

Investigação da coagulação e floculação adequadas para a FAD no tratamento de água com cor aparente moderada e baixa turbidez destinada ao abastecimento público

Investigation of coagulation and flocculation conditions for DAF in drinking water treatment for public source containing moderated color and low turbidity

Rodrigo Braga Moruzzi¹

Professor Assistente Doutor do Departamento de Planejamento Territorial e Geoprocessamento do Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Universidade Estadual Paulista (UNESP). Engenheiro Civil pela UFSCar, Mestre e Doutor em Engenharia Civil pela EESC/USP na área de Hidráulica e Saneamento.

Marco Antonio Penalva Reali

Professor Doutor do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. Engenheiro Civil, Mestre e Doutor em em Engenharia Civil pela ESC/USP na área de Hidráulica e Saneamento.

¹ **Endereço:** Departamento de Planejamento Territorial e Geoprocessamento, Instituto de Geociências e Ciências Exatas (UNESP – Campus de Rio Claro), Rua 10, nº 2527, Santana, Rio Claro-SP. Tel.: (19) 35262411 ramal 214 e-mail: rmoruzzi@rc.unesp.br

RESUMO

Este artigo apresenta os resultados de uma investigação em escala de laboratório visando obter as condições adequadas de coagulação e floculação visando a flotação por ar dissolvido (FAD) de água contendo cor moderada e baixa turbidez, situação esta onde os sistemas que empregam a decantação apresentam baixa eficiência acarretando em sobrecarga das unidades de filtração subsequentes. Para tal, foram investigados os seguintes parâmetros: i) tipo de coagulante; ii) dosagem, condição de mistura e recirculação (p) e iii) condições adequadas de floculação. A FAD apresentou excelentes resultados com eficiência maior que 90% nos parâmetros analisados. Os resultados apontaram para a utilização do sulfato de alumínio na dosagem de 25 mg.L⁻¹ (2,25mgAl⁺³.L⁻¹) em valor de pH em torno de 6,25 e recirculação de 8%v/v (8,4g de ar.m⁻³ de água bruta). As condições adequadas de floculação obtidas foram: gradiente médio de velocidade (Gf) de 50 e 90 s⁻¹ para tempo de floculação (Tf) de 8 minutos.

ABSTRACT

This paper presents some lab scale results from an investigation such the main aim was to obtain coagulation and flocculation conditions by treating water containing medium color e low turbidity where systems that apply sedimentation units usually have low efficiency causing overload on the filtration following units. For this propose the following parameters were evaluated: i)coagulant type; ii) dosages, mixture e recirculation conditions (p) e iii) flocculation conditions. The aluminum sulfate in 25 mg.L⁻¹ (2,25mgAl⁺³.L⁻¹) in pH value around 6,25 and recirculation of 8% v/v (8,4g of air.m⁻³ of raw water) were pointed as the bests conditions. The best's flocculation conditions were: 50 and 90 s-1 for 8 minutes.

1. INTRODUÇÃO

A flotação por ar dissolvido (FAD) com recirculação pressurizada do efluente caracteriza-se como um processo trifásico de separação sólido/líquido. Neste, micro-bolhas de ar são introduzidas na massa líquida visando remoção de flocos, que são formados na etapa de coagulação e floculação.

A influência das condições de coagulação e floculação na eficiência do processo de FAD já foi amplamente discutida em diversos trabalhos [1, 2, 3, 4, 6, 8], entre outros.

Entretanto, foram ressaltadas águas contendo altos valores de cor aparente ou verdadeira ou florações algais, onde o tratamento de ciclo completo, empregando tanques de sedimentação, possui baixo desempenho. Todavia, grande parte das fontes naturais de água, principalmente àquelas oriundas de barragens naturais ou artificiais, apresentam valores moderados de cor e baixa turbidez. A princípio, dependendo da frequência de ocorrência de picos e variabilidade sazonal da fonte natural, águas com estas características poderiam ser tratadas por tecnologias que empregam a filtração direta descendente (FDD), filtração direta ascendente (FDA), dupla filtração (DF) ou mesmo por sistema composto por FAD seguido de filtração rápida descendente. Entretanto, a última alternativa apresenta maior robustez e flexibilidade operacional, permitindo adaptação frente as variações da qualidade do afluente.

A dosagem, o tipo de produto químico e as condições de mistura estão intimamente ligados às características da água a ser tratada e, por isso, não podem ser generalizadas, sob pena de incorrer em aumento no consumo de insumos, queda na eficiência do processo ou mesmo o não atendimento as condições mínimas de qualidade do efluente exigidas pela 518/04.

Neste sentido, é consenso que se deve proceder uma rigorosa investigação em escala de laboratório visando obter as condições adequadas de coagulação e floculação. Entretanto, deve-se salientar que as condições obtidas em equipamentos de jarteste não representam as melhores condições para a FAD [6]. Assim, para ensaios visando obtenção de parâmetros para a FAD o equipamento denominado Flotateste deve ser utilizado[7].

O artigo apresenta os resultados investigativos das condições adequadas de coagulação e floculação para uma água contendo cor moderada e baixa turbidez visando atendimento do padrão de potabilidade estabelecido pela portaria 518/04. Para tal foi utilizado um método proposto para ensaios em escala de laboratório, desenvolvido por Reali e Campos [6], utilizando equipamento especialmente desenvolvido para ensaios de FAD.

Desta forma, as questões que nortearam os ensaios foram:

- 1- Qual o coagulante mais adequado para pré-claração da água investigada?
- 2- Qual a condição de coagulação mais favorável à remoção da cor e turbidez da água de estudo?
- 3- Quais são as condições de floculação (G_f e T_f) e a razão de recirculação mais adequadas na remoção de cor e turbidez?

2. OBJETIVO

Investigar o tipo de coagulante, as condições adequadas de coagulação (pH versus dosagem coagulante), as condições de floculação (G_f e T_f) e a quantidade de ar requerida para a FAD.

3. MÉTODOS EMPREGADOS

3.1 Descrição da instalação

A instalação de Flotação por Ar Dissolvido (FAD) em escala de laboratório (Flotateste), é constituída de quatro colunas de floculação/flotação independentes, (capacidade de 2,1 litros) graduadas com escala em mm, conforme apresentado na Figura 1. Essas colunas encontram-se interligadas a uma única câmara de saturação (pressurizada) e operam em regime de fluxo descontínuo (alimentação por batelada). Após a mistura rápida do coagulante, completam-se os jarros com o volume desejado de amostra de água coagulada, aciona-se o agitador para que seja iniciada a etapa de floculação. Cada câmara de floculação/flotação possui agitador próprio, que está conectado a um regulador de tensão para controle de rotação das pás giratórias, possibilitando o controle do gradiente médio de velocidade durante a floculação.

Terminado o período de floculação, abrem-se as válvulas que controlam a entrada do volume de água saturada (recirculação pressurizada)

proveniente da câmara de saturação, promovendo-se a colisão das micro-bolhas de ar com os flocos em suspensão e subsequente remoção.

A coleta de amostras da câmara de flotação é realizada com o auxílio de pinças dispostas em pontos situados em posições adequadas ao cálculo das curvas de distribuição de velocidades de flotação (Curvas de Flotação) conforme metodologia proposta por Reali [5]. A Figura 1 apresenta uma fotografia geral e um desenho esquemático da referida instalação.

