

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
Escola de Engenharia

Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Tese de Doutorado

***REMOÇÃO DE ÓLEO DO MEIO FILTRANTE NO  
PROCESSO DE RETROLAVAGEM EM  
FILTROS DE AREIA.***

Autor: Kirlene Salgado Fernandes Penna

Orientador: Luiz Fernando Andrade de Castro

Abril de 2009

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

Curso  
Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Kirlene Salgado Fernandes Penna

***REMOÇÃO DE ÓLEO DO MEIO FILTRANTE NO  
PROCESSO DE RETROLAVAGEM EM FILTROS DE  
AREIA.***

Tese de Doutorado apresentada ao curso de  
pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de  
Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de Concentração: Metalurgia de Extração  
Orientador: Luiz Fernando Andrade de Castro

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG  
2009

*Dedico este trabalho a Deus, ao meu marido  
e à minha filha Pietra  
Amo vocês.*

## **Agradecimentos**

À Deus que esteve presente em minha vida fazendo com que alcançasse com êxito a realização deste trabalho.

Ao meu orientador Professor Luiz Fernando Andrade de Castro que me apoiou desde o início deste trabalho.

Ao Professor Toninho pela amizade e compreensão.

À Buckman Laboratórios que forneceu o material a ser estudado, além de disponibilizar laboratório e equipamentos de análise. À Letícia, Paulinho, Rodrigo, Luiz e Flávio o meu muito obrigada.

Aos meus pais, meus irmãos Aline, Monick, Laís e Graciliano que sempre estiveram ao meu lado, dando-me carinho, apoio e certeza de um dia alcançar este resultado.

Às minhas amigas Patrícia e Geisamanda pelo incentivo e amizade.

Ao meu marido Gutemberg que esteve tão presente nas horas difíceis com seu carinho, amor, incentivo, paciência e compreensão.

À minha filha Pietra que chegou para alegrar meus dias com seus olhos brilhantes radiando amor.

## **Resumo**

Nos últimos anos as indústrias siderúrgicas vêm investindo em tratamento de água recirculada reduzindo o consumo de água captada dos rios. Isto tem acontecido em função da preservação de recursos hídricos no Brasil. Atualmente apenas 4% do insumo utilizado na produção é captado das bacias hidrográficas. A principal utilização da água nas atividades siderúrgicas ocorre na refrigeração dos equipamentos. Há dois tipos de sistema de resfriamento: no primeiro, a água não entra em contato com outros materiais, mantendo suas propriedades físicas e químicas. Neste caso, utilizam-se inibidores de corrosão no tratamento da água de recirculação. No segundo, a água é utilizada para resfriar o material que está sendo processado, sendo contaminada pela carepa formada na superfície da placa de aço e o óleo dos equipamentos. Neste caso, antes da aplicação dos inibidores de corrosão é necessário clarificar a água utilizando coagulantes e floculantes, além da etapa de filtração. A filtração é a etapa mais importante, pois irá remover as pequenas partículas de sólidos em suspensão após a decantação das partículas maiores. Os filtros de areia, após um ciclo de filtração, precisam ser lavados para remover o excesso de partículas sólidas retidas durante o processo de filtração. Neste caso é utilizado o processo de retrolavagem. Uma vez que o óleo utilizado no processo de laminação contamina a água de recirculação, este óleo também é retido no processo de filtração, porém a contralavagem não é suficiente para remover o óleo aderido na superfície do meio filtrante. Foram realizados ensaios em laboratório visando encontrar um produto de limpeza para remover o óleo da superfície do meio filtrante com aplicação na retrolavagem dos filtros de areia na planta industrial. As análises realizadas em laboratório indicaram que o óleo presente em maior proporção na água contaminada é o óleo lubrificante. O produto que apresentou o melhor resultado na remoção de óleo em laboratório é a base de ácidos inibidos e surfatantes. Os testes realizados na planta industrial, com o produto de limpeza que apresentou o melhor resultado em laboratório, apresentaram resultados satisfatórios e semelhantes aos encontrados em laboratório.

## **Abstract**

In the recent years iron and steel making industries have been investing on recycled water treatment aiming at reducing the consumption of water collected in rivers. The motivation for the procedure is the preservation of Brazilian water resources. At present only 4% of the water used in production is collected from hydrographic basins. The major use of water in iron and steel making activities occurs in cooling systems. There are two types of cooling systems: in the first water does not contact other materials, keeping its physical and chemical properties. In this case corrosion inhibitors are used in the recirculation water treatment. In the second, water is used to cool a material that is under processing, being then contaminated by iron scale formed on the steel plate surface and by oil from equipments. In this case, prior to corrosion inhibitors application it is necessary to use coagulants and flocculants, in addition to the filtration stage. Filtration is the most important stage, for it will remove the small solid particles in suspension after the decantation of the larger ones. The sand filters, after one filtration cycle must be washed to remove the excess of solid particles retained during the filtration process. Backwashing is used in this case. Since the oil used in the rolling process contaminates the recirculation water, it is also retained in filtration, but the backwashing is not capable of removing the oil adhered to the filtration medium. Laboratory experiments were performed aiming at removing the oil from the filtration medium surface with application on backwashing of sand filters in the industrial plant. Laboratory analyses indicated that lubrication oil is the most abundant in contaminated water. The most efficient production for its removal, in laboratory experiments, is based on inhibited acids and surfactants. The industrial plant trials with the use of the cleaning agent that yielded the best laboratory result presented satisfactory results, similar to those obtained in the laboratory.

## ***SUMÁRIO***

RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE TABELAS.....	vii
<b>1 -INTRODUÇÃO.....</b>	<b>01</b>
<b>2 – OBJETIVOS.....</b>	<b>03</b>
<b>3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>04</b>
3.1 – Água de Resfriamento do Sistema Direto.....	04
3.2 – Tratamento Químico da Água.....	06
3.2.1 – Coagulação.....	09
3.2.2 – Mecanismos de Coagulação.....	10
3.2.3 – Flocculação.....	12
3.2.4 – Coagulação e Flocculação: uma correlação.....	17
3.3 – Tratamento Mecânico da Água.....	22
3.3.1 – Flotação.....	22
3.3.2 – Filtração.....	26
3.3.3 – Mecanismos da Filtração.....	28
3.3.4 – Filtros Lentos de Areia.....	30
3.3.5 – Filtros Rápidos de Areia.....	31
3.3.6 – Meio Filtrante.....	34
3.3.7 – Lavagem do Meio Filtrante.....	36
3.4 – Fluidização.....	43
3.4.1 – Condições de Fluidização.....	43
3.4.2 – Interfaces Fluidas.....	47
3.5 – Agentes de Limpeza para Equipamentos de Tratamento de Água.....	47
3.6 - Óleos.....	49
3.6.1 – Óleos Minerais.....	50
3.6.2 – Óleos Lubrificantes.....	50

3.6.3 – Lubrificantes Utilizados na Laminação.....	53
3.6.4 – Óleos Hidráulicos.....	55
3.7 – Técnicas Auxiliares.....	56
3.7.1 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	56
3.7.2 – Espectroscopia no Infravermelho.....	57
3.7.3 – Análise Granulométrica.....	58
<b>4 – METODOLOGIA.....</b>	<b>60</b>
4.1 – Características do Meio Filtrante.....	62
4.1.1 – Granulometria e Determinação da Área Superficial.....	63
4.1.2 – Microscopia Eletrônica de Varredura.....	63
4.2 – Características dos Tipos de Óleos Presentes no Sistema de Laminação.....	64
4.3 – Características da Água a ser Filtrada.....	64
4.3.1 – Análise Gravimétrica.....	65
4.3.2 – Calorimetria.....	65
4.3.3 – Extração de Óleo e Graxa.....	66
4.4 – Utilização de Agentes Químicos para limpar o Meio Filtrante.....	67
<b>5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>68</b>
5.1 – Caracterização da Água a ser Filtrada.....	68
5.2 – Caracterização dos Tipos de Óleo Presentes na Água a ser Filtrada.....	69
5.2.1 – Análise da Superfície do Meio Filtrante por Espectroscopia no Infravermelho.....	70
5.3 – Caracterização do Meio Filtrante.....	77
5.4 – Limpeza Química do Meio Filtrante.....	79
5.4.1 – Análise Química e Morfológica da Superfície do Meio filtrante Utilizando Limpeza com Água.....	81
5.4.2 – Análise Química e Morfológica da Superfície do Meio filtrante Utilizando Limpeza com BSP242.....	82
5.4.3 – Análise Química e Morfológica da Superfície do Meio filtrante Utilizando Limpeza com BLB8031.....	83



<b>6 – CONCLUSÕES.....</b>	<b>86</b>
<b>7 – CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS AO CONHECIMENTO.....</b>	<b>88</b>
<b>8 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>89</b>
<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>90</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1: Fluxograma das Etapas do Processo de Tratamento de Água.....	05
FIGURA 3.2: Representação Esquemática da Dupla Camada Elétrica nas Vizinhanças de uma Interface Sólido-Líquido.....	12
FIGURA 3.3: Representação Esquemática da Formação das Pontes Químicas com o Emprego do Polímero.....	14
FIGURA 3.4: Atuação dos Polímeros como Auxiliares da Coagulação para a Filtração.....	16
FIGURA 3.5: Curva de Energia de Interação em Função da Distância de Aproximação Mútua de duas Partículas.....	18
FIGURA 3.6: A Dupla Camada Elétrica.....	19
FIGURA 3.7: Ação de um Polieletrólito Aniônico.....	20
FIGURA 3.8: Esboço Mostrando o que Ocorre num Meio Filtrante.....	33
FIGURA 3.9: Areia Borbulhando no Início da Lavagem.....	38
FIGURA 3.10: Processo de Retrolavagem.....	40
FIGURA 3.11: Variação das Partículas do Meio Filtrante em Função do Tempo para Areia e Antracito.....	41
FIGURA 3.12: Flutuação da Pressão a Diferentes Velocidades de Água e Ar.....	44
FIGURA 3.13: Amostras do Meio Filtrante Antes e Após a Limpeza.....	48
FIGURA 3.14 Modelo Esquemático da Formação do Filme Protetivo pela Adsorção do Inibidor.....	49
FIGURA 3.15: Cilindros de Laminação.....	53
FIGURA 4.1: Esquematização dos Filtros de Areia.....	60
FIGURA 5.1: Correlação entre o Espectro no Infravermelho da Amostra do Sobrenadante na Bacia de Sedimentação x Óleo de Laminação (espectro azul) – Probabilidade de 43%.....	71
FIGURA 5.2: Correlação entre o Espectro no Infravermelho da Amostra enviada para o Filtro de Areia x Óleo de Laminação (espectro azul) – Probabilidade < 30%.....	71
FIGURA 5.3: Correlação entre o Espectro no Infravermelho da Amostra da Lama da Bacia de Sedimentação x Óleo de Laminação (espectro azul) – Probabilidade de 47%.....	72

FIGURA 5.4: Correlação entre o Espectro no Infravermelho da Amostra do Sobrenadante na Bacia de Sedimentação x Óleo Hidráulico (espectro azul) – Probabilidade de 88%.....	73
FIGURA 5.5: Correlação entre o Espectro no Infravermelho da Amostra enviada para o Filtro de Areia x Óleo de Hidráulico (espectro azul) – Probabilidade de 55%.....	73
FIGURA 5.6: Correlação entre o Espectro no Infravermelho da Amostra da Lama da Bacia de Sedimentação x Óleo de Hidráulico (espectro azul) – Probabilidade de 68%.....	74
FIGURA 5.7: Correlação entre o Espectro no Infravermelho da Amostra do Sobrenadante na Bacia de Sedimentação x Óleo Lubrificante (espectro azul) – Probabilidade de 98%.....	75
FIGURA 5.8: Correlação entre o Espectro no Infravermelho da Amostra enviada para o Filtro de Areia x Óleo de Lubrificante (espectro azul) – Probabilidade de 78%.....	75
FIGURA 5.9: Correlação entre o Espectro no Infravermelho da Amostra da Lama da Bacia de Sedimentação x Óleo de Lubrificante (espectro azul) – Probabilidade de 90%.....	76
FIGURA 5.10: Resultado da Análise Granulométrica da Amostra antes da Limpeza Química.....	78
FIGURA 5.11: Resultado da Análise Granulométrica da Amostra após da Limpeza Química.....	79
FIGURA 5.12: Amostra do Meio Filtrante antes da Limpeza química.....	80
FIGURA 5.13: Amostra do Meio Filtrante aos a Limpeza somente com água.....	81
FIGURA 5.14: Amostra do Meio Filtrante aos a Limpeza Com BSP 242.....	83
FIGURA 5.15: Amostra do Meio Filtrante aos a Limpeza com BLB 8031.....	84

## LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1: Características do Meio Filtrante.....	35
TABELA 3.2: Tamanho Médio e Uniformidade dos Meios Filtrantes Antes e Após a Retrolavagem.....	41
TABELA 3.3: Características dos Óleos Minerais.....	50
TABELA 5.1: Características da Água utilizada no Processo de Filtração.....	68
TABELA 5.2: Posição das Bandas Relativas ao Espectro no Infravermelho dos tipos de Óleos Utilizados na Água no Processo de Laminação à quente.....	70
TABELA 5.3: Correlação entre os Tipos de Óleo Presentes na Água de Laminação a ser Filtrada e o local da Amostragem.....	77
TABELA 5.4: Resultado da Amostra de Área Superficial das Amostras do Meio Filtrante.....	78

## 1 – Introdução

A produção de aço bruto mundial em 2007 foi de 1,20 bilhão de toneladas, 6,8% superior ao ano de 2006. O Brasil atualmente contribui com 2,8% deste total, ou seja, 33,7 milhões de toneladas, levando o país à décima terceira posição de maior fornecedor de aço mundial. A produção brasileira de aço bruto em maio de 2009 foi de 1,9 milhão de toneladas, representando crescimento de 9,5% em relação a abril e queda de 36,3% quando comparada com o mesmo mês em 2008. Com esses resultados, a produção acumulada de janeiro a maio totalizou 8,6 milhões de toneladas de aço bruto o que significou queda de 40,6% e 40,1% respectivamente sobre o mesmo período de 2008.

Uma grande quantidade de água é usada na fabricação do aço, ao todo 16 milhões de m<sup>3</sup> de água circulam por dia nas unidades de produção das siderúrgicas brasileiras. A tecnologia do tratamento de água recirculada é utilizada visando economizar o consumo de água onde suas taxas de recuperação podem atingir 94%, ou seja, 15 milhões de m<sup>3</sup> circulam por dia em circuito fechado nas unidades de processo do setor, reduzindo a captação e situando as empresas brasileiras entre as de melhores índices no cenário mundial. Em algumas plantas a quantidade de reposição de água é somente 100 a 200 mil m<sup>3</sup> de água /dia. De acordo com o site do Instituto Brasileiro de Siderurgia, para produzir 1 tonelada de aço são necessários 40 litros de água.

No ano de 2007, as siderúrgicas no Brasil reduziram em 27% o seu consumo de água em relação ao ano de 2006, isto é, economizaram 122 milhões de m<sup>3</sup>/ano. Já o consumo de água por tonelada de aço produzido caiu de 14 para 10m<sup>3</sup> de água por tonelada. O motivo desta redução é decorrente das melhorias nos sistemas de tratamento e recirculação das águas. Apenas 4,1% do insumo utilizado na produção do aço foi captado nas bacias hidrográficas. Cerca de 2% da água utilizada no processo industrial evapora e os outros 2% são devolvidos aos rios após receber o tratamento adequado.

A principal utilização da água na atividade siderúrgica ocorre no momento da refrigeração dos equipamentos, em um processo realizado em circuito fechado, o que propicia a reutilização constante do recurso natural durante a produção. A água utilizada

é classificada como água de resfriamento direto e água de resfriamento indireto. Os problemas causados pela água recirculada podem ser corrosão e sujeira biológica, dessa forma são utilizados inibidores de corrosão e biocidas. As condições de operação e qualidade da água são diferentes em cada processo, tendo tratamentos químicos característicos e específicos.

No processo de tratamento de água industrial, substâncias que causam interferências no sistema, tais como sólidos dissolvidos e sólidos em suspensão, são removidas da água. Sólidos em suspensão (SS) são removidos através do processo de tratamento de água industrial e descartados como lama com alta quantidade de água. Como a água possui alguns tipos de sólidos dissolvidos e sólidos em suspensão, o método adequado de tratamento de água deve ser selecionado de acordo com a qualidade da água a ser tratada. Os métodos de tratamento da água são classificados em três categorias: mecânico, químico e biológico. Porém, só serão relatados o tratamento mecânico e o químico, uma vez que o tratamento biológico não é de interesse neste estudo.

A água utilizada no processo de laminação a quente pode ser dividida em: água de *resfriamento indireto* que é utilizada para o resfriamento do forno de reaquecimento de placas entre outros equipamentos. Neste sistema são utilizados inibidores de corrosão à base de fosfato e zinco para evitar a ocorrência de corrosão severa. Já no sistema de *resfriamento direto*, a água que é utilizada para o resfriamento da tira, é contaminada com óleos lubrificantes e com a carepa (óxido de ferro) formada na superfície do aço depois de reaquecido. Neste sistema são utilizados os processos de clarificação e filtração.

No processo de filtração são removidas pequenas partículas de sólidos em suspensão provenientes da carepa e também é retido o óleo utilizado no processo de laminação emulsionado na água de recirculação. Após um determinado tempo de filtração é necessário lavar o meio filtrante através do processo de retrolavagem. Porém devido à presença do óleo, que adere a superfície do meio filtrante, a limpeza não é eficiente, gerando um acúmulo de material retido dentro do filtro reduzindo sua capacidade de filtração.

## 2 - Objetivo

Os objetivos propostos deste trabalho são:

### *Objetivo geral:*

Remover o óleo aderido à superfície do meio filtrante utilizando um agente de limpeza químico durante o processo de retrolavagem em filtros de areia.

### *Objetivos específicos*

- Identificar o tipo de óleo presente na superfície do meio filtrante utilizando a técnica de Espectroscopia no Infravermelho.
- Identificar o agente de limpeza químico mais apropriado à remoção do tipo de óleo encontrado aderido na superfície do meio filtrante.
- Caracterizar o meio filtrante quanto a granulometria, área superficial e morfologia.
- Desenvolver metodologia de aplicação do agente de limpeza para a remoção do óleo aderido na superfície do meio filtrante, identificando as etapas de retrolavagem.

### **3 - Revisão Bibliográfica**

#### **3.1 - Água de Resfriamento do Sistema Direto**

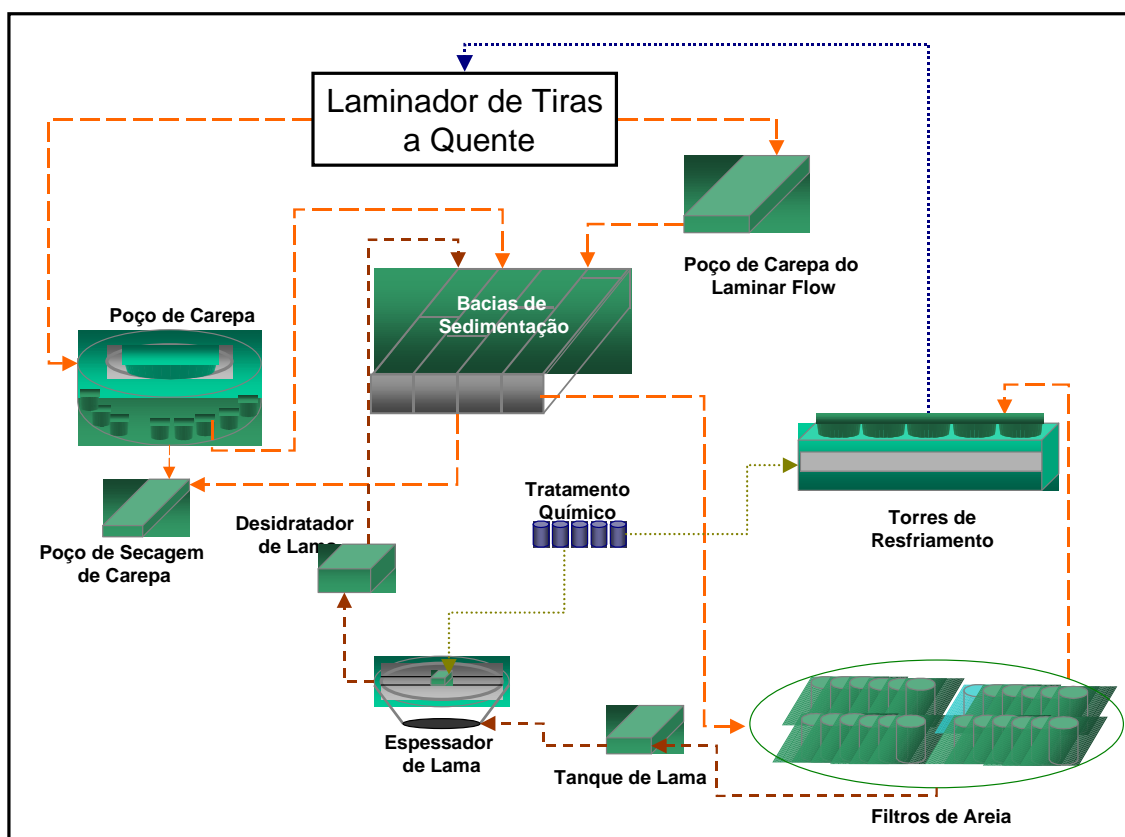
De acordo com Kurita (1999), a água de resfriamento do sistema direto na laminação a quente é um sistema de aspersão contínua e com alta pressão para a remoção da carepa (óxido de ferro) formada durante o reaquecimento da placa para obtenção de propriedades metalúrgicas, podendo causar corrosão e entupimentos dos bicos de aspersão. O sistema de aspersão de água é lançado diretamente no aço numa zona de resfriamento secundário. Após a água ser aspergida, retirando a carepa formada na superfície metálica, a concentração de sólidos suspensos na água torna-se muito alta. Estes sólidos suspensos são removidos em tanques de sedimentação seguido de filtração. Problemas como corrosão ocorrem quando o pH da água de resfriamento for baixo e/ou a concentração de sais for alta. O mecanismo de zonas de aspersão são repetidamente úmidos e secos, onde os sais na água de aspersão estão concentrados na superfície metálica. Este mecanismo provoca corrosão severa que pode ser reduzida utilizando os inibidores de corrosão.

O uso de inibidores de corrosão, juntamente com os agentes controladores de pH, é eficiente no controle da corrosão. No entanto, inibidores de corrosão são consumidos no sistema pois se combinam com os sólidos em suspensão presentes na água sendo removidos pelo processo de filtração. Dessa forma o consumo de inibidores de corrosão nos sistemas de resfriamento direto são elevados (Kurita, 1999).

O entupimento dos bicos de aspersão pode ser causado por vários fatores de acordo com as condições de operação. Para evitar o entupimento dos bicos de aspersão, primeiramente deve-se minimizar a concentração de sólidos em suspensão na água de recirculação pelo controle de clarificação e filtração. Na água de resfriamento do sistema direto, a água de recirculação possui alta concentração de sólidos em suspensão após a aspersão. Neste sistema tanques de sedimentação e filtros de areia são instalados para remover os sólidos em suspensão presentes na água e também são utilizados inibidores de corrosão para reduzir o aparecimento de corrosão severa. Além disso, o



aumento da corrosão pode causar o entupimento de bicos de aspersão. A Figura 3.1 representa esquematicamente as etapas do processo do tratamento da água.



**FIGURA 3.1: Fluxograma das Etapas do Processo do Tratamento da Água. (Manual do Programa Buckman)**

Após o processo de Resfriamento Direto, a água contendo a carepa é destinada ao Poço de Carepa onde é removida a carepa mais grossa. Em seguida a água é direcionada através de bombas para as Bacias de Sedimentação onde recebe o tratamento químico para a clarificação da água. A próxima etapa consiste no sistema de Filtração seguindo para a Torre de Resfriamento onde a água recebe o tratamento químico de inibidores de corrosão e microbiocida retornando ao processo de laminação para o resfriamento de equipamentos e do material em processamento.

Após o processo de filtração, ocorre a retrolavagem dos filtros onde é removida toda a lama de carepa em forma de sólidos em suspensão acumulada. Esta lama segue para o

espessador de lama onde recebe novo tratamento de clarificação da água. A lama formada segue para o desidratador à vácuo e a água clarificada retorna para as bacias de sedimentação.

### **3.2 - Tratamento Químico da Água**

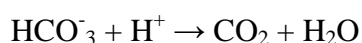
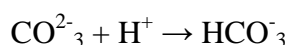
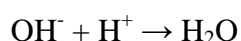
Inicialmente o tratamento consiste na retirada de calor e dos resíduos incorporados à água durante o processo de laminação a quente mantendo suas propriedades físico-químicas. A retirada de calor é feita através de uma Torre de Resfriamento, específica deste estudo, com uma vazão de aproximadamente 13.000 m<sup>3</sup>/h. Os principais equipamentos que são refrigerados pela água durante o processo são os cilindros de laminação, os rolos de mesas, a tesoura, a bobinadeira e a tira laminada. A água que entra em contato com a tira laminada remove a carepa (óxido de ferro) formada na superfície. A retirada de resíduos incorporados à água é feita pelo processo de clarificação e filtração.

De acordo com Babbitt (1962), sempre que a água for muito turva, a simples sedimentação prévia permite a remoção de partículas mais grosseiras em suspensão, resultando em uma água de mais fácil tratamento. A preparação da água de modo a garantir uma boa clarificação é um requisito essencial para a economia e operação satisfatória dos filtros. A sedimentação tem pouco efeito sobre as partículas muito pequenas, sendo bastante eficaz na remoção da maior parte das partículas grosseiras e mais pesadas, de modo que o grau de clarificação dependerá do tamanho das partículas que constituem a matéria em suspensão. A turbidez elevada das águas é devido, principalmente, às partículas mais finas que não sedimentam rapidamente.

Durante o tratamento químico alguns parâmetros são constantemente avaliados para verificar sua eficiência. São eles:

1 – Alcalinidade: A alcalinidade pode ser definida como a capacidade de reação de um meio, face a adição de um ácido. É a capacidade de neutralização de um meio, quando submetido a um ácido forte. Representa a capacidade que um sistema aquoso tem para

neutralizar ácidos sem perturbar de forma extrema as atividades biológicas que nele decorrem (efeito tampão natural da água). Esta capacidade é avaliada com o auxílio de um indicador ácido/base. Há uma relação entre pH e a existência de hidroxilas, carbonato, bicarbonato e dióxido de carbono. A alcalinidade é interpretada como a presença de íons bicarbonato, carbonato e hidróxido. Outros íons como os fosfatos e os silicatos podem interferir nos valores de alcalinidade.



Para sistemas de recirculação de água é importante saber a alcalinidade do sistema, pois através dela pode-se antever tendências de corrosividade ou de incrustação de uma determinada água (Kurita, 1999).

De acordo com Netto (1991), a alcalinidade é devida à presença de carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ), ou hidróxidos ( $\text{OH}^-$ ). É uma das determinações mais importantes no controle da água, estando relacionada com a coagulação, redução de dureza e prevenção de corrosão. Os íons causadores da alcalinidade são todos básicos e, assim, capazes de reagir com um ácido de concentração conhecida.

2- Condutividade: Depende da quantidade de sais dissolvidos na água e é aproximadamente proporcional à sua quantidade. Sua determinação permite obter uma estimativa rápida do conteúdo de sólidos de uma amostra.

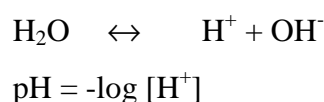
Depende de:

- concentração, tipo e tamanho de íons,
- natureza do solvente,
- interação entre os solventes e os íons,
- temperatura

Quanto maior a condutividade, maior será a probabilidade da água proporcionar corrosão ou incrustação nos sistemas de troca térmica.

3 – Sólidos em suspensão: São espécies químicas de baixa solubilidade (ou quase insolúveis), dispersas em um líquido. Carvão, poeira, argila, ferro, areia, folhas e uma imensa variedade de precipitados, podem ser geralmente removidos por filtração. Os sólidos suspensos possuem a capacidade de turvar a água. A presença destas partículas provoca a dispersão e a absorção da luz, dando a água uma aparência nebulosa.

4 – pH: Mede a concentração de íons  $H^+$  em uma dada solução. Sabemos que a água ioniza-se produzindo íons  $H^+$  e  $OH^-$  da seguinte maneira:



Na prática, o pH mede a quantidade de íons  $H^+$  e/ou de íons  $OH^-$  presentes em uma solução. Quanto mais íons hidrogênio ( $H^+$ ) estiverem presentes, mais ácido é o meio. Quanto mais íons hidroxilas ( $OH^-$ ) estiverem presentes, mais básico/alcalino é o meio.

De acordo com Netto (1991), o termo pH é usado universalmente para expressar a intensidade de uma condição ácida ou alcalina de uma solução. Mede a concentração do íon hidrogênio ou sua atividade, importante em cada fase do tratamento, sendo referindo freqüentemente na coagulação, floculação, desinfecção e no controle da corrosão.

5 – Óleos e Graxas: Também denominados de extraíveis orgânicos, são componentes oleosos analisados através de uma extração (solubilização em solventes) de elementos orgânicos que a água contém. Trata-se de uma medida de matéria orgânica efetuada a partir de solvente do tipo “hexanas” muito embora o clorofórmio e solventes clorados possam ser utilizados. Utiliza-se com freqüência esta análise em depósitos encontrados em sistemas de resfriamento, onde há suspeitas da existência de contaminação orgânica.

