

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental
Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental

FLOCULAÇÃO EM MEIO GRANULAR EXPANDIDO

Dissertação apresentada a
Universidade Federal de
Santa Catarina para a
obtenção do título de Mestre
em Engenharia Ambiental

ANELISE LEAL VIEIRA CUBAS

Orientador: Prof. Maurício Luiz Sens, Dr.

FLORIANÓPOLIS
SANTA CATARINA
JULHO - 1999

“FLOCULAÇÃO EM MEIO GRANULAR EXPANDIDO.”

ANELISE LEAL VIEIRA CUBAS

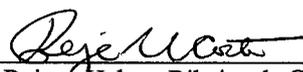
Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL
na Área de Tecnologias de Saneamento Ambiental.

Aprovado por:



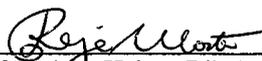
Prof. Mauricio Luiz Sens, Dr.
(Orientador)



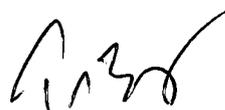
Prof. Rejane Helena Ribeiro da Costa, Dr.ª



Prof. Flávio Rubens Lapolli, Dr.



Prof. Dr.ª Rejane Helena Ribeiro da Costa
(Coordenadora)



Prof. Paulo Belli Filho, Dr.

FLORIANÓPOLIS, SC – BRASIL
AGOSTO/1999

Dedico esta dissertação:

**Aos meus pais, razão da minha existência,
de quem recebi a base da minha formação
e o incentivo constante para estudar.**

**Ao meu marido, pelo apoio e pela compreensão
em todos os momentos.**

"Pobre de quem teve medo de correr riscos. Porque este talvez não se decepcione nunca, não tenha decepções, nem sofra como aqueles que têm um sonho a seguir. Mas quando olhar para trás, porque sempre olhamos para trás, vai escutar seu coração dizendo: O que fizeste com o milagres que Deus semeou por teus dias? O que fizeste com os talentos que teu Mestre te confiou? Enterraste fundo em uma cova, porque tinhas medo de perde-los. Então esta é a tua herança: a certeza de que desperdiçaste a tua vida."

(Paulo Coelho)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Maurício Luiz Sens por ter sido mais que um orientador, um amigo, paciente e prestativo, que sempre me apoiou e acreditou no meu trabalho, nunca me negando ajuda, apesar da exigüidade do tempo disponível.

Agradeço a todo o pessoal do laboratório, funcionários e colegas que contribuíram, direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

Não poderia deixar de mencionar os professores da pós-graduação pelo enriquecimento nos meus conhecimentos e os funcionários do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental pelo apoio.

Agradeço a CAPES que possibilitou o título de mestrado um sonho possível através do fornecimento de uma bolsa de estudos.

Agradeço a minha família pelo incentivo constante, o amor, o carinho e a compreensão nos momentos difíceis, principalmente ao meu querido marido.

RESUMO

Este trabalho consiste no desenvolvimento de uma técnica de floculação em meio granular expandido para a aplicação em estações de tratamento de água compactas e transportáveis, que possam ser utilizadas em situações críticas ou de emergência. Sendo assim, esta técnica de floculação obedece a critérios como pequenas dimensões, pouca mecanização, leveza, fácil transporte e pequenas vazões. O projeto proposto é uma continuação da pesquisa realizada por SENS e HANSEN (1995) e tem por principal objetivo a busca de maiores eficiências sem aumentar a altura do reator. Para realizar a pesquisa, foi construído um piloto de floculação constituído por três colunas de vidro dispostas em ordem crescente de diâmetro, recheadas por um meio granular formado com pequenas esferas de polietileno ($d=6$ mm). A água bruta recebe o coagulante (sulfato de alumínio) na mistura rápida na entrada da primeira coluna, passa pelas três colunas causando a expansão das esferas do meio e provocando agitação na água para formar os flocos desejados; após tal processo, essa água passa por um decantador onde fica em repouso por 10 e 20 minutos para a coleta de amostras. O piloto também trabalhou apenas com 1 coluna a fim de comparar a eficiência com relação a 3 colunas. Visando aplicar esta técnica de floculação em situações que envolvam diferentes qualidades de água, submeteu-se o floculador a quatro tipos de água doce, inclusive um efluente doméstico. Foram analisadas as condições hidráulicas de funcionamento do piloto. A eficiência do floculador foi avaliada através de ensaios de turbidez, cor, sólidos e carbono orgânico total para os diferentes tipos de água doce. Com base no trabalho realizado, concluiu-se que é bem mais vantajoso trabalhar com 3 colunas do que somente com 1, pois o número de compartimentos em série aumenta, assim como o tempo de detenção e com isto a eficiência; a colocação das colunas em ordem crescente de diâmetro, que proporcionou diminuição dos gradientes de velocidade, também colaborou para esse aumento da eficiência. Observou-se que os valores de turbidez da água floculada e decantada do piloto são maiores que nas estações convencionais, porém o tempo de floculação é menor, sendo 1,27min para 1 coluna e 3,13 minutos para 3 colunas, enquanto que, nas estações de tratamento de água (ETAs) convencionais, os tempos de floculação ficam entre 20 e 40 minutos. Já para a água filtrada, os valores de turbidez foram bastante baixos, podendo, portanto, esta floculação ser utilizada como pré-floculação em estações de filtração direta. Outro fato importante observado foi que, para todos os parâmetros analisados, o piloto não apresentou melhoria significativa quanto ao tempo de funcionamento. Flocularam todos os tipos de água trabalhados, inclusive a água de lago, geralmente de difícil floculação. O piloto apresentou eficiência de 84,5% para água com bentonita, 97,3% para água natural de rio, 61% para água de lago e 98,9% para efluente doméstico, em termos de remoção de turbidez para as 3 colunas em funcionamento.

ABSTRAT

This work consists of the development of a flocculation technique in middle to granulate expanded for the application in stations of treatment of water compact and transportable, that can be used in critical situations or of emergency. Thus, this flocculation technique obeys approaches as small dimensions, little mechanization, lightness, easy transport and that gets to work to the small flows. For the accomplishment of this work a flocculation pilot constituted by three glass columns disposed in a growing order of diameter was built, stuffed by a middle formed with small spheres of polietilen ($d=6$ mm). The gross water receives the coagulant in the fast mixture in the entrance of the first column, it goes by the three columns causing the expansion of the spheres and causing an agitation in the water to form the wanted flakes, after this process this water goes by a sedimentador where it rests for 10 to 20 minutes for the collection of samples. The pilot also worked just with the third column in operation in order to compare if there is difference in the efficiency related to three columns. Seeking the application of this technique in stations of treatment of water that can work in critical situations or of emergency with different types of water, the pilot worked with several types of water, besides a wastewater. The hydraulic conditions were analyzed of operation that provided the best efficiencies, the pilot's efficiency was also observed as the turbidez removal, color, solids and total organic carbon for the different types of water used. Based on the accomplished work, it was understood that is much more advantageous to work with three columns in operation instead of only one, because the number of compartments in series increases and with this the efficiency. The placement of the columns in growing order of diameter provide a decrease of the gradients of speed also collaborated for this increase of the efficiency. It was also observed that the values of turbidez of the water flocculated and decanted of the pilot were larger than in the conventional stations, even the time of flocculation is smaller, being 1.27min for 1 column and 3.13 minutes for 3 columns in operation. In conventional stations of treatment of water the times of flocculation are of around 20 to 40 minutes. for the filtered water the turbidez values were pretty low, therefore being able to be used with success as a pre-flocculation in stations of direct filtration. Another important fact was that for all the analyzed parameters the pilot didn't present significant improvement involving the time of operation. All types of water that the pilot worked whit flocculated, including the lake water that is generally difficult of flocculate. The pilot presented an efficiency of 87,65% for a water with bentonita, 97,6% for a natural water of river, 67,2% for the lake water and 98,9% for a wastewater.

SUMÁRIO

LISTAS DE TABELA.....	i
RELAÇÃO DE FIGURAS.....	vi
RESUMO.....	viii
ABSTRAT.....	ix

CAPÍTULO

I. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivo.....	3
1.1.1. Objetivo Principal.....	3
1.1.2. Objetivos Específico.....	3
II . REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Sistemas de Tratamento de água de abastecimento.....	4
2.2. Coagulação.....	5
2.2.1. Mistura Rápida.....	6
2.2.2. Sistema Coloidal.....	6
2.2.3. Estabilidade das Partículas Coloidais e Moléculas.....	7
2.2.4. Mecanismo da Coagulação.....	9
2.2.5. Coagulante e seus Auxiliares.....	10
2.2.5.1. Sulfato de alumínio	11
2.3. Floculação.....	12
2.3.1. Gradiente de Velocidade.....	13
2.3.2. Floculação em Meio Granular.....	19
2.3.3. Floculação em Meio Granular Expandido.....	23
2.3.3.1. Apresentação do Fenômeno de Fluidização ou Expansão.....	23
2.3.3.1.1. Perda de Carga.....	24
2.3.3.1.2. Velocidade Mínima de Fluidização.....	26
2.3.3.1.3. Velocidade Máxima de Fluidização.....	28
2.3.3.1.4. Expansão do Leito.....	29
2.3.3.2. Gradiente de Velocidade no Leito Granular Expandido.....	30

2.3.3.3. Número de Camp.....	31
2.3.3.4. Porosidade e Altura do Leito.....	32
2.3.3.5. Cálculo do Floculador.....	33
III - METODOLOGIA.....	34
3.1. O piloto.....	34
3.1.1. Misturador rápido.....	35
3.1.2. Floculador.....	36
3.1.3. Meio Granular.....	36
3.1.4. Decantador.....	37
3.1.5. Alimentação do Piloto.....	37
3.2. Teste de Jarros.....	38
3.2.1. Melhor Dosagem de Coagulante.....	39
3.2.2. Melhor Tempo de Floculação.....	39
3.2.3. Melhor Gradiente de Velocidade.....	40
3.3. As análises.....	41
3.3.1. Turbidez.....	41
3.3.2. Cor.....	41
3.3.3. Potencial Hidrogênionico.....	42
3.3.4. Alcalinidade.....	42
3.3.5. Determinação de sólidos.....	43
3.3.5.1. Sólidos Suspensos.....	43
3.3.5.2. Sólidos Totais.....	44
3.3.5.3. Sólidos Dissolvidos.....	44
3.3.5.4. Sólidos Sedimentáveis.....	44
3.3.6. Carbono Orgânico Total (COT).....	45
IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	46
4.1. Condições Hidráulicas do piloto.....	47
4.1.1. Determinação das Melhores Condições Hidráulicas de Funcionamento do Piloto.....	49
4.2. Ensaio de Floculação.....	51
4.2.1. Água com Bentonita.....	52

4.2.1.1. Ensaio em descontínuo - jarrest.....	52
4.2.1.2. Ensaio em contínuo.....	53
4.2.2. Água Natural.....	62
4.2.2.1. Ensaio em descontínuo – jarrest.....	62
4.2.2.2. Ensaio em contínuo.....	63
4.2.3. Água de Lago.....	69
4.2.3.1. Ensaio em descontínuo – jarrest.....	69
4.2.3.2. Ensaio em contínuo.....	70
4.2.4. Efluente.....	74
4.2.4.1 Ensaio em descontínuo	74
4.2.4.2. Ensaio em contínuo.....	75
4.3. Comparação dos Resultados.....	76
V. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
ANEXOS.....	85
Anexo 1: Teste de jarro em água com bentonita.....	86
Anexo 2: Teste de jarro para água com bentonita com T= 64.3 NTU.....	91
Anexo 3: Teste de jarros para a determinação da melhor dosagem de sulfato de alumínio para águas com alta concentração de bentonita.....	96
Anexo 4: Resultados dos ensaios para a determinação da melhor vazão para uma água com bentonita.....	99
Anexo 5: Resultados dos ensaios de floculação realizados em uma água com alta concentração de bentonita.....	102
Anexo 6: Variação do tempo que a água passa pelo decantador.....	105
Anexo 7: Tabelas dos resultados obtidos em água com bentonita.....	107
Anexo 8: Tabelas dos resultados obtidos com água natural.....	109
Anexo 9: Tabelas dos resultados da água de lago.....	111
Anexo 10: Tabelas dos resultados obtidos com o efluente.....	113
Anexo 11: Condições hidráulicas medidas no piloto.....	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Equação de equilíbrio de algumas espécies hidrolizadas do alumínio.....	11
Tabela 2: Valores de a e n.....	28
Tabela 3: n para a equação de Richadson-Zaki para dif. regimes de escoamento.....	30
Tabela 4: Relação da vazão com a velocidade.....	50
Tabela 5: Relação das condições hidráulicas para a vazão de 230l/h nas três colunas..	51
Tabela 6: Comparação dos resultados do jarrest com o piloto para os mesmos tempos de floculação para água com bentonita.....	57
Tabela 7: Comparação dos resultados do jarrest com o piloto para os mesmos tempos de floculação para água de lago.....	71
Tabela 8: Características do efluente bruto.....	74
Tabela 9 a 17: Ensaio com testes de jarro em água com bentonita (anexo 1).....	86
Tabela 18 a 26: Ensaio com testes de jarro em água com bentonita com turbidez de 60 NTU (anexo 2)	91
Tabela 27 a 32: Ensaio de jarrest para a determinação da melhor dosagem de sulfato de alumínio para águas com alta concentração de bentonita(anexo 3).....	96
Tabela 33 a 36: Ensaio para a determinação da melhor vazão para uma água com bentonita (anexo 4).....	99
Tabela 37 a 40: Ensaio de floculação realizados em uma água com alta concentração de bentonita (anexo 5).....	102
Tabela 41 a 43: Ensaio da variação do tempo que a água passa pelo decantador (anexo 6).....	105
Tabela 44 a 55: Tabelas dos resultados obtidos em água com bentonita (anexo 7).....	107
Tabela 56 a 67: Tabelas dos resultados obtidos com água natural (anexo 8).....	109
Tabela 68 a 77: Tabelas dos resultados da água de lago (anexo 9).....	111
Tabela 78 a 79: Tabelas dos resultados obtidos com o efluente (anexo 9).....	113
Tabela 80 a 82: Condições hidráulicas medidas no piloto (anexo 11).....	114

RELAÇÃO DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma de uma estação de tratamento de água convencional.....	4
Figura 2: Configuração da dupla camada elétrica.....	8
Figura 3: Perfil de velocidade em um escoamento laminar.....	13
Figura 4: Escoamento turbulento.....	14
Figura 5: Perfil de velocidade no escoamento turbulento.....	14
Figura 6: Visualização de um elemento fluido ($\Delta X \Delta Y \Delta Z$).....	16
Figura 7: Gráfico ilustrativo do comportamento da perda de carga em função do gradiente de velocidade de aproximação.....	25
Figura 8: Desenho esquemático do piloto.....	34
Figura 9: Desenho esquemático do processo de mistura rápida.....	35
Figura 10: Bomba peristáltica para a dosagem de sulfato de alumínio.....	36
Figura 11: Foto do piloto.....	36
Figura 12: Decantador.....	37
Figura 13: Caixas d'água para a alimentação do piloto.....	37
Figura 14: Câmara de Carga.....	38
Figura 15: Aparelho de jarrest.....	39
Figura 16: Relação do gradiente de velocidade com os agitadores do jarrest.....	40
Figura 17: Foto dos flocos formados durante a floculação.....	46
Figura 18: Expansão do leito granular em função da velocidade nas três colunas.....	47
Figura 19: Perda de carga em função da velocidade nas três colunas.....	48
Figura 20: Gradiente de velocidade versus velocidade nas três colunas.....	49
Figura 21: Melhor vazão de funcionamento do piloto.....	50
Figura 22: Melhor dosagem de sulfato de alumínio para água com bentonita.....	52
Figura 23: Qualidade da água decantada em função do gradiente de velocidade para diferentes tempos de floculação para a água com bentonita.....	53
Figura 24: Abatimento da turbidez em relação ao tempo de funcionamento do piloto para água com bentonita.....	54
Figura 25: Eficiência do piloto em relação ao abatimento da turbidez para água com bentonita.....	54
Figura 26: Abatimento da turbidez para água com bentonita com 1 coluna em funcionamento.....	55

Figura 27: Abatimento da turbidez para água com bentonita com 3 colunas em funcionamento.....	55
Figura 28: Abatimento da cor para água com bentonita.....	56
Figura 29: Abatimento da turbidez para água com bentonita decantada e filtrada com 1 coluna em funcionamento.....	57
Figura 30: Abatimento da turbidez para água com bentonita decantada e filtrada com 3 colunas em funcionamento.....	58
Figura 31: Sólidos sedimentáveis para água com bentonita com 1 coluna em funcionamento.....	58
Figura 32: Sólidos sedimentáveis para água com bentonita com 3 colunas em funcionamento.....	59
Figura 33: Abatimento dos sólidos suspensos para água com bentonita.....	60
Figura 34: Abatimento dos sólidos dissolvidos para água com bentonita.....	60
Figura 35: Abatimento dos sólidos totais para água com bentonita.....	60
Figura 36: Abatimento do COT para água com bentonita.....	61
Figura 37: Melhor dosagem de sulfato de alumínio para água natural.....	63
Figura 38: Abatimento da turbidez para água natural.....	63
Figura 39: Abatimento da cor para água natural.....	64
Figura 40: Eliminação da cor e da turbidez em % para 1 e 3 colunas em funcionamento para água natural.....	64
Figura 41: Abatimento da turbidez para água natural após filtração.....	65
Figura 42: Abatimento da turbidez para água natural filtrada e decantada.....	66
Figura 43: Sólidos sedimentáveis em água natural com 1 coluna em funcionamento.....	66
Figura 44: Sólidos sedimentáveis em água natural com 3 colunas em funcionamento.....	67
Figura 45: Sólidos suspensos para água natural.....	67
Figura 46: Sólidos dissolvidos para água natural.....	68
Figura 47: Sólidos totais para água natural.....	68
Figura 48: Abatimento do COT para água natural.....	69
Figura 49: Melhor dosagem de sulfato de alumínio para água de lago.....	70
Figura 50: Abatimento da turbidez para água de lago.....	70
Figura 51: Abatimento da cor para água de lago.....	71
Figura 52: Abatimento da turbidez para água de lago decantada e filtrada.....	72
Figura 53: Sólidos suspensos para água de lago.....	72

Figura 54: Sólidos dissolvidos para água de lago.....	73
Figura 55: Sólidos totais para água de lago.....	73
Figura 56: Abatimento do COT para a água de lago.....	74
Figura 57: Melhor dosagem de sulfato de alumínio.....	75
Figura 58: Abatimento da turbidez para o efluente doméstico.....	75
Figura 59: Gráfico comparativo com relação ao parâmetro turbidez.....	76
Figura 60: Floculador com meios granulares de peso específico diferentes.....	80
Figura 61 a 69: Ensaios com testes de jarro em água com bentonita (anexo 1).....	86
Figura 70 a 78: Ensaios com testes de jarro em água com bentonita com turbidez de 64,3 NTU (anexo 2)	91
Figura 79 a 84: : Ensaios de jarrest para a determinação da melhor dosagem de sulfato de alumínio para águas com alta concentração de bentonita (anexo 3).....	96
Figura 85 a 88: Ensaios para a determinação da melhor vazão para uma água com bentonita (anexo 4).....	99
Figura 89 a 92: Ensaios de floculação realizados em uma água com alta concentração de bentonita (anexo 5).....	102
Figura 93 a 95: Ensaios da variação do tempo que a água passa pelo decantador (anexo 6).....	105

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

As técnicas atuais de tratamento de água para o abastecimento de uma cidade, não são adaptadas ao tratamento de água para pequenas comunidades, uso industrial ou para o transporte quando se tomam necessárias instalações rápidas como em situações críticas ou mesmo de emergência. Para atender a tais necessidades, as estações devem ser compactas, ou seja, de dimensões menores, leves e que de preferência possibilite o seu transporte em caminhões.

O projeto proposto consiste no desenvolvimento de uma técnica de floculação hidráulica em meio granular expandido adaptada para estações de tratamento de água compacta, obedecendo a critérios como pouca mecanização, fácil transporte e que seja capaz de flocular água doce de diferentes qualidade à pequenas vazões.

O trabalho apresentado é uma continuação de trabalhos já desenvolvidos nos últimos anos sobre floculação em meio granular, sendo estudada inicialmente floculação em meio granular fixo (Sens, M.L. e Martin, G., 1991- desenvolvida na França), para em seguida estudar floculação em meio granular expandido (Sens, M.L. e Hansen, S., 1995 - desenvolvida em Florianópolis no LIMA).

A continuação deste estudo foi proposta a fim de obter maior grau de eficiência, além da diminuição da altura do floculador, aumentando o número de compartimentos em série.

No tratamento de água, a floculação é utilizada como fase preparatória na remoção de partículas em suspensão. Embora uma estação de tratamento de água seja um sistema integrado de diversos processos unitários, vem-se firmando atualmente a opinião de que a floculação é o mais importante de todos.

A tecnologia de tratamento da água tem obtido progresso nos últimos anos, principalmente nos processos de decantação e filtração. Com o emprego de decantadores laminares e filtros de duas ou mais camadas, os tanques de decantação e as unidades filtrantes têm o seu tamanho cada vez mais reduzido, com igual ou maior eficiência do que os dos projetos convencionais. Considerável aporte de conhecimentos teóricos sobre o processo de coagulação foi acumulado no mesmo período; contudo, continuam os tanques de floculação a ser dimensionados para os mesmos tempos de detenção, normalmente de 30 a 40 minutos, mantendo, conseqüentemente, o mesmo tamanho.

Um dos maiores erros que se pode cometer no projeto de um floculador é pensar que se determinado período de detenção, por exemplo, 30 minutos, é bom, então um tempo mais prolongado, por exemplo, 45 minutos, será melhor. O contrário pode ocorrer. Mais que isso: há condições em que, se apropriadamente exploradas, pode-se reduzir substancialmente o período de detenção nos tanques de floculação, tornando possível a realização de projetos mais econômicos (RICHTER, 1986).

Quanto mais compartimentos em série possuir um floculador melhor será sua eficiência; o meio granular simula vários compartimentos em série e ocupa menos espaço e menor tempo do que tanques usados em estações convencionais (ARGMAN et al., 1970).

Para a realização deste trabalho foi construído um piloto de floculação em meio granular, no qual se trabalhou com 1 e 3 colunas. A fim de obter maiores eficiências as colunas foram colocadas em ordem crescente de diâmetro resultando no aumento do tempo de detenção e o decréscimo do gradiente de velocidade de uma coluna a outra.

A água de abastecimento do piloto também foi variada: tendo o floculador trabalhado com água preparada com bentonita, água natural, água de lago e um efluente doméstico.

1.1 - Objetivos

1.1.1 - Objetivo Principal

Este trabalho tem como objetivo buscar maiores eficiências na floculação em meio granular expandido, sem aumentar a altura do reator, não ultrapassando a valores de uma altura de contêiner ($\leq 2,40$).

1.1.2 - Objetivos Específicos

- Diminuir o tempo de floculação a valores inferiores aos das estações de tratamento convencionais, reduzindo desta forma o tamanho do floculador.
- Avaliar a eficiência da floculação em meio granular expandido para diferentes tipos de água doce.
- Comparar a eficiência da floculação entre 1 e 3 colunas do piloto em funcionamento.
- Avaliar o efeito das condições hidráulicas na eficiência da floculação.

CAPÍTULO II

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Sistemas de tratamento de água de Abastecimento

O tratamento de água para abastecimento envolve uma série de processos físicos, químicos e bioquímicos.

Os processos físicos e químicos visam á clarificação da água e são compostos por mistura, coagulação, floculação, sedimentação e filtração. A figura 1 mostra o fluxograma de uma estação de água convencional que possui estes processos.

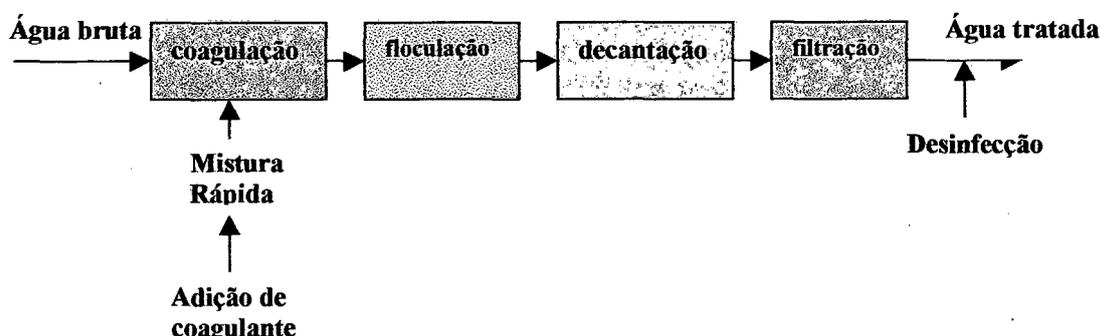


Figura 1: Fluxograma de uma estação de tratamento de água convencional. (SPELLMAN, 1998)

A primeira etapa de uma estação de tratamento de água convencional, a mistura rápida é um processo mecânico, para distribuir o mais rapidamente possível o coagulante na água.

A coagulação consiste na condução simultânea de partículas coloidais, realizadas por forças químicas originadas do processo de reação do coagulante na água, é a hidrólise do coagulante processada na água num pH conveniente. Esta reação, que é muito rápida, processa-se dentro de poucos segundos após a aplicação do coagulante.

A floculação é um processo físico que consiste em agrupar e compactar as partículas coaguladas para formar, através de agitação prolongada, agregados

denominados flocos. A mesma é realizada em floculadores que proporcionam uma agitação lenta adequada e limitada para evitar o rompimento de flocos adensados já formados.

A sedimentação ou decantação consiste na remoção, por ação da gravidade, do material floculado.

A filtração é a remoção de sólidos dissolvidos, coloidais e em suspensão, através da passagem da água por um meio filtrante.

A floculação é o alvo principal no trabalho aqui proposto, sendo ela realizada em floculador hidráulico onde a agitação é causada por um meio granular constituído de pequenas esferas de polietileno que se expandem com a velocidade da água.

2.2 - Coagulação

A coagulação é o processo de desestabilização de carga (predominantemente negativa) das partículas em suspensão coloidal, que provocam a cor e a turbidez na água, para sua posterior remoção por sedimentação (ou por flotação) e filtração. A otimização desse processo envolve conhecimentos sobre a estabilidade das partículas, a química da coagulação e cinética das reações (RICHTER, 1991).

A coagulação resulta de dois fenômenos: o primeiro, químico, é a reação do coagulante com a água e a conseqüente formação das espécies hidrolisadas com carga positiva; o segundo, físico, consiste no transporte das espécies hidrolisadas para viabilizar seu contato com as impurezas (DI BERNARDO, 1993).

A coagulação geralmente é realizada com sais de alumínio ou ferro adicionados na unidade de mistura rápida em uma estação de tratamento.

A coagulação é a primeira operação unitária no processo convencional de tratamento de água. O modo como esta é realizada é de fundamental importância no desempenho das operações unitárias subseqüentes (floculação, sedimentação e filtração). (FERREIRA et al., 1997).

2.2.1 – Mistura Rápida

A mistura rápida é a mistura do coagulante com a água a ser tratada. Este processo ocorre sob forte agitação e altos gradientes de velocidade ($700s^{-1}$) e é muito rápido, variando de décimos de segundo até cerca de 100 segundos, dependendo das características da água, como pH, temperatura, quantidade de impurezas, etc.

A eficiência da coagulação depende muito do sucesso do processo de mistura rápida (KAWAMURA S, 1996), pois a coagulação está relacionada com a formação dos primeiros complexos de cátions metálicos hidrolizados. Esta reação de hidrólise é muito rápida e, para haver a desestabilização dos colóides, é indispensável a dispersão de alguns gramas de coagulante sobre toda a massa de água em um tempo muito curto, o que implica na necessidade de aplicá-lo em uma região de grande turbulência proporcionando uma distribuição equânime e uniforme do coagulante à água (AZEVEDO NETO et al, 1991).

2.2.2 - Sistema Coloidal

Os sistemas coloidais podem ser classificados em estáveis e instáveis, de acordo com a condição de permanência ou não dessa estabilidade. Os colóides estáveis, também denominados colóides reversíveis, incluem moléculas de detergente ou sabão (miscelas), proteínas, amidos e alguns polímeros de grande cadeia. Os colóides instáveis também denominados irreversíveis, são por exemplo argilas, óxidos metálicos e microrganismos.

A estabilidade depende da resultante final das forças de atração e repulsão que agem entre as partículas coloidais. As forças de atração conhecidas como de "Van der Waals" são causadas pela interação de partículas dipolares permanentes ou induzidas enquanto as forças de repulsão são fornecidas pelo potencial zeta.

Entre as propriedades dos colóides que influem na coagulação estão a hidrofobia, a hidrofília e a mobilidade eletroforética.

A primeira, que caracteriza os colóides hidrófobos, consiste na sua capacidade de atrair para a sua superfície um número muito grande de moléculas de água que constituem uma barreira, impedindo a sua união. A segunda é a propriedade contrária, que impede os colóides de atrair moléculas de águas para sua superfície.

Nos sistemas hidrófilos, as partículas reagem quimicamente com a água ou fase dispersora e com os coagulantes metálicos, enquanto nos sistemas hidrófobos não há intervenção da água na reação, a coagulação assume características mais físicas do que químicas.

A mobilidade eletroforética, que resulta do fenômeno da eletroforese, nada mais é do que o movimento de migração que sofrem as partículas de argila coloidal para um dos pólos elétricos criados no interior de uma dispersão coloidal onde foram colocados dois eletrodos entre os quais passa a corrente elétrica.

2.2.3 - Estabilidade das Partículas Coloidais e Moléculas

Existem duas formas de estabilidade das partículas e moléculas: estabilidade eletrostática e estabilidade estérica. Dois aspectos são considerados para a condição de estabilidade: estrutura da interface sólido-líquido e forças entre duas interfaces, quando próximas entre si.

Na estabilização eletrostática, a maior parte das partículas e moléculas de substâncias húmicas possuem superfície carregada eletricamente, decorrente de três processos:

- a) grupos presentes na superfície sólida que, ao reagir com a água, podem receber ou doar prótons;
- b) grupos superficiais que podem reagir com a água e com outros solutos além de prótons;
- c) imperfeições na estrutura da partícula responsável pela parcela substancial da carga das argilas minerais.

Devido aos três processos, através dos quais os colóides se apresentam com carga de superfície negativa, ocorre um balanço com íons de carga contrária presentes na água, por isso o sistema coloidal não apresenta carga elétrica líquida.

A carga primária de uma partícula coloidal atrai íons de carga oposta à da solução, e os íons contrários atraídos circundam-na, constituindo uma camada denominada aderente, compacta ou de "Stern". Estes íons são mantidos em volta do colóide através de forças eletrostáticas de "Van der Waals", suficientemente fortes para subjugar a agitação térmica. Em volta dessa camada fixa de íons existe uma camada difusa de íons

que é impedida de formar uma camada dupla com a de Stern pela agitação térmica, como mostra a Figura 2.

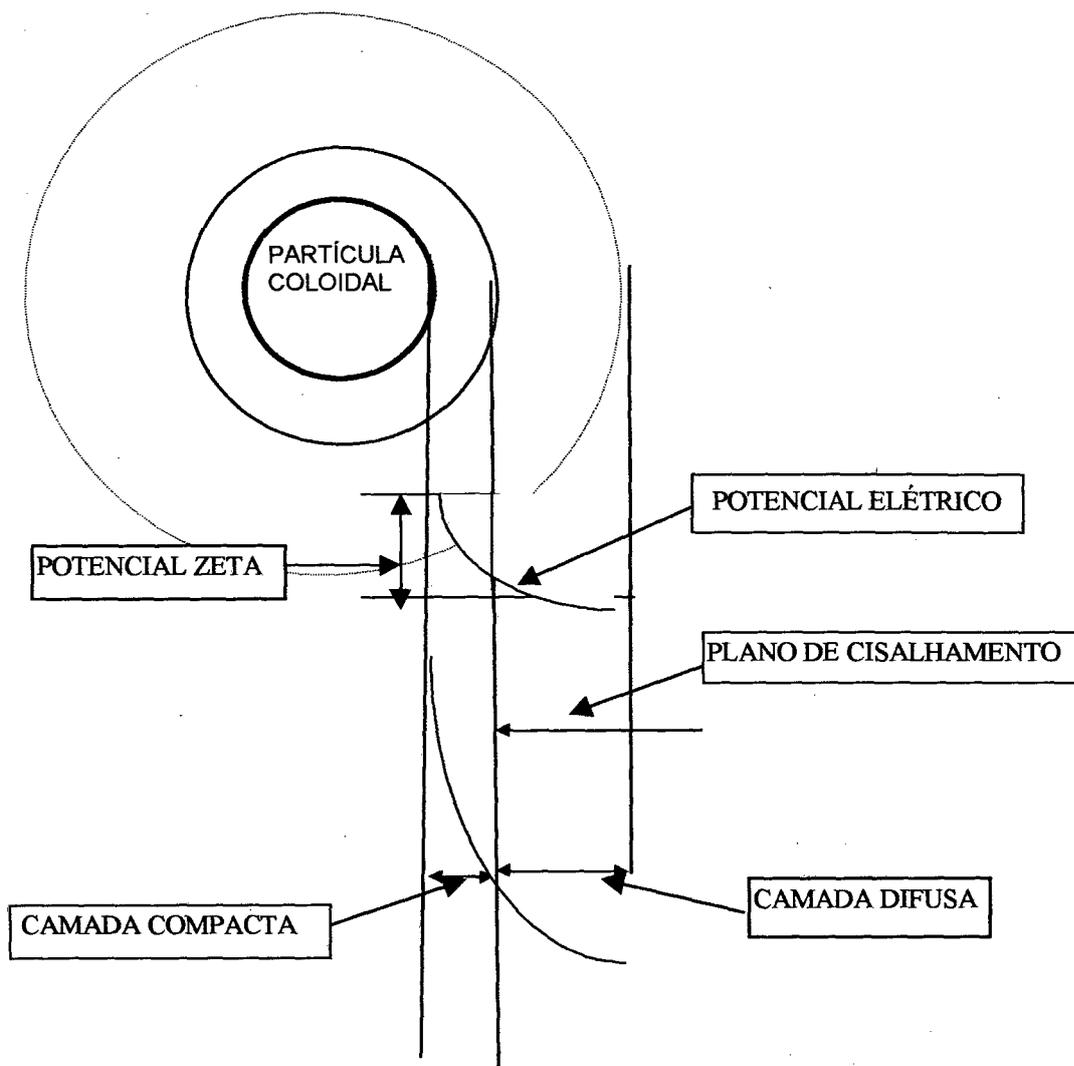


Figura 2: Configuração da dupla camada elétrica (DI BERNARDO, 1993)

Segundo Stern existe uma distância mínima entre a superfície do colóide e os íons de carga contrária (positivos), na qual o potencial elétrico decresce linearmente, em seguida a diminuição resulta exponencial, passando pela fronteira entre a camada compacta e a difusa, local denominado Potencial Zeta e está associado à aplicação da diferença de potencial em uma amostra de água contendo colóides negativos de tal forma que uma certa porção do meio, em torno da partícula, caminha junto com esta ao eletrodo positivo, caracterizando o Plano de cisalhamento.

2.2.4 - Mecanismos da Coagulação

O fenômeno da Coagulação caracteriza-se pela alteração da força iônica do meio. Em tratamento de água isto é feito, principalmente, pela adição de sais de alumínio ou de ferro ou de polímeros sintéticos. A literatura apresenta quatro principais formas de desestabilização de partículas coloidais (FERREIRA et al -1997): a) compressão da camada difusa, b) adsorção e neutralização, c) varredura, d) adsorção e formação de ponte.

a) Compressão da Camada Difusa

A introdução de um eletrólito indiferente num sistema coloidal causará um aumento na densidade de cargas na camada difusa e diminuirá a "esfera" de influência das partículas, ocorrendo a coagulação por Compressão da Camada Difusa. Concentrações elevadas de íons positivos e negativos acarretam acréscimo do número de íons na camada difusa que, para manter-se eletricamente neutra, tem seu volume reduzido, de tal modo que as forças de Van der Waals sejam dominantes, eliminando a estabilização eletrostática. Dois aspectos são importantes nesse mecanismo de coagulação: a) para haver a coagulação, a quantidade de eletrólitos é praticamente independente da concentração de colóides na água., b) para qualquer quantidade adicionada de eletrólitos, é impossível causar a reestabilização das partículas coloidais, ou seja, a reversão da sua carga, que passa a ser positiva.

b) Adsorção e Neutralização de Cargas

O mecanismo de adsorção-neutralização de carga é muito importante quando o tratamento é realizado através da tecnologia de filtração direta, pois não é necessário produzir flocos para posterior sedimentação. As partículas desestabilizadas são retidas no meio filtrante.

