



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS



Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

Determinação da força e recrescimento do floco de águas de abastecimento

Juliana Carvalhinho Büll

Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi

Rio Claro (SP)

2017

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

JULIANA CARVALHINHO BÜLL

**DETERMINAÇÃO DA FORÇA E RECRESCIMENTO DO
FLOCO DE ÁGUAS DE ABASTECIMENTO**

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Rio Claro – SP
2017

JULIANA CARVALHINHO BÜLL

DETERMINAÇÃO DA FORÇA E RECRESAMENTO DO
FLOCO DE ÁGUAS DE ABASTECIMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia
Ambiental.

Comissão Examinadora
PROF. DR. RODRIGO B. MOURAZI

_____ (orientador)

Prof. Dr. Fabiano T. de Loureiro

Prof. Dr. Marcus César Avezzano de Castro

Rio Claro, 31 de maio de 2017.

Juliana C. Büll
Assinatura do(a) aluno(a)

[Assinatura]
Assinatura do(a) orientador(a)

Resumo

Foram estudados a floculação, ruptura e recrescimento de flocos de águas de abastecimento. Os ensaios foram conduzidos em bancada, para duas águas de estudo, em condições variadas de mistura e de tempo de residência. A força e o recrescimento foram avaliados por técnicas macroscópicas, usando os parâmetros denominados por Fator de Força (FF) e Fator de Recrescimento (FR). O Sulfato de Alumínio foi usado como coagulante. Foram estudados gradientes de velocidade médios (G) de 20 a 80 s⁻¹ e o monitoramento dos agregados foi contínuo durante o tempo de floculação. A ruptura dos agregados previamente formados foi realizada em condições controladas e o recrescimento ocorreu sem coagulante adicional. Observou-se que em menores gradientes de floculação formam-se flocos maiores, tanto antes quanto depois da quebra. O fator de força foi menor em gradientes de floculação menores e vice-versa.

Palavras-chave: Força do floco, recrescimento, floculação

Abstract

The flocculation, rupture and re-growth of flocs of drinking water were studied. The tests were conducted on bench for two study waters at different flocculation rates and time. The strength and re-growth were evaluated by macroscopic techniques, using the Strength Factor and Recovery Factor. Aluminum sulphate were used as coagulant. It were studied different speed rates, from 20 to 80 s⁻¹, and the monitoring of aggregates was continuous during the flocculation time. The breakage of flocs previously formed was performed under controlled conditions and re-growth occurred without additional coagulant. It has been observed that at lower flocculation rates larger flocs are formed, both before and after the break. The Strength Factor was lower in lower flocculation rates.

Key words: Floc strength, Re-growth, Flocculation

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma simplificado das atividades desta pesquisa.....	11
Figura 2. Funcionamento do equipamento de monitoramento PDA3000.....	14
Figura 3 – Representação dos valores de IF_1 , IF_2 e IF_3 calculados a partir das médias nos patamares estáveis antes da ruptura, após ruptura e após recrescimento, respectivamente (adaptado de Yu et al, 2009).....	15
Figura 4 – Representação dos valores de IF_1 , IF_2 e IF_3 calculados a partir dos máximos nos patamares estáveis antes da ruptura, após ruptura e após recrescimento, respectivamente (adaptado de Yu et al, 2009).....	15
Figura 5 - Diagramas de coagulação para água contendo caulinita (a) e contendo ácido húmico (b).....	16
Figura 6 – Resultados do ajuste da Equação 1 para Fator de Força e Fator de Recrescimento da água de estudo com Ácido Húmico, calculados a partir dos valores médios de IF_1 , IF_2 e IF_3 nos patamares estáveis.....	20
Figura 7 – Resultados do ajuste da Equação 1 para Fator de Força e Fator de Recrescimento da água de estudo com Caulinita, calculados a partir dos valores médios de IF_1 , IF_2 e IF_3 nos patamares estáveis.....	20
Figura 8 - Resultados do ajuste da Equação 1 para Fator de Força e Fator de Recrescimento da água de estudo com Ácido Húmico, calculados a partir dos valores máximos de IF_1 , IF_2 e IF_3 nos patamares estáveis.....	20
Figura 9 - Resultados do ajuste da Equação 1 para Fator de Força e Fator de Recrescimento da água de estudo com Caulinita, calculados a partir dos valores máximos de IF_1 , IF_2 e IF_3 nos patamares estáveis.....	20

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Resultados de Fator de Força e Fator de Recrescimento para ambas águas de estudo, dados pela média e máxima dos valores de IF_1 , IF_2 , IF_3 nos patamares estáveis.....18

Tabela 2 – Resultados do coeficiente de força do floco e coeficiente de recrescimento, representados por γ e calculados por meio da média dos valores de IF_1 , IF_2 e IF_3 nos patamares estáveis e pelos valores máximos de IF_1 , IF_2 e IF_3 nestes patamares.....21

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
2. OBJETIVOS.....	10
2.1 Geral.....	10
2.2 Específicos.....	10
3. METODOLOGIA.....	11
3.1 Águas de estudo e diagramas de coagulação.....	12
3.2 Ensaios de ruptura, recrescimento e força dos flocos.....	13
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	16
4.1 Diagramas de coagulação.....	16
4.2 Fator de força e fator de recrescimento.....	17
5. CONCLUSÃO.....	22
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	23
ANEXO A - Gráficos do sinal gerado pelo equipamento PDA3000.....	26

1. Introdução

As impurezas presentes na água podem ser partículas coloidais, substâncias húmicas e organismos, os quais apresentam carga superficial negativa, razão pela qual os mesmos se repelem e permanecem em meio líquido se suas características não forem alteradas (Di Bernardo e Dantas, 2005). A alteração dessas características ocorre por meio da coagulação e floculação para posterior remoção por meio de unidades de separação sólido/líquido.

A matéria orgânica contém compostos que podem ser convenientemente classificados em substâncias não húmicas e húmicas. As substâncias não húmicas incluem aquelas com características químicas definidas, tais como carboidratos, proteínas, aminoácidos, gorduras, graxas e ácidos orgânicos de baixo peso molecular. Elas são facilmente degradadas por microrganismos e tem vida relativamente curta (Di Bernardo e Dantas, 2005). As substâncias húmicas (ácido húmico – AH, ácido fúlvico – AF e humina), em contraposição, são mais estáveis (Di Bernardo e Dantas, 2005). Estes são ácidos de coloração escura, de maior peso molecular e classificados de acordo com suas características de solubilidade. A cor da água, característica relacionada à parcela de luz que atravessa o meio líquido, é provocada pela presença de matéria orgânica dissolvida.

