

4 Coagulação química

A coagulação é empregada para a remoção de material em suspensão ou coloidal. Os colóides são apresentados por partículas que tem uma faixa de tamanho de 1 nm (10^{-7}) a 0,1 nm (10^{-8}), e causam cor e turbidez. As partículas coloidais não sedimentam e não podem ser removidas por processos de tratamento físicos 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). Se suas características não forem alteradas, permanecem no meio líquido. Para que as impurezas possam ser removidas, é preciso então alterar algumas características por meio da coagulação, floculação, sedimentação (ou flotação) e filtração.

É comum referir-se aos sistemas coloidais como hidrófobos ou suspensóides quando repelem a água, e como hidrófilos ou emulsóides quando apresentam afinidade com a água (Di Bernardo, 2005).

A matéria particulada na água residuária é na maior parte orgânica. As condições de mistura e de floculação para a agregação de colóides orgânicos serão diferentes daquelas empregadas para colóides inorgânicos: as superfícies hidrofílicas destas partículas orgânicas reagem diferentemente à adição de coagulante. Em geral, coagulante é o produto químico que é adicionado para desestabilizar as partículas coloidais de modo que possa formar o floco. Em geral são utilizados sais de alumínio e ferro. Floculante é o produto químico, geralmente orgânico, adicionado para acentuar o processo de floculação (Metcalf & Eddy, 2003). A maioria dos floculantes usados consiste em polieletrólitos tais como derivados de poliacrilamida e de poliestireno (Bekri-Abbes, Bayoudh e Baklouti, 2007).

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 aqui é desestabilizar a suspensão coloidal reduzindo todas as forças atrativas, desse modo abaixando a barreira de energia e permitindo partículas de se agregarem.

Dependendo das propriedades físicas e químicas da solução, do poluente e do coagulante, um número de mecanismos de coagulação (por exemplo, neutralização da carga, compressão da dupla camada, formação de pontes e arraste) foram postulados. A dosagem do produto químico entrega o coagulante como um sal que se dissocia na solução com hidrólise do cátion de alumínio (e de ânions associados) que determinam a especiação da solução e pH. Adição de alumínio (isto é, sulfato de alumínio), por exemplo, acidifica a água (Holt, 2002).

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. O processo é muito rápido, variando desde décimos de segundo a cerca de 100 segundos, dependendo das demais características (pH, temperatura, condutividade elétrica, concentração de impurezas, etc.). Daí em diante há necessidade de agitação lenta, para que ocorram choques entre as impurezas, que se aglomeram formando partículas maiores, denominadas flocos, que podem ser removidos por sedimentação, flotação ou filtração rápida. Essa etapa é denominada floculação (Di Bernardo, 2005). Uma característica essencial da floculação da água residuária é a eliminação dos sólidos em suspensão e do material orgânico tanto quanto possível (Amuda e Alade, 2006).

O processo de coagulação/floculação pode ser usado como pré-tratamento antecedente ao tratamento biológico a fim de aumentar a biodegradabilidade da água residuária durante o tratamento biológico. Se o tratamento físico-químico feito no estágio inicial do tratamento de água residuária for eficaz, a carga orgânica em toda a fase biológica subsequente ao tratamento estará então reduzida consideravelmente (Amuda e Amoo, 2006). A planta de tratamento completa será mais compacta e terá maior eficiência de energia (Bhuptawat, Folkard e Chaudhari, 2006).

As dosagens dos coagulantes variam em grande escala para maximizar a eficiência de remoção dos poluentes, usando doses mínimas no pH ótimo (Amuda e Alade, 2006).

As condições ótimas para a coagulação podem ser determinadas fazendo-se o *Jar Test*. Estes testes podem ser usados para estabelecer o melhor tipo e a melhor concentração do coagulante, as condições apropriadas de mistura e as taxas de sedimentação floculenta para melhor remoção orgânica e/ou da

toxicidade (Al-Mutairi, 2006 *apud* Adams *et al.*, 1981). O procedimento de *Jar Test* pode ser encontrado no Apêndice C.

4.1 Propriedades das partículas coloidais

As partículas coloidais têm uma área superficial específica muito alta e conseqüentemente seu comportamento na suspensão é determinado na maior parte pelas suas propriedades de superfície (Casey, 1997).

Do ponto de vista energético, algumas partículas coloidais são termodinamicamente estáveis e denominadas colóides reversíveis, incluindo as moléculas de detergente ou sabão (miscelas), proteínas, amidos e alguns polímeros de grande cadeia. Outros colóides, termodinamicamente instáveis, são denominados irreversíveis, como argilas, óxidos metálicos, microorganismos, etc., e estão sujeitos à coagulação. Alguns colóides coagulam rapidamente e outros, lentamente.

Os termos estável e instável muitas vezes são aplicados aos colóides irreversíveis, referindo-se, porém, à cinética da coagulação e não às características termodinâmicas e energéticas. Um sistema coloidal cineticamente estável é um sistema irreversível ou termodinamicamente instável, no qual a coagulação é desprezível; por outro lado, um sistema coloidal cineticamente instável é um sistema coloidal irreversível no qual a coagulação é significativa.