A desestabilização de uma dispersão coloidal consiste nas interações entre coagulante-colóide, coagulante-solvente e colóide-solvente. As interações coagulante-solvente são responsáveis pela adsorção do coagulante na interface colóide-água. No caso de espécies hidrolisadas de alumínio e ferro ou de polímeros sintéticos catiônicos, é comum ocorrer a adsorção específica, causada pela interação entre coagulante e colóide.

d) Varredura

A formação de precipitados do tipo $Al(OH)_3$ ou $Fe(OH)_3$ poderá ocorrer dependendo da quantidade adicionada destes sais, do pH da mistura e da concentração de alguns tipos de íons na água. As partículas coloidais são envolvidas pelos precipitados e, como este mecanismo não depende da neutralização da carga dos colóides, a condição ótima da coagulação pode não corresponder àquela em que é mínimo o potencial zeta.

O mecanismo de varredura é intensamente utilizado nas estações de tratamento em que se tem a floculação e a sedimentação antecedendo a filtração, pois os flocos resultantes são de maior tamanho e apresentam velocidades de sedimentação relativamente maiores do que os dos flocos obtidos com a coagulação realizada no mecanismo de adsorção -neutralização.

e) Adsorção e Formação de Pontes

Existe uma variedade significativa de compostos orgânicos sintéticos e naturais caracterizados por grandes cadeias moleculares, que apresentam sítios ionizáveis ao longo da cadeia e atuam como coagulantes. Os polímeros com estas propriedades podem ser classificados como:

1. catiônico- apresenta sítios ionizáveis positivos
2. aniônico- apresenta sítios ionizáveis negativos
3. não iônico- não apresenta sítios ionizáveis
4. anfótero- apresenta sítios ionizáveis negativos e positivos.

2.2.5 - Coagulante e Seus Auxiliares

Os coagulantes podem ser classificados em polieletrólitos ou auxiliares de coagulação e coagulantes metálicos, e atuam como polímeros além, da ação de carga elétrica que possuem (LEME- 1990).

Nos polieletrólitos, as cadeias polimerizadas já estão formadas quando eles são agregados à água. Os polieletrólitos podem ser naturais ou sintéticos, ambos encontrados comercialmente agindo como coagulantes ou auxiliares de coagulação. Classificam-se de

acordo com sua carga elétrica em catiônico e aniônico, conforme tal carga seja positiva ou negativa.

Nos coagulantes metálicos, a polimerização se inicia no contato com a água, vindo a seguir a etapa de absorção dos colóides nela existentes. Os coagulantes metálicos podem ser classificados em três tipos: sais de alumínio, sais de ferro e compostos diversos.

2.2.5.1 - Sulfato de Alumínio

O sulfato de alumínio é uma das substâncias químicas mais amplamente usada para a coagulação nos tratamentos de água, devido à sua excelente formação de floco, sua relativa economia e a sua facilidade de manuseio.

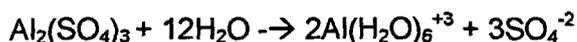
Quando um sal de alumínio é adicionado em meio aquoso, ocorre inicialmente a sua dissociação, seguida pela reação com a água, de modo a permitir a formação de espécies mononucleares e polinucleares. Numerosos estudiosos têm-se dedicado a elucidar quais espécies hidrolisadas seriam formadas preferencialmente; no entanto, ainda não há um consenso sobre quais são as espécies preponderantes, permanecendo muita controvérsia sobre o assunto.

Algumas espécies hidrolisadas mais significativas do alumínio e suas respectivas equações de equilíbrio estão indicadas na tabela 1.

Tabela 1: Equação de equilíbrio de algumas espécies hidrolisadas do alumínio (FERREIRA et al-1997).

Al^{+3}	$Al(OH)_{3s} \rightleftharpoons Al^{+3} + 3OH^-$	10^{-33}
$Al(OH)^{+2}$	$Al^{+3} + H_2O \rightleftharpoons Al(OH)^{+2} + H^+$	10^{-6}
$Al_2(OH)_2^{+4}$	$2Al^{+3} + 2H_2O \rightleftharpoons Al_2(OH)_2^{+4} + 2H^+$	$10^{-6,3}$
$Al_7(OH)_{17}^{-4}$	$7Al^{+3} + 17H_2O \rightleftharpoons Al_7(OH)_{17}^{-4} + 17H^+$	$10^{-48,8}$
$Al_{13}(OH)_{34}^{-5}$	$13Al^{+3} + 34H_2O \rightleftharpoons Al_{13}(OH)_{34}^{-5} + 34H^+$	$10^{-97,4}$
$Al(OH)_4^-$	$Al(OH)_{3s} + OH^- \rightleftharpoons Al(OH)_4^-$	$10^{-1,3}$

O sulfato de alumínio, $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$, é um pó normalmente hidratado que, quando em solução, apresenta-se hidrolisado, como indica a reação abaixo:



O sulfato de alumínio não pode permanecer completo na água pois é encontrado sempre hidrolizado, e é esta a causa que explica por que íons como o Al^{+3} não são encontrados em soluções aquosas (LEME-1991).

Para que o sulfato de alumínio possa reagir para formar um precipitado, é necessário que a água, dentro da qual é colocado, contenha alguma alcalinidade, usualmente sob forma de bicarbonato de cálcio. A faixa de trabalho de mínima solubilidade do alumínio em meio aquoso situa-se entre 5.5 e 7.5.

As quantidades de sulfato de alumínio a serem aplicadas no tratamento de água são determinadas experimentalmente por ensaios (testes de jarros) .

2.3 - Floculação

Realizada após a coagulação, a floculação consiste na obtenção de agrupamento e compactação das partículas em suspensão em grandes conjuntos denominados flocos, que podem ser removidos da água em processos subsequentes.

A floculação é efetuada através de agitação lenta, com o objetivo de nela se criarem gradientes de velocidade que causam turbulência capaz de provocar choques ou colisões entre as partículas coaguladas e as existentes em suspensão e no estado coloidal na água. Tais gradientes, que produzem tensão cisalhante nos flocos existentes, são limitados para que não ultrapassem a capacidade de resistência ao cisalhamento dessas partículas.

Relações complexas existem entre os numerosos fatores que afetam o fenômeno de floculação, como pH, alcalinidade, heterogeneidade de uma suspensão com respeito ao tipo, tamanho, concentração e fração de volume de partículas, assim como o tipo de reator e a variação na intensidade da turbulência (AYOUB, 1996).

A eficiência da floculação depende da intensidade da agitação fornecida, que deve criar gradientes de velocidade tais que não conduzam a esforços cortantes, geradores de tensões cisalhantes superiores às tensões admissíveis do material coagulado. A floculação, conseqüentemente, além de uma função do gradiente de velocidade criado é também função do número, tamanho e concentração das partículas (LEME, 1991).

2.3.1 - Gradiente de Velocidade

Gradiente de velocidade é o parâmetro mais importante na cinética da floculação e no dimensionamento de flocladores, daí ser de fundamental importância entendê-lo para melhor compreender todo o processo que envolve a floculação.

O gradiente de velocidade é originado nos fundamentos da mecânica dos fluidos. Ao iniciar-se o movimento de um fluido dentro de um tubo, as velocidades de escoamento de todos os pontos de um plano normal ao eixo do tubo são praticamente iguais. Quando o movimento continua, junto à parede do tubo forma-se uma camada estacionária, denominada "camada limite de Prandtl" (uma película aderente e imóvel de fluido) (LEME, 1991).

Com o movimento do fluido, outras camadas de fluido irão se atritar com esta camada, gerando esforços tangenciais, como se diferentes camadas se atritassem, entre si, deslocando-se com velocidades diferentes, originando-se, em virtude de tais forças de resistência, "gradientes de velocidade" que se estendem por toda a seção transversal do tubo.

A figura 3 ilustra o perfil da velocidade caso o comportamento do escoamento seja laminar e inteiramente desenvolvido, na qual se vê a distribuição das velocidades em plano normal ao eixo do tubo. Neste tipo de escoamento o fluido se move em lâminas paralelas e em velocidades relativamente baixas.

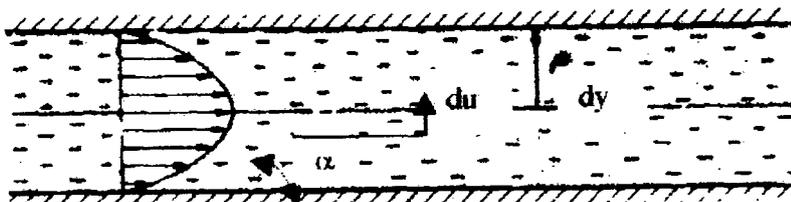


Figura 3: Perfil de velocidade em um escoamento laminar (LEME, 1991)

Em velocidades mais elevadas, o escoamento apresentará comportamento laminar somente nas paredes do tubo enquanto que no restante do tubo principalmente no centro, o fluido apresentará flutuações *caóticas* em todas as direções, conforme visualizado na figura 4, tomando-se turbulento. O perfil de velocidade para um regime turbulento é visualizado na figura 5.



Figura 4: escoamento turbulento

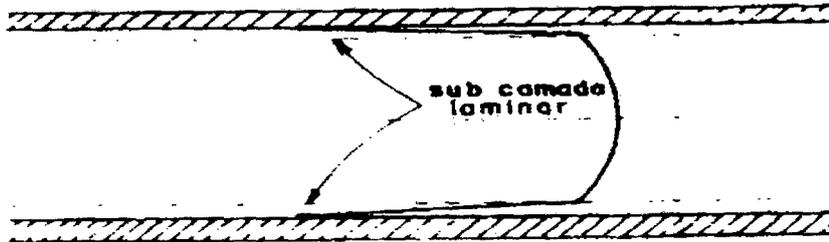


Figura 5: Perfil de velocidade no escoamento turbulento(LEME, 1991)

Os escoamentos laminar e turbulento foram descobertos em 1883 por Osborne Reynolds. Ele comprovou que a existência desses dois tipos de escoamento não depende somente da velocidade, mas também do parâmetro $V.D/\nu$, onde V é a velocidade média no tubo, D é o diâmetro do tubo e ν é a viscosidade cinemática do fluido. Este parâmetro adimensional cujo nome representa uma homenagem a Reynolds, é parâmetro básico para o estudo do movimento dos fluidos.

No escoamento em tubos, como o diâmetro do tubo é a dimensão característica, o escoamento pode se tornar turbulento quando $Re \geq 2000$.

Considerando-se a figura 3 a velocidade local, numa distância y da parede do tubo, sendo μ a velocidade, a inclinação do perfil nesta distância será o gradiente de velocidade:

$$G = \frac{du}{dy} = \operatorname{tg} \alpha \quad (1)$$

A tensão de cisalhamento, também conhecida como a tração por unidade de área que age em uma superfície cilíndrica de eixo paralelo à direção do escoamento, é função do gradiente de velocidade; para água e outros fluidos newtonianos é expressa pela equação 2:

$$\tau = -\mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2)$$

Onde τ é a tensão de cisalhamento, que é função da viscosidade do fluido e μ é o coeficiente de viscosidade absoluta.

Para o escoamento turbulento, a viscosidade de redemoinho ε , que resulta das flutuações e necessita de teste experimental, deve ser incorporada na equação 3 da tensão, ou seja,

$$\tau = -(\mu + \varepsilon) \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3)$$

O valor da viscosidade de redemoinho depende do movimento e da densidade do fluido; portanto, não é uma propriedade do fluido.

O conceito de gradiente de velocidade, aplicado particularmente aos sistemas de tratamento de água principalmente nas operações unitárias de mistura rápida e floculação, teve origem nas primeiras teorias sobre a conjunção de partículas, devidas a VON SMOLUCHOWSKI que em 1917 introduziu uma expressão relatando a frequência da colisão de um sistema de partículas por unidade de volume e por unidade de tempo. Segundo FAIR (1968), os choques entre partículas podem ocorrer entre íons, moléculas, colóides e partículas em suspensão (citado em SHOLJI, 1997). A agitação aumenta a probabilidade de colisões entre partículas facilitando a agregação.

VON SMOLUCHOWSKI, desenvolveu a equação 4 para calcular o número de colisões por unidade de volume e por unidade de tempo (citado em AYOUB, 1996),

$$\frac{dN_{ij}}{dt} = \frac{1}{6} n_i n_j (d_i + d_j)^3 \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}} \quad (4)$$

onde dN_{ij}/dt = taxa de colisões entre as partículas do tipo i e do tipo j; n_i = número de partículas i por unidade de volume; n_j = número de partículas j por unidade de volume; d_i = diâmetro das partículas i; d_j = diâmetro das partículas j, e G = gradiente de velocidade em um certo ponto ($G = dU/dZ$).

As partículas do tipo i podem ser responsáveis pela cor ou pela turbidez; as partículas do tipo j podem ser partículas de flocos.

Numerosos estudos teóricos e experimentais colocaram em evidência a influência do gradiente de velocidade e da concentração de partículas primárias sobre a cinética da

floculação que demonstrou que a taxa de colisão entre partículas é resultado do movimento do fluido e, portanto, controlável.

O gradiente médio de velocidade, comumente anotado pela letra G, pode ser facilmente calculado pela equação de CAMP & STEIN (1943), cuja dedução é apresentada a seguir (AZEVEDO NETO, 1991).

Considere-se um elemento de fluido $\Delta X \Delta Y \Delta Z$ (Figura 6), sujeito à agitação hidráulica ou mecânica no processo de mistura. A potência dissipada é o produto da força de viscosidade pela velocidade, ou

$P = \text{tensão de cisalhamento } (\tau) \times \text{área } (\Delta X \Delta Z) \times \text{velocidade } (\Delta v)$

$$P = \Delta X \Delta Y \Delta Z \frac{\Delta v}{\Delta Y} \quad (5)$$

Sendo $\Delta X \Delta Y \Delta Z = \Delta V$, volume do elemento de fluido, no limite obtemos a equação 6.

$$\frac{P}{V} = \tau \frac{dv}{dy} \quad (6)$$

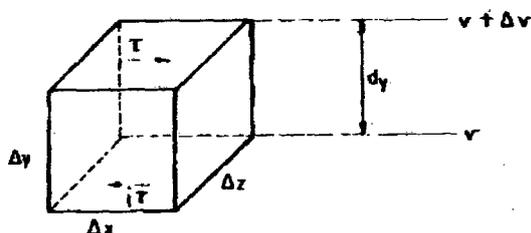


Figura 6: Visualização de um elemento fluido ($\Delta X \Delta Y \Delta Z$). (AZEVEDO NETO, 1991)

onde P/V é a potência dissipada por unidade de volume.

Para um líquido newtoniano $T = \mu \cdot dv/dy$, onde μ é o coeficiente de viscosidade dinâmica. Substituindo τ na equação 6, resulta

$$\frac{P}{V} = \mu \left(\frac{dv}{dy} \right)^2 \quad (7)$$

ou, explicitando $dv/dy (= G)$, finalmente temos a equação de Camp e Stein:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \quad (8)$$

A potência P pode ser calculada em função da perda de carga em dispositivos de mistura hidráulica, seja em condições de fluxo laminar ou turbulento.

Deduzida para condições de fluxo laminar e que expressa a relação entre o gradiente de velocidade G e a energia dissipada por unidade de volume p, a equação 8 é

ainda a ferramenta mais útil no cálculo dos flocladores e dos sistemas de veiculação de água floclada.

Combinando as equações (4) e (8) obtém-se

$$\frac{dN_{ij}}{dt} = \frac{1}{6} n_i n_j (d_i + d_j)^3 \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}} \quad (9)$$

Esta equação indica que o número de colisões por unidade de tempo e de volume na massa líquida aumenta em função do número e do tamanho das partículas, da potência útil introduzida e da temperatura do líquido, pois a viscosidade muda com a temperatura.

Para um sistema hidráulico, a potência pode ser calculada através da equação 10:

$$P = \rho \cdot U \cdot \Delta h \cdot g \cdot S \quad (10)$$

com ρ = massa específica da água [$L^{-3} \cdot M$]; U = velocidade de escoamento intersticial ($U = U_0/\varepsilon$); Δh = perda de carga [L]; g = aceleração da gravidade [$L \cdot T^{-2}$] e S = seção da coluna [L^2].

Combinando a equação (8) e (10), obtém-se o gradiente de velocidade em flocladores hidráulicos:

$$G = \left(\frac{\rho \cdot g \cdot U \cdot S \cdot \Delta h}{\mu \cdot V} \right) = \sqrt{\frac{\varpi \cdot \Delta h}{\mu T}} \quad (11)$$

sendo: $\rho \cdot g = \varpi$; $V/S = L$ e $L/U = T$.

Uma análise mais refinada do modelo de floclação foi realizada por HARRIS et al., (1966), citados em AYOUB (1996), admitindo uma distribuição por tamanho das partículas, e levando em conta o efeito da compartimentação em série do tanque de floclação no processo:

$$\frac{N_0}{N_m} = \left[1 + KVG \frac{T}{m} \right]^m \quad (12)$$

Onde N_o e N_m são as concentrações de partículas respectivamente na água bruta e no efluente do enésimo compartimento; K é uma constante que depende do tamanho e da natureza da suspensão; V é a fração em volume de floco; G é o gradiente de velocidade; T é o tempo de floculação; e m o número de compartimentos.

O modelo teórico da floculação na sua forma geral é combinado com os efeitos de agregação e de quebra dos flocos, (ARGAMAN, 1971).

ARGAMAN et KAUFMAN (1970), consideraram o papel da turbulência na agregação das partículas e introduziram os efeitos na separação dos flocos citado em HAARHOFF (1997). Eles propuseram a equação 13 para calcular a variação do número de partículas por unidade de volume.

$$\frac{dN}{dt} = -K_A N G + K_B N_o G^2 \quad (13)$$

Onde K_A e K_B são constantes de agregação e de desagregação, N é a concentração de partículas primárias e N_o é a concentração inicial das partículas. Admitindo que K_A e K_B fiquem constantes dentro de um floculador com tempo de detenção total T assimilável a "m" câmaras instaladas em série completamente misturadas, então o balanço do número de partículas primárias para uma câmara qualquer de $p = 0$ à $p = m$:

$$\frac{N_{p-1}}{N_p} = \frac{1 + K_A G \frac{T}{m}}{1 + K_B \frac{N_o}{N_{p-1}} G^2 \frac{T}{m}} \quad (14)$$

Argaman et Kaufman observaram que o diâmetro de um floco pode crescer até certo valor máximo. Quanto maior gradiente de velocidade G , menor o diâmetro do floco e maior será sua densidade.

Segundo esses autores, a eficiência global, pode ser obtida a tempos cada vez menores à medida que se aumenta o número de "m" câmaras em série. A equação 15 visualiza tal eficiência.

$$\frac{N_{p-1}}{N_p} = \frac{\left(1 + K_A \frac{Ca}{m}\right)^m}{1 + K_B G^2 \frac{T}{m} \sum_{p=0}^{p=m-1} \left(1 + K_A \frac{Ca}{m}\right)^p} \quad (15)$$

Onde N_m é a concentração de saída do último compartimento de floculação e Ca é o número de Camp.

O produto do gradiente de velocidade pelo tempo de detenção ($G.T = Ca$) constitui-se num parâmetro auxiliar de dimensionamento de uma unidade de dispersão de coagulantes e de floculação denominado de "Número de Camp".

Este produto é adimensional e está ligado à probabilidade de colisão das partículas. Se "Ca" for constante, a probabilidade de colisão também o será, e neste caso a eficiência será a mesma. Na prática, esta afirmação não é sempre verdadeira, tornando-se necessária a determinação dos valores de G e T. O valor de G está associado ao do consumo de energia e T à dimensão do floclador ou câmara de floculação. Estes são então dois parâmetros econômicos muito importantes.

Do trabalho de Argaman e Kaufman, pode-se dizer que é possível reduzir significativamente o tempo de detenção, utilizando vários compartimentos em série. Em tratamento de água, em que os valores de G são relativamente pequenos (RICHER, 1991), o tempo de detenção para "m" câmaras em série pode ser calculado por,

$$\frac{N_o}{N_m} = \left(1 + K_A G \frac{T}{m}\right)^m \quad \text{ou seja,} \quad T = \frac{m}{K_A G} \left[\left(\frac{N_o}{N_m}\right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right] \quad (16)$$

BRATBY et al., (1977), mostraram que a relação equivalente para um sistema descontínuo ou reator em fluxo pistão (plug flow, $m \rightarrow \infty$) é dada pela equação 17:

$$\frac{N_o}{N_m} = \left[\frac{K_B}{K_A} G + \left(1 - \frac{K_B}{K_A} G\right) e^{-K_A Ca} \right]^{-1} \quad (17)$$

2.3.2 - Floculação em Meio Granular

No Brasil, estimulado por trabalhos preliminares realizados na Índia por BADRINATH, RICHTER (1981) desenvolveu um modelo para a floculação em meio granular, empregando pedregulhos, visando aplicá-lo em estações de tratamento de água para pequenas comunidades. Em 1980 e 1981, RICHTER e MOREIRA estudaram a

redução da turbidez em floculador granular com leito de pedregulho (RICHTER, 1991). Obtiveram bons resultados, porém encontraram problemas de colmatagem do meio e dificuldades para limpá-lo.

Um meio poroso ou granular bastante longo pode ser considerado um reator a "m" elevado. RICHTER (1981), a partir da equação (12), demonstrou que o tempo de detenção T requerido para reduzir N_0 a N_m é visualizado na equação 18:

$$T = \frac{1}{K_A G} \ln \left(\frac{N_0}{N_m} \right) \quad (18)$$

O trabalho de Richter consiste em validar a relação:

$$\ln \frac{N_0}{N_m} = K_A (GT) = K_A \cdot Ca \quad (19)$$

e, em especial, demonstrar a estimativa do gradiente de velocidade no interior de uma coluna recheada com pequenas esferas onde se produz a floculação, sabendo que o tempo de detenção varia durante a operação devido aos depósitos de flocos no meio granular.

Uma série de ensaios em condições diferentes proporcionou a escolha das condições de floculação no meio granular. A evolução da sedimentabilidade dos flocos que atravessam o reator granular permite indicar as condições de trabalho da associação floculador/decantador. Pode-se utilizar o gradiente de velocidade G para comparar os resultados dos floculadores, como propuseram Camp e Stein em 1943.

O gradiente de velocidade está ligado à potência dissipada P, e ela é função da perda de carga Δh . Através da equação de Ergun (citada em DI BERNARDO, 1993) para a perda de carga, obtém-se o gradiente de velocidade no floculador granular.

Combinando as equações (8) e (10), obtém-se a equação 20 para definir o gradiente de velocidade num floculador hidráulico:

$$G = \left(\frac{\rho \cdot g \cdot U \cdot A \cdot \Delta h}{\mu \cdot V} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{ou} \quad G = \left(\frac{\omega \cdot U \cdot J}{\mu} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

Ou ainda para um reator granular, onde $U = U_0/\varepsilon$ temos:

$$G = \left(\frac{\varpi \cdot U_0 \cdot J}{\varepsilon \cdot \mu} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

ε = porosidade do meio

O tempo de detenção no floculador granular é dado pela equação 22:

$$T = \frac{L}{U} \quad e \quad U = \frac{U_0}{\varepsilon}$$

$$T = \frac{L \cdot \varepsilon}{U_0} \quad (22)$$

Onde L = comprimento do meio granular [m]

O número de Camp Ca para um reator granular, resulta na equação 23:

$$Ca = G \cdot T \quad Ca = \left(\frac{\varpi \cdot U_0 \cdot J}{\varepsilon \cdot \mu} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{L \cdot \varepsilon}{U_0}$$

Fica:

$$Ca = \sqrt{\frac{g}{\nu}} \frac{\varepsilon}{U_0} \cdot \Delta h \cdot L \quad \text{ou} \quad Ca = \sqrt{\frac{g \cdot J \cdot \varepsilon}{\nu \cdot U_0}} \cdot L \quad (23)$$

A perda de carga unitária em meio granular limpo em estado fixo é dado pela equação 24, conhecida como a expressão de Ergun (1952) citado em DI BERNARDO (1993):

Onde S = área específica média dos grãos. Para grãos esféricos, $S = 6/d$ e

$$J = 150 \frac{\mu}{\varpi} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \left(\frac{S}{6} \right)^2 U_0 + 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \left(\frac{S}{6} \right) \frac{U_0^2}{g} \quad (24)$$

d = diâmetro do grão ou da esfera de vidro utilizada [m]

Em 1991 na França, **Sens e Martin** pesquisaram floculação em meio granular com grãos fixos e esféricos, a fim de levantar parâmetros sobre floculação granular para aplicação em unidades compactas de tratamento de água. O meio granular foi composto por esferas de vidro variando-se o diâmetro (3, 5 e 10 mm), o tempo de detenção e as velocidades de escoamento do líquido no meio.

Como conclusão da floculação em meio granular fixo, esses autores observaram melhor remoção de turbidez com bolinhas de 10 mm de diâmetro chegando a 93% de eficiência, pois as cavidades formadas entre os grãos permitem a formação de flocos de tamanho maiores. Para lavagem do leito, foi sugerida a injeção de ar de tempos em tempos, sem a interrupção do tratamento.

A combinação das equações (20) e (23) resultam na equação 25:

$$G^2 = \frac{\varpi \cdot U_o \cdot J}{\varepsilon \cdot \mu} = \frac{\varpi \cdot U_o}{\varepsilon \cdot \mu} \left[150 \frac{\mu}{\varpi} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \left(\frac{S}{6}\right)^2 \cdot U_o + 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \left(\frac{S}{6}\right) \frac{U_o^2}{g} \right]$$

$$\frac{1}{\nu} = \frac{\rho}{\mu}$$

$$G = \left[150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^4} \left(\frac{S}{6}\right)^2 U_o^2 + 1,75 \frac{1}{\nu} \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^4} \left(\frac{S}{6}\right) U_o^3 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

A equação (25), proposta por SENS e MARTIN (AQUA-1992), calcula o G diretamente sem o cálculo da perda de carga. Basta conhecer o meio granular e algumas medidas físicas como: o diâmetro do grão d , a porosidade ε a velocidade de operação. Da mesma forma pode ser feito para o número de Camp combinando as equações (22) e (23):

$$Ca = \left[150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^2} \left(\frac{S}{6}\right)^2 + 1,75 \frac{1}{\nu} \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^2} \left(\frac{S}{6}\right) U_o \right]^{\frac{1}{2}} \cdot L \quad (26)$$

Em um floculador granular, dependendo da granulometria e da velocidade de escoamento, a porosidade ε pode mudar durante o tratamento. Quanto menor o diâmetro, para uma velocidade de escoamento (aproximação), mais rapidamente diminui a porosidade ε em função do volume de água tratada. Neste caso, para um volume v de água tratada tem-se uma porosidade ε_v , e conseqüentemente uma velocidade de escoamento real U_v , uma perda de carga unitária J_v , um tempo de detenção T_v e também um gradiente de velocidade e número de Camp, G_v e Cav . No instante $t = 0$, a velocidade de escoamento é igual a U_0 (veloc. de aproximação), a perda de carga J_0 , o tempo de detenção T_0 , o gradiente de velocidade G_0 e o número de Camp Cao .

2.3.3 - Floculação em Meio Granular Expandido

Teoricamente, quanto menor o diâmetro dos grãos do meio, maior a eficiência do processo. Porém, quanto menor o diâmetro dos grãos, maior será o índice de filtrabilidade do meio. Desta forma, SENS E HANSEN (1995), à procura de uma tecnologia para evitar a filtração e aumentar a eficiência da floculação com baixa vazão, pesquisaram a floculação em meio granular expandido com esferas de 5 mm de diâmetro.

Nessa floculação, a fluidização no material granular é muito pequena, isto é, as distâncias entre um grão e outro são muito pequenas, permitindo que um grão roce no outro. Por esta razão foi utilizado o termo expansão, pois embora as velocidades e a densidade do grão fossem pequenas (pouco superiores às da água), os grãos ou esferas permanecem próximos, de modo a permitir total passagem dos flocos que se formem, utilizando-se de grãos esféricos todos com o mesmo diâmetro.

2.3.3.1 - Apresentação do Fenômeno de Fluidização ou Expansão

A fluidização é um fenômeno de deslocamento de partículas sólidas pela corrente líquida. As partículas movem-se desordenadamente no interior da massa líquida. O crescimento da vazão implica na expansão da camada de grãos, dando um crescimento da energia potencial.

COMA, J. et al., (1990), estudaram a floculação de uma água residuária urbana em leito fluidificado associada a decantador laminar, comparando com outros tipos de processos, como jar-test e foc-test. Os dados experimentais em autofloculação (sem uso de coagulante) mostraram que, apesar das condições energéticas menos favoráveis, o

leito fluidizado permite obter resultados interessantes: 60% de abatimento de turbidez para um tempo de detenção global (floculação+decantação) inferior a 15 minutos. Em presença do coagulante cloreto férrico, as eficiências são comparáveis nos três sistemas, mas a dose de coagulante requerida ficou duas vezes menor, o que diminui a quantidade de lodo produzido.

2.3.3.1.1 - Perda de Carga

Pode-se equacionar a perda de carga segundo WILHEM E KWAIK (1948) como:

$$\Delta h_e \cdot A = \frac{M}{\rho_s} (\rho_s - \rho) g \quad (27)$$

Δh_e = perda de carga no meio expandido

A = área transversal do reator

M = massa das partículas do leito

ρ_s = massa específica do sólido

ρ = massa específica da água

g = aceleração da gravidade

Na condição de equilíbrio, quando o leito encontra-se completamente fluidificado, a perda de carga passa a ser constante, podendo ser expressa por:

$$\Delta h_e = L_o \frac{(\rho_s - \rho)(1 - \varepsilon_o)}{\rho} \quad (28)$$

L_o = altura do leito fixo

ε_o = porosidade no leito fixo

Segundo DI BERNARDO (1993), para grãos com tamanho maior que 1 mm e velocidades ascensionais superiores a 0,20 m/min (estudo de lavagens de filtros), o regime de escoamento pode resultar em transição ou turbulento, invalidando a aplicação da equação de Carman-Kozeny. A equação de Ergun pode ser utilizada para qualquer

regime de escoamento, desde que o número de Reynolds, dado pela equação $\{Re = (\rho/\mu) \cdot p \cdot U \cdot d\}$, esteja compreendido entre 1 e 2000.

No leito expandido as velocidades adotadas são relativamente pequenas, porém o diâmetro do grão é grande em relação aos diâmetros normalmente adotados para filtros de areia.

Desta forma a equação de Ergun, fórmula que serve a qualquer regime de escoamento e aplicável no leito fixo (até o momento da expansão) e expandido, é mais apropriada para os cálculos de perda de carga nos experimentos:

$$J = 150 \frac{\mu}{\varpi} \frac{(1 - \varepsilon_o)^2}{\varepsilon_o^3} \left(\frac{S}{6}\right)^2 U_o + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon_o)}{\varepsilon_o^3} \left(\frac{S}{6}\right) \frac{U_o^2}{g} \quad (29)$$

onde: S = área específica média dos grãos, que para grãos esféricos é: $S = 6/d$, onde d = diâmetro do grão.

A figura 7 mostra um esquema ilustrativo de como se comporta o crescimento da perda de carga. Para materiais com baixa densidade, quando ocorre a expansão do material, o crescimento da perda de carga diminui e posteriormente decresce, para em seguida permanecer constante. Quanto menor a densidade do grão, mais acentuada e mais longa será a curvatura. Para grãos muito densos, como é o caso da areia, a perda de carga cresce proporcionalmente até a expansão para quase instantaneamente decrescer e permanecer constante.

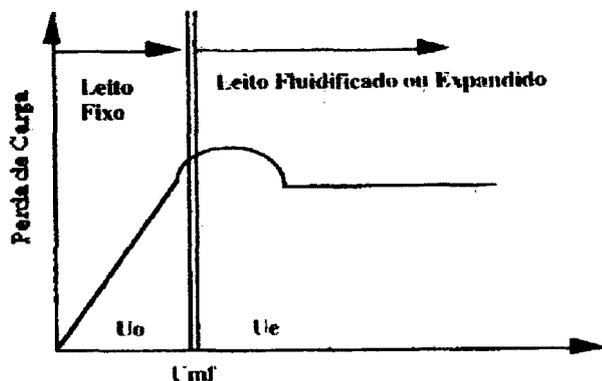


Figura 7: Gráfico ilustrativo do comportamento da perda de carga em função da velocidade de aproximação (SENS, 1996)

Utilizando-se então de bolinhas de 5 mm de diâmetro, Sens e Hansen simplificaram a equação da perda de carga para uma temperatura da água da ordem de 20°C, e considerando que no estado fixo, início da operação, não haja acúmulo de flocos no meio ($E_o = 0,38$), em que:

$$J_o = 4,23 U_o + 395,5 (U_o)^2 \quad (30)$$

Como a expansão é muito pequena, o distanciamento de um grão para outro é irrisório, considerando que o regime permanece laminar. Assim, a perda de carga pode ser calculada pela fórmula abaixo, para igual diâmetro de grão e temperatura:

$$J_e = 0,604 \frac{(1 - \varepsilon_e)^2}{\varepsilon_e^3} U_o + 35 \frac{(1 - \varepsilon_e)}{\varepsilon_e^3} U_o^2 \quad (31)$$

$$Re_e = \frac{\rho \cdot U_o}{\mu(1 - \varepsilon_e) S} \quad (32)$$

O "S" para grãos esféricos é 6/d, assim Re_e fica:

$$Re_e = \frac{U_o \cdot d}{6\nu(1 - \varepsilon_e)} \quad (33)$$

2.3.3.1.2 - Velocidade Mínima de Fluidização

A passagem do estado fixo ao estado fluidizado corresponde a uma velocidade mínima de fluidização U_o assim como para a porosidade ε_o .

A maioria das equações que permitem o cálculo da velocidade mínima de fluidização utilizam correlações relativas ao estado fixo ou ao estado fluidizado, principalmente entre a porosidade e a velocidade de escoamento do líquido.

A relação mais utilizada é a relação de Narsimman que se refere ao estado fixo do meio, mostrando a perda de carga por unidade de comprimento (altura da camada) com a ajuda da equação de Ergun:

$$J = \frac{\Delta h}{L} = h_k \mu \frac{36 (1 - \varepsilon_o)^2}{d^2 \varepsilon_o^3} U_o + h_B \rho \frac{6 (1 - \varepsilon_o)}{d \varepsilon_o^3} U_o^2 \quad (34)$$

Podemos tirar a velocidade mínima de fluidização combinando as equações (27) e (28), em regime laminar:

$$g(\rho_s - \rho)(1 - \varepsilon_o) = h_k \mu \frac{36 (1 - \varepsilon_o)^2}{d^2 \varepsilon_o^3} U_o \quad (35)$$

Assim, a velocidade mínima de fluidização é:

$$U_o = U_{mf} = \frac{g(\rho_s - \rho) d^2 \varepsilon_o^3}{180 \mu (1 - \varepsilon_o)} \quad (36)$$

Onde d = diâmetro do grão e

μ = viscosidade da água [Kg/m.s]

As equações propostas necessitam do conhecimento da porosidade antes da fluidização ou da expansão. Para leito homogêneo com esferas quase idênticas como meio granular $\varepsilon_o = 0,38$ (Di Bernardi).

Wen e Yon citados em DI BERNARDO (1993) propuseram uma relação que permite o cálculo da velocidade mínima de fluidização sem o conhecimento da porosidade

$$U_{mf} = \frac{\nu}{d} \left(\sqrt{1135 + 0,0408 Ga} - 33,7 \right) \quad (37)$$

ε_o :

$$Ga = \frac{d^3 \rho g}{\mu^2} \quad (\text{número de Galileu}) \quad (38)$$

$$\text{ou } Ga = \frac{g (d_s - 1) d^3}{\nu^2} \quad (39)$$

onde d_s = densidade do grão

2.3.3.1.3 - Velocidade Máxima de Fluidização

A velocidade máxima de fluidização é a velocidade limite de queda livre dos grãos. A importância do conhecimento dessa velocidade está em determinar o valor de velocidade de aproximação ascensional que arrasta os grãos. A resultante das forças que exercem sobre um grão ou partícula permite aplicar, expressando a força de arraste em função da energia cinética específica do líquido, o critério de Newton, (JABBOURI, A. 1988),

$$Ne = \frac{4}{3} \frac{d(\rho_s - \rho)}{\rho U^2} g \quad (40)$$

A análise adimensional mostra que a relação entre os diferentes parâmetros que caracterizam o sistema, deve ser colocada, sob a forma de uma relação geral entre dois critérios adimensionais, onde Ne e Re:

$$Ne = \frac{a}{Re^n} \quad (41)$$

A combinação da equação (30) e (31), sabendo que $Re = rUd/\mu$, fica:

$$U^{2-n} = \frac{4}{3} \frac{d^{1+n} \cdot (\rho_s - \rho) \rho^{n-1} \cdot g}{\mu^n a} \quad (42)$$

Para facilitar o uso desta equação, introduzem-se dois outros números adimensionais:

$$x(d) = Ne \cdot Re^2 \quad e \quad y(U) = \frac{Re}{Ne} \quad (43)$$

Os valores de a e de n são tirados em função dos valores de x(d) e y(U) e de Re:

Tabela 2: Valores de a e n

Re	y (U)	x (d)	a	n
< 1	< 1/24	< 24	24	1
> 1000	> 2270	44 x 10 ⁴	0,44	0
	entre estes dois valores		18,5	0,6

2.3.3.1.4 - Expansão do Leito

A maioria dos estudos sobre expansão de um leito granular foram efetuados para estudar o comportamento hidrodinâmico nas lavagens de filtros de areia. Desses estudos surgiram os modelos descritos abaixo:

Modelo de Feixe de Poros

O escoamento em regime laminar neste modelo é representado pela equação de Kozeny-Carman:

$$U_e = \frac{\Delta h}{L_e} \frac{d^2 \cdot \varepsilon_e^3}{180 \mu (1 - \varepsilon_e)^2} \quad (44)$$

O volume de grãos do leito fixo é exatamente o mesmo no leito expandido (LEME, 1979). Assim a equação de conservação se escreve:

$$L_e(1 - \varepsilon_e)A = L_o(1 - \varepsilon_o)A$$

$$L_e(1 - \varepsilon_e) = L_o(1 - \varepsilon_o) \quad (45)$$

A combinação das equações (26), (30) e (31) permite escrever a relação de Leva:

$$\frac{U_e}{U_o} = \frac{(1 - \varepsilon_o)}{\varepsilon_o^3} \frac{\varepsilon_e^3}{(1 - \varepsilon_e)} \quad (46)$$

A relação é aplicável para meios suficientemente densos para ser assimilado a feixes de poros, isto é, para porosidade inferior a 0.80 e para escoamento laminar no interior dos poros, ou seja $Re < 1$.