As partículas coloidais podem ser divididas em colóides reversíveis, os quais são termodinamicamente estáveis, como detergentes e sabão, e colóides irreversíveis são termodinamicamente instáveis, como argilas e óxidos metálicos. As argilas são colóides constituídos de argilominerais junto com alguns outros materiais como matéria orgânica, quartzo e pirita. Suas partículas apresentam-se morfológicamente como lâminas muito finas, e podem ser classificadas de acordo com a estrutura do cristal, por exemplo, montmorilonita, caulinita e illita (Di Bernardo e Dantas, 2005). A turbidez pode ser definida como sendo o grau de redução que a luz sofre ao atravessar uma certa quantidade de água, devido a presença das partículas e substâncias que esta contém (Pavanelli, 2001), característica conferida pela presença de argilas.

Nesse contexto, para remoção das impurezas presentes na água faz-se necessário alterar a força iônica do meio, desestabilizando as partículas a partir da adição de

sais de alumínio em uma agitação intensa, processo chamado de coagulação. Al(III) é um coagulante muito comum no tratamento de águas para abastecimento (Yu *et al.*, 2015). Após dosado em água, o Al(III) desencadeia uma série de processos de hidrólises, polimerização, precipitação e agregação (Yu *et al.*, 2015). O mecanismo de varredura é muito utilizado nas estações de tratamento de ciclo completo de água, nas quais se tem floculação e sedimentação antecedendo a filtração rápida (Constantino, 2008). Isto se deve a adição de alta dosagem de coagulante, o que promove a precipitação, removendo por captura os colóides presentes no meio e assim formando flocos maiores e com alta velocidade de sedimentação.

Além de Al(III), há diversos outros coagulantes para o tratamento de água. Pavanelli (2001) investigou a eficiência de alguns, uma vez que a atuação do coagulante é de suma importância para as etapas posteriores do tratamento. Neste estudo, foram utilizados sulfato de alumínio, cloreto férrico, hidróxicloreto de alumínio e sulfato férrico. Segundo o autor, os diagramas de coagulação são altamente utilizados em pesquisas sobre coagulação, uma vez que auxiliam na determinação da dosagem de coagulante e pH de coagulação apropriados.

A floculação é a operação seguinte à coagulação e acontece através de uma agitação relativamente lenta que possibilita colisão entre os flocos, promovendo formação e crescimento de mesmos para posterior remoção através de sedimentação, flotação ou filtração (Constantino, 2008).

A formação de flocos depende da concentração de coagulante adicionado, força de cisalhamento aplicada, concentração da partícula e tamanho (Yu *et al.*, 2009). A força do floco é uma característica estrutural dependente das ligações entre as partículas componentes do mesmo, isso inclui a quantidade e a energia dessas ligações (Parker *et al.*, 1972), e representa a capacidade do floco de resistir às forças de cisalhamento durante a agitação. Quando o distúrbio aplicado sobre a superfície do floco é maior que a energia das suas ligações, o mesmo se rompe, voltando a se formar em pontos mais favoráveis quando a força de atração é maior ou a força repulsiva é menor. O recrescimento dos flocos é um parâmetro operacional que se mostra particularmente importante em técnicas de separação sólido/líquido para a remoção eficiente de partículas agregadas, uma vez que sua eficiência diminui com a ruptura de flocos. O Fator de Recrescimento representa a

capacidade do floco de retornar a sua condição original após a ruptura, maior será sua capacidade de recuperação quanto mais próxima a condição inicial (Li *et al.*, 2006). Isto é importante porque partículas menores geralmente possuem menor eficiência de remoção (Jarvis *et al.*, 2005). Li *et al.* (2006) utilizou o índice de floclação para comparar forças de flocos em diferentes taxas de cisalhamento, calculando o Fator de Força e Fator de Recrescimento.

Por este motivo, os processos unitários em estações de tratamento de água são geralmente projetados para minimizar a quebra do floco, o que, no entanto, na realidade não é alcançado, com regiões de altas forças de cisalhamento sendo prevalentes (Jarvis *et al.*, 2005), razão pela qual é de suma importância estudar o recrescimento dos flocos.

2. Objetivos

2.1 Geral

O presente trabalho de conclusão de curso tem por objetivo avaliar a força macroscópica dos flocos e o recrescimento após ruptura controlada, para duas situações em que as partículas têm origens e composições diferentes.

2.2 Específicos

1. Avaliar a força dos flocos e recrescimento após ruptura controlada.
2. Comparar duas águas com composições diferentes.
3. Comparar dois métodos de cálculo.

3. Metodologia

Esta pesquisa é componente da linha orientada pelo professor Rodrigo Braga Moruzzi, DEPLAN/IGCE/UNESP RIO CLARO, contando com vários anos de trabalho dentro área de floculação, com orientações na modalidade de Iniciação Científica, Mestrado e Pós-doutorado, financiados pelas agências FAPESP, CNPq e projeto de auxílio FAPESP (10/50694-0) em parceria com o ITA.

Nesse item são descritos os procedimentos adotados para a realização da pesquisa. As atividades sequenciais necessárias a consecução dos ensaios foram resumidamente apresentadas na Figura 1.

Nos itens subsequentes foram detalhados os procedimentos adotados para preparação e coagulação das águas de estudo, bem como os procedimentos para monitoramento e obtenção da força e recrescimentos dos agregados.

