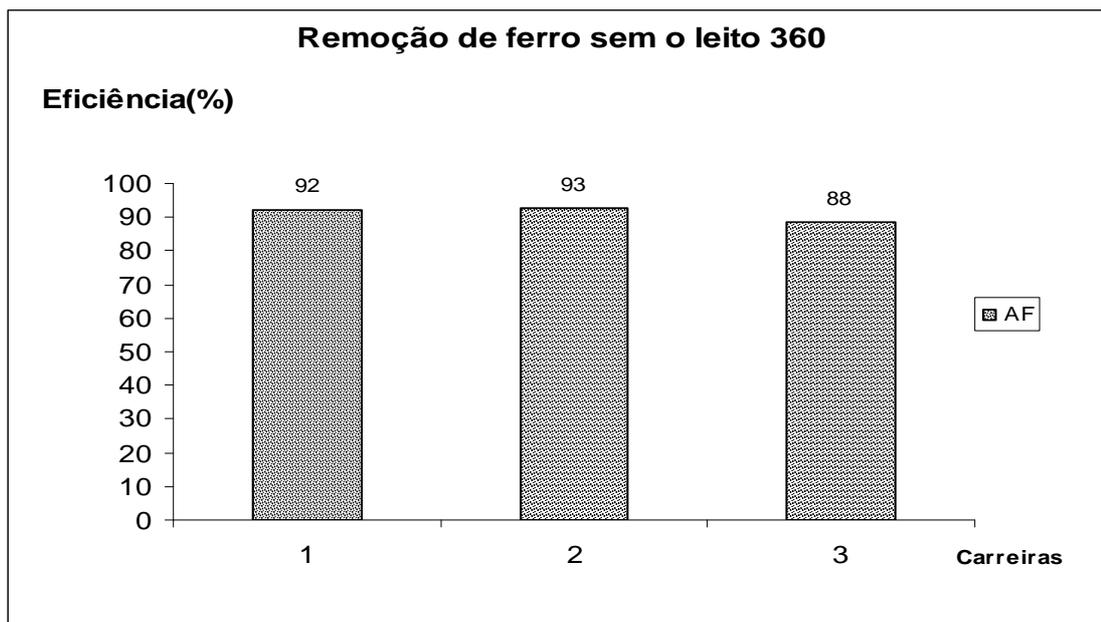


Gráfico 37 - Variação da eficiência em relação a concentração do ferro total da AF para Tx – $360\text{m}^3/\text{m}^2\text{dia}$ sem leito de contato

- **Carreira de Filtração**

Verificou-se que o encerramento das carreiras de filtração também ocorreu por perda de carga, com turbidez do efluente inferiores ao limite de 1uT, no entanto, nesta fase as carreiras de filtração tiveram menor duração de 4h (Figura 29b), 6h (Figura 29d) e 4h (Figura 29f) com média de 4,7 horas. Nota-se também o acréscimo de 18,5% para perda de carga conforme a Figura 29 pode se observar o encerramento das carreiras também por perda de carga, com turbidez do efluente inferiores ao limite de 1uT.

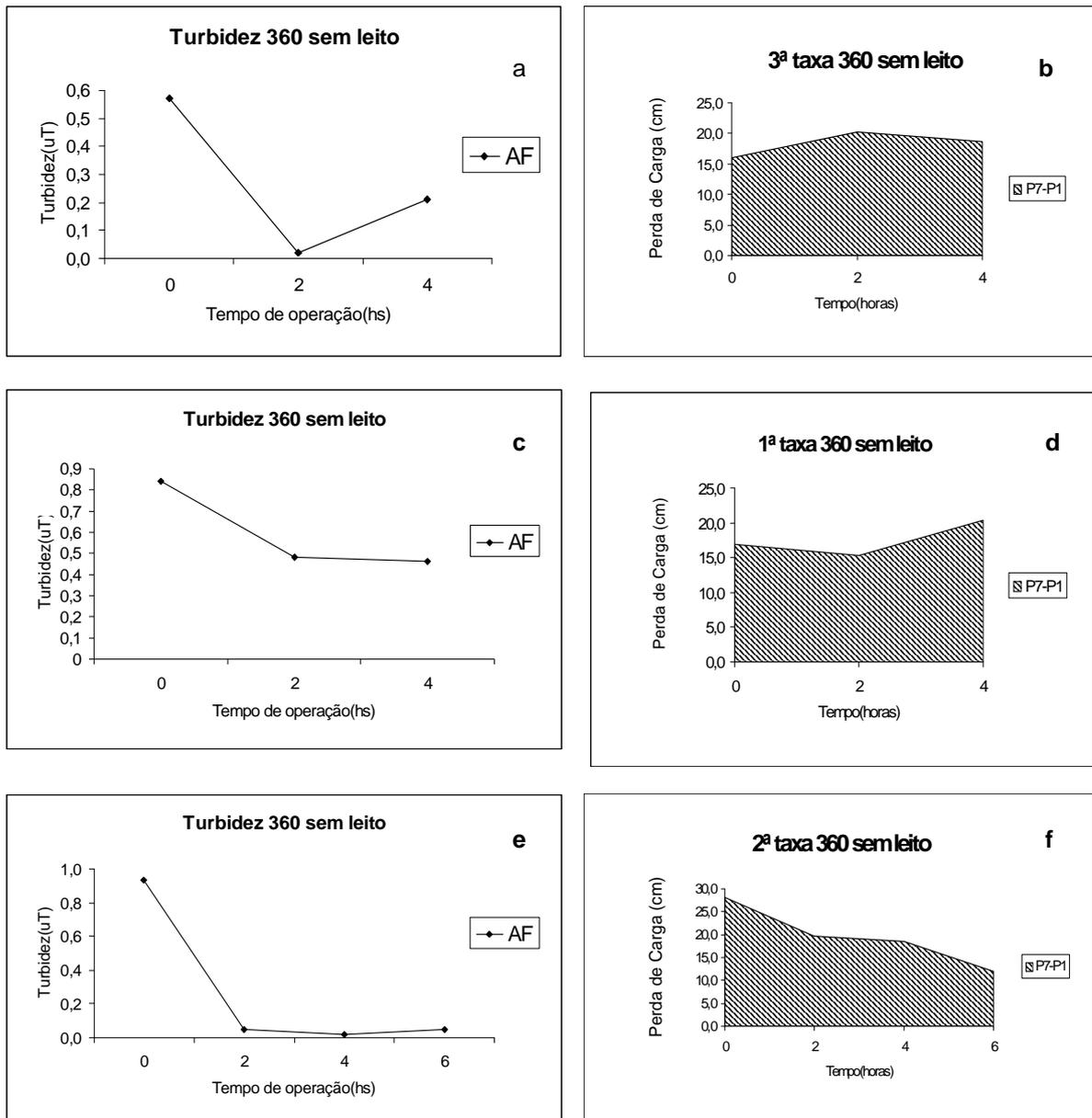


Figura 29 - Variação da concentração da turbidez da AF e distribuição da perda de carga em função do tempo de operação para Tx – 360m³/m²xdia sem leito de contato

6.1.1 Avaliação do Comportamento do Sistema para as Taxas em Função do Leito de Contato

- Taxa de 180m³/m²xdia em função da unidade de contato

A presença da unidade do leito de contato está relacionada à qualidade da água, uma vez que o leito retém as maiores partículas de ferro, o que contribui para o melhor desempenho do filtro rápido descendente.

Observa-se para taxa de $180 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times \text{dia}$, com leito de contato, valores de ferro total para AF entre 0,13 a 0,16mg/L. Entretanto para a mesma taxa sem leito de contato, os valores variaram entre 0,14 a 0,20mg/L. Em média observa-se redução no ferro total de cerca de 13% na qualidade de água que fora produzida utilizando-se o leito de contato para taxa de $180 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times \text{dia}$.

No Gráfico 38 é apresentado o comportamento do Ferro Total na AF, para taxa de $180 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times \text{dia}$, em função da presença do leito de contato, sendo nas abscissas apresentados os valores mínimos, médios e máximos obtidos para cada situação estudada.

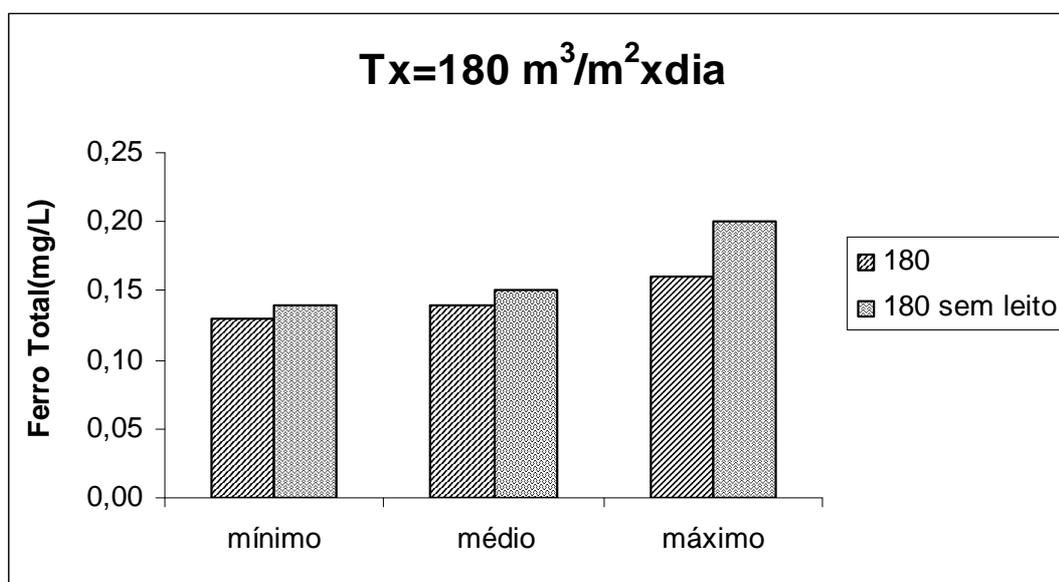


Gráfico 38 - Avaliação do comportamento para taxa de $180 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times \text{dia}$

Na carreira de filtração ocorreu decréscimo médio de 59% sem a utilização do leito de contato, o que implica no aumento do número de lavagem e conseqüentemente maior consumo de água e energia elétrica para acionamento das bombas.

