

## MINIMIZAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS CAUSADOS POR MINERADORAS ATRAVÉS DA REDUÇÃO DA TURBIDEZ DOS EFLUENTES GERADOS - ESTUDO DE COAGULAÇÃO DO EFLUENTE DA LAGOA DAS CODORNAS EM NOVA LIMA–MG

Frederico Roncalli Siqueira<sup>1</sup>  
Diego Roberto Sousa Lima<sup>2</sup>  
Raphael de Vicq Ferreira da Costa<sup>3</sup>

### RESUMO

A exploração dos recursos naturais, exercida pelo homem desde a pré-história, é um processo emblemático para o desenvolvimento da sociedade em praticamente todos os setores. Porém toda essa importância vem acompanhada de agressões ao meio ambiente. O objetivo deste trabalho constituiu em caracterizar um efluente gerado por uma mineradora e otimizar um tratamento por clarificação em escala de bancada visando a redução da turbidez atendendo ao padrão exigido pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente. Dessa forma, o estudo de coagulação foi realizado testando dois tipos de coagulantes sendo eles: Clorossulfato Férrico (Salfer/Floculan) e Cloreto de Polialumínio (PAC), ambos da marca Bauminas® e um polímero Polímero Floculante WD 545 (Werdyal®). Todos os ensaios foram realizados no equipamento *Jartest*. O coagulante que apresentou os melhores resultados em termo de remoção de turbidez foi o PAC. Após a otimização desse coagulante, foi possível aplicá-lo em um efluente real (Turbidez inicial ~800 uT) e atingir eficiências de remoção de turbidez superior a > 90% (Turbidez final ~20 uT)

**Palavras-chave:** Tratamento por clarificação; Efluente de mineração; Turbidez.

### ABSTRACT

The Natural resources exploitation exerted by man since prehistory is an emblematic case for the development of society in practically all industries. However, all of this importance comes with environmental aggressions. However, the aim of this work consisted in characterize an effluent generated by a mining company and optimize a treatment by a scale clarifying bench aimed at reducing turbidity meeting the standard required by the National Environmental Council. Therefore, the study of coagulation was performed testing two types of coagulants such as: chlorosulfate Ferric ( Salfer / Floculan ) and Polyaluminium Chloride (

<sup>1</sup> Graduando Engenharia Ambiental Faculdade Santa Rita – FaSaR. E-mail: fredericoroncalli@gmail.com

<sup>2</sup> Químico Industrial pela Universidade Federal de Alfenas - Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Ouro Preto e Doutorando em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Ouro Preto – Professor Associado da Faculdade Santa Rita – FaSaR. E-mail: diegosousalima@hotmail.com

<sup>3</sup> Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Ouro Preto e Doutor em Conservação de Recursos Naturais pela Universidade Federal de Ouro Preto com tutela pela Universidade Tecnológica de Freiberg – Alemanha – Professor Titular da Faculdade Santa Rita – FaSaR. E-mail: raphaelvicq@gmail.com

PAC ) both of Bauminas ® brand polymer and a polymer flocculant WD 545 ( Werdyal ® ) . All the trials were performed in the Jarrest equipment. The coagulant that showed the best results in terms of turbidity removal was the PAC. After the optimization of coagulant was possible to apply it in a real effluent (~ 800 NTU initial turbidity) and achieve higher removal efficiencies of turbidity at > 90 % (~ 20 NTU Turbidity end).

**Keywords:** Treatment by clarification; Mining effluent; Turbidity.

## INTRODUÇÃO

A exploração dos recursos naturais, exercida pelo homem desde a pré-história, é um processo emblemático para o desenvolvimento da sociedade em praticamente todos os setores, porém toda essa exploração vem acompanhada de agressões ao meio ambiente.

A mineração é um desses processos, sendo apontada há décadas por vários autores como fonte inesgotável de contaminação de sedimentos por elementos traço em rios (LEWIN e MACKLIN, 1987). Muitos trabalhos sobre acumulação de sedimentos têm sido feitos em bacias hidrográficas de áreas mineradas, tanto na Europa como no Brasil, destacando-se os trabalhos de Leigh (1994), e Ronchi (2000).