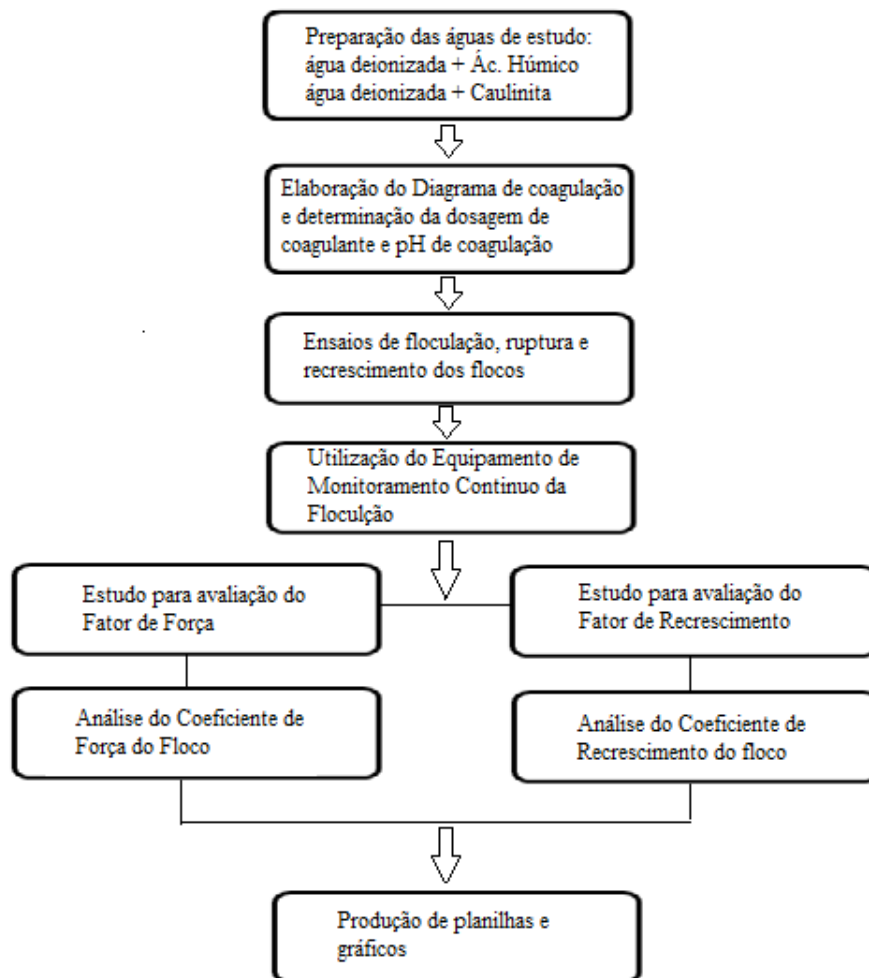


Figura 1. Fluxograma simplificado das atividades desta pesquisa

3.1 Águas de estudo e Diagramas de Coagulação

Foram preparadas duas águas em laboratório, uma apresentando cor e outra turbidez. O preparo da água com cor foi feito com Ácido Húmico *Sigma Aldrich Chemical*, em concentração de 31 mg/L, em água deionizada, obtendo cor de 50 ± 2 uC, conforme Constantino (2008). A água apresentando turbidez foi preparada conforme Moreno (2014), obtendo 25 ± 2 uT, com objetivo de obter partículas primárias com diferentes características.

Os ensaios do presente estudo foram realizados no equipamento *Jar Test*. Este equipamento possui seis jarros graduados com volume de 2 litros, com paletas giratórias com ajuste de rotação, possibilitando a regulação dos gradientes de velocidade. O equipamento possui também dispositivos para coleta simultânea de amostras (Lopes, 2011).

Para elaboração do diagrama de coagulação da água de estudo com cor, esta foi levada ao equipamento *Jar Test* e passou pelo processo de coagulação e floculação, acrescida do agente floculante Sulfato de Alumínio Comercial ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$) e Solução de Hidróxido de Sódio concentrada, para determinação das suas concentrações ideais. Para esses testes, o gradiente de mistura rápida (Gmr) foi de 800 s^{-1} durante 10 segundos (Tmr) e gradiente de floculação (Gf) 20 s^{-1} durante 20 minutos (Tf), com diversas dosagens do coagulante e do agente alcalinizante. A velocidade de sedimentação foi de 2,5cm/min, e o pH de floculação e a cor para 2,8 minutos de sedimentação foram medidos em todos os testes.

Para a água de estudo com caulinita, foi utilizado o diagrama de coagulação desenvolvido por Oliveira *et al.* (2015).

3.2 Ensaios de ruptura, recrescimento e força dos flocos

Ambas as águas foram levadas ao equipamento *Jar Test*, coaguladas com Sulfato de Alumínio e pH corrigido com Hidróxido de Sódio. As condições de mistura foram adotadas conforme Oliveira *et al.* (2015), com gradiente de mistura rápida de 800 s^{-1} durante 10 segundos e o gradiente de floculação variado, começando em 20 s^{-1} , 40 s^{-1} , 60 s^{-1} e 80 s^{-1} durante 25 minutos, produzindo os flocos que são o objeto de estudo. Ao atingir 25 minutos de ensaio de crescimento dos flocos, iniciaram-se os ensaios de ruptura dos mesmos, que consistem em elevar as forças de cisalhamento do sistema, de forma a promover a quebra dos flocos. Posteriormente, retornava-se ao patamar anterior, de modo a promover o recrescimento. O gradiente de ruptura foi de 800 s^{-1} aplicado por 10 segundos, retornando ao gradiente de floculação inicial correspondente do patamar na condição anterior a quebra. Após a ruptura dos flocos, não houve aditivo de agente coagulante.

A técnica de monitoramento que foi utilizada neste trabalho foi inicialmente desenvolvida pela *University College London - UCL* por volta de 1984, denominada *turbidity fluctuations*. Neste método, uma amostra fluindo em escoamento laminar é submetida à passagem de feixe de luz por meio de caminho óptico de comprimento conhecido. Tal passagem apresenta variações aleatórias de intensidade na célula receptora. Este procedimento pode fornecer informações relacionadas ao tamanho do floco durante todo o período de sua formação, quebra e recrescimento proporcionando informações mais detalhadas das propriedades dos flocos do que as que podem ser obtidas com procedimentos convencionais de monitoramento. Neste trabalho, o equipamento utilizado para o monitoramento foi o PDA3000 (*Photometric Dispersion Analyser*), o qual é adequado as variações de tamanho de flocos e que, quando devidamente calibrado, pode ser empregado para acompanhamento do desempenho da floculação em sistemas contínuos. A Figura 2 representa o funcionamento do equipamento.

