

CLARIFICAÇÃO DE ÁGUAS PLUVIAIS NA CAVA DA MINA DE FÁBRICA NOVA¹

*Juliano Alves dos Reis²
Bráulio Silva Guimarães³
José Luciano Fortes⁴*

Resumo

Durante o período chuvoso, que se estende geralmente de outubro a fevereiro, a cava da mina de Fábrica Nova recebe um grande volume afluyente de águas pluviais. Enquanto escoam pelos taludes e acessos da mina, esta água carrega uma grande quantidade de sólidos durante seu trajeto até o fundo da cava, adquirindo conseqüentemente, uma elevada turbidez. Para a continuidade das atividades de lavra, é necessário o esgotamento desta água por meio de bombeamento. Antes de lançar a água bombeada nos cursos d'água naturais, é necessário tratá-la, devolvendo-lhe características físico-químicas dentro dos padrões estabelecidos pela norma Conama 357. Durante este processo, a água bombeada passa por um sistema de tratamento, constituído basicamente de floculação e sedimentação, onde ocorre sua clarificação. Após passar por este sistema, amostras da água coletadas apresentaram um elevado índice de redução da turbidez inicial, atendendo os padrões estabelecidos pela legislação.

Palavras-chave: Qualidade da água; Turbidez; Floculação.

CLARIFICATION OF SURFACE WATER AT FÁBRICA NOVA'S MINE TRENCH

Abstract

During the rainy period, which stretches out generally from October to February, the trench of Fábrica Nova mine receives a great tributary amount of surface waters. While it drains for mine slopes and accesses, this water carries great amounts of solids particles during its course to the bottom pit, acquiring consequently, elevated turbidity characteristic. For continuity of exploitation activities, it is necessary to drain the water by pumping. Before launch the pumped water on natural water courses, it is necessary to treat it, restoring its physical chemical characteristics according to standards established by norm Conama 357. During this process, the pumped water passes by a treatment system, consisting basically on flocculation and sedimentation, where the clarification process occurs. After pass by the treatment system, collected samples of water, had presented a high index of reduction on its initial turbidity, attending the standards established for the legislation.

Key words: Water quality; Turbidity; Flocculation.

¹ *Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

² *Engenheiro de Minas, Vale S.A.*

³ *Tecnólogo em Meio Ambiente e Técnico em Mineração, Vale S.A.*

⁴ *Técnico em Mineração, Vale S.A.*

1 INTRODUÇÃO

1.1 Aspectos Gerais

A importância dos sistemas de separação sólido-líquido nas atividades de mineração tem crescido rapidamente, seja nos processos de concentração, ou para o tratamento de efluentes industriais antes de lançá-los no meio ambiente.

A técnica normalmente utilizada para o tratamento de efluentes é a sedimentação por gravidade (espessamento e clarificação), uma vez que esta técnica é muito eficiente em situações onde existe uma grande diferença entre as densidades do líquido e das partículas, situação típica na grande maioria dos processos minerais onde o líquido é usualmente a água.

Os minerais na faixa granulométrica fina costumam responder mal aos processos usuais de separação sólido/líquido. Para que a separação das duas fases seja satisfatória, se torna necessário que a polpa passe por um processo de coagulação e floculação.

1.2 Área de Influência do Trabalho

O processo de clarificação objeto deste trabalho foi realizado na mina de Fábrica Nova, que é a maior das quatro minas que compõem o Complexo Minerador de Mariana, além das minas de Alegria, Fazendão e Timbopeba, todas de propriedade da empresa Vale S.A.

O Complexo Minerador de Mariana está situado na região sudeste de Minas Gerais nos municípios de Ouro Preto, Mariana e Catas Altas. Suas quatro unidades têm capacidade anual de produção anual de 40,9 milhões de toneladas de minério de ferro e reservas estimadas em mais de 7 bilhões de toneladas. Os principais produtos são o Sinter Feed, o Pellet Feed e os Granulados, que chegam até os clientes por meio da Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM) e do porto de Tubarão.

As coordenadas geográficas da Mina de Fábrica Nova são 20° 13' 00" a 20° 14' 00" de latitude sul e 43° 27' 00" a 43° 28' 00" de longitude oeste.