Os efluentes lançados pelas mineradoras contém uma carga geoquímica relevante, com diversos elementos traços potencialmente perigosos, tais como: Arsênio, Chumbo, Cromo, Níquel, Cádmiio, os quais podem entrar no ciclo biogeoquímico da Terra e trazer danos à população residente no entorno da região minerada. (COSTA, 2007).

A região do Quadrilátero Ferrífero (QF) é conhecida mundialmente por sua diversidade de minérios e tipos litológicos. Trata-se, portanto, de uma região com imenso patrimônio geoambiental e intensa atividade de mineração. Além disso, também se constitui em uma das áreas de maior concentração populacional do Estado e um dos pilares econômicos de Minas Gerais.

A coexistência de grandes concentrações humanas e a atividade econômica intensa quase sempre cria intensos conflitos relacionados ao uso dos recursos naturais e do espaço. Tais conflitos são especialmente relevantes no Quadrilátero Ferrífero que

apresenta em seu território uma forte pressão ambiental relacionada à atividade mineradora, principalmente da mineração de ferro (NALINI, 2009).

Inúmeros já são os problemas advindos dessa convivência e, a partir disso, pode-se projetar que, devido à expansão prevista para as áreas de lavra paralelamente ao crescimento das áreas urbanas, esses conflitos irão tornar-se mais intensos em um futuro muito próximo.

Diante do exposto, verifica-se a necessidade de proposição de estratégias que possibilitem minimizar os impactos ambientais causados pela mineração, uma vez que essa atividade é um dos pilares econômicos do estado de Minas Gerais, devendo ser fomentada de forma sustentável. Dessa forma, o objetivo deste trabalho consistiu em caracterizar um efluente gerado por uma mineradora no município de Nova Lima-MG e otimizar um tratamento por clarificação em escala de bancada, objetivando a redução da turbidez, atendendo ao padrão exigido pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente em vigência (CONAMA 430).

O objetivo geral foi caracterizar e tratar um efluente produzido em uma mineradora, que é lançado no Ribeirão Codornas no município de Nova Lima-MG e tem-se como objetivos específicos otimizar um tratamento por clarificação para uma significativa e eficiente redução da turbidez; empregar usuais coagulantes primários encontrados no mercado; levantar custo comercial do melhor coagulante testado.

## **REVISÃO DA LITERATURA**

Os efluentes, em geral, podem conter uma grande variedade de sólidos suspensos, dissolvidos e coloidais, destacando-se entre elas as substâncias orgânicas, inorgânicas e inúmeros sais (VON SPERLING, 2005). Os sólidos suspensos são partículas que não se dissolvem na água e são capturadas pela análise gravimétrica em um filtro de 0,45 micrometros. Isso inclui lama, argila, poeiras e matéria microbiológica. Tais sólidos contribuem, diretamente, para a turbidez e opacidade da água. Essas partículas são grandes o suficiente para serem removidas pelas técnicas de precipitação, flotação ou filtração.

A qualidade dos efluentes de turbidez elevada é melhorada pelo aumento da velocidade de sedimentação das partículas em suspensão, num procedimento denominado desestabilização das partículas em suspensão. Este procedimento se baseia na redução da carga superficial característica do sistema disperso água-partícula sólida pela adição de reagentes denominados coagulantes e floculantes (CARVALHO, 2005).