O Gráfico 39 apresenta o tempo de duração das carreiras de filtração com e sem leito para taxa de $180 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times \text{dia}$.

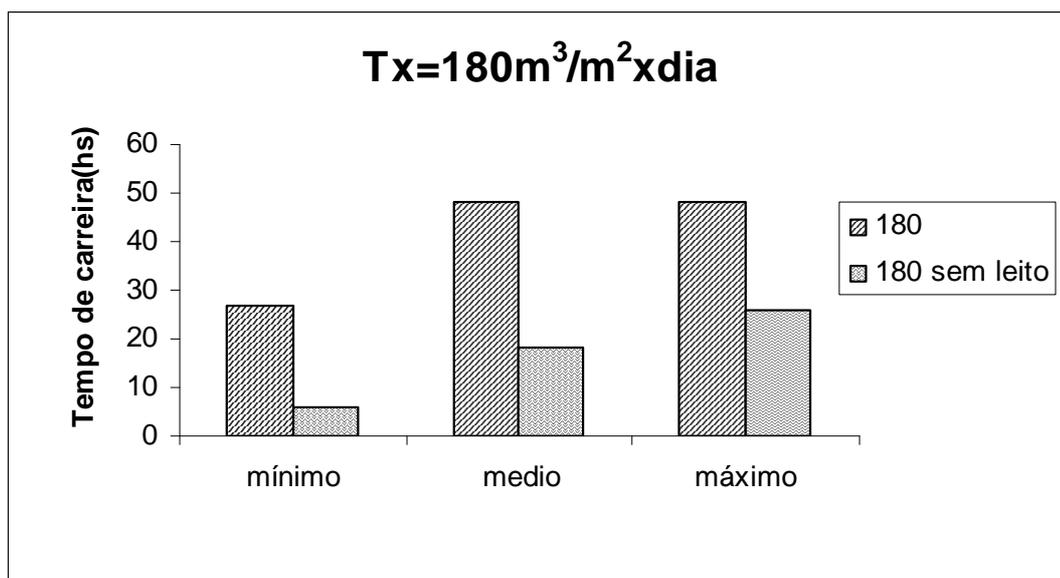


Gráfico 39 - Duração da carreira de $180\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ (hs)

- Taxa de $270\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ em função da unidade de contato

Para as taxas de $270\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ com e sem leito, apresentaram-se teores de ferro total para AF entre duas faixas: 0,14 a 0,22mg/L e 0,16 a 0,19mg/L, respectivamente. Pode-se observar uma semelhança nos valores de ferro total na presença e ausência do leito.

No Gráfico 40 é apresentado o comportamento do Ferro Total na AF, para taxa de $270\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$, em função da presença do leito de contato, sendo nas abscissas apresentados os valores mínimos, médios e máximos obtidos para cada situação estudada.

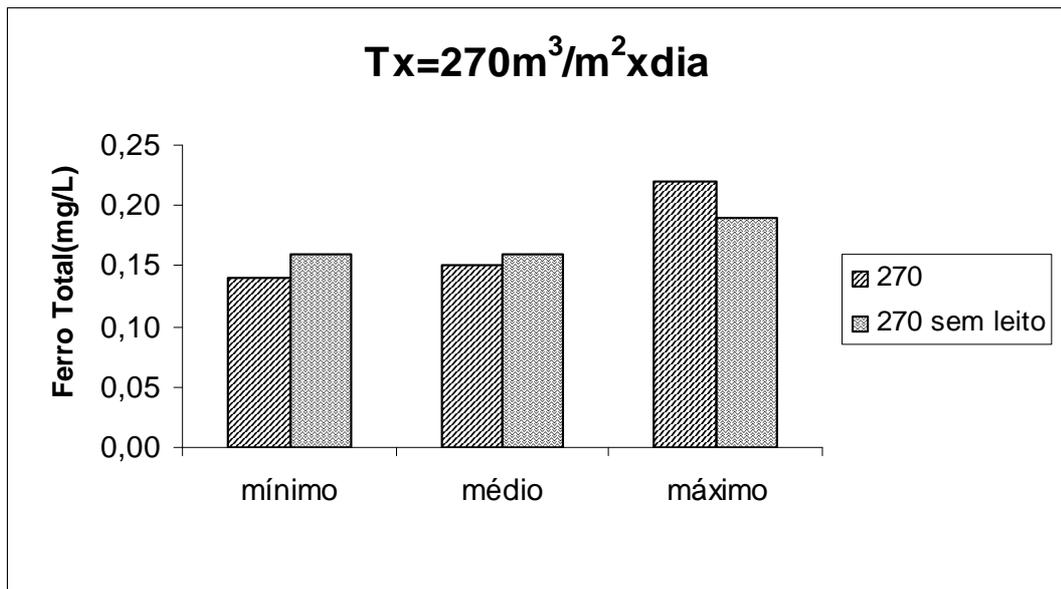


Gráfico 40 - Avaliação do comportamento para taxa de 270m³/m²xdia

O tempo de duração das carreiras de filtração apresentou um aumento médio de 60% com a utilização do leito de contato.

O Gráfico 41 apresenta o tempo de duração das carreiras de filtração com e sem leito para taxa de 270m³/m²xdia.

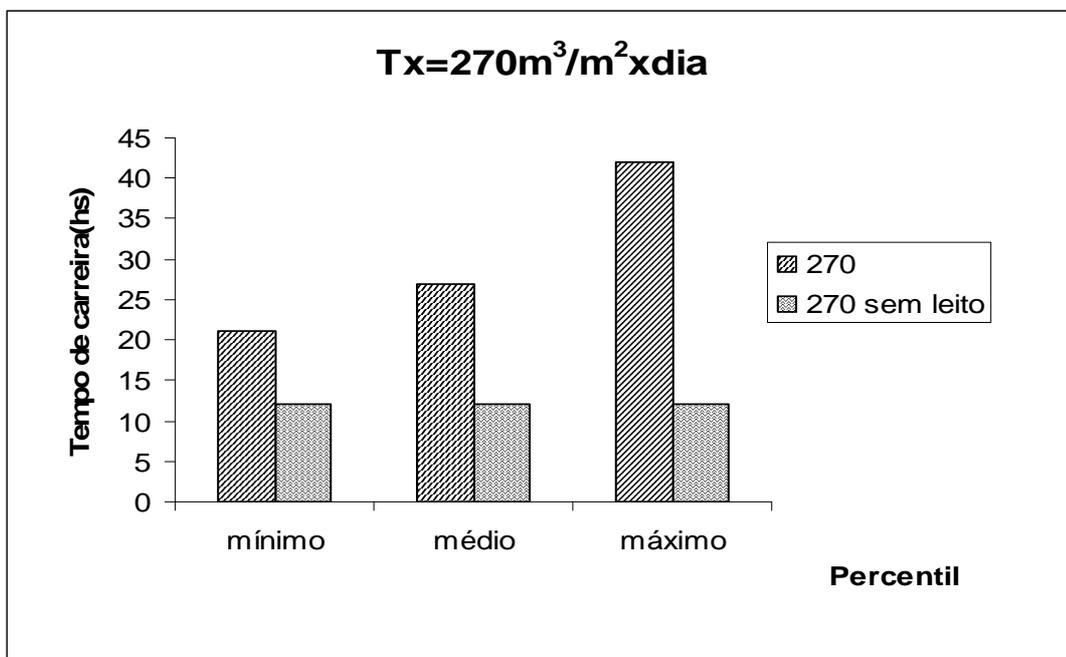


Gráfico 41 - Duração da carreira de 270m³/m²xdia(hs)

- Taxa de 360 m³/m²xdia em função da unidade de contato

A taxa de filtração de 360 m³/m²xdia com leito apresentou valores de ferro total para AF entre 0,14 a 0,19mg/L e para a mesma taxa sem leito, os valores variaram entre 0,15 a 0,23mg/L, tendo em média uma redução no ferro total de cerca de 12% na qualidade de água produzida, utilizando-se o leito de contato para taxa de 360m³/m²xdia ligeiramente satisfatórios na qualidade da água para os ensaios na existência do leito.

No Gráfico 42 é apresentado o comportamento do Ferro Total na AF, para taxa de 360m³/m²xdia, em função da presença do leito de contato, sendo nas abscissas apresentados os valores mínimos, médios e máximos obtidos para cada situação estudada.