1.3 Aspectos Teóricos dos Processos de Coagulação e Floculação

As águas, em geral, podem conter uma grande variedade de impurezas suspensas, destacando-se entre elas as partículas coloidais de substâncias orgânicas, inorgânicas e as substâncias húmicas. Estas impurezas, dependendo da sua natureza e das características físico-químicas da água, apresentam carga superficial de caráter predominantemente positivo ou negativo. Portanto, a repulsão eletrostática entre as mesmas impede que elas se aproximem e faz com que permaneçam em suspensão e com velocidades de sedimentação baixíssimas.

A qualidade das águas de turbidez elevada é melhorada pelo aumento da velocidade de sedimentação das partículas em suspensão, num procedimento denominado desestabilização da dispersão. Este procedimento se baseia na redução da carga superficial característica do sistema disperso água-partícula sólida pela adição de reagentes denominados coagulantes e floculantes.⁽¹⁾

1.3.1 Coagulação

A coagulação ocorre quando partículas extremamente finas se aderem diretamente umas as outras através de forças de atração mútua denominadas London-van der Waals⁽²⁾ e tem por objetivo aglomerar as impurezas que se encontram em suspensões finas, em estado coloidal ou dissolvidas, em partículas maiores que possam ser removidas por decantação ou filtração.

A adesão ocasionada por essas forças não é possível quando as partículas se encontram envolvidas por uma atmosfera eletricamente carregada que, usualmente, acarreta uma repulsão entre partículas que se aproximam umas das outras. A agregação das partículas irá, portanto, depender do balanço entre as forças de atração e de repulsão eletrostáticas presentes na interface sólido-líquido.

Para que ocorra a neutralização das cargas, são adicionadas substâncias denominadas coagulantes, que são eletrólitos com cargas opostas às das superfícies das partículas e, provocam sua neutralização, levando as partículas ao contato umas com as outras e a sua adesão em função das forças de atração moleculares.

1.3.2 Floculação

A floculação consiste na formação de aglomerados muito mais abertos que os obtidos a partir da coagulação e depende da utilização de moléculas de reagentes que agem como pontes entre partículas separadas na suspensão. Os reagentes utilizados para formar essas pontes são polímeros orgânicos de cadeia longa que podem ser naturais, tais como, amido, goma e gelatina, ou sintéticos, denominados polieletrólitos.

Para cada tamanho de partícula existe um peso molecular mínimo, a partir do qual a floculação é possível. Esse peso molecular mínimo aumenta com o tamanho da partícula, que também interfere na quantidade de floculante a ser usada. Uma vez que partículas ultrafinas apresentam maior área superficial total a ser coberta pelas moléculas do polímero, em sistemas com essa característica, deve ser usada uma concentração maior de floculante.

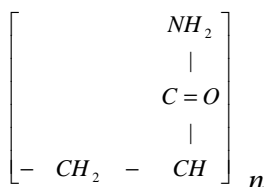
1.3.3 Polímeros sintéticos

Um polímero é uma macromolécula formada por vários segmentos unitários, denominados monômeros. Em sua composição, podem haver monômeros iguais ou diferentes entre si, resultando na formação de homopolímeros ou copolímeros, respectivamente.

Embora sejam mais caros, os polímeros sintéticos apresentam uma série de vantagens em relação aos polímeros naturais, sendo solúveis em água e, usualmente, de peso molecular elevado.

Os mais importantes polímeros sintéticos para a indústria mineral são as poli(acrilamidas) (PAM) e o poli(óxido)etileno (POE).

As poli(acrilamidas) são largamente utilizadas como floculantes e são produzidas numa grande variedade de pesos moleculares. A densidade de carga está associada à percentagem dos segmentos do monômero acrílico que carregam a carga. Por exemplo, se o polímero não é carregado ele compreende um número n de segmentos similares do monômero acrílico. O polímero é então um homopolímero-poli(acrilamida):



O poli(óxido)etileno é um polímero neutro, que adsorve-se por meio de pontes de hidrogênio e interações hidrofóbicas. Comercialmente, pode ser encontrado com diferentes tamanhos de molécula.