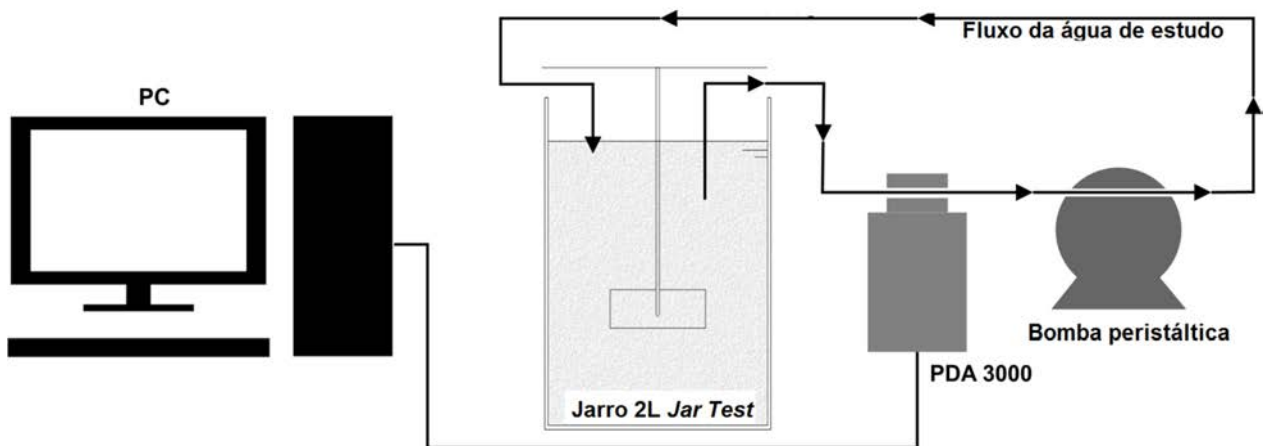


Figura 2. Funcionamento do equipamento de monitoramento PDA3000

Os dados gerados pelo PDA3000 foram organizados em planilha eletrônica em Excel®, uma para cada gradiente de floculação. O tratamento consiste em construir gráficos a partir destas planilhas, os quais foram filtrados utilizando média móvel de 8. O índice de floculação (IF) foi utilizado como parâmetro de monitoramento, por meio do qual se avaliou macroscopicamente a força do floco e o recrescimento, conforme Jarvis *et al.* (2005).

A equação proposta por Li *et al.* (2006) foi adaptada utilizando o Fator de Força (FF) e de Recrescimento (FR), determinados por meio de IF , como representação indireta da dimensão característica. Dessa forma, a força do floco pode ser indiretamente relacionada com as tensões de cisalhamento, conforme Equação 1. Os valores do Fator de Força (FF) e de Recrescimento (FR) foram determinados conforme Equação 3 e 4. Neste trabalho, os fatores determinados pelas Equações 3 e 4 foram obtidos por meio dos valores médios e máximos de IF .

$$FR \text{ ou } FF = CG^{-\gamma} \quad (1)$$

$$\text{Log } d = \text{Log } C - \gamma \text{ Log } G \quad (2)$$

$$\text{Fator de Força (FF)} = \frac{IF_2}{IF_1} \cdot 100\% \quad (3)$$

$$\text{Fator de Recrescimento (FR)} = \frac{IF_3 - IF_2}{IF_1 - IF_2} 100\% \quad (4)$$

Onde: C é fator multiplicativo; G é gradiente de velocidade (s^{-1}); γ é coeficiente de força do floco; d é o tamanho do floco; IF_1 é o tamanho do floco na fase estável

antes de quebra; IF_2 é o tamanho do floco após o período de quebra, e; IF_3 é o tamanho do floco após o recrescimento para a nova fase constante.

O Fator de Força (FF) representa a capacidade do floco de resistir às forças de cisalhamento durante a agitação, e o Fator de Recrescimento (FR) é a capacidade do floco retomar a sua condição original após a ruptura (Li *et al.*, 2006).

As Figuras 3 e 4 representam as posições do índice de floculação usadas na determinação de FF e FR (IF_1 , IF_2 e IF_3).

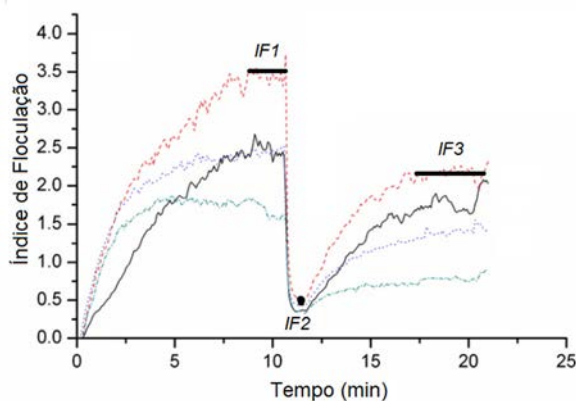


Figura 3 – Representação dos valores de IF_1 , IF_2 e IF_3 calculados a partir das médias nos patamares estáveis antes da ruptura, após ruptura e após recrescimento, respectivamente (adaptado de Yu *et al.*, 2009)

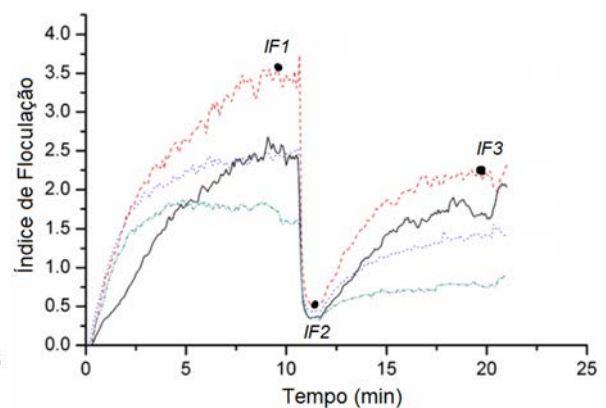


Figura 4 – Representação dos valores de IF_1 , IF_2 e IF_3 calculados a partir dos máximos nos patamares estáveis antes da ruptura, após ruptura e após recrescimento, respectivamente (adaptado de Yu *et al.*, 2009)

4. Resultados e discussão

Nos itens subsequentes apresentam-se os resultados dos ensaios de coagulação e dos ensaios que envolveram a análise da ruptura, recrescimento e força dos flocos.

4.1 Diagramas de coagulação

Os diagramas de coagulação, para as condições desta pesquisa, encontram-se na Figura 5, no qual os pontos de trabalho podem ser observados nas marcas em destaque.