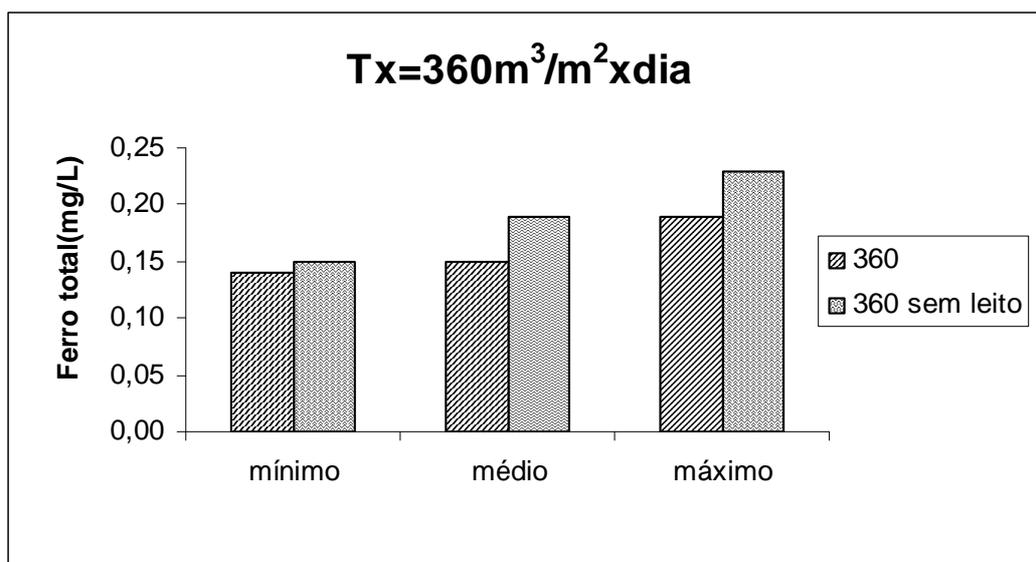


Gráfico 42 - Avaliação do comportamento para taxa de 360m³/m²xdia

Durante a realização dos ensaios, as carreiras de filtração apresentaram um acréscimo médio de 79% com a presença do leito de contato.

O Gráfico 43 apresenta o tempo de duração das carreiras de filtração com e sem leito para taxa de 360m³/m²xdia.

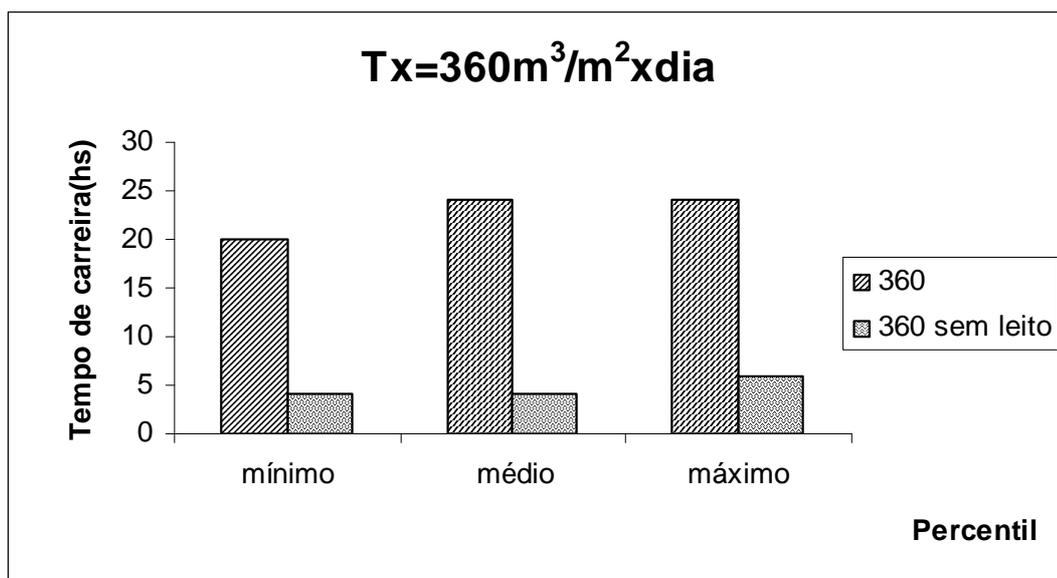


Gráfico 43 - Duração da carreira de 360 m³/m²xdia(hs)

6.1.1.1 Em Função da Presença do Leito de Contato

Observamos os valores de ferro total na AF ligeiramente mais satisfatórios para a taxa de filtração de 180m³/m²xdia, em relação as taxas de 270m³/m²xia e 360m³/m²xida, sendo a taxa de 180m³/m²xdia o parâmetro de filtração que apresentou as melhores condições de qualidade de água produzida.

Nota-se também que os valores obtidos, para as taxas de filtração estão de acordo com a Portaria 518/04 do Ministério da Saúde que estabelece VMP para concentração de ferro total em 0,3mg/L.

No Gráfico 44 é apresentado o comportamento do Ferro Total na AF, para as taxas de 180m³/m²xdia, 270 m³/m²xdia e 360 m³/m²xdia em função da presença do leito de contato, sendo nas abscissas apresentados os valores mínimos, médios e máximos obtidos para cada situação estudada.

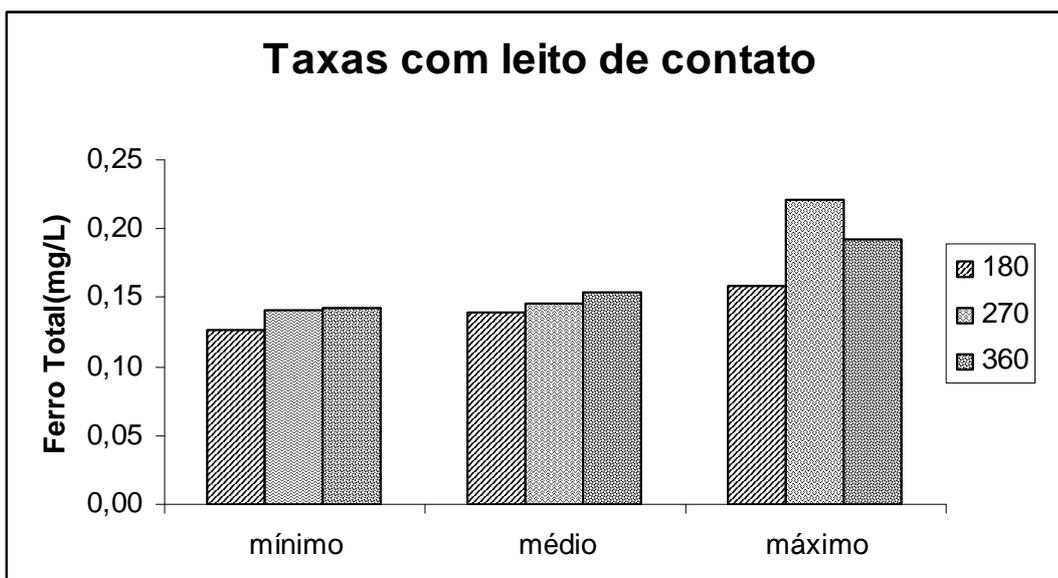


Gráfico 44 - Variação das taxas 180 m³/m²xdia e 270 m³/m²xdia e 360 m³/m²xdia em função da presença do leito de contato

Comparando a duração das carreiras para a taxa de 180m³/m²xdia com leito de contato, observa-se que a produção de água foi realizada em média de 41h, enquanto que para taxa de 270m³/m²xdia a duração foi em média de 30h e para taxa de 360m³/m²xdia foi realizada em um período de 22,7h.

Observa-se que a taxa de filtração está relacionada à duração da carreira de filtração, isto é, quanto menor for a taxa de filtração para determinada qualidade de água bruta, maior será carreira de filtração.

O Gráfico 45 apresenta o tempo de duração das carreiras de filtração em relação as taxas de 180m³/m²xdia, 270 m³/m²xdia e 360 m³/m²xdia em função da presença do leito de contato.

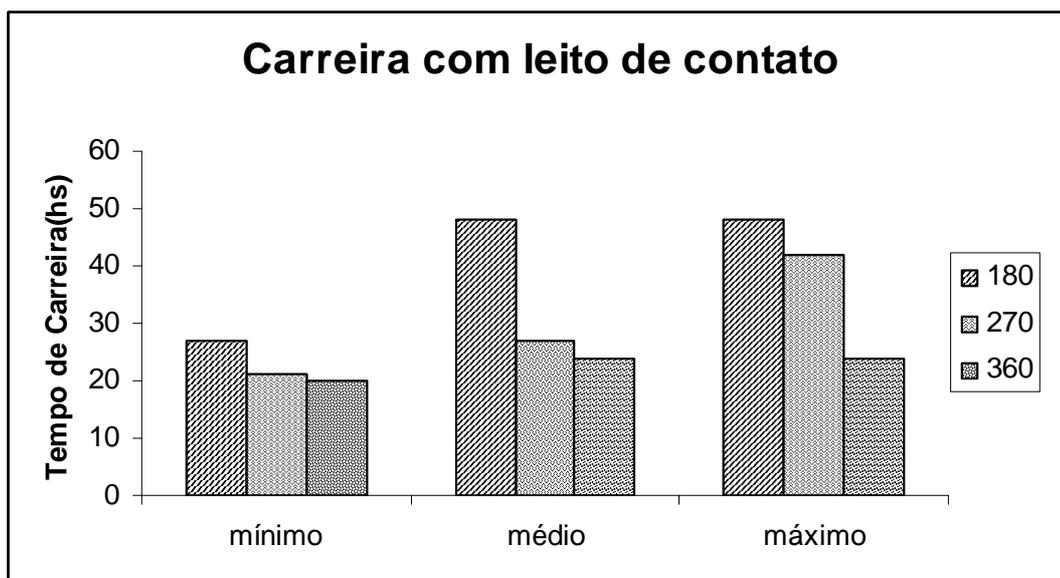


Gráfico 44 - Duração da Carreira em função da presença do leito de contato

6.1.1.2 Em Função da Ausência do Leito de Contato

Pode-se observar valores de ferro total praticamente iguais para as taxas estudadas de $180\text{m}^3/\text{m}^2\text{xida}$, $270\text{ m}^3/\text{m}^2\text{xida}$ e $360\text{ m}^3/\text{m}^2\text{xida}$, representando boa qualidade de água do efluente condizente ao Padrão de Potabilidade.

No Gráfico 46 é apresentado o comportamento do Ferro Total na AF, para as taxas de $180\text{m}^3/\text{m}^2\text{xidia}$, $270\text{ m}^3/\text{m}^2\text{xidia}$ e $360\text{ m}^3/\text{m}^2\text{xidia}$ em função da ausência do leito de contato, sendo nas abscissas apresentados os valores mínimos, médios e máximos obtidos para cada situação estudada.

