



# Unidade Piloto para Clarificação de Efluente da Indústria Têxtil

Anderson da Silva Radich  
André Rodrigues Pereira

## **Projeto Final de Curso**

### **Orientadores:**

Prof. Lídia Yokoyama, D.Sc  
Prof. Ladimir José de Carvalho, D.Sc

Fevereiro de 2006

# UNIDADE PILOTO PARA CLARIFICAÇÃO DE EFLUENTE DA INDÚSTRIA TÊXTIL

*Anderson da Silva Radich*  
*André Rodrigues Pereira*

Projeto Final de Curso submetido ao corpo docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado por:

---

Oswaldo Galvão Caldas da Cunha, Ph.D.

---

Elioni Maria de A. Nicolaiewsky, D.Sc.

---

Francisco Assis Barbosa, M.Sc.

Orientado por:

---

Lídia Yokoyama, D.Sc

---

Ladimir José de Carvalho, D.Sc

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Fevereiro de 2006

Radich, Anderson da Silva; Pereira, André Rodrigues  
Unidade Piloto para Clarificação de Efluente da Indústria Têxtil / Radich, Anderson da Silva; Pereira, André Rodrigues. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2006.  
Vi, 78 p.; il  
(Projeto Final de Curso) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2006.  
Orientadores: Lídia Yokoyama e Ladimir José de Carvalho  
1. Coagulação / Floculação 2. Operações Unitárias 3. Efluente Têxtil 4. Projeto Final de Curso. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Lídia Yokoyama e Ladimir José de Carvalho I.  
Título: Unidade Piloto para Clarificação de Efluente da Indústria Têxtil

Dedicamos este estudo aos nossos pais e aos nossos avós.

Resumo do Projeto de Final de Curso apresentado a Escola de química como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Químico.

## **UNIDADE PILOTO PARA CLARIFICAÇÃO DE EFLUENTE DA INDÚSTRIA TÊXTIL**

Anderson da Silva Radich  
André Rodrigues Pereira

Fevereiro, 2006

Orientadores: Prof. Lídia Yokoyama, D.Sc.  
Prof. Ladimir José de Carvalho, D.Sc.

### **RESUMO**

A grande preocupação com o meio ambiente tem trazido para a sociedade desafios com relação ao tratamento e descarte dos efluentes têxteis.

As indústrias têxteis são um grande potencial corpo poluidor do meio ambiente, em específico os recursos hídricos naturais. Devido à diversidade de corantes, pigmentos, que, utilizados nos processos de tingimento e estampagem geram efluentes coloridos que não tratados são bastante impactantes ao meio ambiente.

Por isso esse trabalho tem como objetivo projetar em escala piloto de bancada uma unidade para tratamento de efluente têxtil constituída de um floculador, sedimentador e filtro de areia.

Ensaio de *Jar-Test* com um efluente sintético, com concentração inicial de corante direto azul de 200mg/L foram realizados para se obter condições ideais de pH, concentração ótima de coagulante, tempo de sedimentação e tempo de floculação.

As melhores condições obtidas no Jar Test permitiram dimensionar o floculador e realizar o teste da proveta visando calcular as dimensões do sedimentador. A partir das dimensões calculadas, foi proposto um fluxograma para esse tratamento. A partir desses dados, foi construída uma unidade piloto de tratamento físico-química de efluente têxtil, em acrílico.

“...Viver, e não ter a vergonha de ser feliz  
Cantar e cantar e cantar  
A beleza de ser um eterno aprendiz...”  
(Gonzaguinha)

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por ter abençoado a nossa trajetória, fortalecendo a cada dia a nossa fé na busca de nossos objetivos e, pela bênção que nos concedeu de ter alcançado esta conquista.

A nossos pais, Sebastião A. Radich e Eliane S. Radich e, Adelino L. Pereira e Silvia F. R. Pereira, pelo apoio e incentivo, fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos nossos avós, pelo apoio e incentivo ao longo desta caminhada.

As nossas noiva e namorada Fabiana Martins e Renata Bajóca, por terem compartilhado momentos importantes, apoiando e incentivando ao longo desta caminhada.

A todos os professores do curso de Engenharia Química que acompanharam nossa trajetória acadêmica.

Aos orientadores, Professora Doutora Lídia Yokoyama e o Professor Doutor Ladimir José de Carvalho, no qual temos muita admiração, que mostraram muita dedicação e competência durante o desenvolvimento deste estudo.

## Índice

Capítulo 1 – Introdução .....	3
Capítulo 2 – Corantes e Tratamentos Utilizados para a sua Remoção.....	5
2.1.1. Corantes Direto.....	7
2.2. Tratamento de Efluentes na Indústria Têxtil.....	7
2.2.1. Tratamentos Físicos.....	8
2.2.2. Equalização.....	8
2.2.3. Gradeamento .....	8
2.2.4. Peneiramento .....	9
2.2.5. Tratamento Físico-Químico .....	9
2.2.6. Tratamento Biológico .....	11
Capítulo 3 - Coagulação e Floculação .....	13
3.1. História da coagulação.....	13
3.2. Definições.....	13
3.3. Coagulantes:.....	17
3.3.1. Sulfato de alumínio.....	18
3.3.1.1. Reações .....	18
3.3.2. Coagulação com Sais de Ferro .....	19
3.3.2.1. Cloreto Férrico.....	19
3.3.2.2. Caparosa Clorada .....	20
3.4. Fatores que influenciam a coagulação .....	20
3.4.1. Controle de laboratório .....	20
3.4.2. Operação:.....	22
3.5. Floculação .....	23
Capítulo 4 – Projeto de Floculador, Decantador e Filtro.....	25
4.1. Projeto da Unidade de Mistura Rápida.....	25
4.1.1. Malhas Difusoras.....	26
4.1.2. Localização da Unidade de Mistura Rápida .....	28
4.2. Projeto do Floculador .....	28
4.2.1. Significado e Aplicações de G.....	30
4.2.2. Floculadores Mecânicos.....	30
4.3. Projeto do Sedimentador.....	32
4.3.1. Projeto dos Tanques de Sedimentação .....	33
4.3.2. Teoria e Prática .....	34
4.3.3. Decantadores para Sólidos Finos .....	36
4.3.4. Dimensionamento de Sedimentadores .....	37
4.3.4.1. Método de Coe e Clevenger.....	39
4.3.4.2. Método de Kynch .....	41
4.3.4.2. Método de Kynch Modificado .....	43
4.4. Projeto do Filtro Rápida por Gravidade .....	47
4.4.1. Características dos Meios Filtrantes .....	47
4.4.1.1. Análise Granulométrica .....	47
4.4.2. Meio Filtrante.....	48
4.4.2.1. Filtro de Areia com Camada Suporte .....	48
4.4.3. Cálculo do número de filtros necessários.....	49
Capítulo 5 – Estudo de Caso - Efluente Têxtil.....	50
5.1. Condições Ideais de Coagulação, Floculação e Sedimentação.....	51
5.1.1. <i>Jar Test</i> .....	51
5.1.1.1. Condições Ideais de pH .....	51

5.1.1.2. Condições ideais de concentração de coagulante .....	52
5.1.1.3. Tempo Ideal de sedimentação .....	52
5.1.1.4. Condições Ideais do Tempo de Floclulação.....	53
5.1.2. Teste de sedimentação em Proveta .....	54
Capítulo 6 – Proposta das Dimensões dos Equipamentos e Fluxograma.....	56
6.1. Unidade de Mistura Rápida .....	56
6.1.1. Malha Difusora.....	56
6.2. Floclulador.....	58
6.3. Sedimentador.....	59
6.3.1 Determinação das Dimensões do Sedimentador Contínuo.....	59
6.3.2. Cálculo de S, D e $Z_3$ do sedimentador. ....	60
6.3.3. Cálculo de $Z_2$ .....	61
6.3.4. Cálculo de $V_S$ .....	61
6.3.5. Cálculo de $V_L$ .....	62
6.3.6. Determinação de $Z_1$ .....	64
6.3.7. Dimensões finais.....	64
6.4. Filtro Rápido por Gravidade .....	64
6.5. Fluxograma proposto .....	65
Capítulo 7 – Conclusões .....	66
Bibliografia .....	68
APÊNDICE 1 .....	70
APÊNDICE 2.....	73
APÊNDICE 3.....	74
ANEXO 1.....	77
ANEXO 2.....	78

## Capítulo 1 – Introdução

As indústrias têxteis constituem fator de grande importância na economia brasileira. Devido a sua grande expansão, nas últimas décadas, prevê-se uma maior ênfase nas leis e normas que regulam a qualidade de seus efluentes. Com isso, o setor têxtil busca cada vez mais soluções para o problema da poluição causada por seus efluentes.

Efluentes têxteis são notadamente conhecidos por conter forte coloração, uma grande quantidade de sólidos suspensos, pH altamente flutuante, temperatura elevada e alta Demanda Química de Oxigênio (DQO). Porém, a coloração, por causar poluição visual facilmente perceptível, é a carga poluidora mais notada (Lin e Peng, 1994). Efluentes coloridos são provenientes das etapas de tingimento e estampagem devido ao uso de corantes. (Cooper, 1995; Braile e Cavalcanti, 1971).

Os métodos convencionais que são usados para tratar os efluentes têxteis consistem no uso de tratamentos físico-químicos e biológicos. Essas etapas são precedidas por um tratamento preliminar, que engloba basicamente processos físicos, que visam remover sólidos flutuantes de dimensões relativamente grandes, areias, óleos, fibras e gorduras (Silva, 1995).

O tratamento físico-químico visa a remoção da matéria orgânica coloidal e parte da matéria orgânica em suspensão (Eckenfelder, 1989).

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica, focando o corante que será tratado nesse trabalho e os processos empregados para o tratamento de efluentes de indústrias têxteis.

Para o tratamento desses efluentes, no capítulo 3 são apresentados as características dos principais coagulantes, suas reações e os fundamentos do tratamento físico-químico, através das técnicas de coagulação e floculação.

O capítulo 4 apresenta os fundamentos teóricos de um projeto de equipamentos para a unidade de tratamento em questão, adotados no capítulo 5 o qual apresenta um estudo de caso para um efluente têxtil sintético, utilizando os ensaios de laboratório.

Finalmente, no capítulo 6, são apresentados os cálculos das dimensões e parâmetros dos equipamentos que estão sendo projetados, bem como o fluxograma proposto a partir dessas dimensões.

## Capítulo 2 – Corantes e Tratamentos Utilizados para a sua Remoção

Efluentes têxteis são gerados a partir de vários processos específicos da indústria têxtil. Estes processos podem ser subdivididos da seguinte forma: tratamento prévio, tingimento, estampagem e acabamento (Araújo e Castro, 1987).

Efluente colorido é gerado principalmente na etapa de tingimento. O tingimento é uma etapa destinada a colorir uniformemente os materiais têxteis. Nessa etapa deve-se considerar o material a tingir, o tipo de corante e a utilização de produtos auxiliares (ácidos, bases, sais, etc). Os efluentes gerados na operação de tingimento apresentam elevada DQO, alta condutividade, elevada coloração, grande quantidade de sólidos suspensos e grande variação de temperatura (Braile e Cavalcanti, 1979).

### 2.1. Corantes Têxteis

A origem dos corantes têxteis é incerta, mas há indicações de seu uso pelo homem desde os primórdios das civilizações. No Egito, muitos dos tecidos encontrados em múmias eram coloridos. No Brasil, desde seu descobrimento, sua história tem estado relacionada à produção de corantes. A começar pelo seu nome, uma vez que este é proveniente da madeira “Pau Brasil”, do qual era extraído um pigmento capaz de tingir tecidos com cores fortes, como vermelho, rosa ou marrom (Dallago et al, 2005).

O primeiro corante sintético foi descoberto apenas em 1856, por William Henry Perkin, denominado “Púrpuro de Tiro”, causando uma verdadeira revolução neste mercado. Wiliam Henry descobriu quando estudava a oxidação da fenilamina com dicromato de potássio ( $K_2Cr_2O_7$ ). Posteriormente, os franceses chamaram o novo corante de Malva.

Novas descobertas surgiram rapidamente, e os corantes naturais foram quase que completamente substituídos pelos sintéticos a partir do início do século XX, em decorrência do crescimento da demanda de corantes. Praticamente todos os corantes e pigmentos comerciais disponíveis atualmente no mercado são substâncias sintéticas, com exceção de alguns pigmentos inorgânicos (Zanoni e Carneiro, 2001).

Corantes são moléculas constituídas de um grupo cromóforo, responsável pela cor, e do grupamento funcional auxiliar que propicia sua afinidade ao substrato que pode ser um tecido, papel, cabelo, couro ou outros materiais. Grupos cromóforos no corante são, geralmente, compostos orgânicos com duas ligações conjugadas.

A fixação do corante em uma superfície pode ocorrer através de reações químicas diretas entre corantes e substrato ou dos derivados gerados durante o processo de tingimento, ou simplesmente por adsorção.

Atualmente, aproximadamente 10.000 corantes são produzidos em escala industrial. Destes, cerca de 2.000 encontram-se disponíveis para a indústria têxtil. No Brasil, das aproximadamente 20 t.ano<sup>-1</sup> de corantes consumidos pela indústria têxtil, cerca de 20% são descartados como efluentes. A principal fonte desta perda corresponde à fixação incompleta dos corantes à fibra durante o processo de tingimento (Dallago et al, 2005).

O sistema de classificação com aceitação internacional é o Color Index (CI), publicado pela The Society of Dyers and Colorists em conjunto com a Association of Textile Chemists and Colorists, porém, há outras formas de classificar os corantes, como por exemplo, de acordo com o método de aplicação, sua constituição molecular, tipo de excitação eletrônica quando exposto à luz, e outros. O Color Index

designa um nome genérico CI para cada corante, conforme sua estrutura química e suas características de aplicação.

Existem vários tipos de corantes sintéticos mas será comentado somente os corantes diretos, os quais são os usados nesse trabalho.

### **2.1.1. Corantes Direto**

São corantes que foram originalmente concebidos para tingir algodão. Formalmente, são definidos como “corantes aniônicos para celulose, quando aplicados a partir de um banho aquoso contendo um eletrólito”. O primeiro corante direto foi o vermelho do Congo, sintetizado em 1884.

Os corantes diretos apresentam a maneira mais simples de colorir materiais celulósicos, uma vez que são aplicados a partir de um banho neutro ou levemente alcalino, próximo ou no ponto de ebulição, no qual são aplicados cloreto ou sulfato de sódio em quantidade e intervalo de tempo apropriados.

## **2.2. Tratamento de Efluentes na Indústria Têxtil**

Algumas das principais características dos efluentes de uma indústria têxtil são a presença de cor, elevado pH e variação de vazão. Afora isso, o efluente apresenta características de biodegradabilidade, como qualquer outro efluente que possua carga orgânica.

Métodos convencionais de tratamento de efluentes têxteis consistem de processos físico-químicos e biológicos precedidos por uma etapa de pré-tratamento físico.

O pré-tratamento físico consiste na equalização do efluente e na remoção de sólidos em suspensão sedimentáveis e flutuantes que pode ser operado utilizando as operações unitárias de gradeamento e peneiramento.

O processo físico-químico é aplicado com o objetivo de clarificar o efluente, baseado na eliminação parcial das partículas orgânicas e inorgânicas contidas na água, desestabilizando os colóides por coagulação seguido da floculação e separação de fases por sedimentação ou flotação, provocada por sais de ferro e alumínio em condições específicas de pH.

O processo de tratamento biológico tem como princípio utilizar a matéria orgânica dissolvida ou em suspensão como substrato para microorganismos tais como bactérias, fungos e protozoários, que a transformam em gases, água e novos microorganismos.

### **2.2.1. Tratamentos Físicos**

Esses processos têm como objetivo a remoção de sólidos grosseiros e sólidos sedimentáveis, a seguir apresentaremos os principais.

### **2.2.2. Equalização**

Tornar o efluente mais uniforme – através de uma homogeneização – em carga, cor, pH e vazão de alimentação é fundamental para o sistema de tratamento, dessa forma, evita-se que o sistema sofra choques de carga, o que anularia o tratamento.

### **2.2.3. Gradeamento**

Com o objetivo da remoção de sólidos grosseiros capazes de causar entupimentos e aspecto desagradável nas unidades do sistema de tratamento são utilizadas grades mecânicas ou de limpeza manual. O espaçamento entre as barras varia normalmente entre 0,5 e 2 cm.

#### **2.2.4. Peneiramento**

Com o objetivo da remoção de sólidos normalmente com diâmetros superiores a 1 mm, capazes de causar entupimentos ou com considerável carga orgânica são utilizadas peneiras.

As peneiras mais utilizadas têm malhas com barras triangulares com espaçamento variando entre 0,5 a 2mm, podendo a limpeza ser mecanizada (jatos de água ou escovas) ou ser estática.

A utilização de peneiras é imprescindível em tratamentos de efluentes de indústrias têxtil.

#### **2.2.5. Tratamento Físico-Químico**

Esse processo é utilizado na etapa de clarificação do processo de tratamento do efluente têxtil, ou seja, utilizado na remoção de cor. A principal técnica é a coagulação e floculação com sais de ferro ou alumínio.

Esta técnica é baseada na desestabilização dos colóides por coagulação seguido da floculação e separação de fases por sedimentação. Geralmente, este tratamento requer um grande controle de pH.

Segundo Cooper (1995), nem todos os corantes são efetivamente removidos pelos coagulantes comumente usados, como o sulfato de alumínio hidratado, que não é satisfatório para remover a cor gerada por corantes reativos, ácidos e básicos, mas é satisfatório para tratar corantes dispersos como a cuba e sulforosos.