6 - Teor de Ferro: Está presente na água em dois estados diferentes: Ferroso e Férrico. No estado ferroso, o ferro está parcialmente oxidado ( $Fe^{2+}$ ) e é bastante solúvel, enquanto que no estado férrico ( $Fe^{3+}$ ) ele encontra-se totalmente oxidado e tem baixa solubilidade. Esta oxidação se dá em valores de pH entre 7,0 e 8,5. Muitas vezes o ferro

é originado nos próprios circuitos de recirculação de águas em função da corrosão que a água provoca nos sistemas ferrosos.

### **3.2.1 - Coagulação**

A coagulação é empregada para a remoção de material em suspensão ou coloidal. Os colóides são apresentados por partículas que têm uma faixa de tamanho de 1nm a 0,1nm e causam cor e turbidez. As partículas coloidais não sedimentam e não podem ser removidas por processos de tratamento físico convencionais. Os colóides possuem propriedades elétricas que criam uma força de repulsão que impede a aglomeração e a sedimentação. Na maior parte dos efluentes industriais o colóide possui carga negativa (Eckenfelder, 1989). A coagulação é o processo de desestabilização das partículas coloidais de modo que o crescimento da partícula possa ocorrer em consequência das colisões entre partículas (Metcalf & Eddy, 2003). O papel do coagulante é desestabilizar a suspensão coloidal reduzindo todas as forças atrativas, desse modo abaixando a barreira de energia e permitindo partículas a se agregarem. (PUC-Rio – Certificação Digital N° 0511120/CA).

A coagulação 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 e depende da concentração do metal e pH final da mistura; o segundo, fundamentalmente físico, consiste no transporte das espécies hidrolisadas para que haja contato entre as impurezas presentes na água. (PUC-Rio – Certificação Digital N° 0511120/CA).

Segundo Libânio (2005), a coagulação consiste essencialmente na desestabilização das partículas coloidais e suspensas realizada pelo conjunto de ações físicas e reações químicas, com a duração de poucos segundos, entre o coagulante, a água e as impurezas presentes. Em solução aquosa, os íons metálicos, positivamente carregados, formam fortes ligações com os átomos de oxigênio podendo coordenar até seis moléculas de água ao redor, liberando os átomos de hidrogênio (aumentando a concentração do íon  $H^+$ ) e reduzindo o pH da suspensão. Este processo denomina-se hidrólise, e os produtos

formados constituem-se em espécies hidrolisadas, podendo culminar em um precipitado de hidróxido do metal. A eficiência da coagulação influi no desempenho das demais etapas do tratamento. Dessa forma, o objetivo da coagulação consiste em elevar a velocidade de sedimentação do aglomerado de partículas a ser formado pela adição do coagulante.

A característica fundamental para um coagulante ser empregado no tratamento de água consiste na capacidade de produzir precipitados e espécies hidrolisadas em dissociação no meio aquoso, capazes de desestabilizar ou envolver as partículas suspensas e coloidais presentes na água.

De acordo com Tansel (2004), o coagulante inclui a agregação e deposição de partículas. O coagulante interage com a superfície da partícula reduzindo as forças de repulsão de curto alcance formando partículas maiores denominadas flocos. Estudos mostraram que a eficiência da filtração melhora com a formação de flocos. Hermeneck et al, estudaram a remoção de água de reuso contaminada com óleo utilizando coagulante na filtração. A adição do polieletrólito catiônico melhorou o desempenho da filtração.

De forma geral, a coagulação do material finamente dividido disperso em suspensões naturais é afetada por propriedades da água, tais como temperatura, alcalinidade e pH, por parâmetros operacionais que afetam as condições hidrodinâmicas do meio, e pela presença e natureza do agente coagulante e sua dosagem. As partículas desestabilizadas pela ação do coagulante podem se agregar em flocos, por meio de mecanismos de transporte, tais como o movimento Browniano, a força da gravidade ou a convecção forçada do fluido. (Guedes et al 2004).

### **3.2.2 - Mecanismos de Coagulação**

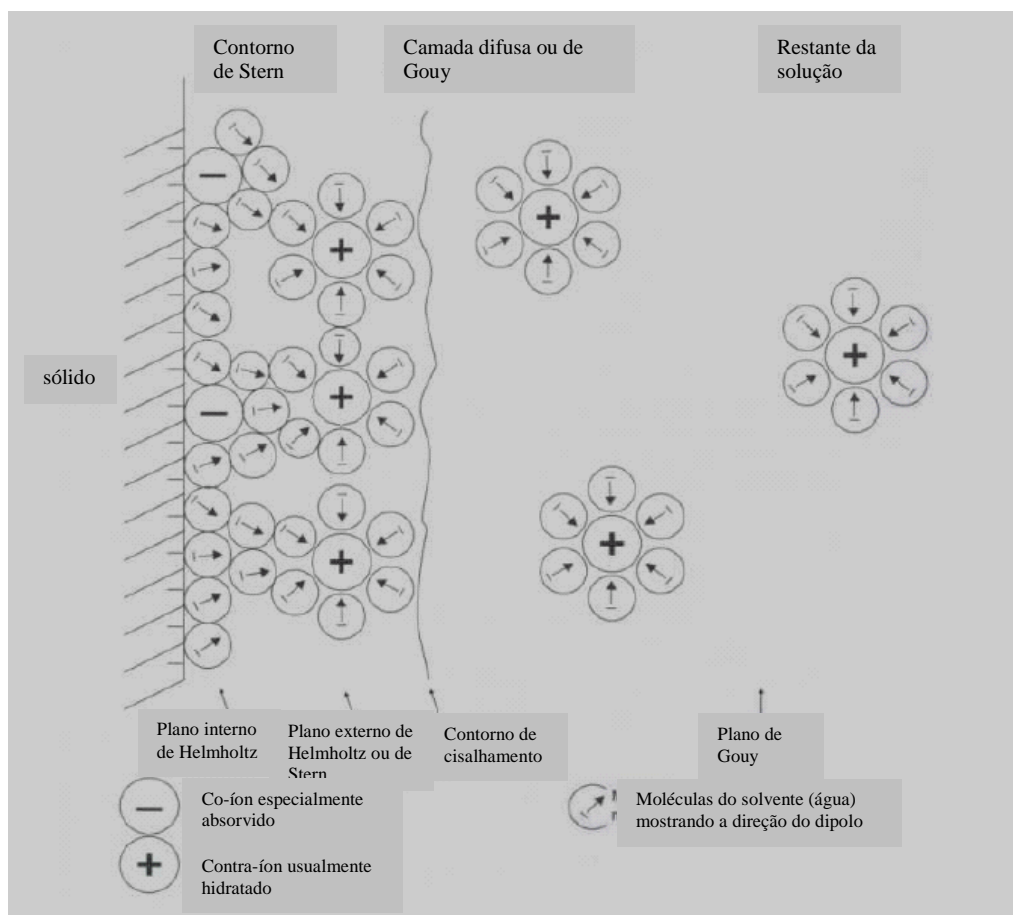
Para melhor compreender os mecanismos no processo de coagulação vale ressaltar que as partículas suspensas e coloidais dispersas na água apresentam carga

predominantemente negativa. Três fenômenos favorecem o desenvolvimento de carga negativa na superfície da partícula:

1. Para o caso das argilas minerais, a carga negativa pode estar associada às próprias imperfeições do cristal ou à substituição do átomo de silício por um átomo de menor valência na estrutura do cristal.
2. Grupos funcionais como carboxilas ou hidrófilas presentes na superfície das partículas, dissociam-se na água e produzem carga elétrica negativa, dependendo do grau de ionização e do pH do meio aquoso.
3. Pode ocorrer a adsorção de íons específicos na superfície da partícula, decorrentes das forças de van der Waals.

Quando as partículas coloidais estão dispersas na água, íons de carga oposta tendem a se aproximar de sua superfície formando uma camada de íons positivos e negativos, denominada camada dupla ou camada de Stern, decorrente das forças de repulsão eletrostática e de atração de van der Waals. Dessa forma, apesar da carga negativa da maioria dos colóides, a suspensão tende a ser eletricamente neutra. Assim, a desestabilização referenciada no próprio conceito de coagulação permitirá a aproximação das partículas vencendo a barreira de energia decorrente desses potenciais elétricos. (PUC-Rio – Certificação Digital N° 0511120/CA).

A Figura 3.2 apresenta de forma esquemática a dupla camada elétrica nas vizinhanças de uma interface sólido-líquido.



**FIGURA 3.2: Representação Esquemática da Dupla Camada Elétrica nas Vizinhanças de uma Interface Sólido-Líquido. (PUC-Rio – Certificação Digital N° 0511120/CA).**

A coagulação é necessária para as águas com turbidez superior a 30 e 50 ppm de presença de sólidos em suspensão. Ela nunca é empregada como tratamento completo, mas sempre seguida pela filtração. Uma coagulação satisfatória é conseguida somente com uma mistura eficiente dos coagulantes na água. Alguns reagentes e certas águas exigem uma mistura rápida e violenta, enquanto que outros requerem uma mistura lenta durante um período mais prolongado. (Babbitt, 1962)

### 3.2.3 – Flocculação

Floculantes são polímeros orgânicos, solúveis em água, de longa cadeia e alto peso molecular. Geralmente atuam pela agregação de partículas finas dentro de grandes



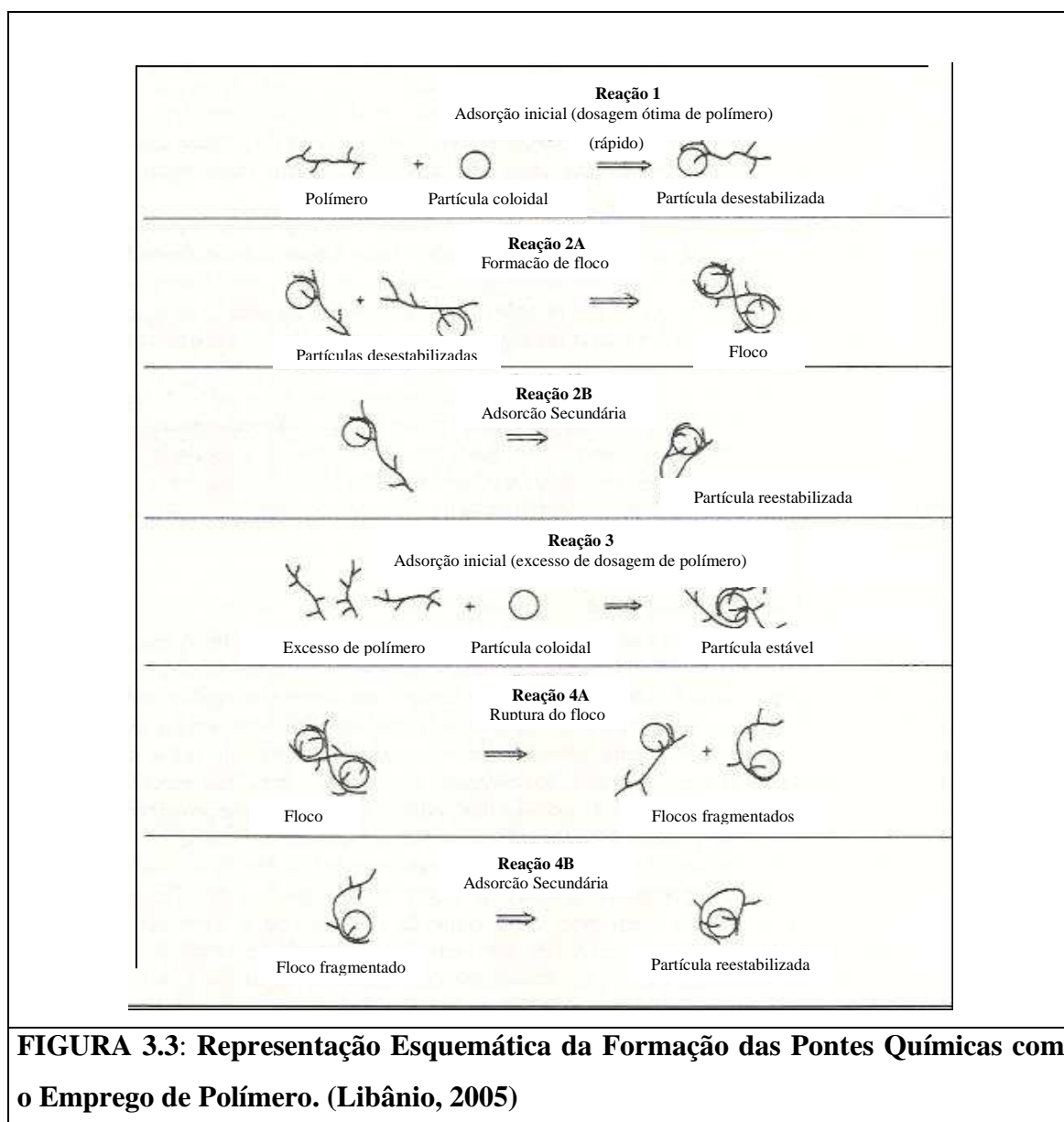
massas chamado flocos, aumentando o tamanho aparente da partícula e o raio capilar. Os mecanismos de adsorção deste flocculante polimérico foram identificados como (i) ponte polimérica (ii) neutralização de carga (iii) formação de complexo polimérico ou (iv) flocculação pelos polímeros livres. O primeiro mecanismo é considerado mais significativo que os dois últimos. A ponte ocorre quando segmentos de um polímero adsorvem em mais de uma partícula simultaneamente, formando assim um elo entre elas. A maioria dos minerais em meio aquoso possuem cargas negativas. A neutralização da carga ocorre quando são utilizados polímeros de cargas opostas. Esses polímeros são adsorvidas na superfície das partículas por mecanismo eletrostático e reduzem as forças de repulsão entre as partículas. (Besra et al, 1997)

De acordo com Babbitt (1962), quando os coágulos são misturados com a água formando flocos, as partículas finamente divididas das matérias em suspensão e em matérias coloidais, que se encontram na água são atraídas para os flocos constituindo grupos ou agregados mais facilmente removíveis pela decantação do que pelas partículas inicialmente presentes. Há ainda a considerar que os flocos apresentam superfícies suficientemente grandes para emaranhar e aglomerar as substâncias responsáveis pela cor; os flocos assim carregados, levam para o fundo a medida que decantam.

Com o objetivo de reduzir as dosagens do coagulante e conferir ao floco maior densidade, são empregados polímeros orgânicos ou sintéticos, como auxiliares de flocculação. Tais substâncias podem ser definidas como compostos orgânicos de longas cadeias constituindo-se de uma série repetitiva de unidades químicas unidas (meros) por ligações covalentes formando moléculas denominadas monômeros, e a massa molar do polímero é conseqüência da soma dos diversos polímeros. Uma classe especial de polímero denomina-se polieletrólitos, que são distintos dos polímeros ordinários por possuírem grupos funcionais ionizáveis capazes de serem adsorvidos na superfície dos colóides (Libânio, 2005).

No processo de flocculação inserem-se os polímeros orgânicos, sintéticos ou naturais, (polieletrólitos) utilizados mais comumente como auxiliares de coagulação, quer para

elevar a velocidade de sedimentação dos flocos quer para, em estações de filtração direta, aumentar a resistência destes aos efeitos de cisalhamento provocado pelas forças hidrodinâmicas do escoamento através dos interstícios do meio filtrante, retardando a ocorrência do transpasse (fenômeno pelo qual as partículas atravessam os interstícios do meio filtrante ocasionando a queda da qualidade do efluente) e, conseqüentemente, prolongando a duração das carreiras dos filtros. (Libânio, 2005)



No emprego dos polímeros, a floculação pode efetuar-se por intermédio da formação de pontes químicas, quando as partículas coloidais são adsorvidas na superfície das

diversas cadeias dos polímeros. Para tal finalidade, a molécula de polímero deve ser longa o suficiente para minimizar o efeito repulsivo da dupla camada quando da aproximação de mais de uma partícula e permitir a adsorção em sua superfície. Há uma correlação direta entre a área superficial das partículas coloidais e a dosagem ótima de polímeros, e a melhor agregação não ocorre, necessariamente, para potencial zeta nulo.

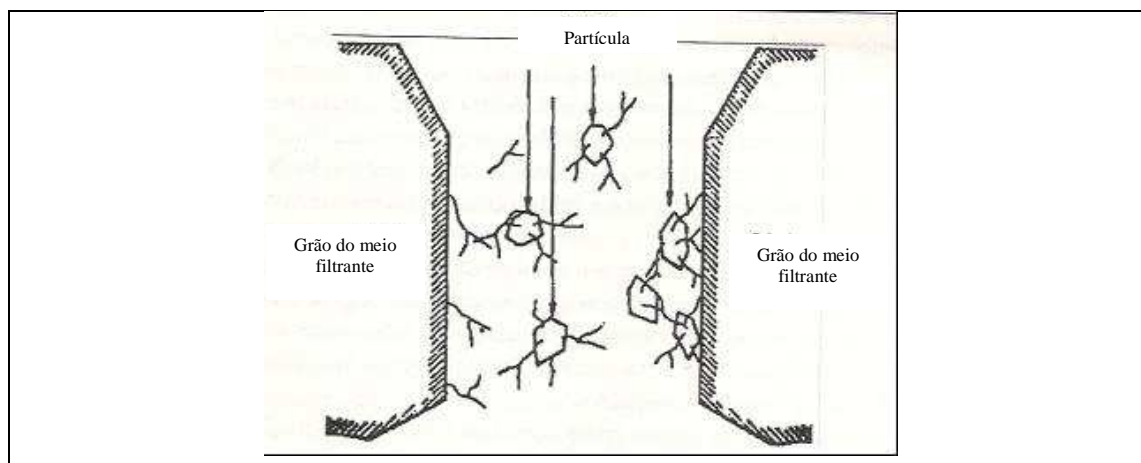
O mecanismo de floculação pode ocorrer com polímeros aniônicos, nos quais predominam sítios negativos. Dessa forma, tanto podem ocorrer ligações decorrentes de forças de atração eletrostática, quanto a prevalência de pontes de hidrogênio ou das forças de van der Waals. A Figura 3.3 apresenta uma representação esquemática da formação das pontes químicas.

Nos polímeros, podem predominar sítios ionizáveis positivos (catiônicos) e negativos (aniônicos), ou nenhum destes (não-iônicos). No emprego dos polímeros como floculantes primários, a desestabilização pode ocorrer a partir da adsorção do polímero às partículas coloidais. Para floculação com polímeros catiônicos a adsorção neutraliza a carga negativa das partículas permitindo a agregação. Para os polímeros aniônicos ou não-iônicos, há a referida formação das pontes químicas conectando as partículas coloidais de carga predominantemente negativas (Libânio, 2005).

A Figura 3.4 apresenta a ação do polímero no interstício do meio filtrante. Observe que o polímero fica retido nas paredes do filtro agregando novas partículas retendo o material a ser filtrado. Os polímeros são utilizados como floculantes primários (auxiliando o processo de coagulação) em estações de filtração direta; predomina os polímeros catiônicos de menor massa molar e seu uso apresenta as seguintes características:

- Em estações de filtração direta há formação de flocos mais resistentes à erosão nos interstícios do meio filtrante;
- Redução do volume de lodo gerado;

- Redução com gastos com alcalinizantes para correção do pH final, uma vez que menores dosagens de coagulantes minimizam a queda acentuada do pH de coagulação;
- Maior facilidade de desidratação do lodo gerado comparada aos sais de ferro e alumínio.



**FIGURA 3.4: Atuação dos Polímeros como Auxiliares de Coagulação para a Filtração. (Libânio, 2005)**

Porém, existem alguns fatores que interferem na floculação. Destacam-se o tipo de coagulante, o pH e a alcalinidade da água bruta, a natureza e a distribuição dos tamanhos das partículas causadoras de cor e turbidez e a uniformidade de aplicação dos produtos químicos na massa líquida. Em menor grau, tem-se a presença de íons, a concentração e a idade da solução de coagulante, a temperatura da água e, dependendo do mecanismo predominante, o gradiente de velocidade e o tempo de agitação na mistura. (Libânio, 2005)

Verificou-se ser vantajoso agitar-se violentamente a água logo após a aplicação dos reagentes (coagulante e floculante) e em seguida, manter-se uma agitação moderada ou lenta enquanto se formam os flocos. Esse movimento mais lento da água permite o encontro e a aglomeração dos flocos, tornando-os maiores e mais eficazes no processo de clarificação. (Babbitt, 1962).

De acordo com PUC-Rio (Certificação Digital N°0511120/CA) o processo de coagulação é muito rápido, variando desde décimos de segundos a cerca de 100 segundos dependendo das demais características (pH, alcalinidade, temperatura, turbidez). Daí em diante há necessidade de agitação lenta, para que ocorra choques entre as impurezas, que se aglomeram formando partículas maiores denominadas flocos, que podem ser removidas por sedimentação, flotação ou filtração rápida. Uma característica essencial da floculação é a remoção de sólidos suspensos.

### **3.2.4 – Coagulação e floculação: uma correlação**

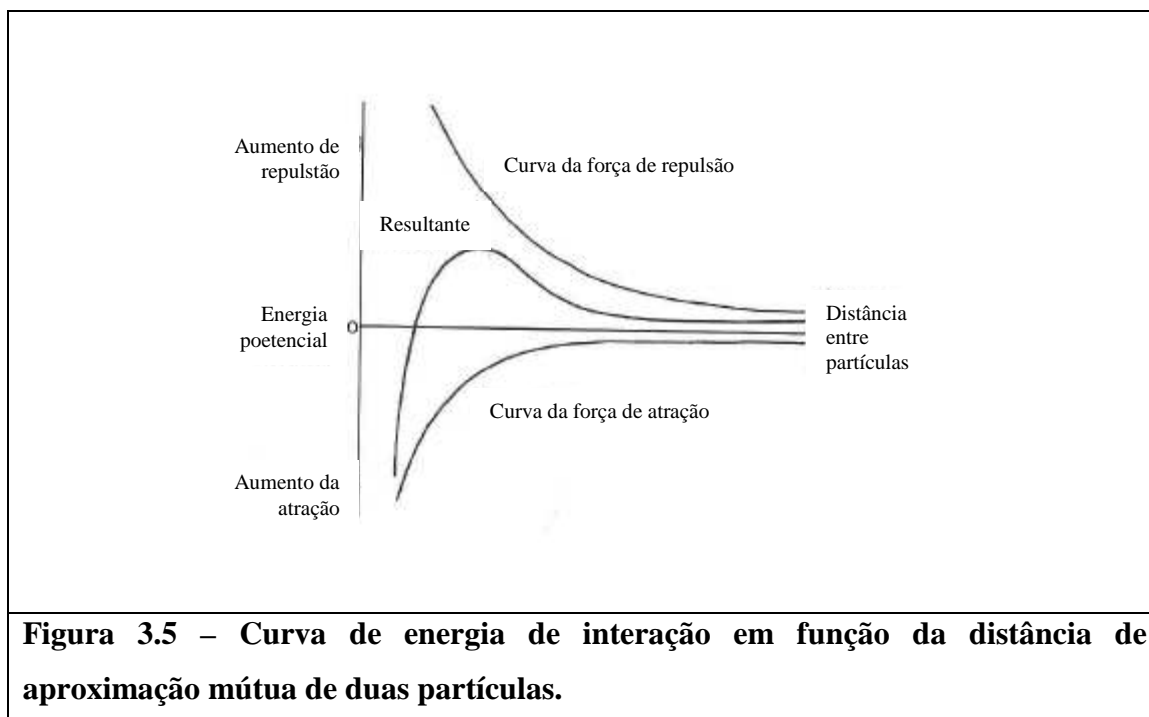
A coagulação ocorre quando partículas extremamente finas aderem diretamente uma à outra. Todas as partículas exercem uma atração mútua devido às forças de London-van der Waals, sendo que essas forças são efetivas somente a distâncias muito pequenas. Normalmente, a adesão entre partículas pela ação dessas forças é evitada devido à presença de uma atmosfera carregada eletricamente ao redor de cada partícula, o que gera forças de repulsão quando as partículas se aproximam uma da outra. Há então um balanço entre as forças de atração e as forças de repulsão elétrica na interface sólido – líquido, conforme ilustrado na Figura 3.5.

Em um dado sistema as cargas elétricas na superfície possuem o mesmo sinal. Em suspensões aquosas de pH maior ou igual a 4 essa carga é geralmente negativa. As superfícies carregadas positivamente ocorrem principalmente em soluções altamente ácidas.

As forças de repulsão não somente evitam a coagulação das partículas como também retardam sua sedimentação mantendo-as em constante movimento. Esse efeito fica mais evidente em partículas menores.

Os coagulantes são eletrólitos que têm carga oposta à carga das partículas e que causam a neutralização das cargas quando dispersos em um sistema. Sem a repulsão entre as partículas elas entram em contato uma com as outras e se aderem como resultado das forças moleculares. Os coagulantes mais utilizados são os sais inorgânicos

(frequentemente carregados positivamente e com cátions altamente carregados), a cal, o ácido sulfúrico e o  $\text{CO}_2$ .



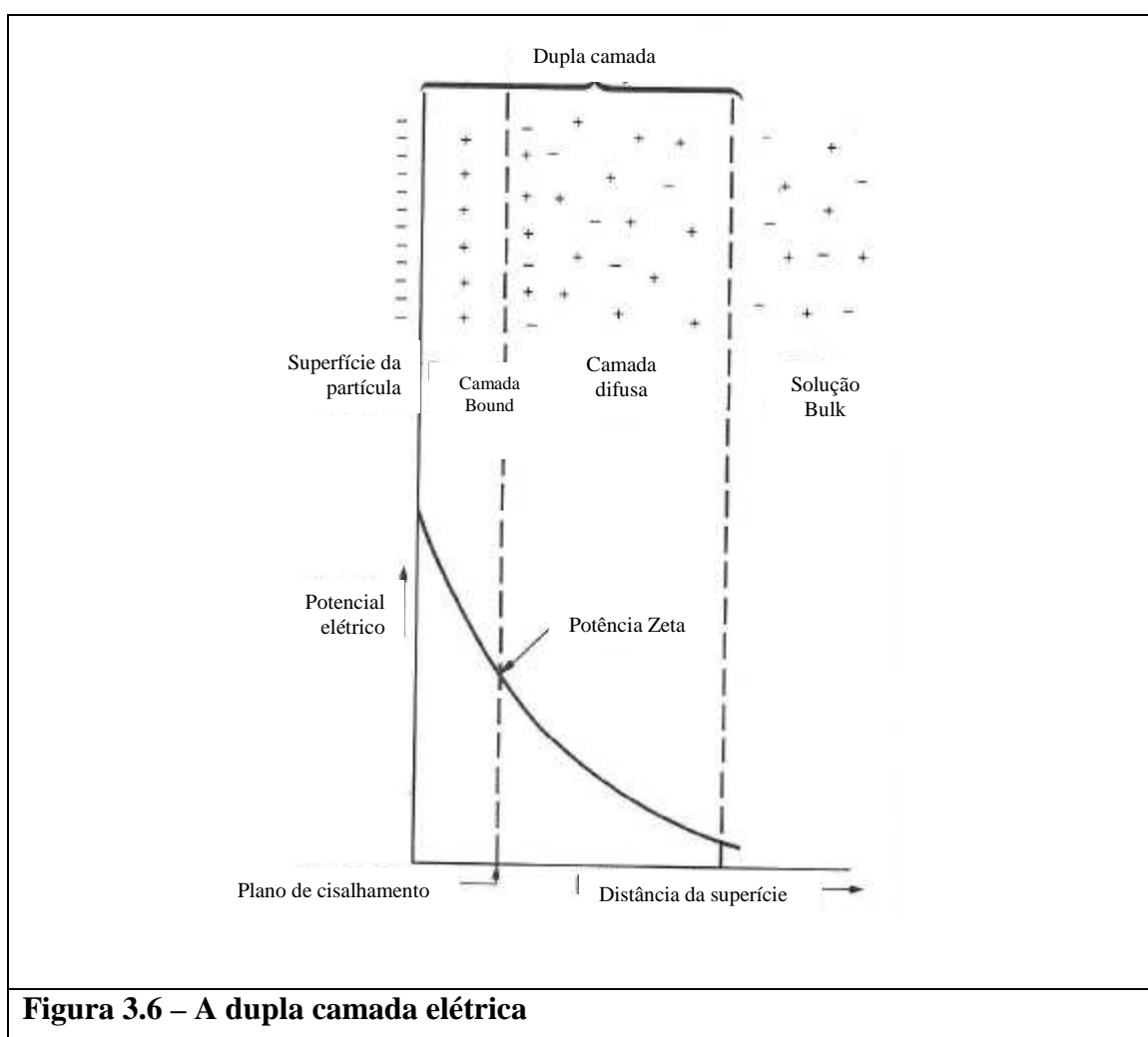
A coagulação ocorre de forma mais pronunciada quando as partículas têm carga zero em relação ao meio, e isto acontece quando o potencial zeta é zero. A natureza do potencial zeta pode ser vista na Figura 3.6, que mostra o modelo da dupla camada elétrica na superfície da partícula.