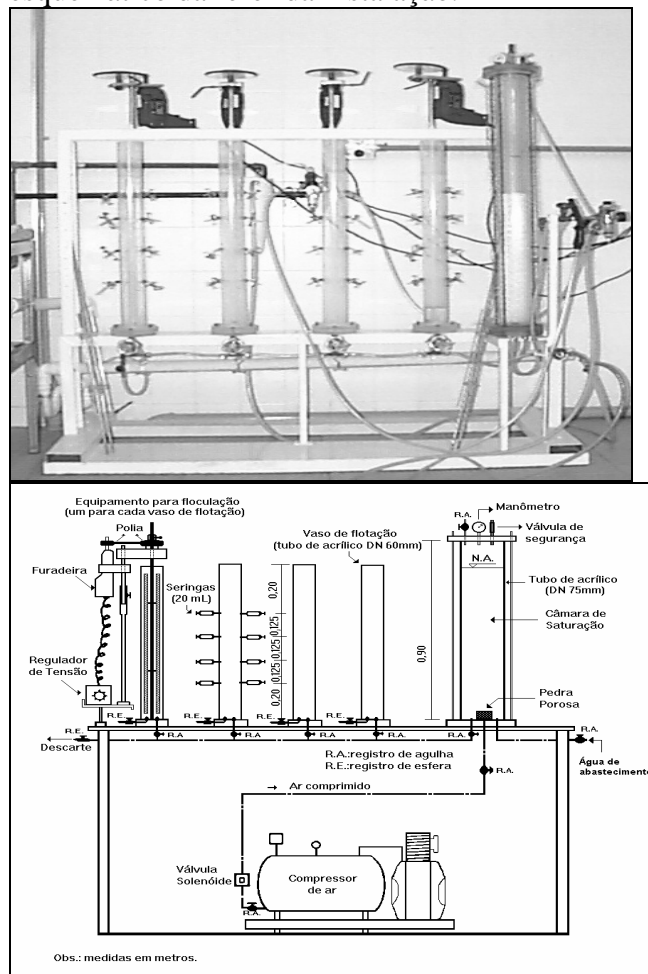


Figura 1 - Fotografia e esquema geral do equipamento de floculação/flotação em escala de laboratório (flotateste).

3.2 Ensaios experimentais

Os ensaios foram divididos em três fases denominados séries de investigação. Na primeira série (série I) foram realizados ensaios visando adequação das condições de coagulação. Posteriormente, foram realizados ensaios visando adequação das condições de floculação (série II). Finalmente, foram realizados os ensaios visando ajuste da porcentagem de água saturada (série III). Assim, para cada coagulante investigado (cloreto

férico e sulfato de alumínio) foram realizados os ensaios referentes às três séries anteriormente descritas.

Para uma melhor visualização da grade de ensaios realizados foram construídos os fluxogramas apresentados nas Figuras 2, 3, 4 e 5.

3.3 Água de estudo

A água de estudo foi preparada visando manter fixas as condições de entrada. Na água proveniente do poço profundo que abastece o campus da Escola de Engenharia de São Carlos (USP), foi acrescentado ácido húmico comercial (marca Aldrich) e caulinita (marca Fluka) de modo a se obter características de cor aparente em torno de 50 uC (5 mg.L^{-1} de ácido húmico) e turbidez em torno de 5 uT. As demais características da água de estudo são apresentadas na Tabela 1. A água foi preparada sempre um dia antes da realização dos ensaios e acondicionada em galões de 200 litros.

Para ensaios em águas provenientes de fontes naturais recomenda-se a investigação em diferentes épocas do ano visando obter a variação sazonal.

Quanto aos coagulantes utilizados, julgou-se conveniente a utilização de produtos comerciais. Esta escolha adveio da necessidade de reprodução dos resultados dos ensaios em escala real.

Tabela A1 - Características da água utilizada nos ensaios.

| | |
|---|-------|
| pH | 6,5 |
| Temperatura (°C) | 24,0 |
| Turbidez (uT) | 5,0 |
| Cor Aparente (uC) | 52 |
| Cor Verdadeira (uC) | 10 |
| Alcalinidade ($\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$) | 24 |
| Dureza ($\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$) | 15 |
| Condutividade ($\mu\text{S/cm}$) | 28 |
| Sólidos Sedimentáveis (mL/L) | 0 |
| Sólidos Totais (ST) (mg.L^{-1}) | 150 |
| Sólidos Fixos (SF) (mg.L^{-1}) | 72 |
| Sólidos Voláteis (SV) (mg.L^{-1}) | 78 |
| Sólidos Suspensos Totais (SST) (mg.L^{-1}) | 2,2 |
| Sólidos Suspensos Fixos (SSF) (mg.L^{-1}) | 0,9 |
| Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) (mg.L^{-1}) | 1,3 |
| Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) (mg.L^{-1}) | 147,7 |
| Sólidos Dissolvidos Fixos (SDF) (mg.L^{-1}) | 71,0 |
| Sólidos Dissolvidos Voláteis (SDV) (mg.L^{-1}) | 76,7 |
| Absorbância a 254nm | 0,06 |

3.4 Ensaios Visando a Otimização da Dosagem de Coagulante e pH de Coagulação

Nessa fase de investigação (série I) foram investigadas diferentes dosagens de coagulante para diferentes valores de pH de coagulação. Foram investigados dois coagulantes: sulfato de alumínio (pó) e cloreto férrico (líquido), disponíveis no mercado. As dosagens de sulfato de alumínio investigadas corresponderam a: 0,45; 0,90; 1,35; 1,80; 2,70; 3,15 e 3,60 $\text{mgAl}^{+3} \cdot \text{L}^{-1}$ (correspondentes a 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 e 45 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ da solução comercial) para valores de pH de coagulação entre 6,0 e 7,5. Para o cloreto férrico foram investigadas as seguintes dosagens: 0,85; 1,25; 1,70; 2,10; 2,50; 2,95; 3,35 e 3,80 $\text{mgFe}^{+3} \cdot \text{L}^{-1}$ para valores de pH de coagulação entre 5,0 e 7,1.

Os demais parâmetros operacionais foram mantidos fixos com base em resultados recomendados em trabalhos anteriores, sendo estes: Tempo de mistura rápida $T_{mr}(s)$, gradiente médio de velocidade de mistura rápida $G_{mr}(s^{-1})$, tempo de floculação T_f (min), gradiente médio de velocidade de floculação G_f (s^{-1}), pressão na câmara de saturação P (KPa), porcentagem de recirculação R (%), velocidade de flotação $V_f(\text{cm} \cdot \text{min}^{-1})$ e a qualidade da água bruta.

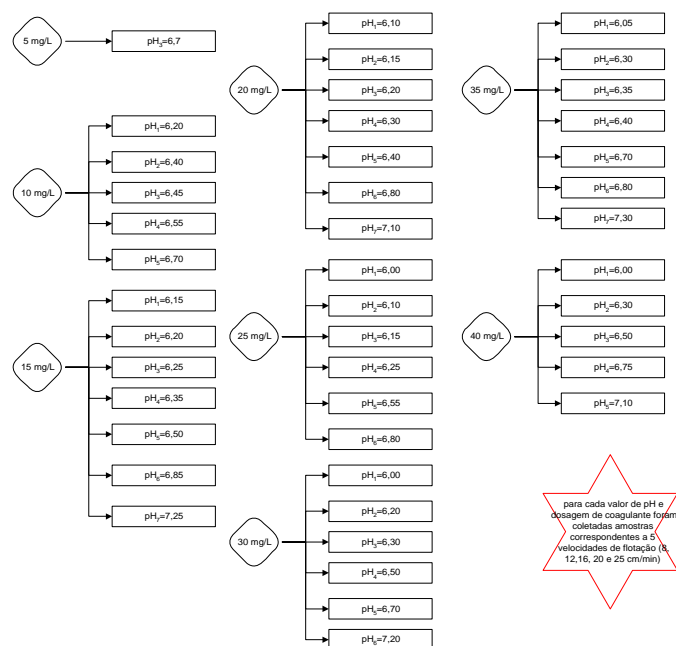


Figura 2: Fluxograma esquemático dos ensaios de adequação da dosagem de sulfato de alumínio e pH de coagulação (série I).