Os colóides são formados por partículas orgânicas e inorgânicas contidas na água, estando o diâmetro das partículas coloidais na faixa de 0,1 de 0,01 $\mu$ m.

A desestabilização de colóides é conseguida por meio de agentes coagulantes químicos, mas existem outros meios como: o calor; a agitação; processos biológicos; passagem de corrente elétrica (eletrocoagulação), ou ainda a eletrocoagulação com a adição de coagulantes químicos.

A eficiência de processos de coagulação e floculação pode ser avaliada pelo consumo de coagulante e pela turbidez apresentada no final do processo.

O uso da coagulação química no tratamento de efluentes têxteis é bem conhecido, sendo a coagulação e o processo de separação física (sedimentação, flotação ou filtração) aplicados tanto antes quanto depois do tratamento biológico (Braile e Cavalcanti, 1979).

Combinações de vários coagulantes inorgânicos têm sido usadas com o objetivo de melhorar a remoção de cor dos efluentes contendo os tipos mais comuns de corantes e bons resultados tem sido alcançados. A desvantagem é a geração de grandes quantidades de lodo, o que acarreta custos para tratamento e disposição final adequados.

A Figura 2.1 apresenta o fluxograma do tratamento físico-químico de efluentes têxteis.

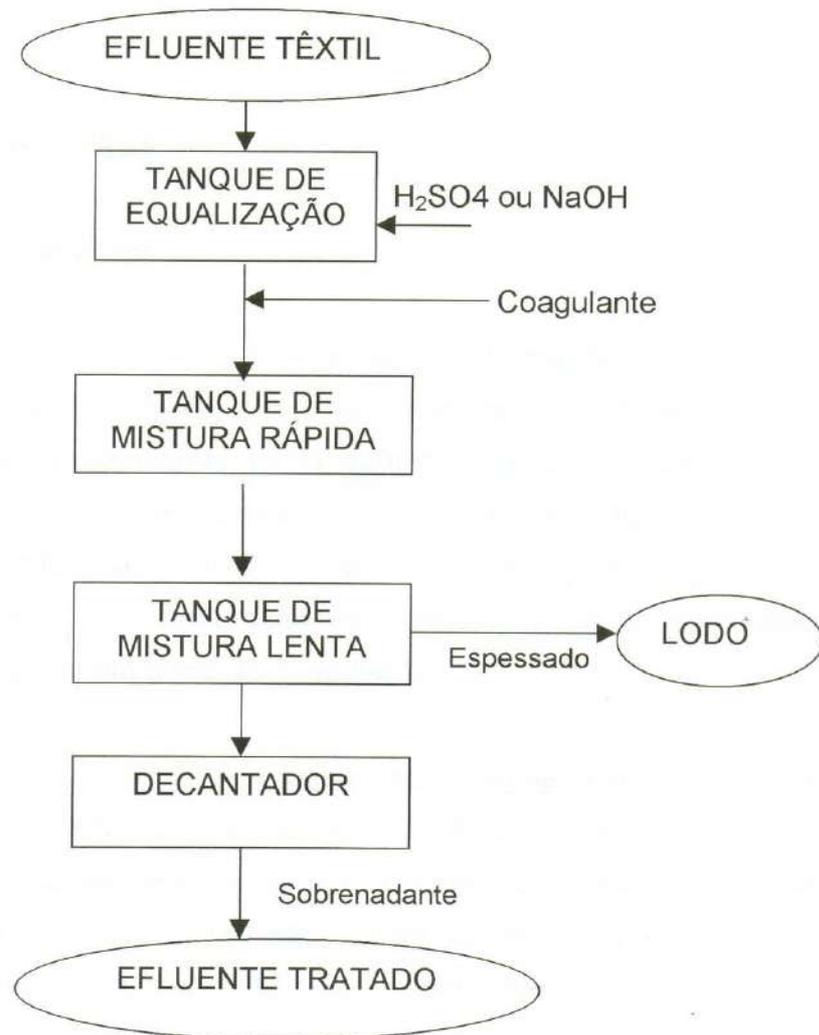


Figura 2.1 - Fluxograma do tratamento físico-químico de efluentes têxteis

### 2.2.6. Tratamento Biológico

O tratamento biológico consiste na degradação da matéria orgânica pelos microorganismos na presença de oxigênio (aeróbio) ou na ausência do mesmo (anaeróbio). O processo biológico mais usado em efluentes têxteis é o de lodos ativados por aeração prolongada.

O tratamento aeróbio, através do sistema de lodos ativados com aeração prolongada, é extremamente eficiente na remoção de matéria orgânica.

As unidades que compõem essa fase são o reator biológico ou tanque de aeração, onde ocorre a oxidação da matéria orgânica, e um decantador secundário, onde acontece a separação física do lodo do efluente final. A partir dessa unidade, é feita a recirculação de uma parte do lodo, que retorna ao reator, sendo o excesso retirado e enviado para o seu destino final.

A remoção da cor através do sistema de lodos ativados com aeração prolongada, dependendo dos corantes utilizados, pode variar de 70 a 95%.

## **Capítulo 3 - Coagulação e Floculação**

### **3.1. História da coagulação**

Em 1884 foi concedida a primeira patente de coagulação a Isaiah Smith Hyatt pelo uso do percloroeto de ferro como coagulante na Companhia de Águas de Nova Orleans onde ele indica não só o percloroeto de ferro, mas “qualquer outro agente adequado capaz de coagular as impurezas do líquido e de impedir a passagem das mesmas através da camada filtrante”. Em 1928 por Hedgepht e Olsen foi usado na coagulação de uma água altamente colorida (Press e Penna, 1964).

### **3.2. Definições**

A coagulação é uma série de reações químicas e operações mecânicas através das quais os coagulantes são aplicados. Três fenômenos ocorrem separadamente nas reações química na etapa de mistura: o primeiro claramente descrito por Miller (1925), compreende na neutralização da carga negativa das impurezas pelo íon coagulante trivalente; o segundo é o resultado da reação do coagulante com a alcalinidade presente na água, pela qual são produzidos flocos de óxido hidratado coloidal, carregados positivamente e, por sua vez, são atraídos pelas impurezas coloidais de carga negativa; o terceiro é a adsorção superficial das impurezas dos flocos resultantes dos dois primeiros fenômenos, melhorando e tornando mais rápida a sedimentação. Esta etapa envolve reações químicas, físico-químicas, iônicas e físicas.

A estabilidade destes sistemas coloidais baseia-se no fato de que estas partículas possuem cargas elétricas superficiais causando repulsão mútua entre elas. Com exceção de alguns exemplos isolados, as cargas das partículas coloidais são negativas quando suspensas em água (GRUTSCH e MALLATT, 1976).

A desestabilização dessas partículas pelo tratamento físico-químico é conseguida pela neutralização ou redução das cargas negativas, ou seja, diminuição do potencial zeta, permitindo assim a aglomeração (coagulação) das partículas e, subseqüentemente, a formação dos flocos. Em seguida, os flocos são removidos por sedimentação, flotação ou filtração (GRUTSCH e MALLATT, 1976).

Uma partícula coloidal negativamente carregada está representada na Figura 3.1, o princípio do mecanismo de coagulação é explicado através do modelo da dupla camada elétrica. A superfície da partícula coloidal carregada negativamente (co-íons) atrai os íons de carga oposta (contra-íons), formando um acúmulo de íons positivos na região da interface sólido-líquido. Este sistema carregado, constituído pela superfície do colóide e pelos contra-íons, é chamado de "dupla camada".

Se a carga negativa do colóide é grande, alguns contra-íons serão fortemente atraídos à superfície do colóide, permanecendo firmemente ligados formando a camada compacta, também denominada de camada de Stern. A camada de Stern neutraliza parcialmente a carga e a atração eletrostática do colóide. Conseqüentemente, os contra-íons remanescentes ficam mais longe da superfície do colóide formando a camada difusa.

O potencial Zeta é o potencial no plano de cisalhamento, que é superfície que separa a parte imóvel da dupla camada da camada difusa.

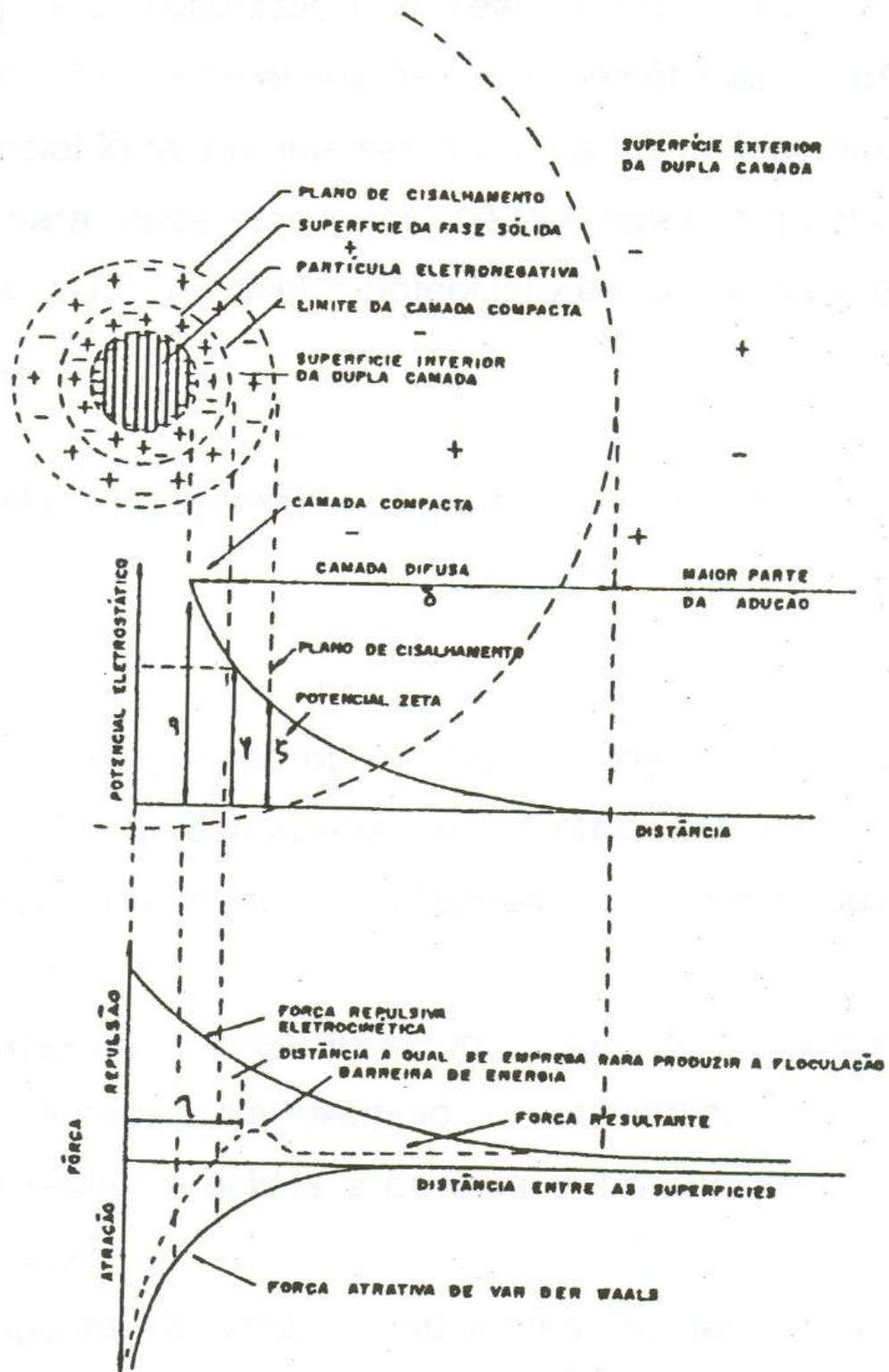


Figura 3.1 – Representação da partícula coloidal negativamente carregada (Netto et al, 1987)

Ocorre interação entre as camadas difusas, e a estabilidade do sistema é quantificada em termos energéticos. A energia total é determinada pela soma da energia atrativa de Van der Waals e pela energia potencial de repulsão, dando origem a uma força resultante (Di Bernardo 1993). Quando a força iônica é pequena, ou seja, pequenas concentrações de íons em solução, a energia resultante é de repulsão, e atinge um valor máximo, conhecido como Barreira de Energia, a uma distância, a partir da superfície coloidal, próxima àquela em que se tem o plano de cisalhamento. Por isso, o potencial Zeta pode fornecer indicações do grau de estabilidade de um sistema coloidal. Com aumento da força iônica a energia resultante pode ser reduzida a ponto de eliminar a barreira de energia, de modo que as partículas podem ser aproximadas sem que haja repulsão entre elas (Di Bernardo, 1993).

Conclui-se que o objetivo principal dos coagulantes é reduzir as forças repulsivas, para que as forças atrativas predominem e as partículas possam se agregar (coagular) (GRUTSCH, 1978).

O processo de coagulação, geralmente realizado com sais de ferro e alumínio, resulta de dois fenômenos: o primeiro, essencialmente químico, consiste nas reações do coagulante com a água e na formação de espécies hidrolisadas com carga positiva, o que depende da concentração do metal e do pH final da mistura; o segundo, fundamentalmente físico, consiste no transporte das espécies hidrolisadas para que haja contato com as impurezas da água (Di Bernardo 1993).

O processo de coagulação consiste em duas etapas, uma de mistura rápida (na unidade de mistura rápida) que consiste na dissolução do coagulante na água - que exige uma agitação violenta - e a floculação, onde se usa agitação lenta para

que as partículas formadas na mistura se aglutinem formando flocos e obterem tamanhos suficientes para ocorrer à sedimentação.

Estas partículas usualmente possuem uma carga negativa cujo sinal pode ser mudado, dependendo do pH e de outras características do ambiente.

### 3.3. Coagulantes:

A Tabela 3.1 apresenta alguns coagulantes e suas respectivas aplicações.

Tabela 3.1 - Principais coagulantes e suas respectivas aplicações (ECKENFELDER, 1989).

COAGULANTES	DOSAGEM (mg/L)	pH	APLICAÇÕES
$\text{Ca(OH)}_2$	150 a 500	9-11	Para a coagulação de colóides e remoção de fósforo. Efluente com baixa alcalinidade e alto e variável teor de fósforo.
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$	75 a 250	4,5-7,0	Para a coagulação de colóides e remoção de fósforo. Efluente com alta alcalinidade e baixo e estável teor de fósforo.
$\text{FeCl}_3, \text{FeCl}_2$	35 a 150	4,0-7,0	Para a coagulação de colóides e remoção de fósforo.
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	70 a 200	4,0-7,0	Efluente com alta alcalinidade e baixo e estável teor de fósforo.
Polímeros Catiônicos	02 a 05	Sem alteração	Para a coagulação de colóides e para auxiliar a coagulação com um metal.
Polímeros Aniônicos e alguns não iônicos	0,25 a 1	Sem alteração	Usado como auxiliar de coagulação.

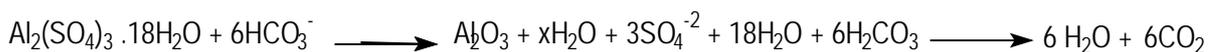
### 3.3.1. Sulfato de alumínio

A composição do sulfato de alumínio é incerta, contém excesso de alumina é indicado pela fórmula  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ . A composição do produto comercial é um sólido cristalino ligeiramente básico, contendo 17% de óxido de alumínio solúvel na água pode ser empiricamente estabelecida como:  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_{2,87} \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ .

É provavelmente a substância química mais amplamente usada para a coagulação de água, devido a excelente formação do floco, sua relativa economia – pode ser produzido a partir da bauxita nas estações - e sua facilidade de manuseio.

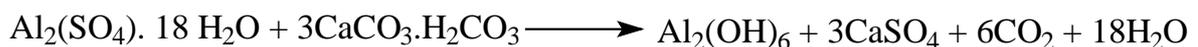
#### 3.3.1.1. Reações

Para que o sulfato de alumínio reaja, é necessário que a água dentro da qual é colocado, contenha alguma alcalinidade (fornecida na forma de íons hidroxila fornecidos pela alcalinidade natural ou adicionada.), usualmente sob forma de bicarbonato de sódio. Os reagentes ionizados e os produtos podem ser expressos como:

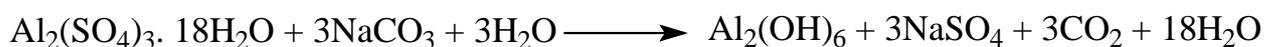


As reações também podem ser expressas hipoteticamente como:

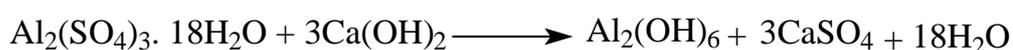
a) Sulfato de alumínio e alcalinidade natural:



b) Sulfato de alumínio e carbonato e sódio



c) Sulfato de Alumínio e cal:

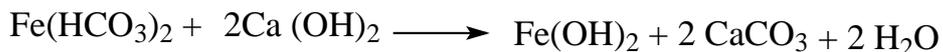
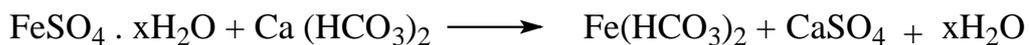


São partículas hidratadas de óxido de alumínio que aglomeram as partículas coloidais na água. Se não estiverem presentes colóides para agir como núcleos, esses devem ser adicionados como auxiliares dos coagulantes cuja função é de formar núcleos para o crescimento do floco. Os auxiliares de coagulantes incluem formas de argila, tais como bentonita e terra diatomácea.

Porém coagulação utilizando sulfato de alumínio não é tão simples assim. Trabalhando com águas intensamente coradas, Miller, em 1925, demonstrou que o poder de coagulação do íon trivalente positivo do alumínio, sobre o colóide “cor” carregado negativamente, é o mais importante fator.