A superfície mostrada tem carga negativa o que atrai os íons positivos da solução. Estes íons formam uma camada na superfície da partícula que é conhecida como *Plano de Stern* e também uma *camada difusa* onde a concentração dos íons positivos decai à medida que se afasta da partícula. A uma determinada distância da superfície as cargas da solução voltam a entrar em equilíbrio. Estas camadas de íons, próximas da superfície da partícula, constituem a dupla camada elétrica.

A floculação envolve a formação de um agregado mais “aberto” do que os resultantes da coagulação. O processo ocorre através da ação de moléculas de reagente que formam uma espécie de ponte entre partículas em suspensão. Os reagentes utilizados para

formar as “pontes” são polímeros de cadeia longa que no passado eram naturais (amido, cola, gelatina e goma de guar) e atualmente são sintéticos.

Os reagentes sintéticos são baseados na repetição de unidades de ácido acrílico e seus derivados. Eles estão disponíveis em uma ampla faixa de peso molecular. Os reagentes contendo grupos ionizáveis são conhecidos como *polieletrólitos*. A maioria destes reagentes tem caráter aniônico, porém também podem apresentar-se na forma não-iônica e catiônica.



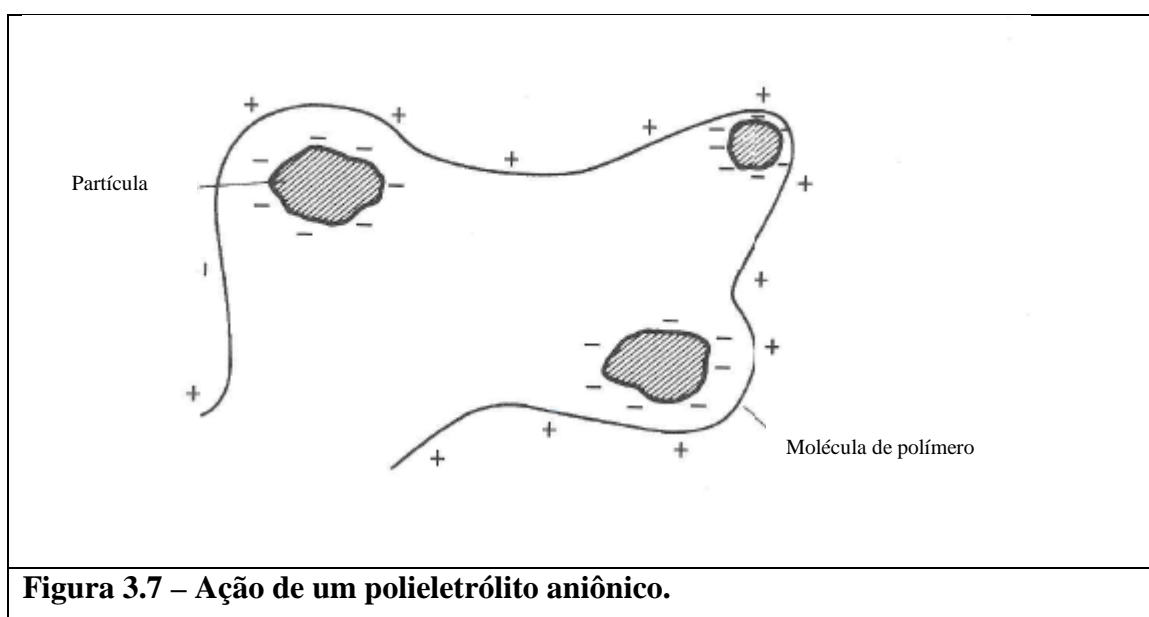
**Figura 3.6 – A dupla camada elétrica**

As poliacrilamidas, que variam amplamente em peso molecular e densidade de carga, são largamente utilizadas como floculantes. A densidade da carga se refere à porcentagem do segmento do monômero acrílico que carrega a carga.

As informações precisas referentes aos produtos disponíveis no mercado geralmente não são reveladas pelos fabricantes de polímeros.

Os fatores que influenciam o grau de floculação são:

- a eficiência ou força de adsorção do polímero na superfície da partícula;
- o grau de agitação durante a floculação;
- o grau de agitação depois da floculação (isto pode resultar na quebra dos flocos).



A taxa de sedimentação e a turbidez são medidas indiretas que fornecem um caminho para a determinação da performance de um processo de floculação, e são governadas principalmente pela distribuição do tamanho dos flocos. A distribuição do tamanho dos flocos pode geralmente ser controlada pela seleção e uso apropriado de flocculantes (Hogg, 2000). Para uma floculação bem sucedida, alguns parâmetros da suspensão como, por exemplo, o pH, a ionicidade, a temperatura, o tipo de flocculante e suas características (peso molecular, densidade de carga e estrutura molecular) são importantes (Werneke, 1979; Atesok, 1988; Hogg, 2000; Yarar, 2001). Desta forma, para que ocorra uma floculação apropriada o tipo de polímero e algumas características da suspensão precisam ser otimizadas.



A escolha do polímero ideal para um dado processo é mais uma arte do que uma ciência, pois existe uma ampla faixa de polímeros disponíveis cujas características detalhadas não são informadas pelos fabricantes (Yong, 1995).

O procedimento mais utilizado para a identificação do tipo de polímero mais adequado para um dado processo é descrito abaixo:

- A amostra a ser investigada é colocada em recipientes, por exemplo, em béckers. Uma quantidade dos polímeros a serem estudados é adicionada na superfície da suspensão. A amostra é então agitada por algumas vezes para que haja a homogeneização do reagente. O material é deixado em repouso. Medidas do deslocamento da interface sólido/água clarificada são realizadas ao longo do tempo. Os polímeros que apresentarem maiores velocidades de sedimentação e melhor clarificação do sobrenadante são posteriormente estudados de forma mais detalhada para otimizar a dosagem.

Como a separação sólido líquido tem sido objeto de maior atenção na literatura técnica recente, artigos abordando tanto o uso de reagentes tanto quanto desenvolvimento em reagentes tornaram-se menos escassos.

Outra abordagem voltada a reagentes (Franks et al., 2008) considera o uso de um único reagente com funções múltiplas visando reduzir o número de espécies químicas no sistema e tornar mais eficiente a flotação e o desaguamento. Dependendo da condição de estímulo, a superfície das partículas pode ser tornada hidrofílica ou hidrofóbica. Partículas hidrofílicas tornam-se dispersas. Partículas hidrofóbicas tendem a se agregar e também a se ligar a bolhas de ar. O polímero sensível à temperatura usado foi poli N-isopropil acrilamida (PNIPAM). A temperatura crítica de transição é 32<sup>0</sup>C, agregação hidrofóbica ocorrendo acima dessa temperatura, consolidação do sedimento com liberação de água ocorrendo em temperaturas inferiores.

Propriedades estruturais do polímero como funcionabilidade, densidade de carga, arquitetura e peso molecular, conformação e cobertura superficial da camada adsorvida

afetam o desaguamento (Mpofu et al., 2003a&b & 2004; Hogg, 1984; Gregory, 1976 & 1989; McFarlene et al. 2005; McFarlene et al. 2008); Addai-Mensah, 2007; Besra et al., 2004; Tjipangandjara e Somasundaram, 1991).

McGuire et al. (2006) verificaram que um copolímero do tipo poliacrilamida anionicamente substituída (carboxilato) é mais eficiente que o copolímero catiônico amino substituído no desaguamento de dispersões de partículas de óxido de ferro negativamente carregadas.

A modificação da química da polpa de dispersões de óxidos de ferro por efeito do pH e da adição de  $\text{NH}_4\text{Cl}$  afeta o potencial eletrocinético e a reologia de dispersão. A taxa de desaguamento é aumentada pela adição de  $\text{NH}_4\text{Cl}$  e pelo ajuste do pH para valores próximos ao do ponto isoelétrico (Addai-Mensh e Ralston, 2004).

### **3.3 - Tratamento Mecânico da Água**

#### **3.3.1 - Flotação**

A flotação é um processo de separação de partículas suspensas em meio líquido baseado na propriedade da interface sólido-líquido. O processo de flotação é o inverso da sedimentação, no qual as partículas acumulam-se na interface líquido-gás das bolhas de ar, induzidas no meio líquido pelo borbulhamento de gás. As bolhas têm densidade menor que a da fase líquida e migram para superfície arrastando as partículas seletivamente aderidas, em função da afinidade da superfície da partícula com a fase gasosa. Constitui-se numa aplicação muito importante, mas bastante complexa da química de superfície. Devido à sua simplicidade operacional, o processo é utilizado para separar uma grande variedade de sólidos, principalmente minerais. (Jafelicci, 2008)

De acordo com Kurita (1999) as substâncias que possuem densidades iguais ou menores que a água, como os óleos, são separadas por flotação. Assim, partículas que apresentam baixa densidade são facilmente flotadas em condições naturais. Neste

processo, bolhas de ar são geradas na água e a adesão das bolhas com as partículas favorece o processo de flotação.

A flotação visa a remoção de partículas em suspensão e/ou flutuantes (fase dispersa) de um meio líquido (fase contínua) para o caso em que a densidade da fase dispersa é menor que a da fase contínua. As partículas da fase dispersa podem ser carregadas para a superfície do tanque de flotação pelo aumento da força ascensional (empuxo) que sobre elas atuam. Esse aumento da força ascensional se deve às bolhas do ar atmosférico de pequeno diâmetro que, ao aderirem à superfície das partículas da fase dispersa, reduzem a densidade aparente do conjunto partícula/bolha. O floco é formado por um conjunto de partículas, em cujos interstícios as bolhas de ar ficam retidas.

De acordo com Ramaswamy et al (2006), a vantagem da flotação é a recuperação seletiva de várias espécies e também é usada para limpeza de água contaminada com óleo. O mecanismo envolvido no processo consiste em vários passos: primeiro, aproximação de uma bolha de ar e uma gota de óleo; segundo, um filme de água muito fino entre a bolha e a gota; terceiro, ruptura do filme de água além da espessura crítica; quarto, união do óleo à bolha de ar; quinto, propagação do óleo na superfície da bolha; e sexto, elevação rápida do conglomerado comparado a uma gota de óleo não fixada devido a redução da densidade.

Macroemulsões, ou emulsões, são definidas como um sistema heterogêneo de um líquido disperso na forma de gota de um outro líquido com tamanhos tipicamente entre 1 e 100 $\mu$ m de diâmetro e com cada gota tendo uma monocamada de surfatante ou emulsão molecular como uma camada. Assim, as duas fases do líquido são imiscíveis, quimicamente não-reativas e o sistema que elas formam é termodinamicamente instável. As emulsões podem consistir de gotas de óleo dispersas em uma fase água contínua (óleo em água) ou de gotas de água dispersas em uma fase contínua de óleo (água em óleo). Este tipo de emulsão que é formada depende de muitos fatores incluindo a razão água/óleo, a estrutura molecular e a concentração de surfatantes, a presença ou ausência de eletrólitos, temperatura e pressão. A estabilidade da emulsão é em função da quantidade de surfatante que é adsorvido na interface. Quanto mais surfatantes na

interface, a tensão interfacial é reduzida, e as moléculas surfatantes atuam como uma barreira retardando a coalescência das gotas pela repulsão eletrostática/estérica. As emulsões requerem um acréscimo de energia no sistema para sua formação. A energia fornecida ao sistema atua para dispersar um líquido dentro de uma fase contínua como gotas, enquanto a área interfacial aumenta. (James-Smith et al, 2007).

Os surfatantes sendo agentes ativos na superfície adsorvem em superfícies óleo/água. O padrão no qual eles adsorvem é bem definido devido às propriedades do final de cada molécula. As extremidades hidrofílicas têm afinidade pela água, enquanto as hidrofóbicas têm afinidade pelo óleo. Isto significa que os surfatantes formam uma película orientada e estabilizada.

Surfatantes são compostos anfifílicos não-poliméricos. Uma molécula de surfatante consiste de um ou mais grupos hidrofílicos (sulfonato, carboxilato) e hidrofóbicos (uma cadeia longa de hidrocarbonetos). O tipo e o número de grupos hidrofílicos afetam a adsorção na superfície sólida e o comprimento da cadeia carbônica afeta sua solubilidade ou dispersabilidade na água, e assim a maneira como ele é aplicado. O mecanismo que tem sido aceito é que surfatantes reduzem a tensão interfacial ar-água. A agregação de partículas finas é facilitada com o uso de combinação de surfatantes e floculantes. (Besra, 1997)

De acordo com Rosen (1979), as moléculas presentes na superfície tem uma energia potencial maior que as moléculas no interior do material. Isto é devido a uma interação mais forte com as moléculas no interior da substância que ele faz com as moléculas gasosas sobre ele. O trabalho requerido, entretanto, é trazer a molécula do interior para a superfície. Agentes ativos na superfície tem uma estrutura molecular característica de um grupo estrutural que tem muito pouca atração para com o solvente, conhecido como grupo hidrofóbico, junto com um grupo que tem uma forte atração para com o solvente, chamado de grupo hidrofílico. Quando o agente de superfície ativa é dissolvido no solvente, a presença do grupo hidrofílico no interior do solvente causa uma distorção da estrutura líquida do solvente, aumentando a energia livre do sistema. Numa solução aquosa do surfatante esta distorção da água pelo grupo hidrofóbico do surfatante, e o

aumento resultante da energia livre do sistema enquanto ele é dissolvido, significa que menos trabalho será necessário para trazer uma molécula surfatante para a superfície. O surfatante ficará concentrado na superfície. Já que menos trabalho é necessário para trazer as moléculas para a superfície, a presença do surfatante reduz o trabalho necessário para criar uma unidade de área superficial (energia livre de superfície ou tensão de superfície). Por outro lado, a presença do grupo hidrofílico impede o surfatante de ser expulso completamente do solvente como uma fase separada.

Um solvente polar como a água é hidrofílico. Como a temperatura e as condições de uso podem variar, modificações na estrutura dos grupos hidrofílicos e hidrofóbicos podem tornar-se necessárias para manter a superfície ativa em níveis adequados.

A tensão superficial é a responsável pela formação das bolhas e pode ser entendida como uma espécie de película que envolve os líquidos. A justificativa para este fenômeno está no fato de que as moléculas situadas no interior de um líquido estão sujeitas a força de atração igual em todas as direções, ao passo que as moléculas situadas na superfície de separação líquido-ar estão submetidas à força de atração não balanceada, o que resulta numa força preferencial em direção ao interior do líquido. O maior número de moléculas se deslocará da superfície para o interior do líquido e a superfície tende a contrair-se. (Jafelicci, 2007)

A linha de tensão pode afetar a estabilidade das emulsões. Sabe-se que pequenas partículas sólidas e gotas líquidas podem ser usadas para afetar o sistema coloidal. Assim, a molhabilidade das partículas (por água e por óleo) pode determinar o tipo de emulsão formada, ou seja, água em óleo ou óleo em água. Na literatura o termo linha de tensão é utilizado para “uma certa tensão linear” nos sistemas bi e tri-dimensionais. (Amirfazli e Neumann, 2004)

De acordo com Shioi et al (2003), interfaces água/óleo ou líquido/ar, nas quais alguns tipos de moléculas estão adsorvidas, apresentam instabilidades causadas pela tensão interfacial. Quando os surfatantes ou alguns tipos de moléculas se movem do seio de uma fase para outra, a energia livre decai para uma condição de equilíbrio.

### 3.3.2 - Filtração

A filtração é o processo que tem como função primordial a remoção de partículas responsáveis pela turbidez; é o processo de purificação onde a água a ser tratada passa através de substâncias porosas. Nas estações de tratamento de água, cabe a filtração a função mais relevante, por se constituir na etapa em que as falhas, por ventura ocorridas na coagulação, floculação e sedimentação, podem ser corrigidas assegurando a qualidade da água tratada. Leitos de areia são muito utilizados uma vez que possibilitam a penetração de impurezas da água bruta sem a deterioração imediata da qualidade do efluente. A areia como meio filtrante apresenta algumas vantagens como o baixo custo e resultados satisfatórios. Quando outro meio filtrante granular, como o antracito, é utilizado o resultado obtido é uma elevada capacidade de filtração devido à formação de multi-camadas do leito filtrante. O leito filtrante pode ser um leito simples de areia ou carvão (antracito), um leito duplo de carvão sobre areia ou um leito misto de carvão, areia e brita.

De acordo com Netto (1991), a filtração é um processo de separação sólido-líquido, envolvendo fenômenos físicos, químicos e às vezes biológicos. Visa a remoção das impurezas da água por sua passagem através de um meio poroso. Quando a velocidade com que a água atravessa o leito filtrante é baixa, o filtro é denominado filtro lento. Quando é elevada, é denominado filtro rápido. Um filtro rápido consiste em uma camada de areia, ou em alguns casos de uma camada de um meio poroso mais grosso e menos denso (antracito) colocado sobre a camada de areia, permitindo taxas de filtração mais elevadas. A granulometria do antracito depende da granulometria da areia a ser adotada, a fim de evitar a mescla indesejável das duas camadas.

Segundo Huisman (1979), como o filtro é um leito de material granular que remove fisicamente material em suspensão da água que passa através dele, a única alteração na qualidade da água que resulta da filtração é a redução dos sólidos em suspensão. Durante o processo de filtração as impurezas são removidas da água, se acumulando nos grãos e na abertura entre os grãos e o meio filtrante, e assim reduzindo o espaço do poro efetivo prejudicando a qualidade da filtração já que há um aumento de pressão no fluxo

da água. Após algum tempo esta resistência criada torna-se tão elevada que é necessária uma limpeza. A maioria dos filtros opera por um período limitado de tempo. Quando a queda de pressão atinge um dado nível, o filtro é obstruído e requer limpeza por retrolavagem. Partículas pequenas podem passar pelo filtro, daí ser importante a preparação da água antes da filtração.

Tipicamente os filtros removem partículas sólidas entre 0,1 e 1000 $\mu\text{m}$  e o mecanismo de transporte depende diretamente do tamanho da partícula. Para partículas maiores que 1  $\mu\text{m}$ , qualquer aumento no tamanho da partícula aumentará a probabilidade de colisão com o meio filtrante facilitando a sua captura. A remoção de sólidos suspensos em filtros envolve duas etapas distintas: transportar a partícula suspensa para a interface sólido-líquido presente no filtro e fixar a partícula na superfície. Algumas partículas já fixadas podem se desprender devido ao aumento das forças de cisalhamento resultante do filtro entupido.(Tansel e Vilar, 2004)

Sendo a filtração um processo físico e químico de purificação da água, existe um grande número de variáveis que influenciam a sua eficiência e estas variáveis são características, tanto da água a ser filtrada quanto do próprio filtro. O conhecimento do modo pelo qual estes fatores afetam a eficiência da filtração cresceu muito rapidamente e seu emprego no projeto e controle de operação tornou possível obter uma substancial melhora qualitativa da água filtrada. Estes fatores são: temperatura da água, filtrabilidade, tamanho, natureza, concentração e qualidade adesiva das partículas coloidais e em suspensão. (Leme, 1979)

O carvão ativado granulado é ocasionalmente usado como meio filtrante, mas geralmente os leitos de carvão são precedidos de areia que serve como proteção para os leitos de troca iônica que se seguem. O carvão ativo absorve traços de cloro ou outros oxidantes que podem prejudicar a resina catiônica e produtos orgânicos que obstruem fortemente resinas aniônicas básicas. O carvão ativo também pode ser utilizado para remover sabores, odores e outras impurezas. Em geral, o filtro de carvão ativo é de fluxo descendente, de pressão vertical, contralavando com água. O carvão utilizado para remover material orgânico dissolvido, entretanto, possui uma capacidade finita que é

determinada por suas propriedades e pela natureza do material orgânico. Quando esgotado, o carvão granulado pode ser substituído por um novo ou por outro regenerado termicamente (Huisman, 1979).

### **3.3.3 - Mecanismos da Filtração**

Inicialmente acreditou-se que a ação limpadora dos leitos filtrantes era inteiramente devida a retenção mecânica; porém, o simples processo de “coar” em um filtro, remove só as partículas de matérias em suspensão, que são maiores do que os espaços entre os grãos de areia. A maior parte das águas precisa ser filtrada ainda mesmo quando uma coagulação/floculação/decantação controlada produz uma água com apenas 10 a 20ppm de turbidez. Antes da água ser aplicada aos filtros, ela deve ser preparada por um processo de coagulação/floculação/decantação. (Babbitt, 1962)

De acordo com Leme (1979), os efeitos do pré-tratamento na filtração se caracterizam na redução da turbidez da água filtrada, que por sua vez se evidencia na qualidade da água purificada sob o aspecto físico. Os efeitos qualitativos da água filtrada obtidos por meio do pré-tratamento são previstos por meio da análise das duas mais importantes características da água floculada, que são o grau de perfeição da floculação e da resistência ao cisalhamento do floco obtido.

O tamanho da areia, a porosidade, a espessura do leito e a taxa de filtração, entre outras variáveis, também poderão exercer um efeito profundo na qualidade da água filtrada, quando a matéria floculada penetrar através do leito por falta de suficiente resistência às forças de cisalhamento que aparecem no leito filtrante. (Leme, 1979)

Os aspectos fundamentais do processo de filtração – taxa de filtração e sentido de escoamento – definem o tipo de filtro. A remoção de impurezas associada ao processo de filtração traz uma combinação de diferentes fenômenos, tais como:

- a) **Tensão Mecânica:** É o processo de remoção mais utilizado, removendo as partículas suspensas que são tão grandes que passam pela abertura entre o grão de areia.



Assim, a superfície do meio filtrante é independente da taxa de filtração. Algumas partículas suspensas podem ser amarradas convergindo espaços entre o meio filtrante (intersticial) enquanto o movimento repentino da água, através dos poros do meio filtrante, cria um gradiente de velocidade, trazendo partículas suspensas em contato uma com a outra. A obstrução do meio filtrante reduz o tamanho dos poros reduzindo a eficiência da filtração.

- b) Sedimentação: Remove partículas suspensas de tamanhos tão pequenos que a abertura dos poros pela precipitação na parte superior da superfície da areia, é exatamente o mesmo caminho do sedimento. O depósito pode se formar na parte inferior. Uma sedimentação eficiente é uma função da taxa entre essa superfície e a velocidade de sedimentação da partícula suspensa.
- c) Adsorção: É a ação mais importante no processo de purificação, removendo partículas suspensas finamente divididas como impurezas moleculares. A força de adsorção tem sua influência externa. O mecanismo de purificação por adsorção é possível somente após outro mecanismo que traga as impurezas a serem removidas para as vizinhanças da superfície de filtração. Muitos desses mecanismos de transportes estão presentes no fluxo intersticial da água, como gravidade, inércia, difusão, forças hidrodinâmicas e tubulares.
- d) Atividade Química: É o processo pelo qual impurezas dissolvidas são quebradas ou convergidas em compostos insolúveis após sedimentação ou adsorção.

Algumas observações podem ser notadas quando a água atravessa o meio filtrante: o tamanho e a resistência do floco. As maiores partículas de flocos podem ser removidas pela ação de coar efetuada na superfície do filtro e a maioria do material floculado consegue introduzir no leito passando através do meio filtrante por milhares de aberturas que existem, alojando-se no seu interior.

A disposição do meio filtrante em relação ao sentido de escoamento da água faz com que a água mais impura encontre primeiramente o material mais grosseiro, de maior

porosidade. À medida que a água se livra de impurezas, no seu movimento vai encontrando meios cada vez mais finos e de menor porosidade. Talvez o maior problema com os filtros surge quando a perda de carga, em um nível qualquer do leito filtrante, supere o peso da camada submergida acima desse nível, fluidificando-o e permitindo que flocos anteriormente depositados passem para o efluente (água filtrada). À medida que prossegue a filtração, pode haver um momento em que ocorre a fluidificação do leito, aumentando a porosidade e permitindo ao material depositado ser arrastado pela água. Observa-se que durante a filtração ocorre uma tendência à fluidificação das camadas superiores de areia, o que ocasiona o arrastamento das impurezas e de flocos retidos do topo do leito filtrante para o efluente. Além disso, as primeiras águas produzidas pelo filtro, geralmente não satisfazem ao rigor da qualidade. Reconhece-se a possibilidade de contaminação da parte superior do filtro pela própria água de lavagem. (Netto, 1991)

Os filtros de areia constituem um leito de material granular (areia) retido por gravidade e dotado de um escoamento vertical. A maior parte das espécies de filtros utilizados no processo de clarificação da água são os filtros rápidos de areia e os filtros lentos de areia.

### **3.3.4 - Filtros Lentos de Areia**

De acordo com Mattenson e Orr (1987) geralmente são empregados na purificação de águas de baixa turbidez e concentração de algas, quase sempre como única potabilização, operando com taxas de 2 a 6 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia. Pela ausência da coagulação no pré-tratamento, não ocorre o mecanismo de aderência, já que o meio filtrante não é lavado por meio de velocidade ascensional que promove o choque entre os grãos para que as partículas a eles aderidas sejam arrastadas com a água de lavagem.

Além da qualidade do efluente, a filtração lenta apresenta algumas vantagens: o fato de prescindir da coagulação química torna a operação mais simples; as baixas taxas de filtração que ocasionam a lenta evolução de perda de carga; e como consequência da ausência da coagulação não há geração de lodo.

Diversos fatores intervêm no desempenho da filtração lenta. Podem ser citados as características da água bruta e do meio filtrante – espessura e tamanho de grão – a taxa de filtração. Contudo, há limitações de ordem prática. Grãos mais finos podem contribuir para a colmatação mais rápida do meio filtrante. A taxa de filtração desses filtros lentos é tão baixa que somente após um período de operação de semanas ou até meses seria necessária a limpeza dos filtros. O material obstruído pode ser removido pela restauração do filtro na sua capacidade original pela raspagem dessa camada suja de areia.

Os filtros lentos de areia antigamente eram de uso comum, porém poucos filtros têm sido construído nos últimos anos pois custam mais caro devido à maior área filtrante requerida e não produzem os melhores resultados. De fato eles não são tão eficientes no processo de clarificação de águas com turbidez elevada.

### **3.3.5 - Filtros Rápidos de Areia**

Os filtros rápidos podem ser classificados como filtros de gravidade e filtros de pressão. Nos filtros de gravidade a água passa através do leito filtrante só pela ação da gravidade. Nos filtros de pressão é utilizada uma pressão hidráulica da tubulação do abastecimento para forçar a água através do leito filtrante. (Babbitt, 1962)

O mecanismo da filtração rápida é extremamente complexo, envolvendo fenômenos físicos (transporte, sedimentação, difusão) e físico-químicos (aderência por forças intermoleculares e/ou eletrostáticas, ponte química) entre as partículas e os grãos do meio filtrante. Durante a filtração, as partículas depositam-se no meio filtrante, e são removidas pela ação de um ou mais dos fenômenos citados. À medida que aumenta o volume de depósitos, a velocidade intersticial aumenta pela redução da porosidade, com um correspondente aumento da perda de carga e das forças hidrodinâmicas de cisalhamento arrastando, em conseqüência, uma certa quantidade de partículas para o interior do leito filtrante. (Netto, 1991)

Segundo Huisman (1979), as partículas a serem removidas nos filtros rápidos de areia com escoamento por gravidade apresentam dimensões diversas em função das quais podem ser apreciadas. Esses filtros consistem de um leito constituído de material granular (areia) retido por gravidade e são dotados de um escoamento vertical descendente. O meio filtrante é normalmente suportado por um leito de cascalho. A areia é colocada em uma série de camadas de variadas espessuras, variando desde o cascalho grosseiro usado no fundo até as partículas de 0,1 polegadas do topo. O material grosseiro absorve energia dos jatos de alta velocidade, que é necessária a atender às seguintes finalidades:

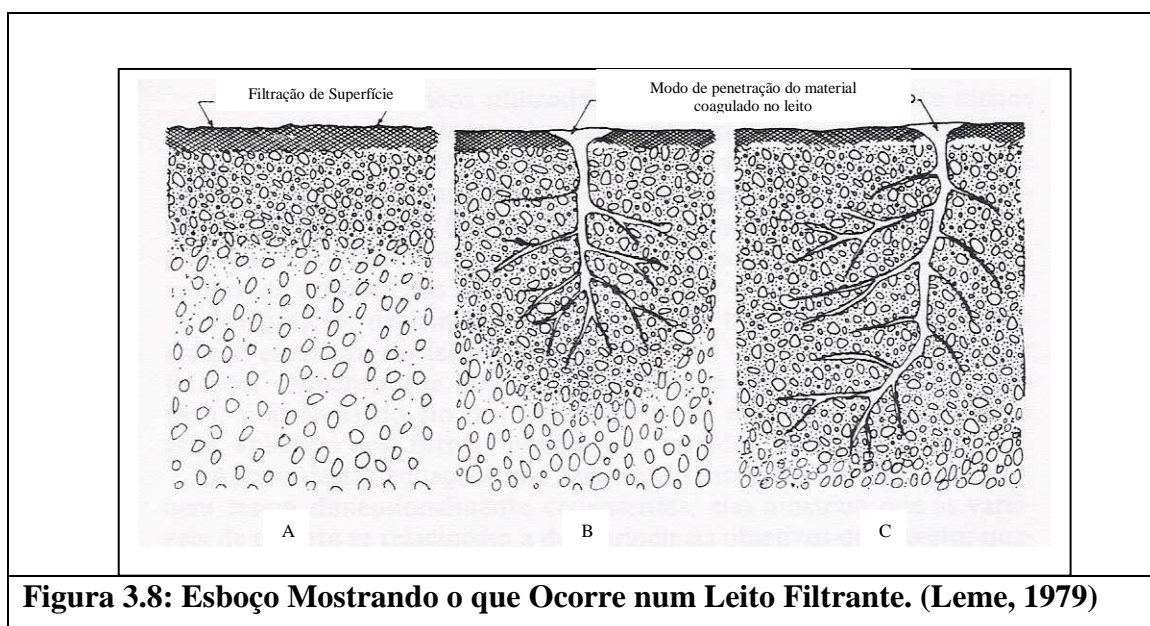
- Difundir uniformemente o escoamento sob a área total do leito de areia durante a operação de lavagem;
- Suportar a areia de modo que ela não possa sair do filtro durante a filtração.