3.5 Curvas de Flotação

As curvas de flotação foram construídas a partir dos resultados de eficiência de remoção de cor aparente e turbidez obtidos utilizando a

metodologia proposta por REALI (1991). Com os valores de dosagem de coagulante e $\text{pH}_{\text{coagulação}}$ foi produzida uma curva com cinco pontos referentes as cinco velocidades de flotação (V_f) investigadas. As curvas de flotação permitem avaliar a velocidade ascensional dos flocos formados em diferentes condições de coagulação/floculação.

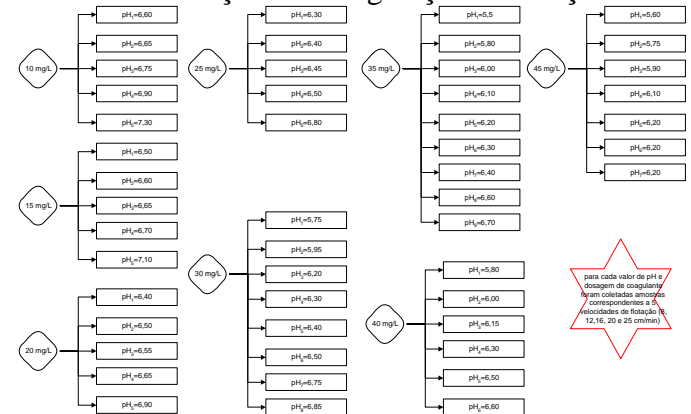


Figura 3: Fluxograma esquemático dos ensaios de adequação da dosagem de cloreto férrico e pH de coagulação (série I).

3.6 Ensaios Visando a Otimização do Tempo (T_f) e do Gradiente médio de Floculação (G_f)

Para estes ensaios (série II) foram variados o tempo (T_f) e o gradiente médio de velocidade de floculação (G_f). Foram variados os gradientes médios de velocidade para a floculação (G_f) de: 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100 s^{-1} nos tempos de floculação (T_f) de: 5, 8, 10, 15 e 20 minutos.

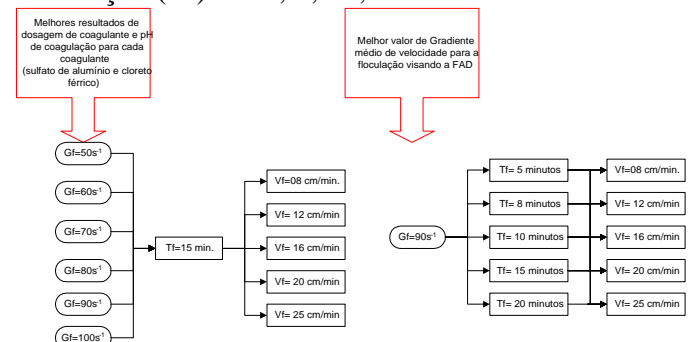


Figura 4: Fluxograma esquemático dos ensaios que envolveram a adequação das condições de floculação (série II) para cada coagulante investigado.

Adicionalmente, foram realizados ensaios (denominados complementares) visando investigar a cinética da floculação. Para tal, foram combinados diferentes valores de G_f e T_f .

3.7 Ensaios Visando a Otimização da Quantidade de Ar Fornecida

De posse dos resultados dos resultados anteriores, foram realizados os ensaios de adequação da quantidade de ar fornecida (série III). A variação da quantidade de ar fornecida para a flotação (S_p) foi produzida pela variação da taxa de recirculação (R), medida em percentual do volume de água contida no jarro de flotação. Foram investigados utilizados valores de taxa de recirculação correspondentes a: R = 2, 4, 6, 8, 10, 12, 15 e 20% (2,1; 4,2; 6,4; 8,4; 10,6; 12,7; 15,9 e 21,2 g de ar fornecido. m^{-3} água bruta na temperatura de 20°C). Nesses ensaios foram mantidos constantes os seguintes parâmetros: $T_{mr}(s)$, $G_{mr}(s^{-1})$, Tf (min), Gf (s^{-1}), P (KPa) e velocidades de flotação (V_f em $cm.min^{-1}$).

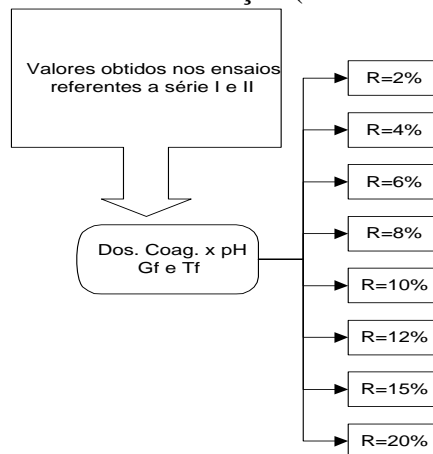


Figura 5: Fluxograma dos ensaios que envolveram a adequação da quantidade de ar fornecida (série III) para cada coagulante investigado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados dos ensaios, em escala de laboratório, que envolveram a utilização do sulfato de alumínio como coagulante.

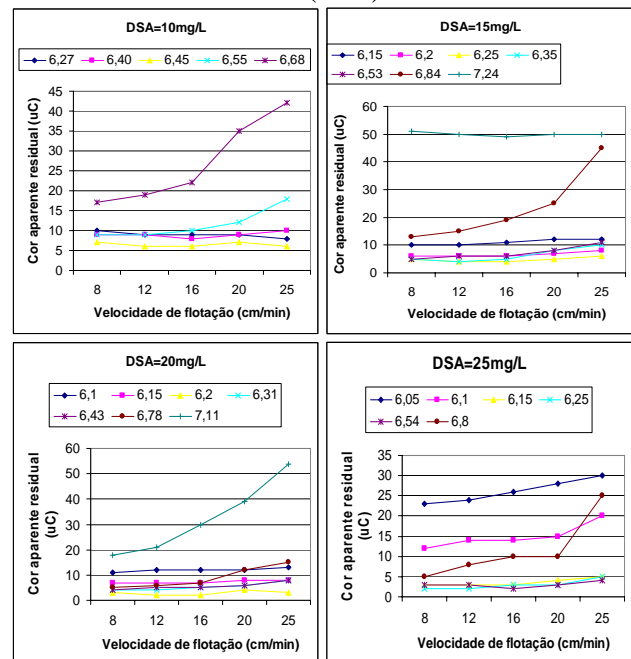
A seguir são apresentados e discutidos os resultados que envolveram a adequação da dosagem do coagulante sulfato de alumínio, o pH de coagulação (série I), as condições de mistura (Gf e Tf) referentes aos ensaios da série II, assim como a porcentagem de recirculação (R%) visando a FAD (série III). Para tal foi utilizado o sulfato de alumínio em pó comercial isento de ferro cujas características são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Características do produto químico comercial (sulfato de alumínio) utilizado nos ensaios. Dados fornecidos pelo fabricante.

| Elementos | Resultado |
|---------------|----------------|
| Insolúveis | 0,49% |
| Alumina | 17,03% |
| Ferro | <0,0006% |
| Ácido Livre | 0,00% |
| Alumina Livre | 0,38% |
| Umidade | 24,62% |
| pH a 5% | 3,3 |
| Arsênio | Não detectável |

4.1.1 Resultados dos ensaios de adequação da dosagem de coagulante (sulfato de alumínio) e pH de coagulação

As curvas de flotação a seguir apresentam os resultados dos ensaios de adequação da dosagem de coagulante e pH de coagulação visando a FAD. Para cada dosagem de sulfato de alumínio nos diferentes valores de pH e velocidades de flotação investigadas, são apresentados os residuais de cor (Figura 6) e turbidez (Figura 7) para as diferentes condições de coagulação/flotação investigadas. É importante constatar que os valores ora apresentados referem-se à dosagem do coagulante comercial sendo, portanto menores, os valores das dosagens quando forem efetuadas as devidas correções para obtenção das dosagens de sulfato de alumínio em base seca (Al^{+3}).