Modelo de Richardson e Zaki

Richardson e Zaki verificaram uma lei baseada em três dados experimentais com valores de porosidade indo até 1.

$$\frac{U_e}{U_i} = \varepsilon_e^n \quad (47)$$

onde U_i é a velocidade do líquido correspondendo a uma camada de porosidade igual a 1, isto é, com velocidade de arraste.

A velocidade U_i pode ser expressa em função da velocidade limite de queda livre U_1 de uma esfera isolada:

$$\text{Log } U_i = \text{Log } U_1 - d/D \quad (48)$$

d = diâmetro da esfera (grão)

D = diâmetro da coluna ou reator.

Os valores de n para diferentes regimes de escoamento são apresentados na tabela que segue:

Tabela 3: n para a equação de Richardson-Zaki para diferentes regimes de escoamento

$Re < 0,2$	$n = 4,65 + 20 d/D$
$0,2 < Re < 1$	$n = (4,4 + 18 d/D) Re^{-0,03}$
$1 < Re < 200$	$n = (4,4 + 18 d/D) Re^{-0,01}$
$200 < Re < 500$	$n = 4,4 Re^{-0,01}$
$Re > 500$	$n = 2,4$

2.3.3.2 - Gradiente de Velocidade no Leito Granular Expandido

Para o cálculo do gradiente de velocidade G para o leito expandido, SENS E MARTIN (1996) basearam-se na equação de Ergun como foi proposto nos estudos em leito fixo para a perda de carga, alterando apenas ε_0 (porosidade do leito fixo) por ε_e (porosidade do leito expandido):

$$G = \left[150 \frac{(1 - \varepsilon_e)^2}{\varepsilon_e^4} \left(\frac{S}{6} \right)^2 U_0 + 1,75 \frac{1}{\nu} \frac{(1 - \varepsilon_e)}{\varepsilon_e^4} \left(\frac{S}{6} \right) U_0^3 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (49)$$

Onde ε_e = porosidade do meio expandido; S = área específica do grão; U_0 = velocidade ascensional a reator vazio; ν = viscosidade cinemática [m²/s].

2.3.3.3 - Número de Camp

O número de Camp "Ca", como já visto anteriormente, é parâmetro auxiliar no dimensionamento do sistema de floculação.

Da mesma forma como para G, o número de Camp também pode ser calculado para o leito expandido pela seguinte equação:

$$Ca = \left[150 \frac{(1 - \varepsilon_e)^2}{\varepsilon_e^4} \left(\frac{S}{6} \right)^2 U_0 + 1,75 \frac{1}{\nu} \frac{(1 - \varepsilon_e)}{\varepsilon_e^4} \left(\frac{S}{6} \right) U_0^3 \right]^{\frac{1}{2}} \cdot Le \quad (50)$$

O tempo de detenção no floculador granular é:

$$T = \frac{L}{U} \quad (51)$$

$$U = \frac{U_0}{\varepsilon_0} \quad (52)$$

sendo U a velocidade real da água entre os grãos.

O tempo de detenção no leito expandido é:

$$T_e = \frac{Le \cdot \varepsilon_e}{U_0} \quad (53)$$

O número de Camp Ca_e , conhecendo-se o valor da perda de carga, é:

$$Ca_e = Ge \cdot Te \quad (54)$$

$$Ca_e = \sqrt{\frac{\varpi U_o Je}{\varepsilon_e \mu}} \cdot Te$$

$$Ca_e = \sqrt{\frac{\varpi U_o Je}{\varepsilon_e \mu}} \frac{Le \cdot \varepsilon_e}{U_o}$$

$$Ca_e = \sqrt{\frac{g \varepsilon_e \Delta h e \cdot Le}{\nu U_o}} \quad \text{ou} \quad Ca_e = \sqrt{\frac{g Je \varepsilon_e}{\nu U_o}} \cdot Le \quad (55)$$

2.3.3.4 - Porosidade e Altura do Leito

No segundo trecho do gráfico ilustrativo da figura 7, onde os grãos encontram-se fluidificados, pode-se calcular a porosidade do meio pela equação:

$$\varepsilon_e = \frac{Ex - 1 + \varepsilon_0}{Ex} \quad (56)$$

onde: ε_e = porosidade no meio expandido;

ε_0 = porosidade no meio fixo (antes da expansão)

Ex = expansão. Por exemplo, se a expansão é de 30%, $Ex = 1,30$.

$$Le = \left(1 + \frac{\varepsilon_e - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon_e} \right) \cdot L \quad (57)$$

Sendo Le a altura do leito expandido, $Le = Ex \cdot L_0$

2.3.3.5 – Cálculo do Floculador

Para calcular um reator de floculação em meio granular expandido, é necessário conhecer a vazão Q , adotar o tempo de detenção $T(T_e)$, o diâmetro dos grãos d e a velocidade de aproximação U_0 . A porosidade do meio para grãos esféricos é 0.38. A porosidade do meio expandido é dada pela fórmula:

$$\varepsilon_e = \frac{Ex - 1 + \varepsilon_0}{Ex} \quad (58)$$

O volume útil do floculador é:

$$V = \frac{Q \cdot T_e}{1 - \varepsilon_e} \quad (59)$$

Para reator cilíndrico, o diâmetro é:

$$D = \sqrt{\frac{4Q \cdot \varepsilon_e}{\pi \cdot U_0}} \quad (60)$$

A altura dos grãos expandidos é:

$$Le = \frac{4V}{\pi D^2} \quad (61)$$



CAPÍTULO III

3. METODOLOGIA

3.1 - O Piloto

Para realizar o experimento foi montado um piloto. A figura 8 apresenta um desenho esquemático do piloto usado para floculação em meio granular.

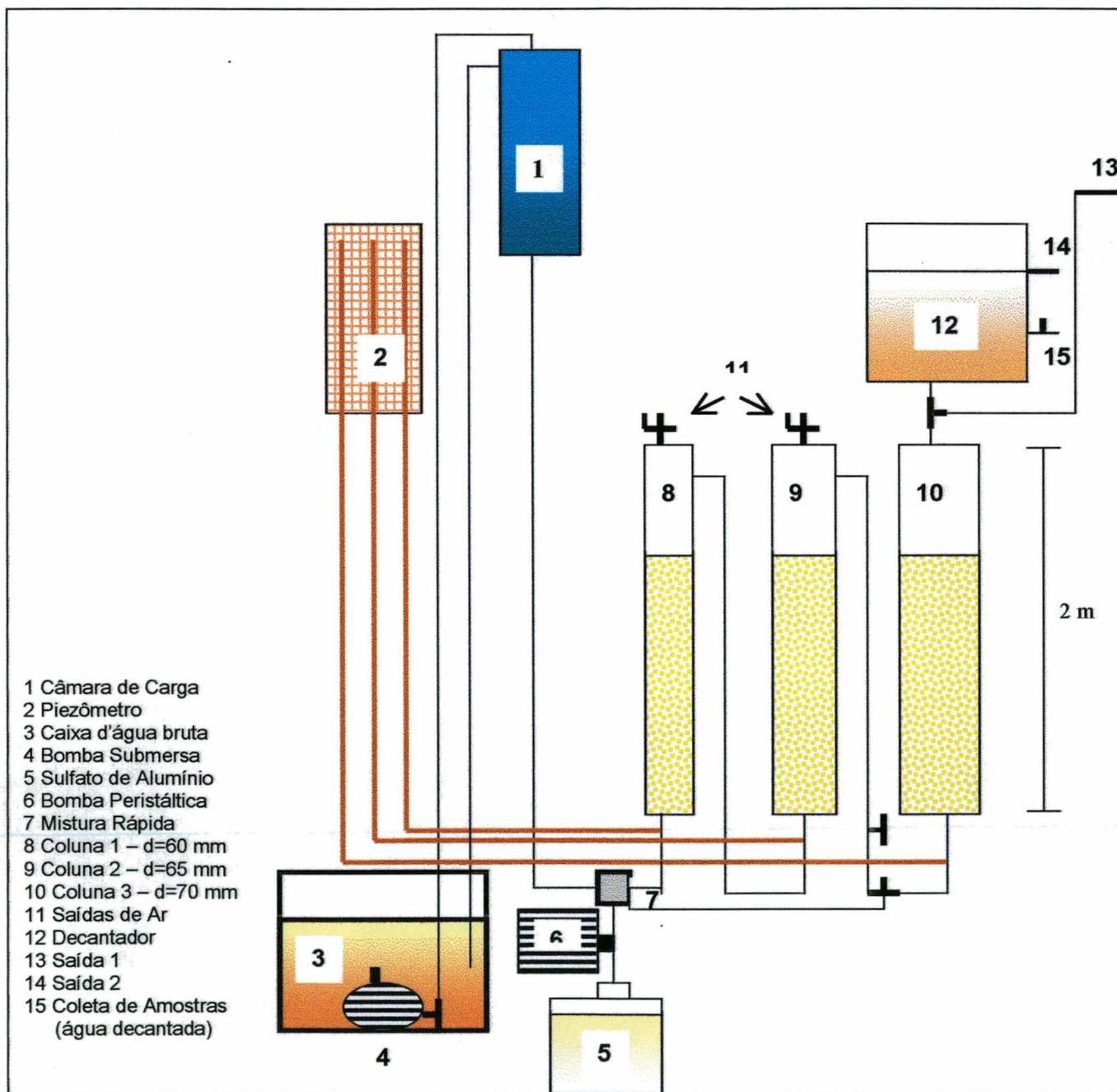


Figura 8: Desenho esquemático do piloto

Após receber o coagulante (sulfato de alumínio), a água bruta entra em contato com o meio granular no sentido ascendente, causando expansão nas esferas do meio. A água passa pelas três colunas de diferentes diâmetros, chegando ao decantador já floculada. Para obter resultados com o piloto funcionando apenas com uma coluna, a água passa apenas pela terceira coluna quando um registro que separa esta coluna das demais é fechado.

As amostras para análises de água floculada e decantada são coletadas no decantador, após tempos de decantação de 10 e 20 minutos.

Para manter o funcionamento contínuo do piloto, fecha-se um registro localizado entre a última coluna e o decantador e a água segue por uma saída lateral localizada no final da terceira coluna.

3.1.1 – Misturador Rápido:

A mistura rápida se passa na própria tubulação de entrada da água bruta no piloto, fazendo-se uma diminuição do diâmetro e em seguida aumentando, provocando assim uma grande turbulência ($G \sim 800s^{-1}$). A figura 9 apresenta um desenho esquemático deste processo.

A dosagem do coagulante sulfato de alumínio é feita através de uma bomba peristáltica visualizada na foto presente na figura 10.

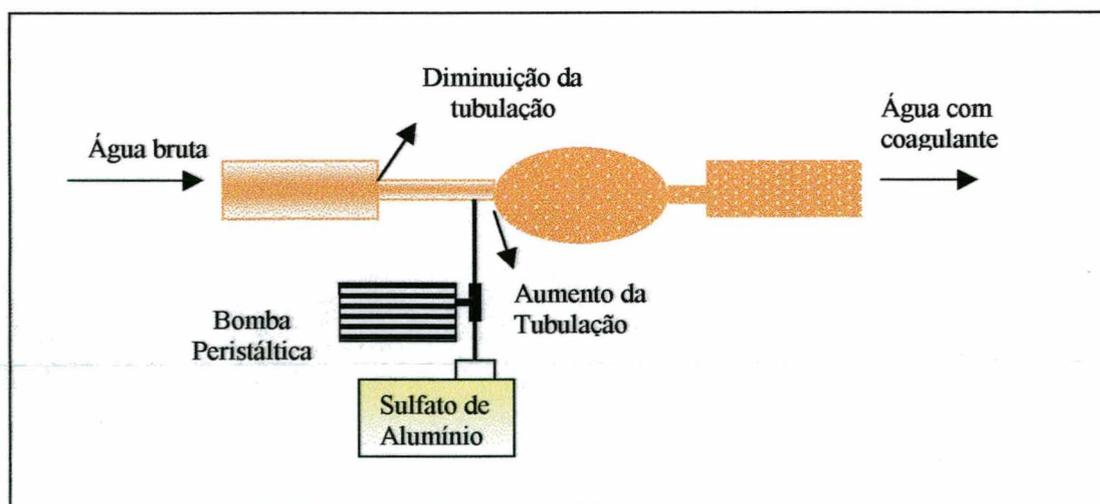


Figura 9: Desenho esquemático do processo de mistura rápida



Figura 10: Bomba peristáltica para dosagem de sulfato de alumínio

3.1.2 - Floculador

O floculador é formado por três colunas de vidro dispostas em ordem crescente de diâmetro, sendo eles 60, 65 e 70 mm, com altura de 2m cada coluna. As colunas são interligadas por mangueiras de plástico transparente com 0.5' de diâmetro. A figura 11 mostra uma foto do piloto.

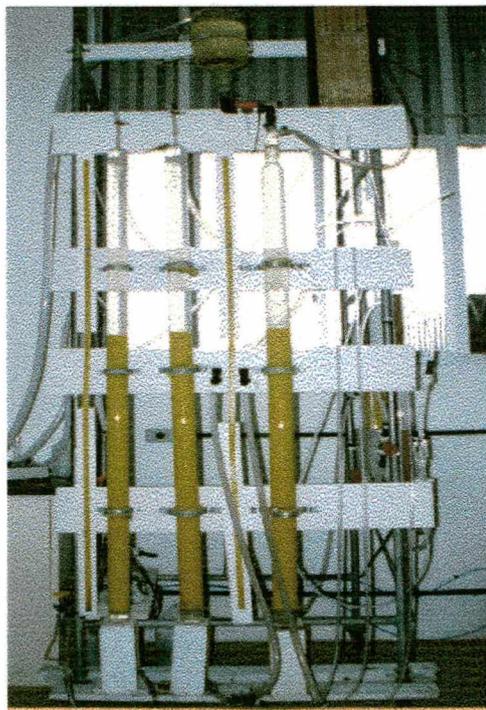


Figura 11: Foto do piloto

3.1.3 – Meio Granular

O meio granular é composto de esferas de polietileno de alto impacto com 6mm de diâmetro e uma densidade de 1016,52.

3.1.4 - Decantador

A decantação não fez parte do estudo, porém utilizou-se um decantador para possibilitar as medições de eficiência da floculação.

O decantador (figura 12) também de vidro está localizado na parte superior da última coluna, possui 200mm de diâmetro e altura de 500mm, na parte lateral possui dois orifícios, um localizado na parte inferior para coleta de amostra em descontinuo e outro na parte superior para saída de água quando o piloto está funcionando em contínuo.



Figura 12: decantador

3.1.5 - Alimentação do Piloto

O piloto é alimentado com água bruta localizada em duas caixas de água (figura 13) com 1000 l cada uma. A água é bombeada por uma bomba submersa para uma câmara de carga (figura 14) localizada a seis metros de altura da entrada do piloto.

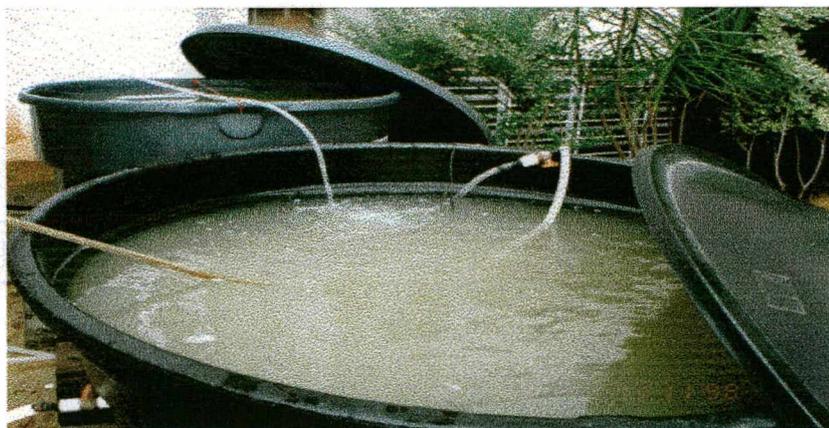


Figura 13: caixas d'água para a alimentação do piloto

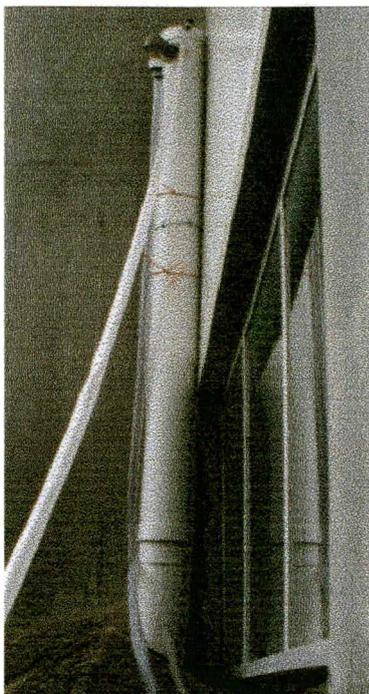


Figura 14: Câmara de carga

3.2 - Teste de jarros

Durante todo o tempo de funcionamento do piloto, testes de jarros foram realizados para determinar a melhor dosagem de sulfato, tempo de floculação e gradiente de velocidade para água usada no piloto.

Os ensaios foram realizados em aparelho da nova ética, composto de 6 reatores tronco-prismáticos com seção transversal quadrada, de capacidade de 2 litros possibilitando aplicações até 600 rpm ($G= 2200s^{-1}$) apresentado na figura 15 e outro aparelho da "Milan jarrest modelo JT. 103" com dispositivo de controle de agitação regulável entre 10 e 120 rpm. Tal aparelho possui um tacômetro onde é lido o número de rotações, e um cronômetro para controlar o tempo de floculação. Para o ensaio em estudo, a potência é fornecida à água através de agitadores mecânicos.

A adição do coagulante é feita com alta agitação (120rpm) durante um pequeno espaço de tempo (1min).

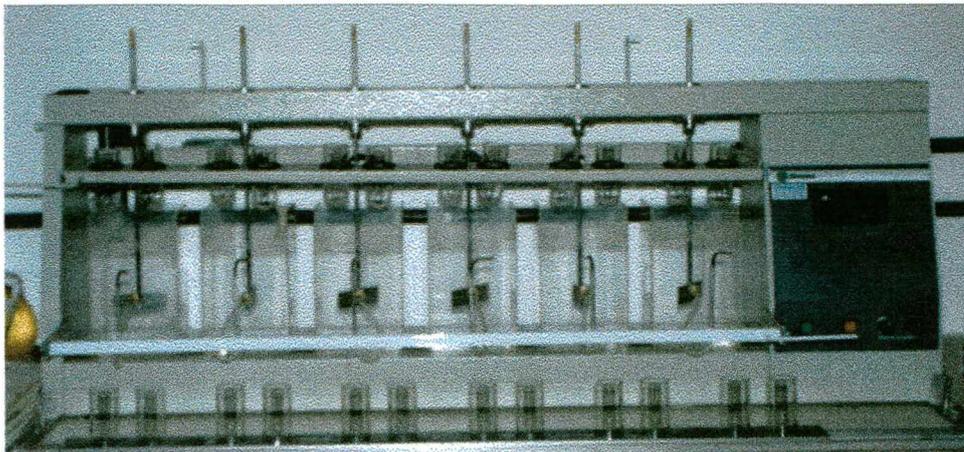


Figura 15: Aparelho de jarrest

3.2.1 - Melhor Dosagem de Coagulante

Para determinar a melhor dosagem de coagulante (sulfato de alumínio), diferentes dosagens de sulfato de alumínio são adicionadas nos seis jarros do aparelho com variação de 5mg/l de um jarro para outro. Após a adição do sulfato a 120rpm, é diminuída a rotação para 40 rpm, passando-se para uma mistura lenta onde se dá a floculação. Esse tempo é de 20 minutos, período em que são formados os flocos, caso as condições sejam favoráveis.

Uma vez paralisada a agitação, a água deve permanecer em repouso para a decantação dos flocos formados. Após 10 e 20 minutos de decantação é feita a coleta de amostra para a leitura da turbidez.

O jarro que apresentar água com menor turbidez é o que possui a melhor dosagem de coagulante.

3.2.2 - Melhor Tempo de Floculação

Neste ensaio é adicionada a mesma dosagem de coagulante em todos os jarros e a mesma rotação de 40rpm na mistura lenta, variando-se o tempo de floculação para cada jarro: 2, 5, 10, 20, 30 e 60 minutos.

Após a floculação nos tempos citados aguarda-se 10 e 20 minutos quando é feita a coleta de amostras para a análise de turbidez. O jarro que apresentar água com menor turbidez é o que possui o melhor tempo de floculação.

3.2.3 - Melhor Gradiente de Velocidade

Para determinar o melhor gradiente de velocidade mantém-se uma dosagem de coagulante e um tempo de floculação fixos e variam-se as rotações por minuto do aparelho de jarrest, variando-se desta forma o gradiente como observado na Figura 16.

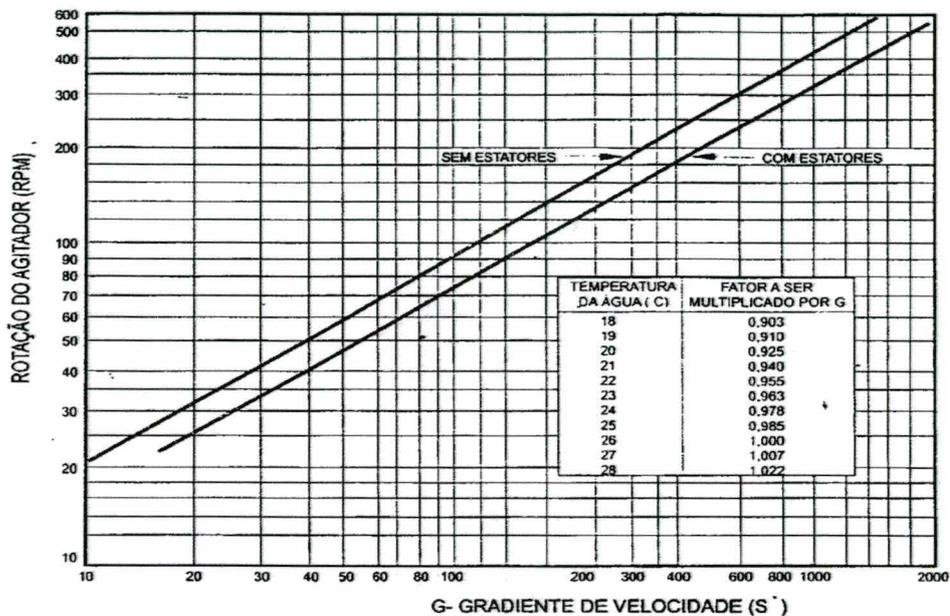


Figura 16: Relação do gradiente de velocidade com as rotações dos agitadores do jarrest (modelo: nova ética)

Este ensaio é feito com um jarro de cada vez, pois as pás do aparelho de jarrest não variam individualmente suas rotações.

O jarro que apresentar os melhores resultados de turbidez após 10 e 20 minutos de decantação é o que floculou com o melhor gradiente de velocidade.

3.3 - As Análises

As principais análises realizadas na água floculada e decantada para ver a eficiência do tratamento foram: turbidez, cor, sólidos e Carbono Orgânico Total (COT) porém análises auxiliares para caracterizar a água bruta também foram realizadas como pH e alcalinidade. Análises de turbidez e de cor foram realizadas também na água decantada e filtrada e na água floculada e filtrada. Para as análises com a água floculada e filtrada, 300ml de água foram coletados e filtrados em papel Whatmann 40 a cada 30 minutos de funcionamento do piloto.

3.3.1 - Turbidez

A turbidez é uma medida da resistência da água à passagem da luz, causada pela presença de materiais em suspensão, tais como argila, sílica, matéria orgânica e inorgânica finamente dividida em organismos microscópicos. Esses materiais ocorrem em tamanhos diversos, variando desde as partículas maiores que se depositam até partículas que permanecem em suspensão por muito tempo (partículas coloidais).

O método utilizado para medir a turbidez foi o nefelométrico (norma L5.156 da CETESB-1978), que se baseia na leitura da intensidade da luz dispersa pela amostra em um ângulo de 90° com a direção da luz incidente, em relação à intensidade da luz dispersa por uma suspensão padrão nas mesmas condições.

A amostra é agitada para dispersar perfeitamente os sólidos e colocada em tubo de vidro até a marca indicada O tubo com a amostra é inserido no lugar apropriado em um turbidímetro Hack 2000, cobrindo-se a amostra com o aparador. A leitura é feita diretamente.

A turbidez é expressa NTU(Unidade nefelométrica de turbidez)

3.3.2 - Cor

O método empregado para determinar a cor é a comparação visual (norma L5.117-CETESB-1978), em que a amostra é comparada com padrões em aparelho comparador.

A cor da amostra é determinada por comparação visual em comparador Nessler Quanti 200 da Policontrol, em que a amostra é comparada com as cores de um disco padronizado .

Um dos tubos do comparador é preenchido com água destilada e o outro com a amostra agitada. O aparelho então é ligado e o disco inserido e girado até a coincidência de cor. Se necessário, a amostra é diluída certo número de vezes até que a cor esteja compreendida entre os valores médios dados pelo disco.

A cor é calculada por:

$$\text{Cor} = C \times F$$

onde: C = leitura da cor da amostra diluída F = fator de diluição

A cor é expressa por u.c (unidade de cor)

3.3.3 - Potencial Hidrogeniônico

O método utilizado para medir o pH e a temperatura foi o método eletrométrico (norma L5.145 da CETESB-1978), baseado na utilização de um pHmetro composto por um eletrodo de vidro com uma membrana que separa dois líquidos de diferentes concentrações de íons H⁺; desenvolve-se entre os lados da membrana um potencial proporcional à diferença de pH entre os dois líquidos, que é medido em relação a um potencial de referência. O eletrodo foi imerso em aproximadamente 50 ml de cada amostra em um béquer, fornecido imediatamente o resultado.

3.3.4 - Alcalinidade:

A alcalinidade é a medida da capacidade que as águas têm de neutralizar ácidos. Embora sejam várias as substâncias que conferem alcalinidade à água, as predominantes são os hidróxidos, os carbonatos e os bicarbonatos.

A alcalinidade é determinada por titulação da amostra com solução de ácido forte até pontos de equivalência pré-estabelecidos (norma L5.102 da CETESB-1978).

Todas as amostras analisadas apresentaram pH inferior a 8,3, portanto, a alcalinidade medida foi a alcalinidade total.

Para determinar a alcalinidade total foram coletados 100ml de amostra e colocado em um erlenmeyer com 3 gotas do indicador metil orange. A amostra sob agitação é titulada com ácido sulfúrico 0.02N até a mudança de cor do indicador.

O volume de ácido gasto na titulação é aplicado na fórmula a seguir:

$$\text{Mg/l de CaCO}_3 = \frac{V \cdot N \cdot 50000}{V_{am}}$$

V_{am}

V = Volume de ácido gasto na titulação até a mudança de cor do indicador

N = Normalidade do ácido

V_{am} = Volume da amostra

A alcalinidade medida é a alcalinidade de bicarbonatos em mg/l CaCO₃

3.3.5 - Determinação dos Sólidos

A quantidade e a natureza dos sólidos nas águas variam muito. Em águas de abastecimento, os sólidos ocorrem, em geral, na forma dissolvida e são constituídos principalmente de sais inorgânicos, além de pequenas quantidades de matéria orgânica. Nessas águas o conteúdo de sólidos totais varia de 20 a 1000mg/l.

O método utilizado para a medição dos sólidos foi o gravimétrico (norma L5.149 da CETESB-1978).

Os testes para a determinação das diversas formas de resíduos são de natureza empírica e não determinam substâncias químicas específicas, mas sim classes de substâncias que têm semelhantes propriedades físicas e respostas à secagem e à ignição.

Os diversos tipos de resíduos são definidos arbitrariamente pelos detalhes de procedimento empregados, tais como: temperatura de secagem; temperatura de ignição; tempo de secagem; tempo de ignição; características do filtro (área de filtração, tamanho dos poros).

3.3.5.1 - Sólidos Suspensos

É a porção do resíduo total que não passa por filtro de fibra de vidro, que retém partículas de diâmetro de 1,2 μ ou maior.

Procedimento:

- a. colocar o papel filtro em um cadinho, aquecer a 100°C por 15 minutos, esfriar em um dessecador e obter o peso inicial (P1);
- b. filtrar a vácuo 100 ml da amostra;
- c. deixar o vácuo ligado até remover toda a água;
- d. secar o conjunto em estufa à temperatura de 105°C por 1 hora;
- e. esfriar em dessecador, pesar e, assim que esfriar completamente, obter o peso final (P2);

$$SS = (P2 - P1)(mg) \times 1000 / \text{Volume}(ml)$$

O resultado é dado em mg/l

3.3.5.2 - Sólidos Totais

É o material que resta na cápsula após a evaporação de uma porção de amostra e sua posterior secagem em estufa a 100°C, até o peso constante.

Procedimento:

- a. toma-se 100 ml da amostra em uma proveta;
- b. coloca-se no cadinho de porcelana, pesa-se a amostra(P1) e seca-se em banho maria;
- c. leva-se a estufa a 103-105°C durante 1 hora;
- d. resfria-se o cadinho num dessecador e obtém-se o peso final (P2)

O resultado é expresso em mg/l após o seguinte cálculo:

$$ST = (P2 - P1)(mg) \times 1000 / \text{Volume}(ml)$$

O resultado também é dado em mg/l

3.3.5.3 – Sólidos Dissolvidos

Os sólidos dissolvidos podem ser determinados subtraindo-se os sólidos suspensos dos sólidos totais.

$$SD = ST - SS$$

3.3.5.4 - Sólidos Sedimentáveis

Quantidade de material em suspensão que sedimenta por ação da força da gravidade, a partir de 1 litro de amostra que permanece por uma hora em cone Imhoff.

Procedimento:

- a. colocar 1000ml de amostra convenientemente agitada, medida em provetas, em cone Imhoff;
- b. deixar em repouso durante uma hora;
- c. fazer a leitura na escala do cone em (ml/l).

3.5.6 – Carbono Orgânico Total (COT)

As análises de carbono orgânico total foram feitas por um equipamento TOC 5000 da marca SCHIMADZU composto de catalizador de sensibilidade normal. O aparelho foi calibrado com os padrões de 100mg/l de TC (carbono total) e 100mg/l de IC (carbono inorgânico).

O princípio do método do carbono orgânico total se baseia na queima de amostra líquida em um forno a uma temperatura de 680°C. A amostra é carregada por ar sintético de alta pureza, controlada por fluxo de 150ml/min. A amostra é introduzida no tubo de combustão por intermédio de injeção automática de uma seringa. Neste tubo há um catalizador que converte a amostra por combustão em CO₂. Este CO₂ é detectado por detector de infravermelho (NDIR) que é convertido em um sinal elétrico e quantificado através de um pico integrado e calculado, comparando-o por uma curva analítica (100mg/L de carbono). O carbono inorgânico (IC) é analisado também por injeção de uma amostra líquida, e a reação é feita por ácido fosfórico (25%). A concentração de carbono inorgânico é determinada pelo mesmo procedimento como do carbono orgânico (TC). O carbono em forma de Hidrogeno carbonato é então analisado no canal IC.

Para a análise liga-se o aparelho e após o forno atingir a temperatura de 680°C, faz-se a calibração com solução de 100mg/l de TC e IC quando então a amostra é introduzida ao aparelho por um pequeno capilar que aspira a mesma para dentro do equipamento. No aparelho a amostra é levada ao forno de TC e logo é lida no canal IC. No final da análise é impresso em papel o resultado em $TOC = TC - IC$ (mg/l).

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O piloto foi colocado em operação pela primeira vez no dia 04/08/98 com o decantador operando em contínuo. Funcionou nessas condições até o final do mês de agosto, quando um registro foi instalado entre a última coluna e o decantador, objetivando a decantação em descontínuo.

Inicialmente o piloto funcionou aproximadamente por oito meses com uma água preparada com bentonita, com uma turbidez em torno 60 NTU. O tempo de funcionamento ficou em torno de oito horas por dia; durante todo o período de funcionamento do piloto algumas mudanças, como a dosagem de sulfato, foram realizadas em função dos resultados obtidos com os testes de jarro.

Com o objetivo de observar se o piloto apresentava bons resultados com outros tipos de água, foram submetidas ao piloto de floculação água natural coletada no Rio Cubatão, água de lagoa coletada na Lagoa do Peri, além de um efluente doméstico.

O piloto também trabalhou com 1 e 3 colunas em funcionamento para determinar as diferenças nos resultados.

A figura 17 mostra a foto dos flocos obtidos durante o processo de floculação dentro de uma das colunas do piloto.

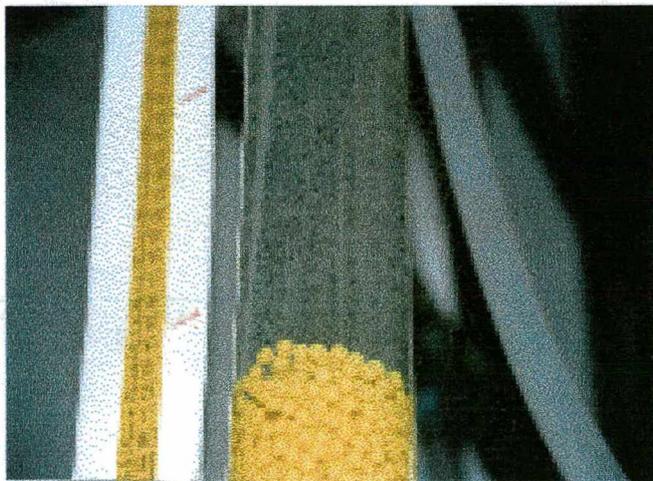


Figura 17: Foto dos flocos formados durante a floculação

4.1 - Condições Hidráulicas do Piloto:

Inicialmente foram realizados os ensaios hidráulicos para melhor visualizar o comportamento do piloto quando submetido a diferentes velocidades, observando parâmetros como perda de carga e expansão além de obter dados para o cálculo do gradiente de velocidade.

A figura 18 mostra a expansão das esferas do leito para diferentes valores de velocidade nas 3 colunas. Observa-se que a velocidade é diretamente proporcional à expansão, sendo que a U_{mf} (velocidade mínima de fluidização) do meio granular foi de 72.04 cm/min para a primeira coluna, 61.42cm/min para a segunda e 52.96 cm/min para a terceira coluna; com o aumento do diâmetro da coluna ocorre diminuição da velocidade mínima de fluidização.

Teoricamente a expansão deverá começar com a mesma velocidade em todas as colunas, porém como as colunas tinham um diâmetro muito pequeno, a acomodação dos grãos não se deu da mesma forma de uma coluna a outra. Para um reator em escala industrial a U_{mf} será $\leq 52,96$ cm/min para o grão utilizado.