### 3.3.2. Coagulação com Sais de Ferro

Afirma-se que os sais de ferro produzem um floco que é mais rápido de formar, mais denso, mais rápido para decantar, e menos facilmente quebrado que o sulfato de alumínio, especialmente a baixas temperaturas. Algumas reações com os sais de ferro, quando em contato com a alcalinidade, são:



#### 3.3.2.1. Cloreto Férrico

Quando o cloreto férrico é adicionado a água, ocorre a seguinte reação:



O hidróxido de ferro polimeriza para formar o floco hídrico de óxido de ferro, o qual é denso, mais pesado do que o floco de óxido de alumínio. É higroscópico, não existe dosagem a seco.

### 3.3.2.2. Caparosa Clorada

Caparosa clorada é uma mistura de cloreto férrico e sulfato férrico preparada adicionando-se cloro a uma solução de sulfato ferroso. Produz um floco de partículas densas, que decantam satisfatoriamente, indo para o filtro um floco compacto de óxido férrico hidratado, o qual não se dissolve em águas alcalinas e forma-se com os valores de pH acima de 3,5.

### 3.4. Fatores que influenciam a coagulação

A quantidade de coagulante a ser adicionada pode variar de 2 a mais de 100 mg.L<sup>-1</sup>. Em toda água existe um faixa de pH em que ocorre uma boa coagulação. Theriault e Clark concluíram que: “Quanto mais diluído estiver o teor total do sal e menor o sulfato de alumínio adicionado, mais estreita torna-se a zona de pH dentro da qual se dá a formação ótima do floco”. Teoricamente, 0,02 g/L de sulfato de alumínio comercial [Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>. 18H<sub>2</sub>O] necessita 7,7 mg/L de alcalinidade como CaCO<sub>3</sub>.

Como as soluções são diluídas, é necessário o uso de dispositivos capazes de encurtar a distância entre choques e o tempo de aproximação entre as moléculas, por isso a necessidade de se ter unidade de mistura rápida, que é fundamental para o controle bem como para todo o processo em si.

#### 3.4.1. Controle de laboratório

Ensaio de laboratório são necessários para estabelecer o pH ótimo e a dosagem de coagulante necessária à coagulação de um dado efluente (Eckenfelder, 1989).

Dois procedimentos podem ser realizados:

- Ensaio de coagulação/floculação (*Jar Test*) no qual o pH e a dosagem do coagulante variam a fim de se atingir as condições ótimas de operação;
- Controle do potencial Zeta, no qual são adicionadas dosagens de coagulante e mede-se o pH para cada dosagem até se obter o ponto isoelétrico da suspensão, isto é, ponto no qual o potencial Zeta se anula e as partículas se desestabilizam.

O controle é essencial a uma coagulação adequada, por duas razões: primeiro, nas estações que tratam por coagulação, a água está sujeita a maiores variações na qualidade química e física e estão mais expostas as contaminações; segundo, o melhor e mais econômico tratamento dessas águas não pode ser determinado a partir de relações conhecidas, mas devem ser verificadas a intervalos freqüentes por meio de “teste de jarros” cuidadosamente realizado para verificar a turbidez, cor, alcalinidade, valor de pH, valor de odor e dióxido de carbono livre.

A operação adequada de um tanque de coagulação pode ser determinada apenas através de experimentação no laboratório e no campo, com a água a ser tratada, sendo mais conclusivos os testes de campo. O controle químico da coagulação se torna difícil devido às soluções extremamente diluídas nas quais ocorrem reações.

No controle da coagulação as observações feitas no laboratório devem incluir:

- a) Aparência inicial dos flocos.
- b) Aparência dos flocos após 5 minutos e após 30 minutos.
- c) Aparência do licor sobrenadante.
- d) Sedimentabilidade dos flocos ao fim do tempo correspondente ao período de retenção no tanque de sedimentação.

Somente três fatores que são passíveis de controle fácil e rigoroso na coagulação: pH de solução, espécie de coagulante, quantidade de coagulante usado

(determinados pelo operador) e tempo de mistura e floculação (estabelecido pelo projetista).

Como a formação dos flocos está relacionada à concentração do íon hidrogênio, e as relações aniônicas e catiônicas, o controle do pH é importante no controle da coagulação. O pH ótimo para a coagulação da maioria das águas é em torno de 7,0.

Três pontos são importantes na coagulação com o sulfato de alumínio:

1°. Quando na água há menos que 20 mg/L de alcalinidade natural, como  $\text{CaCO}_3$ , deve ser adicionado cerca de 0,35 gramas de cal ou 0,5 gramas de carbonato de sódio para cada grama de sulfato de alumínio. As reações são mostradas no item 3.3.1.1.

2°. A presença de sódio e potássio causam partículas muito pequenas e que não coagularão e passarão pelo filtro, uma alternativa é aumentar a dose de sulfato de alumínio.

3°. A temperaturas baixas (abaixo de 4,4 °C), o floco tem uma forma fina e pode ser carregado para o filtro. O floco se forma satisfatoriamente em temperaturas moderadas, porém com o aumento de temperatura a quantidade de coagulante pode aumentar também, por isso, neste caso o controle pelo pH é mais satisfatório.

#### **3.4.2. Operação:**

Na maioria dos casos, os flocos devem ser vagarosamente transferidos do floculador para o tanque de sedimentação, para evitar a quebra dos flocos formados.

### 3.5. Flocculação

Após a coagulação, os flocos maiores se reúnem, dando origem a flocos de maior tamanho que o das partículas isoladas. O crescimento desses flocos depende de dois fatores: da colisão, que, por sua vez, é inteiramente dependente da ação física de agitação; e da adesão, que é controlada por forças químicas de Van Der Waals, ou eletrônicas.

A ação física, compreendida na fase de flocculação, é produzida por dispositivos mecânicos por meio dos quais as altas velocidades iniciais são reduzidas gradualmente a um ponto em que um floco formado na primeira fase não seja quebrado, e sim mantido em suspensão e induzido a crescer, portanto, grau de flocculação de uma suspensão depende de dois fatores antagônicos:

1º) a probabilidade de haver o choque entre as várias partículas que vão formar o floco;

2º) a probabilidade de que, depois da colisão, elas permaneçam aglomeradas.

A probabilidade dos aglomerados recém-formados não se desagregarem espontaneamente pode ser aumentada com emprego de floculantes, que são de quatro tipos:

a) Eletrólitos que neutralizam a dupla camada elétrica existente nas partículas sólidas em suspensão, eliminando desta forma as forças de repulsão que favorecem a dispersão. O poder aglomerante do eletrólito será tanto maior quanto maior for a valências dos íons;

b) Coagulantes que provocam a formação de precipitados gelatinosos capazes de aglomerar, durante a decantação, as partículas finas existente em suspensão;

c) Agentes tensoativos a materiais como amido, gelatina e cola, que decantam arrastando consigo os finos de difícil decantação; e,

d) Polieletrólitos, que são polímeros de cadeia longa com um grande número de pontos ativos nos quais as partículas sólidas se fixam.

## **Capítulo 4 – Projeto de Floculador, Decantador e Filtro**

O tratamento completo consiste nas etapas de coagulação, floculação, sedimentação e filtração rápida.

A etapa de coagulação ocorre na unidade de mistura rápida, pois é nesta etapa que o sal de alumínio é adicionado na corrente do efluente simulado a ser tratado.

A floculação ocorre devido à agitação do líquido com o coagulante químico que tem como objetivo a formação de flocos.

A sedimentação ocorre no decantador, onde os flocos formados sedimentam, em regime laminar, segundo a lei de Stokes da velocidade terminal.

Por fim, a unidade de filtração rápida tem como objetivo o polimento final pela retenção das partículas suspensas residuárias presentes na água clarificada.

### **4.1. Projeto da Unidade de Mistura Rápida**

De acordo com a NB 592, a mistura rápida é a operação destinada a dispersar produtos químicos na água a ser tratada, enquanto que, a floculação, é requerida para promover a agregação de partículas coaguladas na mistura rápida.

A eficiência da coagulação e, portanto, das fases subseqüentes do tratamento, está relacionada com a formação dos primeiros complexos de cátions metálicos hidrolisados, cuja composição depende das condições da água no momento e no ponto em que entram em contato. Essa reação de hidrólise é muito rápida e, para haver a desestabilização dos colóides, é indispensável à dispersão de algumas gramas de coagulante sobre a massa de água em um tempo muito curto, o que implica na necessidade de aplicá-lo em uma região de grande turbulência.

A agitação necessária em uma mistura rápida pode ser obtida por meio de dispositivos mecânicos, hidráulicos ou especiais.

Neste presente projeto, a unidade de mistura rápida é por meio de dispositivo hidráulico, conforme mostrado na figura abaixo.

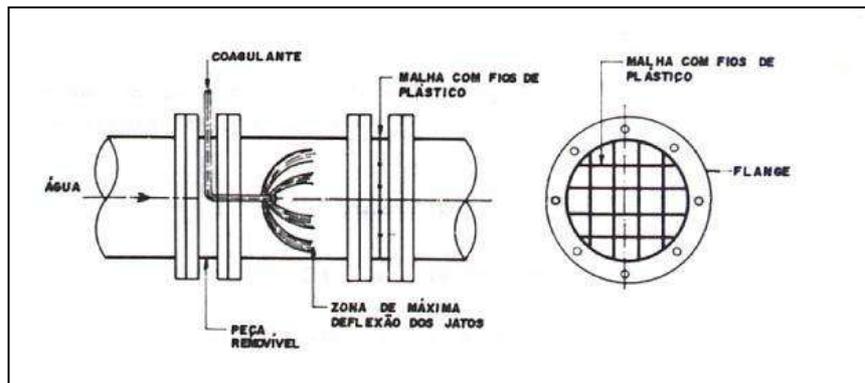


Figura 4.1 – Mistura Rápida por meio de Injetor e Malha de Fios

Segundo Di Bernardo (1993), os parâmetros usuais para projeto de unidades de mistura rápida utilizando o sulfato de alumínio como coagulante são:

Coagulante	$G_{mr} (s^{-1})$	$T_{mr} (s)$	$G_{mr} \cdot T_{mr}$
Sulfato de Alumínio	3000-7000	$\leq 5$	15000-30000

Parâmetros:

$G_{mr}$  : gradiente de velocidade médio ( $s^{-1}$ )

$T_{mr}$  : tempo médio de mistura rápida (s)

#### 4.1.1. Malhas Difusoras

As malhas difusoras promovem a dispersão da solução do coagulante no efluente em tubos, através de dutos providos de malhas formadas por fios de plástico para promover a floculação.

Segundo Richter et al (1995), a floculação por malha difusora é realizada em tempo bastante inferior que em câmaras mecanizadas ou em canais com chicanas.

As malhas são caracterizadas por diversos parâmetros:

### 1) Porosidade

A porosidade de uma malha não quadrada, é dada por:

$$\varepsilon = (1 - n_{f1} * d_{f1}) * (1 - n_{f2} * d_{f2}) \quad (4.1)$$

em que:

$n_{f1}$  : número de fios com diâmetro  $d_{f1}$ , por unidade de comprimento (1/m)

$n_{f2}$  : número de fios com diâmetro  $d_{f2}$ , por unidade de comprimento (1/m)

### 2) Perda de Carga

A perda de carga nas malhas é muito pequena e depende do número de Reynolds.

$$h_m = \frac{0,55 * (1 - \varepsilon^2)}{\varepsilon^2} * \frac{V_e^2}{2 * g} \quad (4.2)$$

em que:

$h_m$  : perda de carga (m)

$V_e$  : velocidade de escoamento à montante da malha (m/s)

$g$  : aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>)

### 3) Gradiente de Velocidade

Assumindo-se que a perda de carga devida à malha seja dissipada em um volume à jusante, compreendido entre o plano da malha e o de uma seção a uma distância de  $4 e_f$ , e que o espaçamento entre os fios seja  $e_f$ .

$$G_m = \left[ \frac{0,55 * \gamma * V_e^2}{8 * g * \mu * e_f} * \frac{(1 - \varepsilon^2)}{\varepsilon^2} \right]^{1/2} \quad (4.3)$$

$\gamma$  : peso específico da água (N/m<sup>3</sup>)

$\mu$  : viscosidade absoluta da água (N s/m<sup>2</sup>)

$V_e$  : velocidade de escoamento (m/s)

$e_f$  : espaçamento entre fios (m)

#### 4.1.2. Localização da Unidade de Mistura Rápida

Segundo Richter (1995), a unidade de mistura rápida deve ficar o mais próximo possível do(s) tanque(s) de floculação, isso, de tal forma que o canal entre as unidades de mistura rápida e floculação não seja longo, pois, isso implica na formação de gradientes baixos na floculação formando flocos fracos que serão rompidos em decorrência dos gradientes mais elevados no início do(s) tanque(s) de floculação.

Por este motivo, as normas brasileiras de projeto, especificam que a distância a ser percorrida pela água até o processo de floculação, deverá corresponder a um tempo de percurso máximo de 60 segundos.

#### 4.2. Projeto do Floculador

Segundo Richter (1991), o modelo teórico da floculação, em sua forma mais geral, combinando os efeitos de agregação e quebra de flocos, pode ser representado por:

$$\frac{dN}{dt} = \text{(função de agregação)} + \text{(função de quebra)} \quad (4.4)$$

A função de agregação, ou taxa de crescimento dos flocos, é definida por Argaman e Kaufman, 1971.

$$\frac{dN_A}{dt} = -K_A * N * G \quad (4.5)$$

Onde:

$N$  – concentração de partículas primárias ( $m^{-3}$ )

$G$  – gradiente de velocidade ( $s^{-1}$ )

$K_A$  – coeficiente de agregação.

A função de quebra pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\frac{dN_B}{dt} = K_B * N_0 * G^2 \quad (4.6)$$

Onde:

$N_0$  – concentração inicial de partículas primárias ao entrar no floculador ( $m^{-3}$ )

$K_B$  – coeficiente de quebra

Combinando (V.2 – 2) e (V.2 – 3), a equação (V.2 – 1) torna-se:

$$\frac{dN}{dt} = -K_A * N * G + K_B * N_0 * G^2 \quad (4.7)$$

Ou, integrando para ( $t = 0$ ;  $N = N_0$ ) e ( $t = T$ ;  $N = N_t$ ), vem:

$$\frac{N_0}{N_t} = \frac{1 + K_A * G * T}{1 + K_B * G^2 * T} \quad (4.8)$$

Essa equação é válida para um único reator.

Admitindo que os coeficientes  $K_A$  e  $K_B$  mantêm-se constantes em um tanque com “ $m$ ” câmaras de floculação em serie, então:

$$\frac{N_0}{N_m} = \frac{\left(1 + \frac{K_A * G * T}{m}\right)^m}{1 + \frac{K_B * G^2 * T}{m} * \sum_{i=0}^{m-1} \left(1 + \frac{K_A * G * T}{m}\right)^i} \quad (4.9)$$

Onde  $N_m$  é a concentração de partículas saindo da última câmara de floculação e  $T$  é o tempo médio total de floculação.

Bratby et al (1977) demonstrou que a relação equivalente para um ensaio de coagulação ou um reator em fluxo de pistão (“plug flow”,  $m = \infty$ ) é a seguinte:

$$\frac{N_0}{N} = \left[ \frac{K_B}{K_A} * G + \left( 1 - \frac{K_B}{K_A} * G \right) * \exp(-K_A * G * T) \right]^{-1} \quad (4.10)$$

#### 4.2.1. Significado e Aplicações de G

Smoluchowski (1917) mostrou que a taxa de floculação, em condições de fluxo laminar, é diretamente proporcional ao gradiente de velocidade num dado ponto. Camp e Stein (1943) substituíram a função pontual gradiente de velocidade,  $dv/dy$ , por um valor médio mensurável, definido como:

$$\bar{G} = \left( \frac{W}{\mu} \right)^{1/2} = \left( \frac{\varepsilon}{\nu} \right)^{1/2} \quad (4.11)$$

Onde:

$W$  – potência total dissipada dividida pelo volume da câmara de floculação = valor médio do trabalho devido à força de cisalhamento hidrodinâmico por unidade de volume e por unidade de tempo.

$\mu$  - coeficiente de viscosidade, absoluta

$\varepsilon$  - potência dissipada por unidade de massa do fluido

$\nu$  - coeficiente de viscosidade cinemática

#### 4.2.2. Floculadores Mecânicos

Os floculadores mecânicos mais utilizados são, sem dúvida, os de movimento giratório com paletas paralelas ou perpendiculares ao eixo. O eixo pode ser horizontal ou vertical (Richter et al, 1991).