## **Turbidez**

A turbidez como característica física acaba por se constituir em uma interferência da concentração de partículas suspensas na água obtida por meio da passagem de um feixe de luz através da amostra, sendo representada por meio de unidades de turbidez (uT), antigamente denominada de unidades nefelométricas de turbidez (UNT). Os constituintes responsáveis pela turbidez da água são os sólidos suspensos, que podem advir de compostos naturais (partículas de rocha, silte e argila, algas e outros microrganismos) e de constituintes de origem antropogênica por meio dos despejos domésticos e os industriais. Esses constituintes podem estar associados a inúmeros compostos químicos, de classes e toxicidade distintas, e aos micro-organismos. A utilização mais frequente desse parâmetro é tanto na caracterização de águas brutas e de efluentes industriais quanto no monitoramento das eficiências das Estações de Tratamento de Água - ETA e Estações de Tratamento de Esgotos - ETE (LIMA, 2013).

## **Coagulação e coagulantes**

Os sais de alumínio e de ferro são os coagulantes primários inorgânicos mais utilizados em ETA e ETE em todo Brasil. Os coagulantes que se destacam incluem o sulfato de alumínio (SA), aluminato de sódio, Cloreto de polialumínio (PAC), sulfato férrico (SF), sulfato ferroso e cloreto férrico (SFCF). Tais coagulantes, quando aplicados, conduzem a uma redução dos valores de pH das águas e efluentes em tratamento.

A coagulação consiste, essencialmente, na desestabilização das partículas coloidais e suspensas, e é realizada pela conjugação de ações físicas e reações químicas. A adição dos coagulantes (geralmente sais de ferro ou de alumínio) faz com que esses

metais dissolvam íons carregados positivamente, acarretando em fortes ligações com hidroxilas da água e liberando íons H<sup>+</sup>, denominando-se, por isso, hidrólise. Em seguida, com a aproximação e colisão das partículas desestabilizadas, há formação dos flocos. O processo de coagulação efetua-se na unidade de mistura rápida da ETA (medidor Parshall), estando presente quase na totalidade das tecnologias de tratamento (LIBÂNIO, 2010).

Coagulantes inorgânicos como o PAC reagem com a turbidez e os sais presentes na água (alcalinidade) para formar espécies positivas e densas como  $(Al(OH)^{2+}$ ;  $Al(OH)^{2+}$ ;  $Al_2(OH)^{24+}$ ;  $Al_3(OH)^{25+}$  e  $Al_{13}O^4(OH)_{24}^{7+}$  (ou “Al<sub>13</sub>”)) do seu hidróxido correspondente conforme reação exemplar abaixo.



Reações similares ocorrem com os coagulantes SA, SF e SFCF. Entretanto deve-se ressaltar que o PAC, por possuir espécies positivas altamente carregadas, tais como o “Al<sub>13</sub>” supracitado em alta concentração acarreta em elevadas eficiências de remoção de material particulado em tempos menores. (ZOURBOULIS *et. al*, 2008).

Sendo assim não fica caracterizada sua dependência pela etapa de hidrólise. Tais autores afirmam ainda que, na presença de PAC, a velocidade e o tamanho dos flocos são maiores que os observados para o SA o que corrobora com o aumento de sua eficiência.

O mecanismo de coagulação por varredura é o mais recorrente nas ETA e ETE em todo Brasil. Em função das dosagens de coagulante e do pH de coagulação, as partículas coloidais e as suspensas são envolvidas pelo precipitado de hidróxido de ferro e/ou de alumínio fazendo com que esse mecanismo passe a predominar. Tal mecanismo conduz a dosagens mais elevadas, formando flocos com maiores pesos que sedimentam com maior facilidade nas unidades de decantação (LIBÂNIO, 2010).

Após a dispersão do coagulante, inicia-se a formação dos flocos que se constitui de um conjunto de fenômenos físicos, nos quais se reduz o número de partículas suspensas e coloidais presentes na massa líquida. Para a correta formação dos flocos, é fornecido maior tempo de detenção (ou de floculação) e menor gradiente de velocidade para que ocorram os choques entre as partículas anteriormente desestabilizadas pela ação do coagulante formando os flocos que serão removidos por sedimentação ou flotação (LIMA, 2013).