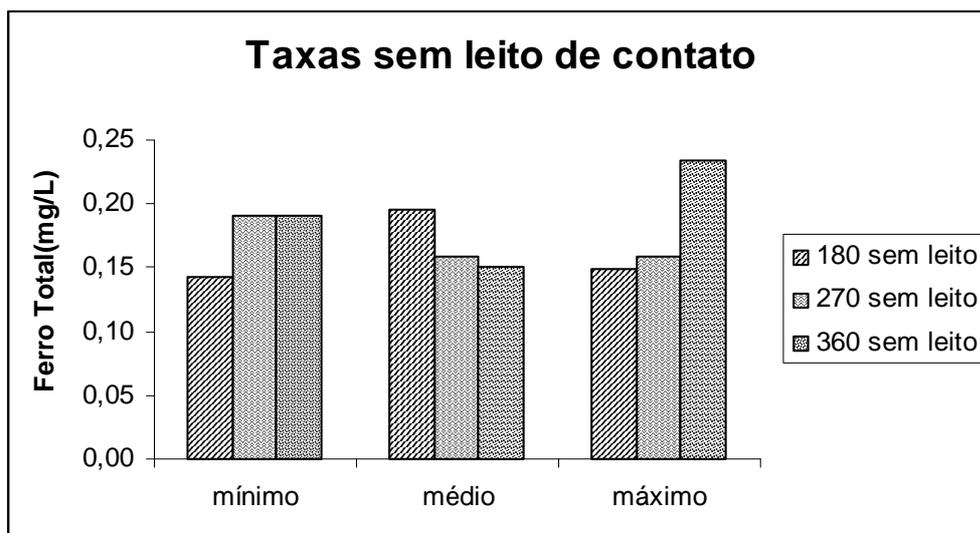


Gráfico 45 - Variação das taxas 180m³/m²xdia, 270m³/m²xdia e 360m³/m²xdia em função da ausência do leito e contato

O tempo de duração da carreira para taxa de 180m³/m²xdia sem leito de contato foi em média 16h, enquanto que para taxa de 270 m³/m²xdia o tempo foi de 12h e para 360 m³/m²xdia foi de 4,7h. Observa-se um aumento de 185% quando na utilização do leito de contato, o que resulta em lavagens com intervalos menores e, conseqüentemente, em maior volume de água para realização da operação de limpeza dos meios filtrantes.

O Gráfico 47 apresenta o tempo de duração das carreiras de filtração em relação as taxas de 180m³/m²xdia, 270 m³/m²xdia e 360 m³/m²xdia na ausência a do leito de contato.

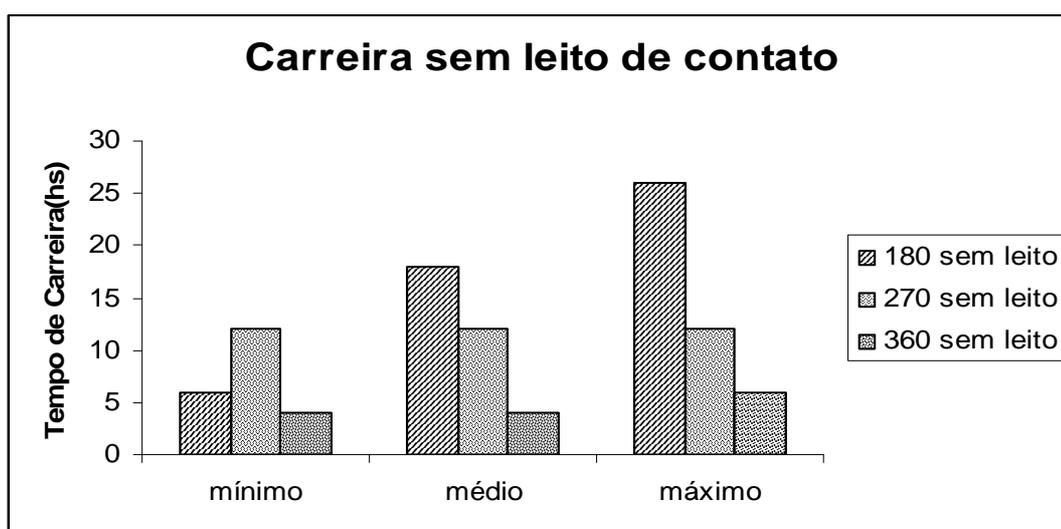


Gráfico 46 - Duração da Carreira em função da presença do leito de contato

6.1.1.3 Em Função da Ausência e Presença do Leito de Contato.

Comparando os resultados obtidos no monitoramento com leito de contato, constatou-se que os valores de ferro total para AF apresentaram-se com melhor qualidade, além de maior duração das carreiras de filtração com conseqüente maior produção. Entretanto os valores obtidos de ferro total na AF, sem a existência do leito de contato foram sensivelmente maiores, no entanto, adequados aos padrões de potabilidade.

Verificou-se que, quanto maior a taxa de filtração empregada, mais elevados resultaram os valores de ferro decorrentes na carreira de filtração e mais rapidamente iniciava-se a colmatação do meio filtrante tanto na ausência como na presença do leito de contato.

Tanto o filtro rápido com e sem o leito demonstrou capacidade de reter as concentrações elevadas de ferro na AB, sendo todos os valores obtidos dentro do estabelecido pela Portaria nº518/04.

No Gráfico 47 e Gráfico 48 são mostrados os valores de ferro da AF em função da existência e não utilização do leito de contato para as taxas de 180m³/m²xdia, 270 m³/m²xdia e 360 m³/m²xdia.

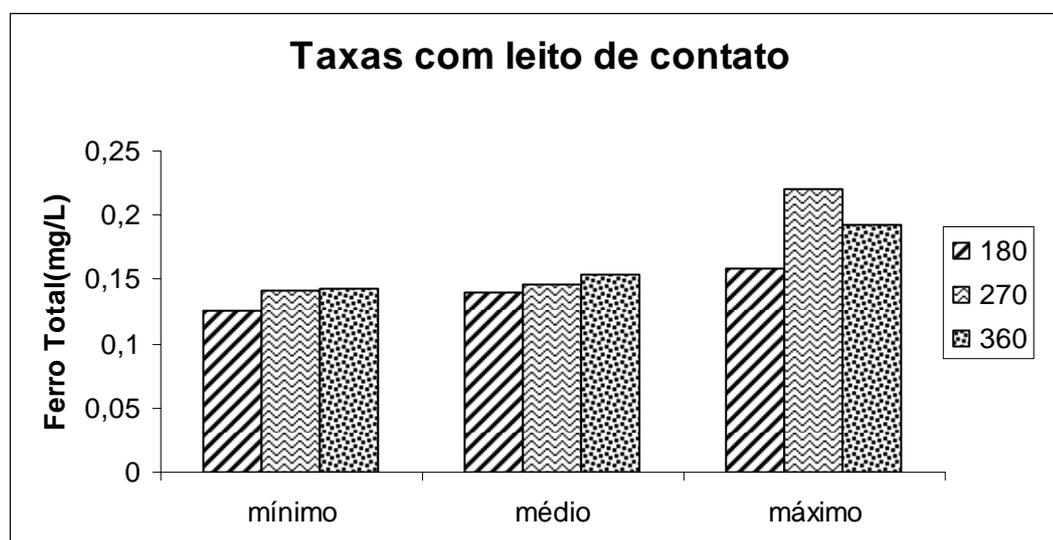


Gráfico 47 - Avaliação comparativa das taxas de 180m³/m²xdia, 270m³/m²xdia e 360m³/m²xdia sem leito de contato

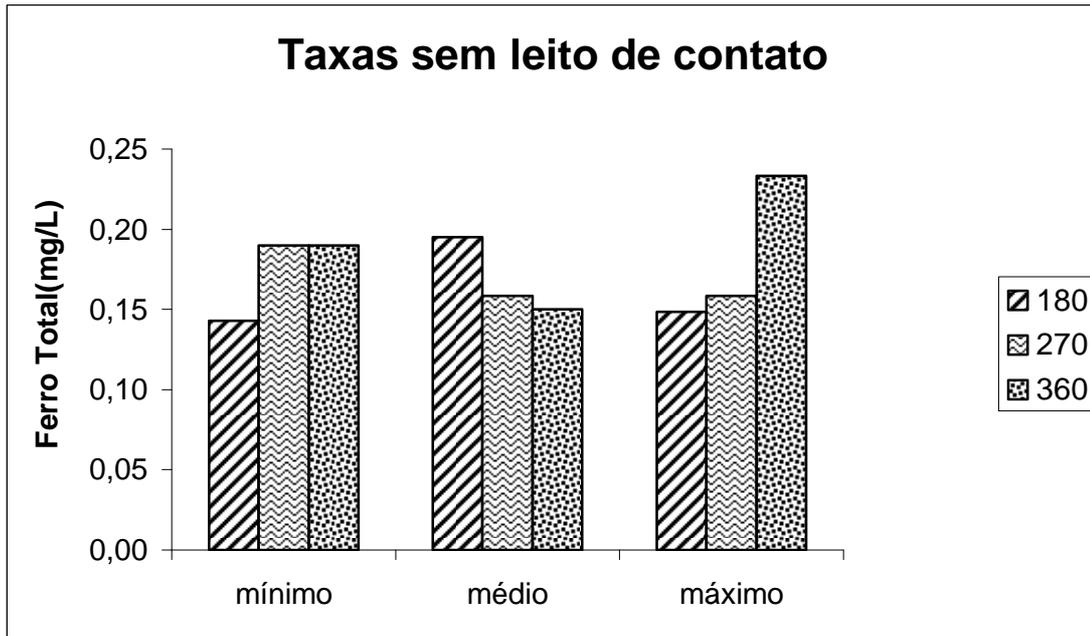


Gráfico 48 - Avaliação comparativa das taxas de 180m³/m²xdia, 270m³/m²xdia e 360m³/m²xdia sem leito de contato

A leitura dos piezômetros permitiu verificar a evolução da perda de carga nas subcamadas do meio filtrante para programação de lavagens dos filtros. O encerramento ocorreu quando o nível de água atingiu a tubulação de descarga do filtro. Esta situação de perda de carga foi verificada para todas as taxas de filtração empregadas.