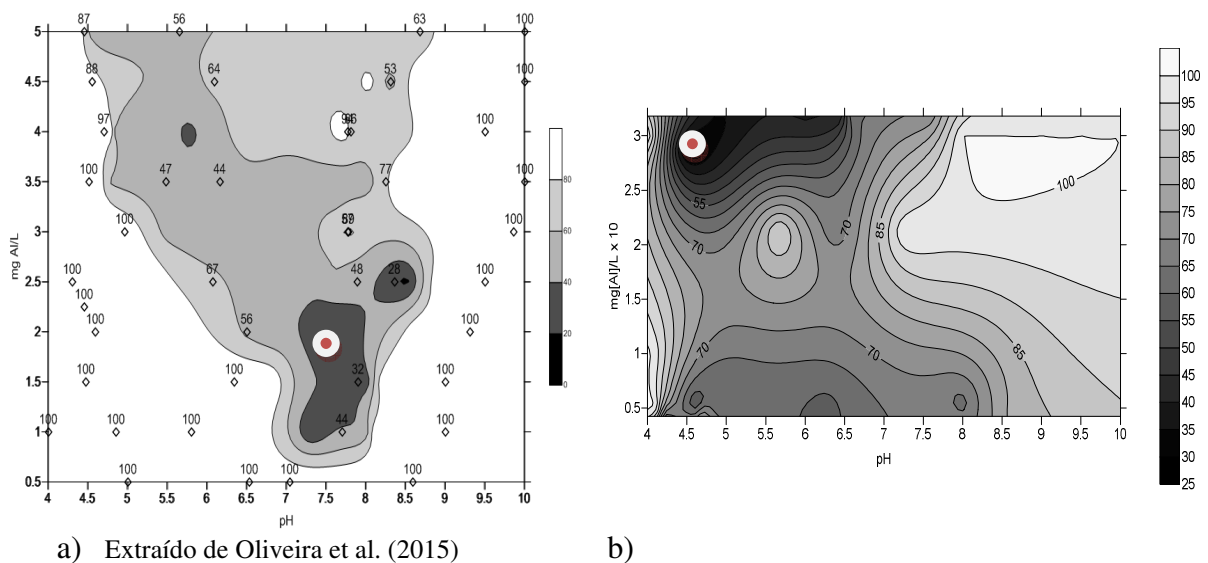


Figura 5 - Diagramas de coagulação para água contendo caulinita (a) e contendo ácido húmico (b).

As regiões delimitadas pelas curvas de isoeffiência permitem visualizar o par de valores (Gf e Tf) adequado para a coagulação. Desta forma, pode-se definir as dosagens empregadas nos estudos subsequentes, quais sejam 2 mg Al^{+3}/L em pH de 7,5 para a água preparada a partir de solução de caulinita e 30 mg Al^{+3}/L em pH de 4,5 para a água preparada a partir de solução de ácido húmico. A região no diagrama de coagulação da água contendo caulinita é semelhante à região encontrada por Pavanelli (2001). Em seu estudo, o autor comparou diversos tipos de coagulante para remoção de turbidez, em uma água com elevada turbidez em relação a cor, para as seguintes condições: Gmr 700 s^{-1} ; Tmr 10 s; Gf 25 s^{-1} ; e Tf 20 min. O diagrama de coagulação com o sulfato de alumínio para velocidade de sedimentação de 2 cm/min foi semelhante ao desta pesquisa.

Edwards e Amirtharajah (1985) realizaram pesquisas para obter mais informações sobre os mecanismos de coagulação. Os ensaios de coagulação da água de estudo com elevada cor verdadeira (100 uC), coagulada com Sulfato de Alumínio Comercial ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$), resultaram em uma região semelhante a do presente estudo, com mais de 80% de remoção de cor aparente.

4.2 Fator de Força e Fator de Recrescimento

Os resultados obtidos para Fator de Força (FF) e Fator de Recrescimento (FR) para ambos os flocos são apresentados na Tabela 1.

Constatou-se pelos resultados que, para ambas as águas de estudo, em menores gradientes de floculação formam-se flocos com maiores valores de IF , tanto antes quanto depois da quebra, o que representa um tamanho médio maior de floco, similar ao concluído por Li *et al* (2006).

Com os resultados apresentados na Tabela 1, é possível notar que o Fator de Força (FF) é menor em gradientes de floculação menores e maior nos gradientes maiores. Segundo Li *et al* (2006), isto ocorre pois flocos formados em maiores forças de cisalhamento são mais fortes para assim poderem resistir à estas forças.

Verificou-se que o Fator de Força é influenciado pela posição inicial, dada por IF_1 . Dessa forma, flocos maiores no estágio pré-ruptura tendem a apresentar menos resistência, ou seja, menor valor de Fator de Força.

Tabela 1- Resultados de Fator de Força e Fator de Recrescimento para ambas águas de estudo, dados pela média e máxima dos valores de IF_1 , IF_2 , IF_3 nos patamares estáveis.

Tipo de floco e rotação	FF pela média dos valores de IF_1, IF_2, IF_3(%)	FR pela média dos valores de IF_1, IF_2, IF_3 (%)	FF pela máxima dos valores de IF_1, IF_2, IF_3 (%)	FR pela máxima dos valores de IF_1, IF_2, IF_3(%)
Floco de Ácido Húmico	40,24	23,64	27,70	56,67
Gf = 20 s ⁻¹				
Floco de Ácido Húmico Gf = 40 s ⁻¹	54,60	19,22	32,90	61,83
Floco de Ácido Húmico Gf = 60 s ⁻¹	50,53	23,16	40,53	36,40
Floco de Ácido Húmico Gf = 80 s ⁻¹	73,30	9,94	55,63	47,00
Floco de Caulinita Gf = 20 s ⁻¹	22,98	36,25	14,76	35,77
Floco de Caulinita Gf = 40 s ⁻¹	28,52	12,86	20,04	15,67
Floco de Caulinita Gf = 60 s ⁻¹	71,74	25,72	57,41	26,20
Floco de Caulinita Gf = 80 s ⁻¹	74,52	25,43	57,38	27,25

Estes resultados também estão de acordo com Yu *et al.* (2010), que observaram que para velocidades de agitação superiores a 100 rpm (equivalente a 138 s^{-1} , em referência a equação obtida por ensaio de torque usada nesse trabalho) ocorreu uma queda considerável no valor de IF imediatamente após a ruptura, concluindo que a quebra dos flocos em altas velocidades de cisalhamento não é totalmente reversível.

Os resultados de Constantino (2008) demonstraram que a ruptura causa perda da eficiência na remoção de cor, mesmo em gradientes de velocidade mais baixos. Voltan (2007) constatou que durante a ruptura os flocos se rompem em pedaços, com características que não retornam às condições iniciais.

Em relação ao recrescimento, verificou-se que os valores de FR da água preparada com ácido húmico variam com maior amplitude quando se varia o gradiente médio de velocidade. Assim, pode-se concluir que a água preparada com ácido húmico é mais sensível ao valor de G , quando comparada a água preparada com caulinita.