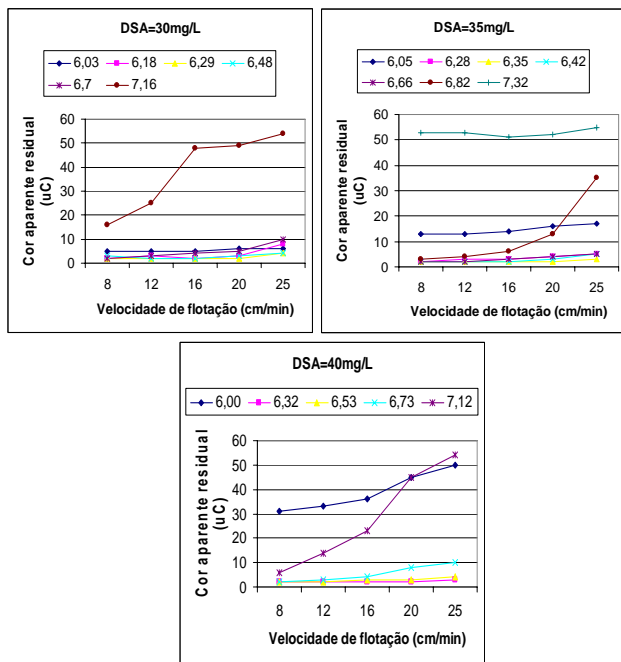


Figura 6: Curvas de flotação para cor aparente residual referentes aos ensaios de adequação da dosagem de sulfato de alumínio e pH de coagulação (série I).

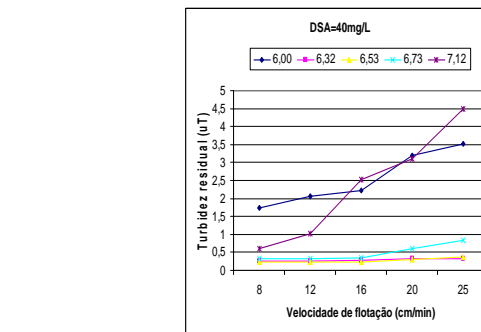
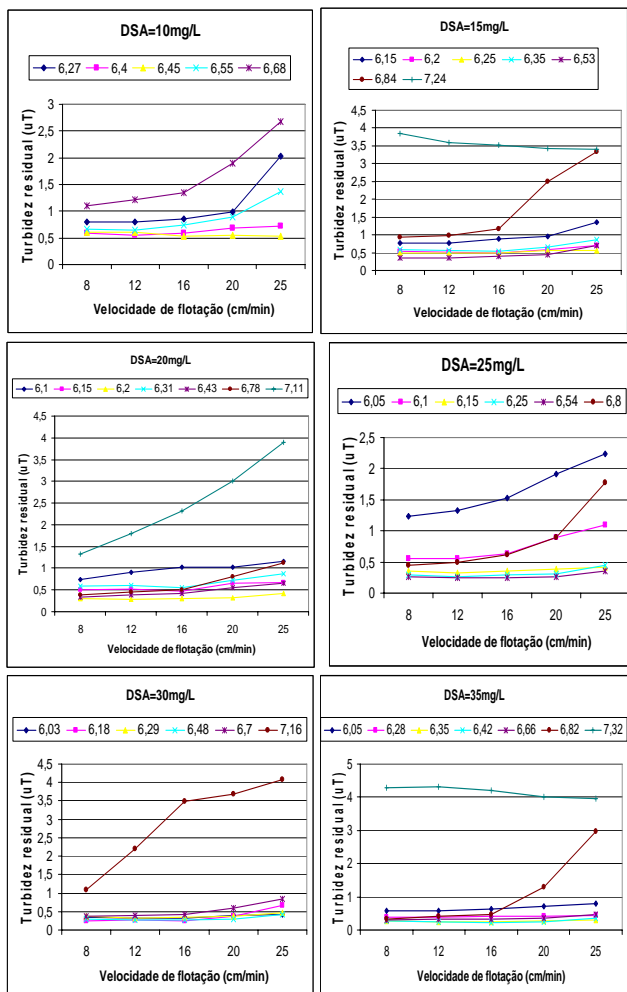


Figura 7: Curvas de flotação para turbidez residual referentes aos ensaios de adequação da dosagem de sulfato de alumínio e pH de coagulação (série I).

Nas figuras 6 e 7 apresentadas, pôde-se observar que, para algumas dosagens de coagulante e valores de pH de coagulação, os valores residuais dos parâmetros monitorados apresentam-se com grande variação frente as diferentes velocidades estudadas enquanto que, para outras, os valores residuais apresentam-se praticamente constantes. Este fator se deve, principalmente, pela adequação do pré-tratamento às condições de flotação representadas pelas cargas superficiais, número e distribuição de tamanho das bolhas. Em uma unidade em escoamento contínuo, além dessas condições, deve-se considerar a influência das condições hidrodinâmicas responsáveis, não somente, pela promoção dos choques entre bolhas e flocos e aglutinação das micro-bolhas, mas também, pela desagregação do conjunto bolhas/flocos e arraste provocado por linhas de correntes superiores às velocidades ascensionais envolvidas.

A análise dos resultados, apresentados nas Figuras 6 e 7, permite constatar que a dosagem de sulfato de alumínio de 25 mg.L^{-1} ($2,25 \text{ mgAl}^{+3} \cdot \text{L}^{-1}$) em valor de pH de 6,25 apresentou os menores valores de cor aparente e turbidez residuais. Sendo assim, estes valores foram adotados nos ensaios posteriores que envolveram a adequação das condições de mistura (G_f e T_f) e recirculação de água saturada (R%).

4.1.2 Resultados dos ensaios de adequação do gradiente médio de velocidade (G_f) e tempo de floculação (T_f)

Para a dosagem de sulfato de alumínio e valor de pH adequados na fase anterior de estudo (25 mg.L^{-1} , correspondente a $2,25 \text{ mgAl}^{+3} \cdot \text{L}^{-1}$) e pH de 6,25, respectivamente), foram variadas às condições de floculação (G_f e T_f) e mantidos fixos

os demais parâmetros: $R=10\%$, $Psat.$ relativa 450KPa e condições de mistura rápida (Gmr e Tmr). Primeiramente, foram variados os valores dos gradientes médios de velocidade (50, 60, 70, 80, 90 e 100 s^{-1}) tendo fixado o tempo de floculação de 15 minutos para as diferentes velocidades de flotação investigadas.

A Figura 8 apresenta os resultados de cor aparente e turbidez residuais para os ensaios de adequação das condições de mistura onde foram variados diversos valores de gradientes médios de velocidade para o tempo de floculação de 15 minutos.