Ressalta-se um decréscimo médio no tempo de carreira de 35% para as três taxas estudadas quanto a utilização da unidade do leito de contato, significando uma analogia entre a taxa de filtração e tempo de duração de carreiras, pois quanto menor a taxa de filtração, maior a duração da carreira. Conforme verificado nos Gráfico 49 e Gráfico 51.

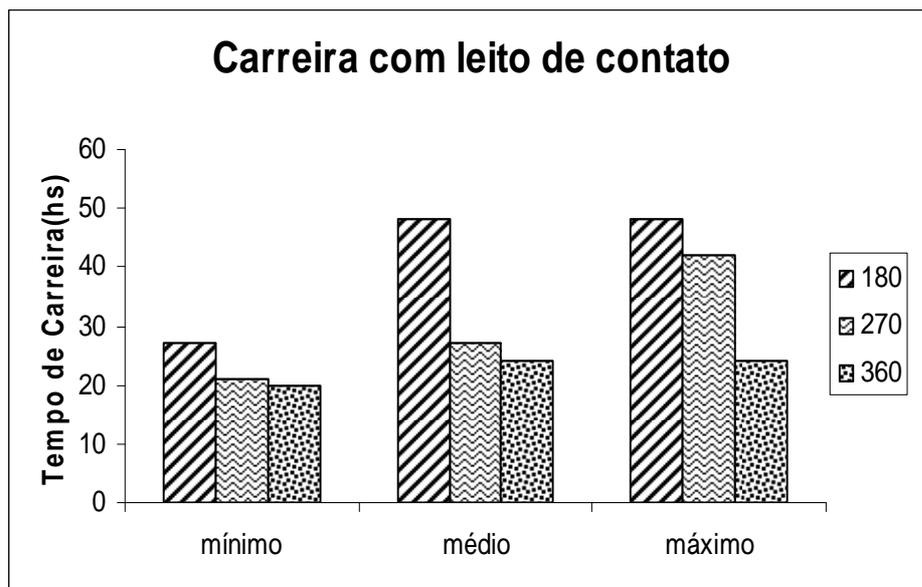


Gráfico 49 - Avaliação comparativa da duração de carreira das taxas de $180\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$, $270\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ e $360\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ sem leito de contato

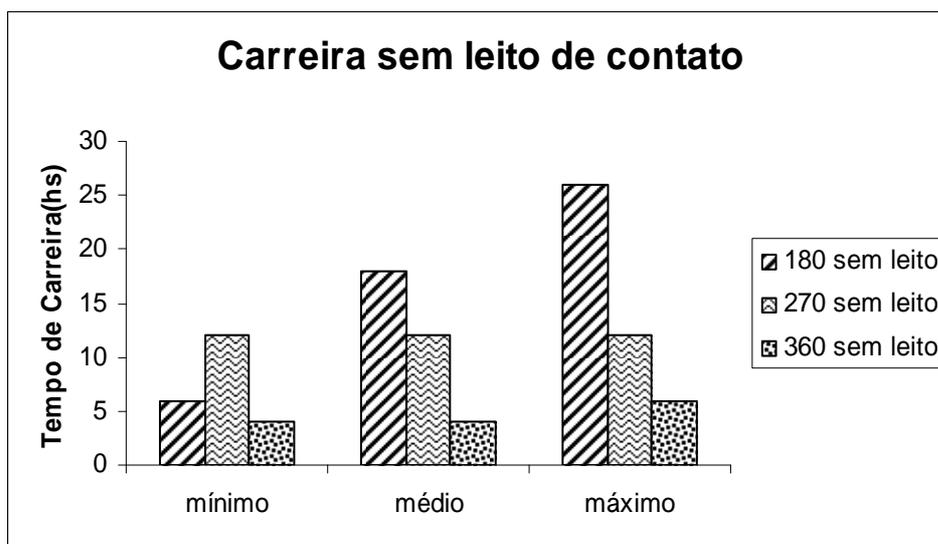


Gráfico 50 - Avaliação comparativa da duração de carreira das taxas de $180\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$, $270\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ e $360\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ com leito de contato

7 CONCLUSOES E RECOMENDAÇÕES

Baseado nos resultados obtidos no monitoramento da Estação de Tratamento piloto tipo desferrização, pode concluir que:

- Para as taxas de $180\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$, $270\text{ m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ e $360\text{ m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ com leito de contato na AF foram verificados na maioria dos casos valores de turbidez inferiores ao estabelecido pela Portaria nº 518/04 que é de 1uT.
- Na aplicação da taxa de $180\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ foi evidenciada, com o leito de contato na AF, a eficiência na remoção de ferro total em torno de 93% a 94%, enquanto que para remoção de ferro total sem a utilização do leito foi de 91% a 93%, que resultou em valores semelhantes entre si.
- A taxa de filtração de $270\text{ m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ com leito de contato na AF apresentou uma eficiência na remoção de ferro total entre 85% a 95% e para a taxa de filtração sem o leito de contato foi de 91% a 93%.
- No emprego da taxa de $360\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ com o leito de contato na AF, a eficiência de filtração foi de 91% a 92%, no entanto para a taxa de $360\text{ m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ na ausência do leito de contato, variou entre 88% a 93%.
- A eficiência de remoção de ferro total para a taxa de $180\text{ m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ no leito de contato foi de 59% a 69%, significando uma melhora na unidade subsequente do sistema de filtração. Para taxa de filtração de $270\text{ m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$, a eficiência no processo de remoção de ferro total no leito de contato foi de 45% a 71%. Já para a taxa de filtração de $360\text{ m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ a eficiência de remoção de ferro total foi em torno de 66% a 82%.
- As carreiras de filtração, na presença do leito de contato, para as taxas de $180\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$, $270\text{ m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ e $360\text{ m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$, apresentaram tempo de duração em média de 41h, 30h e 22,7h, respectivamente.

- Para as carreiras de filtração nas taxas de $180\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$, $270\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ e $360\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$, na ausência do leito de contato, a duração média foi de 16h, 12h e 4,7h, respectivamente.
- Pode-se concluir que a carreira de filtração está relacionada com a taxa de filtração, pois quanto menor é a taxa de filtração, maior é o tempo de duração das carreiras.
- Para as taxas estudadas, conclui-se que o leito de contato é uma unidade indispensável para águas com elevados teores de ferro total em torno de 2mg/L , já que uma parcela considerável de ferro fica retida no mesmo, implicando na diminuição do número de lavagem dos filtros e conseqüentemente menor consumo de água e energia elétrica para acionamento das bombas.

Para otimização de tratamento de água tipo desferrização, recomenda-se ainda a realização de outros trabalhos, como por exemplo:

- Utilizar as taxas de filtração com leito de contato de $270\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ e $360\text{m}^3/\text{m}^2\text{xdia}$ acima da NBR 12.216/92, pois apresentaram bons resultados de eficiência de remoção de ferro, o que contribui no menor custo operacional e de implantação do sistema;
- Estudos alternativos de produtos químicos na avaliação de Estação de Tratamento de Água tipo desferrização em função do parâmetro pH, uma vez que existe uma faixa ótima de pH de oxidação do ferro de 7 a 8;
- Estudar outras alternativas de meio filtrante na eficiência do processo de remoção de ferro total;
- Modificar a camada suporte na adequação e otimização do filtro rápido;
- Averiguar o desempenho das ETAs tipo desferrização para teores de ferro acima e abaixo do valor médio obtido deste trabalho que foi de 2mg/L .

REFERÊNCIAS

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the Examination of Water and Wastewater**. 19th. Ed. Washington, 1995.
- AMERICAN WATER WORKS; AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Water treatment plant design**. 4th Ed. New York: McGraw Hill, 1991.
- AMIRTHARAJAH, A. Some theoretical and conceptual views of filtration. **Jour AWWA**, v.80, n. 12, p.35-46, Dec. 1988.
- ARAI, M. et al. **Considerações sobre a idade do Grupo Barreiras no Nordeste do Estado do Pará**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35., Belém, 1988. Anais... Belém: SBG, 1988. p. 738-752.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12216 - **Projeto de Estação de Tratamento de Água para Abastecimento Público**. Rio de Janeiro, 1992. 16 p.
- AZEVEDO, F. A. ; CHASIN, A. A. da M. **Metals Gerenciamento da Toxicidade**. Londrina: Atheneu InterTox, 2003.
- BRESAOLA JÚNIOR, R. B. A Utilização de Reatores Meio Granular, de Fluxo Ascendente , e o Emprego de Permanganato de Potássio e Cloro na Remoção de Ferro e Manganês em Águas de Abastecimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2000, João Pessoa. **Anais ...** João Pessoa: UFPB, 2000.
- BUNKER JR., D.Q et al. Pretrt considerations for air flotation: water type, coagulants and flocculation. In: IVES, K, L.; BERNHARDT, H. J., eds. **Flotation processes in water and sludge treatment**. Water Science and Technology, Great Britation, v. 31, n. 3-4, p.63-71, 1995. (verificar livro ou revista)
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro:(s.n), 1988.
- CARVALHO, M.N. et al. Remoção do Ferro da Água Potável da Grande Recife por Adorção em Matérias Naturais: Fase II – Avaliação Comparativa da Baronesa com Bagaço de Cana-de-Açúcar. In: CONGRESSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23., 2005, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: UFPB, 2005.
- CAVALGANTE, I. N.; SABADIA, J. A. B. Potencial Hídrico Subterrâneo: um Mineral Vital Ameaçado pela poluição Antrópica. **Revista de Geologia**, v. 5, 1992.