Já a etapa de decantação, a qual é a última fase do tratamento por clarificação, consiste em uma operação unitária que, geralmente, são fornecidas aos flocos previamente formados, condições que permitam que os mesmos sejam depositados por ação da gravidade, objetivando diminuir o afluxo de partículas às unidades filtrantes (LIMA, 2013).

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

Para o estudo de coagulação, foram utilizados três tipos de coagulantes, sendo eles: Clorossulfato Férrico – nome comercial Salfer/Floculan e Cloreto de Polialumínio (PAC), ambos da marca Bauminas® e um polímero Polímero Floculante WD 545 - conhecido como Werdyá (Werdyal®).

Todos os ensaios experimentais foram realizados no equipamento *Jartest* (Milan JT 102) de acordo com a (Figura 1). Tal equipamento possui capacidade de simular, com os mesmos parâmetros, o tratamento por clarificação de águas de abastecimento e efluentes industriais usualmente empregados na maioria das ETA e ETE do Brasil.

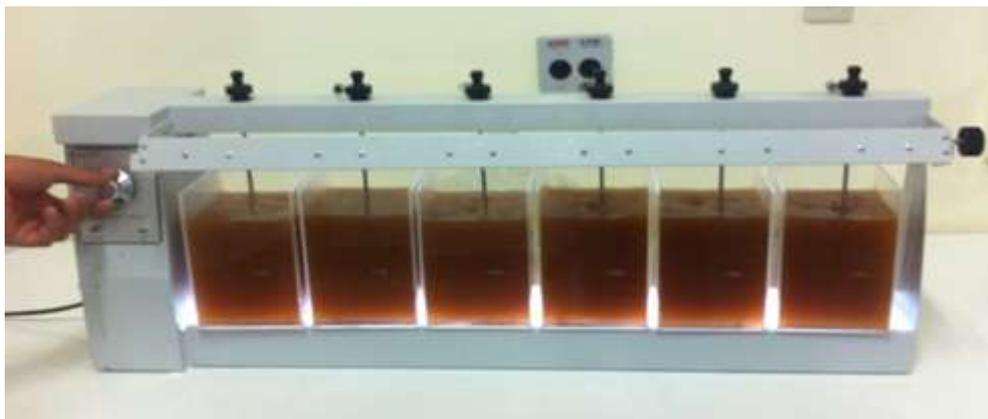


Figura 1: Equipamento *Jarrest* utilizado na otimização de todos os ensaios do tratamento por clarificação

Formulas químicas dos principais reagentes utilizados:

$(Al_n(OH)_mCl_3)$  = Cloreto de Polialumínio (PAC);

$FeCl_3SO_4$  = Clorossulfato Férrico (Salfer/Floculan);

$Al_2(SO_4)_3$  = Sulfato de Alumínio (SA);

O trabalho foi dividido em duas etapas:

- Etapa 01: Avaliação das eficiências de remoção de turbidez dos distintos coagulantes testados no tratamento por clarificação para o efluente real da mineradora em estudo;
- Etapa 02: Otimização da eficiência de remoção de turbidez do coagulante que obteve o melhor resultado na primeira etapa.

Para a realização dos ensaios, foram coletados 100 litros de efluente durante os meses de outubro e novembro de 2013; todas as amostras coletadas estavam com uma turbidez entorno de 800 uT, mesmo em período de estiagem. Vale ressaltar que em períodos chuvosos a turbidez superou o valor de 1000 uT.

De todas as amostras coletadas, o pH inicial mantinha-se entre 6,0 e 8,0. Para a realização dos ensaios foram seguidas as recomendações dos principais parâmetros do tratamento por clarificação da norma NBR 12216 (ABNT, 1992) como suporte técnico operacional.