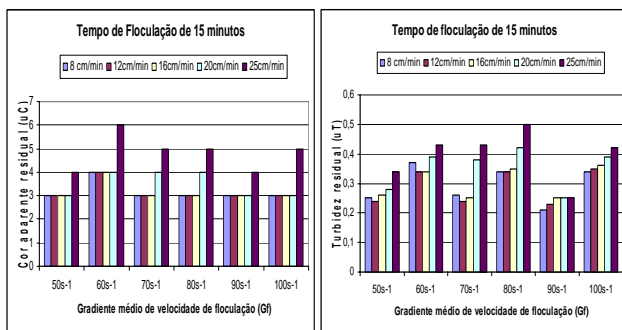


Figura 8: Valores de cor aparente e turbidez residuais frente às variações dos gradientes médios de velocidade de floculação e às diferentes velocidades de flotação investigadas para o tempo de floculação de 15 minutos.(série II)

A Figura 8 permite visualizar que os resultados obtidos com o gradiente médio de velocidade de 90 s^{-1} apresentaram o melhor conjunto de resultados para as diferentes velocidades de flotação investigadas. Nota-se que, mesmo para a maior velocidade investigada ($25\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$), os residuais de cor aparente e, principalmente, de turbidez residual foi menor para o gradiente médio de velocidade de 90 s^{-1} .

Assim, procederam-se os ensaios visando investigação do tempo de floculação para o gradiente médio de velocidade de 90 s^{-1} . A Figura 9 apresenta estes resultados para os tempos de floculação de 5, 8, 10, 15 e 20 minutos.

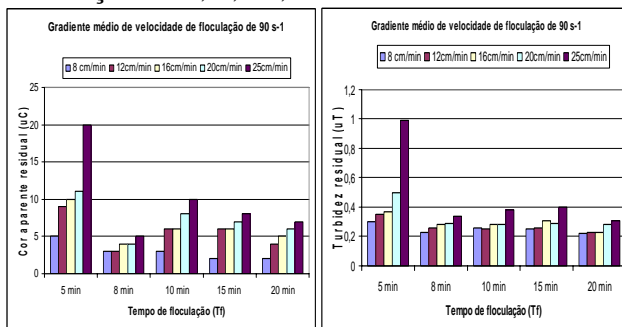


Figura 9: Valores de cor aparente e turbidez residuais frente às variações dos tempos de floculação e às

diferentes velocidades de flotação investigadas para o gradiente médio de velocidade de 90 s^{-1} (série II)

De uma forma geral, os resultados referentes ao tempo de floculação de 8 minutos apresentaram o melhor conjunto de resultados para todas as velocidades investigadas, principalmente para a cor aparente residual. Para a turbidez residual, os resultados foram ligeiramente menores para o tempo de floculação de 25 minutos, porém o tempo de 8 minutos apresentou resultados bastante satisfatórios. Sendo assim, o tempo de 8 minutos foi adotado para o prosseguimento dos ensaios referentes à adequação da porcentagem de recirculação.

4.1.3 Resultados dos ensaios de adequação da porcentagem de recirculação de água saturada (R%)

Conforme exposto, a porcentagem de recirculação é controlada pelo volume de água saturada introduzido em cada jarro de flotação. Os resultados apresentados na Figura 10 referem-se à investigação dos seguintes valores de porcentagem de recirculação: 2, 4, 6, 8, 10, 12, 15 e 20%, correspondentes a 2,1; 4,2; 6,4; 8,4; 10,6; 12,7; 15,9 e 21,2 g de ar fornecido. m^{-3} água bruta na temperatura de 20°C . Para tal, foram adotados todos os parâmetros adequados nas séries de investigações anteriores.

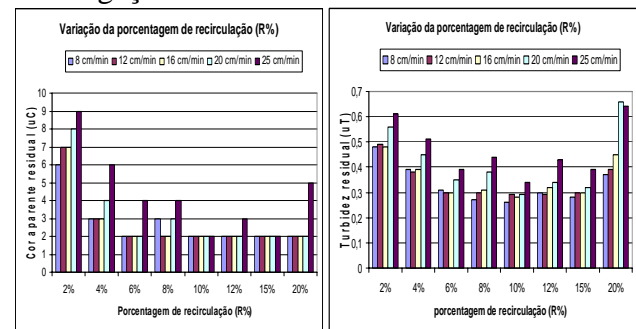


Figura 10: Valores de cor aparente e turbidez residuais frente às variações da porcentagem de recirculação.

Vê-se pela Figura 10 que, a porcentagem de recirculação de 10% (10,6 g de ar fornecido. m^{-3} água bruta) apresentou o melhor conjunto de resultados para as diferentes velocidades de flotação investigadas. No entanto, a porcentagem de recirculação de 6% (6,4 g de ar fornecido. m^{-3} água bruta) apresentou bons resultados principalmente para cor aparente residual. Devido as diferentes condições hidrodinâmicas presentes em unidades de laboratório em relação aos ensaios

de escoamento contínuo, principalmente no que se refere a intensidade de choques entre bolhas e flocos, aconselha-se a investigação dos valores obtidos em escala piloto e a verificação em unidades de tratamento.

4.2 Resultados dos ensaios em escala de laboratório que envolveram a utilização do cloreto férrico como coagulante

Da mesma forma que para o sulfato de alumínio, a seguir são apresentados e discutidos os resultados que envolveram a aplicação de cloreto férrico como coagulante para as três séries de investigação de laboratório. Para tal foi utilizado o cloreto férrico líquido comercial cujas características são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Características do produto químico (cloreto férrico) utilizado nos ensaios. Dados fornecidos pelo fabricante.

| Características | Resultado |
|---------------------------|---------------|
| Densidade relativa a 24°C | 1,42 |
| %insolúveis | 0,001 |
| Acidez | 1,06 |
| %FeCl ₃ | 39,79 |
| %Fe total | 13,70 |
| Ferro II (%) | Máx. 2,5 |
| Cor | Marrom escuro |
| Aspecto | Líquido |

4.2.1 Resultados dos ensaios de adequação da dosagem de cloreto férrico e pH de coagulação

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios de adequação da dosagem de coagulante e pH de coagulação visando a FAD. Como coagulante foi utilizado o cloreto férrico em solução preparada a 20 g/L e como alcalinizante utilizou-se a cal em solução de 2g/L. Embora não seja recomendada a administração de ácido, devido aos diversos fatores de risco associados em unidades de tratamento, foi necessária a utilização de solução de ácido sulfúrico a 0,02N para baixar o valor de pH sem a necessidade de superdosagem de coagulante. Este procedimento é aconselhado somente para ensaios de laboratório visando investigação de baixas dosagens de cloreto férrico.

As dosagens apresentadas referem-se ao produto comercial sendo, portanto, menores as dosagens quando forem efetuadas as correções para a dosagem de cloreto férrico em base seca (Fe⁺³).

Nas Figuras 11 e 12 são apresentadas as curvas de flotação para cada dosagem de cloreto férrico nos diferentes valores de pH e velocidades de flotação investigadas.