O processo usual de cálculo considera o numero total de paletas, somando a que estão a mesma distância do eixo. Isso pode conduzir a erros na estimativa do

gradiente, como se verá a seguir. Têm sido usadas as equações como as que seguem (vide figuras):

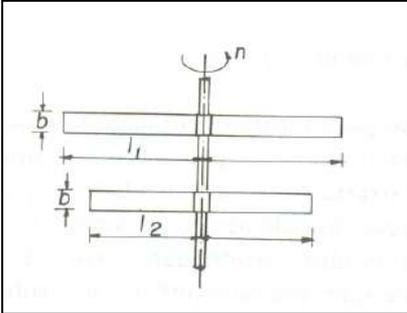


Figura 4.2 - Paletas perpendiculares ao eixo

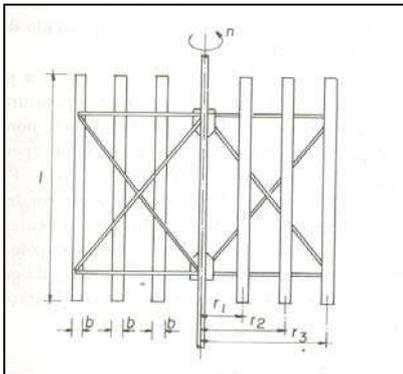


Figura 4.3 - Paletas paralelas ao eixo

$$G = 112 * \sqrt{\frac{C_D * (1-k)^3 * n^3 * b * l * (N_1 * r_1^3 + N_2 * r_2^3 + \dots)}{\mu * V}} \quad (4.12)$$

$$G = 56 * \sqrt{\frac{C_D * (1-k)^3 * n^3 * b * l * (N_1 * l_1^4 + N_2 * l_2^4 + \dots)}{\mu * V}} \quad (4.13)$$

Onde:

- $C_D$  é o coeficiente de arrasto, que depende da relação “ $l/b$ ” das paletas; para número de Reynolds maiores que 1000 e paletas planas  $C_D$  iguais a 1,16; 1,20; 1,50; 1,90 para “ $l/b$ ” iguais a 1,0; 5,0; 20 e  $\infty$ , respectivamente.
- $k$  é a relação entre a velocidade da água e das paletas;  $k = 0,25$  é o valor normalmente adotado em projetos.
- $n$  é a velocidade das paletas em rps.
- $r$ ,  $l$  e  $b$  são os elementos geométricos do agitador, numa câmara de volume  $V$ .
- $N_1, N_2, \dots$ , número de paletas na posição 1, 2...etc

Recomendações práticas para o projeto de flocculadores mecânicos são:

- Tempo de Retenção: 30 a 40 minutos.
- Número de compartimentos em série: igual ou superior a 3
- Gradiente de Velocidade: 75 a 10  $s^{-1}$  (mais comumente 65 a 25  $s^{-1}$  do primeiro ao último compartimento).
- Área das paletas: menor que 20 % da área do plano de rotação das paletas
- Velocidade na extremidade das paletas: menor que 1,20 m/s na primeira câmara (G elevado); menor que 0,60 m/s na última câmara (G baixo).

### 4.3. Projeto do Sedimentador

A sedimentação deve ser entendida como o movimento de partículas no seio de uma fase fluida, provocado pela ação da gravidade. Partículas estas consideradas esféricas (para cálculos teóricos).

As diferenças de diâmetro e a forma das partículas, peso específico das partículas, densidade do líquido, e viscosidade do meio produzem uma grande variação das velocidades de sedimentação e algumas partículas, ao cair, carregam

outras, aumentando assim o ritmo da floculação. Esse aumento do tamanho das partículas sólidas é essencial no caso de sistemas coloidais porque neste estado a decantação é impossível, uma vez que o movimento browniano e a repulsão elétrica entre as partículas anulam a ação da gravidade. Assim, a velocidade de sedimentação se altera conforme varia o tamanho e a densidade do material auxiliar.

Quando a concentração das partículas em suspensão é de mais de 1%, estas velocidades podem ser reduzidas de 10% ou mais em virtude das interferências de velocidades entre as partículas (Camp, 1946).

As velocidades reais de sedimentação podem diferir de maneira significativa das teóricas, em virtude do movimento da água nos tanques de sedimentação de vazão contínua, é necessário desenvolver uma teoria racional de clarificação baseada num tanque ideal, no qual a sedimentação de partículas discretas ocorre da mesma maneira que um tanque de águas paradas, de mesma profundidade. Assim podemos prever o efeito da turbulência e da aglomeração das partículas no processo de sedimentação.

A vazão superficial é o mais importante critério da eficiência da sedimentação, quando as velocidades horizontais no tanque são aproximadamente uniformes.

#### **4.3.1. Projeto dos Tanques de Sedimentação**

Segundo Babbitt et al (1973), o tanque de sedimentação é projetado para receber a água vindo da câmara de floculação e retê-la num tempo suficiente para permitir a sedimentação da quantidade adequada de floco permitindo a passagem para o filtro.

Entre as forças e as condições afetando a sedimentação da matéria em suspensão na água estão:

- A força da gravidade;

- O tamanho e a gravidade específica das partículas decantáveis;
- Coagulação ou coalescência das partículas decantáveis;
- A profundidade e a forma do tanque;
- A temperatura da água e a correspondente viscosidade;
- A presença de correntes de convecção e outras;
- O método de operação do tanque;

#### 4.3.2. Teoria e Prática

Segundo Babbitt et al (1973), a velocidade de sedimentação teórica de uma partícula, em regime laminar, pode ser representada pela lei de Stokes:

$$V = \frac{g * d^2 * (D_1 - D_2)}{18 * \nu} \quad (4.14)$$

Onde:

$g$  – aceleração da gravidade

$D_1$  – densidade da partícula decantável

$D_2$  – densidade da água

$d$  - diâmetro da partícula decantável

$\nu$  – coeficiente de viscosidade da água; a 25° C é igual a 8,64 milipoise

A taxa real de decantação de partículas finas nos tanques de sedimentação é afetada por tantas condições que a Lei de Stokes não é diretamente aplicável as condições de campo, podendo, porém ser útil como um índice.

Condições importantes são freqüentemente negligenciadas nos estudos teóricos dos tanques de sedimentação, são energia cinética e as correntes de densidade.

Outros parâmetros devem ser computados, como:

a) Profundidade

A profundidade dos tanques de fluxo vertical pode ir até 7,5 metros.

b) Período de Retenção

Este período é maior que o período de passagem, o qual é o tempo médio necessário para uma pequena quantidade de líquido passar através do tanque a uma dada vazão. O período de passagem tem sido definido como:

b.1) O menor tempo para uma partícula de água fluir da entrada e saída, algumas vezes, chamado de tempo de primeiro traço;

b.2) O centro de gravidade do gráfico cujas ordenadas são a densidade do traçador na saída e cujas abscissas são os tempos de aparecimento na saída;

b.3) A moda ou ordenada máxima desse gráfico. Deve ser feito um teste para determinar o período de retenção adequado.

c) Área Superficial

Recomenda-se que a carga por metro quadrado de área superficial de um tanque de decantação esteja entre 12,6 e 168 m<sup>3</sup> / m<sup>2</sup> dia para sólidos granulares; 33,6 a 84 m<sup>3</sup> / m<sup>2</sup> dia para sólidos amorfos, de decantação lenta; e 42 a 50,4 m<sup>3</sup> / m<sup>2</sup> dia para material floculento.

d) Armazenamento do Lodo

Possivelmente, 25% da capacidade do tanque é reservado para o lodo. A quantidade de lodo a ser manipulada pode ser grosseiramente aproximada pela expressão (Babbitt et al, 1973):

$$Q = \frac{S * P}{240 * P_1} \quad (4.15)$$

Onde:

Q – toneladas de lodo úmido a ser manipulado por milhão de galão de água tratada.

S – matéria em suspensão na água bruta, ppm.

P – porcentagem de sólidos em suspensão removida pela sedimentação simples.

P<sub>1</sub> – porcentagem de sólidos no lodo.

#### **4.3.3. Decantadores para Sólidos Finos**

A decantação de sólidos finos pode ser realizada sem interferência mútua das partículas (decantação livre) ou com interferência (decantação retardada). De um modo geral, é a concentração de sólidos na suspensão que determina o tipo de decantação. As leis de Stokes e Newton, bem como as correlações empíricas para a decantação retardada, aplicam-se ao cálculo da velocidade de decantação. Todavia o projeto de decantadores é feito com base em ensaios de decantação realizados em laboratório, sendo a razão disto o desconhecimento das verdadeiras características das partículas (Gomide, 1980).

Os ensaios de laboratório permitem obter a curva de decantação da suspensão, sendo conduzidos de modo diferente quando se trata de suspensão diluída ou concentrada.

Há decantadores em batelada e contínuos. O decantador de batelada mais simples é um tanque retangular ou cilíndrico com saídas laterais em alturas diferentes. O decantador contínuo mais conhecido é o cone de decantação. O ângulo de abertura do cone não deve ser maior do que 45° a 60 ° para facilitar a descarga da lama (Gomide, 1980).

#### 4.3.4. Dimensionamento de Sedimentadores

Segundo Gomide (1980), o ensaio de decantação realizado consiste em medir a altura  $Z$  da superfície de separação entre o líquido clarificado e a suspensão.

A velocidade de decantação em cada instante é  $-\frac{dZ}{d\theta}$ .

Se colocarmos uma suspensão concentrada (cerca de 50-100g de sólido por litro) num cilindro graduado e logo após a homogeneização abandonarmos a suspensão em repouso, observaremos o seguinte:

a) Quando a decantação tem início, a suspensão encontra-se a uma altura  $Z_0$  e a sua concentração é uniforme  $C_0$ .

b) Pouco tempo depois é possível distinguir cinco zonas distintas no cilindro:

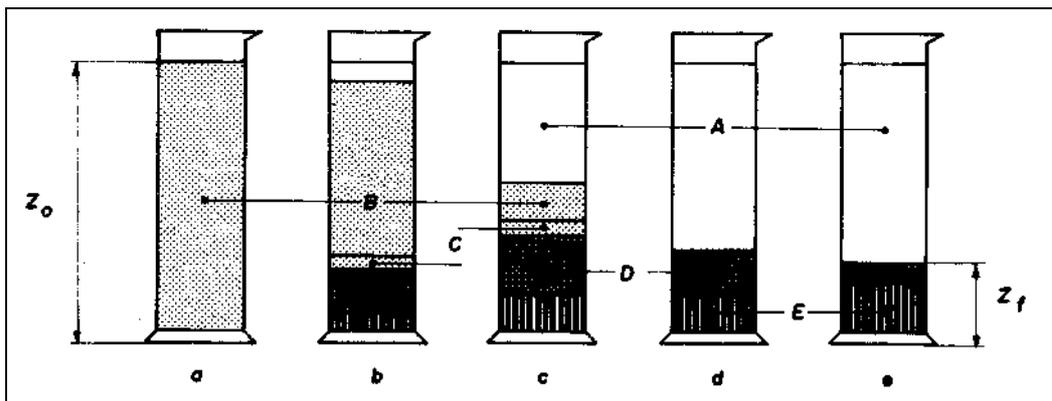


Figura 4.4 - Ensaio de decantação – Gomide (1980)

A – Líquido clarificado.

B – Suspensão com a mesma concentração inicial  $C_0$ .

C – Zona de Transição.

D – Suspensão espessada na zona de compressão.

E – Sólido grosseiro que decantou logo no início do ensaio.

c) Esta figura mostra a evolução da decantação com o tempo. As zonas A e D aumentaram de tamanho, enquanto a zona B diminuiu e C e E permaneceram inalteradas.

d) Os pontos críticos B e C desapareceram, ficando apenas o líquido clarificado, a suspensão em compressão e o sedimento grosso. Este é também chamado ponto de compressão.

e) A zona A continuou aumentando enquanto a zona D foi diminuindo lentamente até a superfícies de separação das camadas A e D atingir o valor final  $Z_f$ . Este valor mínimo não corresponde necessariamente à concentração máxima da suspensão decantada, pois é possível, com agitação apropriada, reduzir ainda mais a altura da lama espessada.

Se fizermos um gráfico dos níveis das superfícies de separação das camadas A e B e C e B em função do tempo, iremos obter o seguinte gráfico com as

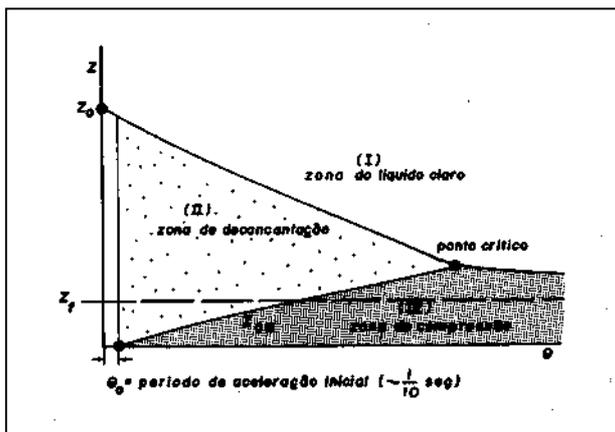


Figura 4.5 - Gráfico de zonas no ensaio de decantação – Gomide (1980)

seguintes zonas distintas:

(I) líquido claro A; (II) zona de decantação B e (III) zona de compressão.

Na zona de decantação (II) a velocidade de decantação é constante:

$$-\frac{dZ}{d\theta} = K'_1 \quad (4.16)$$

Na zona de compressão a velocidade decresce:

$$-\frac{dZ}{d\theta} = K'_2 * (Z - Z_f) \quad (4.17)$$

Onde:

Z – altura no instante  $\theta$

O dimensionamento dos sedimentadores pode ser feito por diversos métodos:

- a) Coe e Clevenger
- b) Kynch
- c) Kynch Modificado

#### 4.3.4.1. Método de Coe e Clevenger

Coe e Clevenger admitiram que:

1º) A velocidade de decantação de sólidos em cada zona é função da concentração local da suspensão:  $u = f(C)$ .

2º) As características essenciais de sólido obtido durante ensaios de decantação descontínuos não se alteram quando se passa para o equipamento de larga escala. Esta segunda hipótese nem sempre é verdadeira. O grau de floculação, por exemplo, poderá variar porque as condições em que é realizada a decantação durante o ensaio são diferentes das de operação normal.

As velocidades de decantação em suspensões de diversas concentrações são determinadas em ensaios isolados, uma para cada concentração. De posse desta relação à área S do decantador é calculada para as diversas concentrações. O valor máximo encontrado será a área necessária para permitir a decantação de todo o sólido alimentado ao decantador.

Seja  $Q_A$  a vazão em  $m^3/h$  da suspensão de concentração  $C_A$  (t de sólidos /  $m^3$  alimentada ao decantador). Sejam  $Q_C$  e  $Q_E$  respectivamente as vazões volumétricas de líquido clarificado e lama espessada (de concentrações  $C_C$  e  $C_E$ ).

Sendo a zona limite a indicada na figura 4.6, onde a vazão da suspensão é  $Q$  e a concentração é  $C$ . Para que não haja arraste de partículas sólidas na direção do vertedor de líquido clarificado e velocidade ascensional do líquido nesta secção limite do decantador deverá ser menor do que a velocidade de decantação das partículas correspondentes à concentração  $C$ . Não havendo arraste de partículas para cima, todo sólido que chega a zona limite sairá necessariamente pelo fundo do decantador quando este opera em regime permanente.

Assim sendo, a diferença entre as vazões  $Q$  e  $Q_E$  será a vazão volumétrica de líquido que sobe pelo decantador nessa secção e  $\frac{Q - Q_E}{S}$  será a velocidade ascensional do líquido na secção. Esta velocidade deverá ser menor do que a velocidade  $u$  de decantação nessa zona. A condição limite poderá ser escrita:

$$u = \frac{Q - Q_E}{S} \quad (4.18)$$

Portanto:

$$S = \frac{Q - Q_E}{u} \quad (4.19)$$

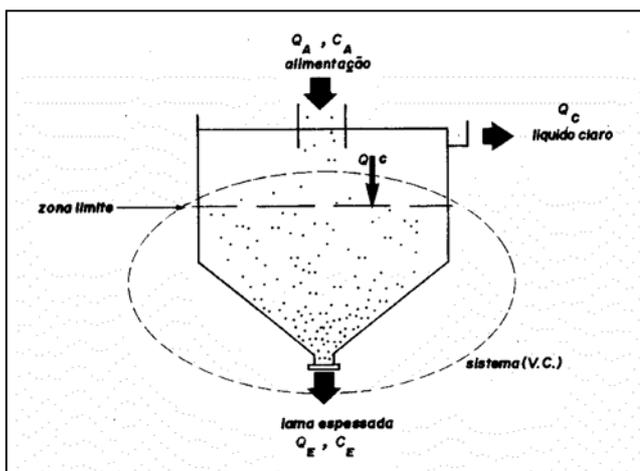


Figura 4.6 - Desenho esquemático do decantador (Método de Coe e Clevenger) – Gomide (1980).

Os balanços materiais do sólido no decantador e no sistema indicado, mantendo as hipóteses de regime permanente e de não haver arraste, podem ser escritos:

$$Q_A * C_A = Q * C = Q_E * C_E \quad (4.20)$$

Portanto:

$$Q = \frac{Q_A * C_A}{C} \quad (4.21)$$

$$Q_E = \frac{Q_A * C_A}{C_E} \quad (4.22)$$

Substituindo em (4.19) vem finalmente:

$$S = \frac{Q_A * C_A * \left( \frac{1}{C} - \frac{1}{C_E} \right)}{u} \quad (4.23)$$

Onde:

S – área de decantação  $m^2$  = seção transversal do decantador

$Q_A$  – vazão volumétrica da suspensão alimentada no decantador ( $m^3/h$ )

$C_A$  – concentração de sólidos na suspensão alimentada ( $t/m^3$ )

$C_E$  – concentração de lama espessada ( $t/m^3$ )

$C$  – concentração da suspensão na zona limite ( $t/m^3$ )

$u$  – velocidade de decantação na zona limite ( $m/h$ )

#### 4.3.4.2. Método de Kynch

Através de uma análise matemática da decantação em batelada Kynch desenvolveu um método de dimensionamento de decantadores que requer apenas um ensaio de decantação no laboratório. Suponhamos que o ensaio seja iniciado com uma suspensão de concentração uniforme  $C_0$ . Na zona de transição a

concentração varia desde  $C_0$  até um valor máximo. Se aceitarmos o fato de que numa secção do decantador onde a concentração tem um valor  $C$  a capacidade do decantador passa por um mínimo, então quando o equipamento estiver funcionando à capacidade máxima, uma zona com essa concentração começará a se formar nessa secção.