- CETESB - SP. Águas: Rios e Reservatórios. Disponível em www.cetesb.sp.gov.br/Agua/rios/variaveis.asp#ferro. Acesso em: 12 jan. 2005.
- CLEASBY, J.L; FAN, K. Predicting Fluidization and Expansion of Filter Media. **Journal of the Environmental Engineering Division**, v. 107, p. 455-471, 1981.
- CONTENTE, E. C. M. S. **Avaliação e Otimização da Unidade de Filtração da Estação de Tratamento de Água do Bolonha**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará, Belém. 2003.
- CUNHA JUNIOR, N. P. **Estudo Comparativo de filtros rápidos de camada simples de areia e de camada dupla**. 1992. 217 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.
- DACACH, N. G. **Sistemas urbanos de água. Rio de Janeiro: Livros Técnico e Científicos**, 1975. 396 p.
- DAMASCENO, F. G.; BORDALO, N. J. M.; VULÇÃO, I. L. **A Presença do Ferro em Águas de Abastecimento e os Processos de Remoção**. 1993. 58 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Sanitária) – Curso de Graduação em Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Pará, Belém, 1993.
- DI BERNADO, Luiz. **Método e Técnicas de Tratamento de Água**. Rio de Janeiro: ABES, 1993. 2 v.
- DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. 2. ed. São Paulo: Rima, 2005.
- DI BERNARDO, Luiz. **Tratamento de Água para Abastecimento por Filtração Direta**. Rio de Janeiro: ABES, Rima, 2003. 498 p.
- DROSTE, R. **Theory and Practice of Water and Wastewater Treatment**. New York: John Wiley & Sons, 1997. 800 p.
- ESTEVES, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. 2. ed. Rio de Janeiro: (s. n.), 1998.
- FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. M. **Hidrogeologia conceitos e aplicações**. Fortaleza: CPRM, 1997.
- FERRAZ, C. F.; PATERNIANI, J. E. S. Eficiência da Filtração Lenta e Areia e Manta não Tecida no tratamento de Águas de Abastecimento para Pequenas Comunidades. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27., 2000, João Pessoa. **Anais ...** João Pessoa: UFPB, 2000.

- FERREIRA FILHO, S. S. et al. Avaliação do Permanganato de Potássio como Agente Pré-Oxidante na Estação de Tratamento de Água do Alto da Boa Vista. In: CONGRESSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23., 2005, Campo Grande. **Anais ...** Campo Grande : UFMG, 2005.
- FERREIRA FILHO, S.S. **Estudo comparativo do comportamento hidráulico de meios filtrantes de areia-antracito e areia-carvão ativado granular no tratamento de água.** 1993. 407 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- FERREIRA, M. B. **Projeto e Avaliação de Micro-sistema de Remoção de Ferro.** 2003. 62 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Sanitária) – Curso de Graduação em Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Pará, Belém, 2003.
- FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. **Manual Técnico de análise de Água para Consumo Humano.** Brasília: Ministério da Saúde, 1999.
- GÓES, A. M. et al. Modelo deposicional preliminar para Formação Pirabas, nordeste do Pará. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Belém, v. 2, p 3 - 15, 1990.
- HAMMER, M. J. **Sistema de Abastecimento de Água e Esgotos;** Tradução de Sérgio A. S. Almeida. Rio de Janeiro: Técnicos e Científicos, 1979.
- HELLER, L.;CASSEB, M.M.S. Abastecimento de Água. In:____BARROS, R. T. V. et al. **Manual de Saneamento e Proteção Ambiental para os Municípios.** Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG. 2001. cap. 4, p. 63-111.
- IVES K. J. **Mathematical models of deep bed filtration: the scientific basic of filtration.** Netherlandes: Nato Advanced Study Institute, 1975.
- LEME, F. P. **Teoria e Técnicas de Tratamento de Água,** 2. ed. Rio de Janeiro: ABES, 1990.
- LIBÂNIO, M. et al. Avaliação em escala real da influência da espessura do leito filtrante do desempenho de unidade de escoamento descendente. In: CONGRESSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 20., 1999, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES. 1999.
- LOBATO, S. J. M. Implantação do Processo por Ar Dissolvido em Substituição ao Processo de Decantação de Alta Taxa no Pré-Tratamento da Água Bruta de Estação de Tratamento de Água de Mantenópolis-ES. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19., 1997, João Pessoa. **Anais ...** João Pessoa : UFPB, 2000.
- LOPES, L. N. A. **Potabilização das águas Subterrâneas Com Elevada Concentração de Ferro.** TCC (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Sanitária).Universidade Federal do Pará, Belém,

- MANAHAN, S. **Environmental Chemistry**. Disponível em: <www.trinkwasserspezi.de/enteisk.htm>. Acesso em: 05 jan. 2005.
- MICHALAKOS, G. D. et al. Removal of iron from potable water using a trickling filter. **Water Research**, v. 31, p. 991- 996, 1997.
- MORUZZI, R. B.; PATRIZZI. L. J.; REALI, M. A. P. Remoção de Ferro e Manganês Complexados com Ácido Húmico Presentes em Águas para Abastecimento Utilizando a Flotação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2001, Paraíba. **Anais ...** Paraíba : UFPB, 2001.
- O CAMINHO da água. **Métodos Gerais de Tratamento de Água**. Disponível em: <www.ocaminhodaagua.hpg.ig.com.br/filtr.html>. Acesso em: 12 out. 2006.
- OLIVEIRA, Josafá Ribeiro de (Org.). Projeto Estudos Hidrogeológicos da Região Metropolitana de Belém e Adjacências. Belém: CPRM, 2002.
- PÁDUA, V. L.; DI BERNARDO, L. Desempenho de filtros de areia em função da qualidade da água decantada. In: SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 9., 2000, Porto Seguro. **Anais...** Porto Seguro, 2000.
- PÁDUA, V. L. Investigação experimental visando o emprego de mantas sintéticas não tecidas na filtração de suspensões flocculentas no tratamento de água. São Carlos. 1999. 296 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
- PEREIRA, E.R.; OLIVEIRA, W.; TANCREDI, A. C. Águas Subterrâneas da Região Metropolitana de Belém. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 4., Belém. **Anais...** Belém: SBG, p.120-123.
- PICANÇO, F. E. L. **Fatores responsáveis pelos elevados teores de ferro em águas subterrâneas na região metropolitana de Belém**. Belém: UFPA, 2000.
- PIUCI, J.; FENZEL, N. **Ocorrências, Conseqüências e Remoção do Ferro nas Águas**. Belém: UFPA/NCGG, 1978.
- PROÁGUA PERFURAÇÕES. **Relatório Final da Construção de um poço Tubular Profundo no Campus da Universidade Federal do Pará**. Belém, 2000.
- REALI, M. A. P. ; DOMBROSKI, S. A. G. Influência da flocculação na flotação por ar dissolvido. In: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL, 25., 1996, Cidade do México. **Anais ...** Cidade do México : AIDIS, 1996.
- RIBEIRO, L. M. Dióxido de cloro. In: CONGRESSO INTERRAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27., 2000, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, 2000.

- RICHTER, Carlos A.; AZEVEDO NETTO; José M. de. **Tratamento de água: tecnologia atualizada.** São Paulo: Edgard Blucher, 2003. 332 p.
- ROSSETTI, D. F.; GOES, A.M; TRUCKENBRODT, W. Estudo Paleoambiental e Estratigráficos dos Sedimentos Barreiras e Pós-Barreiras na Região Bragantina, Nordeste do Pará. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi.** Belém, n. 1, p. 25-71, 1989. (Série Ciência da Terra, 1)
- SAUMA FIHO, M. **As Águas subterrâneas de Belém e adjacências: influência da formação pirabas e parâmetros físico-químicos para medidas de qualidade.** 1996. 128 f. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) – Curso de Pós Graduação em Geologia e Geoquímica, Universidade Federal do Pará, Belém, 1996.
- SILVA, S. O., LOEWENSTEIN, P. Contribuição à Geologia da Folha de São Luís (SA- 23) no Estado do Pará; II – Novas Localidades e Razão magnésio/cálcio do calcário Pirabas. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi.** Belém, n.13, p.17, 1968. (Nova Série Geologia).
- SIMÕES, M. F. Coletores – pescadores ceramistas do Litoral do Salgado (Pará). **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi.** Belém, v.78, p.1 – 33, 1981. (Nova Série Antropologia).
- TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água.** 2. ed. São Paulo: (s.n), 2005.
- VALENCIA, J. A. **Teoría y practica de la purificación del agua.** Florida: AWWA, 1992.
- VIANNA, M.R. **Hidráulica aplicada às Estações de Tratamento de Água.** Belo Horizonte: Imprimatur, 2002.
- WIECHETECK, G.K. **Influência do método de lavagem nas características de Carvões Antracitoso e Betuminoso utilizados em meio filtrante.** 1996, 169f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.
- WIECHETECK, G.K.; MOLINA, F. R. O.; DI BERNARDO, L. **Influência do método de lavagem nas características de carvão antracitoso utilizado em meio filtrante.** In: CONGRESSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, 19., 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 1997.