**Etapa 1** - Avaliação das eficiências de remoção de turbidez dos distintos coagulantes no tratamento por clarificação para o efluente real da mineradora

Foi realizada uma bateria de testes no *Jartest*, nos quais o pH, durante os ensaios, foi monitorado. Foram adicionadas doses de 1 a 3mL de cada coagulante (sem prévia diluição) mantendo um gradiente de mistura elevado (300 rpm) garantindo uma agitação rápida por 15 segundos (etapa de coagulação). Após essa etapa, reduziu a rotação para 80 rpm e depois de dois minutos e trinta segundos de teste foi suspensa a agitação do equipamento (etapa de floculação), caracterizando, a partir de então, a etapa de sedimentação. Ao final da sedimentação (tempo variável para cada coagulante), foi verificado o pH e a turbidez remanescente do efluente tratado

Nessa etapa, foi determinado o melhor coagulante dentre os testados. Para tanto o melhor coagulante foi aquele que, com a menor dose aplicada, obteve a menor turbidez remanescente no efluente tratado. Posteriormente foram realizados novos ensaios como descritos no item a seguir (Etapa 2).

**Etapa 2** - Otimização e avaliação do coagulante que obteve o melhor desempenho

De posse dos resultados preliminares, foi iniciado o estudo de otimização e avaliação com o coagulante que obteve o melhor desempenho. A fim de conhecer a condição ideal de dose e minimizar os gastos de reagente foi realizada uma diluição do coagulante em dez vezes. As doses aplicadas (mL) foram de 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2 e 1. O procedimento experimental para essa segunda etapa foi, exatamente, o mesmo da Etapa 1.

## **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Otimização dos coagulantes para a redução da turbidez

O coagulante Salfer aplicado demonstrou, nos parâmetros de monitoramento utilizados, uma redução brusca nos valores de pH do efluente e uma ineficiência na remoção da turbidez, com aplicações de doses em baixas concentrações. A Tabela 1 apresenta os principais resultados alcançados com esse coagulante.

Dosagem (mL)	Turbidez inicial (uT)	pH inicial	pH final	Turbidez após 3 min de teste (uT)	Turbidez após 5min de teste (uT)
1	828	7,66	2,65	872	872
3	828	7,66	2,61	877	877

Tabela 1 – Valores de doses do coagulante Salfer, e os valores de turbidez (inicial/final) e valores de pH (inicial/final)

Pelos valores de turbidez apresentados na Tabela 1, é possível observar que, ao aplicar as menores doses do coagulante Salfer, não houve grandes reduções da turbidez do efluente real. Foram testadas, inicialmente, as menores doses de cada coagulante, pois um dos objetivos do trabalho é otimizar a aplicação dos coagulantes com o menor custo. Com tais resultados, esse coagulante não foi para a segunda etapa do trabalho.

O coagulante Werdyal, mesmo em baixas concentrações, conseguiu desestabilizar as partículas sólidas em suspensão reduzindo a turbidez remanescente do efluente real, porém a sua eficiência foi mediana (~50%). Os resultados desse coagulante estão apresentados na Tabela 2 abaixo.

Dosagem (mL)	Turbidez inicial (uT)	pH inicial	pH final	Turbidez após 3min de teste (uT)	Turbidez após 5min de teste (uT)
1	828	7,66	4,72	645	544
3	828	7,66	3,87	641	465

Tabela 2 – Valores de dosagens do coagulante Werdyal, turbidez inicial/final e pH inicial/final

Pelos resultados apresentados na Tabela 2 é possível concluir que o coagulante Werdyal foi mais eficiente do que o Salfer em termos de turbidez remanescente. Entretanto os valores de turbidez final (~500 uT) ainda são considerados elevados (CONAMA 430). Além dessa eficiência moderada de remoção de turbidez (~ 50%), ao aplicar o Werdyal, foi observada uma grande redução do pH de coagulação. Dessa forma, se tal coagulante fosse aplicado em escala real seria necessária a implementação de uma etapa de correção de pH, o que iria agregar mais custos ao tratamento.

Já os resultados obtidos da aplicação do coagulante PAC estão apresentados na Tabela 3 a seguir.