Seja  $v$  a velocidade ascensional de propagação da zona limite em relação ao decantador. Para que haja o espessamento da suspensão até o valor  $C_E$  especificado para o fundo do espessador e, ao mesmo tempo, haja regime permanente, então a face inferior da zona limite também deverá subir com a mesma velocidade  $v$ .

O balanço material pode ser escrito e permite calcular  $v$  em função de  $C$  e  $u$ :

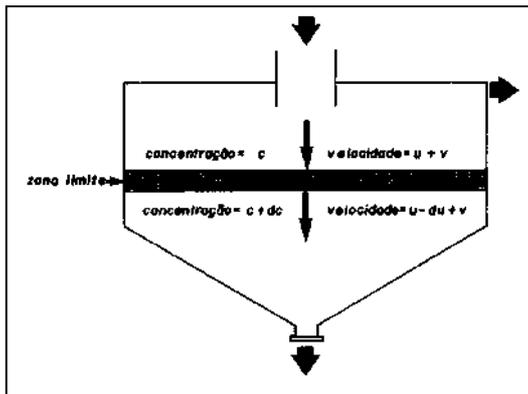


Figura 4.7 - Desenho esquemático do espessador (Método de Kynch) – Gomide (1980)

$$C * (u + v) * S = (C + dC) * (u - du + v) * S \quad (4.24)$$

$$v = C * \frac{du}{dC} - u \quad (4.25)$$

Sendo  $s$  a secção transversal do cilindro de ensaio o balanço material dos sólidos poderá ser escrito como segue:

$$Z_0 * s * C_0 = (u + v) * s * C * \theta \quad (4.26)$$

Onde  $\theta$  é o tempo necessário para a zona limite atingir a interface e  $Z_0$  a altura inicial. A distância do fundo à interface sendo  $Z_i = v \cdot \theta_i$ , pode-se tirar  $C$  da anterior:

$$C = \frac{Z_0 * C_0}{(u + v) * \theta_i} = \frac{Z_0 * C_0}{u * \theta_i + Z_i} \quad (4.27)$$

onde  $Z_i$  é altura da interface no instante  $\theta_i$ ,  $i=1,2,3,\dots$

Tanto  $C$  quanto a velocidade de decantação podem ser tirados diretamente da curva de decantação  $Z$  vs  $\theta$  obtida do ensaio realizado. Traçam-se tangentes em diversos pontos da curva e determinam-se os valores de  $\theta$ ,  $Z_0$ ,  $Z_i$ . A velocidade e a concentração são calculados como se segue:

$$u = -\frac{dZ}{d\theta} = \frac{Z_i - Z_0}{\theta} \quad (4.28)$$

$$C = \frac{Z_0 * C_0}{Z_i} \quad (4.29)$$

Em resumo, o método de Kynch consiste em realizar um ensaio que fornece a curva de decantação. Com a construção gráfica descrita calculam-se diversos pares de valores da concentração e da velocidade.

O valor máximo obtido é a área mínima que o decantador poderá ter:

$$S = \frac{Q_A * C_A * \left( \frac{1}{C} - \frac{1}{C_E} \right)}{u} \quad (4.30)$$

#### 4.3.4.2. Método de Kynch Modificado

O ensaio de sedimentação na proveta é, também a base para esse procedimento. No início do ensaio os sólidos estão uniformemente dispersos na proveta, na concentração  $C_0$ . A massa total dos sólidos na proveta é  $C_0 * A * Z_0$ , onde

A é a área da seção reta e  $Z_0$  a altura inicial da interface, que no caso, coincide com a profundidade do líquido. Seja  $\theta_c$  o tempo necessário para se atingir a concentração crítica  $C_2$ . Fisicamente, esta concentração é atingida no instante em que a velocidade de sedimentação diminui rapidamente.

Uma outra vez é plotado os dados do ensaio como na figura 5.5. Esta curva é usada para determinar  $\theta_2$  e  $C_2$  da seguinte forma:

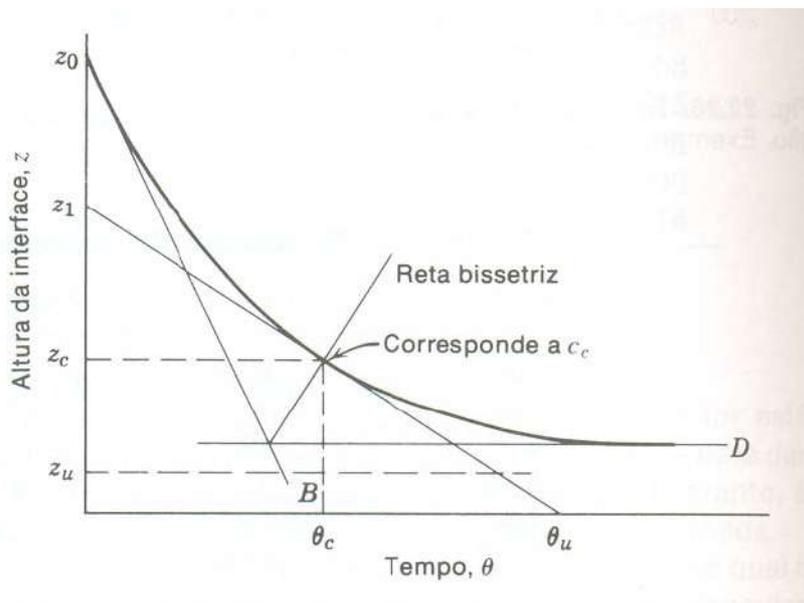


Figura 4.8 – Determinação da Concentração Crítica.

A parte inicial da curva representa a “sedimentação livre”, com velocidade quase constante. Traça-se uma tangente a esta parte da curva. No final do ensaio, quando as concentrações são elevadas e as velocidades baixas, a curva mostra que a velocidade também é quase constante. Traça-se então uma tangente a esta parte terminal da curva. As duas tangentes são prolongadas até que se interceptam num ponto. Na interseção, traça-se a bissetriz do ângulo. A interseção dessa bissetriz com a curva de sedimentação dá uma estimativa do instante  $\theta_c$  em que os sólidos entram na zona de compressão; a concentração em  $\theta_c$  é  $C_c$ .

Durante o ensaio, a massa de sólidos na proveta é constante. Um balanço de material dos sólidos dá:

$$C_0 * A * Z_0 = C_C * A * Z_C = C_u * A * Z_u \quad (4.31)$$

ou

$$C_0 * Z_0 = C_u * Z_u \quad (4.32)$$

onde o índice u identifica os valores da fase densa. Quando se imagina que o processo de espessamento vai da concentração  $C_C$  até a concentração  $C_u$ , vê-se a necessidade da remoção de uma certa quantidade de água para que seja possível esta alteração de concentração. O volume de água que é expelido é:

$$V = A * (Z_C - Z_u) \quad (4.33)$$

e o tempo necessário para descarga deste volume de água é  $(\theta_u - \theta_C)$ . Assim sendo a vazão volumétrica L, é:

$$L = \frac{V}{\theta_u - \theta_C} = \frac{A * (Z_C - Z_u)}{\theta_u - \theta_C} \quad (4.34)$$

e a resolução em  $(\theta_u - \theta_C)$  dá:

$$(\theta_u - \theta_C) = \frac{A * (Z_C - Z_u)}{L} \quad (4.35)$$

Da figura 4.8 tira-se a velocidade de sedimentação no instante  $\theta_C$  a partir do coeficiente angular da curva na abscissa  $\theta_C$ , ou seja,

$$v_c = \frac{Z_1 - Z_C}{\theta_C} \quad (4.36)$$

Nas condições de escoamento contínuo, o escoamento ascendente de líquido límpido não pode exceder a  $v_c$ , para que seja possível o espessamento.

Portanto o escoamento em  $\theta_C$  quando o espessamento principia, é

$$L = A * v_c = A * \left( \frac{(Z_1 - Z_c)}{\theta_c} \right) \quad (4.37)$$

Substituindo-se o valor de L que vem da equação (4.37) na equação (4.35)

$$\frac{Z_c - Z_u}{\theta_u - \theta_c} = \frac{Z_1 - Z_c}{\theta_c} \quad (4.38)$$

A equação (4.38) é usado para calcular  $\theta_u$  a partir da figura 4.8, mediante o seguinte procedimento: o  $Z_u$  é calculado pela equação (4.31)

$$Z_u = \frac{Z_0 * C_0}{C_u} \quad (4.39)$$

Na figura 4.8 localiza-se  $Z_u$  e  $\theta_u$  pode ser calculada pela equação (4.39), ou obtido no gráfico onde a horizontal que passa por  $Z_u$ , intercepta a tangente à curva em  $\theta_c$  no ponto de abscissa  $\theta_u$ .

O procedimento de Talmadge e Fitch, aplicado à análise da sedimentação em proveta, e que descrevemos acima, é usado para determinar a área mínima num decantador que opera continuamente. A velocidade ponderal média em que a camada de concentração  $C_u$  forma-se no decantador é  $\frac{C_u * Z_u * A}{\theta_u}$ . Porém, aplicando na equação (4.31), a velocidade ponderal média é  $\frac{C_0 * Z_0 * A}{\theta_u}$ . No caso da operação contínua, a velocidade em que se forma a camada de concentração  $C_u$  deve ser igual à velocidade com que os sólidos entram na unidade

$$L_0 * C_0 = \frac{C_0 * Z_0 * A}{\theta_u} \quad (4.40)$$

ou

$$A = \frac{L_0 * \theta_u}{Z_0} \quad (4.41)$$

#### **4.4. Projeto do Filtro Rápida por Gravidade**

A filtração é uma operação unitária que visa separar sólido-líquido, envolvendo fenômenos físicos, químicos e, às vezes biológicos. Esta operação consiste na remoção de partículas suspensas e coloidais e de microorganismos presentes na água que escoam através de um meio poroso.

Um filtro rápido consiste de um meio poroso que permite a filtração a taxas elevadas.

A filtração em leito granular ocupa uma posição de destaque na remoção de particulados nos processos de tratamento de água. Neste projeto, será tratado o caso unidirecional.

Neste projeto, o meio poroso é constituído por uma camada de areia sobre uma camada suporte constituída de pedregulhos.

A filtração em meio poroso é aquela, através da qual percola uma suspensão, cujas partículas são parcial e progressivamente retidas pelo meio.

A permeabilidade em cada ponto do leito depende da posição, profundidade e do tempo, pois as partículas da suspensão são retidas pelo leito de uma forma aleatória.

##### **4.4.1. Características dos Meios Filtrantes**

###### **4.4.1.1. Análise Granulométrica**

O diâmetro dos grãos de areia e a distribuição de tamanhos são obtidos através da análise granulométrica do material granular. Este material deve apresentar variações de diâmetros dentro de determinados padrões para uma eficiente taxa de filtração.

A determinação é feita através de uma amostra seca e representativa do material granular através de uma série de peneiras com aberturas conhecidas.

As quantidades retidas em cada peneira são relacionadas como percentagens de massas retidas. Denomina-se tamanho efetivo  $d_{10}$  ao tamanho dos grãos abaixo do qual ficam 10% da massa total granular e, tamanho efetivo  $d_{60}$ , abaixo do qual ficam 60% da massa total da amostra.

A relação destes valores define o coeficiente de uniformidade U.

$$U = d_{60} / d_{10}$$

#### **4.4.2. Meio Filtrante**

##### **4.4.2.1. Filtro de Areia com Camada Suporte**

A taxa de filtração fixada no projeto foi de  $36 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$

O filtro é de seção quadrada e possui fundo falso com orifícios espaçados adequadamente. Este fundo garante uma coleta simplificada da água filtrada.

As principais características da areia utilizada em filtros convencionais operados com taxas de filtração inferiores a  $200 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$  são:

- Coeficiente de uniformidade:  $\leq 1,6$
- Tamanho efetivo: 0,4 a 0,6 mm
- Tamanho mínimo: 0,35 mm
- Tamanho máximo: 1,2 mm
- Peneiras de preparação: 14 e 42 (Tyler)

A camada suporte é composta de pedregulho, sendo do menor diâmetro para o maior diâmetro, sendo a referência de cima para baixo.

#### 4.4.3. Cálculo do número de filtros necessários

Calcula-se a quantidade de filtros contínuos, visando o custo mínimo, utilizando a seguinte relação:

$$\frac{B}{L} = \frac{n+1}{2n} \quad (4.42)$$

Em que:

B = largura de uma câmara.

L = comprimento de uma câmara.

N = número de câmaras.

Este projeto seguiu o seguinte roteiro para o projeto de filtração:

- Seleção do tipo de filtro;
- Fixação da taxa de filtração;
- Estabelecimento do número de filtros;
- Cálculo da área do filtro;
- Escolha do tipo de fundo do filtro;
- Dimensionamento do equipamento;
- Especificação da granulometria do material filtrante;
- Especificação da camada suporte.

## Capítulo 5 – Estudo de Caso - Efluente Têxtil

Para o estudo de caso foi simulado um tratamento de efluente têxtil sintético a partir de um corante direto azul.

As premissas para o estudo de caso foram:

- Solução sintética 200 mg/L de corante direto azul “Tingecor Guarany” (nome comercial);
- Coagulante sulfato de alumínio;
- Utilização de *Jar-Test* para determinar condições ideais.

O Teste em Jarros foi realizado no Laboratório de Águas e Efluentes Industriais do DPI, usando o equipamento de Jar Test, visando encontrar as melhores condições de pH, concentração de sulfato de alumínio, tempo de sedimentação dos flocos formados e tempo de floculação.

A partir desses dados, foi realizado um experimento nas melhores condições de coagulação/floculação para o ensaio de sedimentação em proveta, visando determinar as dimensões do sedimentador.

Para determinar o comprimento de onda no qual a absorvância foi determinada, foi adotada a seguinte metodologia:

Com o branco (amostra de referência padrão) no espectrofotômetro, foi feita uma varredura entre os comprimentos de onda para verificar qual fornecia a menor absorvância, comprimento de onda no qual a transmitância é maior e, portanto será o ponto ideal para fornecer as leituras de comprimento de onda, pois é o ponto que o aparelho verifica a maior quantidade de luz que passa pela solução referência. O comprimento de onda no qual foi verificada todas as absorvâncias do presente trabalho foi de 590 nm.

## 5.1. Condições Ideais de Coagulação, Floculação e Sedimentação.

### 5.1.1. Jar Test

Os teste de jarros (*Jar Test*) foram feitos com a finalidade de obter o pH, dosagem de coagulante, tempo de sedimentação e floculação ideais.

#### 5.1.1.1. Condições Ideais de pH

As condições ideais de pH foram determinadas a partir de soluções de mesmo volume de corante sintético (200 mg/L) e concentração de sulfato de alumínio (30 mg/L). O teste foi feito variando o pH das soluções e estabeleceu-se o pH ideal, lendo a absorvância (a menor) das amostras.

Os resultados numéricos obtidos e condições de operação encontram-se no APÊNDICE 1 e a curva dos resultados da absorvância em função do pH é apresentada na Figura 5.1.

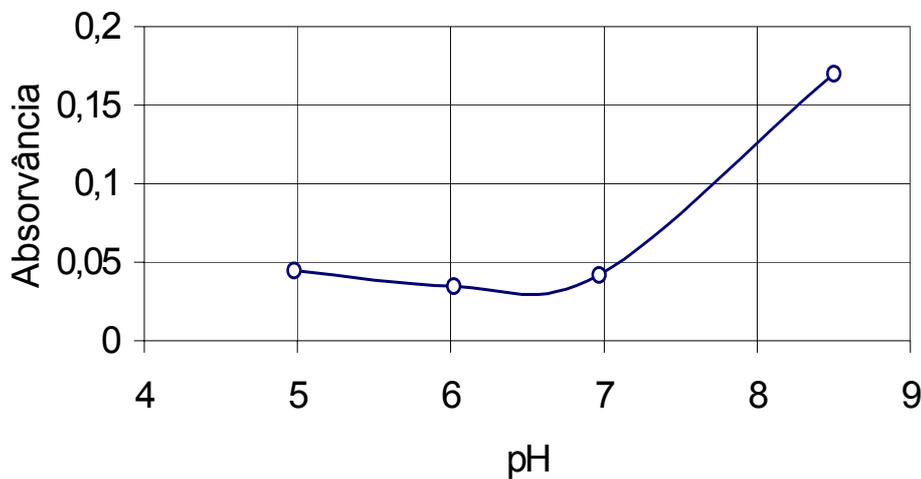


Figura 5.1 - Gráfico do pH ótimo de coagulação

Analisando a Figura 5.1, pode-se extrair que o pH favorável à coagulação fica entre 6 e 7.

### 5.1.1.2. Condições ideais de concentração de coagulante

Após estabelecer o pH ótimo da amostra, variou-se a concentração do coagulante, agora, com pH constante igual a 6,0. A concentração de corante sintético foi mantida em 200 mg/L. A determinação da concentração ideal de sulfato de alumínio foi feita a partir da menor absorvância lida. Os resultados são apresentados na forma gráfica na Figura 5.2.

Os resultados numéricos obtidos e condições de operação encontram-se no APÊNDICE 1.