A fórmula do poli(óxido)etileno é apresentada a seguir:



O mecanismo de ação das poliacrilamidas consiste na adsorção de um seguimento ativo da cadeia de hidrocarbonetos na superfície de uma partícula, deixando livre o restante desses seguimentos da molécula, para serem adsorvidos em outras partículas, formando pontes entre elas, conforme mostrado na Figura 2, onde é mostrada somente uma ligação entre partículas, mas na prática o que se verifica é que são formadas muitas pontes entre partículas, mantendo-as juntas. Os fatores que influenciam o grau de floculação são a eficiência ou a força da adsorção do polímero na interface e o nível de agitação durante o processo de floculação.

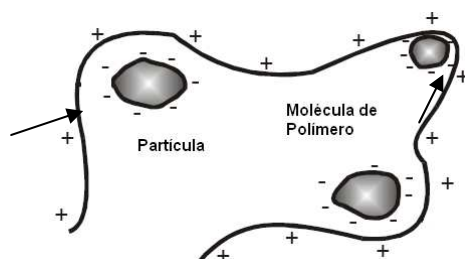


Figura 1. Mecanismo de formação do floculo.⁽²⁾

1.4 Mecanismos de Adsorção dos Floculantes

Os mecanismos de adsorção dos polímeros na superfície mineral podem envolver as ligações de hidrogênio, interações hidrofóbicas e eletrostáticas, ligações químicas e coordenadas.

As ligações de hidrogênio constituem o principal mecanismo de adsorção dos polímeros não iônicos em superfícies hidrolíticas. O átomo de hidrogênio é polarizado positivamente podendo interagir com átomos vizinhos eletronegativos promovendo a ligação. Em uma molécula de poliacrilamida, as ligações de hidrogênio podem ser promovidas através da interação do grupo funcional carbonila (C = O) com sítios eletropositivos da superfície mineral ou do grupamento amida (NH₂) em sítios eletronegativos.

As ligações de hidrogênio são consideradas individualmente frágeis (10 kJ.mol⁻¹ - 40 kJ.mol⁻¹), quando comparadas com as ligações covalentes (cerca de 500 kJ.mol⁻¹), entretanto, a adsorção simultânea dos grupos funcionais na superfície das partículas, se torna praticamente irreversível.

A adsorção pode também ocorrer por meio de interações hidrofóbicas da cadeia hidrocarbônica do polímero. Isso somente é possível nos casos em que a superfície da partícula é naturalmente hidrofóbica ou foi hidrofobizada. Quando a



superfície mineral e o polímero apresentam cargas contrárias, ocorrem as interações eletrostáticas, que são a principal forma de adsorção dos floculantes catiônicos. A adsorção pode ainda ocorrer através das ligações químicas entre grupos ativos da molécula do polímero e sítios metálicos disponíveis na superfície do mineral, formando compostos insolúveis por meio de ligações covalentes ou iônicas.

Finalmente quando a adsorção dos polímeros acarreta a formação de complexos ou quelatos, o mecanismo de adsorção envolvido é o das ligações coordenadas.

1.5 Mecanismos de Floculação

Os flocos são formados através de dois mecanismos principais: a floculação por pontes (*bridging flocculation*) e a floculação por reversão localizada de carga (*patch flocculation*).

A floculação por pontes ocorre quando são utilizados polímeros de elevado peso molecular, não iônicos, ou com carga elétrica de mesmo sinal da superfície mineral. Observa-se que somente uma parte da molécula interage diretamente com o sólido. O restante da cadeia polimérica estende-se em forma de braços possibilitando o contato e adsorção em outras partículas. Quando o polímero e a partícula possuem cargas opostas, as atrações eletrostáticas são muitas vezes, a base da interação. Em alguns casos, outras interações podem ser mais significativas que a atração eletrostática, são elas: pontes de hidrogênio e forças de van der Waals.⁽³⁾ Assim, os flocos formados podem se unir a outros, formando agregados maiores, que podem conter centenas ou mesmos milhares de partículas individuais.