São duas as formas de estabilidade das partículas e moléculas:

- i) estabilidade eletrostática;
- ii) estabilidade estérica.

Para cada condição de estabilidade são considerados dois aspectos (Di Bernardo, 2005):

- a) estrutura da interface sólido-líquido;
- b) forças entre duas interfaces quando próximas entre si.

Segundo Faust & Aly (1998), citado por Di Bernardo (2005), os colóides são estáveis em sistemas aquosos em razão de sua capacidade de hidratação ou da carga eletrostática em sua superfície. Ambos os fenômenos dependem essencialmente da estrutura química e da composição da superfície da partícula na interface com a água (**Figura 4.1**). As moléculas de água, cátions e ânions

interagem com a superfície da partícula por meio de ligações iônicas (energia de ligação entre 150 e 200 kcal/mol), covalente (energia de ligação entre 50 e 100 kcal/mol), de hidrogênio (energia de ligação de 1 a 10 kcal/mol) e polar (energia de ligação menor que 5 kcal/mol). Além das forças eletrostáticas, há as forças de atração de van der Waals, decorrentes da polarização induzida nas moléculas e átomos, que são fracas e apresentam energia de ligação similar às ligações polares. Por isso, a estabilização eletrostática é a grande preocupação na coagulação de partículas coloidais.

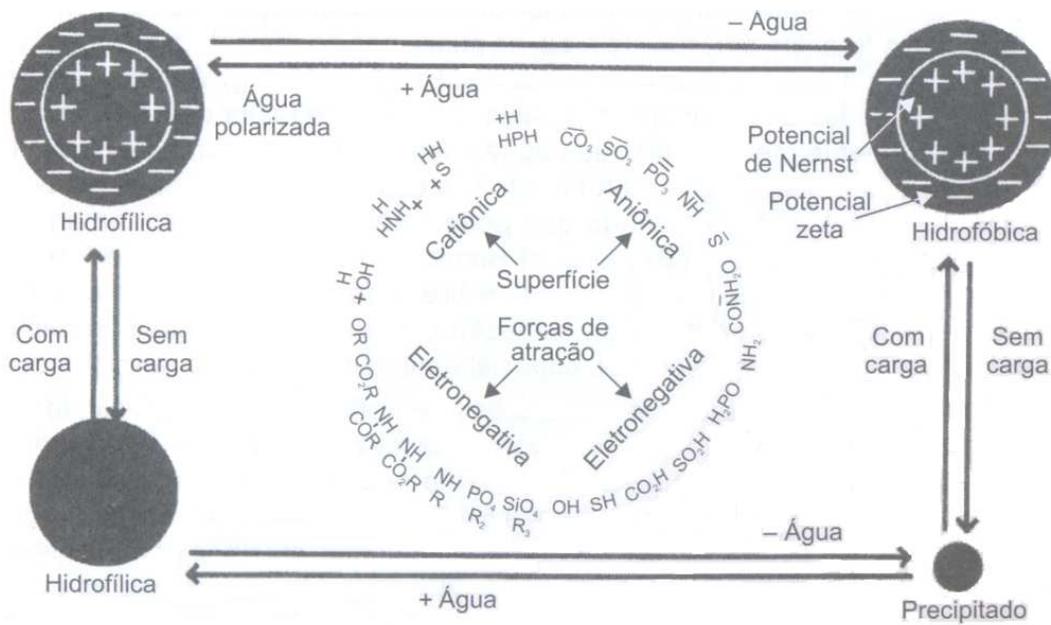
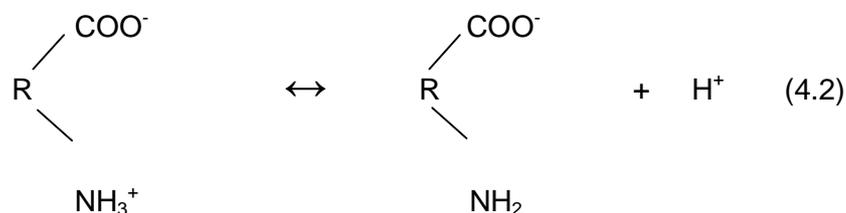
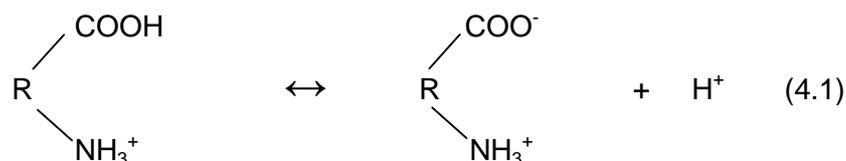


Figura 4.1 – Interação entre partícula coloidal e água de hidratação em sistemas aquosos (Di Bernardo, 2005).