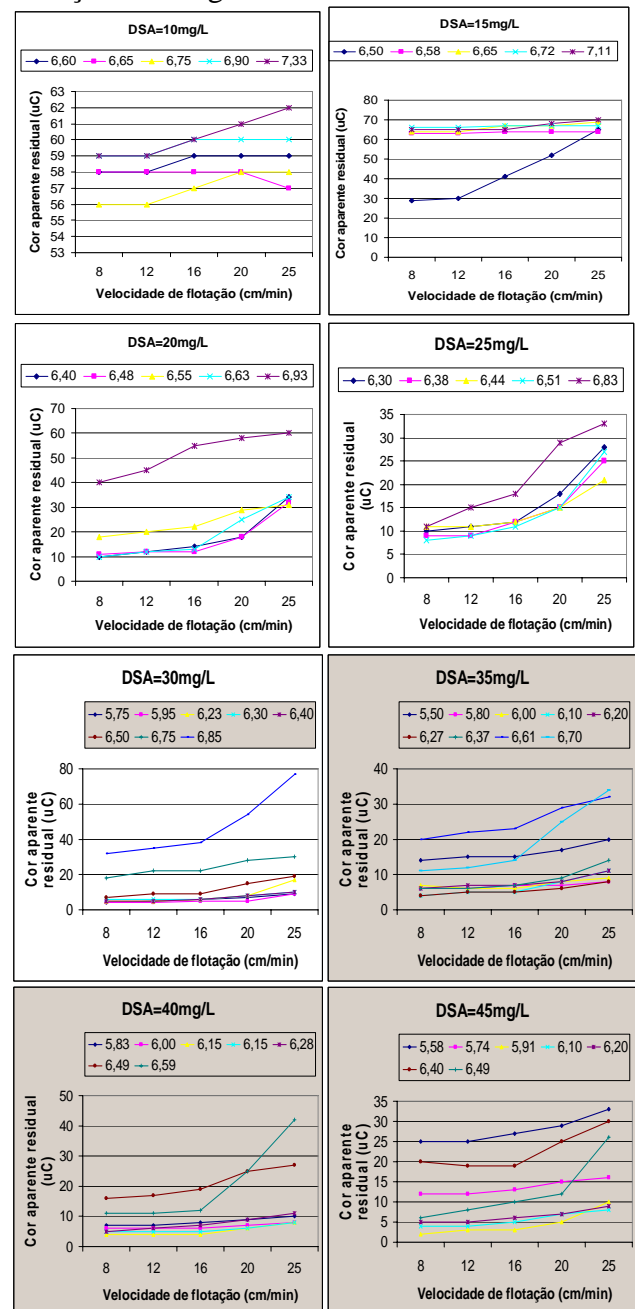
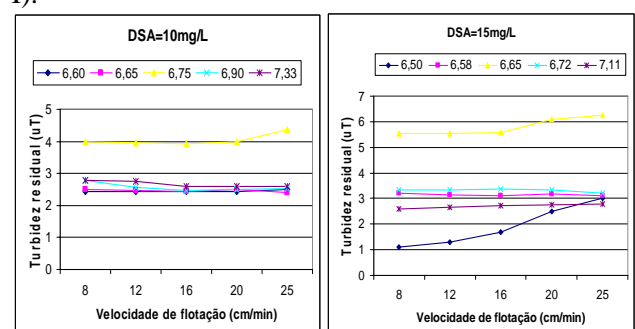


Figura 11: Curvas de flotação para cor aparente residual referentes aos ensaios de adequação da dosagem de cloreto férrico e pH de coagulação (série I).



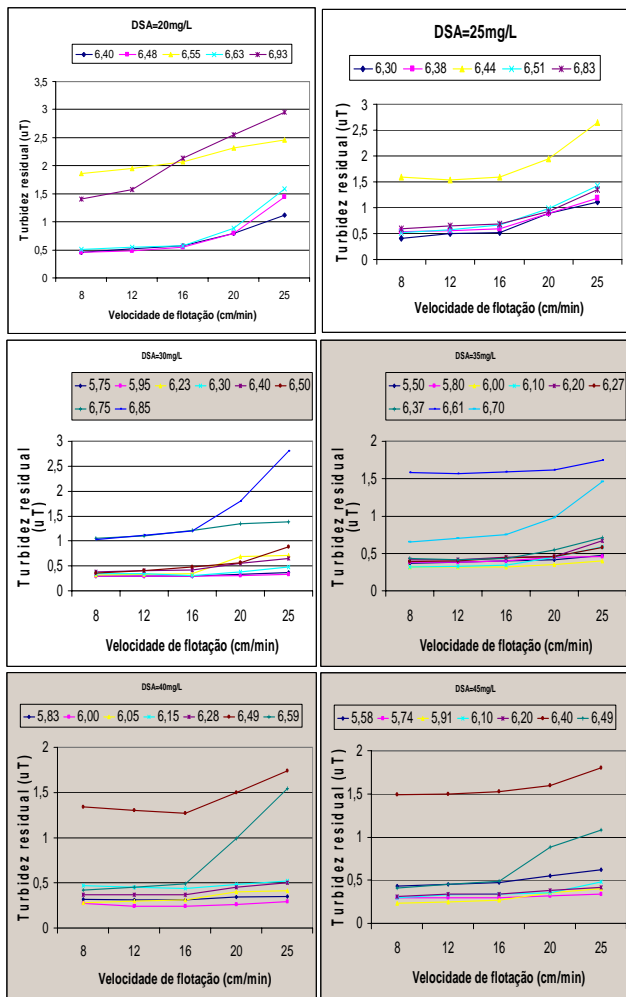


Figura 12: Curvas de flotação para turbidez residual referentes aos ensaios de adequação da dosagem de cloreto férrico e pH de coagulação (série I).

Pode-se analisar, através das Figuras 11 e 12, que as dosagens de cloreto férrico inferiores a 20 mg.L^{-1} não apresentaram bons resultados tanto para a cor aparente residual quanto para a turbidez. Para as demais dosagens observam-se bons resultados para valores de pH entre 6,20 e 6,50, sendo que os menores valores de cor aparente e turbidez foram obtidos para a dosagem de 30 mg.L^{-1} em valores de pH entre 6,00 e 6,40.

Para a dosagem de cloreto férrico de 30 mg.L^{-1} em pH de coagulação em torno de 6,00 podem ser observados valores de cor aparente residual menores que 05 uC e turbidez menor que $0,30 \text{ uT}$ em todas as velocidades de flotação investigadas. Sendo assim, adotou-se a dosagem de cloreto férrico de 30 mg.L^{-1} ($2,50 \text{ mgFe}^{+3} \cdot \text{L}^{-1}$) em pH de coagulação em torno de 6,0 para a realização das etapas subsequentes de investigação (séries II e III).

4.2.2 Resultados dos ensaios de adequação do gradiente médio de velocidade (G_f) e tempo de flocação (T_f)

São apresentados os resultados dos ensaios referentes a série II para a dosagem de cloreto férrico de 30 mg.L^{-1} ($2,50 \text{ mgFe}^{+3} \cdot \text{L}^{-1}$) em valor de pH em torno de 6,0. Para tal foram variadas às condições de flocação (G_f e T_f) e mantidos fixos os demais parâmetros: $R=10\%$, P_{sat} relativa 450 KPa e condições de mistura rápida (G_{mr} e T_{mr}). Primeiramente, foram variados os valores dos gradientes médios de velocidade ($50, 60, 70, 80, 90$ e 100 s^{-1}) tendo fixado o tempo de flocação de 15 minutos para as diferentes velocidades de flotação investigadas. Posteriormente foram efetuados os ensaios visando adequação do tempo de flocação.

A Figura 13 apresenta graficamente os resultados dos ensaios referentes a série II para o coagulante cloreto férrico.

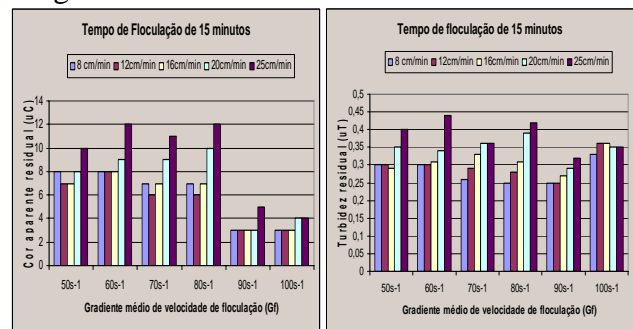


Figura 13: Valores de cor aparente e turbidez residuais frente às variações dos gradientes médios de velocidade de flocação e às diferentes velocidades de flotação investigadas para o tempo de flocação de 15 minutos.(série II)

Verificou-se que o gradiente médio de velocidade de 90 s^{-1} apresentou o melhor conjunto de resultados para as diferentes velocidades de flotação investigadas. Mesmo para a maior velocidade investigada (25 cm.min^{-1}), os residuais de cor aparente (05 uC) e de turbidez ($0,30 \text{ uT}$) foram menores obtidos. Assim, procederam-se os ensaios visando investigação do tempo de flocação para o gradiente médio de velocidade de 90 s^{-1} . Assim, são apresentados na Figura 14, a seguir, os resultados para os tempos de flocação de 5, 8, 10, 15 e 20 minutos.