A floculação por reversão localizada de carga ocorre quando um polímero com peso molecular médio ou baixo, de carga elétrica oposta à da superfície da partícula, se espalha sobre o sólido, revertendo a carga elétrica da superfície nas regiões de adsorção. Nesse caso a superfície passa a apresentar uma distribuição heterogênea de cargas, com áreas positivas e outras negativas, fazendo com que a colisão entre áreas com cargas opostas de duas partículas origine a formação do floc.

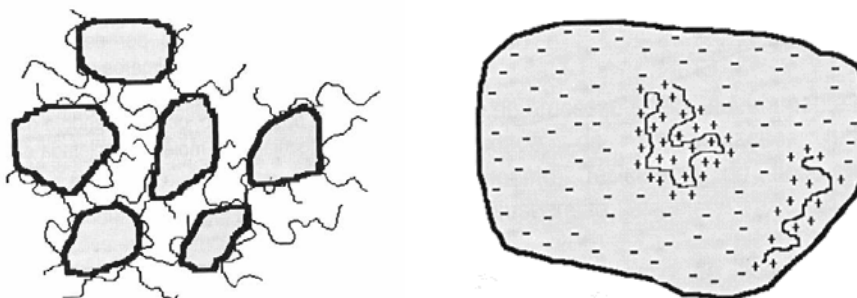


Figura 2. À esquerda, representação do mecanismo de floculação por pontes e à direita, representação do mecanismo de floculação por reversão localizada de carga.⁽²⁾

Os flocos produzidos a partir da floculação por pontes são grandes, flexíveis, tem forma helicoidal e retém bastante água em seu interior. Embora a presença de água no flocos acarrete uma redução na sua densidade média, a velocidade de sedimentação é elevada, devido ao tamanho do flocos. Nesse tipo de mecanismo, o crescimento dos flocos é um processo rápido

Os flocos formados através do mecanismo de floculação por reversão localizada de carga têm crescimento lento e apresentam formas esféricas e uniformidade de tamanho. Além disso, são pequenos, compactos, rígidos, densos e permeáveis.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Equipamentos Utilizados

Os equipamentos utilizados no bombeamento da água para o sistema de clarificação, são basicamente os mesmos utilizados em qualquer sistema de bombeamento, como bombas, tubulações, registros e painéis elétricos. Os produtos químicos utilizados no processo são a cal hidratada e o WD 15[®], discriminados a seguir:

A *cal hidratada* ou *hidróxido de cálcio* é uma substância da família das bases fortes, cuja fórmula química é $\text{Ca}(\text{OH})_2$. É uma substância cáustica que provoca a elevação da alcalinidade nos cursos de água. A cal hidratada, quando derramada, produz material em suspensão.⁽⁴⁾ Suas propriedades físico-químicas são:

Estado Físico: Sólido, Forma: Pó, Cor: Branca, Odor: Inodoro, pH: 12,5, Densidade: 0,5 g/cm³, Solubilidade em água: 0,125 g/100 g de água a 10°C.

WD 15[®] é o nome comercial do floculante utilizado no processo de clarificação. É um polímero floculante, não iônico, em emulsão de alto peso molecular, que pode ser usado em qualquer processo de floculação de partículas onde se deseja realizar separação de sólidos e líquidos no tratamento de águas. WD 15[®] proporciona a formação de flocos grandes e densos, o que permite uma sedimentação rápida e completa. É ecologicamente correto, pois é completamente solúvel em água e não deixa resíduos no meio ambiente.⁽⁵⁾

Suas propriedades físico-químicas são: Estado Físico: Líquido, Odor: Inodoro, pH: 6.8 – 7.2, Aspecto: Emulsão líquida transparente.