Nas Figuras 6 e 7 são apresentados os resultados do ajuste da Equação 1, adaptado de Li *et al.* (2006), para valores obtidos a partir da média dos valores de IF_1 , IF_2 , IF_3 nos patamares estáveis. As Figuras 8 e 9 apresentam os resultados do ajuste da Equação 1 para valores obtidos a partir dos valores máximos de IF_1 , IF_2 , IF_3 nos patamares estáveis. Verificou-se que os coeficientes de força do floco e recrescimento (γ , conforme Equação 1) são maiores para a água de estudo com caulinita, quando comparados à água contendo ácido húmico. Estes resultados reforçam que os flocos de caulinita são mais propensos a quebra quando comparados aos flocos formados a partir de ácido húmico. Os valores dos coeficientes podem ser vistos na Tabela 2.

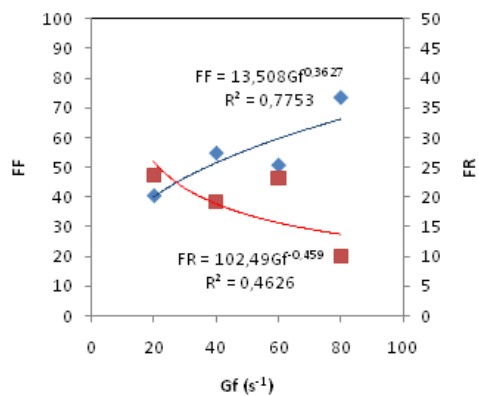


Figura 6 – Resultados do ajuste da Equação 1 para Fator de Força e Fator de Recrescimento da água de estudo com Ácido Húmico, calculados a partir dos valores médios de IF_1 , IF_2 e IF_3 nos patamares estáveis.

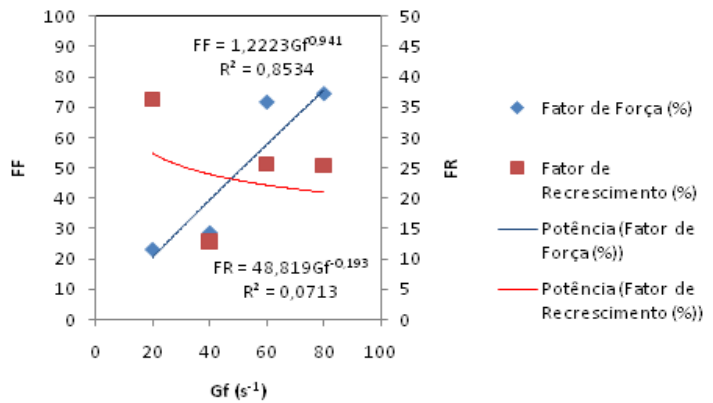


Figura 7 – Resultados do ajuste da Equação 1 para Fator de Força e Fator de Recrescimento da água de estudo com Caulinita, calculados a partir dos valores médios de IF_1 , IF_2 e IF_3 nos patamares estáveis.

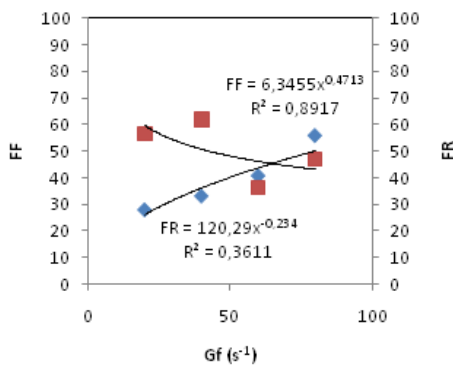


Figura 8 – Resultados do ajuste da Equação 1 para Fator de Força e Fator de Recrescimento da água de estudo com Ácido Húmico, calculados a partir dos valores máximos de IF_1 , IF_2 e IF_3 nos patamares estáveis.

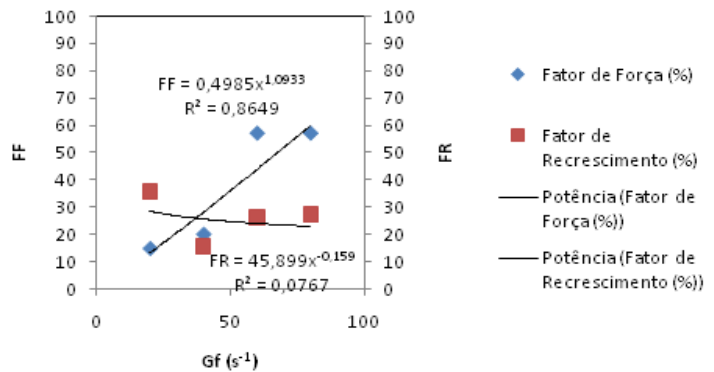


Figura 9 – Resultados do ajuste da Equação 1 para Fator de Força e Fator de Recrescimento da água de estudo com Caulinita, calculados a partir dos valores máximos de IF_1 , IF_2 e IF_3 nos patamares estáveis.

Tabela 2 – Resultados do coeficiente de força do floco e coeficiente de recrescimento, representados por γ e calculados por meio da média dos valores de IF_1 , IF_2 e IF_3 nos patamares estáveis e pelos valores máximos de IF_1 , IF_2 e IF_3 nestes patamares.

	Ácido Húmico para valores médios de IF_1, IF_2 e IF_3	Caulinita para valores médios de IF_1, IF_2 e IF_3	Ácido Húmico para valores máximos de IF_1, IF_2 e IF_3	Caulinita para valores máximos de IF_1, IF_2 e IF_3
Coeficiente de Força do Floco	0,36	0,94	0,47	1,09
Coeficiente de Recrescimento	-0,45	-0,19	-0,23	-0,15

A diferença entre os coeficientes de força calculados pelos dois métodos, tomando por base o coeficiente médio, é 30% para o floco de ácido húmico e 15% para o floco de caulinita, e para os coeficientes de recrescimento é 48% para floco de ácido húmico e 21% para floco de caulinita. Apesar das diferenças observadas, os resultados levam a mesma ordem de grandeza e ao mesmo comportamento dos expoentes, sendo maior para água de estudo com caulinita.

Segundo Li *et al.* (2006), quanto mais íngreme a inclinação de γ , mais propensos os flocos são em quebrar em tamanhos menores com força de cisalhamento crescente e, assim, o valor de γ é considerado como um indicador de força de floco.