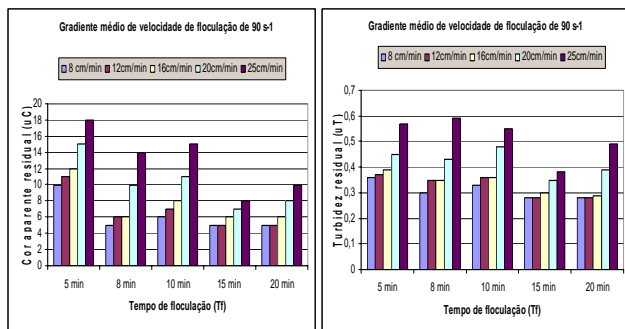


Figura 14: Valores de cor aparente e turbidez residuais frente às variações dos tempos de floculação e às diferentes velocidades de flotação investigadas para o gradiente médio de velocidade de 90 s^{-1} (série II)

Visando adequar o tempo de floculação para o gradiente de 90 s^{-1} , verificou-se que o tempo de floculação de 15 minutos apresentou os menores residuais de cor aparente e turbidez. Mesmo para a maior velocidade de flotação investigada ($25 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$) os valores de cor aparente e turbidez foram baixos (08 uC e $0,38 \text{ uT}$, respectivamente). Assim, para os ensaios referentes a série III de investigação foi adotado o tempo de floculação de 15 minutos além dos parâmetros obtidos anteriormente ($Gf=90 \text{ s}^{-1}$ e dosagem de cloreto férrico de $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ em pH de coagulação de 6,0).

4.2.3 Resultados dos ensaios de adequação da porcentagem de recirculação de água saturada (R%)

Neste item são apresentados os resultados da série III para o coagulante cloreto férrico. Foram mantidos constantes os demais parâmetros adequados nas séries de investigações anteriores ($DCF=30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ em pH de coagulação de 6,0, $Gf=90 \text{ s}^{-1}$ para $Tf=15$ minutos) e variadas as porcentagens de recirculação em valores equivalentes a: 2, 4, 6, 8, 10, 12, 15 e 20%, correspondentes a 2,1; 4,2; 6,4; 8,4; 10,6; 12,7; 15,9 e 21,2 g de ar fornecido. m^{-3} água bruta na temperatura de 20°C .

A Figura 15 apresenta, graficamente, os residuais de cor aparente e turbidez para os ensaios referentes a série III onde foram investigadas as porcentagens de recirculação para diferentes valores de velocidade de flotação.

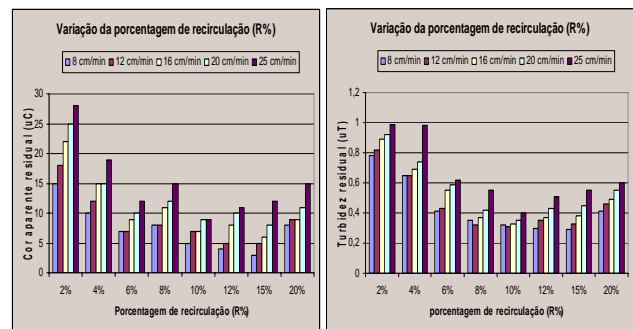


Figura 15: Valores de cor aparente e turbidez residuais frente às variações da porcentagem de recirculação referentes aos ensaios da série III utilizando o cloreto férrico como coagulante.

Pela Figura 15 pode-se observar que, as porcentagens de recirculação de 10% e 12% ($10,6$ e $12,7 \text{ g}$ de ar fornecido. m^{-3} água bruta na temperatura de 20°C) apresentaram o melhor conjunto de resultados para as diferentes velocidades de flotação investigadas. Porém, a porcentagem de recirculação de 10% ($10,6 \text{ g}$ de ar fornecido. m^{-3} água bruta) apresentou os melhores resultados principalmente para cor aparente residual. No entanto, assim como nos ensaios referentes à série III para o coagulante sulfato de alumínio, valores menores podem ser observados para outras porcentagens de recirculação, como por exemplo 12 e 15% ($12,7$ e $15,9 \text{ g}$ de ar fornecido. m^{-3} água bruta) as quais obtiveram os menores residuais de cor aparente (04 e 03 uC , respectivamente para a velocidade de flotação de $08 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$).

4.3 Ensaios Complementares

O objetivo principal destes ensaios complementares foi investigar a cinética da floculação visando a flotação. Para tal, os tempos de floculação foram combinados com diversos valores de gradientes de velocidade de floculação nas dosagens e valores de pH adequados. Observou-se que os menores valores de gradientes estudados demandam maiores tempos de floculação e vice-versa para que a remoção dos parâmetros monitorados seja maior que 90%. Para o tempo de floculação em torno de 10 minutos o gradiente de velocidade de floculação mais adequado foi o de 90 s^{-1} (residuais de 4 uC e $0,25 \text{ uT}$ para cor aparente e turbidez, respectivamente). Já para o tempo de 20 minutos o gradiente de velocidade de 70 s^{-1} também apresentou bons resultados (residuais de 2 uC e

0,23uT para cor aparente e turbidez, respectivamente).

Assim, foi possível inferir que existem mais de uma condição de distribuição de tamanho das partículas, para a mesma dosagem de sulfato de alumínio, que atende ao processo de FAD. As Figuras 16, 17, 18 e 19 apresentam os resultados complementares de laboratório para as diferentes condições investigadas.

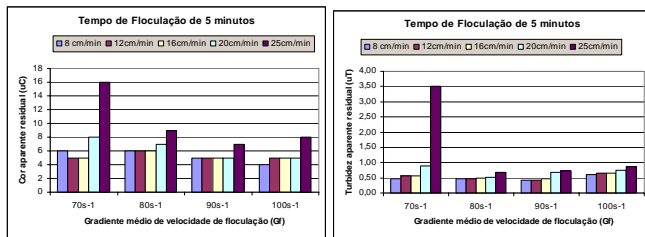


Figura 16: Valores de cor aparente e turbidez residuais frente às variações dos gradientes médios de velocidade de flocculação e às diferentes velocidades de flotação investigadas para o tempo de flocculação de 5 minutos.(série II)

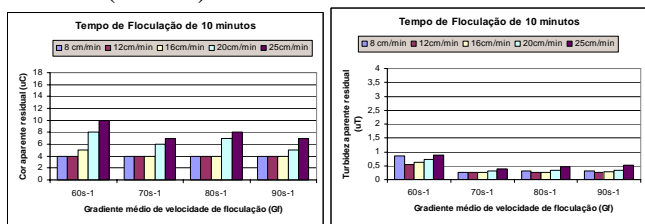


Figura 17: Valores de cor aparente e turbidez residuais frente às variações dos gradientes médios de velocidade de flocculação e às diferentes velocidades de flotação investigadas para o tempo de flocculação de 10 minutos.(série II)