Como consequência da significativa área devido às elevadas taxas de filtração, os filtros rápidos – principalmente os de gravidade e com escoamento descendente – constituem-se no tipo mais utilizado. Os filtros rápidos distinguem-se entre si pela natureza e sentido de escoamento e pelo tipo de meio filtrante. A taxa de filtração é tão elevada que a necessidade de limpeza pode ocorrer em poucos dias. A limpeza dos filtros rápidos é possível pelo processo de retrolavagem, onde o fluxo da água é invertido expandindo o meio filtrante e arrastando as impurezas acumuladas. (Mattenson e Orr, 1987).

Quando um filtro é colocado em serviço, quase todas as partículas de floco passam através do leito, e a turbidez da água filtrada fica longe do padrão desejado. Em virtude do material floculado se alojar entre os grãos de areia, a medida que a água é filtrada, a areia livre fica reduzida e o leito passa a oferecer uma resistência crescente ao escoamento da água. À medida que o escoamento prossegue, as condições do leito continuam a mudar; a taxa de escoamento aumenta através das maiores aberturas e diminui através das menores. A Figura 3.5 apresenta um esboço mostrando o que ocorre num meio filtrante. Nos canais onde a água escoava com velocidade alta ocorre pouca deposição de material floculado. A água conduzindo sedimentos se movimentava através

dos canais até atingir vazios que ainda não foram obstruídos, neles se espalhando, ocorrendo o alojamento dos flocos. Quando os vazios que existem em volta da areia se encherem, os flocos previamente decantados passam a oferecer resistência ao escoamento e novos canais então se formam através das áreas ainda não perfuradas conduzindo a água para setores que ainda não foram obstruídos. (Leme, 1979)

À medida que o escoamento prossegue, as condições do leito continuam a mudar; a taxa de escoamento aumenta através das maiores aberturas e diminui através das menores e das que forem parcialmente obstruídas. Resulta disto que muitos dos maiores caminhos por onde a água flui, permanecem quase livres de material depositado, como pode ser observado na Figura 3.8.



**Figura 3.8: Esboço Mostrando o que Ocorre num Leito Filtrante. (Leme, 1979)**

O filtro é limpo periodicamente com água filtrada por meio de reversão do escoamento e a descarga da água carregada de sedimentos é feita por meio de dreno. Os filtros rápidos de areia são projetados de modo que o escoamento da água de lavagem se dirija para cima e levante o sedimento removido do meio filtrante expandido, conduzindo-o para fora do leito em um ponto de escoamento. (Leme, 1979)

A filtração rápida consiste na conjunção de mecanismos de transporte e aderência. Os primeiros constituem-se fenômenos físicos e hidráulicos afetados pelos parâmetros que

governam a transferência de massa. Os mecanismos de aderência são influenciados por fenômenos predominantemente químicos, tais como a formação de pontes químicas, quando se utiliza polímero como coagulante – forças eletrostáticas e de van der Waals, balizados por parâmetros físicos e químicos também interferem nas etapas de coagulação e floculação. Assim, espera-se remover na filtração uma ampla gama de partículas. (Libânio, 2005)

De acordo com Williams et al (2007), a filtração rápida de água potável tem sido praticada muito mais extensivamente que para água de reuso. Alguns estudos demonstraram que a coagulação melhora o desempenho da filtração e conseqüentemente torna comum o uso de coagulante antes da etapa de filtração de água de reuso. Um pico na turbidez foi observado quando os filtros iniciaram, devido a existência de água de retrolavagem no filtro. A coagulação reduziu a turbidez da água para próximo de 1 NTU, que pode refletir no tamanho e distribuição de novas partículas devido a precipitação do coagulante.

### **3.3.6 - Meio Filtrante**

De acordo com Libânio (2005), na maioria dos filtros utilizados para o tratamento de água o meio filtrante assenta-se sobre a camada do cascalho ou pedregulhos denominada de camada suporte. O meio filtrante e a taxa de filtração possuem uma correlação direta. A partir da taxa de filtração a ser utilizada – isto definirá os filtros como rápidos ou lentos – estabelece-se o meio filtrante. Assim, pode-se definir a taxa de filtração a ser aplicada. Pela conjunção de ambos, define-se o nível inicial de operação, a partir da perda de carga inicial (perda de carga no meio filtrante limpo adicionada à do sistema de drenagem e tubulações), estima-se o nível de água para lavagem e a altura do filtro.

Além da espessura, os meios filtrantes caracterizam-se por:

- Tamanho e distribuição dos grãos: Este item é importante no desempenho dos filtros, seja na qualidade do efluente ou na vida útil do filtro.

- Esfericidade: sua importância concentra-se na determinação da perda de carga no meio filtrante e na estimativa da velocidade de lavagem. O coeficiente de esfericidade relaciona-se à porosidade do meio filtrante e, por consequência, à capacidade de armazenamento de partículas, aumentando a vida útil do filtro.
- Porosidade: consiste na razão entre o volume de vazios e o dos grãos. À medida que o coeficiente de esfericidade cresce, reduzem-se os vazios intergranulares e, em consequência, a porosidade. Grãos mais granulares ou triturados tendem a apresentar maior porosidade. A porosidade também ajuda na estimativa de perda de carga no meio filtrante por ocasião do início do funcionamento e na lavagem.
- Densidade: na essência, não interfere na retenção de partículas, mas apresenta-se como característica na lavagem do meio filtrante, encontrada nos filtros rápidos.
- Dureza: consiste na resistência dos grãos à fragmentação, auxiliando na vida útil do filtro. O antracito e o carvão ativado apresentam dureza inferior em relação a areia.

As características apresentadas na Tabela 3.1 justificam o emprego de filtros de camada dupla (areia e antracito), como o meio filtrante mais utilizado. Por possuir menor densidade que a areia, a camada de antracito mantém-se acima da de areia por ocasião das lavagens. Além disso, a maior porosidade permite penetração mais significativa das partículas através do meio filtrante, prolongando a duração das carreiras mesmo para a significativa elevação das taxas de filtração. (Libânio, 2005)

**TABELA 3.1: Características do Meio Filtrante**

<b>Característica/Meio Filtrante</b>	<b>Areia</b>	<b>Antracito</b>	<b>Carvão ativado</b>
<b>Densidade</b>	2,65	1,45 a 1,73	1,3 a 1,5
<b>Porosidade (%)</b>	42 a 47	56 a 60	50
<b>Esfericidade</b>	0,7 a 0,8	0,46 a 0,60	0,75

Fonte: Cleasby e Logsdon (1999) – Libânio, 2005.

De acordo com Netto (1991), com a finalidade de aumentar a capacidade de armazenamento do leito filtrante, de tal forma que os sólidos removidos sejam distribuídos mais uniformemente entre as camadas mais profundas do leito, tem-se empregado o antracito, com tamanho efetivo aproximadamente igual ao dobro do da areia. O antracito, sendo de menor densidade, tende a permanecer sobre a camada de

areia, após a lavagem em sentido ascendente. A disposição das camadas de antracito e areia sobrepostas com granulometrias diferentes representa uma aproximação da filtração ideal, na qual a água deveria passar no leito filtrante através de grãos cada vez mais finos, no sentido de diminuição da porosidade.

As propriedades do meio filtrante desempenham um fator preponderante na eficiência da filtração. Se bem que sejam fixadas em projeto, podem ser alteradas posteriormente para melhorar a qualidade do efluente ou quando se necessita aumentar a capacidade dos filtros ou mesmo reconstruí-los. As características do meio filtrante que exercem uma influência na eficiência dos filtros são: o tamanho, a forma, e a distribuição dos grãos, a porosidade e a profundidade de leito. (Netto, 1991)

### **3.3.7 - Lavagem do Meio Filtrante**

A retrolavagem dos meios filtrantes é um processo mais crítico que a própria filtração. Mas algumas tolerâncias podem ser aceitas a partir da taxa de filtração ou do tamanho do meio filtrante sem afetar muito a eficiência do filtro. Taxas de retrolavagem incorretas podem levar a perda do meio filtrante. De acordo com Colton et al (1996), a remoção das partículas em suspensão pelo meio filtrante é mais eficiente após o processo de retrolavagem; esta melhora é conhecida como período de maturação e isto tem sido a chave para o tratamento de água industrial. Após o processo de retrolavagem foi observada a presença de partículas retidas no meio filtrante, e foi observada uma forte correlação entre a maturação e o volume de partículas capturadas. Dessa forma, o retorno de uma limpeza dos filtros serve de retenção de partículas reduzindo a passagem de outras partículas durante a maturação.

De acordo com Amburgey (2004), a maturação do filtro, período de degradação da qualidade do efluente imediatamente após a retrolavagem, é um problema conhecido nos tratamentos de água. O período de maturação tem sido estudado por vários pesquisadores e foi encontrado que mais de 90% das partículas passando através de um filtro bem operado podem produzir o efeito de maturação. O período de maturação do filtro não é um entendimento completo e a passagem das partículas nem sempre é bem



controlada. Dessa forma esta água filtrada durante o período de maturação é descartada. Procedimentos envolvendo a adição de coagulante na água de retrolavagem (polímeros) ao filtro durante a atividade de retrolavagem tem sido aplicada. Há evidências que a adição de polímeros durante uma filtração pode reduzir a turbidez durante o período de maturação.

O filtro é limpo periodicamente com água por meio de reversão do escoamento. Os filtros rápidos de areia são projetados de modo que o escoamento da água de lavagem se dirija para cima e levante o sedimento removido do meio filtrante expandido, conduzindo-o para fora do leito em um ponto de escoamento.

De acordo com Netto (1991), os filtros rápidos são lavados a contracorrente (por inversão de fluxo), com uma vazão capaz de assegurar uma expansão adequada para o meio filtrante. Estudos recentes tem evidenciado que a colisão e a abrasão das partículas durante a lavagem tem pouca ou nenhuma ação na limpeza do meio filtrante, sendo a ação das forças cortantes hidrodinâmicas, resultantes do fluxo ascensional da água entre as partículas, que produz o efeito desejado. Convém observar que as características do meio, tais como tamanho efetivo, coeficiente de uniformidade e peso específico têm mais influência do que a própria velocidade de lavagem, desde que ocorra a fluidização do meio. Se a lavagem for inadequada, permanece aderida uma película de flocos ou impurezas em volta dos grãos. Essa película sendo compressível, a medida que aumenta a perda de carga através do meio filtrante, os grãos são comprimidos uns aos outros, surgindo então fendas e gretas.

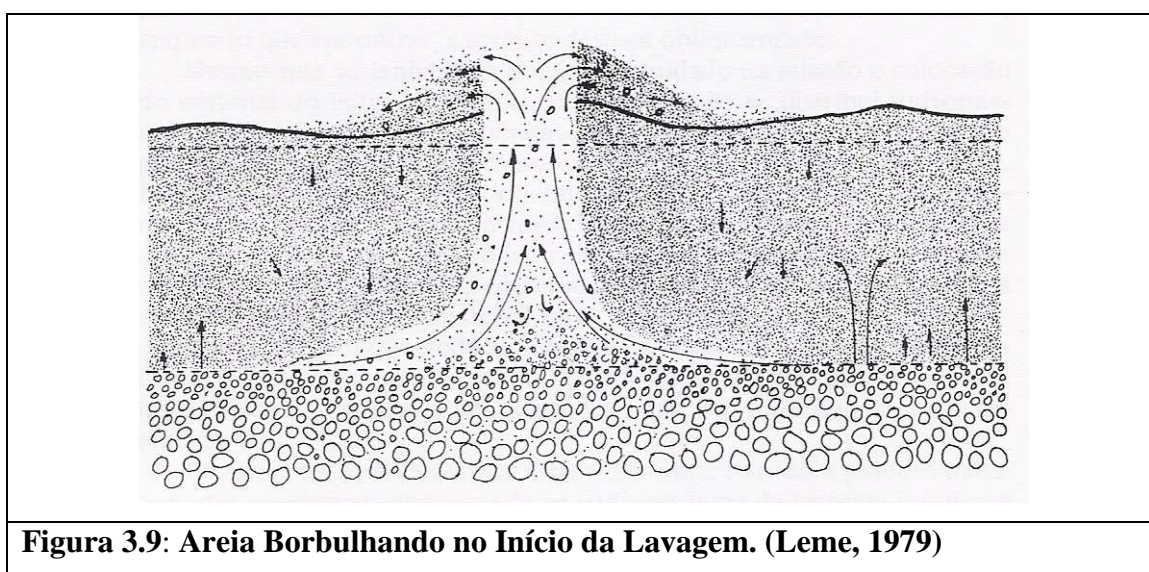
O processo de retrolavagem é um estágio vital na eficiência da operação dos filtros rápidos. A operação de retrolavagem consiste em reverter o fluxo de água para remover os depósitos com a própria água. A retrolavagem pode ser acompanhada por alguns métodos auxiliares de limpeza tais como ar ou jatos de água. Os tipos mais comumente utilizados são: (i) somente água a uma taxa para fluidizar o leito, (ii) ar seguido de água, (iii) simultaneamente ar e água. Os processos de filtração e retrolavagem no ciclo operacional estão intrinsecamente ligados. Retrolavagem ineficiente afetará os ciclos subsequentes de filtração. Similarmente, mudanças nas condições de filtração como

aumento da concentração do efluente pode reduzir a eficiência ou o regime fixado da retrolavagem. (Hall e Fitzpatrick, 2000)

Segundo Huisman (1979), quando se inicia a lavagem os grãos de areia não se movem separadamente através do leito com rapidez uniforme. É necessário certo tempo de lavagem para que a areia se equilibre durante a expansão e, se o início for repentino, isto ocasionará um levantamento completo do leito acima do cascalho que produzirá um vazio entre ele e a areia, rompendo-se o leito num ou vários pontos e desmoronando-se a camada superior do cascalho (Figura 3.6). Esta ocorrência, que exige uma reconstituição da camada de cascalho, evidencia a necessidade de ser evitada, o que se consegue providenciando-se na instalação a possibilidade de se abrir sempre gradual e lentamente a válvula de lavagem.

Em leitos constituídos de antracito, existe a necessidade da expansão do leito se processar até atingir um nível acima dos jatos com o objetivo de se evitar a perda de antracito, que é lançado para fora do leito com maior facilidade que a areia em virtude da turbulência da água de lavagem superficial. (Leme, 1979)

A Figura 3.9 apresenta o modo como a areia borbulha no início da lavagem. Observe que há um deslocamento das partículas do meio filtrante.



**Figura 3.9: Areia Borbulhando no Início da Lavagem. (Leme, 1979)**

De acordo com Stevenson (1995), na prática, os meios filtrantes não possuem o mesmo tamanho de grão; isto pode variar com o tamanho da partícula e sua distribuição. Se a lavagem é sem a corrente de ar inicial, logo se formarão lacunas; mas se a corrente de ar é utilizada o meio filtrante pode compactar até 38% das lacunas formadas na expansão.

Segundo Leme (1979), como resultado de deficiências de lavagens do leito filtrante podem ocorrer modificações dos leitos da areia e do cascalho que influem de maneira prejudicial na eficiência qualitativa da água filtrada. Estas modificações consistem em:

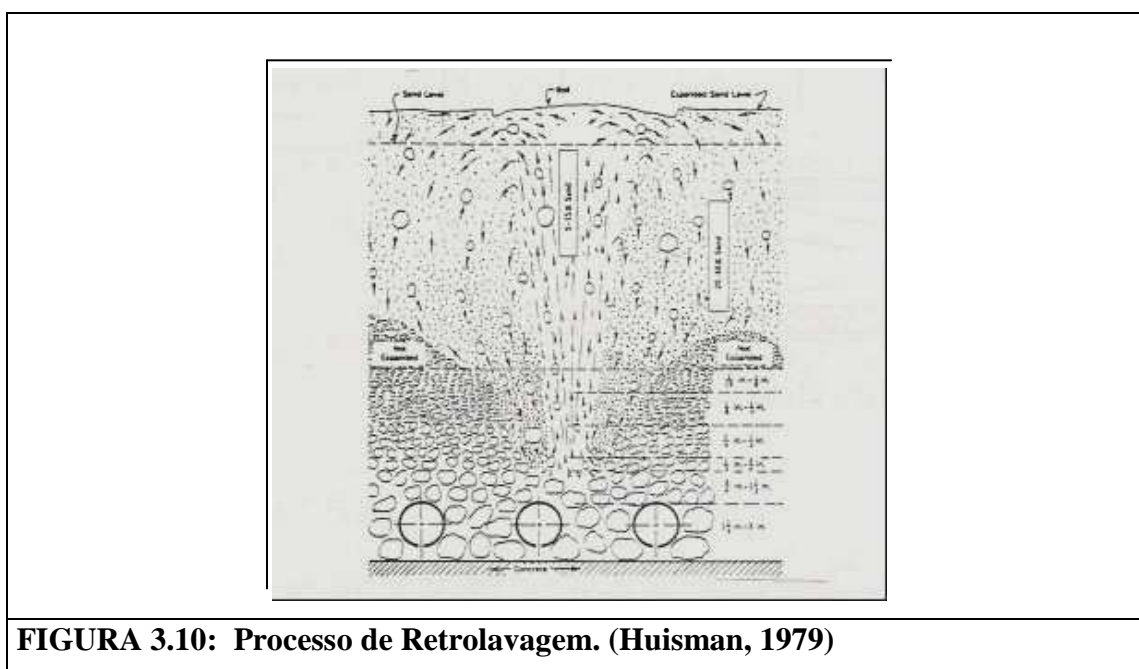
- Distúrbios produzidos na camada de cascalho por jatos de velocidades elevadas, resultantes do emprego de altas taxas de lavagem. Estes distúrbios, que constituem na desarrumação do cascalho, contribuem para a ocorrência de fuga de areia através da água filtrada.
- Formação de bolas de lama no meio filtrante como resultado de lavagens inadequadas, que permitem acumulação e compactação de materiais retidos durante a filtração e não removidos na lavagem.
- Compressões produzidas no leito filtrante, devido a pressões exercidas sobre ele pela água acumulada acima da sua superfície, por causa do aumento da perda de carga e do recobrimento da superfície por uma camada mole de material removido na filtração.

A perda do meio filtrante durante o processo de retrolavagem é mencionada por Humby e Fitzpatrick (1995). Foi realizado um estudo sobre a perda do antracito utilizando a fase ar. Foi observada uma perda de aproximadamente 5% em massa e seu tamanho foi reduzido em 2,5%, ou seja, o atrito ocasiona a quebra do material tornando sua função ineficiente. Foi utilizado um teste acelerado de retrolavagem para determinar a perda do meio filtrante.

Quando, num filtro, os grãos de areia se acham limpos, eles se equilibram entre si e, a não ser que ocorra alguma vibração do filtro, existirá pequena compactação no leito à medida que cresce a perda de carga. Se, entretanto, os grãos de areia forem cobertos por

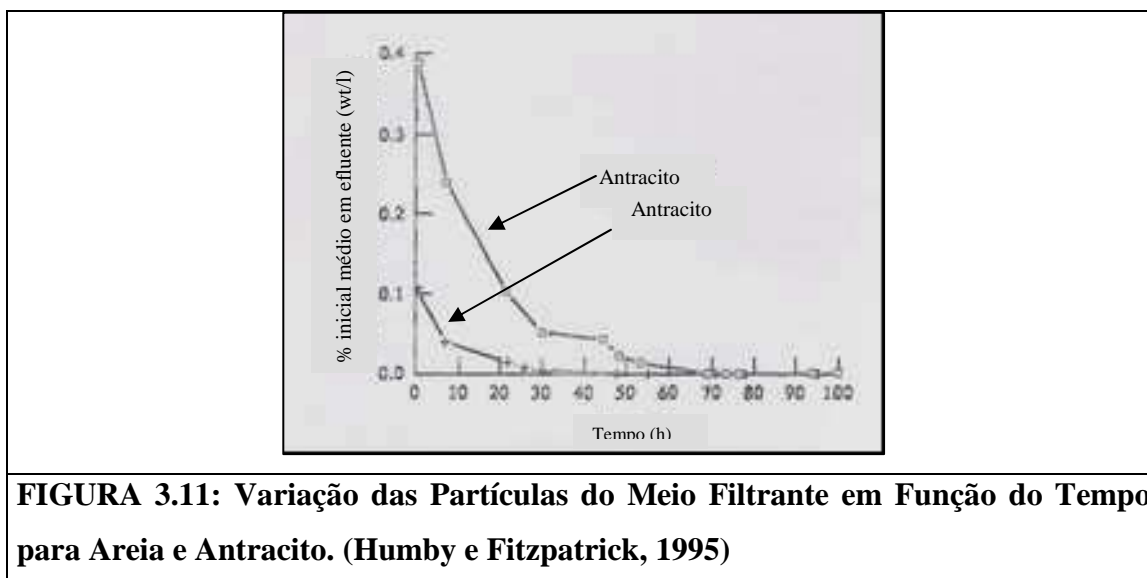
uma camada mole, o leito será comprimido à medida que aumentar a perda de carga, podendo então formar trincas.

A operação de lavagem dos filtros (Figura 3.10) dá-se em fluxo ascendente, na maioria dos casos objetivando a fluidização do meio filtrante. A ressalva quanto à maioria refere-se ao emprego da lavagem auxiliar com ar quando essa não visa a expansão do meio filtrante, como no caso dos filtros de camada simples de maior espessura. Problemas com meio filtrante, tais como formação de bolas de lama e sulcos na superfície, traduzem o principal resultado de sucessivas lavagens ineficazes, culminando com a queda de qualidade do efluente e a substituição do meio filtrante. Essas situações não ocorrem no caso de filtração lenta. (Huisman, 1979)



De acordo com Humby e Fitzpatrick (1995), a retrolavagem utilizando somente água em seu processo mostrou-se ineficiente devido ao número limitado de impactos que ocorrem entre os grãos. A maioria das limpezas mostrou-se efetiva com a combinação ar e água, favorecendo o atrito entre os grãos. A Figura 3.11 mostra que há uma variação do atrito em função do tempo que decresce exponencialmente. Isto ocorre devido à primeira ruptura (remoção acentuada dos cantos e bordas) ser inicialmente

rápida. A Tabela 3.2 apresenta as alterações no tamanho e distribuição do meio filtrante antes e após a retrolavagem.



**TABELA 3.2: Tamanho médio e coeficiente de uniformidade dos meios filtrantes antes e após a retrolavagem**

Meio Filtrante	Tamanho ( $d_{5\%}$ - $d_{95\%}$ )	Coefficiente de Uniformidade
Antracito – antes	1,18-2,45	1,50
Antracito – depois	1,24-2,36	1,45
Areia – antes	1,07-1,94	1,36
Areia - depois	1,07-1,85	1,26

Fonte: Calculado de acordo com a BEWA (1993) – Humby, 1995.

Fitzpatrick (1997) utilizou a técnica de endoscopia para avaliar a agregação e separação de partículas no meio filtrante. Durante a retrolavagem há um movimento rápido e vigoroso dos grãos e a separação dos depósitos. A agitação do meio filtrante causada pelo colapso de bolhas de ar resulta na variação de pressão no leito filtrante. Essa variação de pressão pode ser monitorada estabelecendo condições de fluxo resultando no movimento do grão e abrasão do meio e assim uma limpeza mais eficiente. A lavagem do meio filtrante utilizando somente água apresentou pouca floculação devido a pouca agitação dentro do leito. Isto era esperado já que a lavagem com água causa

pouca abrasão do grão. A lavagem do meio filtrante utilizando a corrente de ar afeta a porção superior do leito. Isto aumenta a agitação com o colapso de bolhas, favorecendo o atrito entre o meio filtrante resultando numa limpeza mais eficiente.

As bolas de lama constituem-se de aglomerados de partículas e grãos de meio filtrante, de dimensões de 5cm, que não foram rompidos durante a lavagem. Com o passar do tempo, esses aglomerados consolidam-se, podendo avançar em direção ao fundo do filtro, e fazem com que a água (e também ar quando utilizado) crie caminhos preferenciais na sua vizinhança favorecendo o aparecimento de fissuras na superfície do meio filtrante que geralmente se iniciam nas paredes dos filtros. Em estações de filtração direta, nas quais se utilizam polímeros como auxiliares na coagulação, as principais funções desses compostos orgânicos são favorecer a aglutinação e aumentar a resistência dos microflocos (concorrem para agravar o problema da formação dessas bolas de lama). Com o aumento da resistência e da densidade da lama, reduz-se a possibilidade de que sejam arrastadas durante a lavagem e aflorem na superfície do meio filtrante, aumentando a perspectiva de maior penetração no interior do meio filtrante. Para filtros de escoamento ascendente, a velocidade mínima eleva-se para 80cm/mim e tempo mínimo de lavagem para 15min.

Segundo Libânio (2005), para filtros de camada dupla, o emprego de lavagem auxiliar com ar tem-se mostrado eficiente na limpeza do meio filtrante e em evitar a formação de bolas de lama. O ar vem de compressores de baixa pressão (aproximadamente 50 KPa) e escoam em tubulação própria. A lavagem com ar ocorre por cerca de 2 a 4 minutos, e a lavagem com água por 4 a 6 minutos, após o desacionamento do compressor. Recomenda-se, logo após o término da aplicação do ar, baixar a velocidade ascensional de lavagem para facilitar a expulsão de bolhas de ar que possam estar aderidas ao meio filtrante. Em algumas estações, há um período de duração da lavagem, da ordem de 2 minutos, no qual o ar é aplicado simultaneamente à água, esta com metade da velocidade ascensional definida para plena expansão do meio filtrante.

A recomendação da norma NBR 12216 de tempo mínimo de lavagem de 10 a 15 minutos, dependendo do tipo de filtro, objetiva assegurar um mínimo de eficiência da

operação, pela impossibilidade de se prever o grau de colmatação do meio filtrante. (Libânio, 2005).

Durante a filtração, ocorrem dois tipos de perda de carga: turbulentas e laminares. As perdas turbulentas são localizadas e contínuas, resultando do escoamento através do sistema de drenagem do fundo do filtro, sobre o qual se assenta o meio filtrante, e das tubulações adjacentes, incluindo registros, curvas que conectam os filtros entre si e ao tanque de contato. As perdas de carga laminares sucedem-se através do meio filtrante e da camada suporte que o regime de escoamento acaba por caracterizá-las. Definidas as características do meio filtrante e a temperatura da água, a perda de carga passa a ser função da taxa de filtração. A medida que a filtração evolui, a retenção de partículas reduz a porosidade e aumenta a magnitude da perda de carga (Libânio, 2005).

A limpeza usada nos filtros de água industriais tem sido um processo de pouco entendimento. Filtros rápidos tem sido usados como um polimento final após a coagulação e a sedimentação, ou como um estágio grosseiro para remoção de partículas preliminares antes da filtração lenta. Estes filtros requerem limpeza quando os sólidos capturados ficam retidos no leito filtrante. O processo de limpeza é a retrolavagem, porém a prática utilizando ar promove a perda de partículas. (Chipps et al, 1993)

### **3.4 – Fluidização**

As características de um leito fluidizado poderão ser melhor compreendidas examinando o comportamento de um sólido dividido, quando em seu interior passar um fluido.

De acordo com Gomide (1980), ao atravessar o leito poroso, o fluido perde pressão, porém não movimenta as partículas. A medida que aumenta a velocidade do fluido, a perda de pressão também aumenta, a princípio linearmente e depois aproximadamente com a potência de 1,8 da velocidade. O aumento da perda de carga do fluido através do leito prossegue até que as partículas sólidas fiquem soltas umas das outras. Este estado pode ser classificado como calmo/tranquilo. Cada partícula é separada das que a

circundam pela fase fluida. O sistema apresenta as características de um fluido, e como tal, cede sob a ação de qualquer esforço externo, permite a flutuação de corpos menos densos do que o leito, que causam até a formação de ondas na superfície. No entanto, por estarem soltas uma das outras, as partículas ainda são livres para se movimentarem de um ponto a outro do leito.

Se a velocidade continuar a aumentar, a perda de carga variará de modo apreciável porque a perda de atrito nas paredes é relativamente pequena em comparação ao peso do leito, porém a característica do leito poroso continuará sofrendo alterações importantes. Há primeiro uma expansão do leito e depois as partículas separam-se uma das outras, começando a se movimentar. Neste ponto a perda de carga pode até diminuir um pouco em virtude do aumento da porosidade e começa propriamente a fluidização do leito. As partículas passam a se movimentar desordenadamente de modo vigoroso no interior do leito. De fato, a velocidade do fluido no leito é muito maior do que acima dele e quando uma partícula sólida é arrastada, ela acaba retornando ao leito, ao menos que seja muito fina. Mesmo havendo arraste de partículas finas, a maior parte do sólido ainda permanece no leito. (Gomide, 1980)

A técnica do leito fluidizado envolve a suspensão do sólido finamente dividido numa corrente ascendente do fluido numa velocidade suficientemente elevada para causar a flutuação e a movimentação vigorosa das partículas. O sistema fluidizado é uma suspensão que possui a maioria das características normalmente apresentadas pelos fluidos verdadeiros.