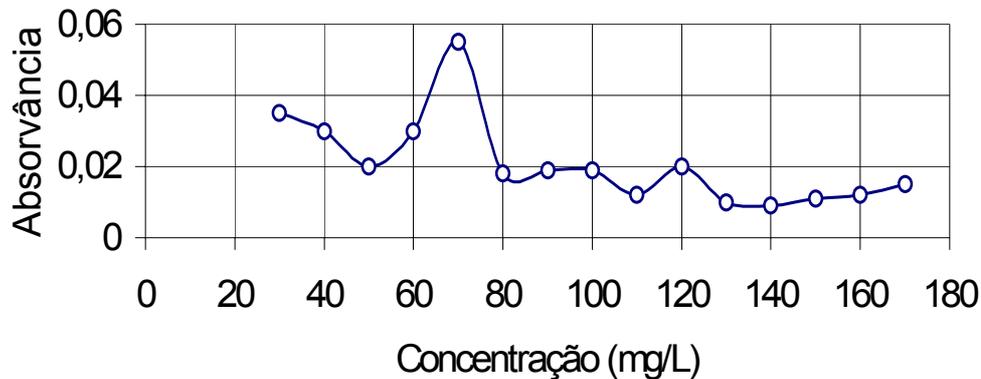


Figura 5.2 - Gráfico da determinação da concentração ótima de coagulante

De uma maneira geral, observa-se um decaimento quando a concentração de sulfato de alumínio é aumentada. A curva sugere que uma concentração de sulfato de alumínio na faixa de 100 a 170 poderia ser usada adequadamente, obtendo-se praticamente a mesma faixa de remoção de cor.

### 5.1.1.3. Tempo Ideal de sedimentação

Foi feito em um único bécher um ensaio de coagulação/sedimentação e decantação visando avaliar as condições ideais do tempo de sedimentação. Para isso, o experimento foi realizado nas condições ótimas de pH e de concentração de sulfato de alumínio, respectivamente, 6,0 e 140 mg/L. A absorvância foi lida com o

passar do tempo e o melhor tempo de sedimentação ideal foi aquele que forneceu a menor absorvância. A curva da absorção versus tempo de sedimentação é apresentada na Figura 5.3.

Os resultados numéricos obtidos e condições de operação encontram-se no APÊNDICE 1.

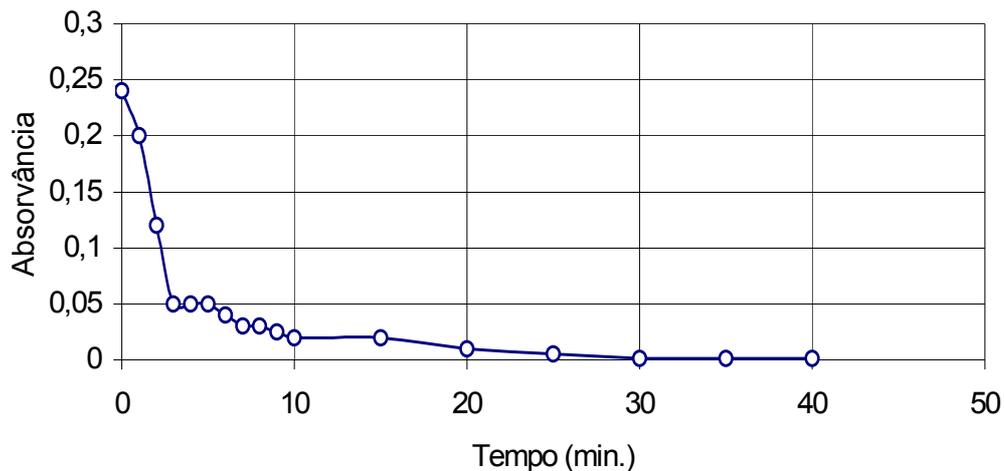


Figura 5.3 – gráfico do tempo ótimo de sedimentação

A Figura 5.3 mostra que um tempo de sedimentação entre 3 a 10 min é suficiente para a clarificação. Tempos superiores demandariam grandes volumes do equipamento.

#### 5.1.1.4. Condições Ideais do Tempo de Flocculação

Segundo Richter et al (1991), o parâmetro  $K_A$  (coeficiente de agregação) e  $K_B$  (coeficiente de desagregação) da equação (4.8). Estes parâmetros podem ser determinados a partir da curva obtida pelo *Jar-Test*.

Com as condições de pH e concentração de coagulante ótimas, o tempo de flocculação é variado. Constrói-se, então um gráfico tempo de flocculação *versus* absorvância, como mostrado na Figura 5.4. Através da tangente destacada na figura 5.4, determina-se os coeficientes acima citados com a relação:

$\frac{K_B}{K_A} = \frac{1}{G} * \frac{\log N_0}{\log N}$ , onde G é o gradiente de velocidade produzido pela pá do Jar-Test

(relação “rpm x gradiente de velocidade no anexo 2) e  $N_0$  é a concentração antes da floculação e N é a concentração indicada pela interseção da tangente com a abscissa.

Por conseguinte o tempo ideal de floculação que corresponde à menor absorvância num tempo de floculação T.

Os resultados numéricos obtidos e condições de operação encontram-se no APÊNDICE 1.

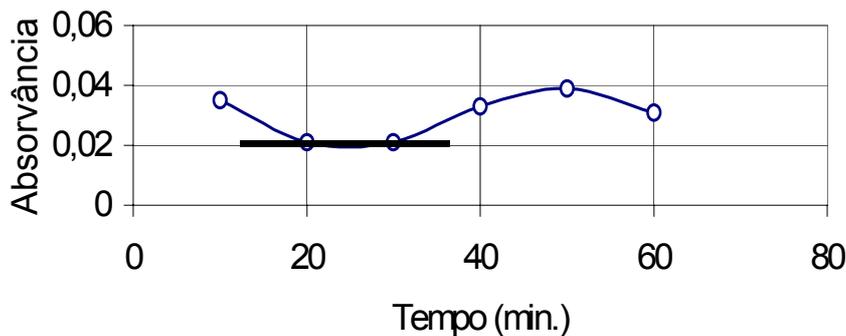


Figura 5.4 – Gráfico da determinação do tempo ótimo de floculação e dos coeficiente de agregação e desagregação.

A curva da Figura 5.4 indica que o tempo de floculação ideal fica entre 20 a 30 min.

### 5.1.2. Teste de sedimentação em Proveta

O teste da proveta é feito para calcular as dimensões do sedimentador. No laboratório, numa proveta de diâmetro grande – para minimizar os efeitos de parede –, é adicionada a solução floculada obtida nas condições ideais de pH, concentração de coagulante e tempo de floculação e deixada decantar. A interface do clarificado é acompanhada com o tempo, de onde constrói-se um gráfico altura da interface *versus* tempo de decantação.

Os resultados em forma gráfica é apresentada na Figura 5.5 e os dados referentes ao teste da proveta encontram-se no APÊNDICE 2.

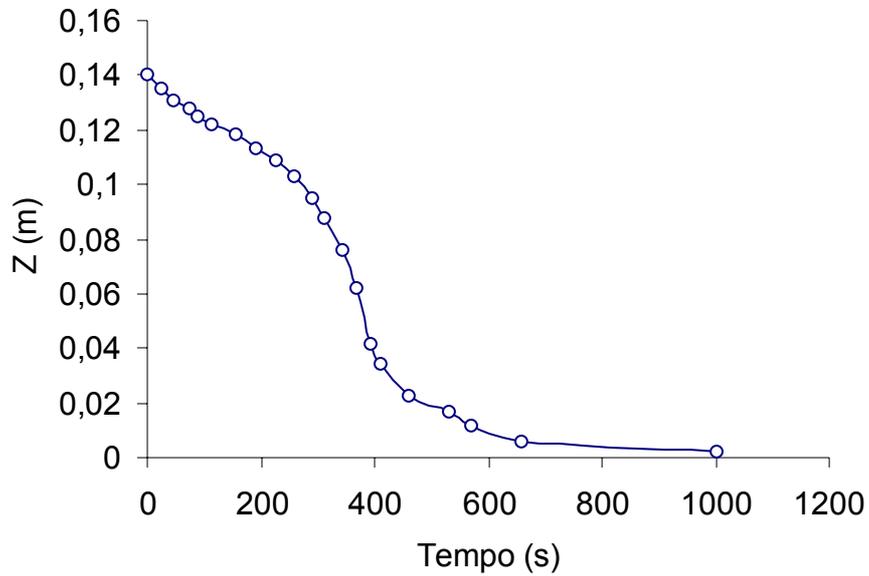


Figura 5.5 – Gráfico do teste da proveta realizado em laboratório

A partir desses resultados foram calculadas as dimensões do sedimentador usando-se o método de Kynch – Biscaia.

## Capítulo 6 – Proposta das Dimensões dos Equipamentos e Fluxograma

As premissas para o projeto da unidade piloto para tratamento primário de efluentes têxteis, empregando as técnicas físico-químicas de coagulação/ floculação/ sedimentação, seguidos de filtração em leito poroso de areia foram:

- Unidade Contínua por gravidade;
- Material de Acrílico utilizado para construção dos equipamentos;
- Vazão de projeto de 1 L/min;
- Leito poroso do filtro com camada de areia sobre camada suporte de pedregulho;
- Diâmetro da tubulação utilizada de 0,5 in;
- Sedimentador cônico;
- Floculador com agitação mecânica.

### 6.1. Unidade de Mistura Rápida

#### 6.1.1. Malha Difusora

Neste presente projeto, a unidade de mistura rápida é por meio de dispositivo hidráulico injetor e malha difusora.

As determinações dos parâmetros desejáveis para o projeto são:

##### a) Porosidade

$$\varepsilon = (1 - n_{f1} * d_{f1}) * (1 - n_{f2} * d_{f2}) \quad (6.1)$$

$$n_{f1} = n_{f2} = 7$$

$$d_{f1} = d_{f2} = 1 \text{ mm}$$

$$\varepsilon = 0,986049$$

##### b) Perda de Carga

A perda de carga será em função da velocidade de escoamento aplicada.

$$h_m = \frac{0,55 * (1 - \varepsilon^2)}{\varepsilon^2} * \frac{V_e^2}{2 * g} \quad (6.2)$$

$$\varepsilon = 0,986049$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

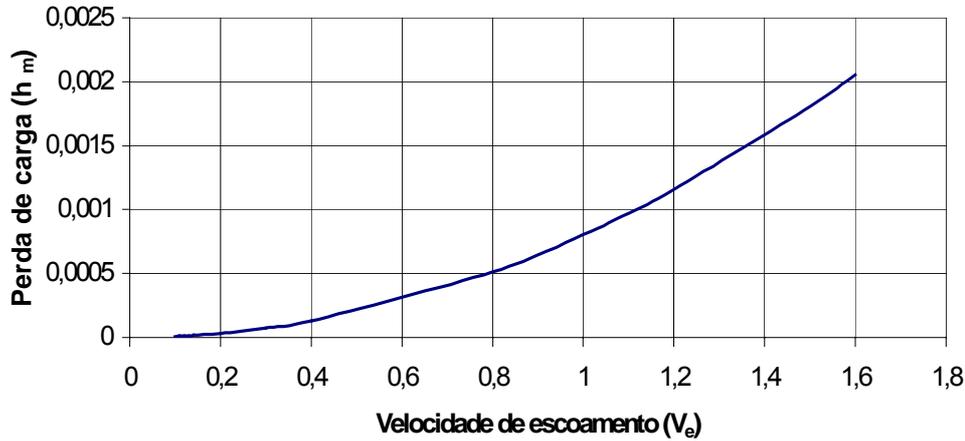


Figura 6.1 – Gráfico da perda de carga em função da velocidade de escoamento

### c) Gradiente de Velocidade

O gradiente de velocidade será em função da velocidade de escoamento aplicada.

$$G_m = \left[ \frac{0,55 * \gamma * V_e^2}{8 * g * \mu * e_f} * \frac{(1 - \varepsilon^2)}{\varepsilon^2} \right]^{1/2} \quad (6.3)$$

$$\gamma = 9,8 \text{ N/m}^3$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$\mu = 0,001 \text{ N s/m}^2$$

$$\varepsilon = 0,986$$

$$e_f = 0,00063 \text{ m}$$

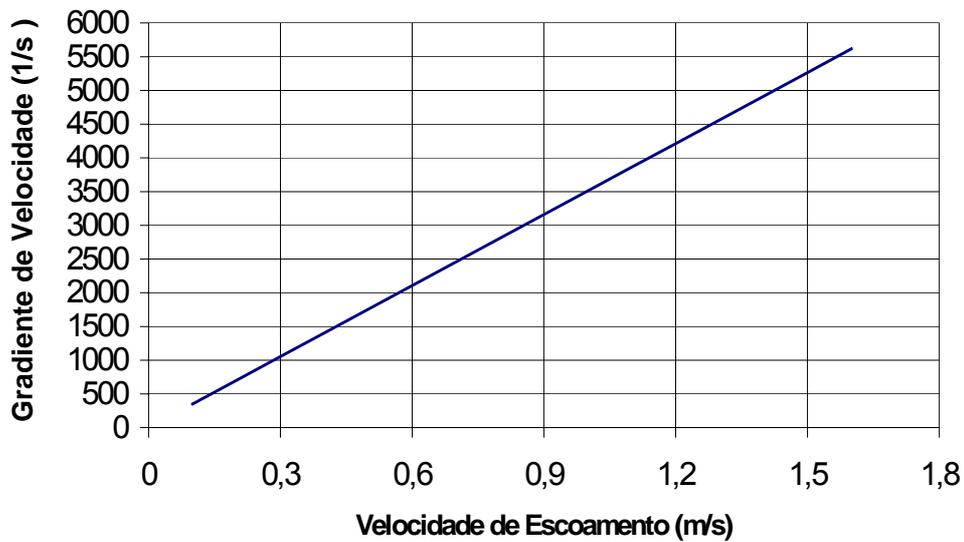


Figura 6.2 – Gráfico do gradiente de velocidade em função da velocidade de escoamento

## 6.2. Floculador

Como os resultados de Jar-Test apontaram um tempo ideal de 20 minutos para a floculação, esse tempo foi adotado como tempo de residência no floculador, portanto, como a vazão de projeto foi de 1L / min, o floculador terá um volume útil de 20 litros. Os resultados do *Jar-Test* se encontram no APÊNDICE 1.

O melhor gradiente de velocidade para o floculador é dado pela equação (4.8) foi de  $6 \text{ s}^{-1}$ , com valores de  $K_A$  igual a  $5,8 * 10^{-2}$  e  $\frac{K_B}{K_A}$  igual a  $1,72 * 10^{-2}$ , como podemos ver na figura a seguir:

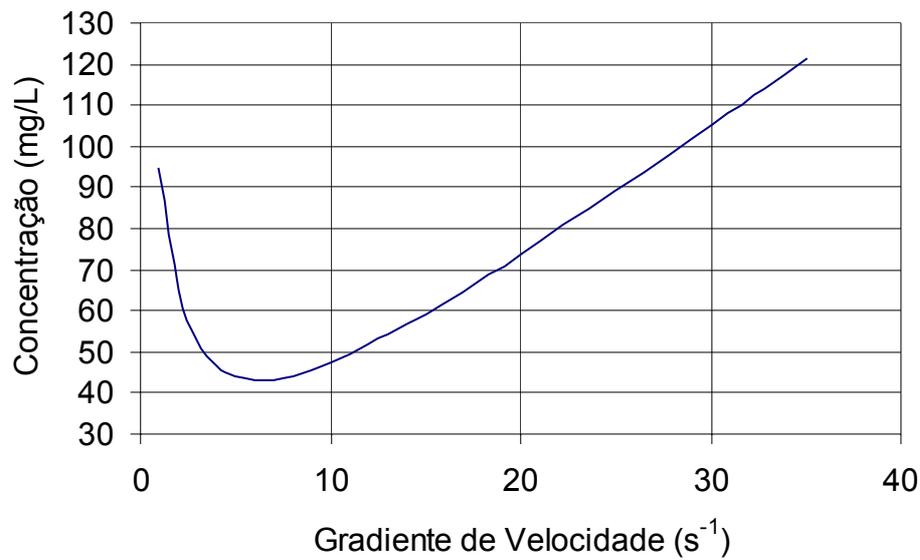


Figura 6.3 – Gráfico que mostra o melhor gradiente de velocidade para o flocculador.

### 6.3. Sedimentador

A figura 6.4 mostra o desenho esquemático de um sedimentador industrial contínuo onde estão destacadas as principais dimensões e correntes envolvidas.

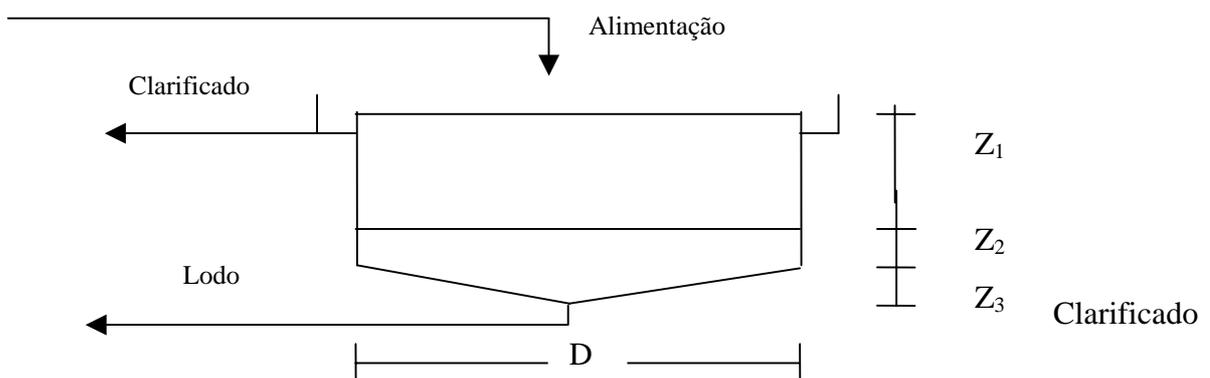


Figura 6.4 - Desenho esquemático das dimensões e principais correntes do sedimentador

#### 6.3.1 Determinação das Dimensões do Sedimentador Contínuo

Dados:

pH da amostra : 6,0

Temperatura do teste de proveta : 25°C

Vazão de alimentação (  $G_A$  ) : 0,0000166 m<sup>3</sup>/s

Concentração da alimentação (  $C_A$  ) : 200 g/m<sup>3</sup>

Concentração da lama (  $C_R$  ) : 1714 g/m<sup>3</sup>

Densidade da água (  $\rho_a$  ) : 1,0\*10<sup>6</sup>g/m<sup>3</sup>

Densidade dos sólidos (  $\rho_s$  ) : 1,34\*10<sup>6</sup>g/m<sup>3</sup>

Altura inicial da suspensão (  $Z_0$  ) : 0,14 m

### 6.3.2. Cálculo de S, D e Z<sub>3</sub> do sedimentador.

Determinação de  $Z_{\min}$  e  $T_{\min}$

$Z_{\min}$  = Altura da camada de lama ao final da decantação.