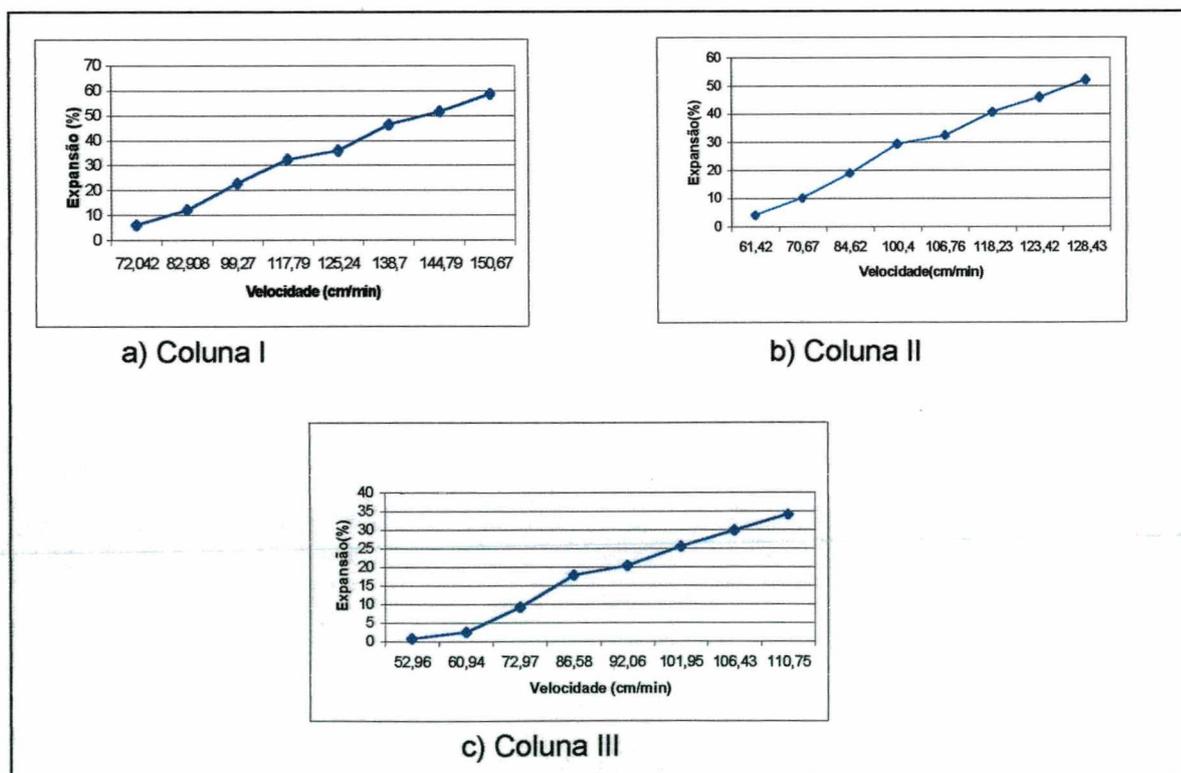


Figura 18: Expansão do leito granular em função da velocidade nas três colunas

A perda de carga também foi medida de acordo com o aumento da velocidade no leito expandido. Na figura 19 observa-se que o meio não atingiu o equilíbrio da perda de carga nas três colunas, isto é, não chegam a expansão a partir da qual a perda de carga permanece constante.

Da mesma forma que na figura anterior, se a distribuição dos grãos dentro da coluna for uniforme, a perda de carga será a mesma nas três colunas para a mesma velocidade de aproximação.

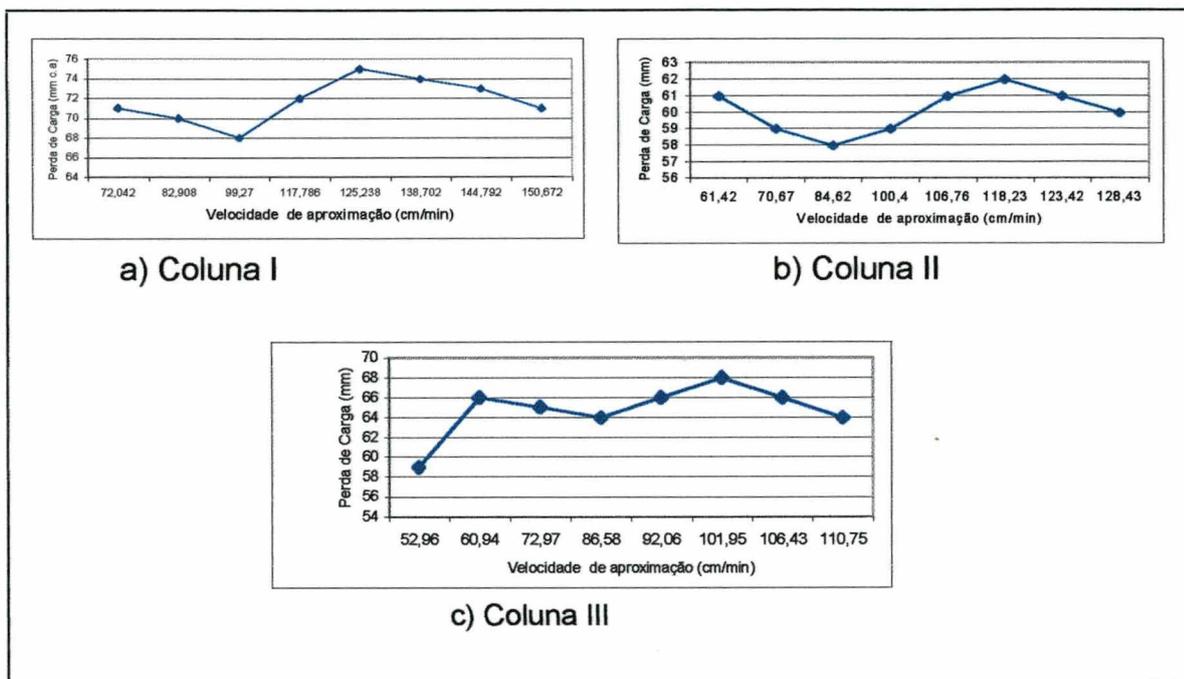


Figura 19: Perda de carga em função da velocidade nas 3 colunas

A figura 20 mostra o gradiente de velocidade calculado para diferentes velocidades nas três colunas. O gradiente de velocidade já visto na revisão bibliográfica foi calculado através da equação 25. Na figura 20 observa-se que, em todas as colunas a medida que a velocidade aumenta, o gradiente de velocidade tende ao valor máximo, quando então declina levemente tendendo à estabilidade. Os valores de G , na região de G máximo, ficam em torno de $37,74 \text{ s}^{-1}$ na primeira coluna, $30,9 \text{ s}^{-1}$ na segunda coluna e $30,82 \text{ s}^{-1}$ na terceira coluna.

É importante ressaltar que as três colunas encontram-se em série, e que neste caso a vazão que passa na primeira coluna passa nas demais. Assim sendo, a velocidade

diminui de uma coluna a outra, conseqüentemente a perda de carga e o gradiente de velocidade.

Estes resultados são muito semelhantes aos obtidos na pesquisa feita por SENS (1995), o que mostra que os resultados experimentais obtidos se adaptaram bem as teorias existentes.

Observa-se que os valores dos gradientes decrescem de um coluna a outra em função do aumento do diâmetro das mesmas, aumentando desta forma o tempo de detenção. As tabelas destes gráficos de gradiente de velocidade assim como de perda de carga e expansão estão presentes no **anexo 11**.

O gradiente de velocidade de uma coluna a outra para a mesma velocidade de aproximação, teoricamente deverá ser o mesmo, porém na prática, para estes experimentos não deu o mesmo, isto se deve a diferença de relação entre o diâmetro do grão e o diâmetro da coluna (d_g/d) serem diferente de uma coluna a outra, e a relação ser muito próxima de 10.

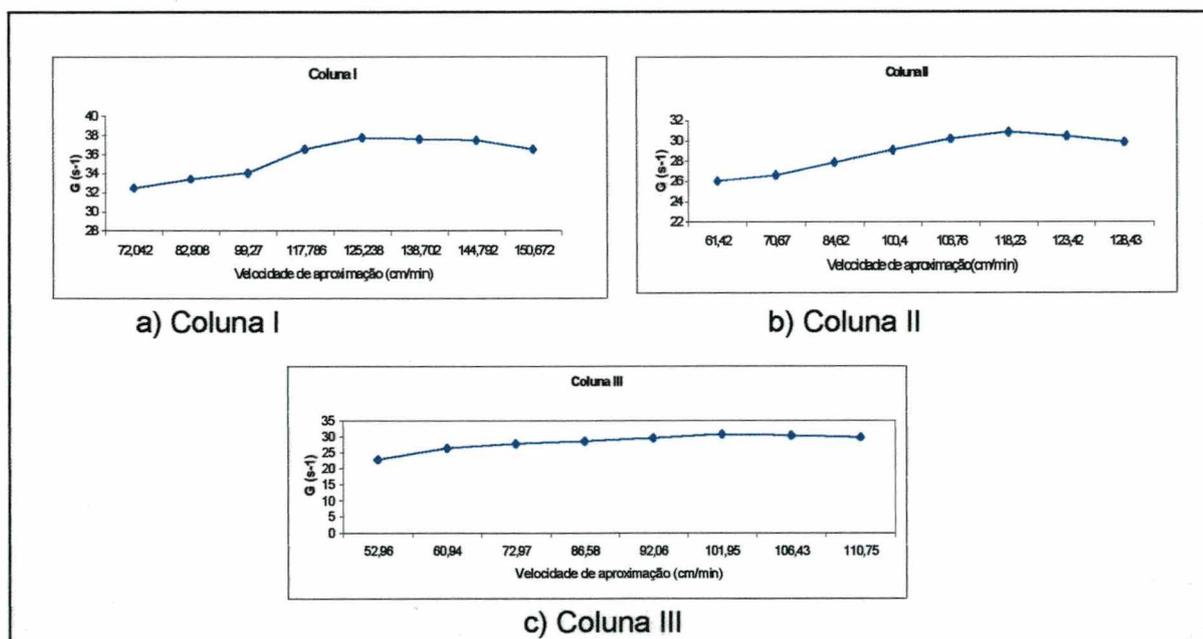


Figura 20: gradiente de velocidade versus velocidade de aproximação nas três colunas

4.1.1 - Determinação das Melhores Condições Hidráulicas de Funcionamento do Piloto

Para determinar as melhores condições hidráulicas de funcionamento, o piloto trabalhou com água preparada com bentonita durante uma semana em média oito horas

por dia, com coletas periódicas (30 minutos) de amostras para análise de turbidez nos tempos 10 e 20 minutos de decantação. A dosagem de sulfato foi determinada no jarrest.

Na figura 21 observa-se o abatimento da turbidez com diferentes vazões. Em alguns pontos do gráfico observa-se brusca redução da turbidez provavelmente devido a ocorrência de filtragem. Outro fator importante observado é que a redução da turbidez não está diretamente relacionada ao tempo de funcionamento do piloto.

A melhor vazão, segundo o gráfico da figura 21, é de 230l/h, em que não há variações bruscas de turbidez e a mesma manteve-se em patamar aceitável.

A tabela 4 relaciona as vazões com as velocidades para as três colunas do piloto. A tabela 5 relaciona a perda de carga, expansão do leito e gradiente de velocidade para a vazão de 230l/h.

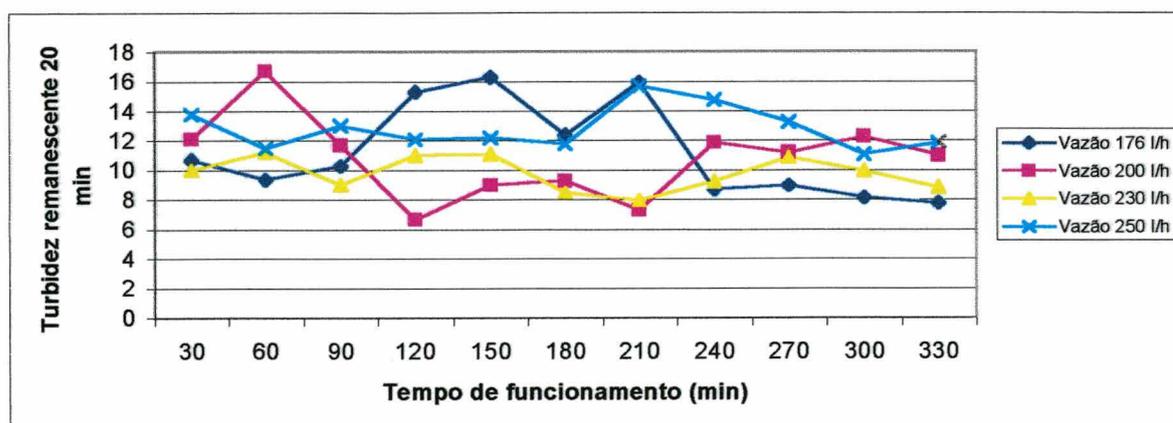


Figura 21: Melhor vazão de funcionamento do piloto

Tabela 4: Relação da vazão com a velocidade

Vazão (l/h)	Velocidade (cm/min)		
	Coluna I	Coluna II	Coluna III
176	103,2	88,2	76,2
200	117,6	100,4	86,4
230	135,6	115,2	99,6
250	147	125,4	108

Tabela 5: Relação das condições hidráulicas para a vazão de 230l/h nas três colunas

	Coluna I	Coluna II	Coluna III
Perda de Carga (mm c.a)	74	62	68
Expansão (%)	44,73	40	27,8
Gradiente de vel. (s-1)	37,3	30,1	28,6
Tempo de floculação (min)	0,93	1,1	1,27

Nas tabelas 4 e 5 observa-se que a expansão diminui de uma coluna para outra em função do aumento do diâmetro da coluna e do decréscimo da velocidade, pois como já visto nas figuras 18 e 19, a expansão até certo ponto é diretamente proporcional à velocidade.

Os gradientes de velocidade referentes aos melhores resultados quanto à remoção de turbidez foram muito próximo aos valores de G máximo em cada coluna observados na figura 20.

Para a mesma vazão as velocidades diminuem de uma coluna a outra, conseqüentemente as perdas de carga deverão diminuir na mesma proporção, porém não é o que aconteceu entre a coluna 2 e 3. Isto se deve ao fato explicado anteriormente, sobre a acomodação dos grãos dentro das colunas, ou seja houve uma maior acomodação na terceira coluna.

Os valores de gradiente de velocidade para a melhor remoção de turbidez também decrescem com o aumento do diâmetro da coluna, sendo este um dos motivos pelos quais se deu continuidade ao estudo com floculação em meio granular expandido, buscando-se, com tal diminuição do gradiente de uma coluna para outra, maiores eficiências.

4.2– Ensaio de Floculação

Os ensaios de floculação propriamente dita foram realizados com quatro tipos de água, tendo o piloto trabalhado com água com bentonita, água natural de um rio, água de lago e um efluente doméstico. Os resultados a seguir estão listados de acordo com a água trabalhada.

4.2.1 - Água com Bentonita

Para cada 1000 litros de água potável foram adicionados 100g da argila bentonita, com o objetivo de causar na água uma turbidez de aproximadamente 60 NTU. Procurou-se dosar a mesma quantidade de bentonida para manter a água sempre com as mesmas características.

4.2.1.1 – Ensaio em descontínuo - jartest

Durante todo o período de funcionamento do piloto com esta água, testes de jarro foram realizados para determinar a melhor dosagem de sulfato, tempo de floculação e gradiente de velocidade.

A figura 22 mostra a melhor dosagem de sulfato de alumínio.

Características da água bruta:

- Turbidez da água bruta = 60 NTU
- Alcalinidade = 10,4 mg/l CaCO₃
- pH = 7,2

Condições de operação do jartest:

- Tempo de mistura rápida a 120 rpm = 2 min
- Tempo de mistura lenta a 40 rpm = 20 min
- Tempo de decantação = 10 e 20 min

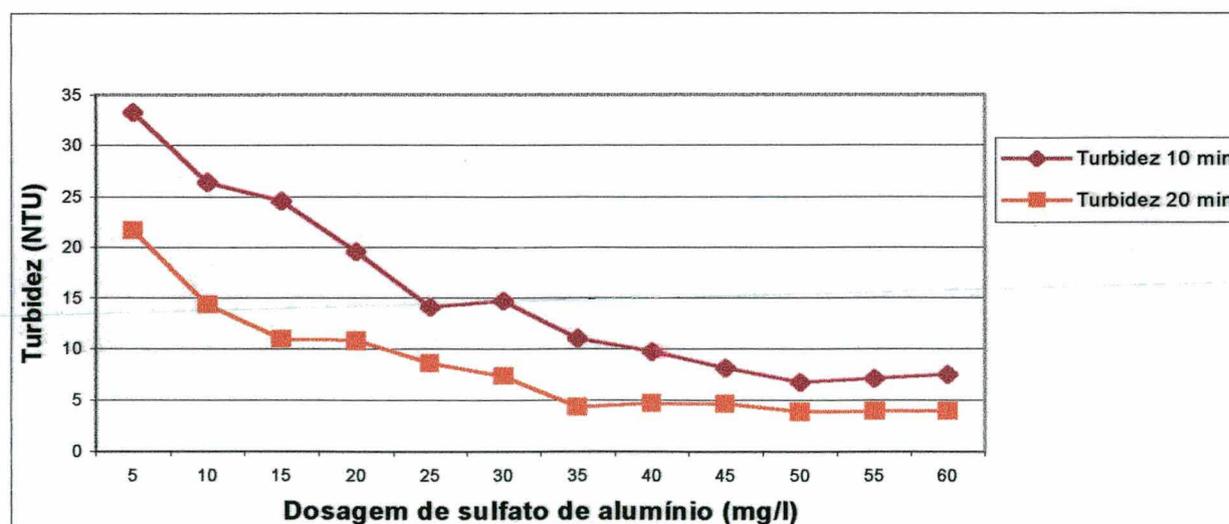


Figura 22: melhor dosagem de sulfato de alumínio para água com bentonita.

De acordo com o gráfico apresentado na figura 22 observa-se que a melhor dosagem de sulfato para uma água nestas condições fica em torno de 50mg/l.

Na figura 23 observa-se a qualidade da água decantada em função do gradiente de velocidade para diferentes tempos de floculação, sendo que os menores valores de turbidez encontrados foi no menor valor do gradiente de velocidade ($G=10s^{-1}$).

Na figura 23 também observa-se uma maior remoção da turbidez para tempos de floculação grandes, como 60 minutos, que foi o melhor entre os tempos testados.

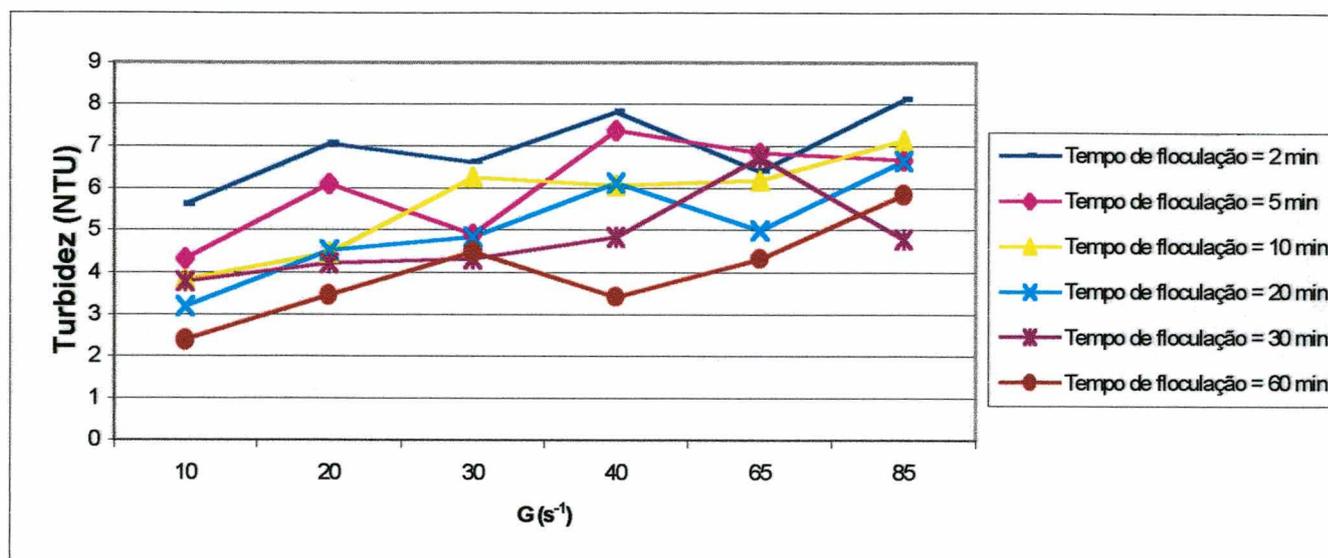


Figura 23: Qualidade da água decantada em função do gradiente de velocidade para diferentes tempos de floculação para água com bentonita

4.2.1.2 Ensaios em Contínuo:

Nestes ensaios, a água foi floculada no reator em contínuo, trabalhando-se com vazão de 230l/h, em que as velocidades de aproximação nas colunas 1, 2 e 3 são respectivamente 135,6 cm/min ($G= 37,3s^{-1}$), 115,2 ($G= 30,1s^{-1}$) e 99,6 cm/min ($G= 28,6s^{-1}$). O tempo de floculação com três colunas em funcionamento foi de 3,3 minutos. Para caracterizar o desempenho da floculação mediram-se os parâmetros de turbidez após os tempos de decantação de 10 e 20 minutos. Os resultados aparecem nas figura 24 e 25.

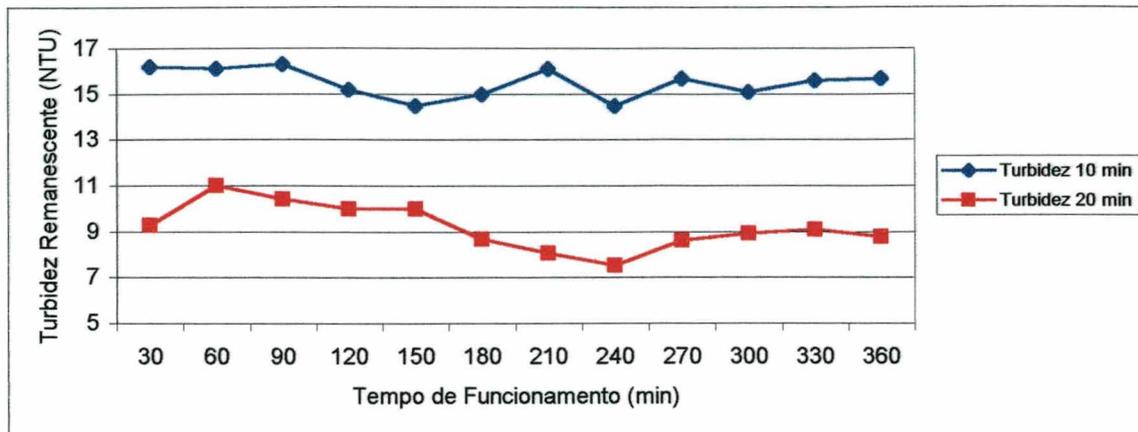


Figura 24: Abatimento da turbidez em relação ao tempo de funcionamento do piloto para água com bentonita

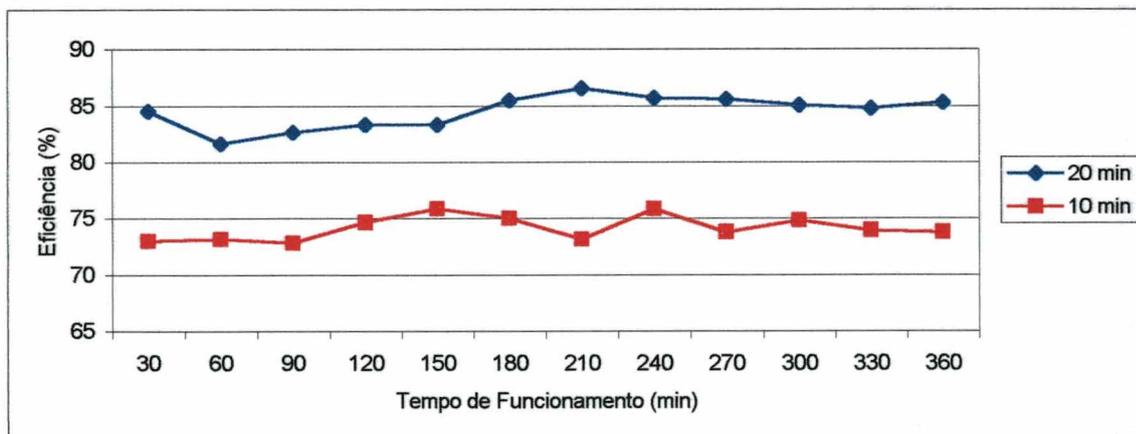


Figura 25: Eficiência do piloto em relação ao abatimento da turbidez para água com bentonita

Nas figuras 24 e 25 observa-se que a remoção da turbidez permaneceu praticamente constante em todo o tempo de operação do sistema de tratamento. Para o tempo de 10 min de decantação obteve-se eficiência na remoção de turbidez da ordem de 74%, e para o tempo de 20 minutos, da ordem de 84,5%.

No estudo de SENS e HANSEN (1995) os resultados foram melhores para um G em torno de $40s^{-1}$. Nestes ensaios não conseguimos colocar neste valor pois o meio granular passava da U_{mf} (velocidade mínima de fluidização), os grãos eram arrastados.

A figuras 26 e 27 apresentam o abatimento da turbidez nos tempos de decantação 10 e 20 minutos com o piloto trabalhando com 1 e 3 colunas em funcionamento

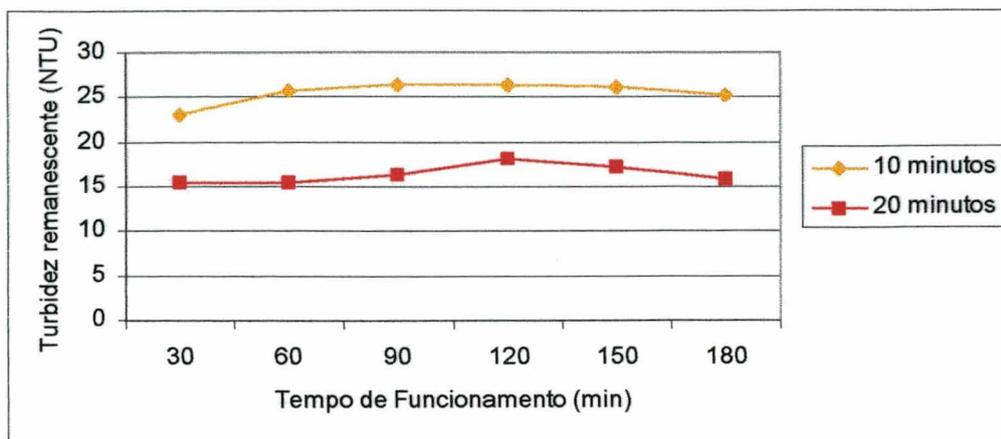


Figura 26: Abatimento da turbidez para água com bentonita com 1 coluna em funcionamento

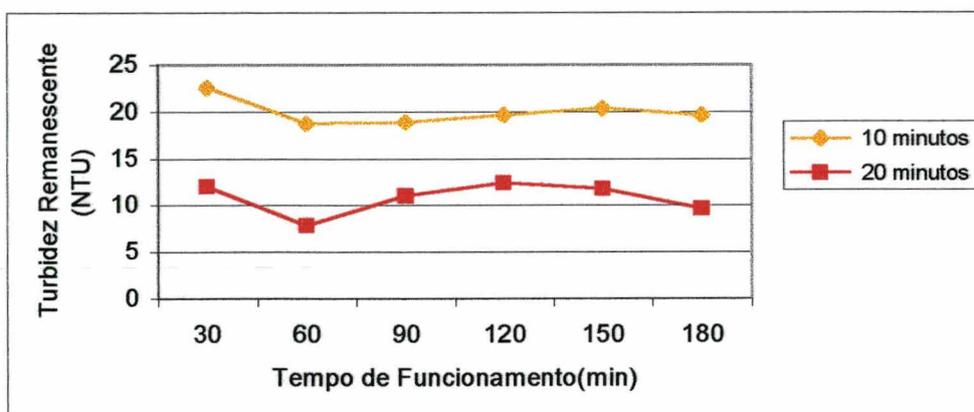


Figura 27: Abatimento da turbidez para água com bentonita com 3 colunas em funcionamento

A figura 28 mostra o abatimento da cor aparente após 20 minutos de decantação com 1 e 3 colunas em funcionamento.

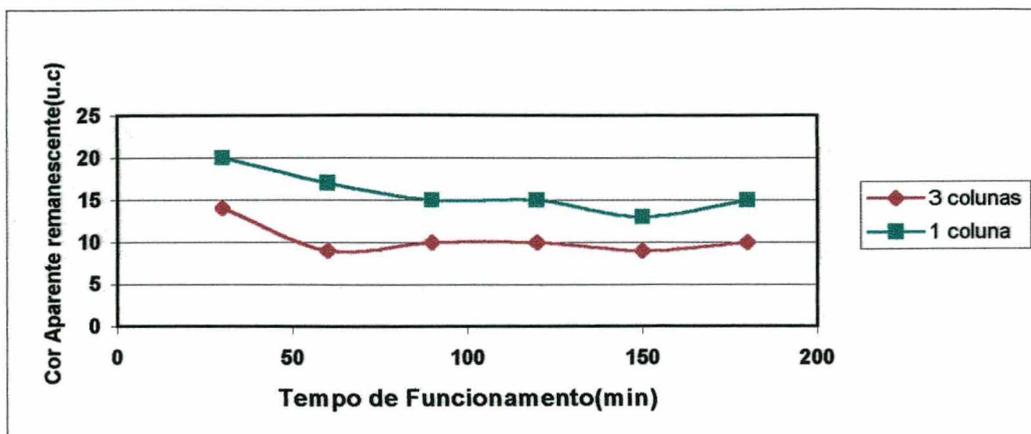


Figura 28: Abatimento da cor para água com bentonita

Nas figuras 26, 27 e 28 observa-se que os resultados quanto ao abatimento da turbidez e da cor aparente com três colunas em funcionamento foram melhores que com apenas uma coluna, fato este que confirma a teoria de que existe a tendência a maior eficiência quando o G decresce de uma coluna para outra em função do aumento do seu diâmetro e do tempo de detenção.

Os gráficos das figuras 26, 27 e 28 também mostram que não houve significativa mudança da turbidez e da cor de acordo com o tempo de funcionamento do piloto, descartando desta forma eventuais problemas de colmatação do meio granular.

SENS (1995), através de ensaios realizados em floculador granular em leito expandido composto apenas por 1 coluna de floculação, com água com bentonita em condições semelhantes a água aqui trabalhada, chegou a valores de turbidez acima de 20 NTU em água floculada e decantada 20 minutos. O trabalho aqui desenvolvido apresentou valores de turbidez inferiores a 20 NTU para o piloto trabalhando com 1 coluna e valores inferiores a 14 NTU para o piloto trabalhando com 3 colunas.

Embora estes resultados pareçam elevados em relação aos obtidos em jarrest e até em estações de água convencionais, é importante salientar que o tempo de floculação no piloto com uma coluna em funcionamento é de 1,27 minuto e com três colunas é de 3,3 minuto, enquanto que normalmente este tempo de floculação em estações convencionais é de 20 à 40 minutos.

Para comparar esses resultados, foi feito um jarrest com os mesmos tempos de floculação do piloto, cujos resultados estão na tabela 6.

Tabela 6: Comparação dos resultados do jarrest com o piloto para os mesmos tempos de floculação para água com bentonita.

Tempo de floculação (min)	1,27		3,3	
Floculadores	Jarrest	Piloto	Jarrest	Piloto
Turbidez 10 min	18,9	25,5	11,5	20,01
Turbidez 20 min	14,2	16,45	7,81	10,78

De acordo com a tabela 6, observa-se que os valores de turbidez da água decantada 10 e 20 minutos no piloto são maiores que os obtidos no Jarrest, porém a diferença da turbidez após 20 minutos de decantação para 1 e 3 colunas no piloto e no jarrest é pequena, observando-se desta forma que a turbidez não é totalmente reduzida com curtos tempos de detenção, indiferente do equipamento utilizado para a floculação.

As mesmas análises de turbidez foram feitas com 1 e 3 colunas em funcionamento para a água filtrada e comparadas com as obtidas com água decantada (figuras 29 e 30).

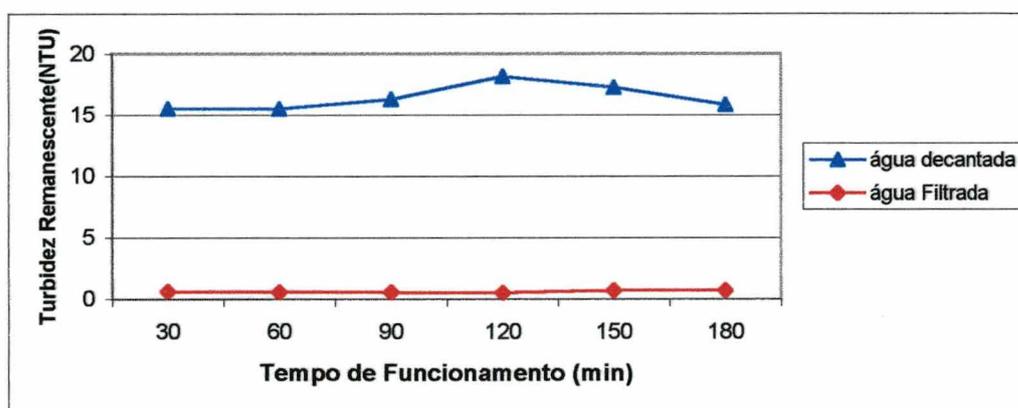


Figura 29: Abatimento da turbidez para água com bentonita decantada e filtrada com 1 coluna em funcionamento

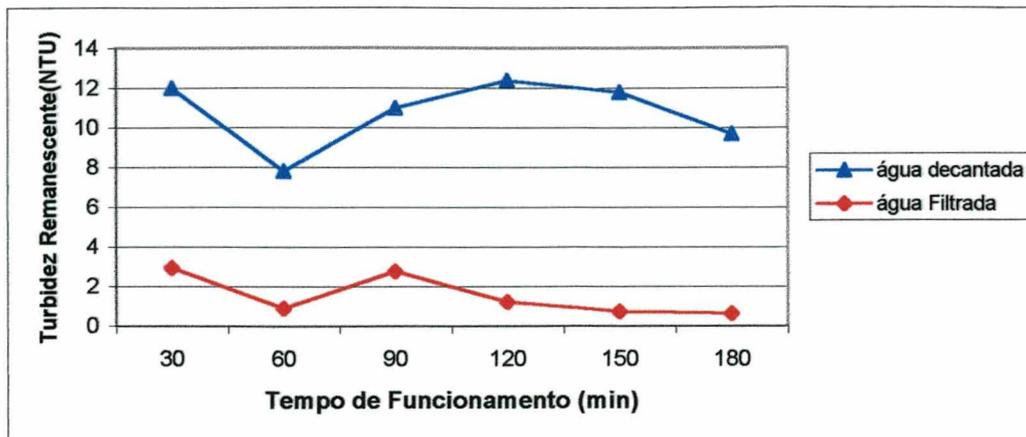


Figura 30: Abatimento da turbidez para água com bentonita decantada e filtrada com 3 colunas em funcionamento

Os gráficos da figura 29 e 30 mostram que para água filtrada os resultados de eficiência foram melhores com uma coluna em funcionamento que com três colunas. Esta filtração, como já descrita no capítulo 3 foi realizada em papel filtro *Whatmann 40*.

A água decantada com 1 coluna em funcionamento apresenta uma turbidez maior do que com 3 colunas. Provavelmente quando essa água é filtrada os resíduos que causavam turbidez vão acumulando-se no filtro, aumentando desta forma a espessura do meio filtrante e com isto a sua eficiência, fazendo com que haja maior retenção de tais resíduos no papel filtro.

Análises de sólidos sedimentáveis medido para 5, 10, 15, 30 e 60 min de sedimentação (figuras 31 e 32) foram realizadas na água floculada. A água bruta não apresentou sólidos sedimentáveis.

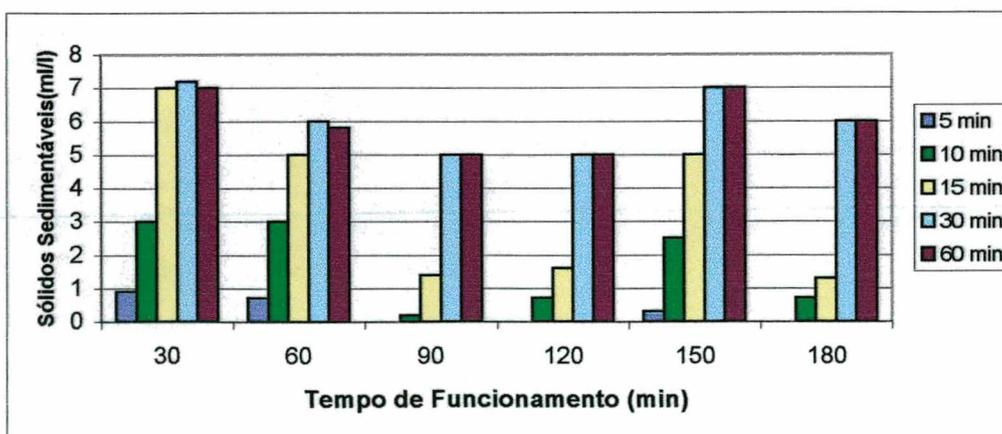


Figura 31: Sólidos sedimentáveis para água com bentonita com 1 coluna

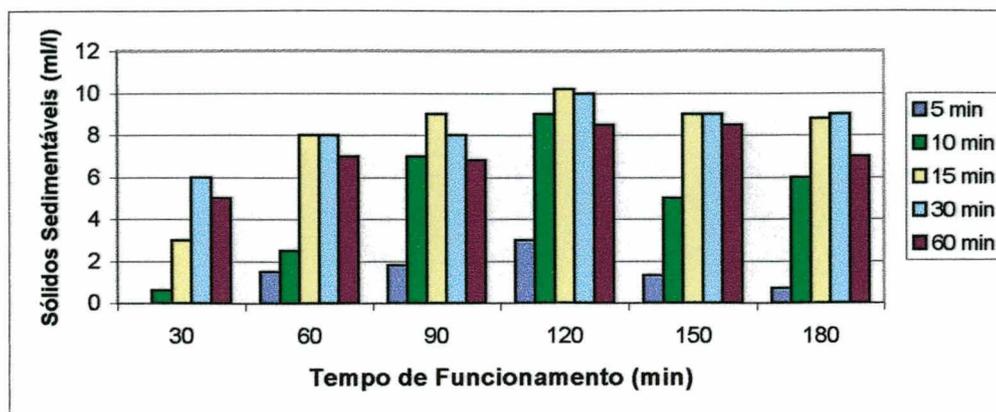


Figura 32: Sólidos sedimentáveis para água com bentonita com 3 colunas

Como já foi visto na metodologia para a análise de sólidos sedimentáveis, foram coletadas amostras de água floculada a cada 30 minutos de funcionamento do piloto. Nos gráficos das figuras 31 e 32 observa-se que cada amostra analisada apresenta um comportamento diferente que independe do tempo de funcionamento do piloto.