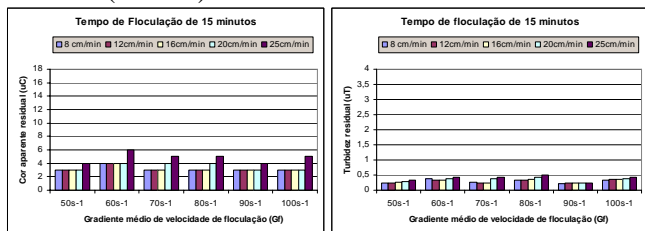


Figura 18: Valores de cor aparente e turbidez residuais frente às variações dos gradientes médios de velocidade de flocculação e às diferentes velocidades de flotação investigadas para o tempo de flocculação de 15 minutos.(série II)

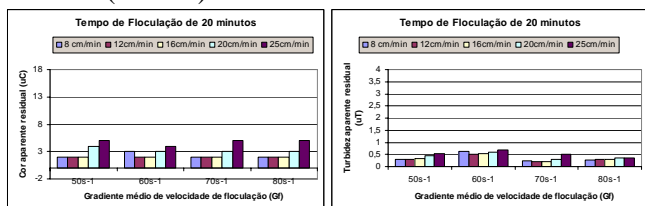


Figura 19: Valores de cor aparente e turbidez residuais frente às variações dos gradientes médios de velocidade de flocculação e às diferentes velocidades de flotação

investigadas para o tempo de flocculação de 20 minutos.(série II)

Somente os ensaios em escala de bancada, cujas condições reproduzam as unidades de tratamento que compõe a estação de tratamento de água (ETA) podem permitir a adequação do processo empregado. Especificamente para a FAD, a utilização do equipamento denominado (flotatest), com jarros compostos por colunas, é aconselhada, pois permite avaliar as condições adequadas de tratamento.

Verificou-se nos ensaios a existência de mais de uma condição de flocculação apropriada para a FAD.

Ressalta-se a importância da constante avaliação laboratorial em estações de tratamento visando adequar o processo as variações sazonais da qualidade da água bruta.

4.4 Considerações a respeito da aplicação dos parâmetros em escala real.

Os resultados obtidos nos ensaios em escala de laboratório contribuem no balizamento e definição de alguns parâmetros adotados em escala real. No entanto, a aplicação irrestrita de todos os valores obtidos em laboratório não é aconselhável sem uma verificação preliminar. Isso se deve ao grande número de variáveis que devem ser controladas durante a operação da unidade de FAD em escala real. A Tabela 8 apresenta algumas destas variáveis, o modo pelo qual elas podem ser controladas e a dependência de cada uma com as demais. Os valores adotados para a operação em unidades reais devem ser preliminarmente definidos na pré-operação das unidades.

Tabela 8 - Variáveis controladas nos ensaios em escala piloto e a dependência com as demais.

| Variáveis | Controle | Dependência |
|---|-----------------------------------|------------------|
| (1) Vazão entrada | R.A | - |
| (2) Razão recirculação (p) | R.A | + (1) |
| (3) Pressão saturação (P _{sat}) | R.A | - |
| (4) Gradiente médio de velocidade de flocculação (G _f) | R.T | - |
| (5) Tempo de flocculação (T _f) | C.I | + (1) |
| (6) Tempo contato zona reação | Variação volume zona reação | + (1); (2) |
| (7) Taxa de aplicação superficial aparente na zona de clarificação (TAS _{ap}) | Variação volume zona clarificação | + (1); (2) e (5) |

| | | |
|-----------------------|-------|-------------|
| (8) DTP ^a | C.I | + (4) e (5) |
| (9) DTMB ^b | ----- | + (2) e (3) |
| | - | |

^a Distribuição de tamanho de partículas (flocos)

^b Distribuição de tamanho de micro-bolhas

R.A registro de agulha

R.T regulador de tensão

C.I controlada indiretamente através de outras variáveis

+ variáveis dependentes

- variáveis não dependentes

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos durante os estudos em escala de laboratório, foi possível responder as questões levantadas. Entre as principais conclusões destacam-se:

- A FAD apresentou excelentes resultados no tratamento da água contendo cor aparente de 50 uC e turbidez de 05uT onde os melhores resultados obtiveram eficiência superior a 90% para a cor aparente (residual inferior a 05uC) e superior a 94% para a turbidez (residual inferior a 0,3uT) para os dois coagulantes investigados nas melhores condições de dosagem e pH de coagulação.

- A FAD, para a mesma água, realizada com o emprego de sulfato de alumínio como coagulante, apresentou os menores valores de cor aparente e turbidez residuais (correspondentes a 02uC e 0,24uT, respectivamente, para a dosagem de 25 mg.L⁻¹ em pH em torno de 6,5).

- Para os dois coagulantes utilizados, o gradiente de velocidade de floculação (Gf) de 90 s⁻¹ foi mais adequado na remoção da cor aparente e turbidez quando comparado aos demais gradientes investigados.

- O tempo de floculação mais adequado variou com o coagulante utilizado, sendo que, para o sulfato de alumínio, o tempo de floculação de 8 minutos apresentou o melhor conjunto de resultados enquanto que, para o cloreto férrico, o tempo de floculação que produziu melhores resultados foi o de 15 minutos.

- Para os ensaios que envolveram a investigação da porcentagem de recirculação (série III), ressalta-se a importância de avaliar as condições em escala real, uma vez que os ensaios em regime de batelada não reproduzem as condições de hidrodinâmicas responsáveis pelo choque entre bolhas e flocos em unidades em escoamento contínuo. No entanto foi possível observar que porcentagens de recirculação em (v/v) entre 6 e 12% (6,4 e 12,7 g de ar fornecido. m⁻³ água bruta)

produziram bons resultados tanto para o cloreto férrico quanto para o sulfato de alumínio.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP pelo financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- EDZWALD, J.K.; WALSH, J.P.; KAMINSKY, G.S.; DUNN, H.J. Flocculation and air requirements for dissolved air flotation. **J. AWWA Res. Tech.**, p. 92-100, Mar. 1992.
- EDZWALD, J.K.; WINGLER, B.J. Chemical and physical aspects of dissolved-air flotation for the removal of algae. **Aqua**, v. 39, p. 24-35, 1990.
- LONGHURST, s. j., graham, n. j. d. Dissolved air flotation for potable water treatment: a survey of operational units in Great Britain. **Publ. Health Eng.**, v. 14, n. 6, p. 71-76, Apr. 1987.
- MORUZZI, R.; REALI, M.A.P.R.; PATRIZZI, L.J. A different view of removing iron and manganese complexes by using dissolved air flotation. In: STUETZ, R.; LENS, P. (Eds.). **Young reearchs 2004**. London: IWA, 2004a. p. 259-266.
- REALI, M.A.P.. **Concepção e avaliação de um sistema compacto para tratamento de águas de abastecimento utilizando o processo de flotação por ar dissolvido e filtração com taxa declinante**. 1991. 373 f. Tese (Doutorado)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991. 2 v.
- REALI, M.A.P.; CAMPOS, J.R. Optimization of colour removal using a batch flotation test. In: WORLD WIDE SYMPOSIUM: POLLUTION IN LARGE CITIES-SCIENCE AND TECHN. FOR PLANNING ENVIRONMENTAL QUALITY, 1995, Pádua. **Proceedings...** Venice, Itália: ABES/ANDES, 1995. v. 1, p. 199-210.
- REALI, M.A.P.; DOMBROSKI, S. A. G. Influência da floculação na flotação por ar dissolvido. In: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITÁRIA Y AMBIENTAL, 25., 1996, Cidade do México. **Anais...** Cidade do México: AIDIS, 1996. CD-ROM.
- ZABEL, T. The advantages of dissolved-air flotation for water treatment. **J. AWWA**, p. 42 – 46, May. 1985. Management and Operations.