$T_{\min}$  = Tempo mínimo para possibilitar a sedimentação de todas as partículas em suspensão.

$$Z_{\min} = (C_A * Z_0) / C_R = 0,016 \text{ m}$$

Pela curva do teste de proveta, Figura 6.5, determinou-se  $T_{\min} = 570 \text{ s}$ .

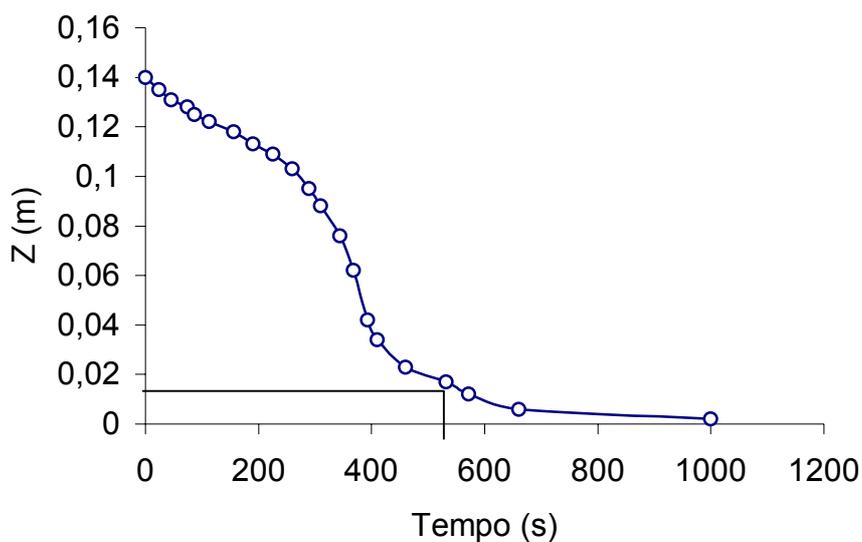


Figura 6.5 - Cálculo de  $T_{\min}$

Pela Equação 6.4, calcula-se a área S:

$$\frac{G_A}{S} = \frac{Z_0}{T_{\min}} \quad (6.4)$$

$$S = 0,0675 \text{ m}^2$$

$$Z_3 = 7,3 \cdot 10^{-2} \cdot D \longrightarrow Z_3 = 0,021 \text{ m} \quad D = 0,29 \text{ m}$$

Convencionou usar no projeto  $Z_3$  igual a 18 cm para atender Gomide (1980), que especifica o ângulo de abertura do cone do sedimentador contínuo entre 45° e 60° para facilitar a descarga da lama.

Outra justificativa é o fato do sedimentador em questão não apresentar equipamento para raspagem de sólido.

### 6.3.3. Cálculo de $Z_2$

$V_2$  : volume da zona 2

$V_L$  : volume de líquido

$V_S$  : volume de sólido

$$V_2 = V_S + V_L$$

### 6.3.4. Cálculo de $V_S$

$T_{AS}$  : Tempo de residência do sólido na zona 2

$T_R$  : Tempo em que todas as partículas terão sedimentado.

$T_C$  : Tempo em que a velocidade diminui rapidamente, e se atinge a concentração crítica.

$$V_S = (G_A \cdot C_A \cdot T_{AS}) / \rho_s \quad (6.5)$$

$$T_{AS} = T_R - T_C$$

$$Z_R = (C_A \cdot Z_0) / C_R = 0,129 \text{ m} \quad (6.6)$$

A partir da Figura 6.6,  $T_R = 800 \text{ s}$  e  $T_C = 590 \text{ s}$

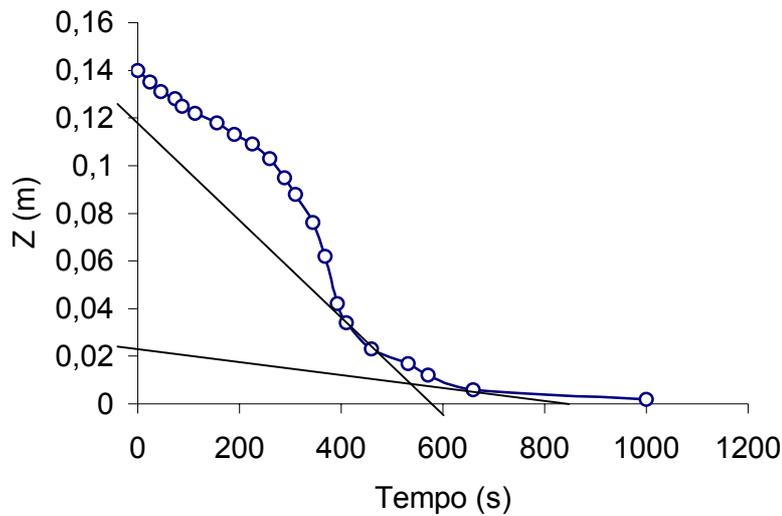


Figura 6.6 - Cálculo de  $T_C$  e  $T_R$

$$T_{AS} = 210 \text{ s}$$

$$V_S = 5,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$$

### 6.3.5. Cálculo de $V_L$

Sejam:

$$V_L = (G_A \cdot C_A \cdot T_{RL}) / \rho_a \quad (6.7)$$

$T_{RL}$  = Tempo de residência do líquido na zona 2.

$$T_{RL} = \rho_a \cdot \left[ \int (1/C_L) dT - (T_R - T_C) / \rho_s \right] \quad (6.8)$$

$$C_L = (C_A \cdot Z_0) / Z_i \quad (6.9)$$

Para resolver a integral e achar  $T_{RL}$  será utilizado o método da quadratura gaussiana com 6 pontos.

Mudança de variáveis

$$T_i = (T_C + T_R) / 2 + ((T_C - T_R) / 2) \cdot N \quad (6.10)$$

Onde:

$N$  = N° de pontos da quadratura

Calculou-se  $T_i$  a partir da curva do teste de proveta, Figura 5.5, e determinou-se o  $Z_i$  correspondente para cada ponto da quadratura. A partir da equação (6.11) montou-se a tabela 6.1, que se refere aos dados do método numérico utilizado.

$$F = Z_i / (C_A * Z_0) \quad (6.11)$$

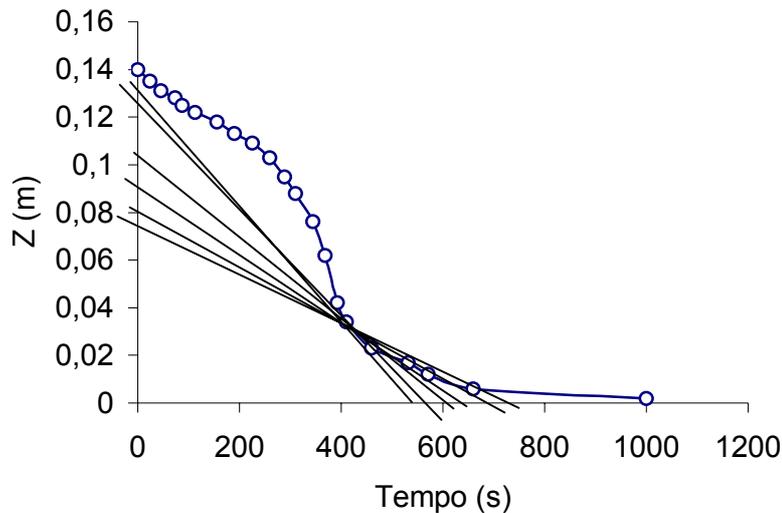


Figura 6.7 - Cálculo de  $Z_i$

Tabela 6.1 - Dados referentes ao cálculo da Quadratura Gaussiana

I	N	$T_i$	$Z_i$	$F(Z_i)$	$W_i$	$F(Z_i) * W_i$
1	-0.9324695	550	0,135	0,004821429	0.1713	8,26E-04
2	-0.6612093	575	0,13	0,004642857	0.3607	1,67E-03
3	-0.2386191	600	0,102	0,003642857	0.4679	1,70E-03
4	0.2386191	650	0,096	0,003428571	0.4679	1,60E-03
5	0.6612093	700	0,08	0,002857143	0.3607	1,03E-03
6	0.9324695	750	0,075	0,002678571	0.1713	4,59E-04

$$\sum F(Z_i) * W_i = \quad \mathbf{0,00728}$$

$$I_a = \int (1/C_L) dT$$

$$B = T_R$$

$$A = T_C$$

$$I_a = (B-A)/2 \cdot \sum F(Z_i) \cdot W_i$$

$$I_a = 105 \cdot 0,00728 = 0,7644$$

$$T_{RL} = 1,0 \cdot 10^6 \cdot [0,7644 - 210/1,34 \cdot 10^6]$$

$$T_{RL} = 764243,28$$

$$V_L = (G_A \cdot C_A \cdot T_{RL}) / \rho_a$$

$$V_L = 2,53 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$V_2 = V_s + V_L$$

$$V_2 = 0,0025 \text{ m}^3$$

$$Z_2 = V_2/S \longrightarrow Z_2 = 0,037 \text{ m}$$

#### 6.3.6. Determinação de $Z_1$

$$0,1 < Z_1 < 0,25$$

Devido à sedimentação ser do tipo flocculenta, será considerado  $Z_1 = 0,21$ , com o objetivo de minimizar erros (sub-estimar) no cálculo de  $Z_2$ .

#### 6.3.7. Dimensões finais

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 = 0,21 + 0,04 + 0,18 = 0,43 \text{ m}$$

$$D = 0,30 \text{ m}$$

#### 6.4. Filtro Rápido por Gravidade

Com a taxa de filtração e o número de filtros estabelecidos em  $36 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \text{ dia}$  e 1 (hum) filtro respectivamente. A equação 4.2 mostra a necessidade de uma área de seção reta de  $0,04 \text{ m}^2$ . Portanto, o filtro será uma caixa de base quadrada com as dimensões de  $0,2 \text{ m} \times 0,2 \text{ m} \times 0,3 \text{ m}$ .

A camada suporte do filtro é constituída por pedregulhos de diâmetro em torno de  $4,0 \text{ mm}$  e de areia, cujo diâmetro varia de  $354 \text{ micra}$  e  $1 \text{ mm}$ . A análise granulométrica da amostra consta no Anexo 1.

Uma amostra de areia, obtida em casa de material de construção civil, foi usada para o preenchimento do leito de areia do filtro. Preliminarmente, uma amostra de areia de 529,94 g. foi submetida à análise granulométrica visando a determinação do seu coeficiente de uniformidade. Segundo Richter (1991) o coeficiente de uniformidade deve ser menor ou igual a 1,6. A análise granulométrica foi feita usando-se 7 peneiras da faixa de 9 a 60 MESH, como sugere Richter (1991). Foram utilizadas peneiras de 9, 12, 16, 24, 35, 42 e 60 Mesh mais o fundo, para o ensaio. O coeficiente de uniformidade é obtido dividindo-se o diâmetro de 60% passante pelo diâmetro de 10% passante e para o presente trabalho foi de 1,2.

### 6.5. Fluxograma proposto

Com base nos cálculos feitos anteriormente, o seguinte fluxograma foi proposto:

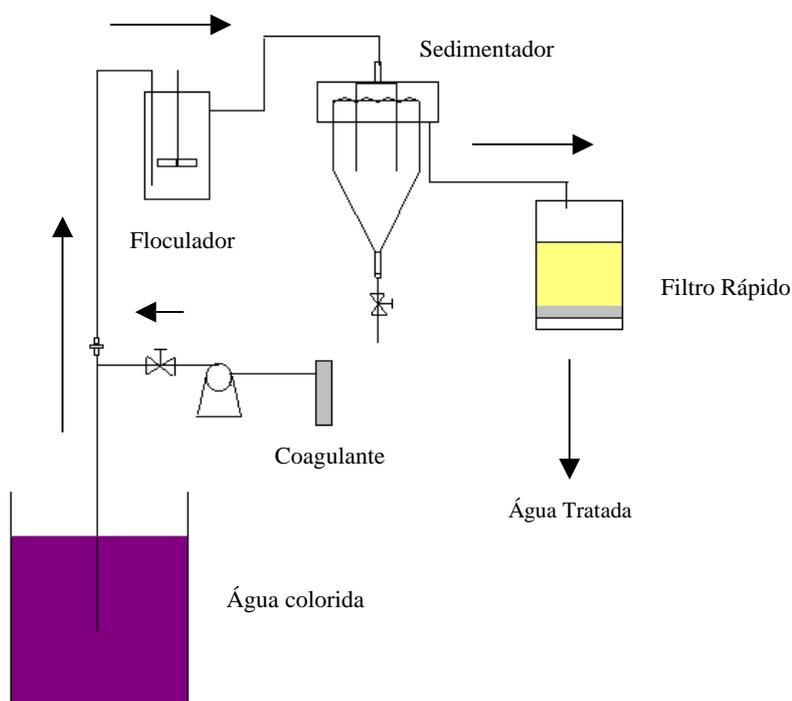


Figura 6.8 – Fluxograma conclusivo da unidade de tratamento piloto.

As dimensões dos equipamentos encontram-se no APÊNDICE 3

## Capítulo 7 – Conclusões

Com o conhecimento adquirido ao longo do curso de Engenharia Química da Escola de Química da UFRJ nos permitiu viabilizar o projeto da unidade piloto de tratamento físico-químico de um efluente.

A partir dos ensaios de Jar-Test realizados com efluente sintético do corante direto azul (na concentração de 200 mg/L) foram determinadas as melhores condições de pH, dosagem de sulfato de alumínio, tempo de floculação e tempo de sedimentação, como será apresentado a seguir:

- pH = 6,0
- Dosagem do sulfato de alumínio = 140 mg/L
- Tempo de floculação = 20 a 30 minutos
- Tempo de sedimentação = 3 a 10 minutos

Estes resultados permitiram determinar as dimensões do floculador, sedimentador e filtro de areia, como podemos ver a seguir (para maiores detalhes, consultar o APÊNDICE 3):

- Floculador

Comprimento: 25 cm

Largura: 25 cm

Altura: 45 cm

- Sedimentador

Diâmetro: 30 cm

Altura: 43 cm

- Filtro

Comprimento: 20 cm

Largura 20 cm

Altura: 30 cm

Um ensaio foi feito em escala micro-piloto no floculador projetado, e no mesmo foi feito todas as etapas (mistura rápida, floculação de 20 minutos e sedimentação de 5 minutos), nestas condições, subtraindo a absorvância inicial (0,36) da absorvância final (0,08), dividindo o valor encontrado pela absorvância inicial (0,36), e multiplicando por 100, obteve-se uma remoção de cor de 77,8 % mostrando que a unidade piloto projetada neste trabalho atende amplamente o tratamento de um efluente têxtil.

O projeto e a construção dessa unidade foi extremamente importante porque vai contribuir com a capacitação de outros alunos, podendo ser usada em tratamento de água e outros efluentes visando levantar parâmetros de processos em escala piloto.

## Bibliografia

- 1) ARAÚJO, M.D., CASTRO, E.M.M. "Tecnologia da Ultimação". In: Manual de Engenharia Têxtil, v. 2, Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 1987.
- 2) BABBITT, H.E.; DOLAND, J.J.; CLEASBY J.E.; Abastecimento de água; tradução de Zadir Castelo Branco. São Paulo, Edgard Blucher, 1973.
- 3) BRAILE, P.M. e CAVALCANTI, J.W.A. Manual de Tratamento de Águas Residuárias Industriais, pp. 319-337, SP, CETESB, 1979.
- 4) BRITO, H.G., "Estudo da Ozonização de Corantes Azo Utilizados na Indústria Têxtil", Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.
- 5) CAMP, T.R. "Sedimentation and design of Settling Tanks". Trans. ASCE, 3:895 (1946)
- 6) COOPER, P., Colour in Dyehouse Effluent, England, Society of Dyers and Colourists, 1995.
- 7) DALLAGO, R.M.; SMANIOTTO, A.; DE OLIVEIRA, L.C.A.; "Resíduos Sólidos de Curtumes como Adsorventes para a Remoção de Corantes em Meio Aquoso"; Química Nova, Vol. 28, No 3, 433-437, 2005
- 8) DI BERNARDO, L.; "Métodos Técnicas de Tratamento de Água"; v.1 Rio de Janeiro; ABES, S1993..
- 9) ECKENFELDER, W.W. Industrial Water Pollution Control, 2 ed., New York, McGraw-Hill, 1989
- 10) FOUST, A.S.; WENZEL, L.A.; CLUMP, C.W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L.B.; Princípios das Operações Unitárias, Ed. Livros Técnicos e Científicos – 2ª ed., 1982
- 11) GIORDANO, G.; "Tratamento e Controle de Efluentes Industriais". UERJ, RJ, 2001.  
  