4.1.1 Estabilização eletrostática

Na água, a maior parte das partículas possui superfície carregada eletricamente, usualmente negativa e decorrente de três fenômenos (Di Bernardo, 2005):

- a) grupos presentes na superfície sólida podem, ao reagir com a água, receber ou doar prótons:
 - substâncias orgânicas contendo grupos carboxílicos e amina podem reagir da seguinte forma:



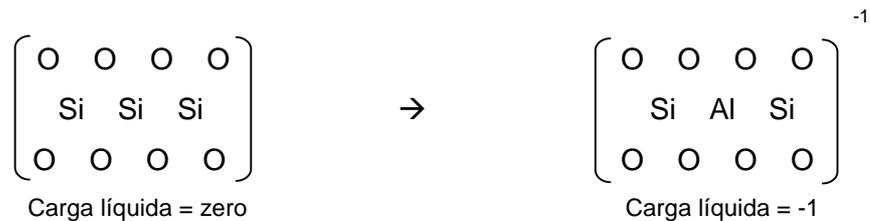
Nessas reações, a carga superficial depende da concentração de prótons (H^+) ou do pH da água. Com o aumento do pH, diminui a concentração de prótons e o equilíbrio das reações acima se desloca para a direita e a molécula orgânica torna-se mais negativa. Geralmente, grupos carboxílicos e amina apresentam-se negativos para valores de pH maiores que 4 (Di Bernardo, 2005).

b) grupos superficiais podem reagir na água com outros solutos além de prótons (por exemplo, considerando a sílica como óxido representativo):



A formação de complexos envolve reações químicas específicas entre grupos da superfície da partícula e solutos adsorvíveis (íons fosfato, por exemplo) e dependem do pH.

c) imperfeições na estrutura da partícula (substituição isomórfica) são responsáveis por parcela substancial da carga das argilas minerais; tipicamente, plaquetas de sílica tetraédrica são cruzadas por plaquetas de alumina octaédrica, de modo que, se um átomo de silício é substituído por um de alumínio durante a formação da plaqueta, resulta carga superficial negativa.



De forma semelhante, um cátion divalente, como Mg^{2+} ou Fe^{2+} , pode substituir um átomo no óxido de alumínio da estrutura octaédrica, resultando carga superficial negativa. O sinal e a magnitude da carga resultante de tais substituições isomórficas são independentes das características da fase aquosa, após a formação do cristal.

Em decorrência dos três fenômenos, por meio dos quais os colóides se apresentam com carga superficial negativa, ocorre um balanço com íons de carga contrária presentes na água e, por isso, um sistema coloidal não apresenta carga elétrica “líquida”. Williams (1994), citado por Di Bernardo (2005), comenta que a carga superficial, juntamente com a movimentação Browniana, conduz à formação da Dupla Camada Elétrica (DCE), formada pelas cargas superficiais e pelo excesso de íons com carga oposta (contra-íons) adsorvidos na partícula, deixando o meio circundante eletricamente neutro e mais adiante da superfície, e pó co-íons (íons de mesma carga) distribuídos de maneira difusa no meio polar (**Figura 4.2**).

O modelo mais simples sobre a DCE considera a interface como um dispositivo armazenador de carga, análogo a um capacitor de placas paralelas. Um modelo mais realista envolve a divisão da dupla camada em duas regiões, Camada Compacta (CC), Stern, e Camada Difusa (CD), conforme mostrado na **Figura 4.3**. Sendo negativa a superfície da partícula, há acúmulo de íons positivos na região da interface sólido-líquido, formando, juntamente com a carga negativa da partícula, a CC. Íons negativos aproximam-se da CC e, atraindo íons positivos, formam a camada difusa, que engloba a primeira; a CD resulta, na realidade, da atração de íons positivos, repulsão eletrostática de íons negativos e difusão térmica (AWWA, 2000). A idéia da DCE foi proposta por Helmholtz, que desenvolveu o conceito de um sistema contendo cargas distribuídas em dois planos paralelos. Porém, com a movimentação térmica dos íons na água, ocorre certo grau de desordem, fazendo com que os íons sejam espalhados fora da região da superfície carregada.