A N E X O S

ANEXO A: DIMENSIONAMENTO DA ETA – PILOTO

Cálculo do Aerador			
Vazão		40m ³ /d	
		1,67m ³ /h	
		0,00046m ³ /s	
		0,46L/s	
		40m ³ /d	
Tipo de Aerador	Tabuleiro		
Forma do Aerador	Quadrada		
Taxa de aplicação de aeração			
Taxa de aplicação de aeração	$T_{X_{máx}} =$		600m³/m²*d
Area das bandejas dos aeradores	$A = Q(m^3/d)/Tx$		0,0667m ²
Lado da bandejas dos aeradores	$A^{1/2}$		0,26m
Espaçamento entre as bandejas	0,3 a 0,75 m		0,20m
Altura das bandejas	0,15 m		0,15m
n° de bandejas	$t^2 * g / 2h$		5unid
	t= tempo de exposição da água ao ar		1,8seg
	g= gravidade		9,81m ³ /s
	h = altura útil		2,10m
Dimensões da bandeja			
Distribuidora	0,30 x 0,30 x 0,15m		
coque (4 band)	0,30 x 0,30 x 0,15m		
coletora	0,80 X 0,80 x 0,40m		
Diâmetro do coque	10mm		
Diâmetro do furo	3mm		

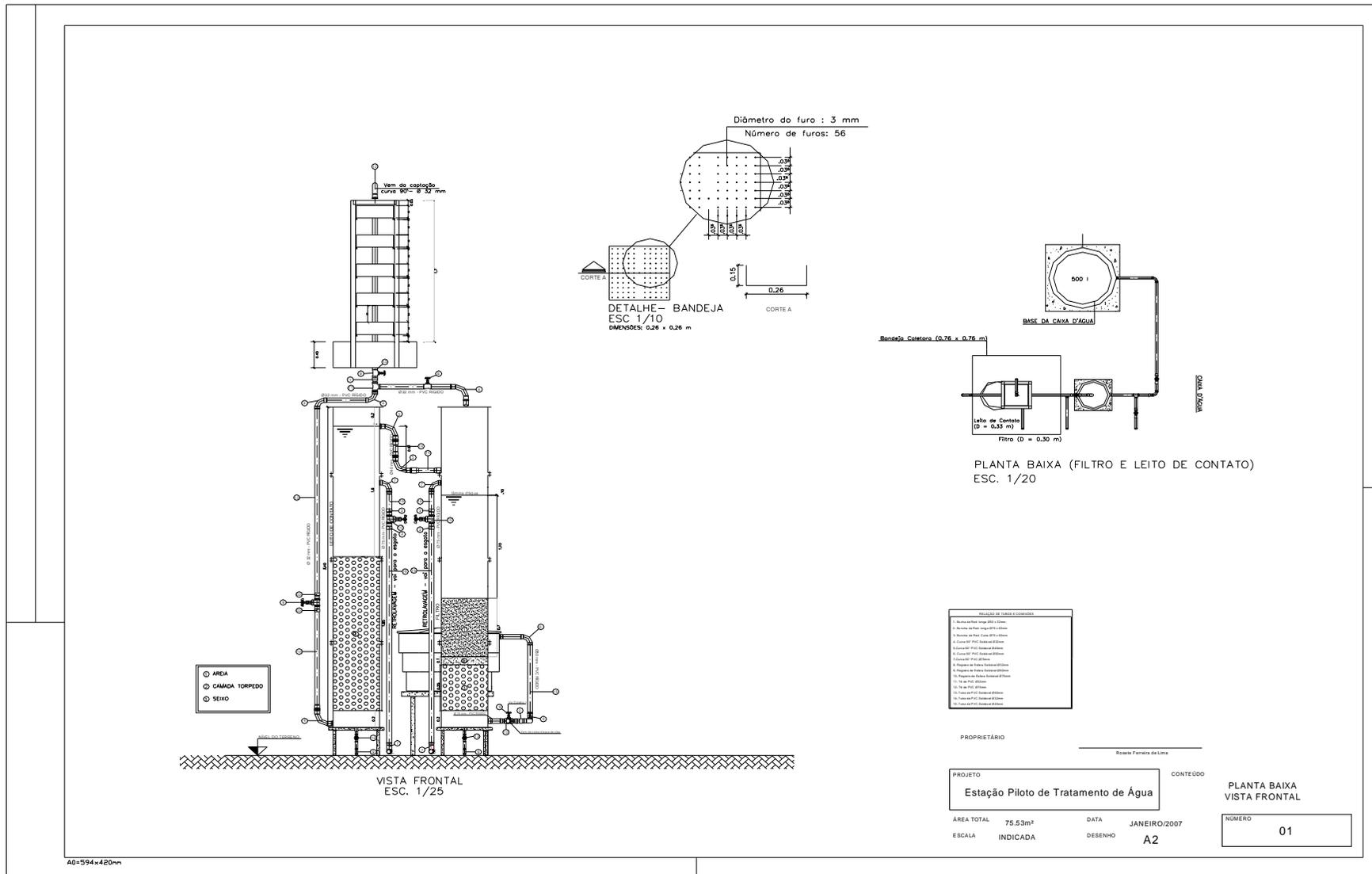
Furos da bandeja		
Área do furo		
Diâmetro do furo		4mm
Área do furo		0m ²
Somatória dos furos		0,000699506
Nº de furos		56furos
Posicionamento dos furos		
nl=nc = (nº de furos) ^{0,5}		
nl=nc	0	
Dimensão entre os furos (e)		
L/nº de furos		0,0052m
Diâmetro da tubulação de entrada		D= K * (QL) ^{0,5} ; K = 1,5 0,032
Diâmetro da tubulação de saída		D= K * (QL) ^{0,5} ; K = 1,5 0,04
Leito de contato		
Área filtrante	Af = Q * 86.4 / T _{xmáx}	0,11m ²
Lado do Leito de Contato	Af = L ²	0,33m ²
Diâmetro	D _{af} = K * (Qm ³ /s ^{0,5}); K = 1,5	0,032m
Altura Total do Leito	Ht=1,85+1,6+0,15	3,85
Camadas do leito de contato		
Seixo rolado	Especificação	Espessura
Seixo 1	5/16" e 1/8"	1,4m
Seixo 2	3/8" e 5/16"	0,1m
Seixo 3	3/4" e 3/8"	0,1m
Seixo 4	1 1/2" e 3/4"	0,15m
Seixo 5	2" e 1 1/2"	0,1m

DIMENSIONAMENTO DA ETA – PILOTO

Cálculo do Filtro Rápido Descendente			
Vazão		40m ³ /d	
		1,67m ³ /h	
		0,00046m ³ /s	
		0,46L/s	
Método de operação			
Método de operação		Taxa constante	
Características gerais do filtro			
Taxa de filtração máxima	$T_{x_{m\acute{a}x}} =$	360d	m ³ /m ² .
Área filtrante	$A_f = Q * 86.4 / T_{x_{m\acute{a}x}}$	0,11m ²	
Lado do filtro	$A_f = L^2$	0,30m	
Altura total	$H_t =$	3,4m	
Nº de unidades	$N =$	1unid	
Vazão por filtro	$Q_f =$	1,67m ³ /h	
Diâmetro de entrada do filtro	$D_{afl} = K * (Q_{m^3/s}^{0,5}); K = 1,5$	0,032m	
Diâmetro de saída da água filtrada	adotar uma polegada maior que o de entrada		mm
Filtro de camada simples (areia)			
Camada de areia			
Espessura da camada	E_c	0,70m	
Coeficiente de desuniformidade:	Coef desun	1,3	
Tamanho efetivo:	T_e	0,55mm	
Tamanho dos grãos:	T_g	0,85mm	
Coeficiente de esfericidade:	C_e	0,78	
Porosidade:	P_e	0,4	
Coeficiente de permeabilidade:	K_o	0,0018	
Cálculo da perda de carga no leito filtrante	H_{lf}	1,64m	
		7cm	
Velocidade média intersticial:	V_{mint}	900d	m ³ /m ² .
Camada suporte			
Seixo rolado	Especificação	Espessura	
Camada torpedo	-	0,1m	
Seixo 1	5/16" e 1/8"	0,1m	
Seixo 2	3/8" e 5/16"	0,1m	
Seixo 3	3/4" e 3/8"	0,1m	
Seixo 4	1 1/2" e 3/4"	0,15m	
Seixo 5	2" e 1 1/2"	0,1m	
Reservatório de lavagem			

Área de um filtro	Af =	0,11m ²	
Velocidade de Lavagem:	VL =	0,9m/min	
Duração da Lavagem:	TL =	10min	
Velocidade de água na interface:	Vint =	0,5m/min	
Duração de descarga de funda (média):	TD =	1min	
Vazão de Lavagem, em m ³ /min:	QL= VL x Afa	0,100n	m ³ /mi
Volume gasto na Lavagem	Vollav =Af x TL	1,11m ³	
Vazão de água na interface	Qint =af x Vint x 60	3,33m ³ /h	
Volume gasto na descarga de fundo	Voldescarga =af x Vint x tD	0,056m ³	
Calha coletora de água de lavagem			
Quantidade de calha :(1,2 < ncalha <2,1)	Ncalha	1,00und	
Velocidade ascensional	Vasc	0,90m/min	
Vazão de lavagem	QL	0,00167m ³ /s	
Vazão em cada calha	QC	0,00167m ³ /s	
Diâmetro da tubulação de entrada de água de lavagem	D= K * (QL) ^{0,5} ; K = 1,5	0,075m	
Diâmetro da tubulação de coleta de água de lavagem	D= K * (QL) ^{0,5} ; K = 1,6	0,075m	
Altura de água sobre o leito		1,6m	
Altura do leito filtrante		1,1m	
Expansão do leito filtrante		20%	
Fundo falso			
Diâmetro da camada torpedo		0,1m	
Diâmetro do furo		0,005m	
Área do furo		0,000020m ²	
Somatória dos furos		0,00038m ²	
Nº de furos		20furos	
Posicionamento dos furos		4,5	
Distância entre os furos		0,09m	

ANEXO B: ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA PILOTO TIPO DESFERRIZAÇÃO



ANEXO C: METODOLOGIA DAS ANÁLISES DO FERRO TOTAL E FERRO FERROSO

FERRO TOTAL

Matriz: Água, Água Residuária e Água Salgada

Fonte: Adaptado do Standard Methods (1998)

Método: 8008 da Hexis Científica

Equipamento: DR 2500

PROCEDIMENTO:

1ª ETAPA – APARATO EXPERIMENTAL

1. Becker de 50mL; 100mL;
2. Pipetas de 1mL; 10mL;
3. Proveta graduada de 100mL;500mL.
4. Balão volumétrico de 100mL; 200ml;
5. Chapa Aquecedora;
6. Papel de filtração de 0,45 µm;
7. pHmetro;
8. Pisseta com água deionizada;
9. Papel absorvente.