A quantidade de sólidos com 3 colunas parece ser maior do que com 1 coluna, provavelmente porque houve melhor floculação com 3 colunas, resultando em melhor sedimentação dos flocos formados.

No gráfico da figura 32 com 3 colunas em funcionamento, observa-se que todas as amostras analisadas apresentam aumento na quantidade de sólidos sedimentáveis (maior quantidade flocos) nos primeiros 15 a 30 minutos de sedimentação, quando então caem esses valores devido à compactação de tais flocos em função do seu peso.

Já com apenas uma coluna em funcionamento observa-se o aumento dos sólidos nos primeiros 30 minutos de sedimentação; depois estabilizam-se esses valores.

Objetivando avaliar a eficiência do piloto quanto à redução de sólidos, análises de sólidos suspensos, dissolvidos e totais foram realizadas. A água bruta apresentou 93mg/l de sólidos suspensos, 150mg/l de sólidos totais e 57 mg/l de sólidos dissolvidos. Os gráficos presentes nas figuras 33, 34 e 35 mostram os resultados obtidos destas análises para uma e três colunas em funcionamento.

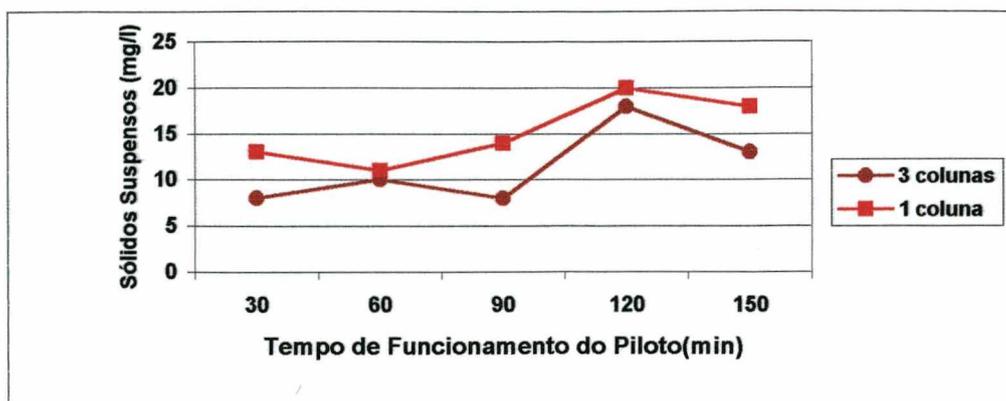


Figura 33: Abatimento dos sólidos suspensos para água com bentonita

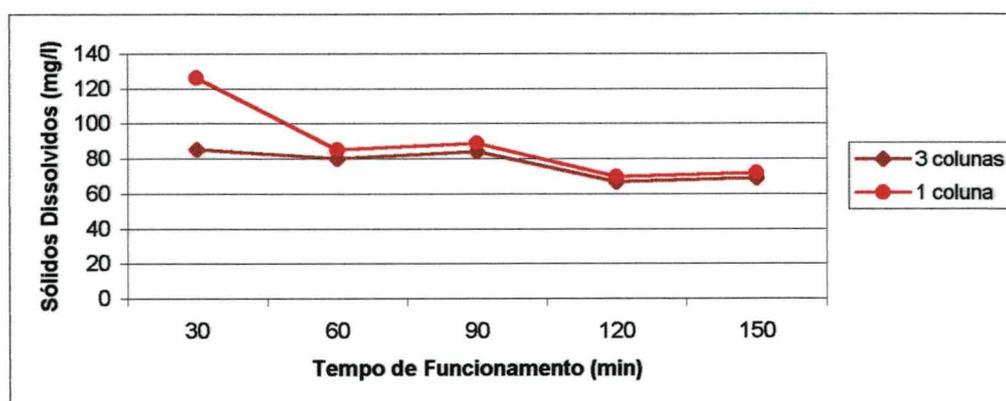


Figura 34: Abatimento dos sólidos dissolvidos para uma água com bentonita

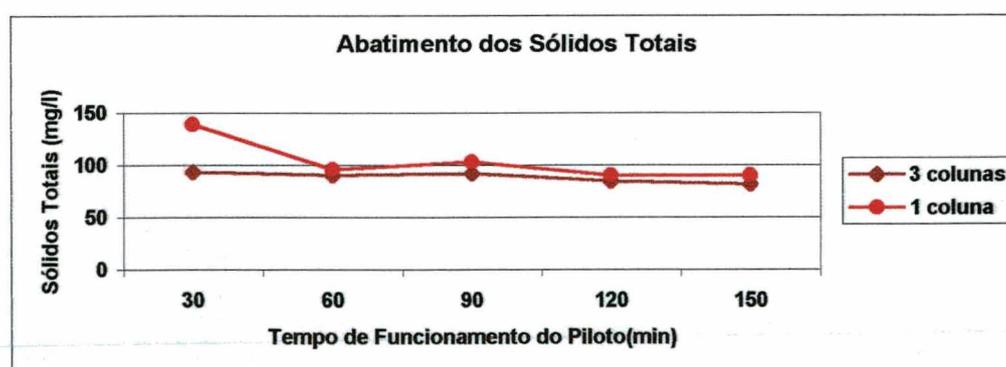


Figura 35: Abatimento dos sólidos totais para uma água com bentonita

As análises de sólidos dissolvidos e totais não apresentaram grande diferença com o piloto trabalhando com 3 ou com 1 coluna; já os sólidos suspensos tiveram melhor redução com três colunas em funcionamento. Estes resultados mostram que o aumento

da turbidez observado nas figuras 26 e 27 é provavelmente devido à quantidade de sólidos suspensos.

Segundo DI BERNARDO (1993) a distribuição do tamanho de partículas suspensas nas águas influem na eficiência da coagulação química; quanto maior o número total de partículas, maior a turbidez, porém, para um mesmo valor de turbidez, por exemplo, por volta de 5 NTU, o número total de partículas varia desde 60×10^3 até cerca de 150×10^3 partículas por mililitro. Por outro lado, para o mesmo número de partículas, da ordem de 250×10^3 por mililitro, a turbidez da água bruta varia de 7 até 12 NTU.

Em relação ao tempo de funcionamento do piloto os sólidos dissolvidos e totais não apresentaram variação significativa, porém os sólidos suspensos tendem a aumentar com o tempo, provavelmente devido à certa quantidade de resíduos sólidos (na forma de sólidos suspensos) que se acumulam no meio granular com o tempo de funcionamento e incorporam-se na água.

Análises de Carbono Orgânico Total (COT) foram realizadas em amostras de água floculada e decantada coletadas a cada 30 minutos de funcionamento do piloto com 3 colunas. Os resultados podem ser visualizados no gráfico da figura 36.

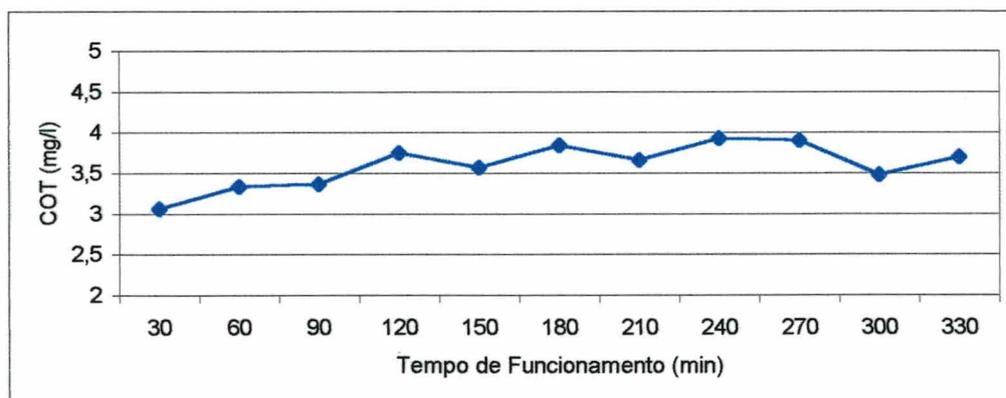


Figura 36: Abatimento do COT para água com bentonita.

A quantidade de COT na água bruta foi de 4,019 mg/l. Conforme observa-se na figura 36 houve redução desse valor, porém com o tempo de funcionamento do piloto observa-se uma tendência a aumentar os valores de COT.

Mesmo o piloto trabalhando em regime contínuo sempre há acúmulo de impurezas com o tempo de funcionamento. Tais impurezas certamente possuem carbono orgânico total que se incorporam à água.

4.2.2 - Água Natural

Aproximadamente 3000 l de água natural foram coletados no Rio Cubatão em Santo Amaro da Imperatriz por um caminhão pipa e transportados para os reservatórios de água bruta do piloto.

O piloto trabalhou com esta água por 8 horas ininterruptas à vazão de 230l/h. A cada 30 minutos o registro entre a terceira coluna e o decantador era fechado e após 10 e 20 minutos, eram coletadas amostra de água decantada para análise. É importante salientar que durante essa decantação em descontínuo o piloto continua funcionando; a água se desloca para a saída por um caminho alternativo (mangueira localizada logo abaixo do decantador).

4.2.2.1 – Ensaio em Descontínuo – jarrest:

O primeiro ensaio realizado com essa água foi o jarrest para detectar a melhor dosagem de sulfato de alumínio.

Características da água bruta:

- Turbidez: 617 NTU
- Cor: 400 u.c
- pH: 6,47
- Alcalinidade: 30 mg/l CaCO₃

Após a caracterização foram adicionados aos jarros do aparelho, dosagens de sulfato de alumínio de 15 a 65mg/l.

Condições de operação do jarrest:

- Tempo de mistura rápida a 120 rpm: 2 minutos
- Tempo de mistura lenta a 40 rpm: 20 minutos
- Tempo de sedimentação: 10 e 20 minutos

A figura 37 mostra que a melhor dosagem de sulfato de alumínio para essa água é de 45 mg/l. Este valor também pode ser visualizado na tabela deste gráfico presente no anexo 8.

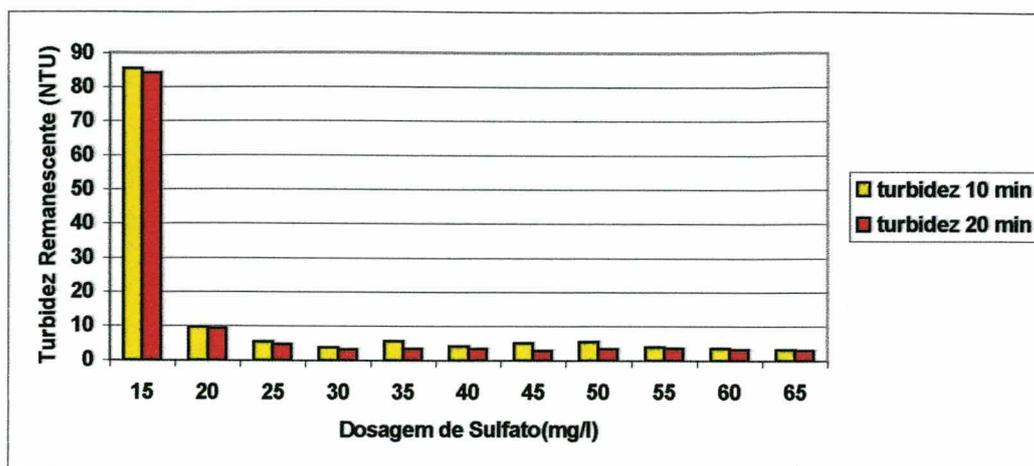


Figura 37: Melhor dosagem de sulfato de alumínio para água natural.

Pode-se observar na figura 37, que para os tempos de decantação de 10 e 20 minutos os valores de turbidez apresentaram pouca diferença, e para as melhores dosagens a turbidez ficou na ordem de 4 NTU.

4.2.2.2 – Ensaio em Contínuo

As primeiras análises realizadas foram turbidez e cor. Após receber o sulfato a 45mg/l (melhor dosagem determinada no Jarrest), passar pelo piloto de floculação e decantar 20 minutos, a água bruta apresentou os resultados presentes nas figuras 38 e 39, ficando a turbidez em torno de 42 NTU para uma coluna e 17 NTU para 3 colunas em funcionamento.

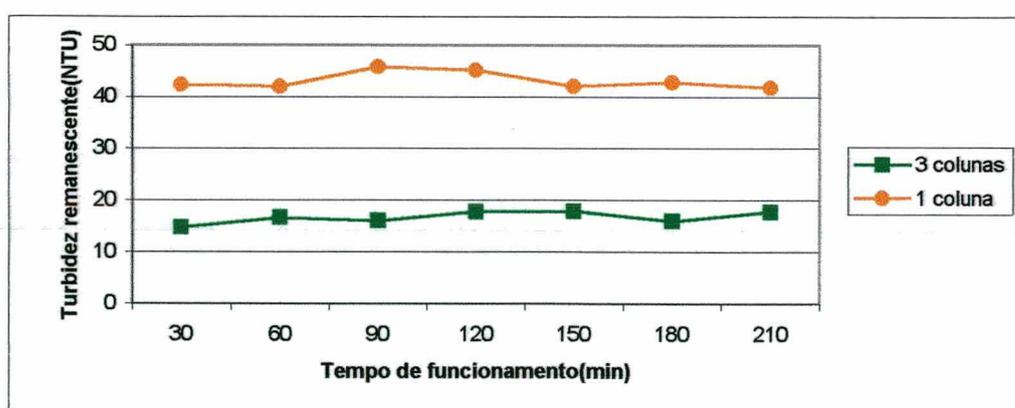


Figura 38: Abatimento da turbidez para água natural.

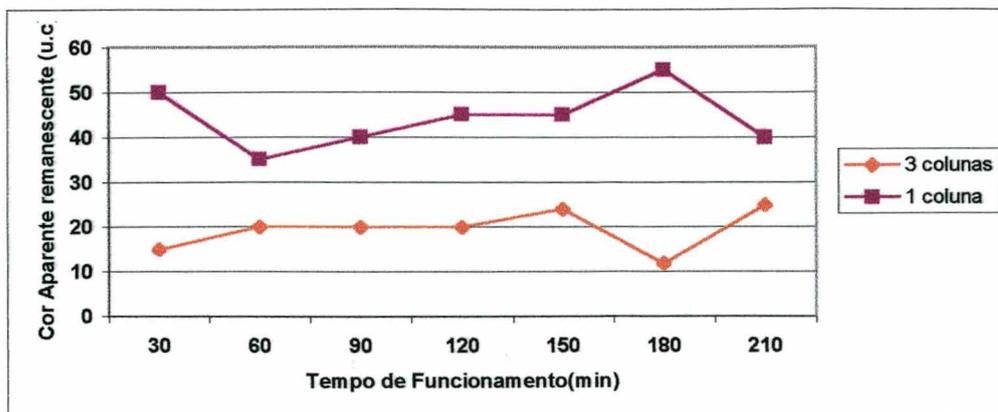


Figura 39: Abatimento da cor para água natural.

Os gráficos das figuras 38 e 39 mostram que não há grande variação da turbidez e da cor em relação ao tempo de funcionamento do piloto. Provavelmente não há acúmulo significativo de flocos no meio granular que poderiam vir a causar uma eventual filtragem.

Quanto ao número de colunas em funcionamento, os resultados são semelhantes aos já observados na água com bentonita, ou seja, o resultado do piloto com 3 colunas em funcionamento é bem melhor do que o com apenas 1 coluna.

Na figura 40 observa-se a eficiência do piloto quanto a redução de cor e turbidez para o piloto com 1 e 3 colunas em funcionamento.

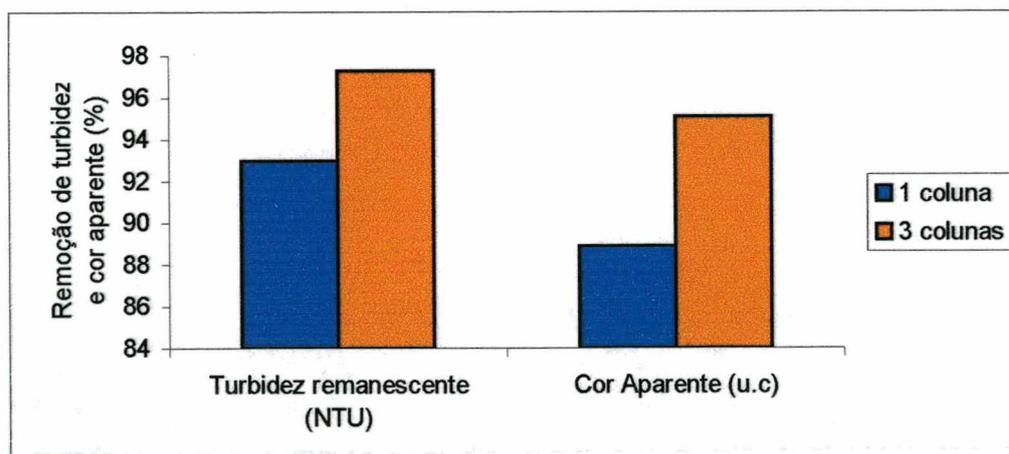


Figura 40: Eliminação da cor e da turbidez em % para 1 e 3 colunas em funcionamento para água natural

A figura 40 mostra que a eficiência do piloto está acima de 97% quanto a remoção de turbidez e em torno de 95% para cor, com o piloto trabalhando com 3 colunas, já para o

piloto funcionando com 1 coluna os resultados foram de 93% de remoção de turbidez e 88,9% para cor. Resultados muito bons considerando o baixo tempo de detenção do piloto, sendo 1,27min com 1 coluna em funcionamento e 3,3min com 3 colunas em funcionamento.

As amostras de água decantada coletadas foram filtradas em papel filtro *WHATMANN 40*. Os resultados obtidos com 3 e com 1 coluna em funcionamento estão presentes na figura 41.

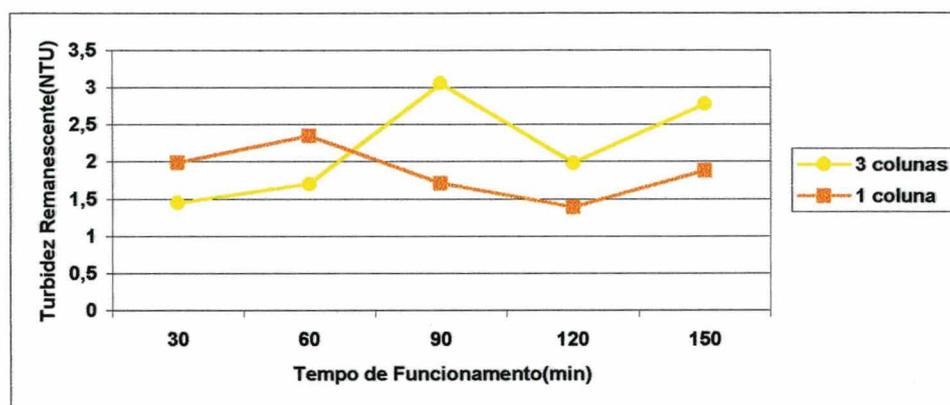


Figura 41: Abatimento da turbidez na água natural após filtração

Na figura 41 observa-se que para a água filtrada não há muita diferença dos valores de turbidez com o piloto funcionando com 1 ou 3 colunas, tendendo até uma melhor performance com apenas uma coluna nos primeiros 60 min de funcionamento do piloto.

Este resultado é muito importante se pensarmos em utilizar o floculador em meio granular expandido como pré-floculador da filtração direta. Os resultados indicam que a floculação em 1 coluna apenas (tempo de detenção= 1.27 min) é suficiente para utilizar como pré-floculador da filtração direta.

Resultado semelhante foi observado na água com bentonita, confirmando que para água filtrada o abatimento da turbidez pode vir a ser inversamente proporcional aos resultados obtidos com água decantada, ou seja, para água mais turva a redução da turbidez na filtração pode ser melhor do que para uma água com turbidez inferior.

Os resultados de turbidez obtidos com água decantada e filtrada foram comparados no gráfico da figura 42.

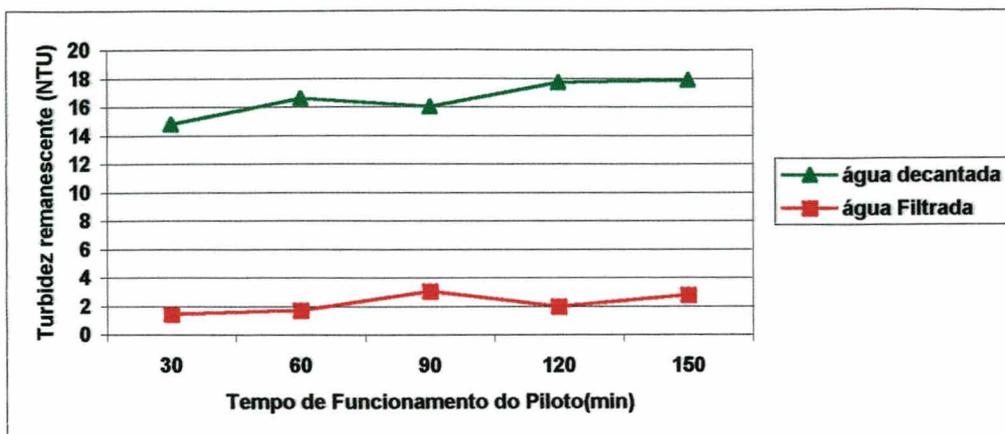


Figura 42: Abatimento da turbidez para água natural filtrada e decantada com 3 colunas.

Na figura 42 observa-se boa redução da turbidez após decantação para 3 colunas em funcionamento, ficando em média em torno de 97.3%. Resultados esses que são ainda melhores para esta água após filtração onde a remoção de turbidez é da ordem de 99.6%.

SENS (1995), em sua pesquisa em floculação em meio granular, também chegou a valores extremamente baixos de turbidez e cor da água filtrada, chegando a obter turbidez de 0,2 NTU e 1 u.c de cor, partindo de uma água bruta de 25 NTU e cor de 240 u.c .

Sólidos sedimentáveis também foram analisados, porém as amostras coletadas para estas análises foram de água apenas floculada.

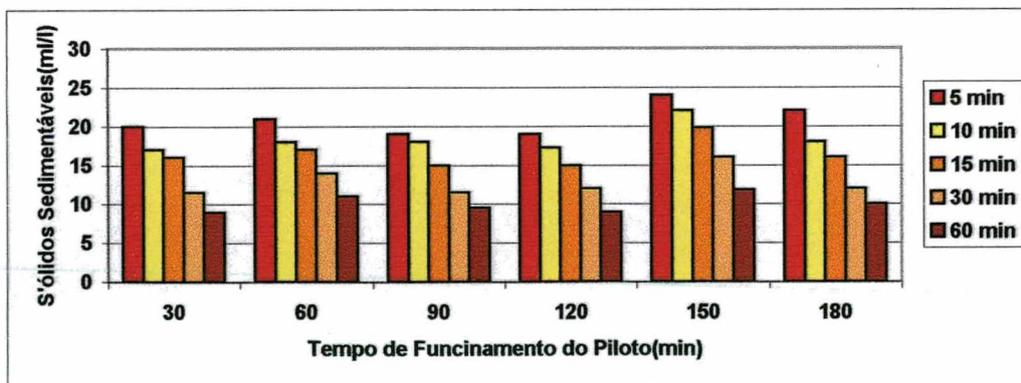


Figura 43: Sólidos Sedimentáveis em água natural com 1 coluna em funcionamento

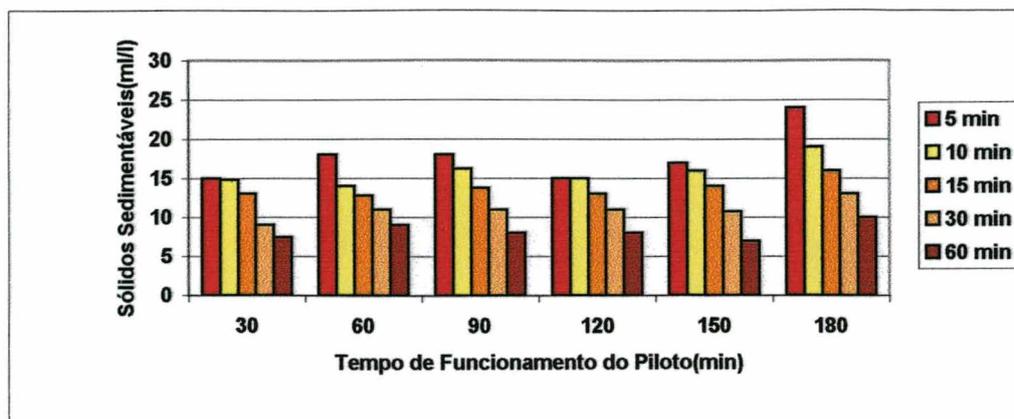


Figura 44: Sólidos Sedimentáveis em água natural com 3 colunas em funcionamento

A água bruta não apresentou sólidos sedimentáveis. As amostras de água floculada foram coletadas a cada 30 minutos de funcionamento do piloto. Os resultados para 1 e 3 colunas em funcionamento são mostrados nas figuras 43 e 44.

O perfil do comportamento dos sólidos sedimentáveis na água natural é bastante diferente do apresentado na água com bentonita. Nas figuras 43 e 44 observou-se que para cada amostra coletada diminuiu a quantidade de sólidos sedimentáveis de acordo com o tempo de sedimentação.

Nos primeiros 5 minutos de sedimentação em todas as amostras coletadas houve quantidade máxima de resíduos sedimentados (flocos), que por sua vez foram-se compactando com o tempo.

Quanto ao número de colunas em funcionamento observa-se que a diferença da quantidade de sólidos sedimentáveis não foi significativa. Após 20 minutos de decantação, amostras de água foram coletadas para análises de sólidos suspensos, totais e dissolvidos. Após floculação e decantação, os resultados das análises de sólidos estão nas figura 45, 46 e 47.

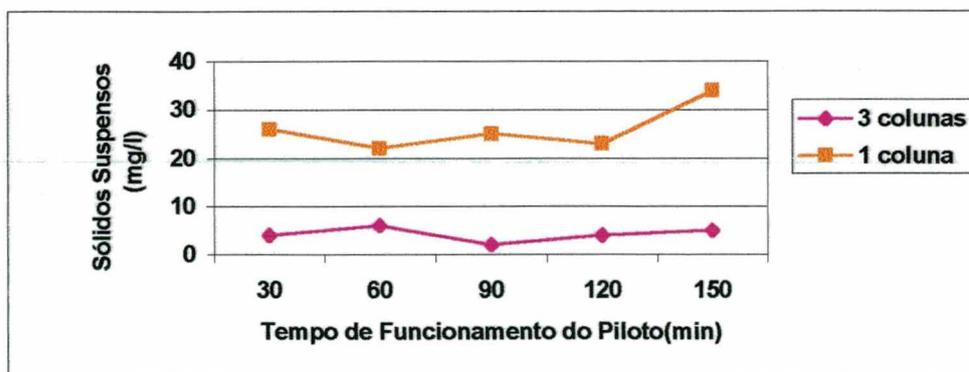


Figura 45: Sólidos suspensos para água natural

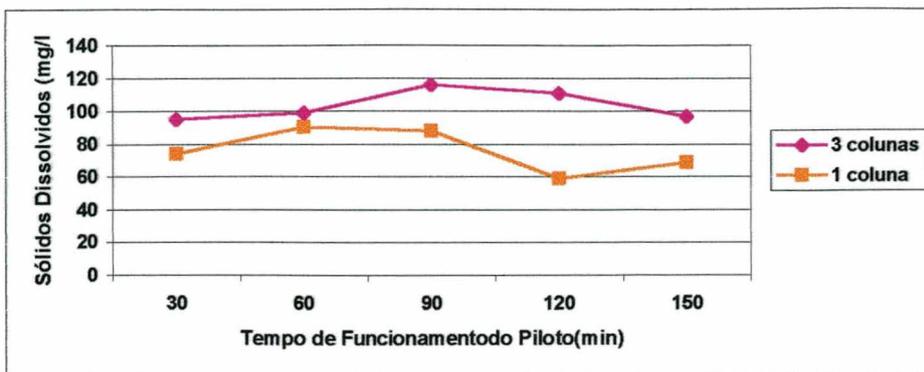


Figura 46: Sólidos dissolvidos para água natural

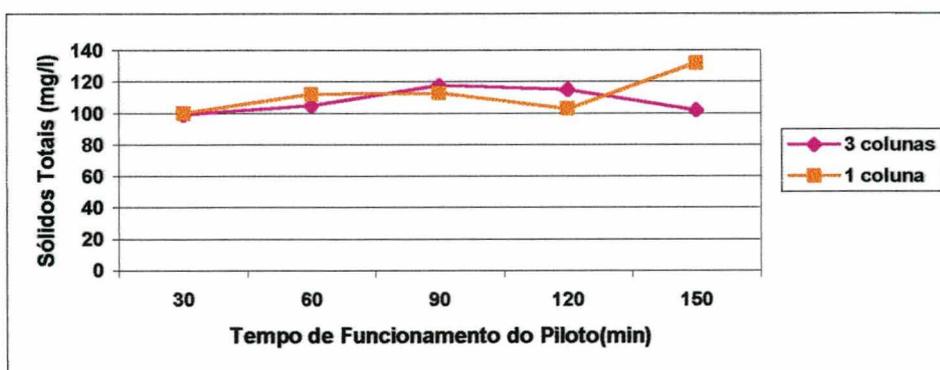


Figura 47: Sólidos totais para água natural

Os sólidos suspensos e dissolvidos observados nas figuras 45 e 46 apresentam-se em maior quantidade para o piloto funcionando com 1 coluna do que com 3 colunas. Já os sólidos totais não apresentam diferença significativa conforme o número de colunas em funcionamento.

Como já observado anteriormente, na figura 38 a turbidez da água floculada e decantada para 1 coluna em funcionamento é maior do que para 3 colunas, portanto, de acordo com as análises de sólidos, a maior parte dessa turbidez deve encontrar-se na forma de sólidos suspensos.

Quanto ao tempo de operação do piloto não variou significativamente a redução dos sólidos suspensos, dissolvidos e totais.

Análises de carbono orgânico total (COT) também foram realizadas nessa água natural após floculação e decantação, cujos resultados estão na figura 48.

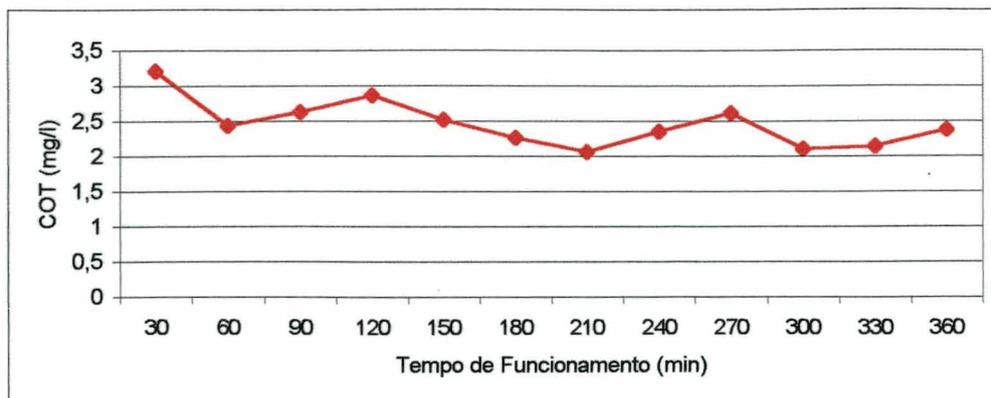


Figura 48: Abatimento do COT para água natural

A água bruta apresentou 4,655mg/l de COT, na figura 48 vê-se que este valor foi reduzido, porém não há significativa redução do COT com o tempo de funcionamento do piloto.

4.2.3 – Água de Lago

Para verificar a eficiência do piloto com água de difícil floculação, como a de lago, aproximadamente 2000 l de água foram coletados com caminhão pipa na Lagoa do Peri, em Florianópolis.

A primeira medida tomada com tal água foi a sua parcial caracterização através de análises de pH, turbidez, alcalinidade e cor. Os primeiros ensaios realizados foram os testes de jarro para determinar a melhor dosagem de sulfato de alumínio.

4.2.3.1 – Ensaios em descontínuo – Jarrest

Água bruta

pH	Turbidez (NTU)	Alcalinidade(mg/l)	Cor (Unid. de cor)
7,04	17	11,2	25

Condições de operação do jarrest:

- Tempo de mistura rápida a 120 rpm= 2 min
- Tempo de mistura lenta a 40 rpm = 20 min
- Tempo de decantação = 10 e 20 min

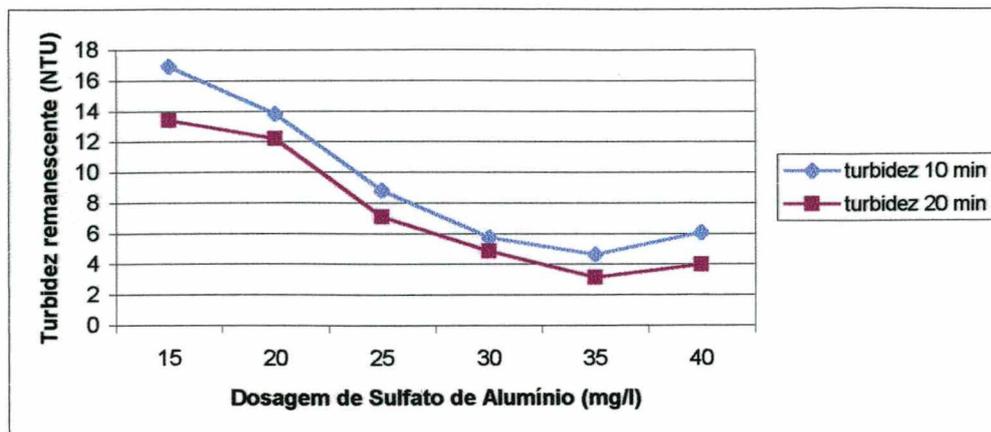


Figura 49: Melhor dosagem de sulfato de alumínio para água de lago

Pelo gráfico da figura 49 observa-se que a melhor dosagem de sulfato de alumínio determinada no jartest para essa água é de 35mg/l.

4.2.3.2 – Ensaio em Contínuo

Determinada a dosagem de sulfato, iniciaram-se os ensaios de floculação no piloto, dentro do mesmo esquema de trabalho feito com as outras águas. As primeiras análises realizadas foram de turbidez e cor, com o piloto funcionando com 1 e 3 colunas, cujos resultados estão nas figuras 50 e 51.