Segundo Hartman et al (2007), durante qualquer tratamento de água de reuso lamas problemáticas são inevitavelmente formadas, com composição e propriedades que variam amplamente com sua origem e com a tecnologia de tratamento empregada. Todos os indicadores sugerem que a produção de lama continuará crescendo e é necessário encontrar um descarte viável para este subproduto. A lama de água de reuso é uma suspensão diluída de uma variedade de colóides e pode ser secada em um leito fluidizado. Em geral, leitos fluidizados podem ser operados de diferentes modos. Do ponto de vista de engenharia, dois estados hidrodinâmicos de um leito devem ser



sempre considerados: o início da fluidização, que ocorre a uma velocidade mínima de fluidização, e o início do arraste, que ocorre muito próximo da velocidade terminal do leito de partículas.

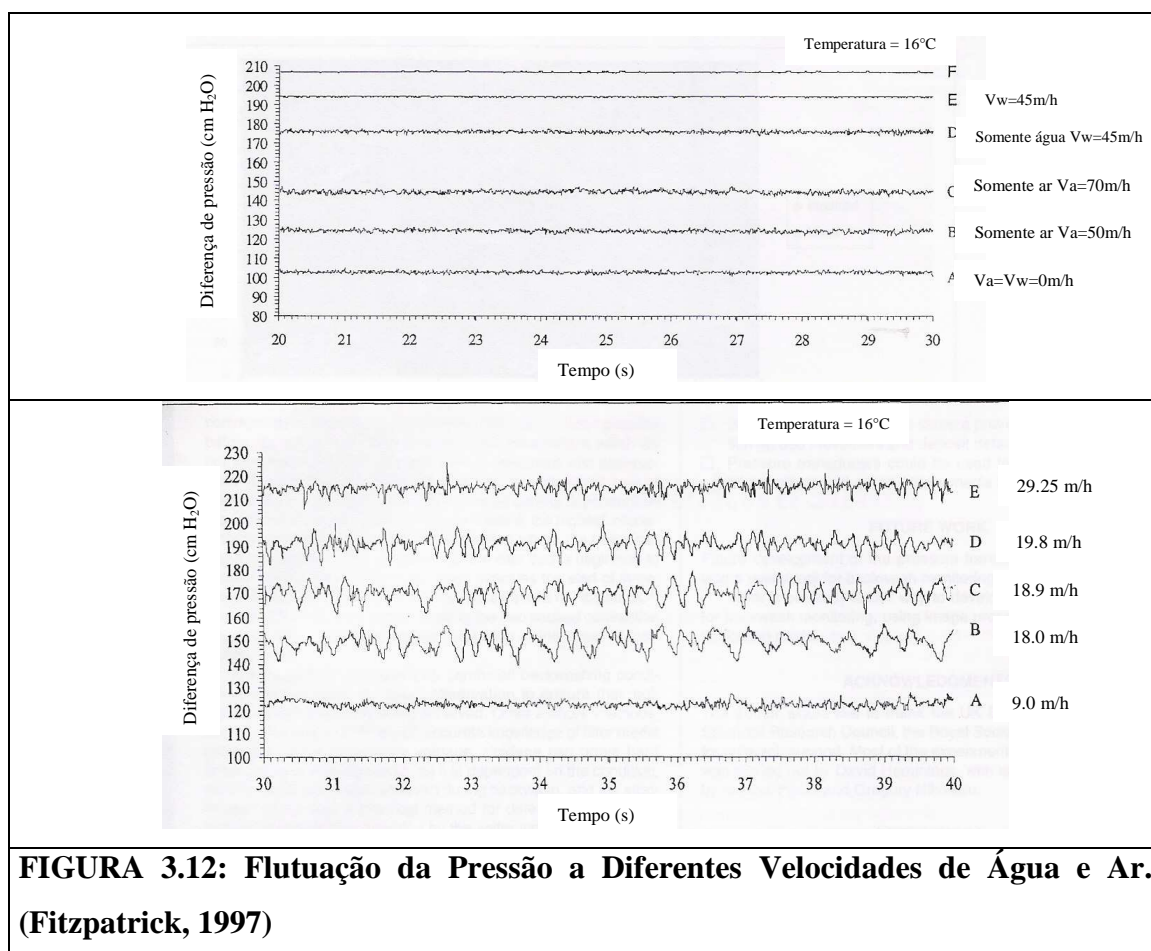
### **3.4.1 – Condições da Fluidização**

As condições propícias para uma boa fluidização dependem do estado físico e das características de sólido, principalmente densidade e granulometria. Segundo Gomide (1980), as partículas movimentam-se individualmente de modo desordenado através do leito. O comportamento do sistema é aproximadamente independente do tamanho e da forma das partículas e o próprio percurso é relativamente constante. Quando um sólido é fluidizado por este mecanismo, não há expansão apreciável do leito estático antes da fluidização. Isto ocorre quando o fluido e o sólido tem a mesma densidade.

Fitzpatrick (1997), utilizou a técnica de endoscopia para estudar a agregação e a separação das partículas no leito filtrante. Durante a retrolavagem nos filtros rápidos de gravidade há um movimento rápido dos grãos e separação de depósitos, onde foi utilizado um vídeo para ver dentro do leito na escala do grão. As imagens obtidas de dentro do leito filtrante foram utilizadas para medir a velocidade do grão de areia, dando uma indicação de como é vigorosa uma retrolavagem, e a imagem indica quando o leito é limpo.

A agitação do leito filtrante causado pelo colapso de bolsas de ar resulta na variação de pressão no leito filtrante. Essa variação de pressão pode ser monitorada estabelecendo condições de fluxo resultando no movimento do grão e abrasão do meio e assim uma limpeza mais eficiente. A Figura 3.12 apresenta sinais da sonda durante a fluidização somente com água e corrente de ar para diferentes velocidades de ar e água. Os sinais mostram pouquíssima floculação, como houve pouca agitação dentro do leito. Isto era esperado, já que a lavagem com água causa pouca abrasão do grão ou do leito floculante. Amirtharajah (2004) observou que somente a corrente de ar afeta a porção superior do leito. Quando a combinação de ar e água foi utilizada, o sinal de pressão mostrou um aumento na atividade com alterações visíveis com o aumento da velocidade

da água. Isto foi confirmado com as imagens de vídeo. A agitação do leito foi evidente com o colapso de bolhas no leito e nas zonas mortas, confirmado pelo pequeno ou nenhum movimento dos grãos de areia. (Fitzpatrick, 1997)



Vários modelos de filtração têm sido desenvolvidos para descrever o processo de deposição para filtros rápidos. Em contraste, poucos modelos têm sido desenvolvidos para descrever o processo de retrolavagem, particularmente em termo de volume de depósitos para serem removidos do leito e o tempo utilizado para um bom regime de retrolavagem. (Hall e Fitzpatrick, 2000)

A retrolavagem simultânea com ar e água envolve três fases: uma líquida (água), uma gás (ar) e uma fase sólida (areia). Poucos trabalhos analíticos têm sido cuidadosos com as propriedades fundamentais do sistema da retrolavagem usando ar e água simultaneamente particularmente com atenção à hidrodinâmica e às fases individuais.

De acordo com Cassanelo *et al* (1995), a hidrodinâmica do leito fluidizado gás-sólido é um sistema caótico. O comportamento caótico pode originar do movimento das partículas e, conseqüentemente, também pode interferir nas propriedades do sólido na fluidização. (Fitzpatrick e Hall, 1999)

### **3.4.2 – Interfaces Fluidas**

De acordo com Sissom e Pitts (1972), um fluido por sua natureza, deve formar interfaces com um sólido ou com outros fluidos. O comportamento de um fluido numa interface depende das forças relativas de coesão, a atração mútua entre as moléculas de um fluido, e de adesão, a atração entre as moléculas de um fluido e as moléculas de uma superfície adjacente. Uma molécula fluida no interior de um corpo fluido é atraída, com igual intensidade e superfícies opostas, pelas moléculas adjacentes. Contudo, uma molécula sobre uma superfície fluida não pode ser atraída igualmente em todas as direções, podendo ser atraída mais por um contorno sólido.

As superfícies livres assemelham-se a membranas flexíveis, necessitando de energia para alterar suas formas. Essa energia de superfície é denominada tensão superficial e é a força atuante sobre uma linha da superfície livre de um líquido por unidade de comprimento. Quando um corpo fluido for grande e as interações da superfície forem desprezíveis, dizemos que a superfície externa é uma superfície livre.

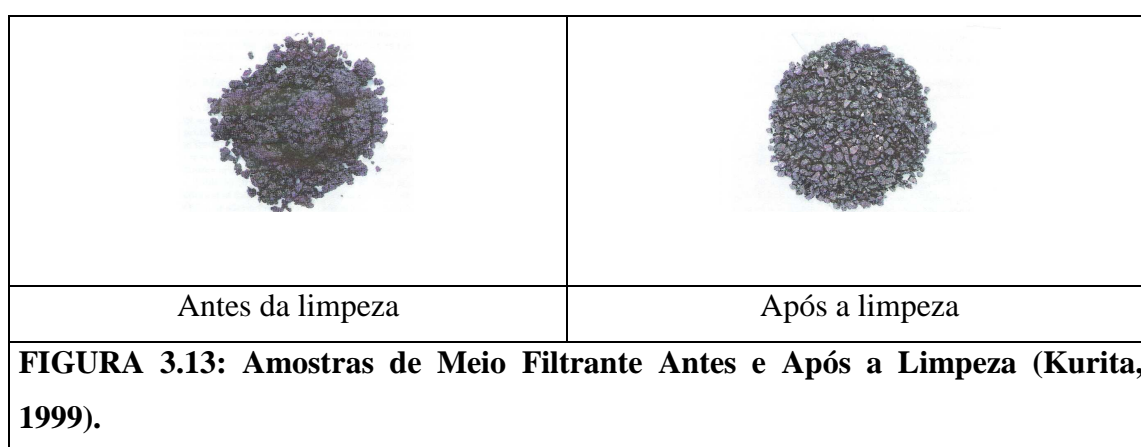
## **3.5 - Agentes de Limpeza para Equipamentos de Tratamento de Água**

De acordo com Kurita (1999) o uso do filtro durante um longo tempo acumula gradualmente sujeira na superfície do filtro dificultando sua remoção no processo de retrolavagem (Figura 3.13). A sujeira acumulada causa vários problemas na operação de filtração como:

- Aumento da diferença de pressão entre a válvula de entrada e a válvula de saída resultando na redução da taxa de filtração;
- Aumento no consumo de carga e eletricidade da bomba;

- Deterioração da qualidade da água filtrada;
- Aumento na frequência de retrolavagem e da quantidade de água consumida na retrolavagem;
- Aumento das frequências de reposição de meios filtrantes elevando o custo.

O tipo de sujeira varia de acordo com a característica da água a ser filtrada, tais como: lama, lodo, óleos e graxas, óxidos e hidróxidos metálicos, excesso de coagulante e floculante.

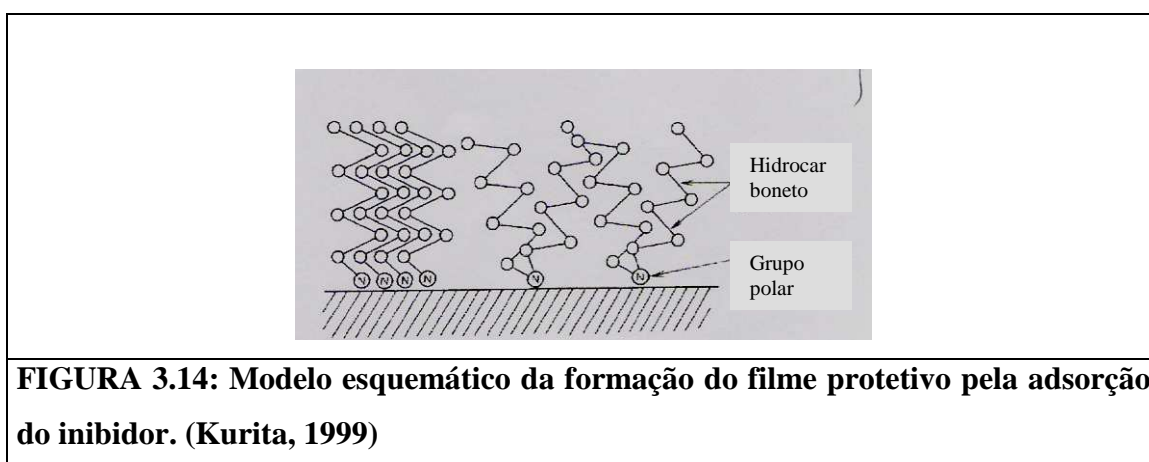


Dessa forma existem alguns tipos de agentes de limpeza utilizados para limpeza dos filtros tais como ácidos, álcalis, surfatantes e microbicidas. Estes agentes são utilizados de acordo com a composição da sujeira aderida nos filtros. A combinação de álcalis e surfatantes é geralmente usada para conter sujeira de alta concentração de óleos. Ácidos são usados geralmente junto com surfatantes para remover óxidos metálicos. A combinação de biocidas e surfatantes é usada para remover lodos.

De acordo com Kurita (1999), os agentes de limpeza química apresentam vantagens e desvantagens de acordo com a composição, tipo e quantidade de sujeira. O ácido clorídrico é frequentemente usado para limpezas químicas devido a seu forte poder de dissolução (exceto para a sílica) e por ser economicamente viável. Além disso, os sais formados pela reação são altamente solúveis e sua redeposição ocorre muito raramente na neutralização do processo após a limpeza ácida. As condições da superfície após a limpeza são melhores. Porém, o ácido clorídrico pode causar corrosão por pite pelos

íons cloreto. Outra desvantagem do ácido clorídrico é a formação do gás cloro para o meio ambiente. Juntamente com o ácido clorídrico podem ser utilizados inibidores de corrosão minimizando o efeito da corrosão.

Várias substâncias orgânicas com relativamente alta massa molar, como as aminas alifáticas, são geralmente usadas como inibidores de corrosão para limpeza ácida. Um inibidor típico de corrosão tem dois tipos de grupos funcionais; um deles é um grupo polar para adsorver na superfície metálica e outro é um tipo de hidrocarboneto hidrofóbico. Este tipo de inibidor forma um filme protetivo na superfície metálica (Figura 3.14).



Vários fatores influenciam no efeito da limpeza química e a corrosão metálica ao mesmo tempo. Entretanto, as condições de limpeza apropriada definem o tipo de efeito resultante. A dosagem e a concentração do agente de limpeza podem remover uma quantidade maior que a calculada de sujeira. A velocidade é outro fator relevante; a concentração do agente de limpeza é reduzida na superfície porque é consumido reduzindo o efeito da limpeza – a alta velocidade do fluxo acelera a remoção mecânica e também acelera a velocidade de corrosão. (Kurita, 1999)

### 3.6 – Óleos

Segundo Young (1979), óleos e graxas podem ser caracterizados de três maneiras: pela polaridade, biodegradabilidade e características físicas. Óleos e graxas polares

normalmente são derivados de material animal e vegetal. Em geral é de conhecimento que óleos e graxas polares são biodegradáveis e, portanto, tornam-se parte da carga orgânica que deverá ser tratada num processo biológico. Óleos e graxas não-polares geralmente são derivados do petróleo ou fontes minerais e geralmente são considerados não-biodegradáveis. Pelas características físicas, óleos e graxas geralmente são indicados como não-flotáveis ou dispersado (emulsificado) *versus* não-dispersado.

### 3.6.1 - Óleos Minerais

São os mais importantes para o emprego da lubrificação. Os óleos minerais são obtidos do petróleo a partir da destilação. Os óleos lubrificantes minerais podem ser classificados em naftênicos e parafínicos que apresentam propriedades peculiares de acordo com suas aplicações. Pode-se pela refinação adequada melhorar a resistência e a oxidação do lubrificante, abaixar seu ponto de fluidez e aumentar seu índice de viscosidade. A Tabela 3.3 apresenta algumas características dos óleos minerais.

**TABELA 3.3: Características dos Óleos Minerais**

<b>Características</b>	<b>Parafínicos</b>	<b>Naftênicos</b>
Ponto de Fluidez	Alto	Baixo
Índice de Viscosidade	Alto	Baixo
Resistência a Oxidação	Grande	Pequena
Oleosidade	Pequena	Grande
Resíduos de carbono	Grande	Pequeno
Emulsibilidade	Pequena	Grande

Fonte: Albuquerque, 1977.

### 3.6.2 – Óleos Lubrificantes

De acordo com Moura e Carreteiro (1975), definem-se como lubrificantes substâncias que, interpostas entre duas superfícies, em deslocamento relativo, diminuem a resistência ao movimento. A função do lubrificante é possibilitar que o movimento se faça com um mínimo de aquecimento, ruído e desgaste. Observam-se duas características do comportamento dos lubrificantes com as superfícies em movimento:

a) reduzem-se as forças de atrito, pois a resistência dos fluidos ao deslocamento é muito menor que as forças de adesão e cisalhamento; b) reduz-se o desgaste por se evitar o contato sólido das superfícies.

Os lubrificantes se dividem em três grupos: sólidos, líquidos e pastosos. O petróleo é a grande fonte dos óleos minerais e é constituído de uma mistura de centenas de hidrocarbonetos. Os óleos lubrificantes minerais podem ser classificados em naftênicos e parafínicos, porém não existe nenhum óleo parafínico ou naftênico puro. Os naftênicos são utilizados na lubrificação dos êmbolos de máquinas alternativas diminuindo a tendência de colagem dos anéis de segmento. Já os parafínicos alteram-se menos com a temperatura. (Moura e Carreteiro, 1975)

Muitos ensaios foram estabelecidos com o objetivo de determinar as propriedades físicas e químicas dos lubrificantes, bem como seu comportamento mecânico, resistência e reação com água.

- a) Ponto de congelamento: ponto a partir do qual o óleo perde sua fluidez e capacidade de escorrer.
- b) Ponto de fulgor: ponto a partir do qual se formam vapores capazes de inflamar-se na presença de uma chama por um instante;
- c) Ponto de combustão: é o ponto no qual se formam vapores suficientes para manter uma combustão contínua durante 5 segundos (geralmente 3 a 5°C acima do ponto de fulgor).
- d) Carvão residual: o ponto de fulgor e o carvão residual são propriedades que dão a volatilidade de um óleo. Um óleo bom para lubrificação deve ser pouco volátil para manter uma película líquida sobre as paredes do cilindro e suficientemente volátil para evaporar-se e queimar-se sem deixar resíduos. Dessa forma, um óleo de baixo teor de carbono é o mais adequado na lubrificação.
- e) Cor: devido aos atuais processos de refinação este parâmetro deixou de ser uma característica marcante.

- f) Resistência a oxidação: um óleo submetido a altas temperaturas, em presença do ar, tende a formar produtos de oxidação prejudiciais; as altas temperaturas desenvolvem a tendência dos óleos de corroer as superfícies metálicas.
- g) Detergência: é a propriedade de certos óleos de não permitir a deposição de resíduos resultantes da queima de combustível e oxidação de óleo, que normalmente depositam-se nas superfícies.
- h) Dispersão: propriedade onde certos óleos impedem que se aglomerem e, depositam-se em seguida, os produtos de oxidação e queima. O poder dispersante mantém divididas e em suspensão as partículas de carbono, que não se depositam.

Para conservar a forma geométrica dos elementos de máquinas, isto é, para evitar o desgaste das superfícies de parceiros de contato, elementos de máquinas de contatos tribológicos devem ser eficientemente separados através de lubrificantes, quer dizer, deve-se evitar o contato metal-metal durante o movimento de rolagem ou deslizamento.

Isso pode ser feito através de um filme compacto de graxa ou óleo com capacidade de suportar carga (lubrificação hidrodinâmica) ou através de um revestimento superficial (lubrificação com lubrificantes sólidos) nos componentes de máquinas com contatos tribológicos.

Devido a altas exigências referentes a comportamento em altas pressões, efeito anti-desgaste, proteção contra corrosão e estabilidade à oxidação, todos os óleos e graxas de alto desempenho contém uma série de aditivos. Para a melhora do comportamento em altas pressões e do comportamento antidesgaste, são usados aditivos solúveis em óleo e de atuação química.

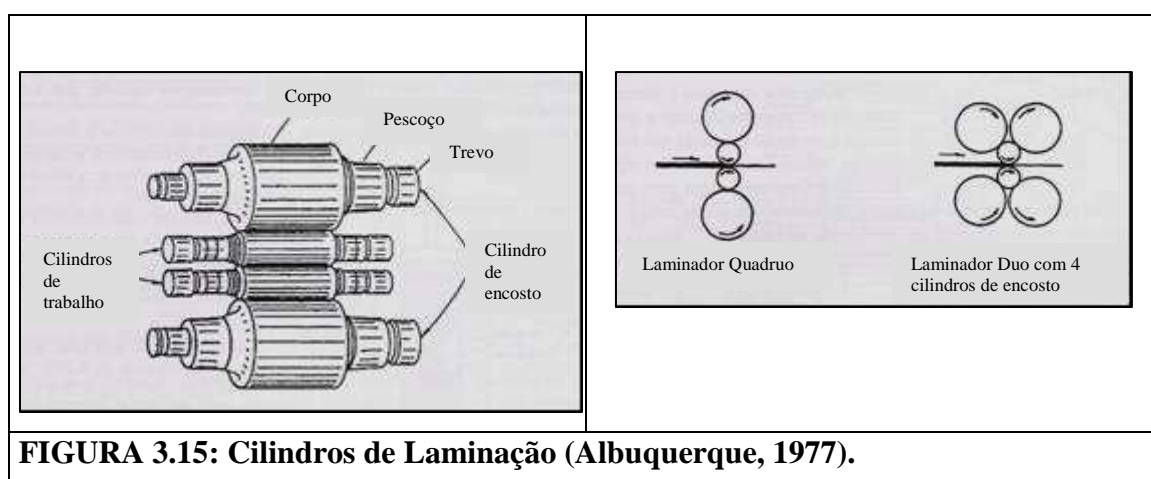
Aditivos de atuação química, que se encontram em certa porcentagem em óleos e graxas, reagem quimicamente com o ferro do aço no contato tribológico, quando são geradas, durante o contato de atrito, temperaturas suficientemente altas para que isso ocorra. Em uma determinada temperatura, aditivos químicos reagem com a superfície metálica e formam uma camada de produto de corrosão de grande



aderência,  
resistente a altas cargas e muito resistente ao desgaste.

### 3.6.3 - Lubrificantes Utilizados na Laminação

As operações de laminação envolvem duas espécies de fricção: a *interna*, molecular, devido à resistência da estrutura cristalina do metal em deformar-se; a *externa*, da chapa, contra as superfícies dos cilindros de trabalho. A Figura 3.15 apresenta os cilindros de laminação.



**FIGURA 3.15: Cilindros de Laminação (Albuquerque, 1977).**

Ambos os esforços geram uma quantidade de calor. A fricção interna mantém-se incontrolável, fora de qualquer domínio metalúrgico, mas a externa pode e deve ser reduzida ao mínimo valor possível. Considerando os requisitos de um lubrificante no processo de laminação, entende-se como um fator importante que ele seja capaz de favorecer minimização do coeficiente de fricção externa.

Segundo Albuquerque (1977), as exigências da lubrificação e do resfriamento se localizam na área de contato entre a chapa e os cilindros de trabalho. Como lubrificante, necessita-se de um óleo que proporcione um filme resistente, para evitar os “agarramentos” e como refrigerante, necessita-se de um fluido que possua a maior relação possível de absorção e dissipação de calor.

É importante que o lubrificante penetre nos interstícios do metal, ou que adsorva fortemente na superfície metálica, durante os passes redutores. Dessa forma, entende-se que os óleos de laminação devem possuir características polares, para adsorver-se na superfície metálica, mesmo na presença de água de refrigeração. (Albuquerque, 1977)

Experiências demonstram que gorduras animais e vegetais neutras possuem coeficiente de fricção bem maior que os similares contendo ácidos graxos livres. O conteúdo do ácido graxo livre nos óleos de laminação, para oferecer bons resultados de laminação, deve estar entre 8 a 12%. A viscosidade dos lubrificantes e seu comportamento diante das pressões e temperaturas desenvolvidas no laminador são importantes. Pesquisas demonstram que a viscosidade dos óleos aumenta sob altas pressões. Este incremento da viscosidade auxilia a manter “inquebrável” o filme oleoso sob o efeito das altas pressões, retendo sua habilidade lubrificante a altas temperaturas. Nos laminadores a temperatura pode chegar até 300°C. (Moura, 1975)

Sabe-se que não existem duas operações de laminação exatamente iguais, no que se refere à velocidade, pressão, diâmetro dos cilindros, tipo de aço entre outras. Os especialistas sabem que cada conjunto de condições requer uma fórmula diferente de óleo, para conseguir os resultados desejados.

Nos laminadores onde as reduções atingem até 70%, a lubricidade requerida deve ser harmonizada de acordo com a taxa de redução e velocidade de processo. Utiliza-se uma emulsão recirculada de óleo em água (1 a 4%).

De acordo com Cambiella et al (2005), óleos emulsificáveis ou miscíveis em água são utilizados na siderurgia como lubrificantes e produto de refrigeração de superfícies e ferramentas de corte. O óleo consiste de uma suspensão de gotas de óleo na água, estabilizada com surfatantes e ainda utiliza vários compostos como biocidas, antiespumantes, inibidores de corrosão. Se a emulsão perder sua propriedade funcional, ela deverá ser tratada antes de sua disposição devido a presença de componentes com propriedades tóxicas. O processo de remoção do óleo envolve destabilização, que não é um estágio muito fácil, devido à presença de agentes emulsificantes e sua preparação.

### 3.6.4 – Óleos Hidráulicos

A principal tarefa de um óleo hidráulico na indústria é de movimentar equipamentos ou ferramentas em linhas de processos. Em geral são sistemas centralizados ou individuais que movem ou transportam produtos na fábrica. Nas indústrias alimentícias, sistemas hidráulicos levantam, empurram, espremem ou dão forma aos ingredientes ou produtos.

Os sistemas com óleo hidráulico muitas vezes estão sendo usados em casos de alta carga. A função do fluido hidráulico é a transmissão de força e a lubrificação das peças internas do sistema como, por exemplo, bombas de engrenagens ou cilindros.

A maior parte dos óleos hidráulicos é produzida com óleos minerais devido ao custo. Para atender as exigências, estes produtos tem de ser melhorados com uma variedade de aditivos, tais como: inibidores de corrosão, antioxidantes, detergentes, aditivos EP (extrema pressão), antiespumantes, emulgadores, abaixador do ponto de congelamento (pour-point), etc. Também é importante que o óleo hidráulico não ataque as vedações do sistema hidráulico.

Com o tempo de uso e a influência de umidade a viscosidade do óleo tende a aumentar devido a emulsificação de água no óleo, fato que ocorre muito nas indústrias de alimentos aonde ocorre a limpeza dos equipamentos diariamente com água sob pressão e detergentes, contaminando assim o óleo hidráulico. Com óleos semi-sintéticos ou sintéticos consegue-se uma economia considerável, devido a diminuição de trocas e paradas no processo produtivo.

## **3.7 – Técnicas Auxiliares**

### **3.7.1 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

A microscopia eletrônica de varredura fornece informações analíticas juntamente com a observação da morfologia do objeto em estudo. Estas informações podem ser qualitativas ou semiquantitativas.

O equipamento possui um feixe eletrônico em foco que varre a superfície da amostra, produzindo:

- Elétrons Secundários: provenientes da espécie arrancada durante o espalhamento inelástico (onde há perda de energia do elétron incidente) e possuem energia inferior a 50eV. São coletados para formar a imagem topográfica do material.
- Elétrons Retroespalhados: uma fração de elétrons incidentes na superfície plana escapa pela mesma superfície de incidência. Possuem alta energia resultando em um maior volume de interação. As imagens obtidas são de fácil interpretação, contendo informações sobre a composição da amostra.
- Raios-X: o elétron do feixe incidente arranca um elétron da camada mais interna dos átomos, e quando os elétrons retornam ao seu estado fundamental de energia emitem raios-X, proporcionado a determinação da composição química e imagens da distribuição de um determinado elemento (Mansur, 2000).

Algumas aplicações da microscopia eletrônica de varredura incluem a identificação de fases, análise de fratura e caracterização microestrutural. Dentre as características desta técnica, é possível obter: imagens da superfície com a resolução da ordem de 0,1  $\mu\text{m}$ ; imagens com diferenciação de fases, precipitados e regiões de segregação; topografia de picos e vales (3D).

### 3.7.2 – Espectroscopia no Infravermelho

Segundo Brandão et al (1990) a espectroscopia no infravermelho aplica-se a análises de amostras gasosas, líquidas e sólidas (cristalinas e amorfas), sendo aplicável tanto a estudos qualitativos como quantitativos. Esta técnica é favorável ao estudo de espécies adsorvidas, tanto a partir de fase gasosa quanto líquida, em substratos sólidos. Uma condição essencial à técnica é uma elevada área superficial específica do adsorvente.