2ª ETAPA – REAGENTES

1. Ácido Nítrico Concentrado.

Adicionar 5mL de HNO₃ em cada litro de amostra.

2. Ácido Clorídrico 1:1.

Adicionar 5mL de HCL 1:1 em cada 100mL da amostra.

3. Hidróxido de Sódio 5,0 N.

Adicionar lentamente solução padrão de NaOH 5,0 N verificar o pH da amostra após cada adição.

3ª ETAPA – DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL.

É necessário digestão da Amostra.

Disgetão Branda EPA com placa aquecedora para análises de metais, apenas.

Procedimento:

1. Acidifique a amostra, no momento da coleta, com ácido nítrico concentrado, adicionando 5 mL de ácido por litro da amostra;

2. Transfira 100 mL da amostra (bem homogeneizada) a um béquer ou balão adicione 5 mL de ácido clorídrico (HCL) 1:1.
3. Aqueça-os em banho - Maria ou placa aquecedora até que o volume tenha sido reduzido para 15-20 mL. Faça com que a amostra não entre em ebulição.
4. Após este tratamento, a amostra deve ser filtrada para remover qualquer material insolúvel.
5. Ajuste o pH da amostra digerida para 4 com adição lenta de solução padrão de NaOH 5,0 N. Homogenize e verifique o valor de pH após cada adição.
6. Quantitativamente transfira a amostra (utilizando água desmineralizada) para um balão volumétrico de 100 mL e dilua para o volume final desejado com água desmineralizada. Continue com o procedimento. Esta digestão branda poderá não ser adequada para todos os tipos de amostra. Uma análise em branco também deverá ser feita utilizando o mesmo procedimento de digestão.

2. Utilizar reagentes 854.66

Passo 1: Selecione programa para ferro (Fe), FerroVer, powder pillows. Pressione: **265 READ/ENTER**. O display mostrará: **DIAL nm TO 510**. **Nota 1:** DR/2000s com software versão 3.0 ou superior mostrarão no display a sigla "P" e o número do programa. **Nota 2:** Instrumentos com software versão 3.0 ou superior não mostrarão no display a mensagem "DIAL nm TO" se o comprimento de onda estiver corretamente selecionado. O display mostrará a mensagem no passo 3. Proceda com o passo 4. **Nota 3:** Se as amostras não forem analisadas imediatamente, veja **Sampling and Storage**. Ajuste o pH da amostra (entre 3 e 5) antes de iniciar o procedimento de análise.

Passo 2: Mova o dial de comprimento de onda até que o display mostre: **510 nm**. **Nota:** Determinação de ferro total requer digestão da amostra; utilize qualquer procedimento descrito na seção 1, **Digestion**.

Passo 3: Pressione a tecla: **READ/ENTER**. O display mostrará: **mg/L Fe FV**.

Passo 4: Preencha uma cubeta com **10 mL** de amostra. **Nota:** Para verificar a precisão da análise, utilize solução padrão 1,0 mg/L de ferro (a preparação desta solução é dada em **Accuracy Check**), no lugar da amostra.

Passo 5: Adicione o conteúdo de um **FerroVer Iron Reagent Powder Pillow** a uma das cubetas. Agite. **Nota 1:** Coloração alaranjada se desenvolverá se ferro estiver presente. **Nota 2:** A precisão não será afetada se o reagente não se dissolver totalmente.

Passo 6: Pressione a tecla: **SHIFT TIMER**. Um período de reação de 3 minutos terá início. **Nota:** Amostras contendo ferrugem necessitam de pelo menos 5 minutos de reação.

Passo 7: Quando o timer bipar, o display mostrará: **mg/L Fe FV**. Preencha outra cubeta com **10 mL** de amostra (este será o branco).

Passo 8: Coloque a cubeta com o branco para o compartimento de cubetas. Feche a tampa protetora. **Nota 1:** Para amostras turvas, trate o branco com 0,2 gramas de **RoVer Rust Remover**. Agite. **Nota 2:** O sistema de fluxo contínuo **Pour-Thru Cell** poderá ser utilizado neste procedimento.

Passo 9: Pressione a tecla: **ZERO**. O display mostrará: **WAIT** e daí: **0,00 mg/L Fe FV**.

Passo 10: Dentro de 30 minutos após o timer bipar, coloque a cubeta com amostra preparada no compartimento de análise. Feche a tampa protetora. **Nota:** Se mais que 5 minutos decorrerem após o bip, a mensagem **ZERO SAMPLE** poderá aparecer. Se isso acontecer, remova a cubeta com amostra, coloque o branco e pressione a tecla **ZERO**. Após isso, coloque a cubeta com amostra e faça a leitura.

Passo 11: Pressione a tecla: **READ/ENTER**. O display mostrará: **WAIT** e, daí, o resultado em mg/L ferro será mostrado. **Nota:** No modo de lâmpada ligado direto, não será necessário pressionar a tecla **EAD/ENTER**. A mensagem **WAIT** não será mostrada no display. Quando o valor no display estabilizar, fazer a leitura.

OBSERVAÇÕES:

- É recomendável calibrar o espectrofotômetro antes de iniciar a determinação de ferro total.
- Checar a validade dos reagentes utilizados na determinação de ferro total.

PRESERVAÇÃO DE AMOSTRA PARA DETERMINAÇÃO DE FERRO TOTAL.

- Recipiente de Amostragem: frasco de polietileno de 1L.
- Volume de amostra: 1000 mL
- Preservação da amostra: adicionar 5mL de ácido nítrico por litro de amostra.
- Prazo de determinação: 6 meses.

FERRO FERROSO

Matriz: Água, Água Residuária e Água Salgada

Fonte: Adaptado do Standard Methods (1998)

Método: 8146 da Hexis Científica

Equipamento: DR 2500

PROCEDIMENTO:

1ª ETAPA – APARATO EXPERIMENTAL

1. Becker de 50mL; 100mL;
2. Pipetas de 1mL; 10mL;
3. Proveta graduada de 100mL; 500mL.
4. Balão volumétrico de 100mL; 200mL; 1000mL.
5. Papel de filtração de 0,45 µm;
6. pHmetro;
7. Pisseta com água deionizada;
8. Papel absorvente.

2ª ETAPA – CURVA DE CALIBRAÇÃO.

Preparar a solução MÃE conforme o procedimento da HACH

Procedimento:

1. Dissolva 0,7022g de sulfato ferroso amoniacal em 1 litro de água deionizada.
2. Construa a curva usando as concentrações de 0,02 a 3 mg/L.

3ª ETAPA – DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL.

Utiliza reagente Cat. Nr. 1037.69

Passo 1: Selecione programa para ferro ferroso (**Fe**), powder pillows. Pressione: **255 READ/ENTER**. O display mostrará: **DIAL nm TO 510**. **Nota 1:** DR/2000s com software versão 3.0 ou superior mostrarão no display a sigla “P” e o número do programa. **Nota 2:** Instrumentos com software versão 3.0 ou superior não mostrarão no display a mensagem “DIAL nm TO” se o comprimento de onda estiver corretamente selecionado. O display mostrará a mensagem no passo 3. Proceda com o passo 4. **Nota 3:** Analise as amostras o mais breve possível, a fim de evitar oxidação de Fe²⁺ a Fe³⁺.

Passo 2: Mova o dial de comprimento de onda até que o display mostre: **510 nm**.

Passo 3: Pressione: **READ/ENTER**. O display mostrará rapidamente: **mg/L Fe²⁺**.

Passo 4: Preencha uma cubeta com 25 mL de amostra. **Nota:** Para verificar a precisão do método, faça análise utilizando solução padrão 1,0 mg/L de ferro ferroso (consulte seção *Accuracy Check*).

Passo 5: Adicione o conteúdo de um **Ferrous Iron Reagent Powder Pillow** a uma cubeta (esta será amostra). Agite. **Nota 1:** Coloração alaranjada se desenvolverá se íon ferroso estiver presente. **Nota 2:** A precisão da análise não será afetada se o reagente não se dissolver totalmente.

Passo 6: Pressione a tecla: **SHIFT TIMER**. Um período de reação de 3 minutos terá início.

Passo 7: Quando o timer bipar, o display mostrará: **mg/L Fe²⁺**. Preencha outra cubeta com 25 mL de amostra (este será o branco).

Passo 8: Coloque o branco no compartimento de análise. Feche a tampa protetora.
Nota: O sistema de fluxo contínuo **Pour-Thru Cell**.

Passo 9: Pressione: **ZERO**. O display mostrará: **WAIT** e, daí: **0,00 mg/L Fe²⁺**.

Passo 10: Coloque a cubeta com o branco no compartimento de análise. Feche a tampa protetora.

Passo 11: Pressione: **READ/ENTER**. O display mostrará: **WAIT** e, daí, o resultado em mg/L Fe²⁺ será mostrado. **Nota:** No modo de lâmpada ligado direto, não será necessário pressionar a tecla **READ/ENTER**. A mensagem **WAIT** não será mostrada no display. Quando o valor no display estabilizar, fazer a leitura.

OBSERVAÇÕES:

- É recomendável calibrar o espectrofotômetro antes de iniciar a determinação de ferro ferroso.
- Checar a validade dos reagentes utilizados na determinação de ferro total.