2.2 Etapas do Processo

2.2.1 Representação esquemática do processo

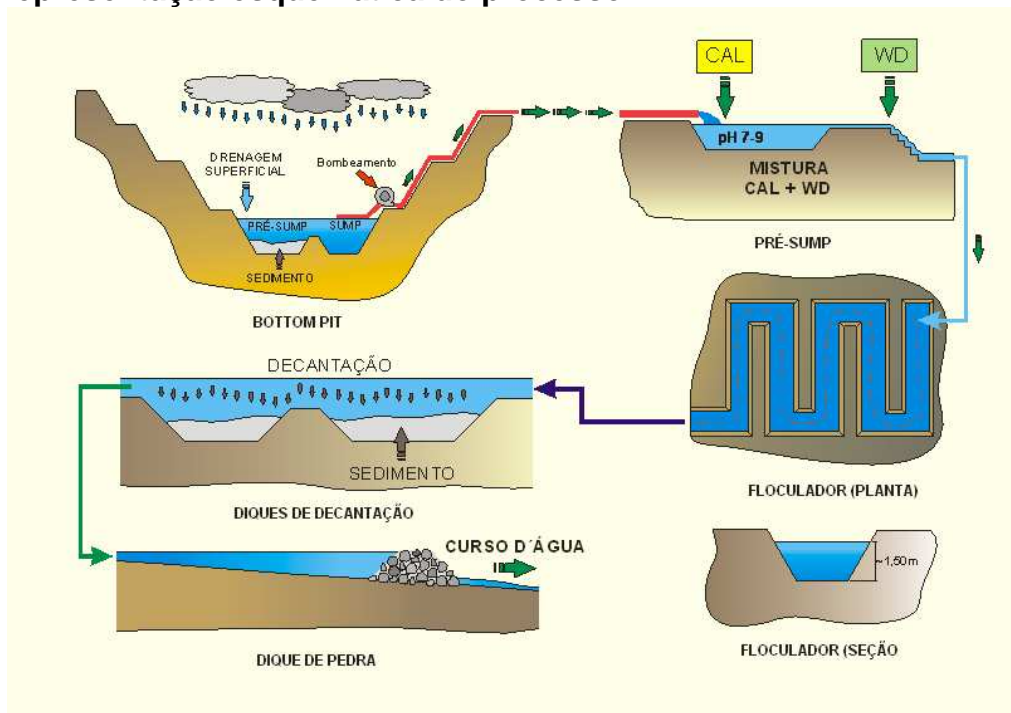


Figura 3. Representação esquemática do processo de clarificação.

2.2.2 Descrição do processo

O processo de clarificação se inicia com o bombeamento da água acumulada no bottom pit da mina para a área destinada ao processo de clarificação, elevando a água da cota 850 (bottom Pit) até a cota 970 (sistema de clarificação).

O sistema de bombeamento é dividido em 2 etapas, sendo a primeira composta por quatro bombas submersíveis, montadas em flutuadores individuais no bottom pit da cava. Cada bomba tem a potência de 140 cv e vazão de 378 m³/h. As tubulações de recalque destas bombas têm diâmetro de 8" e elevam a água até uma plataforma intermediária, montada na cota 910, onde é instalada uma bomba horizontal centrífuga, com potência de 350 cv e vazão de 1600 m³/h, com tubulação de recalque de 12" de diâmetro, responsável por vencer o desnível até a cota 970, onde a água é descarregada no pré-sump para o início de seu tratamento.



Figura 4. Sistema de bombeamento.

No pré-sump, que tem um volume de 32 m³ e recebe em média a descarga de 1.500 m³/h de água bombeada, inicia-se o tratamento da mesma, que recebe uma adição de 60 kg de cal diluídos em 1.000 litros de água por hora. A adição da cal tem o objetivo de elevar o pH da água, que ao ser descarregada no pré-sump, possui valor médio de 3,99. O pH da água após a adição da cal possui valor médio de 7,82, considerado ótimo para a continuidade do processo, uma vez que para valores de pH entre 7 e 9, inicia-se a desestabilização da suspensão e a atuação do floculante WD 15[®] é otimizada.



Figura 5. Descarga da água bombeada no pré-sump e adição da cal.

Na sequência, a água homogeneizada com a cal verte por um extravasor na saída do pré-sump, onde recebe a adição do floculante WD 15[®]. A adição é feita através de uma flauta, montada sobre o extravasor, que efetua a dosagem de 84 litros por hora do floculante diluído em água numa proporção de 50% em volume.