A radiação infravermelha cobre uma região relativamente larga do espectro eletromagnético. O chamado infravermelho próximo refere-se a sua vizinhança como a faixa da luz visível; o infravermelho distante limita-se com a região de radiações térmicas ou de calor, ou mesmo a região de microondas ou radar. Já a faixa chamada *fundamental*, refere-se ao infravermelho intermediário, encontra-se na região crítica para a identificação dos compostos orgânicos e inorgânicos. A absorção da energia da radiação infravermelha é possível para uma enorme gama de ligações químicas, que são ativas nesta região espectral; as moléculas interagem com a radiação eletromagnética absorvendo esta energia, que é convertida em vibrações e/ou rotações moleculares.

Mesmo uma molécula muito simples pode gerar um espectro muito complexo e esta complexidade é aproveitada quando se compara o espectro de uma substância desconhecida com o de um composto padrão. Embora o espectro no infravermelho seja característico como um todo, certos grupos de átomos dão origem a bandas que ocorrem mais ou menos na mesma frequência, independente da estrutura da molécula. É a presença destas bandas que permite a obtenção, através de um simples exame do espectro e consulta de tabela, de informações úteis para se fazer a identificação de estruturas.

Todas as moléculas são compostas por átomos unidos por ligações químicas que atuam como molas, e esses átomos vibram uns em relação aos outros. Cada molécula tem sua própria frequência vibracional, e moléculas diferentes possuem vibrações diferentes. A radiação infravermelha não tem energia suficiente para provocar a excitação dos elétrons, mas faz com que os átomos, ou grupos de átomos dos compostos vibrem com

maior rapidez e maior amplitude em torno das ligações covalentes que os unem. Essas vibrações são quantizadas e, quando ocorrem, os compostos absorvem energia infravermelha em certas regiões do espectro.

Nas vibrações, as ligações covalentes se comportam como se fossem molas unindo os átomos. Quando os átomos vibram, só podem oscilar em certas frequências. Por isso os átomos ligados possuem certos níveis de energia vibracional, isto é, os níveis são quantizados. A excitação de uma molécula de um nível de energia vibracional para outro só acontece quando o composto absorve energia infravermelha particular com um certo comprimento de onda ou uma certa frequência ( $\Delta E = h\nu$ )

A maior parte dos espectros é linear e em função do número de onda ( $\text{cm}^{-1}$ ). Um espectro linear em número de onda é bem diferente de um linear em comprimento de onda. A escala linear do número de onda é usada devido à direção proporcional entre essa quantidade e ambas energia e frequência. A frequência da radiação absorvida é a frequência da vibração molecular atualmente responsável pelo processo de absorção. Frequência é raramente aplicada na abscissa devido ao tamanho inconveniente da unidade, embora a escala em termos de  $\text{cm}^{-1}$  seja referida como uma escala de frequência, o que não está correto. (Silverstein, 1991)

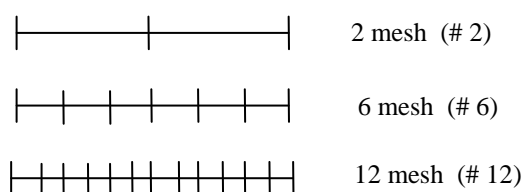
### **3.7.3 – Análise Granulométrica**

A análise granulométrica de partículas sólidas compreende a determinação do tamanho das mesmas, bem como da frequência com que ocorrem em uma determinada classe ou faixa de tamanho. Existem diversas técnicas de análise granulométrica, que se aplicam a faixas granulométricas bem definidas. A escolha da técnica adequada para se efetuar a análise granulométrica de um determinado material vai depender do tamanho das partículas ali presentes.

Segundo Gomide (1980) o meio mais prático consiste em passar o material através de uma série de peneiras com malhas progressivamente menores, cada uma das quais retém uma parte da amostra. Abaixo de  $80 \mu\text{m}$ , o peneiramento é insatisfatório. O material

retido em cada peneira é pesado separadamente, sendo sua quantidade relacionada com a abertura da malha que o reteve.

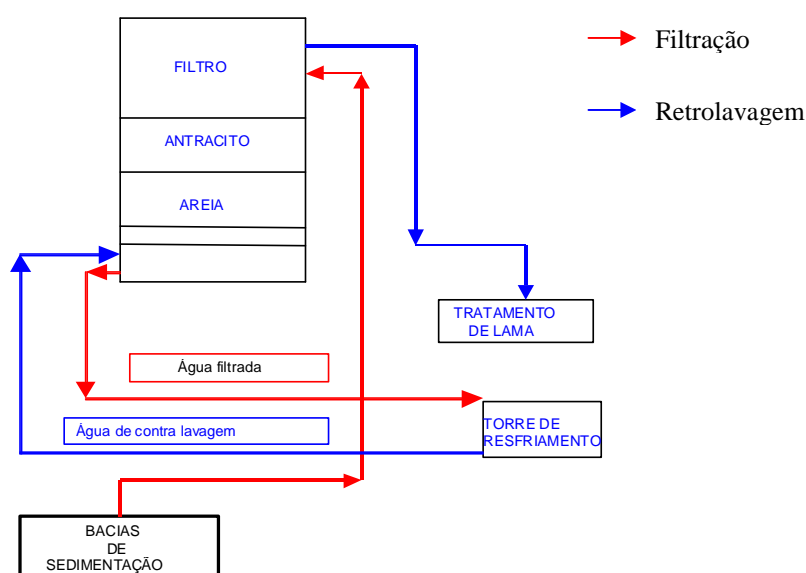
O ensaio consiste em colocar a amostra sobre a peneira mais grossa utilizada no ensaio e agitar o conjunto de peneiras colocadas uma sobre as outras na ordem decrescente da abertura das malhas. Na última panela há uma panela que recolhe o material mais fino. Algumas vezes a operação é realizada com a amostra em suspensão num líquido para facilitar a separação das partículas. A análise granulométrica fornece a distribuição percentual, em peso, dos tamanhos dos grãos que constituem o material. Essa caracterização é essencial para os processos físicos voltados para a extração e síntese. Ou seja, a análise granulométrica permite identificar o tamanho e a distribuição dos grãos. Esta análise é feita através de peneiras de diferentes aberturas e que são padronizadas internacionalmente. Cada peneira tem um número de aberturas por polegada linear denominado “mesh”. Logo, quanto maior o “mesh”, maior o número de aberturas e, conseqüentemente, mais fino deverá ser o grão para que passe por ela. Assim, para materiais grosseiros, usa-se peneiras de baixo “mesh” e para finos usa-se peneiras com maior “mesh”, conforme o modelo abaixo.



## 4 – Metodologia

Os filtros de areia deste estudo são do tipo leito profundo com camadas de areia e antracito, lavados com água e ar comprimido. Os filtros são de colunas verticais trabalhando sob pressão com o leito filtrante homogêneo em toda sua altura, suportado por um fundo falso metálico perfurado, no qual são fixados os bicos distribuidores. Estes bicos de água são montados de modo a manter o fluxo de água uniforme pelo leito filtrante, quando em serviço ou em retrolavagem, sem criar caminhos preferenciais. Os bicos são do tipo com ranhura, cauda longa, próprios para lavagem água-ar.

Durante a produção, a operação dos filtros de areia é controlada pela vazão à montante, e pela perda de carga, que indica o grau de entupimento. Durante a produção normal a vazão de cada filtro é de  $560 \text{ m}^3/\text{h}$ . Quando o tempo de campanha do processo de filtração atingir 16 horas é realizada a retrolavagem que descompacta o leito do filtro de areia e remove as partículas que ficam retidas no leito. A Figura 4.1 apresenta a esquematização do processo de filtração e retrolavagem.



**FIGURA 4.1: Esquematização do Filtro de Areia.**

A retrolavagem é um processo onde é efetuada a passagem de água corrente, com fluxo em sentido contrário ao de operação normal, indicada pela seta vermelha na Figura 4.1. A água filtrada é introduzida pela parte inferior do vaso e é recolhida pela parte superior



do vaso. A passagem da água em sentido contrário tem a função de agitar o leito filtrante, desagregando qualquer partícula que se encontra retida. O processo de retrolavagem, indicado pela seta azul na Figura 4.1, ocorre em 5 etapas:

#### 1 – Drenagem e abertura do filtro para coleta de amostra

Nesta etapa é realizada a remoção da água que fica retida dentro do filtro durante o processo de filtração. Esta água deve ser removida para redução da pressão interna, favorecendo a abertura do filtro para a coleta da amostra e também para a realização da etapa seguinte (entrada de ar). A amostra coletada foi colocada num recipiente limpo e seco.

#### 2 – Injeção de ar para expansão do meio filtrante (2 minutos)

A injeção de ar tem como objetivo a expansão do meio filtrante para facilitar a limpeza durante a operação de retrolavagem. O tempo foi determinado pela empresa fornecedora dos filtros de areia.

#### 3 – Assentamento do meio filtrante (1 minuto)

Esta etapa consiste na acomodação das partículas do meio filtrante. O tempo também foi determinado pela empresa fornecedora dos filtros de areia.

#### 4 – Injeção de água de retrolavagem + produto químico (2 minutos)

Através da tubulação de injeção de água de retrolavagem no filtro de areia, foi acoplada uma mangueira para aplicação dos produtos químicos testados em laboratório para remoção da lama. Para aplicação do produto na tubulação foi utilizada uma bomba de vácuo de alta pressão. O tempo de duração para aplicar todo o produto foi de 2 minutos. Após a aplicação do produto químico foi realizada a injeção de ar visando homogeneizar o produto dentro do filtro de areia durante 30 segundos. Qualquer tempo maior que este promoveu a formação de muita espuma.

#### 5 – Injeção de água para lavagem do produto químico (10 minutos)

Nesta etapa, a medida que a água entra pelo fluxo ascendente do filtro, ela sai por uma tubulação na parte superior do filtro, não ficando retida. Sendo assim, 10 minutos foi o

tempo necessário para a remoção de todo o produto (indicado pela presença de espuma) e sujeira de dentro do filtro, sendo observada visualmente a qualidade da água nas tubulações de saída.

#### 6 – Assentamento do leito filtrante e coleta de amostra

Após a remoção do produto químico de dentro do filtro, foi interrompida a entrada de água de retrolavagem, visando o assentamento das partículas do meio filtrante. Novamente, foi realizada uma coleta do meio filtrante.

#### 7 – Normalização do processo

Após a coleta da amostra o filtro foi fechado e reiniciado o processo de filtração.

O objetivo deste trabalho é a verificação da eficiência dos agentes químicos de limpeza na remoção do óleo impregnado no meio filtrante. Dessa forma, foram utilizados os seguintes procedimentos para verificação de sua eficácia:

- Caracterização do meio filtrante;
- Caracterização dos tipos de óleo presentes no sistema de laminação;
- Caracterização da água a ser filtrada;
- Utilização de agentes químicos para limpar o meio filtrante.

### **4.1 – Caracterização do Meio Filtrante**

Neste estudo foram utilizados filtros de areia com alta camada de areia e antracito de uma só granulometria, que é apropriada para a fixação em profundidade das matérias em suspensão, e é preferível para efluentes oleosos, sendo utilizados em particular no tratamento de águas do sistema direto de siderúrgicas.

Posteriormente, foi pesada uma amostra de 5 gramas do meio filtrante (areia e antracito) em balança analítica da marca SATÓRIOS modelo BL210S com precisão de 0,1mg utilizando um becker de 100 mL, para sua caracterização quanto a sua granulometria

após a utilização dos produtos químicos para verificar a eficiência na remoção do óleo e também para verificar o mecanismo de remoção.

Para visualização da amostra após a limpeza química foi utilizado um Esteroscópio da marca Olympus modelo SZPT com aumento de 20 vezes.

#### **4.1.1 – Granulometria e Determinação da Área Superficial**

A análise granulométrica permite identificar o tamanho e a distribuição dos grãos. O ensaio consiste em colocar a amostra sobre a peneira mais grossa utilizada no ensaio e agitar o conjunto de peneiras colocadas uma sobre as outras na ordem decrescente da abertura das malhas. Na última panela há uma panela que recolhe o material mais fino.

Foi realizada análise granulométrica por peneiramento convencional a seco utilizando o equipamento da marca Bertel.

A análise de área superficial específica BET, por adsorção de gás  $N_2$ , foi realizada utilizando-se o equipamento da marca Quantachrome e modelo NOVA 1200. Foi utilizada a temperatura de degaseificação de 180°C.

#### **4.1.2 – Microscopia Eletrônica de Varredura**

As amostras de meio filtrante foram analisadas quanto à morfologia e composição química (microanálise semiquantitativa). A tecnologia empregada foi a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e microanálise e raios-X por dispersão de energia (EDS). Foram utilizadas amostras do meio filtrante após a limpeza dos agentes químicos de limpeza.

Essa técnica permite a análise de superfícies irregulares por apresentar boa profundidade de foco. O equipamento utilizado foi o Modelo JSM 6360 LV marca JEOL. E o equipamento de EDS utilizado foi o modelo Quest da marca ThermoNoram

com a condição de operação de 15kV sendo utilizado o metalização com ouro para aumentar a condutividade do material.

## **4.2 – Caracterização dos Tipos de Óleo Presentes no Sistema de Laminação**

Durante o processo de laminação são utilizados 3 tipos de óleo: laminação, lubrificante e hidráulico. Estes óleos contaminam a água utilizada no processo de resfriamento da placa que passará pelo processo de filtração.

Foram coletados 500 mL de cada tipo de óleo utilizados durante o processo de laminação (hidráulico, lubrificante e de laminação) e também foram coletados 1000 mL de amostra de água que será filtrada, contendo a mistura dos três tipos de óleo. Após a análise individual de cada tipo de óleo e da amostra de água, foi utilizada a técnica de Espectroscopia de Infravermelho para a identificação da correlação dos tipos de óleo presentes na amostra de água a ser filtrada.

O equipamento utilizado foi o de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier Modelo Spectrum One, Marca Perkin-Elmer do Laboratório de Pesquisas da Buckman Laboratórios. O equipamento possui um software (Spectrum One) que avalia a equação matemática que origina os espectros e faz uma comparação entre dois materiais indicando uma probabilidade de correlação entre eles.

## **4.3 – Caracterização da Água a ser Filtrada**

Durante o processo de laminação a água é utilizada no resfriamento das placas e dos equipamentos. Em seguida passa pelo tratamento químico e pela filtração para remoção dos sólidos em suspensão.

Foram coletadas amostras da água utilizada no processo de laminação a quente nos seguintes pontos: bacias de sedimentação e torre de resfriamento para caracterização quanto à presença de sólidos em suspensão e óleos e graxas.

Foram realizadas análises quantitativas. Foram verificados alguns parâmetros químicos da qualidade da água utilizada no processo de laminação a quente proveniente da torre de resfriamento e das bacias de sedimentação, tais como: Sólidos em Suspensão, Óleos e Graxas e Teor de Ferro. Os métodos utilizados para realização das análises quantitativas são descritas a seguir.

### **4.3.1 – Análise Gravimétrica**

A análise gravimétrica ou gravimetria tem o objetivo de determinar um composto dos demais presentes no material em estudo, na forma de uma fase pura, que é então pesada. A partir deste peso acha-se o peso do constituinte desejado. A separação do constituinte pode ser efetuada por meios diversos, mas o mais importante é a precipitação química. (Ohlweiler, 1974)

Foi coletada 100mL da amostra de água e adicionado 5mL de ácido nítrico concentrado e levado à chapa aquecedora até que a amostra reduza seu volume para 15mL. Após o resfriamento em temperatura ambiente, foi feito um ajuste do pH da amostra para um valor entre 3 e 4 utilizando Soda Cáustica a 5N. Em seguida a amostra é colocada em um balão volumétrico de 100mL e avolumado. Coletar uma amostra de 50mL da amostra já digerida e com o pH ajustado. Adicionar o reagente da HACH e agitar até a completa dissolução. Coloque a amostra no equipamento para leitura do teor de ferro onde a cor azul indicará a presença do elemento.

### **4.3.2 - Colorimetria**

A colorimetria consiste num processo da química analítica que se baseia na comparação direta ou indireta da intensidade da cor e da qual se deduz a concentração. A determinação é realizada através de medições da sensação de cor. Baseia-se no fato de cada sensação de cor (psicológica) poder ser produzida por muitas excitações de cor (físicas), sendo, no entanto, todas elas substituíveis por uma mistura (física-aditiva) determinada por excitações de cor escolhidas arbitrariamente e denominadas cores de calibração.

A sensação de cor pode caracterizar-se por três valores designados coordenadas de cor. Estas cores de calibração possuem determinadas percentagens de vermelho, verde e azul. É possível representar a totalidade das sensações de cor num diagrama plano, como, por exemplo, um triângulo cromático. Os vértices correspondem às luzes de calibração e a cada ponto do triângulo corresponde uma cor, cujas coordenadas são dadas pelas coordenadas do ponto.

### 4.3.3 – Extração de Óleo e Graxa

A técnica de gravimetria compreende a extração por solventes da fase orgânica da fase aquosa utilizando n-hexano. Nesta etapa foram utilizadas alíquotas de n-hexano: três de 30 mL para a extração de 400 mL de água oleosa e 20 mL para a rinsagem final. A fase orgânica foi drenada em um funil analítico contendo papel de filtro e 10 gramas de sulfato de sódio anidro umedecido com n-hexano e recolhido dentro de um erlenmeyer.

O erlenmeyer com o extrato foi colocado sobre uma placa de agitação e sua coloração foi observada. O extrato apresentou uma coloração amarela pálida transparente, então, o Procedimento A foi adotado para dar prosseguimento na análise de gravimetria. O Procedimento A consiste das seguintes etapas: (1) O erlenmeyer foi colocado sob agitação magnética por 5 minutos com sílica gel (3,0 gramas). (2) Após este tempo, o extrato foi filtrado e recolhido em um balão de destilação pesado anteriormente. (3) Ao final da extração, o teor de óleos e graxas foi calculado utilizando a Equação (1):

$$\text{TOG} = 1.000.000 \times (\text{massa final} - \text{massa inicial}) / \text{volume da amostra} \quad (\text{Equação 1})$$

TOG = Teor de Óleo e Graxa

onde massa final = massa do balão após a extração;

massa inicial = massa do balão vazio;

volume da amostra = volume da amostra analisada.

#### **4.4 – Utilização de Agentes Químicos para Limpar o Meio Filtrante**

Foram coletadas 10g de amostras do meio filtrante pesadas em balança analítica da marca SATÓRIOS modelo BL 210 S com precisão de 0,1mg em becker de 100 mL. As amostras foram imersas individualmente em solução de remoção a 1, 5 e 10% v/v. O teste realizado utilizou um equipamento de 'jar test' que simulou a agitação e o tempo do processo de retrolavagem. Foram observados o pH da solução e as características físicas dos produtos testados (densidade, cor, formação de espuma).

Após a limpeza química do meio filtrante foi utilizada a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para verificar a superfície da amostra de areia e antracito (antes e após a utilização dos agentes químicos utilizados) observando a eficiência da limpeza.

## 5 – Resultados e Discussões

### 5.1 – Caracterização da Água a ser Filtrada

Durante o processo de laminação a água é utilizada no resfriamento das placas e dos equipamentos. Em seguida passa pelo tratamento químico de coagulação e floculação seguindo pela filtração para remoção dos sólidos em suspensão.

Foram coletadas amostras da água utilizada no processo de laminação a quente nos seguintes pontos: bacias de sedimentação e torre de resfriamento para caracterização quanto à presença de sólidos em suspensão e óleos e graxas.

Foram verificados alguns parâmetros químicos da qualidade da água utilizada no processo de laminação a quente proveniente da torre de resfriamento e das bacias de sedimentação, tais como: Sólidos em Suspensão, Óleos e Graxas e Teor de Ferro. A Tabela 5.1 apresenta a média dos resultados obtidos.

**TABELA 5.1: Características da Água Utilizada no Processo de Filtração.**

<b>Parâmetros de Controle</b> <i>Local de Amostragem</i>	<b>Unidade</b>	<b>Resultado</b>	<b>Faixa Limite</b>
Sólidos em Suspensão – <i>Bacias de Sedimentação</i>	ppm	18,00	40,00
Sólidos em Suspensão – <i>Torre de Resfriamento</i>	ppm	4,00	10,00
Óleos e Graxas – <i>Bacias de Sedimentação</i>	ppm	5,35	20,00
Óleos e Graxas (TOG) – <i>Torre de Resfriamento</i>	ppm	1,18	10,00
Ferro – <i>Torre de resfriamento</i>	ppm	2,65	5,00

O valor da faixa limite foi determinado pela empresa do tratamento da água.



De acordo com os resultados da Tabela 5.1 verifica-se que é uma característica da água a presença de sólidos em suspensão e óleos e graxas. O teor de ferro indica que a origem dos sólidos em suspensão é proveniente da carepa (óxido de ferro) originada na placa a ser laminada que é removida durante o processo de laminação a quente. O teor de óleos e graxas indica que esta substância é inerente ao processo de laminação, pois o óleo é utilizado nas engrenagens dos equipamentos do processo de laminação e também é utilizado para reduzir o atrito entre os cilindros e a placa a ser laminada. Dessa forma, o óleo fica presente na água utilizada para o resfriamento da placa e dos equipamentos. A presença de sólidos em suspensão e de óleos e graxas presentes na água da torre de resfriamento em menor quantidade, em relação às bacias de sedimentação, indica que o óleo utilizado no processo de laminação a quente e os sólidos em suspensão ficam retidos no filtro de areia. No processo do tratamento de recirculação da água, o processo de filtração está situado entre a bacia de sedimentação e a torre de resfriamento, ou seja, o filtro de areia retém as partículas e o óleo que não decantaram na bacia de sedimentação no processo de floculação/decantação e envia à torre de resfriamento a água nos parâmetros desejados pela empresa de tratamento de água.

## **5.2 – Caracterização dos Tipos de Óleo Presentes na Água a ser Filtrada**

É sabido que durante o processo de laminação a quente são utilizados 3 tipos de óleo: hidráulico, lubrificante e de laminação. Estes óleos são misturados com a água de refrigeração da placa de aço a ser laminada para reduzir o atrito entre o cilindro e a placa e também com os equipamentos de laminação. Foram coletadas amostras do óleo sobrenadante presente na água da bacia de sedimentação e amostra da água enviada pela tubulação para o filtro de areia. Também foi coletada amostra da lama (carepa fina) decantada na bacia de sedimentação, após o processo de floculação.

### 5.2.1 – Análise da Superfície do Meio Filtrante por Espectroscopia no Infravermelho

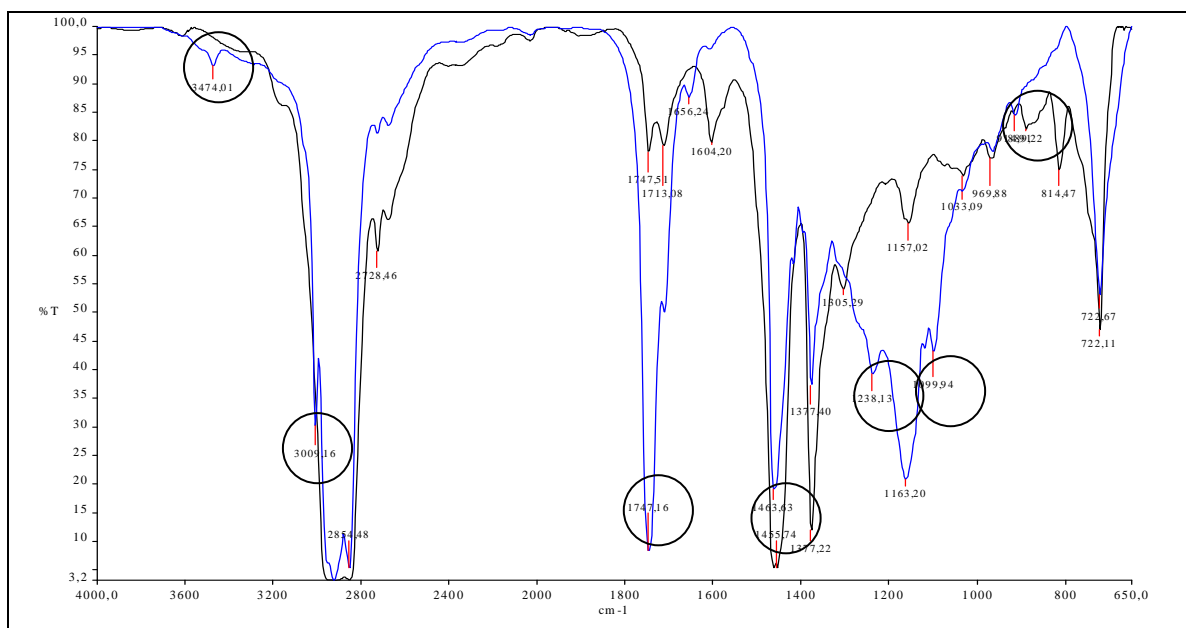
Foram coletadas amostras puras dos três tipos de óleo utilizados durante o processo de laminação a quente (lubrificante, hidráulico e de laminação) e em seguida foi realizada a análise por espectroscopia no infravermelho correlacionando essas amostras com as amostras coletadas na bacia de sedimentação (sobrenadante) e na tubulação de envio de água para o filtro de areia (emulsificada). A Tabela 5.2 apresenta as posições das bandas dos espectros obtidos das amostras de óleo utilizadas no processo de laminação a quente. Observa-se que há uma coluna de ‘posições diferenciadas’ que indica uma posição da banda encontrada no tipo de óleo especificado que não é comum a nenhum outro tipo de óleo deste estudo.

**Tabela 5.2: Posição das Bandas Relativas ao Espectro no Infravermelho dos Tipos de Óleo Utilizados no Processo de Laminação à Quente.**

Tipos de Óleo	Posição das Bandas (cm <sup>-1</sup> )	
	Posições Semelhantes	Posições Diferenciadas
Laminação	3474/3009/2854/2728/1747/1656/1463/1377/ 1238/1163/1099/722	3474/3009/1747/1656/ 1238/1099/914/848
Hidráulico	3787/3640/2854/2728/2032/1905/1604/1450/ 1377/1305/1156/1032/972/889/814/722/667	3787/3640/2032/1905/1604/ 1305/1032/814/889/667
Lubrificante	2854/2728/1664/1450/1377/1305/1156/ 1038/960/822/814/722	*

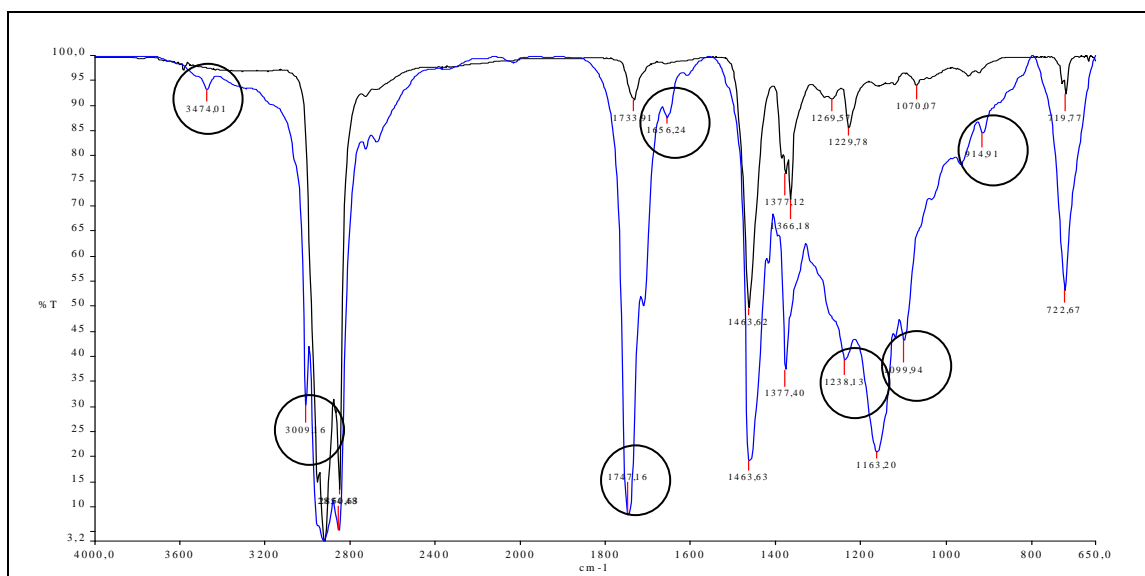
\*Não foi encontrado nenhum pico diferenciado para este tipo de óleo.

As Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 apresentam a correlação entre as amostras coletadas e o óleo de laminação. Esta correlação foi dada pelo software Spectrum One equipamento de espectroscopia no infravermelho ao ser realizada a análise dos tipos de óleo presentes na água.