Em linhas gerais, pode-se afirmar que a caulinita foi mais sensível a quebra, entretanto o recrescimento foi maior (maios valores de FR) e de forma menos dependente do valor do gradiente médio de velocidade usado no recrescimento.

5. Conclusão

A avaliação macroscópica da força do floco permitiu a quantificação das constantes de força e de recrescimento e os resultados para cada método são diferentes, porém levam a mesma conclusão, ou seja, flocos formados em gradientes maiores terão maior força e ligações mais fortes entre suas partículas, para assim resistirem às forças de cisalhamento.

Para a água preparada a partir de solução de ácido húmico, o Fator de Força médio variou de 40 a 73, para gradientes médios de velocidade de 20 a 80 s^{-1} , nessa ordem. Para a água preparada a partir de solução de caulinita, o Fator de Força médio variou de 23 a 74,5, para gradientes médios de velocidade de 20 a 80 s^{-1} , respectivamente. Para as duas águas, os resultados indicam maior resistência para flocos formados a partir de maiores valores de gradientes médios de floculação.

O Fator de Recrescimento mede a capacidade global dos flocos atingirem suas condições pré-ruptura. Para as duas águas de estudo, verificou-se que o recrescimento foi mais acentuado para os gradientes médios de floculação de 20 s^{-1} , com valores de 23 e 36 para água preparada a partir de ácido húmico e caulinita, respectivamente.

Comparando os resultados obtidos entre as duas águas de estudo, verificou-se que os flocos formados a partir de caulinita são mais propensos a quebrar em flocos de menores tamanho, sendo os coeficientes de força do floco de 0,36 e 0,94 para água preparada com ácido húmico e caulinita, nessa ordem. Ainda, os flocos formados a partir de caulinita apresentam maiores valores de coeficiente de recrescimento, portanto seu recrescimento após a ruptura foi maior, em comparação com floco formado a partir de ácido húmico.

Em linhas gerais, os resultados apresentados nesse trabalho demonstram a importância de evitar a quebra dos agregados formados na floculação em canais, passagens e aberturas presentes nas estações de tratamento, visto que a força do agregado e sua capacidade de recuperação são limitadas.

6. Referências Bibliográficas

1. BALTAR, C.A.M., Oliveira, J.F., Flocculation of colloidal silica with polyacrylamide and the effect of dodecylamine and aluminium chloride pre-conditioning. (1998). *Miner. Eng.* 11, 463–467.
2. BROWN, G.M.; GREGORY, J.; JACKSON, P.J.; NELSON, D.W.; TOMLINSON, E.J. (1985). An on-line monitor for flocculation control. In: *Instrumentation and Control of Water and Wastewater Treatment and Transport Systems* (Edited by Drake R. A. R.), Pergamon Press, Oxford, p.239-245.
3. CONSTANTINO, L. T. Ruptura e recrescimento de flocos em água com substâncias húmicas aquáticas coagulada com sulfato de alumínio e cloreto férrico. (2008). 164 p. Tese (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos - SP.
4. DI BERNARDO, L., DANTAS, A. D. B. Métodos e Técnicas de Tratamento de Água. 2 ed. São Carlos: Rima Editora, 2005. V. 1
5. EDWARDS, G.A.; AMIRTHARAJAH, A. Removing color caused by humic acids. (1985). In: *Journal AWWA. Research & Technology*, p.50-57.
6. FRANCOIS, S.B., Strength of aluminum hydroxide flocs. (1987). *Water Res.* 21, 1023–1030
7. GREGORY, J.; NELSON, D.W. (1984). A new optical method for flocculation monitoring. In: J. Gregory (Ed.), *Solid-Liquid Separation*, Ellis Horwood, Chichester, p. 172-182
8. GREGORY, J.; NELSON, D.W. (1986). Monitoring of aggregates in flowing suspensions. *Colloids and Surfaces*, 18, p.175-188
9. GREGORY, J. Turbidity fluctuations in flowing suspensions. (1985). *Journal of Colloid and Interface Science*, v.105, n.2, p.357-371, June.
10. JARVIS, P., et al., A review of floc strength and breakage. (2005). *Water Res.* 39, 3121–3137.
11. LI, T. et al. The strength and fractal dimension characteristics of alum-kaolin flocs. *International Journal Of Mineral Processing*, Beijing, Pr China, v. 82, n. 1, p.23-29, 12 maio 2006.
12. LOPES, M.A. Avaliação de diferentes coagulantes para remoção de sólidos por flotação e sedimentação de água residuária de uma indústria metal-

mecânica. (2011). Tese de mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos - SP.

13. MORENO, P., Emprego de técnica dedicada de análise de imagem na avaliação do produto GT no desempenho da floculação. (2014). Tese de mestrado – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Bauru-SP.

14. MORUZZI, Rodrigo Braga; JULIO, Marcelo de; OLIVEIRA, André. Equipamento de Monitoramento Contínuo da Floculação (EMCF): experimentação, correlação e calibração. Revista DAE, *No Prelo*, São Paulo - SP.

15. MORUZZI, R. B. Avaliação do desempenho do processo de floculação usando parâmetro característico da função distribuição de tamanho de partículas: experimentação, modelagem e simulação / Rodrigo Braga Moruzzi. - Rio Claro, 2014. 209 f.

16. OLIVEIRA, A.L.de, MORENO, P., SILVA, P.A.G.DA, JULIO, M.D., MORUZZI, R.B. The effect of form and particle size distribution (PSD) on the removal of particulate matter. *Desalination and Water Treatment*, 2015, Vol. 57 (36). 1-12.

17. PÁDUA, V.L. Metodologia para determinação dos gradientes de velocidade médios em unidades de floculação de mistura completa com câmaras em série e escoamento contínuo a partir de reatores estáticos. (1994) 165 p. São Carlos. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

18. PARKER, D.S., Kaufman, W.J., Jenkins, D., Flocbreakup in turbulent flocculation processes. (1972). *J. Sanit. Eng. Div.: Proc. Am. Soc. Civ. Eng. SA1*, 79–99.

19. PAVANELLI, G., Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada. (2001). Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos-SP.

20. VOLTAN, P.E.N. Avaliação da ruptura e do recrescimento de flocos na eficiência de sedimentação em água com turbidez elevada. (2007). Tese de mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos – SP.