Figura 6. Extravassor do pré-sump e adição do DW 15 pela flauta.

A água então cai por uma cascata de aproximadamente 3 m de altura antes de entrar no floculador. O objetivo da cascata é criar uma zona de turbilhonamento e promover a homogeneização do WD 15[®] com a água. O floculador é uma estrutura construída com pedras de mão, arranjadas em forma de curvas em “S”, denominadas chicanas, com 165 m de comprimento, responsável por reduzir a velocidade do fluxo para 0,18 m/s e aumentar o potencial de decantação dos sólidos presentes. Assim, a floculação é realizada de forma controlada, possibilitando um melhor desempenho do sistema de decantação.



Figura 7. Floculador em forma de curvas em “S”.

Ao sair do floculador, a água entra na câmara de floculação, composta por 3 diques em sequencia, com volume de 6.000 m³ cada, onde ocorre o processo de decantação dos sedimentos.



Figura 8. Câmara de floculação.

Ao sair pelo vertedouro do último dique, chamado dique de pedra, a água já clarificada segue então por gravidade o sentido da drenagem natural e afluí para o córrego do Ouro Fino no distrito de Bento Rodrigues, que por sua vez é afluente do rio Gualaxo do Norte, pertencente à bacia hidrográfica do Rio Doce.



Figura 9. Amostras de água coletadas na sequência do processo de clarificação: 1ª antes do tratamento, 2ª no dique 01, 3ª no dique 02 e 4ª no dique de pedra.

3 RESULTADOS

De acordo com a resolução Conama 357,⁽⁶⁾ que dispõe sobre a classificação dos corpos d'água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, E estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, tem-se os seguintes limites estabelecidos para pH e Turbidez:

Tabela 1. Valores de referência para pH e Turbidez⁽⁶⁾

Valores Máximos permitidos (Conama 357)		
Corpo Receptor	pH	Turbidez
Classe I	6,0 - 9,0	40 NTU
Classe II	6,0 - 9,0	100 NTU

Após passar pelo processo de clarificação, a água acumulada na cava da Mina de Fábrica Nova, apresentou os seguintes valores para pH e Turbidez:



Tabela 2. Valores de pH e Turbidez da água da mina de Fábrica Nova, 2008

<i>Local</i>	<i>pH</i>	<i>Turbidez (NTU)</i>
Fundo da Cava	3,99	1000*
Pré-Sump (Após aplicação da cal)	7,82	1000*
Entrada do Floculador (Após aplicação do WD 15 [®])	9,04	1000*
Dique 1	8,59	391,35
Dique de pedra (Último dique dentro da mina)	7,49	65,05
Córrego do Ouro Fino	7,83	18

* O valor máximo de calibração do turbidímetro utilizado nas medições era de 1000 NTU