Dosagem (mL)	Turbidez inicial (uT)	pH inicial	pH final	Turbidez após 3min de teste (uT)	Turbidez após 5min de teste (uT)
1	828	7,66	5,8	19,2	14,8
3	828	7,66	5,1	15,7	11,1

Tabela 3 – Valores de dosagens do coagulante PAC, turbidez inicial/final e valores de pH inicial/final

Observando os valores de turbidez remanescente após o tratamento com o PAC (Tabela 3), é possível perceber que, aplicando pequenas doses do PAC, foram alcançadas elevadas eficiências de remoção de turbidez (> 90%). Por esse motivo e pela menor variação do pH de coagulação entre os coagulantes testados, o PAC foi considerado, nessa etapa, como o melhor coagulante e, dessa forma, o tratamento por clarificação foi otimizado para esse coagulante.

Otimização e avaliação do coagulante que obteve o melhor desempenho

A segunda etapa dos ensaios experimentais foi a otimização do uso do PAC buscando sua maximização nas eficiências de remoção de turbidez e minimização dos custos de aplicação. Para isso, o primeiro procedimento foi diluir o coagulante em dez vezes e em seguida, realizados os ensaios, variando as dosagens de 1 a 9 mL.

A Figura 2 apresenta os resultados obtidos quando aplicadas as doses de 1 a 5 mL do PAC (respectivamente jarro 1 ao 5). Apenas para comparação, foi refeito um ensaio com o Werdyal (diluído 10 vezes) com a dose de 3 mL (Jarro 6 da Figura 2).

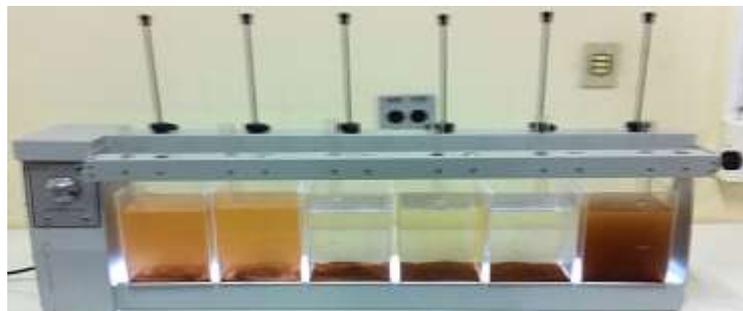


Figura 02 – Resultado de coagulação após três minutos e trinta segundos com o PAC

Vale ressaltar que os resultados da caracterização do efluente bruto demonstram uma turbidez inicial próxima de 800 uT e pH inicial de 7,66. Nos ensaios de otimização do PAC foi utilizando o efluente real nessas condições reais.

Analisando a Figura 02 é possível perceber que por meio das menores doses do PAC (1 e 2 mL) a turbidez remanescente permaneceu elevada cujos valores foram de 149 e 102 uT, respectivamente (Jarro 1 e 2 da Figura 02). Porém elevando a dose aplicada para 3, 4 e 5 mL, a turbidez remanescente tornou-se bem reduzida, demonstrando elevada eficiência desse coagulante na remoção das partículas em suspensão.

A menor dose que atendeu as exigências dos ensaios experimentais foi a de 3mL, pelo fato de ter ocorrido uma boa formação dos flocos, acarretando uma boa sedimentação e, conseqüentemente, uma devida clarificação do efluente real em um tempo baixo, inferior a 3 minutos.

A turbidez final da amostra com 3 mL de PAC foi de 31,4uT (Jarro 3 da Figura 02). Os valores inicial e final de turbidez e pH das dosagens 1, 2, 3, 4 e 5mL de PAC estão todos apresentados na Tabela 4.

Dosagem (mL)	pH de coagulação	Turbidez após 3min de teste (uT)	Turbidez após 5min de teste (uT)
1	7,1	677	149
2	6,9	395	102
3	6,1	33,8	31,4
4	5,7	29,8	24,3
5	5,1	27,7	22,8

Tabela 4 – Variação de doses do PAC aplicado, pH de coagulação e turbidez remanescente nos diferentes tempos de sedimentação (Turbidez inicial ~ 828 uT e pH inicial ~ 7,6)

Por meio dos resultados de turbidez remanescente obtidos para cada coagulante em função das distintas doses aplicadas, foi possível construir um gráfico comparativo entre os três coagulantes testados. Tais resultados estão compilados na Figura 03.