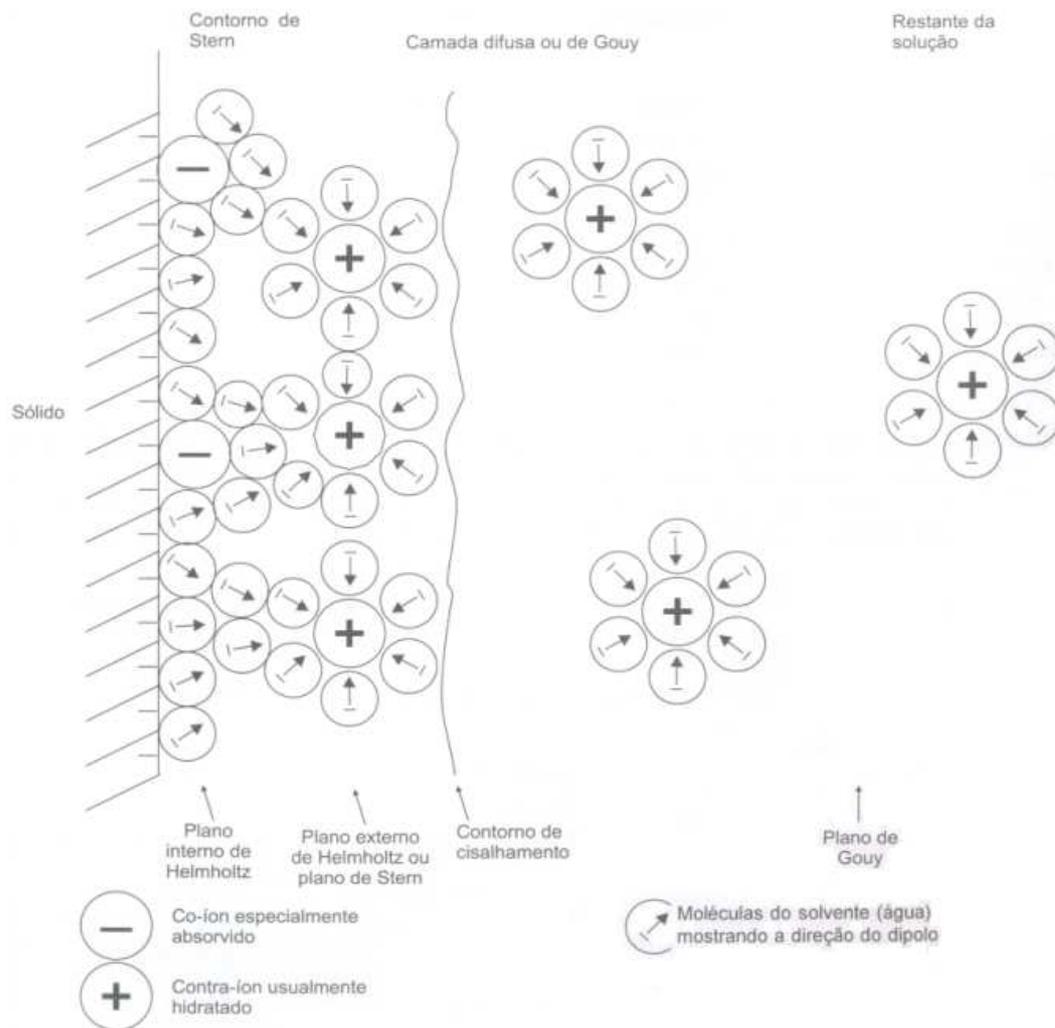


Figura 4.2 – Representação esquemática da dupla camada elétrica nas vizinhanças de uma interface sólido-líquido (Di Bernardo, 2005).

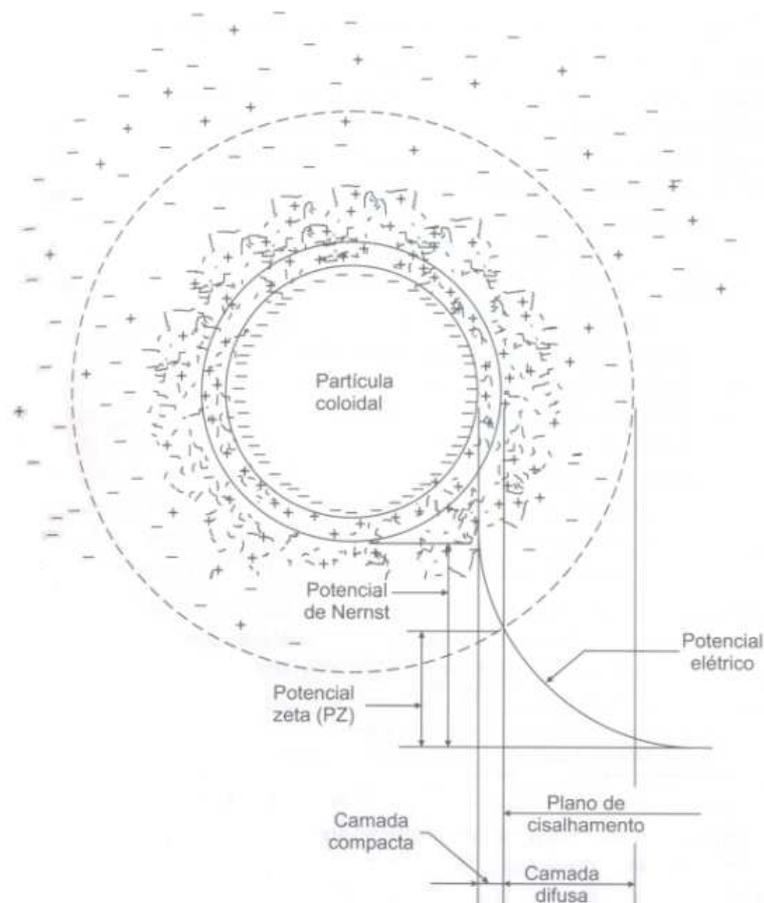


Figura 4.3 – Configuração esquemática da dupla camada elétrica (Di Bernardo, 2005).