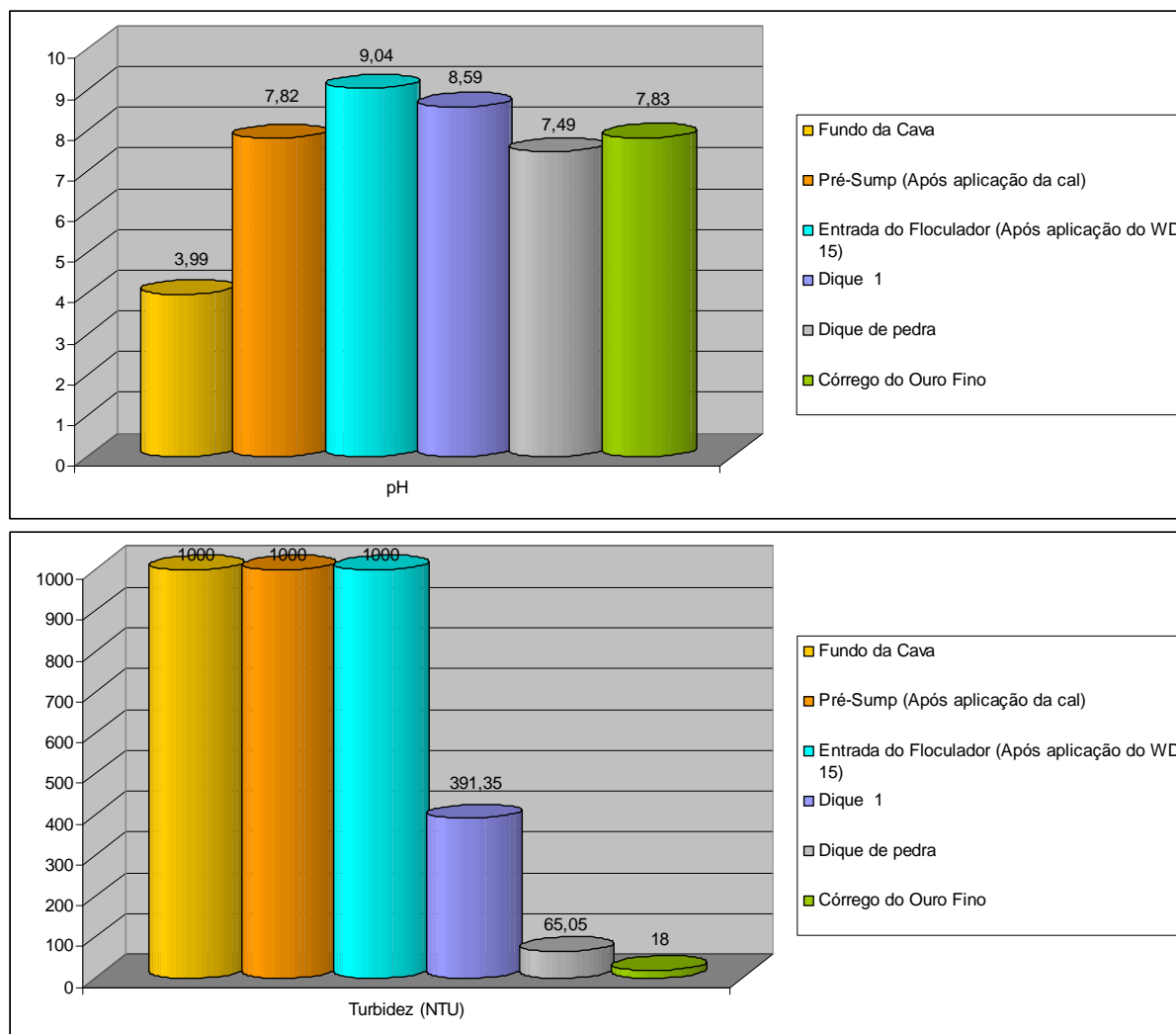


Figura 10. Gráficos dos valores de pH e Turbidez respectivamente durante o processo de clarificação.

4 DISCUSSÃO

Existem vários processos de clarificação de águas utilizados para diferentes finalidades, mas basicamente, todos eles se constituem de coagulação/floculação e sedimentação.

Os coagulantes químicos mais utilizados no tratamento de água são os sais de alumínio, em virtude de sua eficácia e baixo preço. Entre eles, o $Al_2(SO_4)_3$ (alúmen), o WAC (Cloro-sulfato de alumínio parcialmente hidrolisado) e o PAC (policloreto básico de alumínio) são os mais amplamente utilizados.⁽⁷⁾ Entretanto, o

emprego de compostos de alumínio no tratamento de água aumenta a concentração de alumínio no produto final e este fato é altamente questionável, em virtude dos efeitos tóxicos potenciais do alumínio.⁽⁸⁾

Uma alternativa ambientalmente segura testada nos processos de clarificação de águas de mineração foi o processo de coagulação utilizando extratos aquosos de *Moringa Oleífera*, que obteve grande eficácia em testes de bancada, porém ainda não se tem conhecimento da utilização deste produto em escala industrial.

O diferencial apresentado neste trabalho, foi a eliminação de um agente coagulante no processo, uma vez que, a adição da cal para elevação do pH da água já é suficiente para desestabilização da suspensão e formação de pequenos flocos, onde a atuação do WD 15[®] se mostrou altamente eficiente.