GOMIDE, Reinaldo; Operações Unitárias – São Paulo, 1980
- 12) Grutsch, J.F., MALLATT, R.C. "Optimize the Effluente System - Part 3: Electrochemistry of Destabilization", Hydrocarbon Processing, pp 221-230, May 1976.
- 13) Grutsch, J.F "Wastewater Treatment: The Electrical Connection", Environ. Sci Tech., v.12, n. 9, pp. 1022-1027, Sep 1978
- 14) HASSEMER, M.E.N.; SENZ, M.L. "Tratamento do Efluente de uma Industria Têxtil. Processo Físico-Químico com Ozônio e Coagulação/Floculação". Artigo Técnico, Engenharia Sanitária e Ambiental; Vol. 7 - Nº 1 - jan/mar 2002 e Nº 2 - abr/jun 2002

- 15) LIN, S.H., PENG, C.F. "Treatment of Textile Wastewater by Electrochemical Method", Water Research, v. 28, n.2, pp. 277-282, 1994.
- 16) NETTO, J.M.A., PARLATORE, A.C., ROSSINI, A.C. "Técnicas de abastecimento e Tratamento de água" v. 2, SP, CETESB/ASCETESB, 1987.
- 17) PRESS L.; PENNA L.; Água: Tratamento e Qualidade ; 2ª ed.; Ao livro técnico , 1964 pag. 130- 162
- 18) RICHTER, C.A.; NETTO, J.M.A.; Tratamento de Água – Tecnologia atualizada. Ed. Edgard Blucher, 1991
- 19) RICHTER, C.A.; NETTO, J.M.A.; Tratamento de Água – Tecnologia atualizada. Ed. Edgard Blucher, 1995
- 20) SILVA, H.S. "Princípios de Tratamento de Efluentes Líquidos", Química Têxtil, n. 39, Jun. 1995.
- 21) VIANNA, M. R.; "Casas de Química para Estações de Tratamento de Água"; Belo Horizonte : Imprimatur Artes, 2001..
- 22) [www.eng.ufsc.br/probio/disc\\_eng\\_bioq/trabalhos\\_pos2004/têxtil/biotecnologia-industrialtextil.htm](http://www.eng.ufsc.br/probio/disc_eng_bioq/trabalhos_pos2004/têxtil/biotecnologia-industrialtextil.htm) - visitado em Outubro de 2005
- 23) [www.cprh.pe.gov.br](http://www.cprh.pe.gov.br), Roteiro Complementar de Licenciamento e Fiscalização para a tipologia Têxtil, Projeto Controle Ambiental, Governo de Pernambuco, Recife, 2001.
- 24) <http://www.alfakit.com.br/produtos/arquivos/Jartest2.pdf> (acessado em 02/02/2006)

## APÊNDICE 1

### DADOS DOS ENSAIOS DE COAGULAÇÃO QUÍMICA (JAR-TEST)

#### 1. Dados Numéricos de determinação de pH ótimo

Amostra	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (mg/L)	pH	Absorvância
JT 1	30	4,98	0,045
JT 2	30	6,02	0,035
JT 3	30	6,97	0,042
JT 4	30	8,5	0,17

#### 1.1. Dados das Condições de Operação

Volume de amostra: 400 mL

Mistura Rápida: 100 rpm durante 1 min

Floculação: 30 min a 21 rpm

Tempo de sedimentação: 15 min

#### 2. Dados numéricos da determinação da dosagem ótima de Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>

Amostra	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (mg/L)	pH	Absorvância
JT 5	30	6,0	0,035
JT 6	40	6,0	0,03
JT 7	50	6,0	0,02
JT 8	60	6,0	0,03
JT 9	70	6,0	0,055
JT 10	80	6,0	0,018
JT 11	90	6,0	0,019
JT 12	100	6,0	0,019
JT 13	110	6,0	0,012
JT 14	120	6,0	0,02
JT 15	130	6,0	0,01
JT 16	140	6,0	0,09
JT 17	150	6,0	0,011
JT 18	160	6,0	0,012
JT 19	170	6,0	0,015

## 2.1. Dados das Condições de Operação

Volume de amostra: 400 mL

Mistura Rápida: 100 rpm durante 1 min

Floculação: 30 min a 21 rpm

Tempo de sedimentação: 15 min

## 3. Dados numéricos da determinação do tempo Ideal de sedimentação

Amostra	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (mg/L)	pH	Tempo (min)	Absorvância
JT 20	140	6,0	0	0,24
JT 21	140	6,0	1	0,2
JT 22	140	6,0	2	0,12
JT 23	140	6,0	3	0,05
JT 24	140	6,0	4	0,05
JT 25	140	6,0	5	0,05
JT 26	140	6,0	6	0,04
JT 27	140	6,0	7	0,03
JT 28	140	6,0	8	0,03
JT 29	140	6,0	9	0,025
JT 30	140	6,0	10	0,02
JT 31	140	6,0	15	0,02
JT 32	140	6,0	20	0,01
JT 33	140	6,0	25	0,005
JT 34	140	6,0	30	0,001
JT 35	140	6,0	35	0,001
JT 36	140	6,0	40	0,001

## 3.1. Dados das Condições de Operação

Volume de amostra: 400 mL

Mistura Rápida: 100 rpm durante 1 min

Floculação: 30 min a 21 rpm

#### 4. Dados numéricos das condições ideais do tempo de floculação

Amostra	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (mg/L)	pH	Tempo (min)	Absorvância
JT 37	140	6,0	10	0,035
JT 38	140	6,0	20	0,021
JT 39	140	6,0	30	0,021
JT 40	140	6,0	40	0,033
JT 41	140	6,0	50	0,039
JT 42	140	6,0	60	0,031

##### 4.1. Dados das Condições de Operação

Volume de amostra: 400 mL

Mistura Rápida: 100 rpm durante 1 min

Floculação: 21 rpm

Tempo de Decantação estabelecido: 10 min

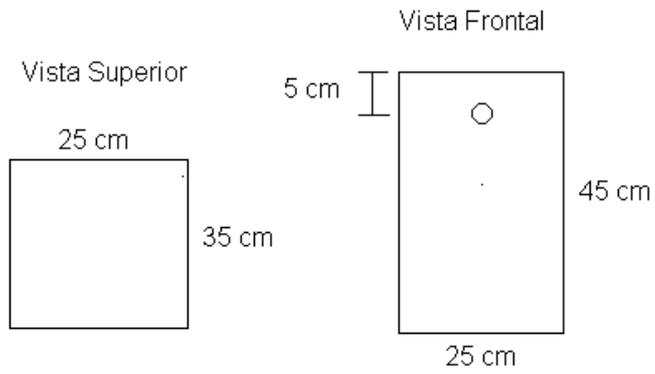
**APÊNDICE 2****DADOS DO ENSAIO DE SEDIMENTAÇÃO****1. Dados numéricos do teste de sedimentação em Proveta**

Amostra	Tempo (s)	Distância (cm)
PV 1	0	14
PV 1	24	13,5
PV 1	46	13,1
PV 1	74	12,8
PV 1	87	12,5
PV 1	113	12,2
PV 1	156	11,8
PV 1	190	11,3
PV 1	225	10,9
PV 1	260	10,3
PV 1	289	9,5
PV 1	310	8,8
PV 1	344	7,6
PV 1	368	6,2
PV 1	393	4,2
PV 1	410	3,4
PV 1	460	2,3
PV 1	532	1,7
PV 1	571	1,2
PV 1	660	0,6
PV 1	100	0,2

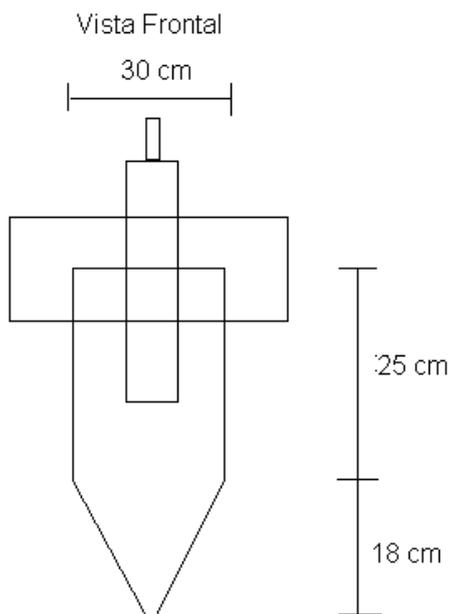
**APÊNDICE 3.**

As dimensões dos equipamentos foram as seguintes:

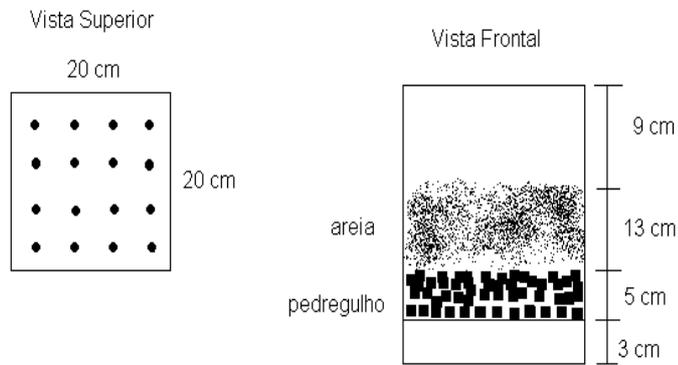
Floculador:



Sedimentador:

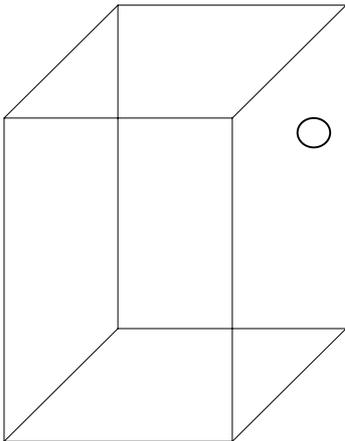


Filtro:

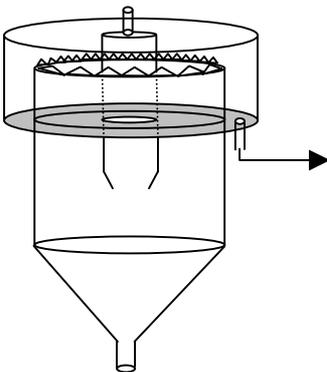


ou ainda os equipamentos em perspectiva:

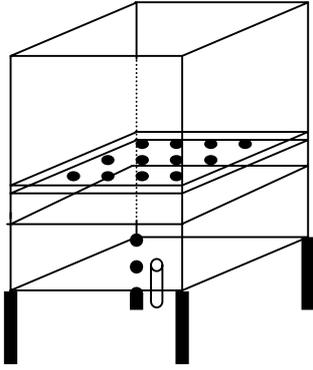
Floculador:



Sedimentador:



Filtro:



## ANEXO 1

A análise granulométrica da amostra foi feita a partir de 529,94 g de areia lavada comumente utilizada na construção civil. O gráfico da figura A.1 foi feito a partir da seguinte tabela:

Abertura da peneira Mesh	mm*	Massa da peneira	Massa da peneira após classificação	Massa Retida (g)	Massa Retida Acumulada (g)	% retida acumulada	% que passa
9	2,00	486,04	533,05	47,01	47,01	8,87	91,13
12	1,41	520,89	579,24	58,35	105,36	19,87	80,13
16	1,00	490,39	584,18	93,79	199,15	37,56	62,44
24	707,00	447,4	551,92	104,52	303,67	57,27	42,73
35	420,00	351,11	477,16	126,05	429,72	81,04	18,96
42	354,00	432,4	460,02	27,62	457,34	86,25	13,75
60	250,00	435,87	475,9	40,03	497,37	93,80	6,20
Fundo		385,69	418,56	32,87	530,24	100,00	0,00

\* a partir de 24 mesh, inclusive, lê-se micra.

Donde construiu-se o seguinte gráfico.

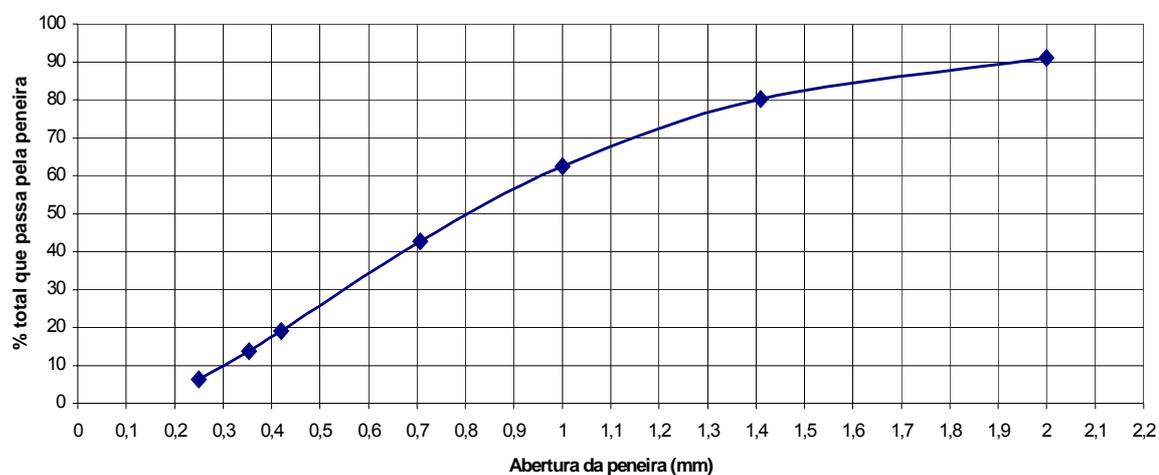


Figura A1 – gráfico da análise granulométrica feita para areia contida no filtro

## ANEXO 2

Em: <http://www.alfakit.com.br/produtos/arquivos/Jartest2.pdf> (acessado em 02/02/2006) podemos verificar a relação da velocidade de rotação das pás de um equipamento de Jar-Test com o Gradiente de velocidade à diferentes temperaturas, como podemos ver na figura A2.

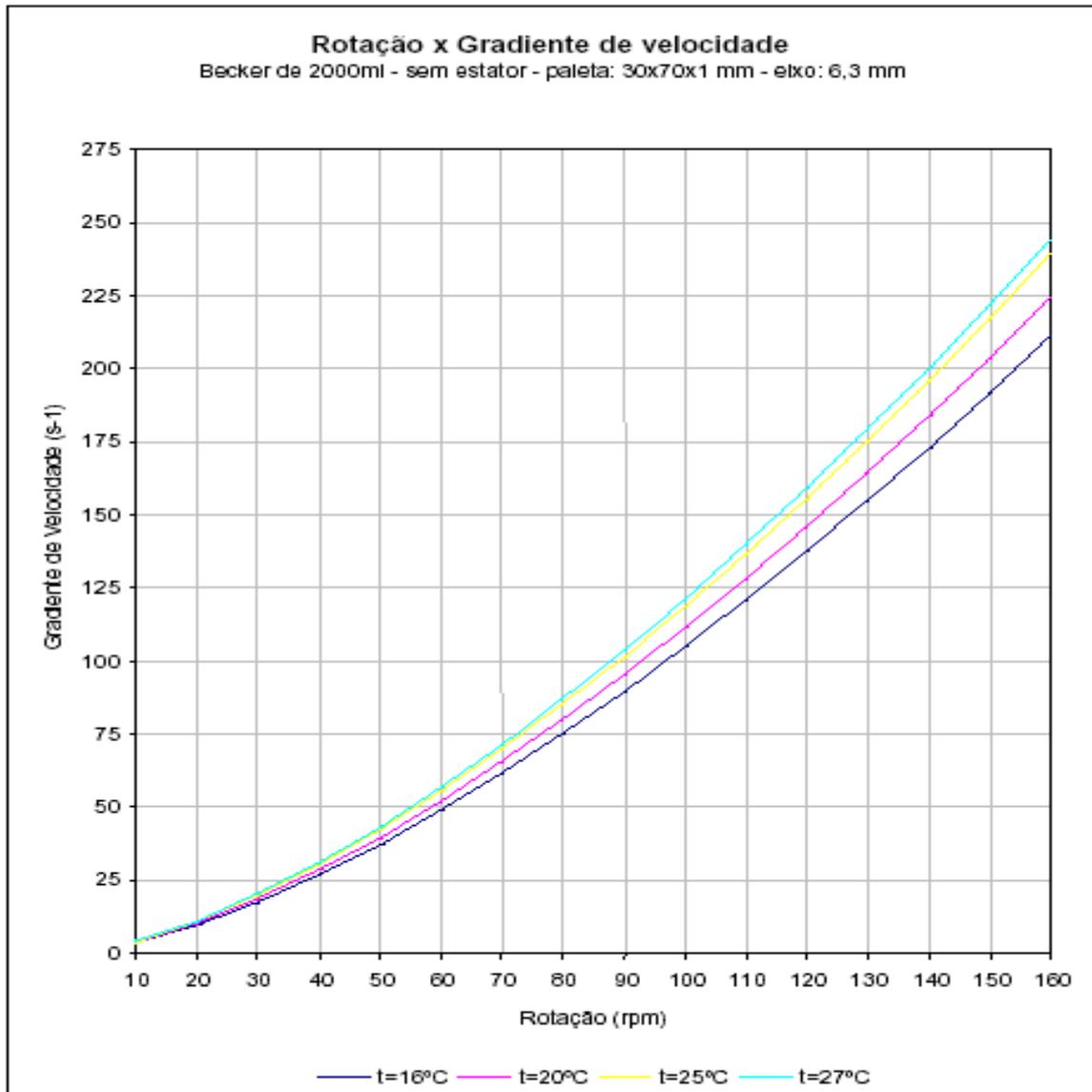


Figura A2 – Relação da velocidade de rotação das pás de um equipamento Jar-Test com o gradiente de velocidade desenvolvido. (Fonte: <http://www.alfakit.com.br/produtos/arquivos/Jartest2.pdf>)