A elevada concentração de íons positivos próximos à superfície do colóide é denominada camada de Stern, a partir da qual se forma a camada difusa, onde a concentração de íons é menor. O potencial elétrico causado pela presença do colóide na água diminui com a distância, a partir da superfície do mesmo, onde é denominado Potencial de Nernst (PN). Stern afirmou que há uma distância mínima entre a superfície do colóide e os íons de carga contrária, na qual o potencial elétrico decresce linearmente; em seguida, a diminuição resulta exponencial, passando pela fronteira das camadas compacta e difusa, região em que o potencial elétrico, segundo Lyklema (1978), é chamado de Potencial Zeta (PZ). O conceito deste potencial está associado à aplicação da diferença de potencial em uma amostra de água contendo colóides negativos, de tal forma que certa porção do meio, em torno da partícula, caminha junto com esta ao eletrodo positivo, caracterizando o Plano de Cisalhamento (Di Bernardo, 2005). O potencial zeta é determinado pela medida da mobilidade das partículas coloidais através de uma célula, visto através de um microscópio (Eckenfelder,

1989). O uso do valor do potencial zeta medido é limitado porque vai variar com a natureza dos componentes da solução (Metcalf & Eddy, 2003).

Quando dois colóides semelhantes se aproximam um do outro, ocorre interação entre as camadas difusas, fazendo com que haja repulsão em decorrência da força eletrostática entre os mesmos. A energia potencial de repulsão diminui com a distância a partir da superfície do colóide.

Existem forças atrativas entre as partículas, denominadas forças de van der Waals. Essas forças surgem de interações dipolo-dipolo, dipolo-dipolo induzido e de dispersão e são dependentes da estrutura química e da topologia das superfícies de interação.

A interação entre as forças de repulsão de origem elétrica e de atração de van der Waals, entre partículas que se movem continuamente em decorrência do movimento Browniano, contribui para a estabilidade do sistema. A energia potencial de repulsão é conhecida como o trabalho necessário para a aproximação de duas partículas coloidais semelhantes, partindo-se de uma distância infinita, e é tanto maior quanto menor a distância entre as mesmas. Quando a força iônica é pequena, a energia resultante é de repulsão e atinge um valor máximo, denominado de barreira de energia, a uma distância próxima àquela em que se tem o plano de cisalhamento. Por isso, o potencial zeta pode fornecer informações sobre o grau de estabilidade de um sistema coloidal. Já quando a força iônica é grande, a energia resultante pode ser reduzida a ponto de eliminar a barreira de energia, de modo que as partículas podem se aproximar sem que haja repulsão entre elas.

4.1.2 Estabilização estérica

O termo estérico refere-se ao arranjo dos átomos no espaço. A adsorção de polímeros na superfície das partículas coloidais ocorre em decorrência da interação coulombica (carga-carga), por meio de ligações de hidrogênio, interações de van der Waals ou pela combinação destas. Os polímeros adsorvidos sobre a superfície das partículas afetam as interações repulsivas e as atrativas; no primeiro caso, a repulsão da DCE aumentará se o polímero estiver ionizado e com o mesmo sinal das partículas; no segundo caso, o polímero adsorvido pode enfraquecer a força de atração. Os polímeros adsorvidos tanto podem estabilizar como desestabilizar, dependendo principalmente da

quantidade relativa de polímero e de partículas, da afinidade entre o polímero com a partícula e a água e do tipo e da concentração de eletrólitos presentes.

As alças e as caudas (**Figura 4.4**) decorrentes da adsorção de um polímero na superfície da partícula coloidal geralmente são as partes estabilizadoras da cadeia, uma vez que, dependendo do tipo de interação com as partículas ou com a água, podem acarretar o aparecimento de energia de repulsão, impedindo sua aglomeração. Os segmentos fixados à superfície são os responsáveis pelo ancoramento da cadeia polimérica, pois se ligam a sítios superficiais com os quais possuem afinidade.

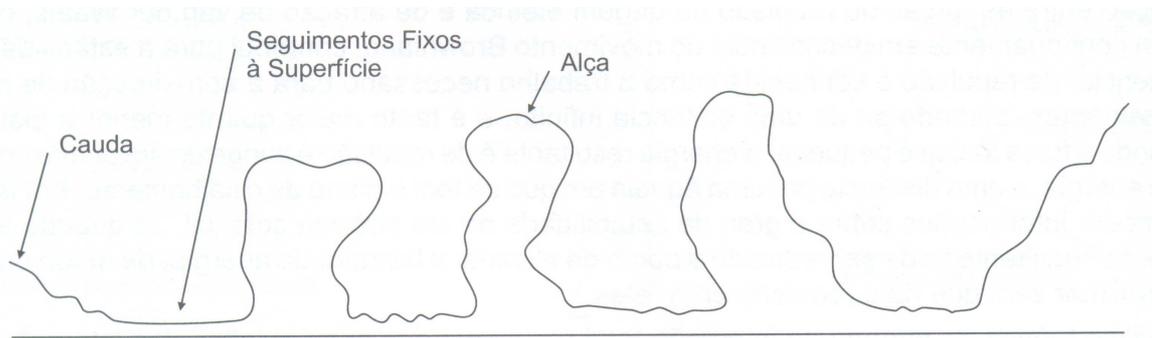


Figura 4.4 – Configuração esquemática de polímeros adsorvidos na superfície de partículas coloidais (Di Bernardo, 2005).