Até o ano de 2007, o processo de sedimentação e clarificação da água da cava da mina de Fábrica Nova era feito na própria cava, antes do bombeamento, pois até então, a cava tinha uma área de captação de chuvas pequena e o volume de produção de minério era pequeno se comparado aos dias atuais,

Estes fatos aliados, permitiam que a água fosse tratada apenas com a cal, já que dispúnhamos de um grande tempo de residência da água no fundo da cava antes de ser bombeada, que é a condição necessária para a sedimentação dos sólidos utilizando apenas a cal.

A partir do ano de 2008, houve a necessidade de esgotamento da água da cava imediatamente após o término do período chuvoso, não permitindo o tempo de residência necessário para atuação apenas da cal no processo de clarificação, por isso foi adotado o uso do WD 15[®] como floculante auxiliar no processo e construído todo o sistema descrito no corpo do trabalho, que se mostrou muito eficiente.

5 CONCLUSÃO

O índice de turbidez inicial da água antes de ser tratada era superior a 1.000 NTU conforme mostrado em resultados. Após passar pelo processo de clarificação, foi atingido um índice médio de turbidez de 65,05 NTU (93,49% de redução da turbidez inicial) no Dique de Pedra, que é o último dique dentro dos limites da mina e média de apenas 18 NTU (98,2% de redução da turbidez inicial) no córrego do Ouro Fino, para onde a água aflui após sair da mina.

O pH da água, que antes do tratamento tinha valor médio de 3,99, teve seu valor elevado após o tratamento para valores médios de 7,49 no Dique de Pedra e 7,89 no Córrego do Ouro Fino.

Conclui-se, portanto, que o método utilizado na clarificação foi eficiente e atendeu os objetivos do trabalho, que são adequar os índices de pH e turbidez da água descartada no meio ambiente aos índices exigidos pela legislação vigente, mantendo o compromisso da empresa de realizar suas atividades em harmonia com o meio ambiente

Agradecimentos

Agradeço ao gerente de Infra Estrutura do Complexo Mariana, Marcello Crispi pelo incentivo na elaboração do trabalho, a toda equipe da Gerência de Infra Estrutura do Complexo Mariana pelo apoio na elaboração técnica do trabalho, especialmente Bráulio Guimarães, José Luciano e Evanderson Santos, a Antônio Delfonso e a equipe do CPT de Alegria pelas informações teóricas, a Antônio Costa

Neto e Milton filho pelas informações referente à hidrologia e a todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 CARVALHO, Renalda Monteiro. Clarificação de águas pluviais ricas em óxidos de ferro acumuladas em cava de mineração através da utilização de um coagulante natural, a *Moringa Oleífera*. Dissertação de mestrado. DEGEO/EM/UFOP Ouro Preto, MG, 2005. p. 4.
- 2 OLIVEIRA, Maria Lúcia Magalhães; LUZ, José Aurélio Medeiros. Curso de espessamento e filtragem. EM/UFOP. Ouro Preto, MG, 2007. p. 14.
- 3 BRANDÃO, Lydia Armond Muzzi Pierantoni. Melhoria da qualidade da água em bacia de decantação de uma mina de ferro – S.A. Mineração Trindade – Samitri. Dissertação de mestrado. DEGEO/EM/UFOP. Ouro Preto, MG, 2001. p.112
- 4 ICAL Indústria de Calcinação. Boletim Técnico sobre a cal hidratada. São José da Lapa, MG, 2002. p. 1.
- 5 WERDYAL Tratamento Ambiental. Boletim Técnico sobre o floculante WD 15[®]. Betim, MG, 2007. p. 1.
- 6 CONAMA, 2005. Resolução Conama 357 de 17 de março de 2005. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/conama>>. Acesso em 10. Mai. 2009.
- 7 MASON, A. 1993. Chimie Coloïdalle dès Complexes de l'Aluminium III Partiellement Hydrolysés. Institut National Polytechnique de Lorraine, France. Tese de Doutorado.
- 8 GUEDES, Claudia Dumans. Coagulação/Floculação de águas superficiais de minerações de ferro com turbidez elevada. Tese de Doutorado. DEGEO/EM/UFOP. Ouro Preto, MG, 2004. p. 45.