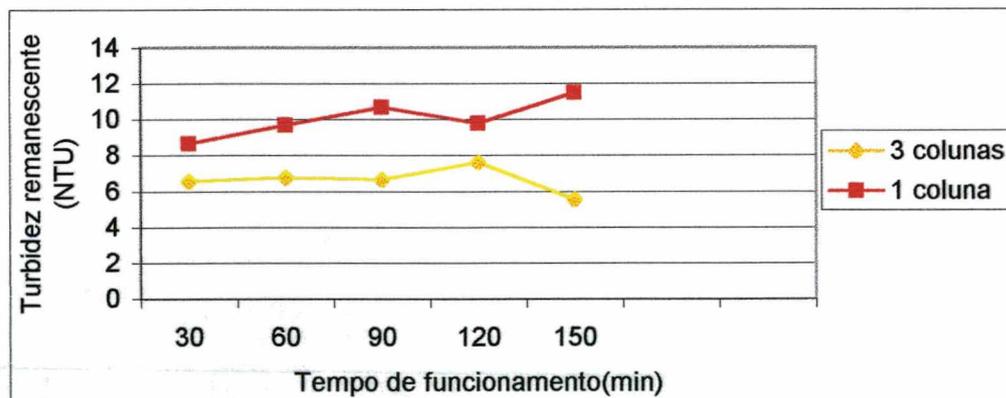


Figura 50: Abatimento da Turbidez para água de lago

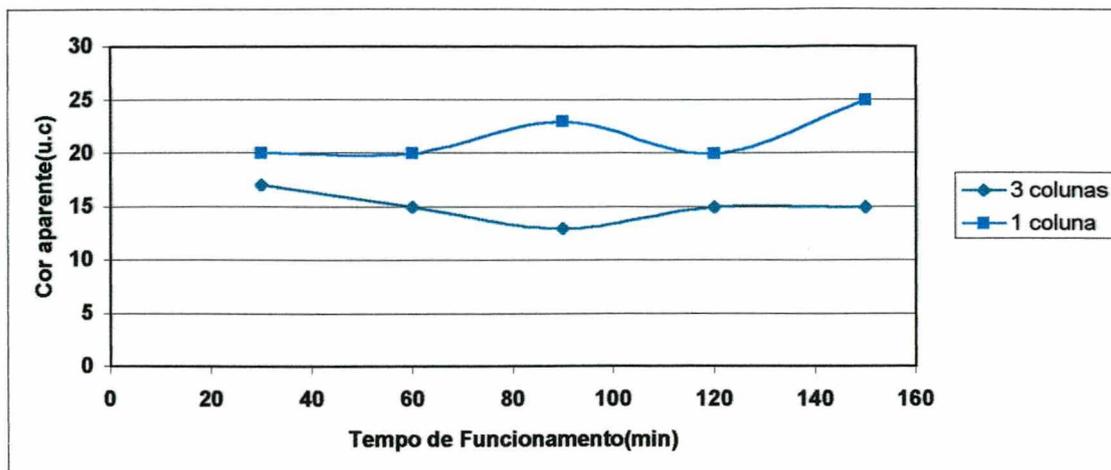


Figura 51: Abatimento da cor aparente para água de lago

O perfil de funcionamento do piloto para esta água quanto a redução de turbidez e cor foi semelhante ao perfil das outras água já trabalhadas, ou seja, os resultados quanto a redução de cor e turbidez foram melhores para 3 colunas em funcionamento do que para apenas 1, e quanto ao tempo de funcionamento, não houve significativa redução dos valores.

O piloto apresentou eficiência quanto a redução de turbidez em torno de 61% e de 40% quanto a cor, com 3 colunas em funcionamento. Os valores parecem baixos, porém considerando que uma água de lago geralmente é de difícil floculação e o tempo de floculação no piloto é baixo, os valores são bastante aceitáveis. A tabela 7 compara os resultados do jarrest com os do piloto para os mesmos tempos de floculação para essa água de lago.

Tabela 7: Comparação dos resultados do jarrest com o piloto para os mesmos tempos de floculação para água de lago

Tempo de floculação (min)	1,27		3,3	
	Jarrest	Piloto	Jarrest	Piloto
Turbidez 10 min	8,41	11,3	5,21	8,73
Turbidez 20 min	4,41	9,68	3,32	6,33

Análises de turbidez também foram realizadas na água de lago filtrada. A cada 30 minutos de funcionamento do piloto 300ml de água eram coletados e filtrados em papel *WHATMANN 40*. O gráfico da figura 52 compara os resultados da água decantada com aqueles para água filtrada para uma coluna em funcionamento.

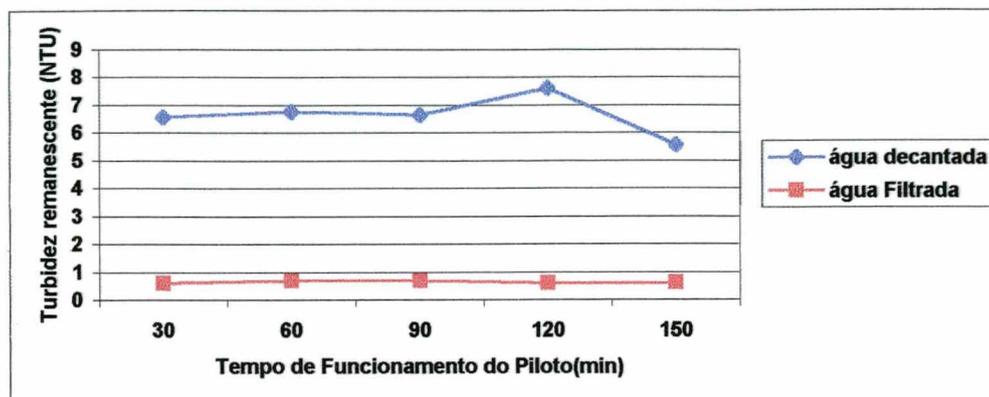


Figura 52: Abatimento da turbidez para água de lago decantada e filtrada para 1 coluna.

A eficiência do piloto quanto a remoção de turbidez para água filtrada ficou em torno de 96%. Como nas outras águas, nesta água de lago também tentou-se realizar análises de sólidos sedimentáveis, porém sem sucesso. As amostras coletadas a cada 30 minutos de funcionamento do piloto ficaram em repouso no cone de Imhoff por uma hora e não houve sedimentação dos flocos. O que se observou, entretanto, foi a sua aderência nas paredes do cone. Desta forma, considerou-se que esta água não apresenta sólidos sedimentáveis.

Análises de sólidos em suspensão, dissolvidos e totais foram realizadas nesta água de lago, cujos resultados estão nas figuras 53, 54 e 55, respectivamente.

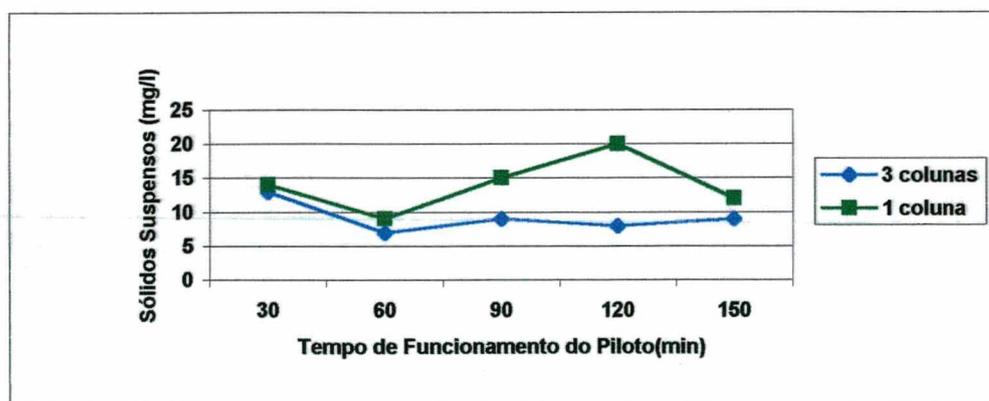


Figura 53: Sólidos suspensos para água de lago

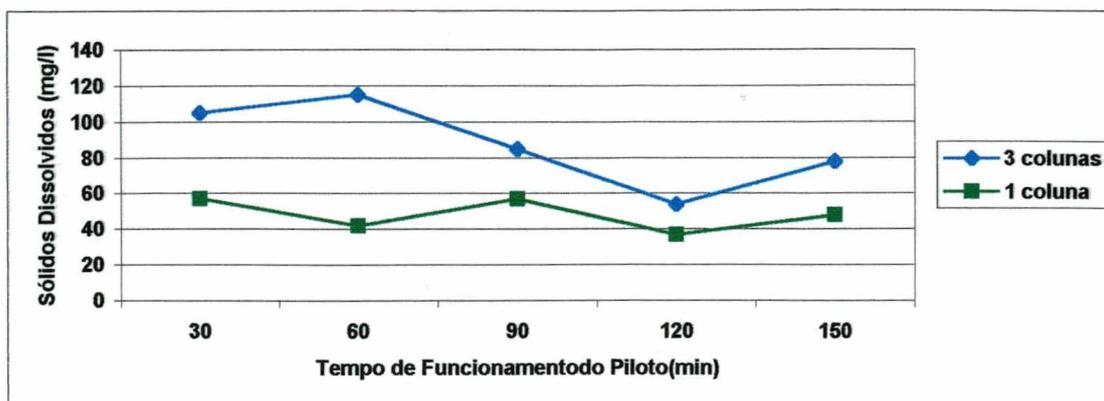


Figura 54: Sólidos dissolvidos para água de lago

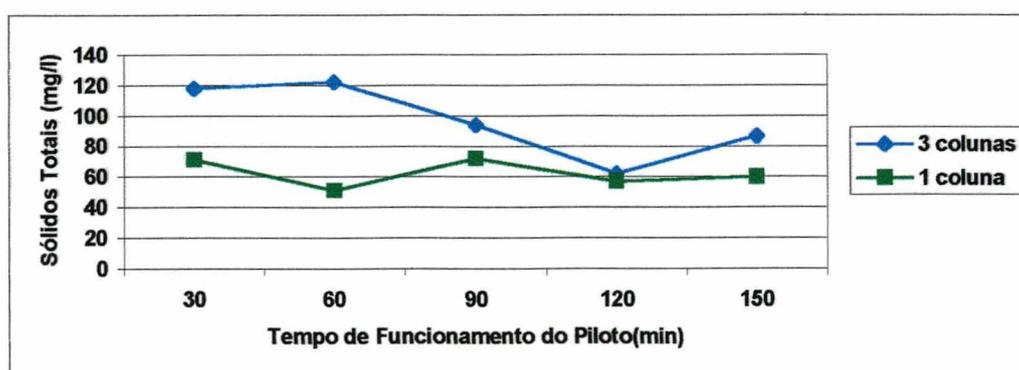


Figura 55: Sólidos totais para água de lago.

A figura 53 mostra que com uma coluna em funcionamento a quantidade de sólidos suspensos é maior do que com 3 colunas. Já as figuras 54 e 55 mostram que os resultados são inversos para os sólidos dissolvidos e totais, ou seja, os valores desses sólidos são maiores com 3 colunas em funcionamento do que com apenas 1 coluna.

A turbidez dessa água quando decantada, revelada na figura 52 em que os valores de turbidez são maiores para 1 coluna em funcionamento, provavelmente é referente à quantidade de sólidos em suspensão.

Quanto ao tempo de floculação para esta água de lago também não houve redução significativa da quantidade de sólidos suspensos, dissolvidos e totais.

A quantidade de carbono orgânico total (COT) foi analisada nessa água em amostras floculadas e decantadas coletadas a cada 30 minutos de funcionamento do piloto. Os resultados estão na figura 56.

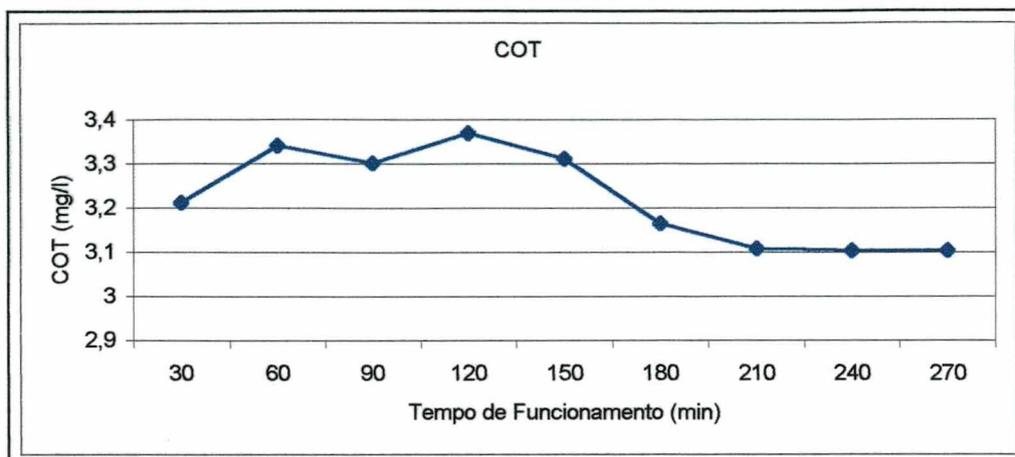


Figura 56: Abatimento do COT para água de lago

A água bruta apresentou 5,6 mg/l de COT, embora este valor tenha sido reduzido após a passagem da água pelo piloto. Os valores de COT visualizados na figura 56 apresentaram inicialmente comportamento crescente (até 120 min de funcionamento), quando por sua vez os valores de COT diminuem até a estabilização.

4.2.4 Efluente

A fim de observar a performance do piloto com águas altamente turvas, uma quantidade de efluente doméstico altamente concentrada foi submetida ao piloto de floculação.

O efluente bruto apresentou as características observadas na tabela 8:

Tabela 8: Características do efluente bruto

pH	Turbidez (NTU)	Alcalinidade(mg/l)
6.20	1800	74

4.2.4.1 – Ensaio em Descontínuo

Os primeiros ensaios para determinar a melhor quantidade de sulfato de alumínio foram efetuados no teste de jarros.

As condições de operação foram as mesmas usadas para os ensaios com os outros tipos de água, o que mudou foi as dosagens de sulfato adicionadas aos jarros em função dos altos valores de turbidez da água bruta.

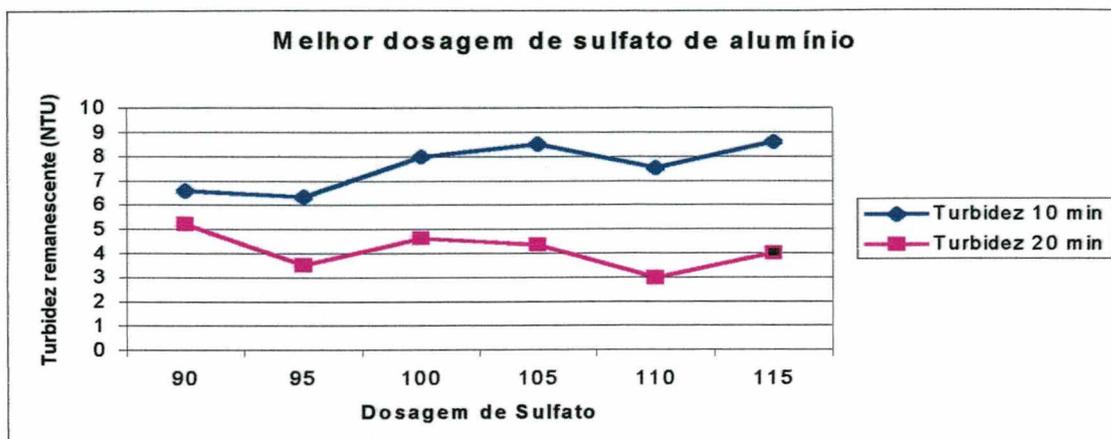


Figura 57: Melhor dosagem de Sulfato de alumínio para o efluente doméstico

A melhor dosagem de sulfato de alumínio determinada no teste de jarro (figura 57) foi de 110mg/l .

4.3.4.2 – Ensaio em Contínuo:

Determinada a dosagem de sulfato, o piloto foi colocado em operação com 1 e 3 colunas em funcionamento. Após 20 minutos de decantação, amostras de água floculada foram coletadas e análises de turbidez foram realizadas, apresentado os resultados na figura 58.

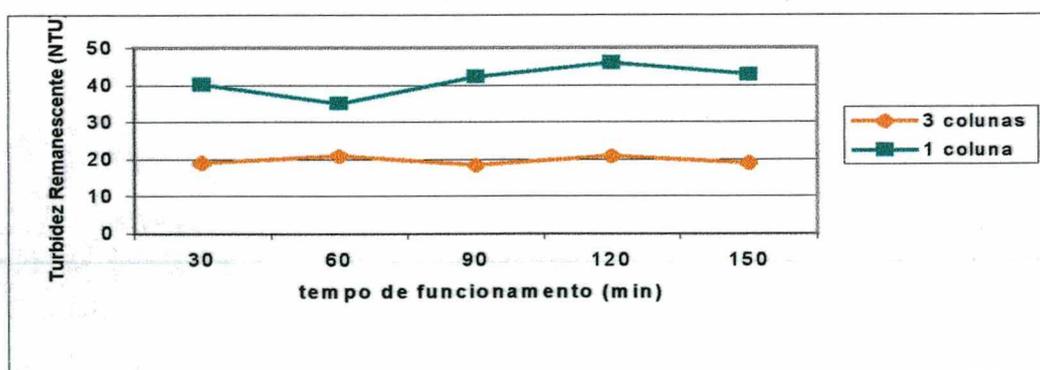


Figura 58: Abatimento da turbidez para o efluente doméstico

Quanto ao número de colunas em funcionamento, de acordo com a figura 58 os resultados foram melhores para 3 colunas, ficando a turbidez de saída em torno de 20 NTU. J. NUNES (1996), afirma que um sistema físico-químico para tratamento de efluente deve apresentar uma remoção mínima de 80% de turbidez. Considerando que o fluido floculado é um efluente altamente concentrado com turbidez de entrada de 1800 NTU, a eficiência do piloto quanto a remoção de turbidez ficou em torno de 98,9 %.

Outras análises como redução de cor, sólidos ou até mesmo COT não foram realizadas com este efluente porque não é objetivo deste trabalho aplicar tal metodologia de floculação para tratamento de efluente, pois a sua utilização pode causar acúmulo de sólidos no interior do meio granular, o que foi observado após 7 horas de funcionamento ininterruptos do piloto.

Este efluente foi utilizado apenas para saber se este piloto de floculação também apresenta boa floculação para águas com altos índices de turbidez.

4.3 - Comparação dos resultados

Com o objetivo de obter um performance global da eficiência do piloto em relação à turbidez com os diferentes tipos de águas trabalhados, foi construído o gráfico comparativo presente na figura 59 para o piloto funcionando com 1 e 3 colunas.

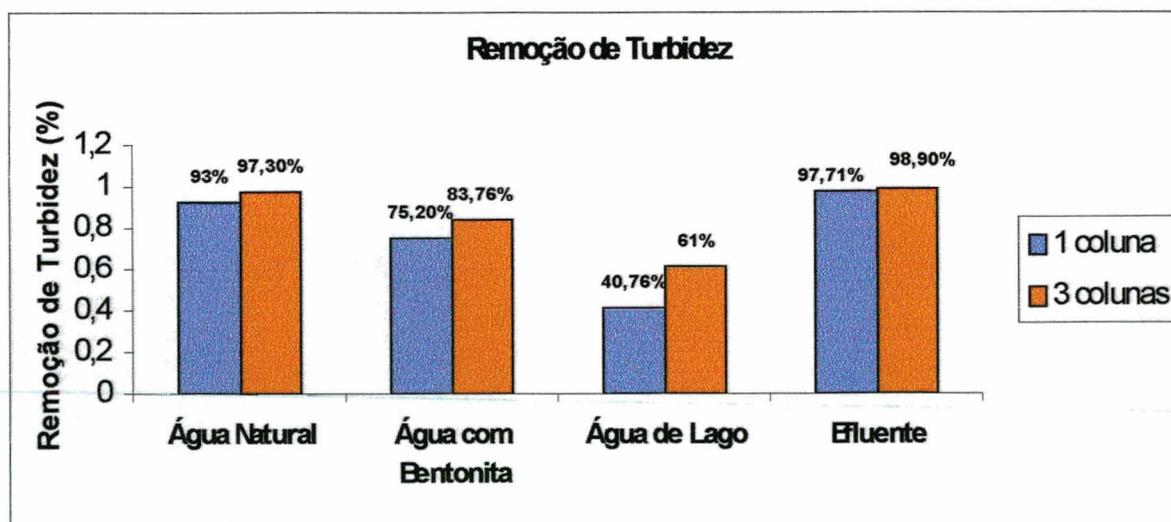


Figura 59: Gráfico comparativo com relação ao parâmetro turbidez.

Na figura 59 observa-se claramente que a eficiência do piloto foi mais alta com água com altos valores de turbidez como a água natural de rio com uma turbidez inicial de

617 NTU e o efluente com turbidez inicial de 1800 NTU. Porém com o tempo de funcionamento do piloto observou-se grande quantidade de resíduos no meio granular principalmente com o efluente.

Com a água com bentonita os resultados também foram muito bons com relação a turbidez, chegando a uma eficiência de 84,5% com o piloto funcionando com 3 colunas. Já para a água de lago a eficiência foi menor, porém considerando que água apresentava uma grande quantidade de algas que dificultam a floculação os resultados foram satisfatórios.

CAPÍTULO V

5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES:

Este trabalho relatou o estudo da floculação em meio granular expandido, desenvolvido em floculador piloto, trabalhando com diferentes tipos de água doce.

Por aproximadamente 10 meses foi feito acompanhamento diário dessa floculação, observando-se a eficiência do piloto quanto a remoção de certos parâmetros de qualidade como turbidez, cor, sólidos e carbono orgânico total. O efeito da quantidade de colunas em funcionamento, velocidade, perda de carga e gradiente de velocidade sobre tal eficiência também foi verificado.

De acordo com o trabalho desenvolvido concluiu-se:

- A comparação dos resultados com 1 e 3 colunas em funcionamento mostrou que os resultados são melhores com o piloto trabalhando com as três colunas juntas, fato que confirma a teoria inicial de que aumentando o comprimento do floculador granular aumenta-se o número de compartimentos em série, melhorando com isto a eficiência do reator. O fato das colunas estarem dispostas em ordem crescente de diâmetro reduz os valores do gradiente de uma coluna a outra, colaborando também para sua eficiência.
- O piloto de floculação trabalha melhor com gradientes de velocidade próximos aos de G máximo, ou seja $37,21 \text{ s}^{-1}$ para a 1ª coluna, $30,06 \text{ s}^{-1}$ para a 2ª coluna e $28,60 \text{ s}^{-1}$ para a 3ª coluna. Os gradientes decrescem de uma coluna a outra devido ao aumento do diâmetro, colaborando desta forma para o aumento dos índices de eficiência. A expansão do meio granular é diretamente proporcional a velocidade, proporcionando uma boa agitação na água para uma rápida formação dos flocos. O piloto apresentou

melhores resultados com expansões no meio de 44,73% na 1ª coluna, 40% na 2ª coluna e 27,8% na 3ª coluna. Na perda de carga observou-se que os valores não atingiram a expansão a partir da qual a perda de carga permanece constante.

- Os valores de turbidez após floculação e decantação podem ser considerados altos em relação às ETAs convencionais, porém o tempo de floculação em relação a essas estações é bastante reduzido com três colunas em funcionamento, onde o floculador apresentou a melhor eficiência. Esse tempo é de 3.3 minutos, enquanto nas estações de tratamento de água o tempo varia de 20 a 40 minutos.
- Essa turbidez relativamente alta da água decantada pode estar ligada a problemas construtivos do decantador, que não foi objeto deste estudo. Entretanto, é importante salientar que a turbidez da água decantada é praticamente toda eliminada na filtração para todos os tipos de água analisados, mostrando que o piloto deve funcionar bem como um preparativo para a filtração ou até como um pré-floculador para filtração direta.
- Quanto ao tempo de funcionamento, o piloto não apresentou melhoria significativa para todos os ensaios realizados, apresentando, por exemplo, eficiências semelhantes com 1 ou 4 horas em funcionamento.
- O desempenho do piloto quanto a redução de carbono orgânico total, sólidos totais e dissolvidos não foi significativo, tendo apresentado melhor eficiência quanto a redução de turbidez, cor e sólidos suspensos para todos os tipos de água trabalhados.
- As análises feitas com os diferentes tipos de água mostraram que o piloto apresenta boa floculação com todas as águas testadas, desde água de lago, difícil de flocular, até efluente doméstico com altos valores de turbidez. Estes resultados permitem a utilização de tal floculador para águas de diferentes características. A eficiência do piloto chegou a 84,5 % para água com bentonita, 97,3 % para água natural coletada em um rio, 61 % para água de lago e 98.9% para efluente doméstico, em relação a turbidez com 3 colunas em funcionamento. Tais valores são considerados altos para o pouco tempo de floculação. Observa-se que o piloto

apresenta melhor desempenho com águas mais turvas, como a água natural coletada em rio com 617 NTU de turbidez e o efluente com 1800 NTU de turbidez.

Recomendações:

- Buscando maior desempenho do floculador, recomenda-se que as colunas tenham em seu interior materiais granulares com peso específico diferente, de forma que a passagem de uma coluna a outra se dê diretamente, ou seja, inicia-se a floculação em uma coluna com o fluxo de baixo para cima, a segunda coluna de cima para baixo e a terceira coluna de baixo para cima, e assim sucessivamente (figura 59). O peso específico do material granular da segunda coluna será menor do que o peso específico da água, para que as esferas possam flutuar.

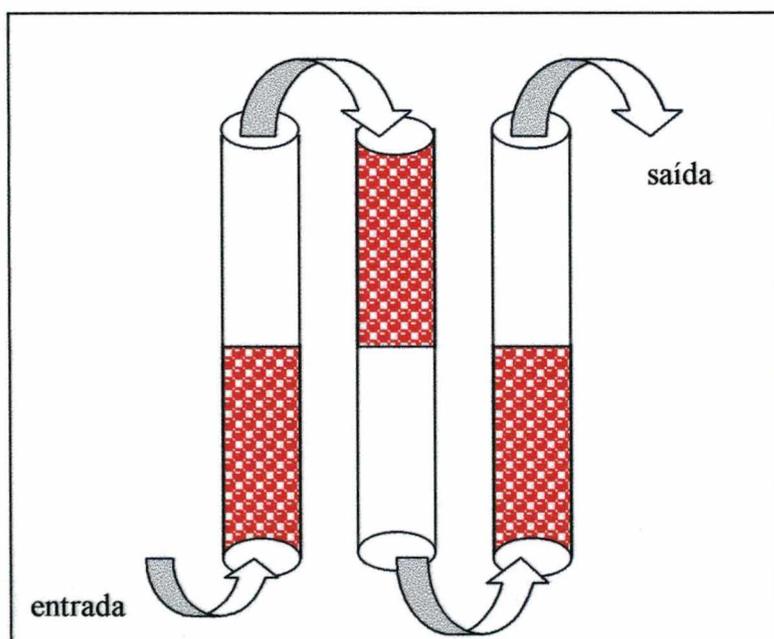


Figura 60: Floculador com meios granulares de peso específico diferentes

- Recomenda-se maiores investigações sobre a utilização da floculação em meio granular como pré-floculador da filtração direta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARGAMAN, Y. AND KAUFMAN, W. J.** Turbulence and Flocculation. **Journal Sanitary Eng. Div.**, ASCE 96, SA 2, 1970.
- ARGAMAN Y. A.** Pilot-Plant Studies Of Flocculation, **Journal AWWA**, 1971.
- AYOUB, G.M.**, A Model for Flocculation in a gravel reactor: development and assessment. **Aqua**. V. 45, nº2, p. 76-83, Abril 1996.
- AZEVEDO NETO, José M. et. al.** *Técnicas de Abastecimento e tratamento de água*. V.2 São Paulo. Cetesb. 1987.
- AZEVEDO NETO, José M. et. al.** *tratamento de Água*. São Paulo. Editora Edgard Blücher LTDA. São Paulo. 1991.
- BABBIT, Harold E. et al.** *Abastecimento de Água*. Editora Edgard Blücher LTDA. São Paulo. 1993.
- BACHE, D.H. et al.** Floc Character: measurement and role in optimum. **Aqua**. V. 44, Nº2, p.83-92. Abril. 1995.
- BRATBY, J. R. et al.** Desian of Flocculation a Systems Fron Batch Test Data. **Water SA**, 3. 4, 173 - 182, 1977.
- BRATBY, J. R.** Interpreting Laboratory Results For The Desian of Ra id Mixina and p b Flocculation Systems. **Journal AWWA**, 318-325, j une 1981 .
- CAMP T.R. and STEIN P.C.** *Velocity Gradients and Internal Works in Fluid Motion*. J.Boston Soc. Civ. Engrs., 30, 219 - 237, 1943.

- CAMP T.R.** *Sedimentation and the Design of Settling Tanks*. ASCE., 111, 920, 1946.
- CAMP T.R.** *Flocculation and Flocculation Basins*. Am. Soc. Civ. Eng. 120,1, 1955.
- CAMP T.R.** Floc Volume Concentration. **Journal AWWA** vol. 60(6), 656-673,1968.
- CHING, H.W.** Dynamics of Coagulation of Clay Particles with Aluminum Sulfate. **Journal of Environmental Engineering**. V. 120, N°1, p. 169-189, Jan/Fev, 1994.
- DI BERNARDO, L.** *Métodos e Técnicas de Tratamento de Água*. ABES. Rio de Janeiro. 1993.
- ERNEST, A.N. et al.** Determination of Particle Collision Efficiencies for Flocculent Transport Models. **Journal of Environmental Engineering**. V. 121, N°4, p. 320-329, Abril, 1995.
- FAIR G. M. et al.** *Treatment Kinetics in: Water and Wastewater*, New York, Willey cap 22, 1968.
- FERREIRA, S.S.F. et al.** Comportamento Químico do Alumínio e do Ferro em Meio Aquoso e Implicações no Tratamento de Água. **Sanare**, p 50-58, 1997.
- HAARHOFF, J. et al.** Determination of Aggregation and Breakup Constant During Flocculation. **Water Science Technology**. V. 36, N°4, p. 33-40, 1997.
- HARRIS, H. S., KAUFMAN W. J. et al.** Orthokinetic Flocculation in Water Purification. **Journal Sanit. Eng. Div, ASCE**, vol. 92, 1966.
- HUIDSON, H.F.** Physical Aspects of Flocculation. **Journal AWWA**, 57, 1965.
- JABBOURI A. et al.** Flocculation in Lit Fluidise. **Water Research**. Vol 24, n°3, 361-366, 1990.

- JABBOURI, A.** *Energetique de la Flocculation et Flocculateurs Fluidises*. Thèse, Univ. des Sciences et Tech. Du Languedoc, 1988, Montpellier.
- KAWAMURA, S.** Optimisation of Basic Water- treatment Processes – Design and Operation: Coagulation and Flocculation. *Aqua*. V. 45, N°1, p 35-47, Fev, 1997.
- KRAMER, T. A. et al.** Influence of Strain-Rate on Coagulation Kinets. *Journal of Environmental Engineering*. V. 123, N°5, p. 444-452, Maio, 1997.
- LEME, F. P.** *Teorias e Técnicas de Tratamento de Água*. ABES. Rio de Janeiro, 1990.
- MELO, L.C.F.** *Efeito da pré-ozonização na geração de lodo em processos de coagulação-floculação no tratamento de efluentes têxteis*. Dissertação (mestrado em Engenharia Ambiental) Florianópolis, UFSC, Jul-1997.
- NORMALIZAÇÃO TÉCNICA SANEAMENTO AMBIENTAL. NT – 07.** Análises físico-químicas de água. CETESB - 1978.
- RICHTER, C. A. et al.** A Evolução Tecnológica do Tratamento de Água. *Revista DAE* N°161, p. 1-12, Jul/ Ago, 1991.
- RICHTER, C. A.** Sistemas de Floculação Acelerada. *Revista DAE*. V. 46, N°145, p. 149-155, Jul, 1986.
- SENS, M.L.** *Floculação em Meio Granular Fixo e Expandido*. Florianópolis, 1997. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal de Santa Catarina.
- SISSOM .L.E. et al.** *Fênomenos de Transporte*. Editora Guanabara. S. A . Rio de Janeiro, 1988.
- SENS, M.L. et al.** Flocculation en Lit Garni de Billes Sphériques 10 mm de Diamètre. *Aqua*. V. 41, N°6, p. 340-344, 1992.

SHOLJI, I. et al. Kinetics of Pneumatic Flocculation. **Water Research**, V. 31, N°12, p. 2979-2988, 1997.

SPELLMAN, F.K. *The Science of Water*, Ed. Technomic Publishing AG. 1998.

THIEM, L.T. et al. Optimizing Submerged Jet Flocculator Performance. **Journal American Water Association**, V. 88, p. 81-92, Agosto, 1996.

VON SMOLUCHOWSKI M. Drei Vortrage Uber Diffusion Brownshe Molekular Bewegung und Koagulation Von Kolloidteilchen. **Physik. Z.**, 17, 1916.

VON SMOLUCHOWSKI M. Vesuch Einer Mathematischen Theorie der Koagulations Kinetik Kolloid Lösungen. **Physik. Z.**, V. 92, p. 155, 1917.

ANEXOS

ANEXO 1: Teste de jarro em água com bentonita

Características da Água bruta:

- Turbidez da água bruta = 80
- Alcalinidade = 10.4
- pH = 8.5

Ensaio 1.1 - Determinação da melhor dosagem de sulfato de alumínio.