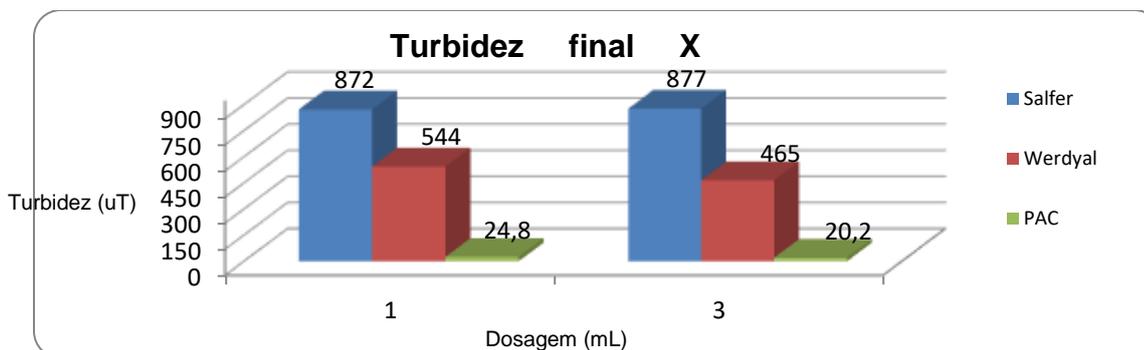


Figura 03: Relação de turbidez remanescente versus menores dosagens aplicadas dos três coagulantes testados

Analisando a Figura 03, é possível perceber que dentre os três coagulantes testados o PAC destaca-se em função da sua elevada eficiência de remoção de material em suspensão (Turbidez). Além desse fator, o menor tempo de sedimentação alcançado pela aplicação do PAC tornou esse coagulante o mais eficiente para o efluente real testado.

## CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou que dentre os coagulantes testados no tratamento por clarificação o PAC obteve a melhor eficiência na remoção de turbidez para esse efluente real de mineração estudado. A otimização desse coagulante alcançou a dose de 0,15 mL/L para tratar um efluente real cuja turbidez inicial aproxima de ~800 uT. Nesse cenário, a aplicação do PAC proporcionou uma turbidez remanescente de ~ 20 uT (90% de eficiência de remoção), a qual respeita o padrão de lançamento da CONAMA 430 em vigência. Considerando o custo do PAC entorno de R\$ 1750,00/Ton., o tratamento mensal de 14400 m<sup>3</sup> de efluentes dessa mineradora (valor médio mensal de descarte) terá um custo com o PAC de R\$ 4.900,00 mensais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – **Projeto de Estação de Tratamento de Águas para Abastecimento Público**, NBR 12216, Rio de Janeiro: ABNT 1992.

CONAMA - **Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011.** Disponível

<<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res4305.pdf>>. Acesso em 10/11/13.

LEWIN J, MACKLIN MG. 1987. **Metal mining and floodplain sedimentation in Britain**. In: V. Gardiner (ed.). First International Conference on Geomorphology. Chichester, Wiley, 1009-1027.

LIMA, D. R. S. **Remoção de fármacos e desreguladores endócrinos de águas naturais por clarificação associada à adsorção em carvão ativado em pó**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água**. 3ª Edição. São Paulo: Editora Átomo. 2010. 494 p.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3ª Edição. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental: Universidade Federal de Minas Gerais. 2005.

ZOUBOULIS, A.; TRASKAS, G. & SAMARAS, P. **Comparison of Efficiency between Poly-aluminium Chloride and Aluminium Sulphate Coagulants during Full-scale Experiments in a Drinking Water Treatment Plant, Separation. Science and Technology**, v. 43, N. 6, p. 1507 - 1519, 2008.