Quando há interação entre as superfícies de duas partículas recobertas por polímeros, que se encontram muito próximos, a repulsão entre elas pode ocorrer de duas formas, conforme mostra a **Figura 4.5**. Em uma delas, com a colisão entre as partículas, cada camada de polímero pode ser comprimida, reduzindo o volume disponível para as moléculas adsorvidas e restringindo o movimento dos polímeros, causando assim, a repulsão entre as partículas. Na outra, e mais freqüentemente, as camadas adsorvidas se entrelaçam, aumentando a concentração dos segmentos dos polímeros nessa região; se os segmentos estendidos dos polímeros forem muito hidrofílicos, ocorrerá, preferencialmente, a reação entre eles e água, tendendo à repulsão (Di Bernardo, 2005).

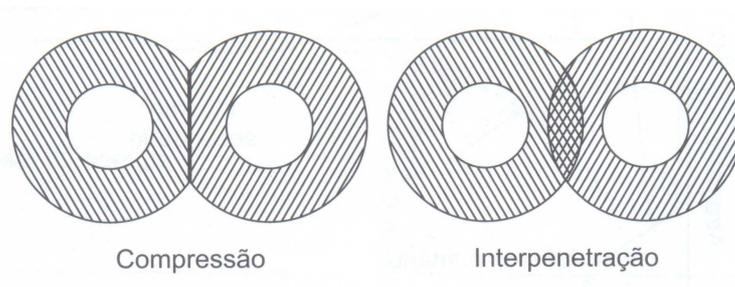


Figura 4.5 – Possibilidade de interações repulsivas decorrentes de polímeros adsorvidos na superfície de partículas coloidais (Di Bernardo, 2005).

4.2 Mecanismos

A coagulação resulta de dois mecanismos básicos: coagulação pericinética e eletrocinética, na qual o potencial zeta é reduzido por íons ou colóides de carga contrária a um nível abaixo das forças atrativas de van der Waals, e coagulação ortocinética, na qual as misturas se agregam e formam blocos que aglomeram as partículas coloidais. A adição de cátions com altas valências abaixa a carga da partícula e a distância efetiva da dupla camada, desse modo reduzindo o potencial zeta (Eckenfelder, 1989).

Porém, segundo Di Bernardo (2005), atualmente considera-se a coagulação como o resultado individual ou combinado da ação de quatro mecanismos distintos:

4.2.1 Compressão da dupla camada elétrica

A introdução de um eletrólito indiferente, ou seja, o qual não tem característica de hidrólise ou de adsorção (como sais simples, por exemplo, cloreto de sódio), em um sistema coloidal causará aumento na densidade de cargas na camada difusa e diminuirá a “esfera” de influência das partículas, ocorrendo a coagulação por compressão da camada difusa. Concentrações elevadas de íons positivos e negativos (força iônica grande) na água acarretam acréscimo do número de íons na camada difusa, que, para se manter eletricamente neutra, necessariamente tem seu volume reduzido (diminuição da espessura), de modo tal que as forças de van der Waals sejam dominantes, eliminando a estabilização eletrostática.

Dois aspectos devem ser destacados neste mecanismo de coagulação: i) a quantidade de eletrólitos para conseguir a coagulação é, praticamente, independente da concentração de colóides na água; ii) para qualquer quantidade adicionada de eletrólitos é impossível reestabilizar as partículas coloidais, ou seja, a reversão de carga das mesmas, que passa a ser positiva.

4.2.2

Adsorção e neutralização

A desestabilização de uma dispersão coloidal consiste nas interações entre coagulante-colóide, coagulante-solvente e colóide-solvente (Di Bernardo, 2005).

Como o coagulante se dissolve, os cátions servem para neutralizar a carga negativa do colóide. Isso ocorre antes da formação visível do floco, e a agitação rápida é efetiva nesta fase. Microflocos são então formados os quais retêm a carga positiva na faixa ácida devido a adsorção de H^+ . Esses microflocos também servem para neutralizar e cobrir as partículas coloidais (Eckenfelder, 1989).

No caso de espécies hidrolisadas de alumínio ou de ferro ou de polímeros sintéticos catiônicos, é comum ocorrer adsorção específica, causada pela interação entre coagulante e colóide.

O mecanismo de adsorção-neutralização de carga é muito importante quando o tratamento é realizado através da tecnologia de filtração direta, pois as partículas desestabilizadas são retidas no meio granular dos filtros.

4.2.3

Varredura

Dependendo da quantidade adicionada de coagulante, do pH da mistura e da concentração de alguns tipos de íons na água, poderá ocorrer a formação de precipitados do tipo $Al(OH)_3$ ou $Fe(OH)_3$. Em geral, os flocos obtidos com esse mecanismo são maiores e sedimentam ou flutam mais facilmente que os flocos obtidos com a coagulação realizada no mecanismo de adsorção e neutralização de cargas (Di Bernardo, 2005). A floculação aglomera os colóides com o floco hidratado do óxido. Nesta fase, a superfície de adsorção é ativa. Colóides não inicialmente adsorvidos são removidos por emaranhamento no floco (Eckenfelder, 1989). Segundo Amirtharajah & Mills (1982), citados por Di

Bernardo (2005), os mecanismos de coagulação por adsorção e neutralização de cargas e por varredura, quando é utilizado sulfato de alumínio, podem ocorrer segundo os caminhos indicados da **Figura 4.6**:

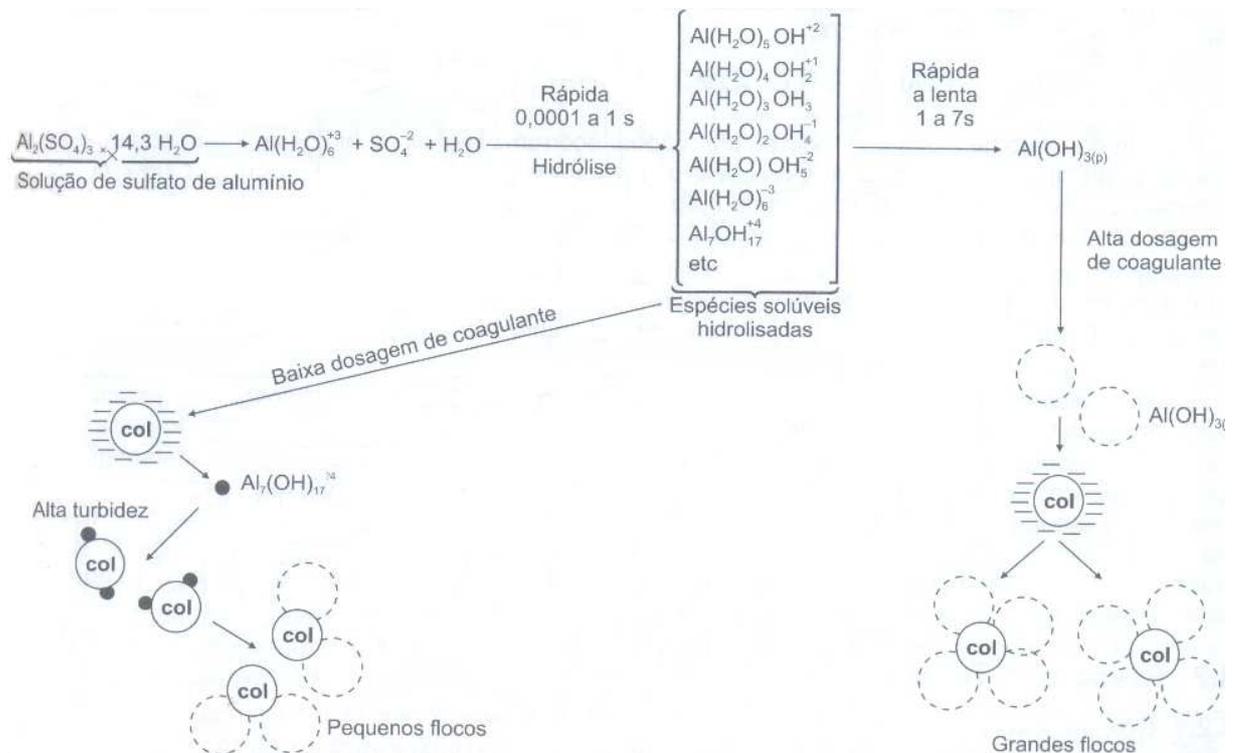


Figura 4.6 – Caminhos para a coagulação por adsorção-neutralização de carga e por varredura utilizando sulfato de alumínio (Di Bernardo, 2005).

4.2.4 Adsorção e formação de pontes

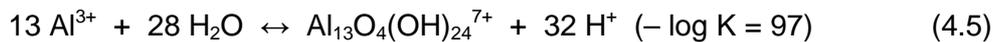
O mecanismo de adsorção e formação de pontes (*interparticle bridging*) caracteriza-se por envolver o uso de polímeros de grandes cadeias moleculares (massa molar $> 10^6$), os quais servem de ponte entre a superfície à qual estão aderidos e outras partículas (Di Bernardo, 2005).

4.3 Tipos de coagulantes e suas propriedades

O coagulante mais popular em tratamento de águas residuárias é o sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$). Quando é adicionado na água em condições alcalinas acontece a seguinte reação (Eckenfelder, 1989):



Para valores elevados da dosagem de sulfato de alumínio (geralmente superiores a 30 g/L) e de pH entre, aproximadamente, 6 e 8, há formação do precipitado $\text{Al}(\text{OH})_3$, porém, quando o pH é inferior a cerca de 5,7, pode haver formação e predominância de espécies poliméricas do tipo $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{27}^{4+}$.



Quando o sulfato de alumínio é adicionado à água, ocorrem reações de hidrólise, intermediárias, antes da formação do precipitado amorfo. Essas reações liberam prótons (H^+), consumindo substâncias que conferem alcalinidade natural à água (se existente) da ordem de 1 mg/L de sulfato de alumínio [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \times 14,3 \text{H}_2\text{O}$] para cada 0,5 mg/L de CaCO_3 (Di Bernardo, 2005).

Sais de ferro também são comumente usados como coagulantes, no entanto têm a desvantagem de apresentar um difícil manuseio. A formação de hidróxido férrico insolúvel é produzida numa faixa de pH 3,0 – 13,0, como observado na seguinte reação (Eckenfelder, 1989):



A carga do floco é positiva em condições ácidas e negativas em condições básicas, e apresenta uma mistura de cargas numa faixa de pH 6,5 – 8,0.