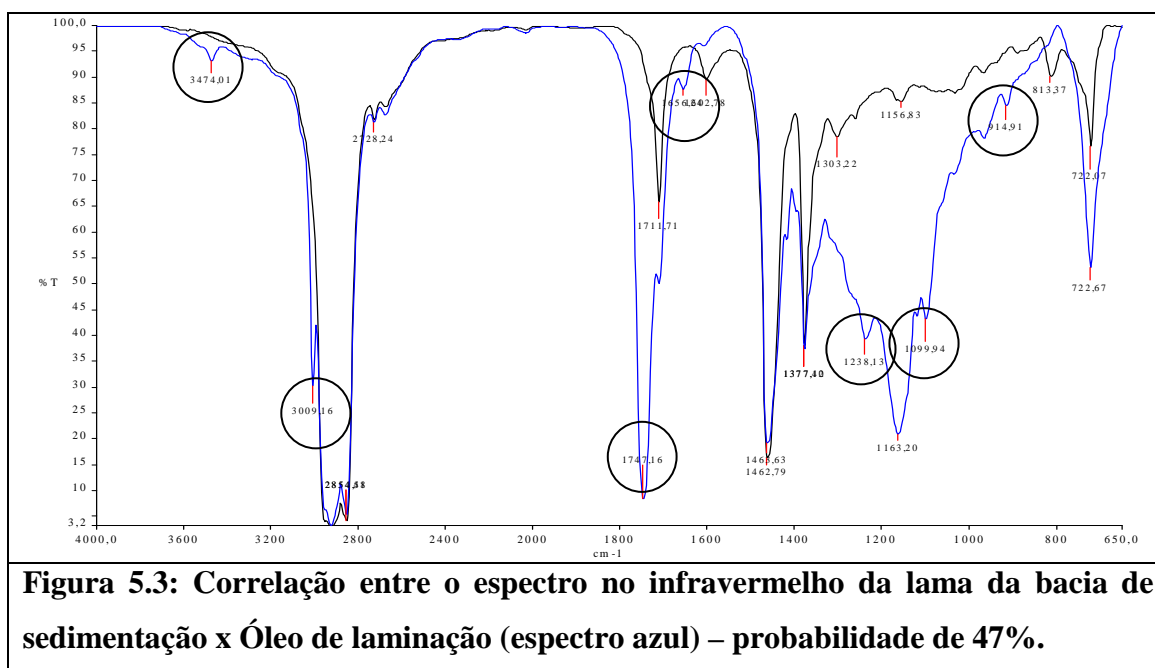
**Figura 5.1: Correlação entre o espectro no infravermelho da amostra do sobrenadante na bacia de sedimentação x Óleo de laminação (espectro azul) – probabilidade de 43%.**

Foi observado que há uma correlação de 43% entre a amostra coletada na bacia de sedimentação e o óleo de laminação, ou seja, comparando os dois espectros não é possível afirmar que o óleo de laminação esteja presente na amostra do sobrenadante na bacia de sedimentação.



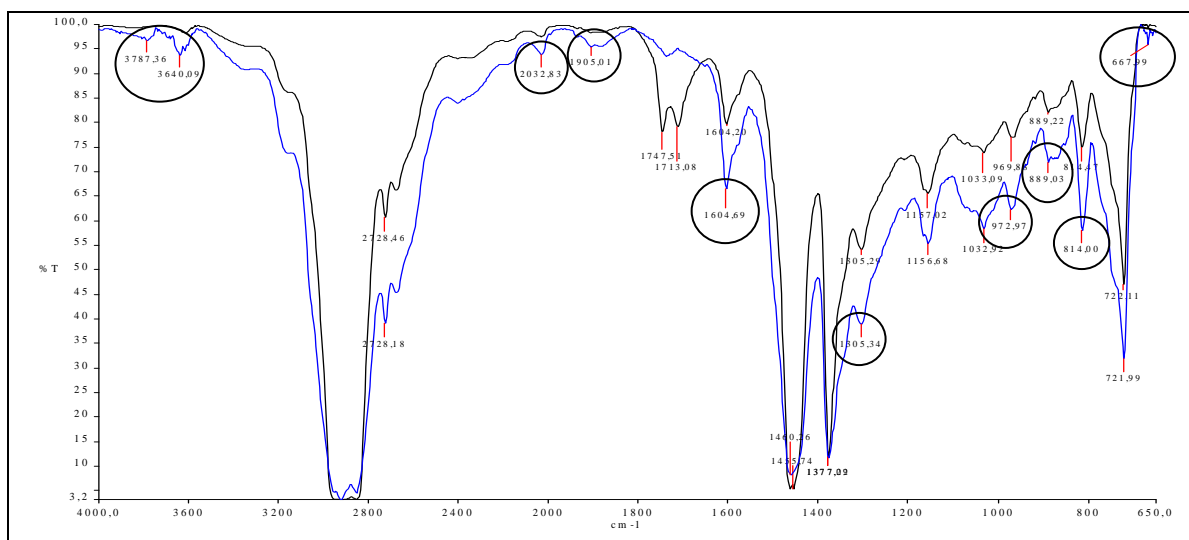
**Figura 5.2: Correlação entre o espectro no infravermelho da amostra enviada para o filtro de areia x Óleo de laminação (espectro azul) – probabilidade < 30%.**

Foi observado que há uma correlação  $< 30\%$  entre a amostra enviada para o filtro de areia e o óleo de laminação, ou seja, comparando os dois espectros não é possível afirmar que o óleo de laminação esteja presente na amostra enviada para o filtro de areia.



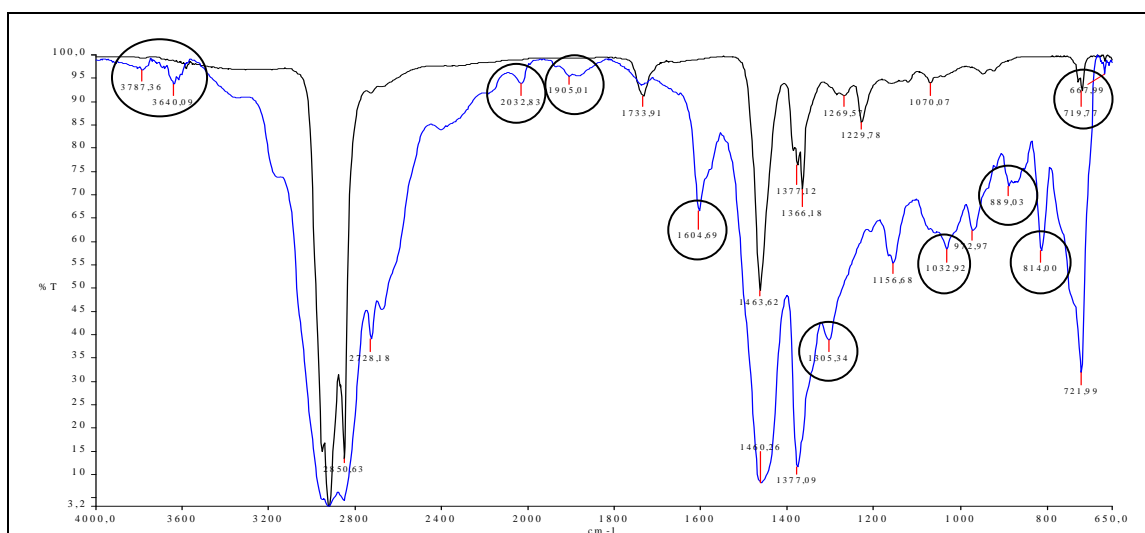
Foi observado que há uma correlação de 47% entre a amostra de lama coletada na bacia de sedimentação e o óleo de laminação, ou seja, comparando os dois espectros não é possível afirmar que o óleo de laminação esteja presente na lama da bacia de sedimentação.

As Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 apresentam a correlação das amostras coletadas com o óleo hidráulico. Esta correlação foi dada pelo software do equipamento Spectrum One de espectroscopia no infravermelho ao ser realizada a análise dos tipos de óleo presentes na água.



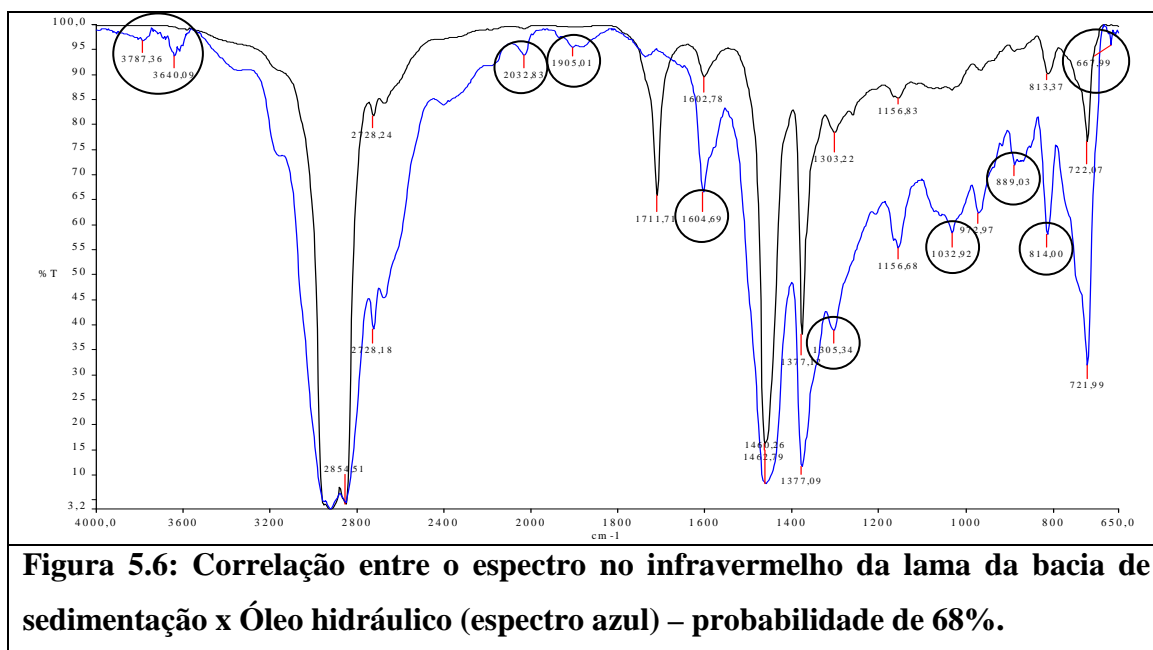
**Figura 5.4: Correlação entre o espectro no infravermelho da amostra do sobrenadante na bacia de sedimentação x Óleo hidráulico (espectro azul) – probabilidade de 88%.**

Foi observado que há uma correlação de 88% entre a amostra coletada na bacia de sedimentação e o óleo hidráulico, ou seja, comparando os dois espectros não é possível afirmar que o óleo hidráulico esteja presente na amostra do sobrenadante na bacia de sedimentação.



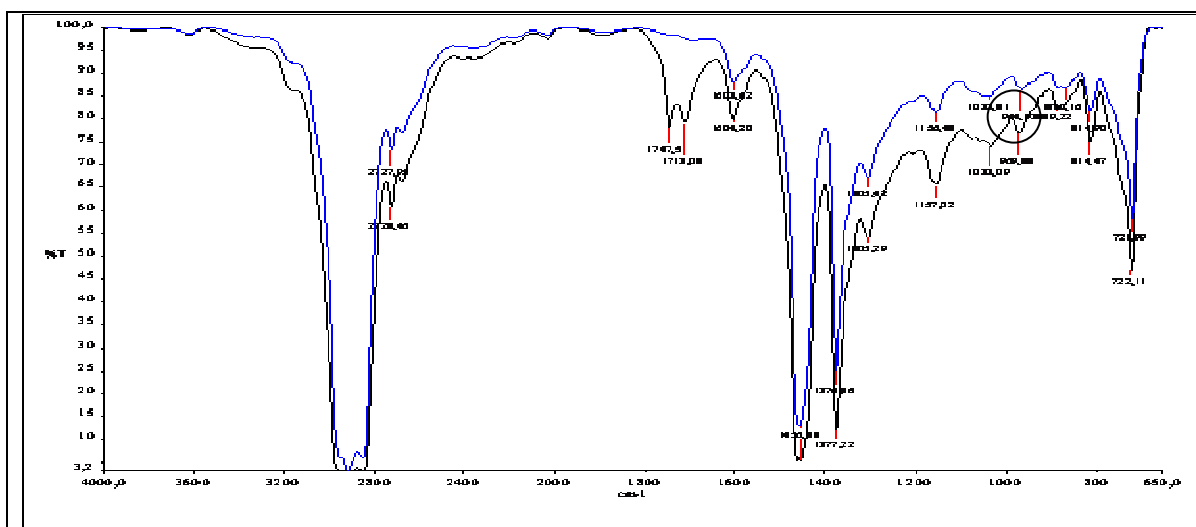
**Figura 5.5: Correlação entre o espectro no infravermelho da amostra enviada para o filtro de areia x Óleo hidráulico (espectro azul) – probabilidade de 55%.**

Foi observado que há uma correlação de 55% entre a amostra enviada para o filtro de areia e o óleo hidráulico, ou seja, comparando os dois espectros não é possível afirmar que o óleo hidráulico esteja presente na amostra enviada para o filtro de areia.



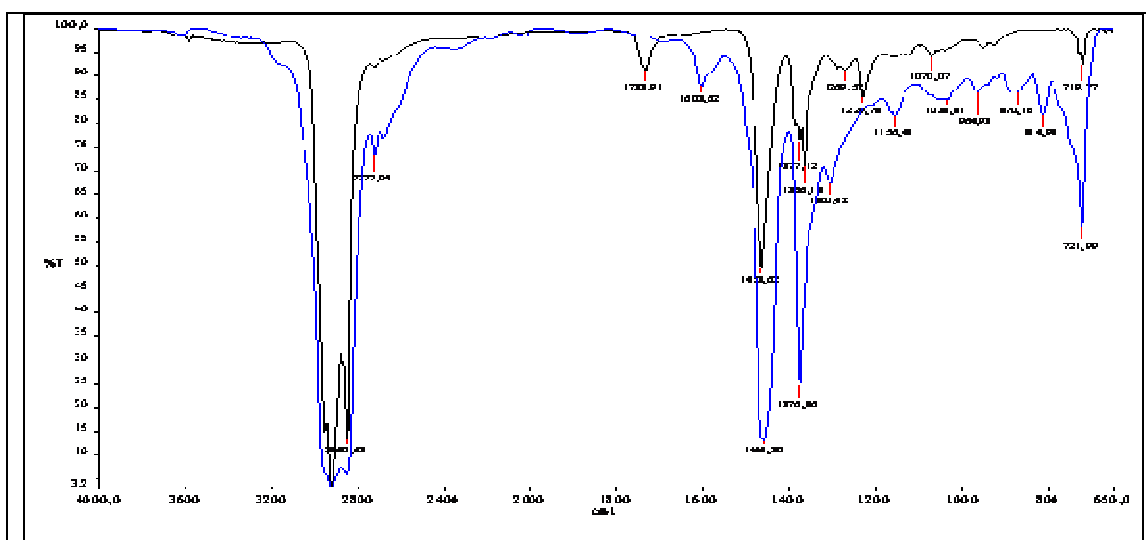
Foi observado que há uma correlação de 68% entre a amostra de lama coletada na bacia de sedimentação e o óleo hidráulico, ou seja, comparando os dois espectros não é possível afirmar que o óleo hidráulico esteja presente na amostra da lama da bacia de sedimentação.

As Figuras 5.7, 5.8 e 5.9 apresentam a correlação das amostras coletadas com o óleo lubrificante. Esta correlação foi dada pelo software Spectrum One do equipamento de espectroscopia no infravermelho ao ser realizada a análise dos tipos de óleo presentes na água.



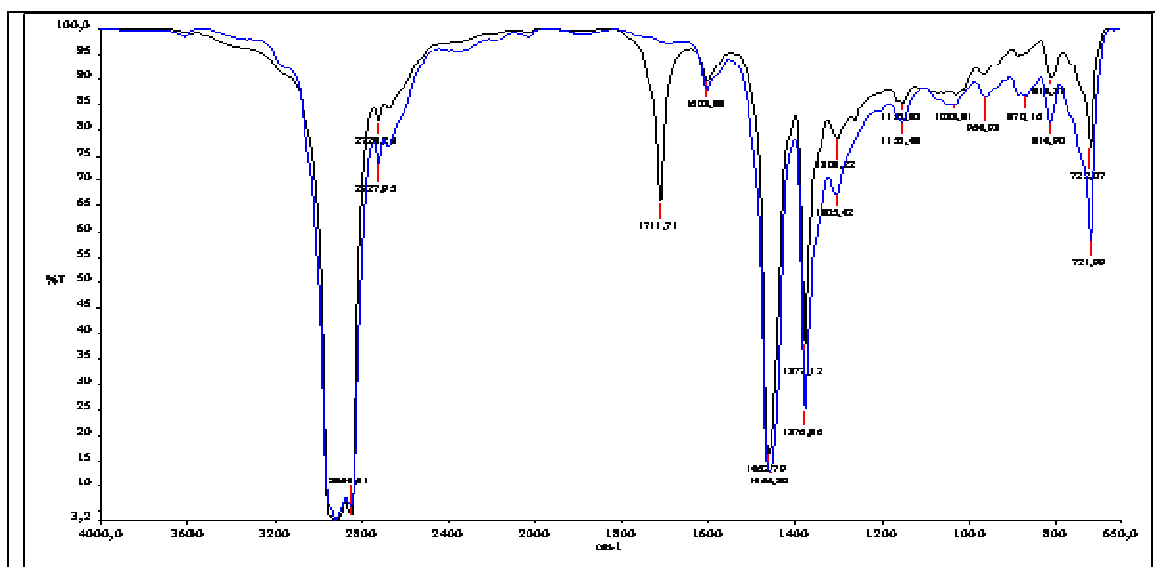
**Figura 5.7: Correlação entre o espectro no infravermelho da amostra do sobrenadante na bacia de sedimentação x Óleo lubrificante (espectro azul) – probabilidade de 98%.**

Foi observado que há uma correlação de 98% entre a amostra coletada na bacia de sedimentação e o óleo lubrificante, ou seja, comparando os dois espectros é possível afirmar que o óleo lubrificante esteja presente na amostra do sobrenadante na bacia de sedimentação.



**Figura 5.8: Correlação entre o espectro no infravermelho da amostra enviada para o filtro de areia x Óleo lubrificante (espectro azul) – probabilidade de 78%.**

Foi observado que há uma correlação de 78% entre a amostra enviada para o filtro de areia e o óleo lubrificante, ou seja, comparando os dois espectros não é possível afirmar que o óleo lubrificante esteja presente na amostra enviada para o filtro de areia.



**Figura 5.9: Correlação entre o espectro no infravermelho da lama da bacia de sedimentação x Óleo lubrificante (espectro azul) – probabilidade de 90%.**

Foi observado que há uma correlação de 90% entre a amostra de lama coletada na bacia de sedimentação e o lubrificante, ou seja, comparando os dois espectros é possível afirmar que o óleo lubrificante esteja presente na amostra da lama na bacia de sedimentação.

Para o óleo lubrificante, a maior probabilidade encontrada foi no sobrenadante das bacias de sedimentação com 98%. Isto indica que a presença deste tipo de óleo passa pelos filtros de areia.

A Tabela 5.3 apresenta os resultados da correlação dos tipos de óleo presentes nas amostras coletadas.



**TABELA 5.3: Correlação entre os tipos de óleo presentes na água de laminação a ser filtrada e o local de amostragem.**

<b>Tipos de Óleo</b>	<b>Sobrenadante na Bacia de Sedimentação</b>	<b>Tubulação para o Filtro de Areia</b>	<b>Lama da Bacia de Sedimentação</b>
Laminação	43%	< 30%	47%
Hidráulico	88%	55%	68%
Lubrificante	<b>98%</b>	<b>78%</b>	<b>90%</b>

Dessa forma, foi observado que há uma maior correlação do óleo lubrificante encontrado nas amostras sobrenadante na bacia de sedimentação e na tubulação para o filtro de areia com 98 e 78% de probabilidade, respectivamente. Essa correlação foi possível realizando a análise de Espectroscopia no Infravermelho utilizando o software. Isto indica que este tipo de óleo deve estar em maior quantidade presente dentro do filtro de areia.

Observa-se ainda que houve uma redução do valor da probabilidade dos tipos de óleo encontrados na amostra sobrenadante nas bacias de sedimentação em relação à amostra enviada para o filtro de areia, ou seja, parte deste óleo fica retida na lama (carepa fina) decantada no fundo da bacia de sedimentação, conforme apresentado na Tabela 5.3.

### **5.3 – Caracterização do Meio Filtrante**

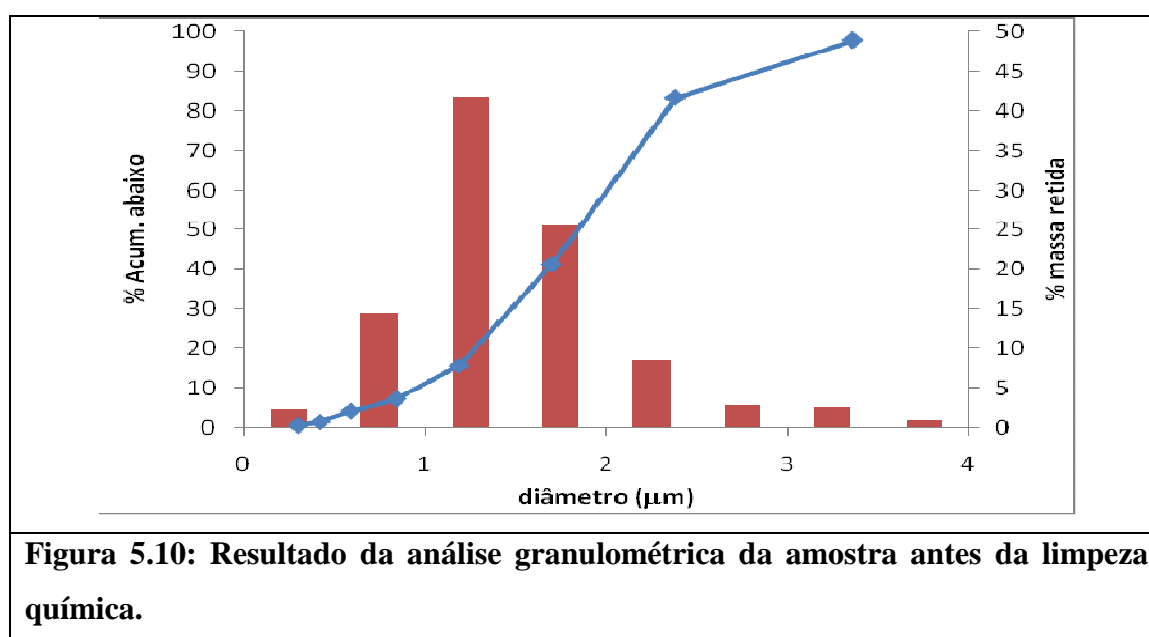
Foi coletado 1kg da amostra do meio filtrante antes e após a limpeza química, e foi realizada análise de granulometria e a determinação da área superficial específica. A Tabela 5.4 apresenta os resultados da área superficial específica da amostra antes e após a limpeza química. Foi observado que a área superficial específica antes da limpeza química é menor que da amostra após a limpeza química indicando que havia uma aglomeração de partículas. Como o diâmetro das partículas não variou muito, ficando

praticamente inalterado, parte da área superficial estava obstruída com o óleo adsorvido presente na água a ser filtrada.

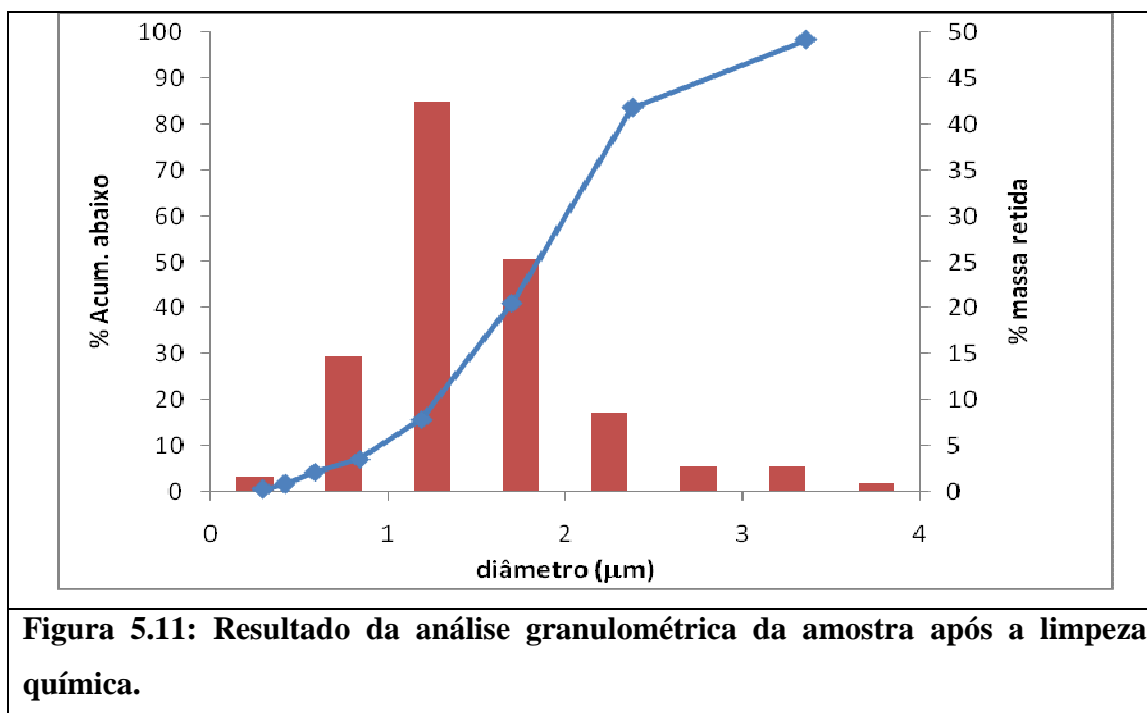
**Tabela 5.4: Resultado da análise da área superficial específica das amostras do meio filtrante.**

Amostra	Área Superficial Específica
Antes da limpeza química	0,09 m <sup>2</sup> /g
Após da limpeza química	0,14 m <sup>2</sup> /g

A Figura 5.10 apresenta o resultado da análise granulométrica da amostra antes da limpeza química. A linha azul indica o percentual acumulado abaixo e a coluna em vermelho indica o percentual de massa retida. O diâmetro das partículas pode variar de 0,29 a 3,36 mm. Foi observado que 41,8% foi de material retido com diâmetro de 1,7 mm.



A Figura 5.11 apresenta o resultado da granulometria da amostra após a limpeza química. A linha azul indica o percentual acumulado abaixo e a coluna em vermelho indica o percentual de massa retida. O diâmetro das partículas pode variar de 0,29 a 3,36 mm. Foi observado que o comportamento das curvas antes e após a limpeza química é semelhante, onde 42,5% foi de material retido com diâmetro de 1,7 mm.

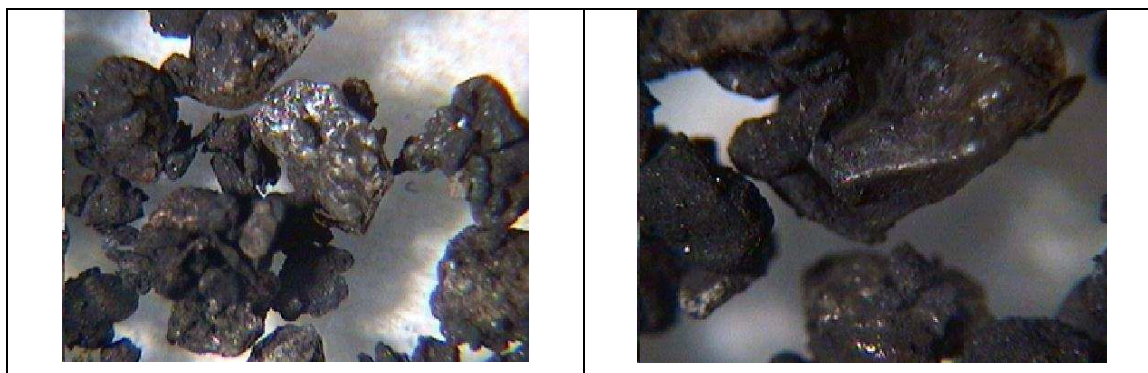


Sendo assim, o resultado da análise granulométrica indicou que não houve variação considerável nas dimensões das amostras do meio filtrante após ter sido utilizado o produto químico para remoção da lama aderida à superfície.

#### 5.4 – Limpeza Química do Meio Filtrante

Após a pesagem da amostra foi realizado um teste em laboratório para encontrar o produto químico que apresentasse o melhor resultado de limpeza superficial e também a melhor dosagem do produto a ser aplicado em escala industrial. Foram testados 10 produtos onde foram observados: pH, cor, formação de espuma, limpeza superficial x concentração do produto e tempo de limpeza. A Figura 5.12 apresenta a amostra de meio filtrante antes da aplicação de qualquer produto químico. Foi observado que há uma aglomeração de material filtrante juntamente com a lama, que fica retida no filtro de areia, dificultando a ação do meio filtrante em capturar as partículas suspensas na água fazendo com que o filtro perca eficiência, podendo formar caminhos preferenciais dentro do leito filtrante onde a água passa pelo leito sem ser limpa. Dessa forma, o

objetivo da ação dos produtos testados é de remover esta lama favorecendo a eficiência no processo de filtração.



**FIGURA 5.12: Amostra do meio filtrante antes da limpeza química.**

Dos produtos testados, dois se destacaram para o teste em escala industrial: o BSP 242 e o BLB 8031. O BSP 242 apresentou um excelente resultado com uma baixa concentração do produto (1%), porém apresentou a formação de espuma durante a agitação do meio filtrante (simulação da injeção de ar e água durante o processo de retrolavagem) e um pH = 1. O BLB 8031 não apresentou a formação de espuma e um pH = 7,5, mas foi necessário utilizar uma concentração de 10% para obter um resultado satisfatório.