21. YU, W., Li, G., Xu, Y., Yang, X. Breakage and re-growth of flocs formed by alum and PACl. (2009). *Powder Technology* 189, p 439 – 443.
22. YU, W., Gregory, J., Campos, L. Breakage and re-growth of flocs formed by charge neutralization using alum and polyDADMAC. (2010). *Revista Water Research* 44, p 3959-3965.
23. YU, W., Gregory, J., Campos, L., The effect of additional coagulant on the re-growth of alum-kaolin flocs. (2010). Elsevier, *Separation and Purification Technology* 74, p 305-309.
24. YU, W., Gregory, J., Campos, L., Graham, N., Dependence of floc properties on coagulant type, dosing mode and nature of particles. (2015). *Revista Water Research* 68, p 119-126.
25. YU, W., Hu, C., Elsevier, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 404, p 106-111. Liu, H., Qu, J., Effect of dosage strategy on Al-humicflocs growth and re-growth. (2012).

ANEXO A – Gráficos do sinal gerado pelo equipamento PDA3000

Os gráficos construídos a partir dos dados gerados pelo PDA3000, filtrados utilizando média móvel de 8, são apresentados abaixo. O índice de floculação (*IF*) foi utilizado como parâmetro de monitoramento, por meio do qual se avaliou macroscopicamente a força do floco e o recrescimento, conforme Jarvis *et al.* (2005).

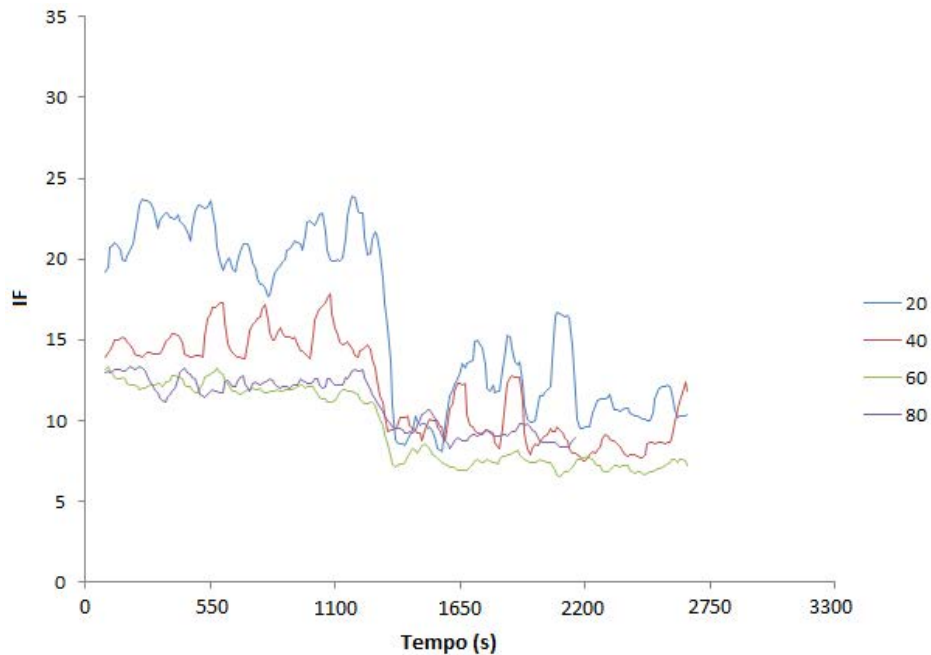


Figura A1 - Resultados das medidas do índice de floculação (IF) por meio do emprego do equipamento PDA3000 para água bruta contendo Ácido Húmico apresentando cor verdadeira de 50uC com adição de sulfato de alumínio comercial como coagulante (30 mg Al³⁺/L) em pH de coagulação de 4,5, mistura rápida correspondente a Gmr de 800 s⁻¹ e Tmr de 10 s e floculação de Gf variando de 20 s⁻¹, 40 s⁻¹, 60s⁻¹e 80 s⁻¹, eTf de 25 min. Ruptura no tempo de 25 min com Gr de 800 s⁻¹

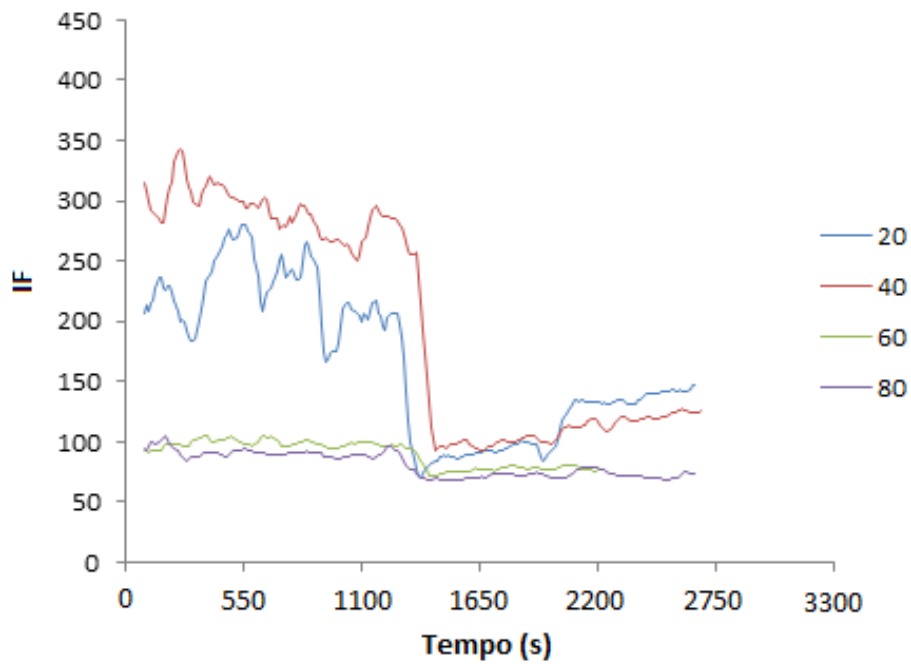


Figura A2 - Resultados das medidas do índice de floculação (IF) por meio do emprego do equipamento PDA3000 para água bruta contendo caulinita apresentando turbidez verdadeira de 25 uT com adição de sulfato de alumínio comercial como coagulante (2 mg Al^{+3}/L) em pH de coagulação de 7,5, mistura rápida correspondente a G_{mr} de $800 s^{-1}$ e T_{mr} de 10 s e floculação de G_f variando de $20 s^{-1}$, $40 s^{-1}$, $60 s^{-1}$ e $80 s^{-1}$, e T_f de 25 min. Ruptura no tempo de 25 min com G_r de $800 s^{-1}$.