Condições de operação do equipamento:

- Mistura rápida = 425 rpm = 1000s⁻¹
- Tempo de mistura rápida = 2 min
- Tempo de mistura lenta à 40 rpm = 20 min
- Tempo de decantação = 10 e 20 min

Sulfato (mg/l)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Turbidez 10 min	33,3	26,4	24,6	19,6	14,2	14,8	11,1	9,81	8,17	6,84	7,22	7,56
Turbidez 20 min	21,7	14,4	11	10,9	8,66	7,36	4,4	4,72	4,66	3,89	3,72	3,25

Tabela 9: Ensaio 1.1

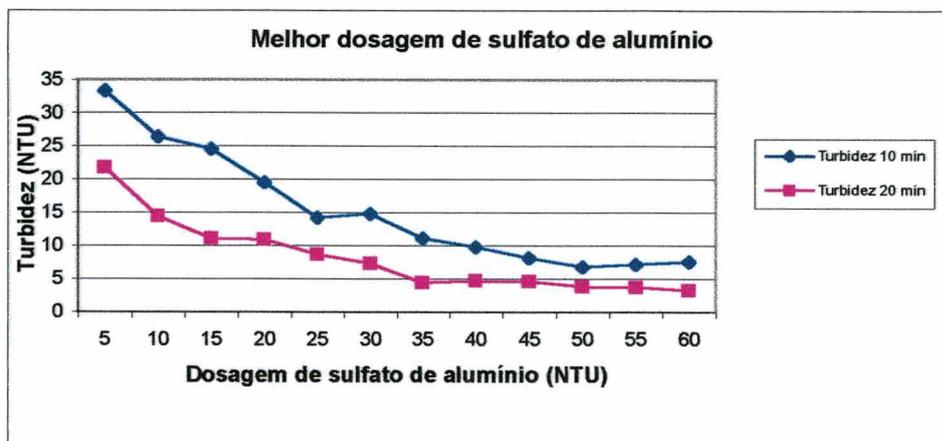


Figura 61: Ensaio 1.1

Ensaio 1.2 : Determinação do melhor tempo de floculação para o melhor gradiente de velocidade:

Ensaio 1.2.1:

- Mistura lenta: 22 rpm
- Gradiente de velocidade = 10 s⁻¹
- Dosagem de sulfato = 50 mg/l

Tabela 10: Ensaio 1.2.1

Tempo (min)	2	5	10	20	30	60
Turbidez 20 min	7,56	5,74	5,11	3,91	4,42	2,24

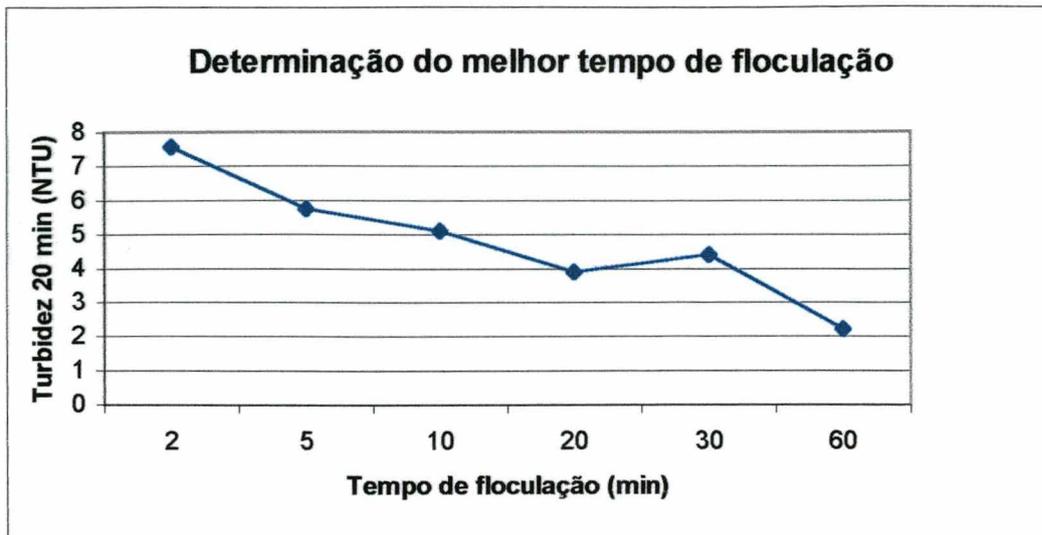


Figura 62: Ensaio 1.2.1

Ensaio 1.2.2

- Mistura lenta: 33 rpm
- Gradiente de velocidade = 20 s^{-1}
- Dosagem de sulfato = 50 mg/l

Tabela 11: Ensaio 1.2.2

Tempo (min)	2	5	10	20	30	60
Turbidez 20 min	6,45	6,41	6,12	4,34	4,57	2,39

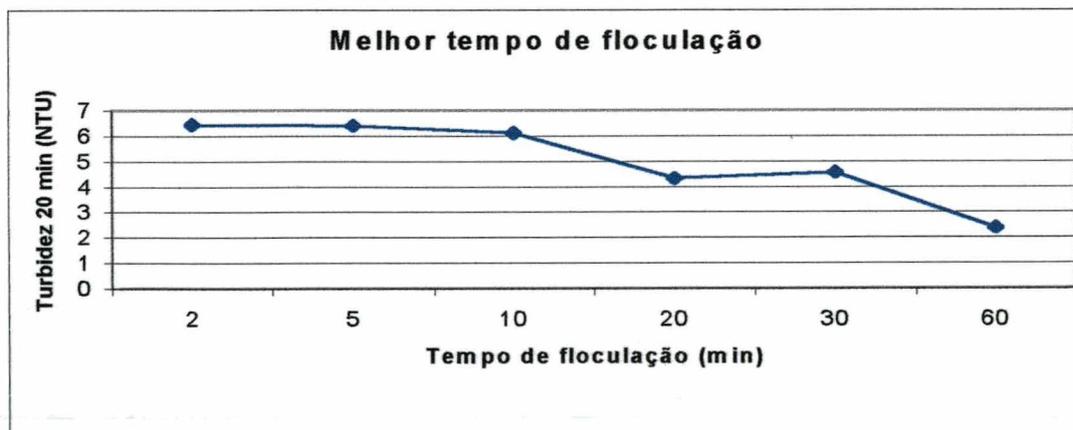


Figura 63: Ensaio 1.2.2

Ensaio 1.2.3

- Mistura lenta: 42 rpm
- Gradiente de velocidade = 30 s^{-1}
- Dosagem de sulfato = 50 mg/l

Tabela 12: Ensaio 1.2.3

Tempo (min)	2	5	10	20	30	60
Turbidez 20 min	5,16	6,34	4,34	3,06	5,47	4,29

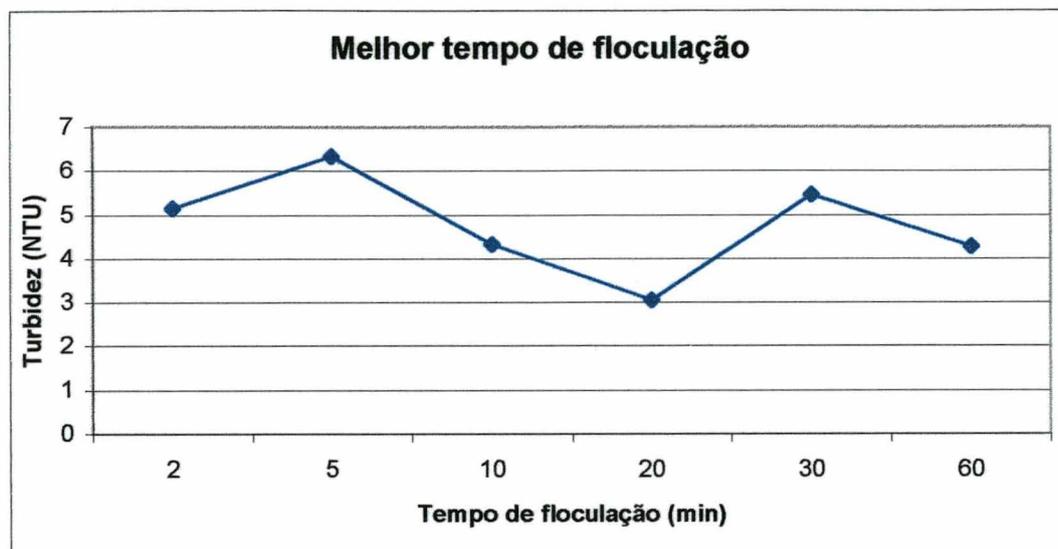


Figura 64: Ensaio 1.2.3

Ensaio 1.2.4

- Mistura lenta: 50 rpm
- Gradiente de velocidade = 40 s^{-1}
- Dosagem de sulfato = 50 mg/l

Tabela 13: Ensaio 1.2.4

Tempo (min)	2	5	10	20	30	60
Turbidez 20 min	5,64	6,2	5,49	4,4	4,8	4,6

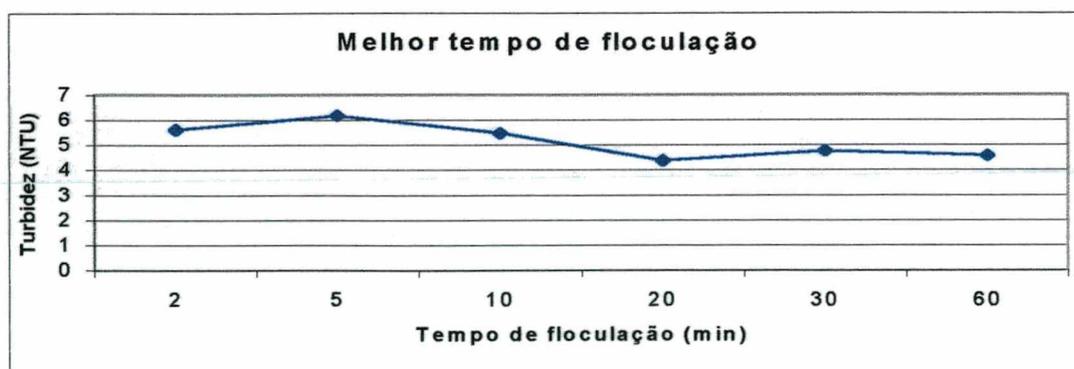


Figura 65: Ensaio 1.2.4

Ensaio 1.2.5

- Mistura lenta: 71 rpm
- Gradiente de velocidade = 65 s^{-1}
- Dosagem de sulfato = 50 mg/l

Tabela 14: Ensaio 1.2.5

Tempo (min)	2	5	10	20	30	60
Turbidez 20 min	6,55	6,19	4,62	4,35	4,2	4,05

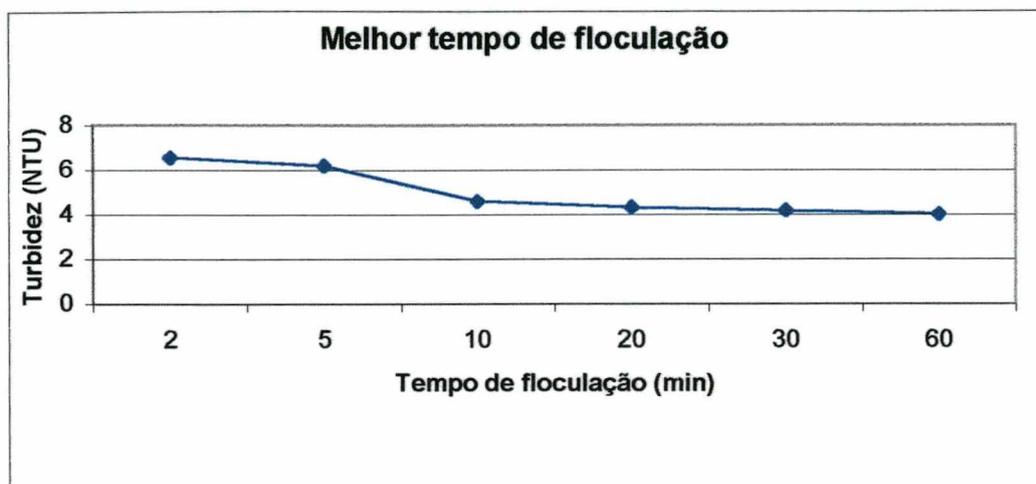


Figura 66: Ensaio 1.2.5

Ensaio 1.2.6

- Mistura lenta: 84 rpm
- Gradiente de velocidade = 85 s^{-1}
- Dosagem de sulfato = 50 mg/l

Tabela 15: Ensaio 1.2.6

Tempo (min)	2	5	10	20	30	60
Turbidez 20 min	12,2	10,8	8,62	8,19	8,38	6,8

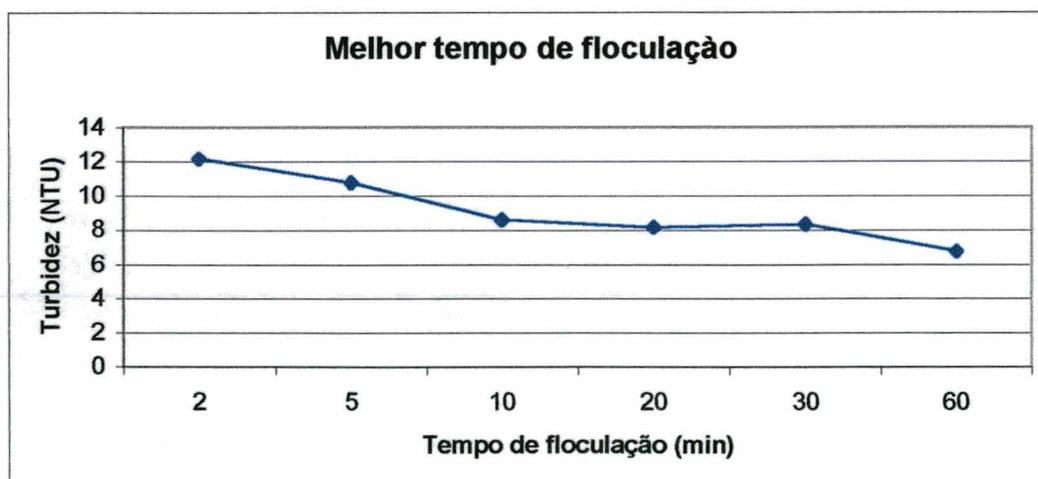


Figura 67: Ensaio 1.2.6

Ensaio 1.3: Qualidade da água decantada em função do gradiente de velocidade para diferentes tempos de floculação

Tabela 16: Ensaio 1.3

Tfloc= 2min	7,56	6,45	5,16	5,64	6,55	12,2
Tfloc =5min	5,74	6,41	6,34	6,2	6,19	10,8
Tfloc =10min	5,11	6,12	4,34	5,49	4,62	8,62
Tfloc = 20 min	3,91	4,34	3,06	4,4	4,35	8,19
Tfloc = 30 min	4,42	4,57	5,47	4,8	4,2	8,38
Tfloc = 60 min	2,24	2,39	4,29	4,6	4,05	6,8

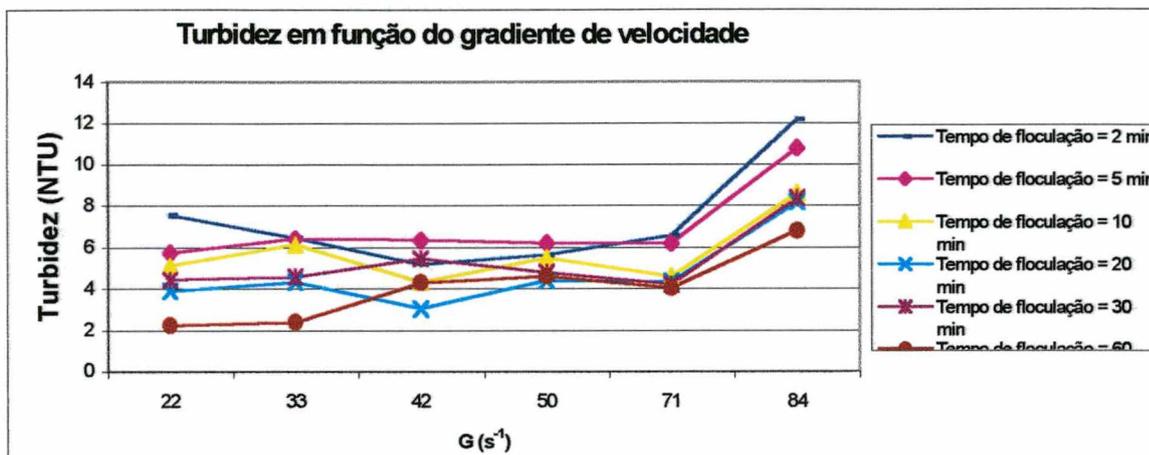


Figura 68: Ensaio 1.3

Ensaio 1.4: Determinação do melhor gradiente de velocidade

Tabela 17: Ensaio 1.4

Gradiente (s-1)	200 - 40	100 - 25	85 - 25	75 - 20
Turbidez 10 min	10,4	7,32	6,27	5,25
Turbidez 20 min	3,62	3,82	3,55	2,96

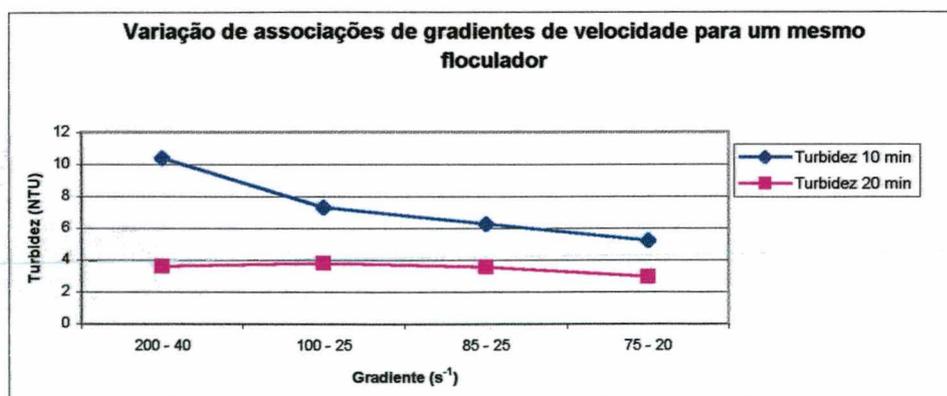


Figura 69: Ensaio 1.4

ANEXO 2: Teste de jarros para um água com bentonita com $T = 64.3$ NTU

Ensaio 2.1: Determinação da melhor dosagem de sulfato de alumínio.

Condições de operação:

- Mistura rápida = $425 \text{ rpm} = 1000 \text{ s}^{-1}$
- Tempo de mistura rápida = 2 min
- Tempo de mistura lenta à $40 \text{ rpm} = 20 \text{ min}$
- Tempo de decantação = 10 e 20 min

Tabela 18: Ensaio 2.1

Sulfato (mg/l)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Turbidez 10 min	37,3	26,5	23,7	22,1	16,1	15,1	14,1	13	10,6	9,62	7,89	10,2
Turbidez 20 min	25,6	10,2	14	10,1	9,82	6,39	5,25	6,76	4,92	4,08	5,1	4,88

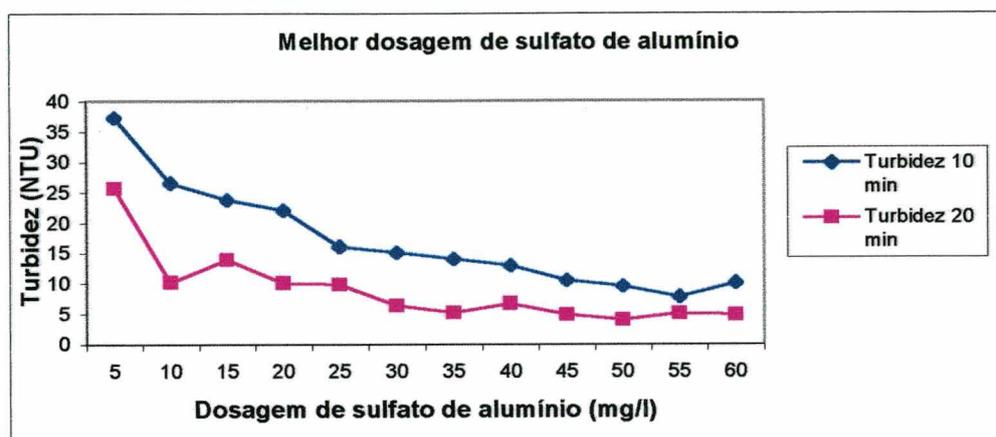


Figura 70: Ensaio 2.1

Ensaio 2.2: Determinação do melhor tempo de floculação para o melhor gradiente

Ensaio 2.2.1

- Mistura lenta: 22 rpm
- Gradiente de velocidade = 10 s^{-1}
- Dosagem de sulfato = 50 mg/l

Tabela 19: Ensaio 2.2.1

Tempo (min)	2	5	10	20	30	60
Turbidez 20 min	5,62	4,34	3,82	3,18	3,77	2,4

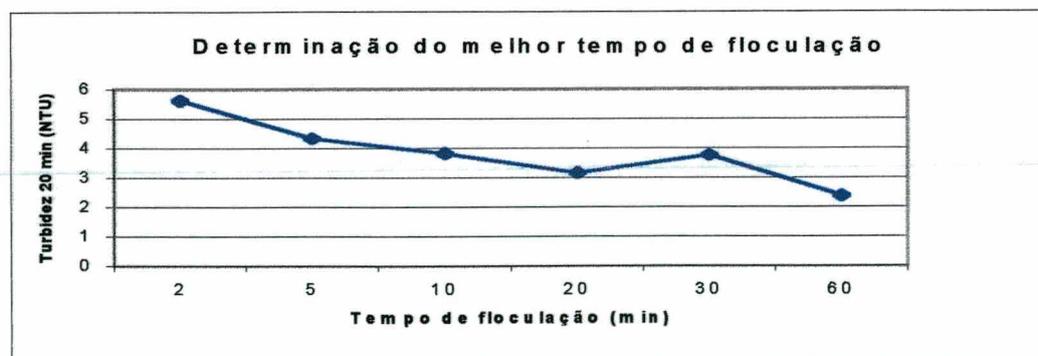


Figura 71: ensaio 2.2.1

Ensaio 2.2.2

- Mistura lenta: 33 rpm
- Gradiente de velocidade = 20 s^{-1}
- Dosagem de sulfato = 50 mg/l

Tabela 20: Ensaio 2.2.2

Tempo (min)	2	5	10	20	30	60
Turbidez 20 min	7,06	6,12	4,46	4,53	4,22	3,45

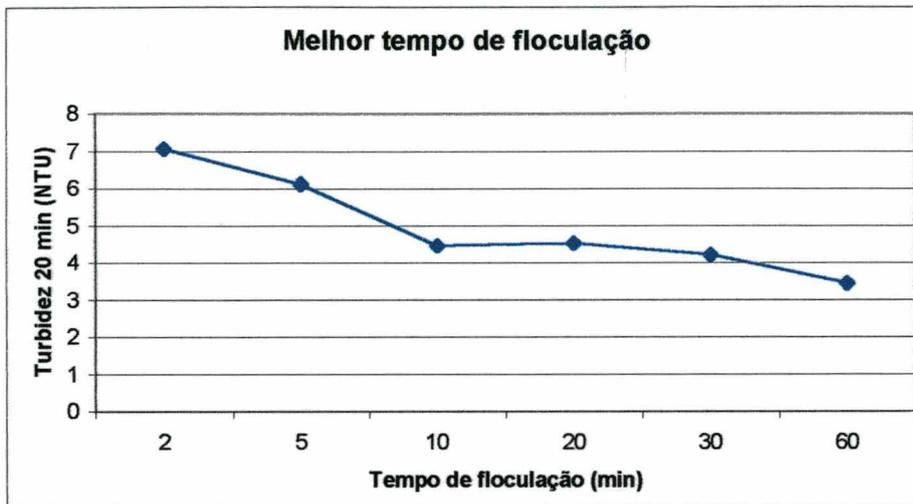


Figura 72: Ensaio 2.2.2

Ensaio 2.2.3

- Mistura lenta: 42 rpm
- Gradiente de velocidade = 30 s^{-1}
- Dosagem de sulfato = 50 mg/l

Tabela 21: Ensaio 2.2.3

Tempo (min)	2	5	10	20	30	60
Turbidez 20 min	6,62	4,9	6,26	4,83	4,32	4,49

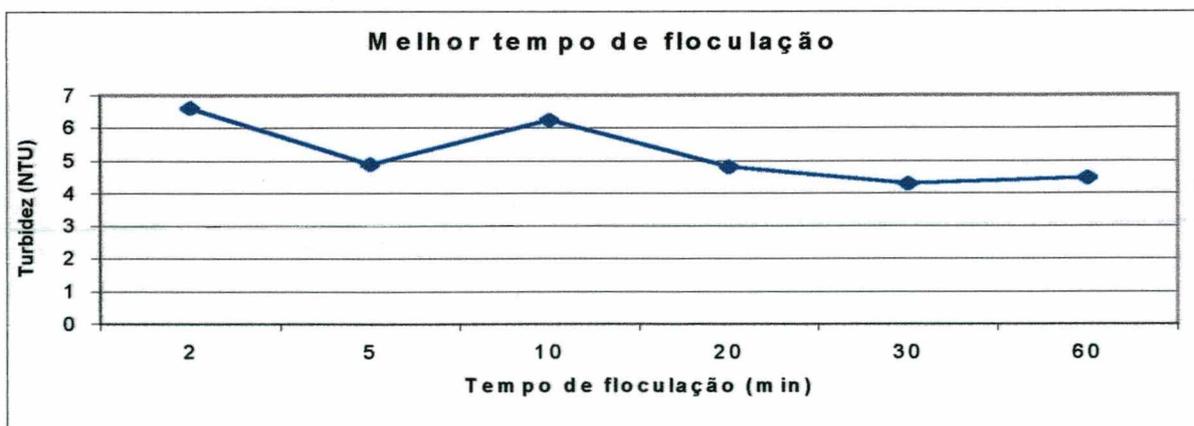


Figura 73: Ensaio 2.2.3

Ensaio 2.2.4

- Mistura lenta: 50 rpm
- Gradiente de velocidade = 40 s^{-1}
- Dosagem de sulfato = 50 mg/l

Tabela 22: Ensaio 2.2.4

Tempo (min)	2	5	10	20	30	60
Turbidez 20 min	7,83	7,38	6,08	6,13	4,84	3,42

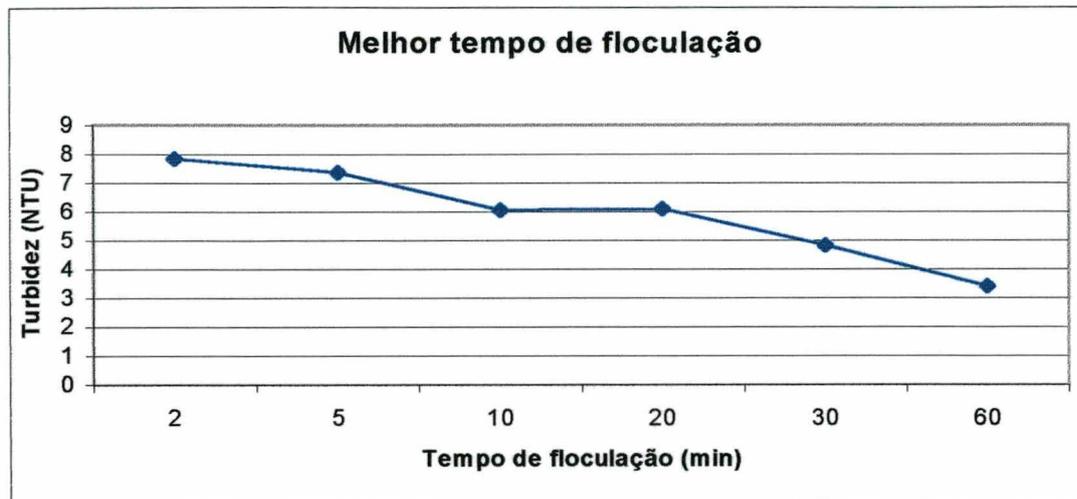


Figura 74: Ensaio 2.2.4

Ensaio 2.2.5

- Mistura lenta: 71 rpm
- Gradiente de velocidade = 65 s^{-1}
- Dosagem de sulfato = 50 mg/l

Tabela 23: Ensaio 2.2.5

Tempo (min)	2	5	10	20	30	60
Turbidez 20 min	6,41	6,86	6,2	5	6,75	4,33

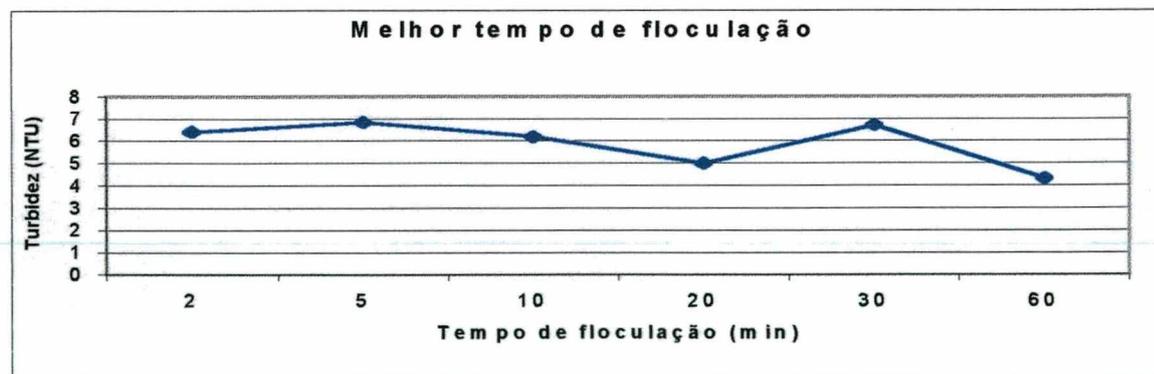


Figura 75: Ensaio 2.2.5

Ensaio 2.2.6

- Mistura lenta: 84 rpm
- Gradiente de velocidade = 85 s^{-1}
- Dosagem de sulfato = 50 mg/l

Tabela 24: Ensaio 2.2.6

Tempo (min)	2	5	10	20	30	60
Turbidez 20 min	8,14	6,68	7,15	6,66	4,8	5,85

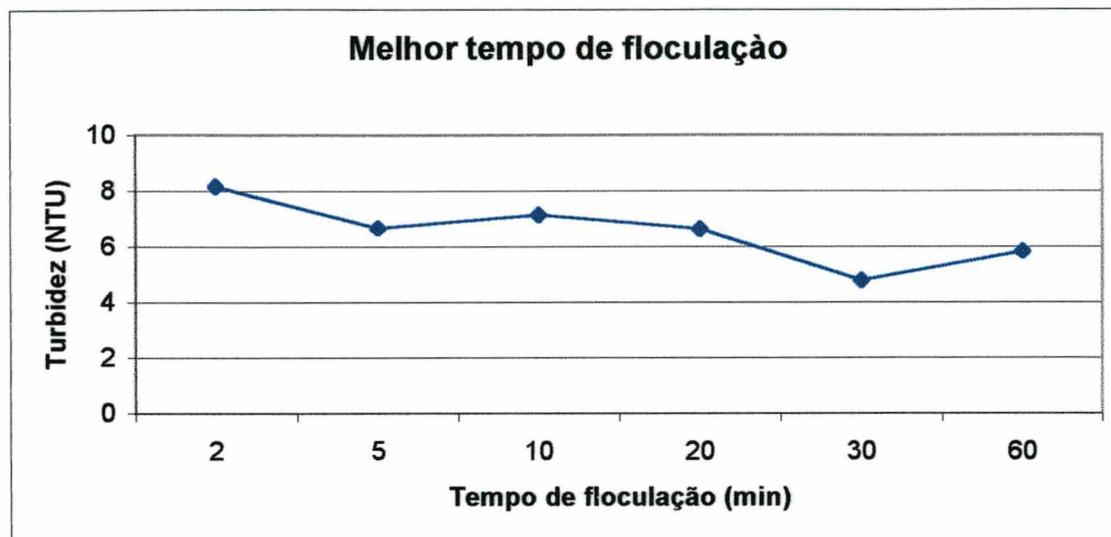


Figura 76: Ensaio 2.2.6

Ensaio 2.3: Qualidade da água decantada em função do gradiente de velocidade para diferentes tempos de floculação

Tabela 25: Ensaio 2.3

T flocc	22	33	42	50	71	84
2 min	5,62	7,06	6,62	7,83	6,41	8,14
5 min	4,34	6,12	4,9	7,38	6,85	6,68
10 min	3,82	4,46	6,26	6,08	6,2	7,15
20 min	3,18	4,53	4,83	6,13	5	6,66
30 min	3,77	4,22	4,32	4,84	6,75	4,8
60 min	2,4	3,45	4,49	3,42	4,33	5,85

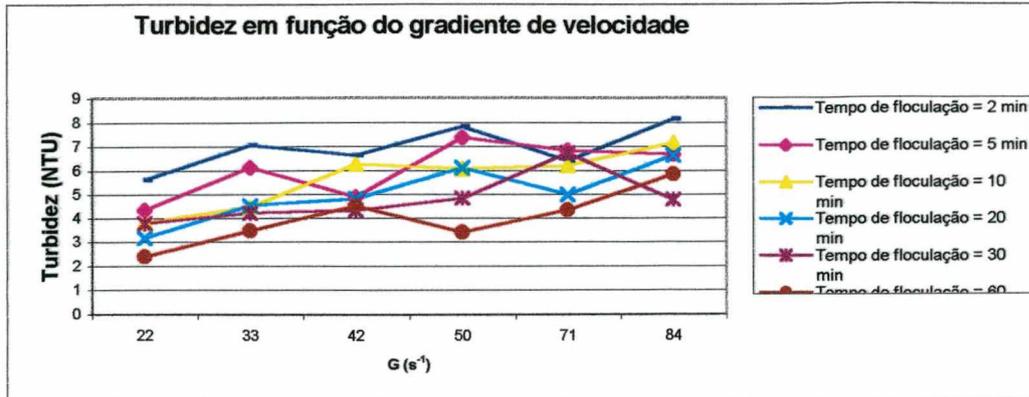


Figura 77: Ensaio 2.3

Ensaio 2.4: Determinação do melhor gradiente de velocidade

Tabela 26: Ensaio 2.4

Gradiente (s-1)	200 - 40	100 - 25	85 - 25	75 - 20
Turbidez 10 min	10,4	7,32	6,27	5,25
Turbidez 20 min	3,62	3,82	3,55	2,96

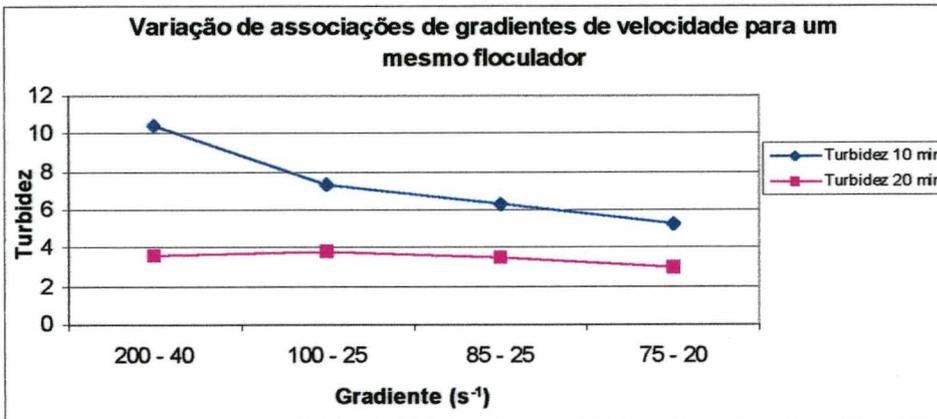


Figura 78: Ensaio 2.4

ANEXO 3: Teste de jarros para a determinação da melhor dosagem de sulfato de alumínio para águas com alta concentração de bentonita

Ensaio 3.1

Água Bruta: Alcalinidade: 13,5

PH: 8,29

Turbidez: 106

Tabela 27: Ensaio 3.1

Sulfato(mg/l)	5	7.5	10	12.5	15	20
Turbidez 10 min	31.1	25.3	21.3	16.8	20.8	15.7
Turbidez 20 min	8.12	9.56	10.9	8.49	13.7	10.7

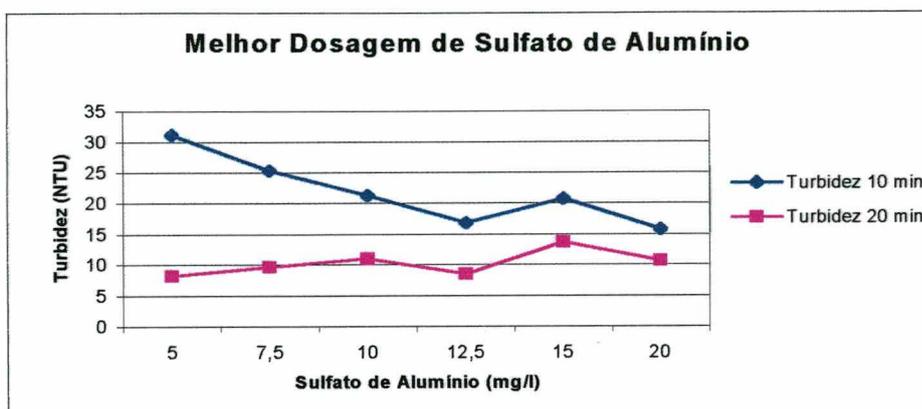


Figura 79: Ensaio 3.1

Ensaio 3.2:

Água Bruta: Alcalinidade: 15

PH: 7,94

Turbidez: 105

Tabela 28: Ensaio 3.2

Sulfato (mg/l)	22.5	25.5	27.5	30	32.5	35
Turbidez 10 min	7.43	7.54	7.67	9.24	5.37	8.98
Turbidez 20 min	4.31	4.36	4.26	4.01	4.39	4.52

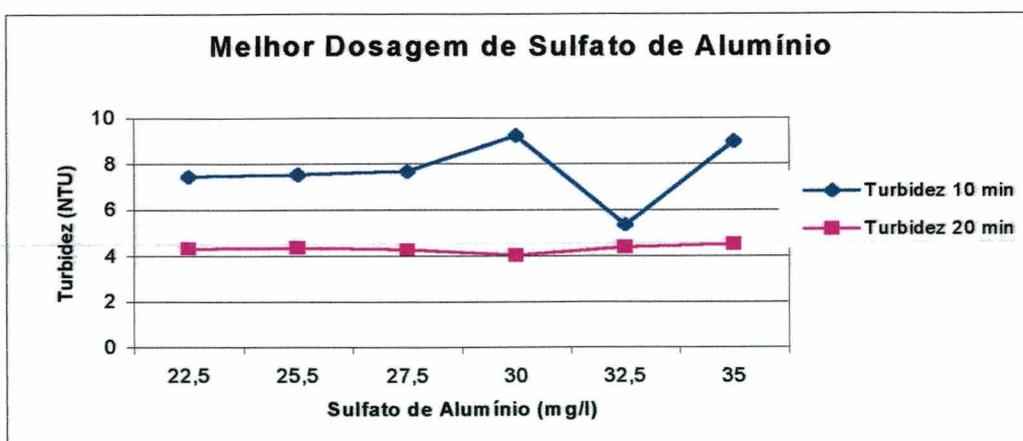


Figura 80: Ensaio 3.2

Ensaio 3.3:
 Água Bruta:
 Alcalinidade: 12
 PH: 10.42
 Turbidez: 107

Tabela 29: Ensaio 3.3

Sulfato (mg/l)	25	30	35	40	45	50
Turbidez 10 min	17	13.3	11.2	6.16	10.7	11.3
Turbidez 20 min	8.4	5.9	5.22	5.28	6.8	6.62

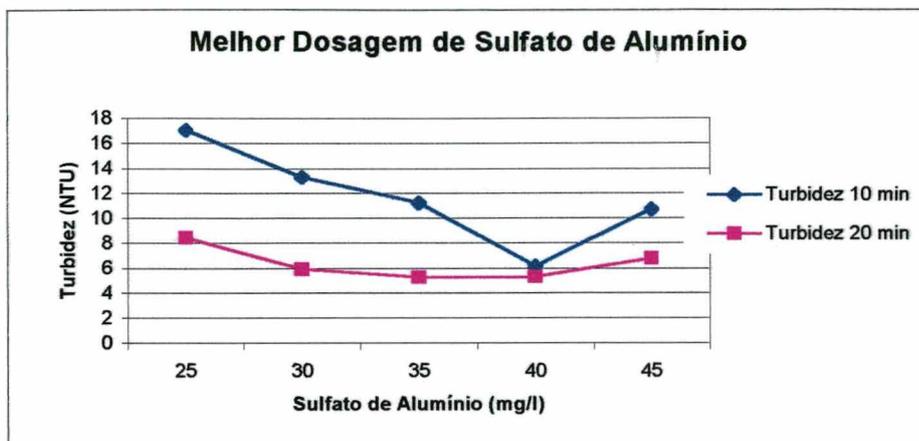


Figura 81: Ensaio 3.3

Ensaio 3.4
 Água Bruta:
 Alcalinidade: 11.6
 PH: 6.74
 Turbidez: 76.7

Tabela 30: Ensaio 3.4

Sulfato (mg/l)	20	25	30	35	40	45
Turbidez 10 min	23.5	19.8	10.5	21.3	6.34	20
Turbidez 20 min	7.37	5	5	4.22	2.28	1.83

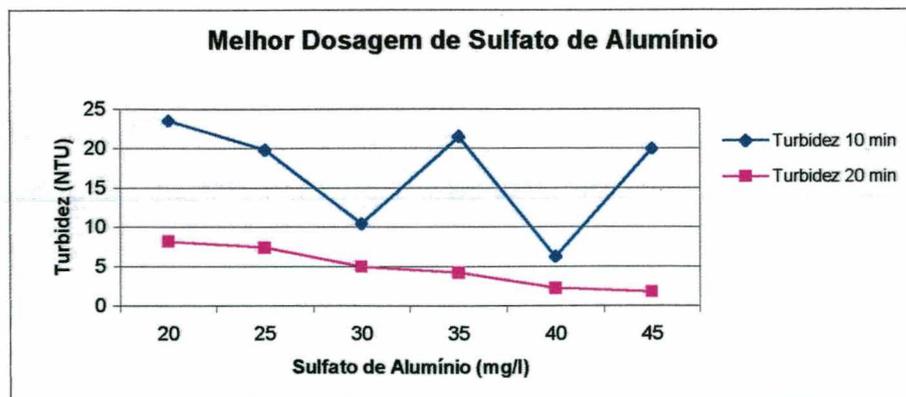


Figura 82: Ensaio 3.4

Ensaio 3.5:
 Água Bruta:
 Alcalinidade: 11.6
 PH: 6.74
 Turbidez: 76.7

Tabela 31: Ensaio 3.5

Sulfato (mg/l)	45	50	55	60	70
Turbidez 10 min	10.3	8.33	7.48	26.7	16.5
Turbidez 20 min	2.48	3.16	2.17	3.42	2.28

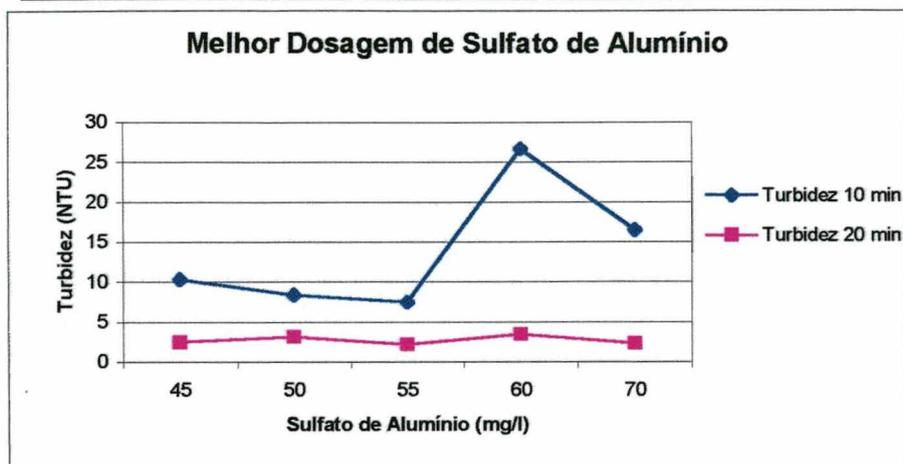


Figura 83: Ensaio 3.5

Ensaio 3.6
 Água Bruta: Alcalinidade: 11.3
 PH: 6.26
 Turbidez: 67.1

Tabela 32: Ensaio 3.6

Sulfato (mg/l)	55	60	65	70	80
Turbidez 10 min	5,48	7,78	8,7	10,1	2,93
Turbidez 20 min	2,4	2,92	2,45	5,43	1,97

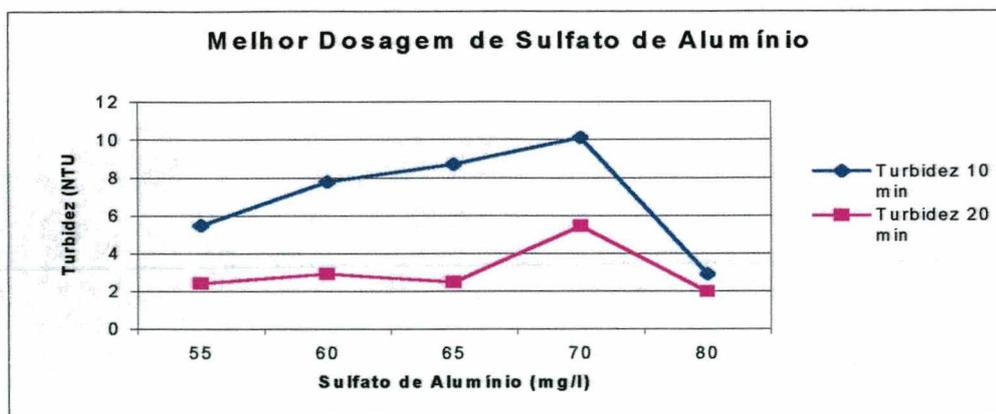


Figura 84: Ensaio 3.6

ANEXO 4 – resultados dos ensaios para a determinação da melhor vazão para uma água com bentonita .