A adição de alguns produtos químicos pode melhorar a coagulação promovendo o crescimento dos flocos e incrementando a velocidade de sedimentação destes.

Sílica ativada é um polímero de cadeia curta, que serve para ligar as partículas microfinas de alumínio hidratado, sua dosagem está na faixa de 5 a 10 mg/L. Polieletrólitos são polímeros de alto peso molecular os quais contêm grupos adsorventes, que formam ligações entre partículas ou flocos com carga. Grandes flocos (0,3 a 1 mm) são criados quando pequenas dosagens de polieletrólitos (1 a 5 mg/L) são adicionadas conjuntamente com sulfato de alumínio ou cloreto férrico.

Existem três tipos de polieletrólitos:catiônicos, os quais absorvem colóides ou flocos negativos, aniônicos, os quais substituem os grupos aniônicos em uma partícula coloidal e permitem a ligação de hidrogênio entre o colóide e o

polímero, e um não iônico, o qual absorve e forma flocos por ligações de hidrogênio entre as superfícies sólidas e os grupos polares no polímero. A **Tabela 4.1** apresenta as aplicações gerais dos coagulantes (Eckenfelder, 1989).

Tabela 4.1 – Aplicações da coagulação química (Fonte: Eckenfelder, 1989).

Processo químico	Faixa de dosagem (mg/L)	pH	Comentários
CaI	150 – 500	9,0 – 11,0	Para coagulação de colóides e remoção de P Águas residuárias com baixa alcalinidade e alta concentração de P. $\text{Ca(OH)}_2 + \text{Ca(HCO}_3)_2 \rightarrow 2\text{CaCO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$ $\text{MgCO}_3 + \text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{Mg(OH)}_2 + \text{CaCO}_3$
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	75 – 250	4,5 – 7,0	Para coagulação de colóides e remoção de P Águas residuárias com alta alcalinidade e baixa concentração de P. $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Al(OH)}_3 + 3\text{H}_2\text{SO}_4$
FeCl_3 , FeCl_2	35 – 150	4,0 – 7,0	Para coagulação de colides e remoção de P
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	70 – 200	4,0 – 7,0	Águas residuárias com alta alcalinidade e baixa concentração de P. $\text{FeCl}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe(OH)}_3 + 3\text{HCl}$
Polímeros catiônicos	2 – 5	Não muda	Usado para coagulação de colóides e para ajudar a coagulação com um metal.
Polímeros aniônicos e não iônicos	0,25 – 1,0	Não muda	Usado para aumentar a velocidade e sedimentação na floculação e aglomera os flocos para filtração
Argila	3 – 20	Não muda	Usado para suspensões coloidais muito diluídas

4.4 Coagulação de efluentes industriais

Como mencionado anteriormente, a coagulação química pode ser usada para clarificação de resíduos industriais contendo partículas coloidais e sólidos em suspensão, os quais estão presentes na grande maioria dos efluentes industriais.

Segundo Eckenfelder (1989), águas residuárias da indústria do papel, borracha sintética, tintas, processamento de vegetais, etc., podem ser efetivamente coaguladas com baixa dosagem de coagulante. A adição de sílica ou polieletrólitos ajuda na rápida formação e sedimentação dos flocos. A **Tabela 4.2** sumariza os dados reportados no tratamento de águas residuárias em diferentes indústrias.

Tabela 4.2 – Coagulação química de águas residuárias de diferentes indústrias (Fonte: Eckenfelder, 1989; Al-Malack *et al.*, 1999; Song *et al.*, 2004).

Procedência da água residuária	Parâmetros (mg/L)	Afluente	Efluente	Coagulante
Indústria de papel	DBO	127	68	$Al_2(SO_4)_3$,
	SS	350	15	polieletrólito
	pH	-	6,7	
Indústria de rolamento de bolas	Óleos e graxas	302	28	
	SS	544	40	$Al_2(SO_4)_3$,
	PO_4	222	8,5	polieletrólito
Lavanderia comercial	pH	10,3	7,1	
	DQO	512	171	
	DBO	243	90	
	ABS	63	0,1	Cal, surfactante catiônico
	PO_4	267	150	
Indústria de tintas	pH	7,1	7,7	
	DQO	4340	178	
	DBO	1070	90	$Al_2(SO_4)_3$
Indústria de borracha sintética	Sólidos totais	2550	446	
	pH	-	4,5	
	DQO	570	100	$Al_2(SO_4)_3$
Indústria têxtil	DBO	85	15	
	DQO	1570	880	$Al_2(SO_4)_3$
Água residuária polimérica de uma indústria química	DQO	1570	1084	$Fe_2(SO_4)_3$
	DQO	7000	70	$FeCl_3$
	DQO	7000	700	$Al_2(SO_4)_3$
Indústria de curtume	DQO	3300	2079	$FeCl_3$
	DQO	3300	2310	$Al_2(SO_4)_3$
	SS	260	140	$FeCl_3$
	SS	260	161	$Al_2(SO_4)_3$