Os demais produtos testados não apresentaram bons resultados de remoção de lama aderida à superfície do meio filtrante.

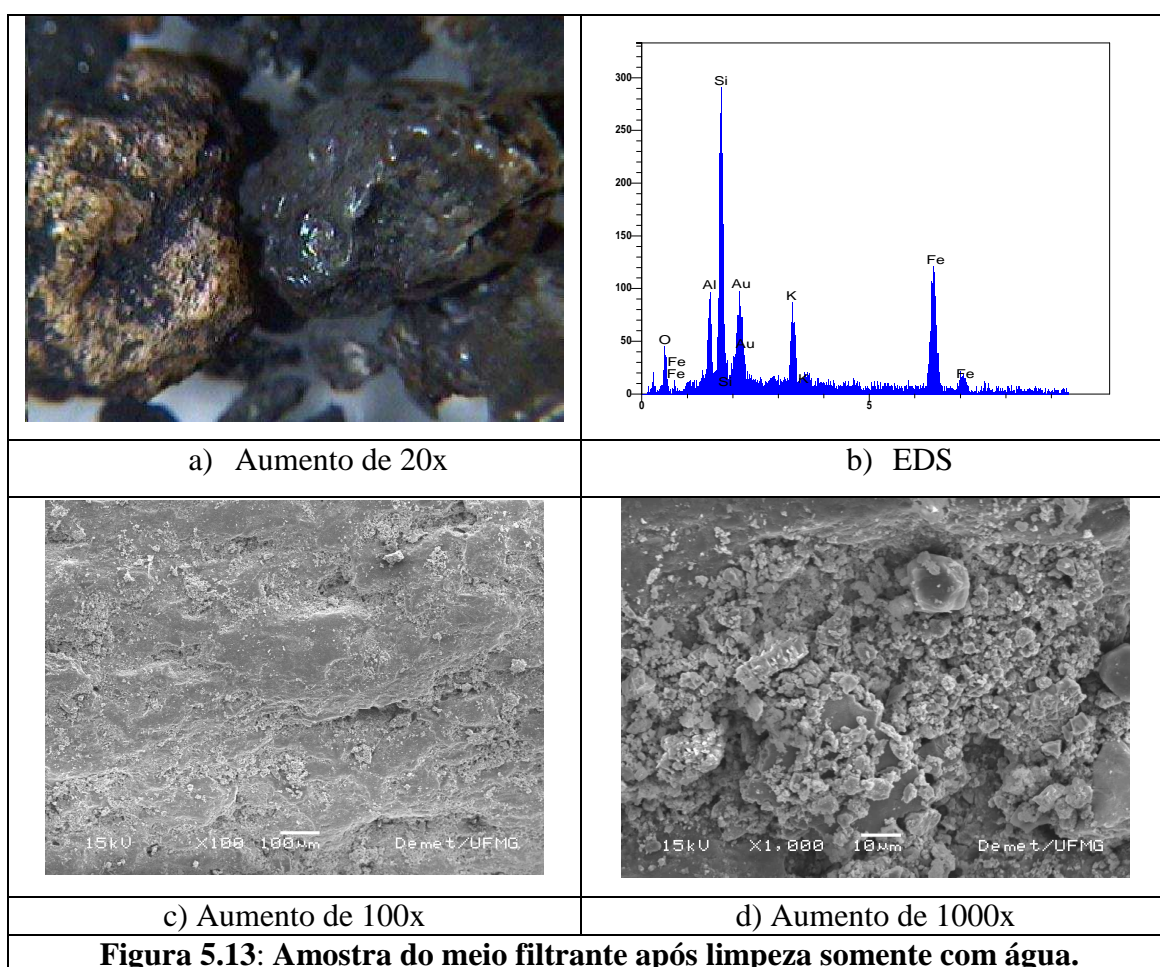
A limpeza química do meio filtrante foi realizada em escala industrial onde o produto químico foi inserido juntamente com a água de retrolavagem numa concentração de 1%. O processo de retrolavagem, juntamente com a adição do produto químico, foi realizado de acordo com as etapas a seguir:

- 1 – Drenagem do filtro
- 2 – Injeção de ar
- 3 – Assentamento do meio filtrante
- 4 – Injeção de água + produto químico

## 5 – Assentamento do leito filtrante

### 5.4.1 – Análise Química e Morfológica da Superfície do Meio Filtrante Utilizando a Limpeza com Água

A Figura 5.13 apresenta os resultados da análise morfológica, obtida a partir da análise por microscopia eletrônica de varredura, do meio filtrante após ser realizada a limpeza da superfície utilizando somente água.



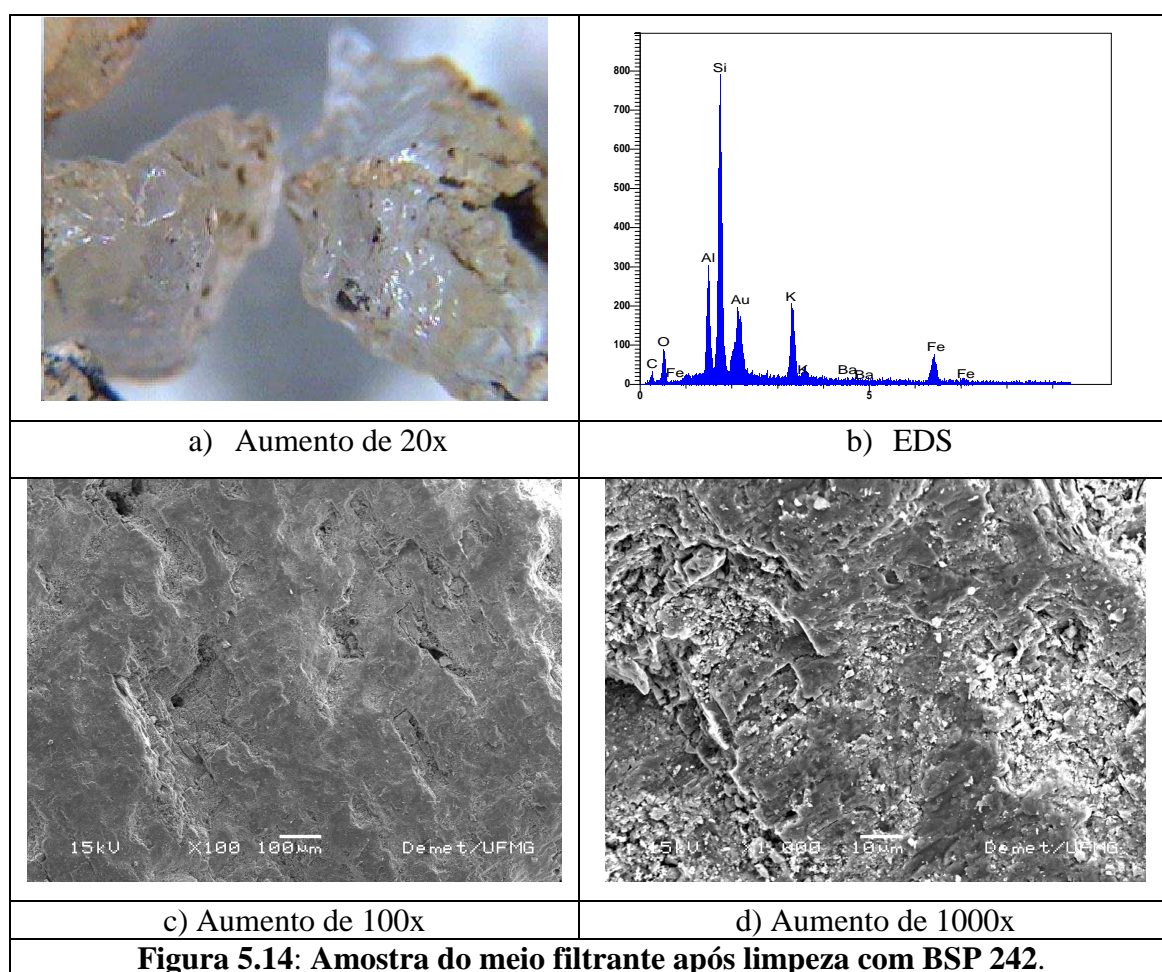
Na Figura 5.13a observa-se a presença de lama ( partículas de carepa impregnada com óleo) nas cavidades do meio filtrante. A Figura 5.13b apresenta os resultados da análise semiquantitativa de composição da superfície do meio filtrante, realizada utilizando uma microsonda acoplada ao microscópio eletrônico de varredura. Foi observada a

presença do Si, confirmando a composição química da areia que é o meio filtrante estudado. Foi observada também a presença do Au que é devida à metalização do material utilizando tal metal. A presença do ferro indica a presença da lama que não foi removida o suficiente do material. As Figuras 5.13c e 5.13d apresentam um aumento de 100 e 1000x, respectivamente, focando a região contendo lama.

#### **5.4.2 – Análise Química e Morfológica da Superfície do Meio Filtrante Utilizando a Limpeza com BSP 242**

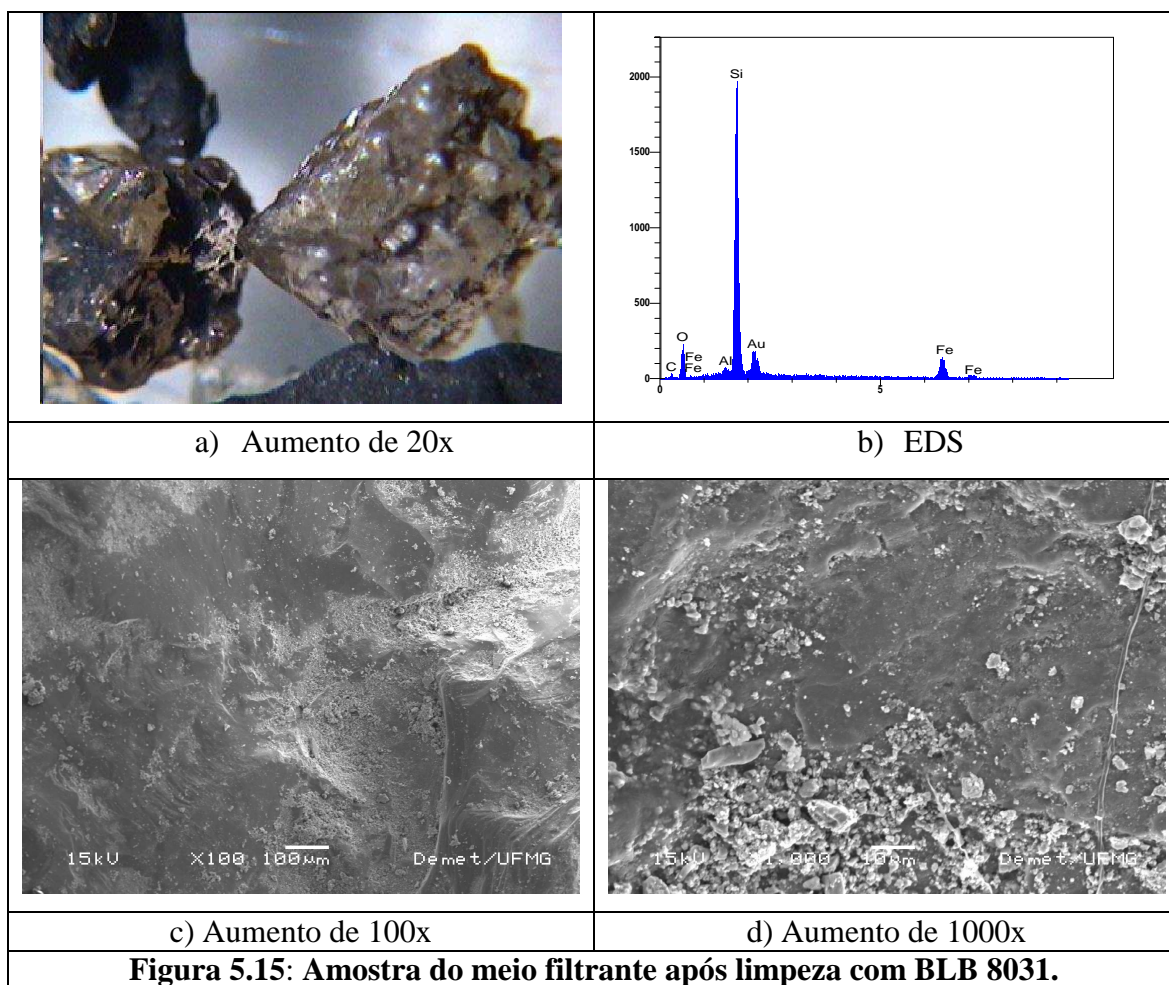
A Figura 5.14 apresenta a os resultados da análise morfológica do meio filtrante após ser realizada a limpeza com BSP 242, obtida a partir da análise por microscopia eletrônica de varredura.

Na Figura 5.14a foi observada a presença lama nas cavidades do meio filtrante em menor quantidade, com relação à Figura 5.13a. A Figura 5.14b apresenta os resultados da análise semiquantitativa de composição da superfície do meio filtrante, realizada utilizando uma microssonda acoplada ao microscópio eletrônico de varredura indicando traços de ferro. As Figuras 5.14c e 5.14d apresentam um aumento de 100 e 1000x, respectivamente, focando a região contendo lama.



### 5.4.3 – Análise Química e Morfológica da Superfície do Meio Filtrante Utilizando a Limpeza com BLB 8031

A Figura 5.15 apresenta a os resultados da análise morfológica do meio filtrante após ser realizada a limpeza com BLB 8031, obtida a partir da análise por microscopia eletrônica de varredura.



Na Figura 5.15a foi observada a presença de lama nas cavidades do meio filtrante. A Figura 5.15b apresenta os resultados da análise semiquantitativa de composição da superfície do meio filtrante, realizada utilizando uma microsonda acoplada ao microscópio eletrônico de varredura confirmando a presença do ferro. As Figuras 5.15c e 5.15d apresentam um aumento de 100 e 1000x, respectivamente, focando a região contendo lama.

De acordo com as Figuras 5.13, 5.14 e 5.15, o BSP 242 foi o produto químico que apresentou um melhor resultado na remoção de lama impregnada no meio filtrante. Este produto contém em sua formulação ácidos inibidos e tensoativo; já o BLB 8031 é um dispersante orgânico contendo tensoativos e amidas.



De acordo com Kurita (1999) a combinação de álcalis e surfatante é geralmente usada para conter sujeira de alta concentração de óleos. Ácidos são usados geralmente junto com surfatantes para remover óxidos metálicos.

## 6 – Conclusões

As características da água utilizada no processo de filtração contêm a presença de sólidos em suspensão, óleos e graxas, sendo que a quantidade destes parâmetros são em maior quantidade antes da filtração, indicando que parte fica deles fica retido nos filtros de areia. A presença dos sólidos em suspensão é proveniente da carepa mais fina que fica dispersa na água que foi utilizada na laminação à quente. A presença de óleo e graxa na água tem sua origem das engrenagens do laminador e também da aspensão do óleo de laminação na placa e nos cilindros visando a redução do atrito.

Após a utilização da técnica de Espectrometria no Infravermelho foi feita uma correlação da presença dos três tipos de óleo utilizados no processo de laminação à quente: hidráulico, lubrificante e de laminação. Os resultados mostraram que há uma correlação de 78% de óleo lubrificante, 55% de óleo hidráulico e menos que 30% de óleo de laminação na tubulação para o filtro de areia.

Foi feita uma comparação entre os espectros dos óleos obtidos pela Espectrometria no Infravermelho onde foi observado que há picos característicos para o espectro do óleo hidráulico e para o óleo de laminação, tais como: 3474, 1747, 1238, 3787, 2032 e 1305  $\text{cm}^{-1}$ . Porém não foi observado nenhum pico característico para o óleo lubrificante.

Quanto à caracterização do meio filtrante, foi observado que a área superficial específica antes da limpeza química é menor que da amostra após a limpeza química indicando que havia uma aglomeração de partículas. Como o diâmetro das partículas não variou muito, ficando praticamente inalterado, parte da área superficial estava obstruída com o óleo adsorvido presente na água a ser filtrada.

O resultado da análise granulométrica indicou que o diâmetro das partículas variou entre 0,29 e 3,36mm. Foi observado que o percentual de material retido com diâmetro de 1,7mm foi de 41,8 e 42,5% para as amostras do meio filtrante antes e após a limpeza

química, respectivamente. O meio filtrante não variou em tamanho de partícula com a limpeza química.

Foi observado um acúmulo de material impregnado no meio filtrante. O produto BSP242 apresentou o melhor resultado de limpeza química da superfície do meio filtrante com a menor concentração utilizada nos testes (1%). Durante a limpeza química foi observada a formação de espuma.

O outro produto testado, BLB8031, não apresentou a formação de espuma, porém mesmo elevando a concentração do produto a 10%, o resultado da limpeza da superfície do meio filtrante foi pior se comparado com o BSP242.

A limpeza do meio filtrante foi realizada em escala industrial, durante o processo de retrolavagem do filtro de areia.

Quanto a morfologia da superfície do meio filtrante, foi observado que a amostra antes da limpeza química apresentou a presença do ferro pela análise de EDS. Com a utilização dos produtos químicos para a limpeza, foi observado que quando testado o BLB8031, houve uma redução do teor de ferro e após a utilização do BSP242, o teor de ferro praticamente desapareceu da superfície da amostra.

O BLB8031, que apresentou bons resultados de limpeza superficial, apresenta em sua formulação química dispersante orgânico contendo surfatantes e amidas. O BSP242, que apresentou excelentes resultados de limpeza superficial do meio filtrante apresentou em sua formulação química tensoativos e ácidos inibidos.

## **7 – Contribuições Originais ao Conhecimento**

Avaliação da ação de produtos químicos utilizados para limpeza de superfície com diferentes características na remoção de óleo e graxa e óxido de ferro proveniente da carepa do processo de laminação à quente da superfície do meio filtrante.

Avaliação do comportamento físico-químico, em escala de laboratório e posteriormente em escala industrial, do produto químico utilizado para limpar a superfície do meio filtrante impregnado de carepa e óleo e graxa.

Utilização em escala industrial da aplicação do produto químico que obteve o melhor resultado em laboratório.

Avaliação das etapas de retrolavagem dos filtros de areia quando da aplicação do produto químico utilizado para limpeza de superfície, avaliando o tempo de cada etapa *versus* a ação do produto testado.

## 8 – Sugestões para Trabalhos Futuros

Avaliar se o coagulante e/ou floculante utilizados na decantação dos sólidos em suspensão possui interferência na ação de aglomeração da lama (carepa fina juntamente com óleos e graxas) às das partículas do meio filtrante. Avaliar se também podem interferir na ação do produto de limpeza químico.

Avaliar outros métodos para identificar os tipos de óleo além da Espectroscopia no Infravermelho.

Avaliar a ação dos componentes químicos do óleo *versus* a formulação química dos agentes de limpeza.

Testar em laboratório diversos tipos de ácidos e álcalis para verificar a ação de limpeza em diferentes pH.

Avaliar a influência do óleo no mecanismo de coagulação.

## Referências Bibliográficas

ADDAI-MENSAH, J., 2007, Enhanced flocculation and dewatering of clay mineral dispersions. *Powder Technology*, 179, p. 73-78.

ADDAI-MENSAH, J.; RALSTON, 2004, Interfacial chemistry and particle interactions relationships with dewatering behaviour of iron oxide dispersions. *Hydrometallurgy*, 74, p. 221-231.

ALBUQUERQUE, O .A . L. P. Lubrificação. Editora McGraw-Hill do Brasil LTDA. 1977. São Paulo.

AMBURGEY, J. E. Optimization of the Extended Terminal Subfluidization Wash (ETSW) Filter Backwashing Procedure. *Water Reserch*. 2004.

AMIRFAZLI, A . NEUMANN, A . W. Status of the Three-Phase Line Tension. *Advances in Colloid and Interface Science*. Department of Mechanical and Industrial Engineering. University of Toronto. Toronto. Canadá. 2004.

AMIRTHARAJAH, A. Optimum backwash of filters with air scour. *Water Sci & Technol*. 1993. pp195-211.

ATESOK, G., 1988, Adsorption of polymers. *Bull. Tech. Univ. Instanb*. 41, 13 – 32.

BABBITT, H. E.; DONALD, J .J.; CLEASBY, J. L. Abastecimento e Purificação da Água. São Paulo. Editora Blucher LTDA. 1962.

BESRA, L.; ROY, S.K.; SENGUPTA, D.K.; AY, P., 2004, Influence of polymer adsorption and conformation on flocculation and dewatering of kaolin suspension. *Separation and Purification Technology*, 37, p. 231-246.

BESRA, L.; SENGH, B. P.; REDDY, P. S. R.; SENGUPTA, D.K. Influence of Surfactants on Filter Cake Parameters during Vacuum Filtration of Flocculated Iron ore Sludge. Powder Technology. 1997.

BRANDÃO, P. R. G.; ARAÚJO, A. C.; PERES, A. E. C. Simpósio EPUSP de Caracterização Tecnológica na Engenharia e Indústria Mineral. São Paulo, 1990.

CAMBIELLA, A.; ORTEA, E.; RIOS, G.; BENITO, J. M.; PAZOS, C.; COCA, J. Treatment of Oil-in-Water Emulsions: Performance of a Sawdust Bed Filter. Journal of Hazardous Materials. 2005.

CASSANELLO, M., LARACHI, F., MARIE M-N., GUY C. AND CHAOUKI J. Experimental Characterization of the solid phase chaotic dynamics in three-phase fluidization. Ind. Eng. Chem. Res.34, 2971-2980. 1995.

CHIPPS, M. J. BAUER, M. J. BAYLEY, R. G. Achieving Enhanced Filter Backwashing with Combined Air Scour and Sub-fluidising Water at Pilot and Operational Scale. Filtration & Separation. Thames Water Utilities Ltd, Group Research & Development. Spancer House. UK. 1993.

COLTON, J. F. HILLIS, P. FITZPATRICK, C. B. Filter Backwash and Start-Up Strategies for Enhanced Particulate Removal. Research Note. School of Water Sciences. Cranfield University. Cranfield, England. 1996.

ECKENFELDER JR, W. W. Industrial Water Pollution Control, McGraw-Hill Book Company. New York, 1989.

FITZPATRICK, C. B. Instrumentation for Investigating and Optimising Filter Backwashing. Department of Civil & Environment Engineering. University College London, Gower Street. London. 1997.

FITZPATRICK, C. B. and HALL, D. Spectral Analysis of pressure variations During Combined Air and Water Backwash of Rapid Gravity Filters. Department of Civil & Environment Engineering. University College London, Gower Street. London. 1999.

FRANKS, G. V.; LI, H. H.; O'SHEA, J. P.; QIAO, G. G., 2008, Application of poly(isopropyl acrylamide) (PNIPAM) as a multiple function process aid in mineral flotation and solid/liquid separation. Proceedings of XXIV International Mineral Processing Congress, Beijing, vol 2, p. 2097-2106.

GOMIDE, R. *Operações unitárias* v. 4. São Paulo : Gomide, 1980.

GREGORY, J., 1976, The effect of cationic polymers on the colloidal stability of latex particles. Journal of Colloids and Interface Science, 55, p. 35-44.

GUEDES, C. D.; PEREIRA, J. G.; LIMA, J. C.; PAIVA, J. F. Coagulação/Floculação de Suspensões Ricas em Óxido de Ferro por Sulfato de Alumínio. Química Nova, Volume 27, número 5. Páginas 715-719. 2004

HARTMAN, M.; POHORILY, M. TRNKA, O. Fluidization of Dried Wastewater Sludge. Powder Technology. 2007.

HOGG, R., 1984, Collision efficiency factor for polymer flocculation. Journal of Colloid and Interface Science, 102, p. 232-236.

HOGG, R., 2000, Flocculation and dewatering. Int. J. Miner. Process. 58, 223-236.

HUISMAN. L. Rapid Filtration. Delft University of Technology. Department of Civil Engineering. Division of Sanitary Engineering. 1979.

HUMBY, M. S. FITZPATRICK, C. B. Attrition of Granular Filter Media During Backwashing With Combined Air and Water. . School of Water Sciences. Cranfield University. Cranfield, England. 1995.



HALL, D. FITZPATRICK, C. B. Suspension Concentration Profiles During Rapid Gravity Filter Backwashing. Chemical Engineering Journal. Department of Civil and Environmental Engineering, University College London. Gower St., London. UK. 2000.

JAFELICCI, J. M. Fundamentos e Aplicações da Flotação como Técnica de Separação de Misturas. Química Nova na Escola. Disponível em <http://www.iq.unesp.br/flotação> (Acesso em 25/10/2008)

JAMES-SMITH, M.; ALFORD, K.; SHAH, D. O. A Novel Method to Quantify the Amount of Surfactant at the Oil/Water Interface and to Determine Total Interfacial Area of Emulsions. Journal of Colloid and Interface Science. 2007.

Kurita Handbook of Water Treatment. Second English Edition. 1999. Japão.

LEME, F. P. Teoria e Técnicas de Tratamento de Água. CETESB. São Paulo. 1979.

LIBÂNIO, M. Fundamentos da Qualidade e Tratamento de Água. Editora Átomo. 2005. São Paulo.

MANSUR, H. Notas de Aula: Curso Introdução a Caracterização de Materiais e Superfícies. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da UFMG. 2000.

MATTENSON, M. J E ORR, C. Filtration: Principles and Practices. Segunda Edição. 1987. Nova York.

MCFARLENE, A. J.; BREMMELL, K. E.; ADDAI-MENSAH, J., 2005, Optimising the dewatering behaviour of clay tailings through interfacial chemistry, orthokinetic flocculation and controlled shear. Powder Technology, 160, p. 27-34.

MCFARLENE, A. J.; BREMMELL, K. E.; ADDAI-MENSAH, J., 2008, The influence of flocculants adsorption kinetics on the dewaterability of clay mineral dispersions. *Colloids and Surfaces A*, 317, 39-48.

MCGUIRE, M. J.; ADDAI-MENSAH, J.; BREMMELL, K. E., 2006, The effect of polymer structure type, pH and shear on the interfacial chemistry rheology and dewaterability of iron oxide dispersions. *Colloids and Surfaces A*, 275, p. 153-160.

METCALF & EDDY. *Wastewater Engineering – Treatment, Disposal and Reuse*, 3<sup>rd</sup> edition, McGraw-Hill. USA. 1991

MOURA, C. R. S. e CARRETEIRO, R. P. *Lubrificantes e Lubrificação*. Livros Técnicos e Científicos. Editora S. A . 1975. Rio de Janeiro.

MPOFU, P.; ADDAI-MENSAH, J.; RALSTON, J., 2003a, The influence of hydrolysis metal ions on the interfacial chemistry, particle interactions and dewatering behaviour of kaolinite dispersions. *Journal of Colloids and Interface Science*, 102, p. 232-236.

NETTO, J. M. A. e RICHTER, C. A. *Tratamento de Água: Tecnologia Atualizada*. São Paulo. Editora Edgard Blucher LTDA. 1991.

OHLWEILER, O. A. *Química Analítica Quantitativa*. 1974

RAMASWAMY, B.; KAR, P. D.; DE, S. A Study on Recovery of Oil from Sludge Containing Oil Using Froth Flotation. *Journal of Environment Management*. 2006.

ROSEN, M. J. *Surfactants and Interfacial Phenomena*. New York. 1979.

SHIOI, A . KATANO, K. ONODERA, Y. Effect of Solid Walls on Spontaneous Wave/oil Interfaces. *Journal of Colloid and Interface Science*. Department of Chemistry and Chemical Engineering, Yamagata University .2003. Japan.

SILVERSTEIN, R. M. and BASSLER, G. C. Spectrometric of Organic Compound. 2ed. Jonh Wiley & Sons, New York. 1991.

SISSOM, L.E and PITTS,D.R. Elements of Transport Phenomena. New York. 1972.

STEVENSON, D. G. Process Conditions for the Backwashing of Filters With Simultaneous Air and Water. Reserch Note. Department of Civil and Environmental Engineering. Univerty College. London,England. 1995.

TANSEL, B. VILAR, F. Enhancement of Media Filter Performance With Coagulant Use for Treatment of Diesel Oil Contaminated Surface Water.Desalination. Civil and Environmental Engineering Department, Florida International University. Miami. 2004.

TJIPANGANDJARA, K. F.; SOMASUNDARAN, P., 1991, Effects of changes in adsorbed polyacrylic acid conformation and alumina flocculation. Colloids and Surfaces, 55, 245-255.

YONG, H. K., 1995, Coagulation and flocculation – Theory and practice, first edition, Tall Oaks Publishing.

YOUNG, J. C. Removal of Grease and Oil by Biological Treatment Process. Grease and Oil. 1979.

WAKEMAN, R. J. Filtration Post-Treatment Process. Department of Chemical Engeneering. University of Exeter. 1975.Devon, England.

WERNEKE, M. F., 1979, Application of synthetic polymers in coal preparation. Soc. Min. Eng. AIME 79-106, 1 -11. (Reprint number).

WILLIAMS, G.J.; SHEIKH, B. HOLDEN, R. B.; KOURETAS, T. J. NELSON, K. L. The Impact of Increased Loading Rate on Granular Media Rapid Depth Filtration of Wastwater. Water Research. 2007.

[www.ibs.org](http://www.ibs.org)

[www.lubrificantes.net](http://www.lubrificantes.net)

[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

[www.google.com.br](http://www.google.com.br)