Ensaio 4.1

Características da água bruta:

- Turbidez Média: 60
- Ph: 6.6
- Alcalinidade : 10 mg/l

Vazão: 176 l/h

Dosagem de sulfato: 50 mg/l

Tabela 33: Ensaio 4.1

Tempo (min)	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390	420	450
Turbidez 10 min	18	15,6	19,4	20,7	26,5	23,3	18,5	21	13,8	16,2	17,5	19,2	17,1	15,9	18,5
Turbidez 20 min	10,7	9,35	10,3	15,3	16,3	12,4	16	8,7	8,99	8,16	7,8	7,16	10,1	8,04	10,2

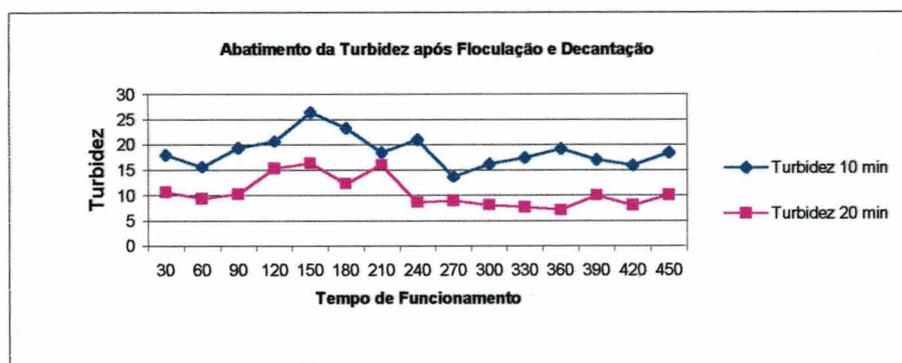


Figura 85 : Ensaio 4.1

Ensaio 4.2

Características da água bruta:

- Turbidez Média: 65
- Ph: 6.5
- Alcalinidade: 11 mg/l

Vazão: 200 l/h

Dosagem de sulfato: 35 mg/l

Tabela 34: Ensaio 4.2

Tempo (min)	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390	420	450
Turbidez 10 min	17,6	17,6	15,6	10,1	14,4	17	22	16,1	15,2	18,3	20,4	19,1	18	18,6	17,1
Turbidez 20 min	12,1	16,7	11,7	6,67	9,02	9,29	7,33	11,9	11,2	12,3	11	11	10,4	11,7	12,4

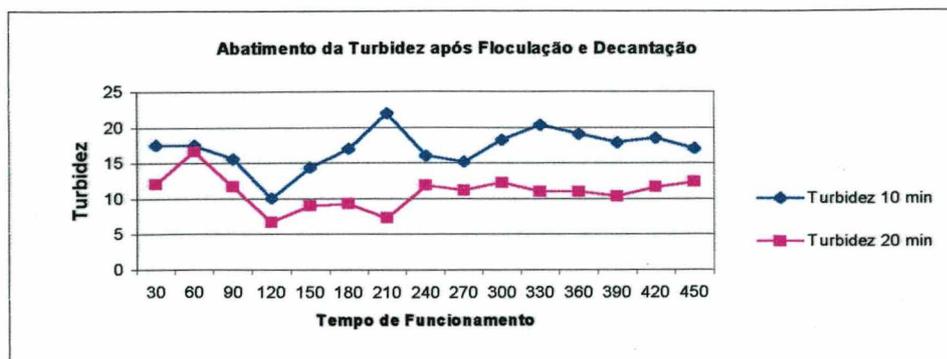


Figura 86 :Ensaio 4.2

Ensaio 4.3:

Características da água bruta

- Turbidez Média: 60
 - Ph: 6.5
 - Alcalinidade: 9 mg/l
- Vazão: 230 l/h
Sulfato: 35 mg/l

Tabela 35: Ensaio 4.3

Tempo (min)	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390	420
Turbidez 10 min	14,9	16,2	15,1	17,5	15,6	15	17	13,2	17	16,6	19,3	17,7	16,2	15,4
Turbidez 20 min	10	11,2	8,99	11	11,1	8,48	7,94	9,26	10,9	9,96	8,82	8,15	9,34	8,92

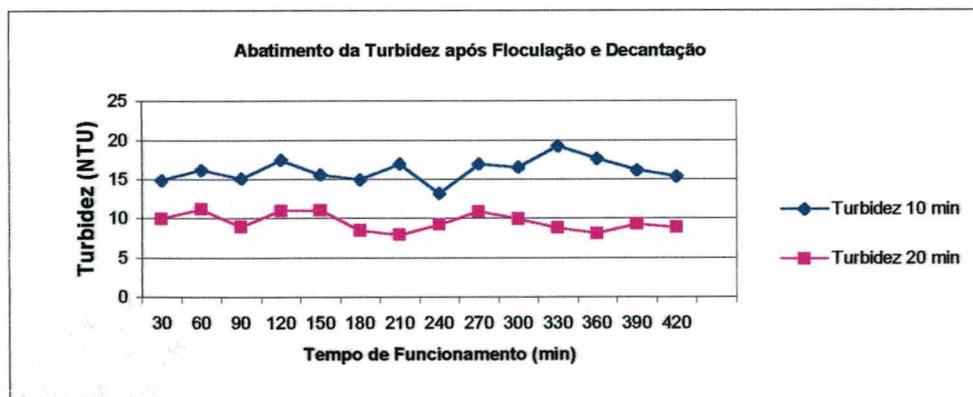


Figura 87 :Ensaio 4.3

Ensaio 4.4:

Características da água bruta

- Turbidez Média: 60
- Ph: 6.5

➤ Alcalinidade: 11 mg/l
 Vazão: 250 l/h
 Sulfato: 35 mg/l

Tabela 36: Ensaio 4.4

Tempo (min)	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
Turbidez 10 min	18,7	17,2	19,4	17,1	18,8	18,5	19,2	21,2	19	17,9	19,8
Turbidez 20 min	13,8	11,2	13	12,1	12,2	11,8	15,7	14,8	13,3	11,1	11,9

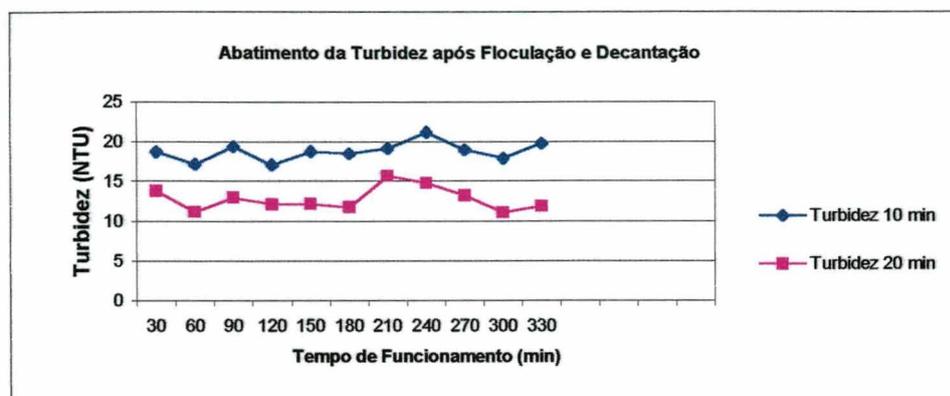


Figura 88 :Ensaio 4.4

ANEXO 5 - Resultados dos ensaios de floculação realizados em uma água com alta concentração de bentonita.

Ensaio 5.1:

Características da água bruta:

- Turbidez Média: 100
- Ph: 7.2
- Alcalinidade: 10 mg/l

Vazão: 188 l/h

Sulfato: 60 mg/l

Tabela 37: Ensaio 5.1

Turb	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390	420	450	490
10 min	33,7	31,1	25,2	25,6	21,3	22,8	23,6	21,6	20,4	21,3	27,9	29,1	24,9	24,5	26,9	28
20 min	29,7	20,3	14,2	12,6	14,8	12,4	14,8	10,3	14,1	12,4	12,1	16,7	16,3	15	15,9	19,8

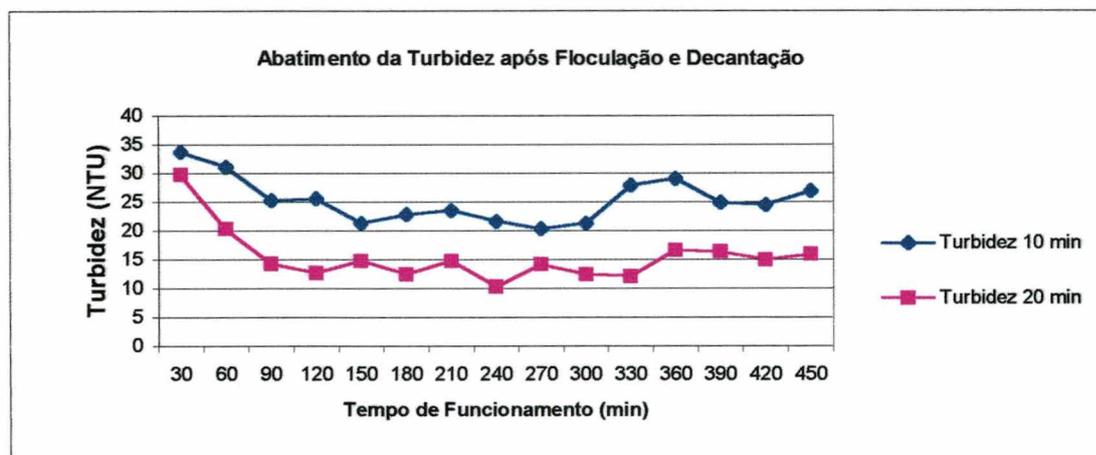


Figura 89 : Ensaio 5.1

Ensaio 5.2:

Características da água bruta:

- Turbidez Média: 93
- Ph: 7.0
- Alcalinidade: 12 mg/l

Vazão: 188 l/h

Sulfato: 60 mg/l

Tabela 38: Ensaio 5.2

turb	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390	420	450	490
10 min	28,1	26,1	26,5	26,9	25,5	24,3	20,8	24,5	25,4	30,3	27,8	24,1	23,5	25,3	24,3	28
20 min	18,9	15,8	16,9	17,1	15,8	15,8	16,6	13,5	14,5	14,5	16,7	15,4	17,2	16,9	17,2	17,3

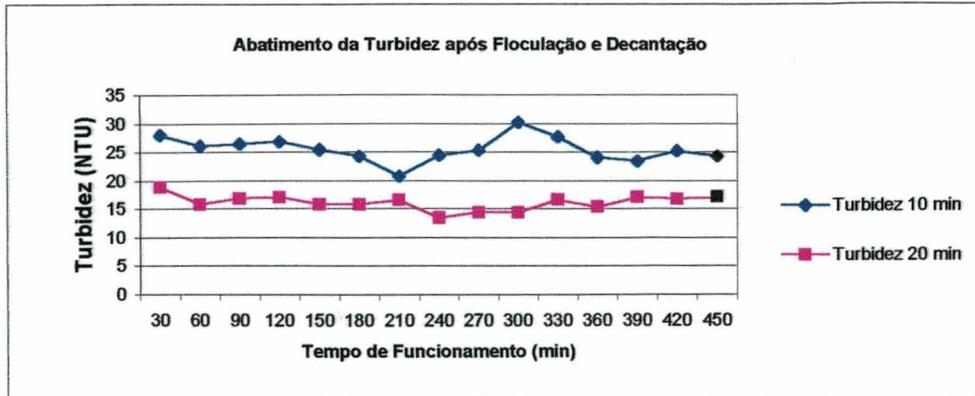


Figura 90: Ensaio 5.2

Ensaio 5.3:

Características da água bruta:

- Turbidez Média: 110
- Ph: 7.0
- Alcalinidade: 10 mg/l

Vazão: 188 l/h

Sulfato: 60 mg/l

Tabela 39: Ensaio 5.3

turb	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390	420	450	490
10 min	16,3	16,5	17,3	17,2	24,8	19	22,6	22,5	23,5	25,7	21,8	23,3	20,1	23,9	22,4	17,3
20 min	10,9	9,29	9,24	11,5	15,9	14,1	16,6	16	18,7	17,6	16,5	14,1	14,3	15,8	11,7	11

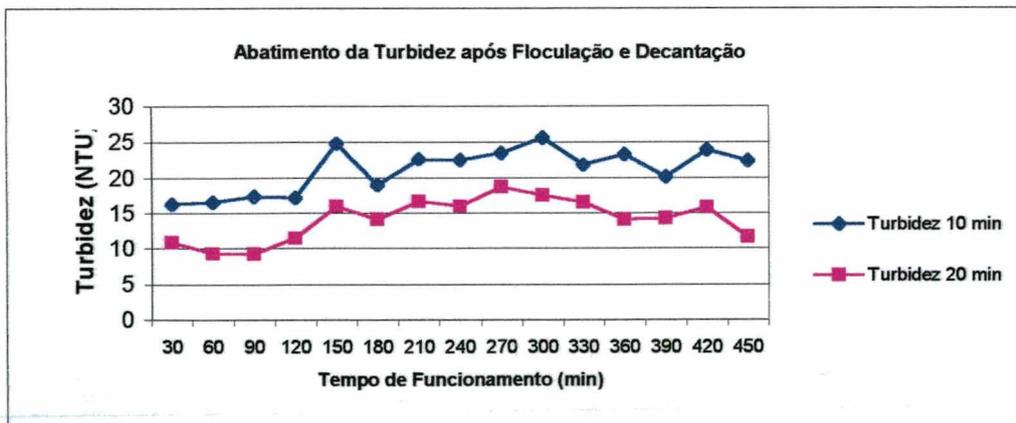


Figura 91 : Ensaio 5.3

Ensaio 5.4:

Características da água bruta:

- Turbidez Média: 150
- Ph: 6.5
- Alcalinidade: 9mg/l

Vazão: 188 l/h

Sulfato: 60 mg/l

Tabela 40: Ensaio 5.4

Tempo (min)	30	60	90	120	150	180	210	240	270
Turbidez 10 min	23,1	23,4	38,5	22,5	22,1	20,6	19,5	28,1	23,5
Turbidez 20 min	20,1	17,3	17,6	16,2	16,9	13,4	13,9	16,6	15,3

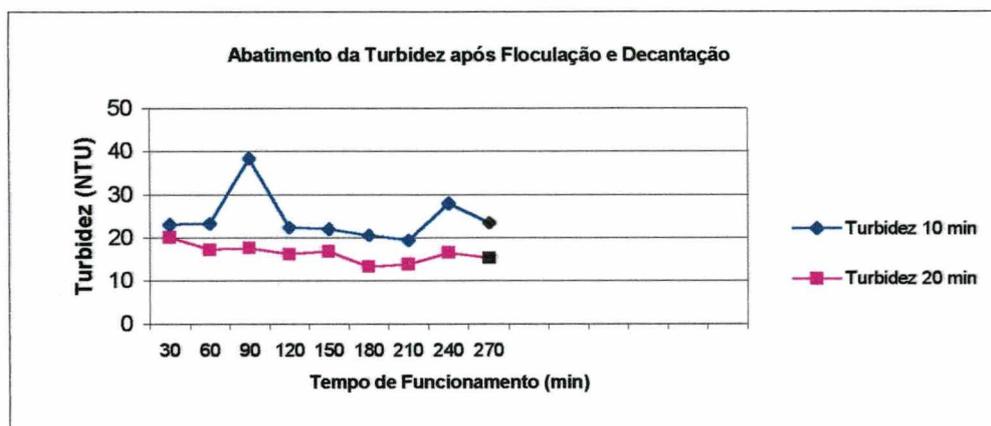


Figura 92 : Ensaio 5.4

ANEXO 6: Variação do tempo que a água passa pelo decantador

Ensaio 6.1:

- Tempo: 10 Minutos
- Características da água bruta:
- Turbidez Média: 60
 - Ph: 6.5
 - Alcalinidade: 10 mg/l
- Vazão: 250 l/h
Sulfato: 35 mg/l

Tabela 41: Ensaio 6.1

Tempo (min)	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
Turbidez 10 min	18,7	17,2	19,4	17,1	18,8	18,5	19,2	21,2	19	17,9	19,8
Turbidez 20 min	13,8	11,2	13	12,1	12,2	11,8	15,7	14,8	13,3	11,1	11,9

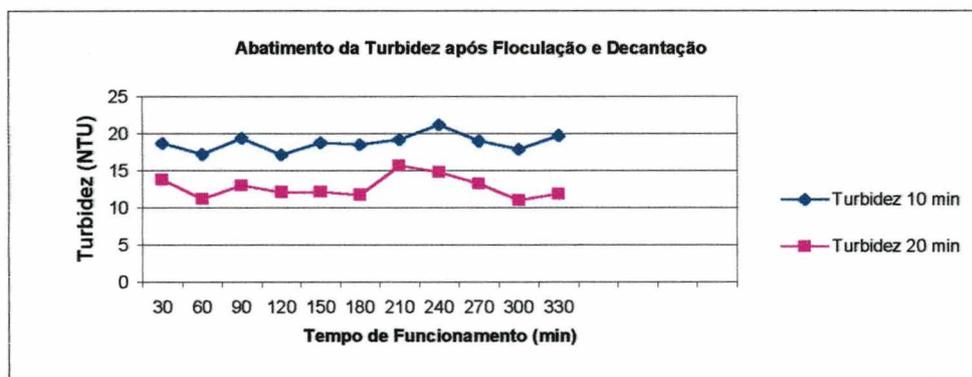


Figura 93 : Ensaio 6.1

Ensaio 6.2:

- Tempo: 20 Minutos
- Características da água bruta:
- Turbidez Média: 60
 - Ph: 6.5
 - Alcalinidade: 12 mg/l
- Vazão: 255 l/h
Sulfato: 35 mg/l

Tabela 42: Ensaio 6.2

Tempo (min)	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	350
Turbidez 10 min	27,3	27,4	27,5	26	25,7	30,1	23,1	30,7	34,5	25,7	27,3	34,9
Turbidez 20 min	18,3	21,9	15,7	18,2	17,6	18	14,9	19,5	21	17,2	18,5	17,3

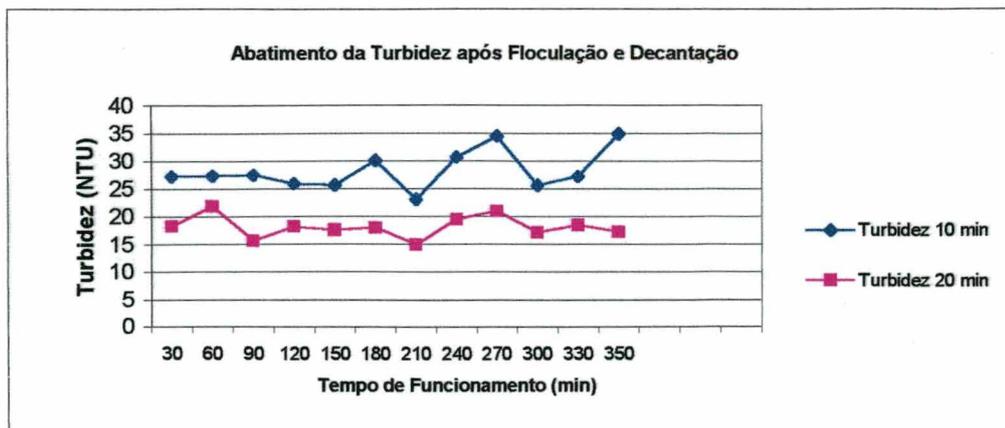


Figura 94 : Ensaio 6.2

Ensaio 6.3:

- Tempo: 30 Minutos
- Características da água bruta:
- Turbidez Média: 60
- Ph: 7.0
- Alcalinidade: 10 mg/l
- Vazão: 255 l/h
- Sulfato: 35 mg/l

Tabela 43: Ensaio 6.3

Tempo (min)	30	60	90	120	150
Turbidez 10 min	23,9	22,2	22	23,9	24,9
Turbidez 20 min	16,1	16,1	13,6	12	17,6

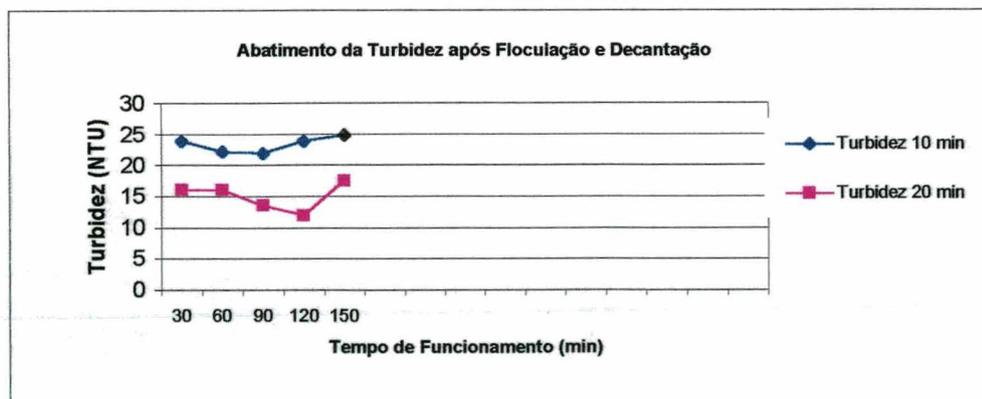


Figura 95: Ensaio 6.3

ANEXO 7: Tabelas dos resultados obtidos em água com bentonita**Tabela 44: Melhor dosagem de sulfato para água com bentonita**

Sulfato (mg/l)	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
turbidez 10 min	85,4	9,52	5,21	3,82	5,41	4,21	4,93	5,33	3,98	3,47	3,23
turbidez 20 min	84,2	9,13	4,55	3,13	3,36	3,35	2,72	3,3	3,59	3,12	3

Tabela 45: Abatimento da turbidez com 1 e 3 colunas em funcionamento para água com bentonita

Tempo (min)	30	60	90	120	150	180
3 colunas	12	7,81	11	12,4	11,8	9,7
1 coluna	15,5	15,5	16,3	18,2	17,3	15,9

Tabela 46: Abatimento da cor com 1 e 3 colunas em funcionamento para água com bentonita

Tempo (min)	30	60	90	120	150	180
3 colunas	14	9	10	10	9	10
1 coluna	20	17	15	15	10	15

Tabela 47: Abatimento dos sólidos suspensos para água com bentonita

Tempo (min)	30	60	90	120	150
3 colunas	8	10	8	18	13
1 coluna	13	11	14	20	18

Tabela 48: Abatimento dos sólidos totais para água com bentonita

Tempo (min)	30	60	90	120	150
3 colunas	93	90	92	85	82
1 coluna	139	96	103	90	90

Tabela 49: Abatimento dos sólidos dissolvidos para água com bentonita

Tempo (min)	30	60	90	120	150
3 colunas	85	80	84	67	69
1 coluna	126	85	89	70	72

Tabela 50: Abatimento dos sólidos Sedimentáveis com 1 coluna em funcionamento para água com bentonita

Tempo	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min
30	0,9	3	7	7,2	7
60	0,7	3	5	6	5,8
90	0	0,2	1,4	5	5
120	0	0,7	1,6	5	5
150	0,3	2,5	5	7	7
180	0	0,7	1,3	6	6

Tabela 51: Abatimento dos sólidos Sedimentáveis com 3 colunas em funcionamento para água com bentonita

Tempo	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min
30	0	0,6	3	6	5
60	1,5	2,5	8	8	7
90	1,8	7	9	8	6,8
120	3	9	10,2	10	8,5
150	1,3	5	9	9	8,5
180	0,7	6	8,8	9	7

Tabela 52: Abatimento da turbidez na água com bentonita filtrada

Tempo (min)	30	60	90	120	150	180
3 colunas	2,94	0,91	2,78	1,22	0,74	0,63
1 coluna	0,61	0,59	0,58	0,53	0,71	0,75

Tabela 53: Abatimento da turbidez para a água com bentonita decantada e filtrada com 1 coluna em funcionamento

Tempo (min)	30	60	90	120	150	180
água decantada	15,5	15,5	16,3	18,2	17,3	15,9
água Filtrada	0,61	0,59	0,58	0,53	0,71	0,75

Tabela 54: Abatimento da turbidez para a água com bentonita decantada e filtrada com 3 colunas em funcionamento

Tempo (min)	30	60	90	120	150	180
água decantada	12	7,81	11	12,4	11,8	9,7
água Filtrada	2,94	0,91	2,78	1,22	0,74	0,63

Tabela 55: Abatimento do COT para água com bentonita

Tempo (min)	30	60	90	120	150	180	210	240
COT	3,057	3,334	3,365	3,749	3,57	3,846	3,662	3,929

ANEXO 8: Tabelas dos resultados obtidos com água natural**Tabela 56: Melhor dosagem de sulfato para água natural**

Sulfato (mg/l)	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
turbidez 10 min	85,4	9,52	5,21	3,82	5,41	4,21	4,93	5,33	3,98	3,47	3,23
turbidez 20 min	84,2	9,13	4,55	3,13	3,36	3,35	2,72	3,3	3,59	3,12	3

Tabela 57: Abatimento da turbidez com 1 e 3 colunas em funcionamento para água natural

Tempo (min)	30	60	90	120	150	180	210
3 colunas	14,8	16,6	16	17,7	17,9	16	17,8
1 coluna	42,3	41,9	45,8	45,1	42	42,7	41,7

Tabela 58: Abatimento da cor com 1 e 3 colunas em funcionamento para água natural

Tempo (min)	30	60	90	120	150	180	210
3 colunas	15	20	20	20	24	12	25
1 coluna	50	35	40	45	45	55	40

Tabela 59: Abatimento dos sólidos suspensos para água natural

Tempo (min)	30	60	90	120	150
3 colunas	4	6	2	4	5
1 coluna	26	22	25	23	34

Tabela 60: Abatimento dos sólidos totais para água natural

Tempo (min)	30	60	90	120	150
3 colunas	99	105	118	115	102
1 coluna	100	112	113	103	132

Tabela 61: Abatimento dos sólidos dissolvidos para água natural

Tempo (min)	30	60	90	120	150
3 colunas	95	99	116	111	97
1 coluna	74	90	88	59	69

Tabela 62: Abatimento dos sólidos Sedimentáveis com 1 coluna em funcionamento para água natural

tempo	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min
30	20	17	16	11,5	9
60	21	18	17	14	11
90	19	18	15	11,5	9,5
120	19	17,3	15	12	9
150	24	22	19,8	16	11,8
180	22	18	16	12	10

Tabela 63: Abatimento dos sólidos Sedimentáveis com 3 colunas em funcionamento para água natural

tempo	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min
30	15	14,8	13	9	7,5
60	18	14	12,8	11	9
90	18	16,2	13,8	11	8
120	15	15	13	11	8
150	17	16	14	10,7	7
180	24	19	16	13	10

Tabela 64: Abatimento da turbidez na água natural filtrada

Tempo (min)	30	60	90	120	150
3 colunas	1,45	1,7	3,06	1,99	2,78
1 coluna	1,99	2,35	1,71	1,39	1,88

Tabela 65: Abatimento da turbidez para a água natural decantada e filtrada com 1 coluna em funcionamento

Tempo (min)	30	60	90	120	150
água decantada	4,43	4,47	4,43	4,38	4,37
água Filtrada	1,99	2,35	1,71	1,39	1,88

Tabela 66: Abatimento da turbidez para a água natural decantada e filtrada com 3 colunas em funcionamento

Tempo (min)	30	60	90	120	150
água decantada	14,8	16,6	16	17,7	17,9
água Filtrada	1,45	1,7	3,06	1,99	2,78

Tabela 67: Abatimento do COT para água natural

Tempo (min)	30	60	90	120	150	180	210	240
3 colunas	3,208	2,435	2,631	2,864	2,517	2,267	2,061	2,356

ANEXO 9: Tabelas dos resultados da água de lago

Tabela 68: Melhor dosagem de sulfato para água de lago

Sulfato (mg/l)	15	20	25	30	35	40
turbidez 10 min	16,9	13,8	8,79	5,72	4,66	6,06
turbidez 20 min	13,4	12,2	7,08	4,86	3,16	3,97

Tabela 69: Abatimento da turbidez com 1 e 3 colunas em funcionamento para água de lago

Tempo (min)	30	60	90	120	150
3 colunas	6,56	6,76	6,66	7,62	5,57
1 coluna	8,65	9,68	10,7	9,81	11,5

Tabela 70: Abatimento da cor com 1 e 3 colunas em funcionamento para água de lago

Tempo (min)	30	60	90	120	150
3 colunas	17	15	13	15	15
1 coluna	20	20	23	20	25

Tabela 71: Abatimento dos sólidos suspensos para água de lago

Tempo (min)	30	60	90	120	150
3 colunas	13	7	9	8	9
1 coluna	14	9	15	20	12

Tabela 72: Abatimento dos sólidos totais para água de lago

Tempo (min)	30	60	90	120	150
3 colunas	118	122	94	62	87
1 coluna	71	51	72	57	60

Tabela 73: Abatimento dos sólidos dissolvidos para água de lago

Tempo (min)	30	60	90	120	150
3 colunas	105	115	85	54	78
1 coluna	57	42	57	37	48

Tabela 74: Abatimento da turbidez na água de lago filtrada

Tempo (min)	30	60	90	120	150
3 colunas	0,59	0,7	0,68	0,6	0,62
1 coluna	1,22	1,06	1,22	1,2	1,18

Tabela 75: Abatimento da turbidez para a água de lago decantada e filtrada com 1 coluna em funcionamento

Tempo (min)	30	60	90	120	150
água decantada	8,65	9,68	10,7	9,81	11,5
água Filtrada	1,22	1,06	1,22	1,2	1,18

Tabela 76: Abatimento da turbidez para a água de lago decantada e filtrada com 3 colunas em funcionamento

Tempo (min)	30	60	90	120	150
água decantada	6,56	6,76	6,66	7,62	5,57
água Filtrada	0,59	0,7	0,68	0,6	0,62

Tabela 77: Abatimento do COT para água de lago

Tempo (min)	30	60	90	120	150	180	210	240	270
COT	3,212	3,34	3,302	3,37	3,311	3,165	3,109	3,105	3,105

ANEXO 10: Tabelas dos resultados obtidos com o efluente**Tabela 78: Melhor dosagem de sulfato para efluente**

Dosagem de Sulfato (mg/l)	90	95	100	105	110	115
Turbidez 10 min	6,59	6,35	8	8,53	7,54	8,62
Turbidez 20 min	5,21	3,53	4,64	4,37	3	4,03

Tabela 79: Abatimento da turbidez com 1 e 3 colunas em funcionamento para o efluente

Tempo (min)	30	60	90	120	150
3 colunas	19	20,8	18,5	20,9	19
1 coluna	40,3	35,1	42,3	46,1	43

Anexo 11: Condições hidráulicas medidas no piloto

Nomeclatura:

U_0 = velocidade de aproximação (cm/min)

E = expansão do meio granular (%)

ε = Porosidade

Δh = Perda de carga (mm)

Gm = gradiente de velocidade (s-1)

A porosidade foi calculada através da equação 56 e o gradiente de velocidade foi calculado pela equação 25.

Tabela 80: Valores obtidos das condições hidráulicas do piloto referentes a coluna I

U_0	E	ε	Δh	G
72,04	0,061	0,416	71	32,46761
82,91	0,123	0,448	70	33,42312
99,27	0,228	0,495	68	34,03506
117,78	0,324	0,532	72	36,5292
125,24	0,36	0,544	75	37,73799
138,70	0,465	0,577	74	37,61596
144,79	0,517	0,591	73	37,44638
150,67	0,588	0,609	71	36,55102

Tabela 81: Valores obtidos das condições hidráulicas do piloto referentes a coluna II

U_0	E	ε	Δh	G
61,41	0,043	0,406	61	26,07654
70,67	0,104	0,439	59	26,65378
84,62	0,191	0,48	58	27,91587
100,40	0,295	0,521	59	29,10698
106,75	0,326	0,532	61	30,21287
118,23	0,409	0,56	62	30,81999
123,42	0,461	0,575	61	30,50665
128,43	0,522	0,592	60	29,90618

Tabela 82: Valores obtidos das condições hidráulicas do piloto referentes a coluna III

U_0	E	ε	Δh	G
52,96	0,0085	0,385	59	22,82346
60,94	0,026	0,395	66	26,35203
72,97	0,094	0,433	65	27,65937
86,58	0,179	0,474	64	28,5495
92,06	0,205	0,485	66	29,50457
101,95	0,256	0,506	68	30,86113
106,43	0,299	0,523	66	30,34212
110,75	0,342	0,538	64	29,89318