

# Incremento da eficiência no tratamento e disposição de resíduos sólidos e líquidos de mineração, por meio do uso de polímeros inorgânicos

Michel Moreira Morandi Fontes

Diretor, Fonntes Geotecnica, Belo Horizonte, Brasil, michel@fonntesgeotecnica.com

Rafael Freitas Rodrigues

Engenheiro Sanitarista e Ambiental/Geotécnico, Fonntes Geotecnica, Belo Horizonte, Brasil, rafael.rodrigues@fonntesgeotecnica.com

Felipe Cavalcante

Engenheiro civil, Fonntes Geotecnica, Belo Horizonte, Brasil, felipe.cavalcante@fonntesgeotecnica.com

**RESUMO:** O grande desafio da indústria/mineração, consiste em estabelecer processos eficientes de gestão/disposição de resíduos (líquidos e sólidos). A cada dia maiores volumes de resíduos são demandados pelas plantas de beneficiamento, todavia, na contramão da escassez de áreas e restrições legais impostas aos sistemas convencionais (pilhas, barragens etc.). Ainda, torna-se mais latente a necessidade reaproveitamento e recirculação de água nas plantas. Logo, o presente artigo aborda a utilização de polímeros inorgânicos HPF (*high performance flocculant*) e HPA (*high performance agglomerant*) em tratamentos de efluentes e resíduos como forma de otimização dos processos de transporte e disposição de resíduos. Ambos os produtos têm por composição básica cinzas vulcânicas, alumina e sílica, que promovem uma aceleração do processo de decantação e absorção de água em resíduos sem modificar características químicas dos efluentes/resíduos tratados. Como diferencial tais produtos oferecem a facilidade de aplicação, adaptada ao processo existente sem riscos de efeitos adversos relacionados a superdosagem. Para aprofundar no tema, foram realizados ensaios de laboratório para comprovar a eficiência dos materiais sugeridos. Os resultados deste trabalho demonstram que o uso dos polímeros em distintas etapas dos processos de beneficiamento mineral, levam a um aumento da eficiência com possibilidades reais de redução de custos operacionais na mineração.

**PALAVRAS-CHAVE:** Disposição de resíduos, polímeros inorgânicos, cinzas vulcânicas.

**ABSTRACT:** One of the great challenges of the industry/mining is to establish efficient waste management/disposal processes (liquid and solid). Every day there are greater volumes of waste required by processing plants, nowadays, contrary to the scarcity of areas and legal restrictions imposed on conventional systems (piles, dams, etc.). Added to this, the need for reusing and recirculating water in plants becomes more evident. Therefore, this article addresses the use of inorganic polymers HPF (*high performance flocculant*) and HPA (*high performance agglomerant*) in effluent and waste treatments as a way of optimizing transport and waste exclusion processes. Both products have a basic composition of volcanic ash, alumina and silica, which promote an improvement in the decantation process and water absorption in waste without, however, modifying the chemical characteristics of the effluents or treated waste. As a difference, these products offer ease of application, adapted to the existing process without the risk of adverse effects related to overdose. To delve deeper into the subject, laboratory tests were carried out to prove the efficiency of the suggested materials. The results of this work show that the use of polymers in different stages of the mineral processing process leads to an increase in efficiency with real possibilities for reducing operating costs in mining.

**KEYWORDS:** Waste disposal, inorganic polymers, volcanic ash

## 1 INTRODUÇÃO

No cenário atual da mineração tem se desenvolvido novos estudos e pesquisas acerca da utilização de novas técnicas e produtos que possam ser inseridos nas linhas do processo de beneficiamento de minério que auxiliem no incremento da eficiência nos processos de beneficiamento, transporte bem como na gestão de resíduos sólidos e efluentes líquidos gerados na mineração.

Filho e Souza (2004) destacam que, em toda a área do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais, a influência das atividades da mineração nos recursos ambientais e na qualidade dos mananciais, é bastante significativa, sendo um dos mais importantes impactos verificados diz respeito ao intenso carreamento de sólidos para as calhas dos rios e córregos, provocado principalmente pelas minerações de ferro. Como medidas de controle os autores destacam ações previstas em EIA/RIMA como medidas ambientais tais como instalação de sistemas de drenagem de águas superficiais, a construção de barragens para contenção de finos, sedimentos e rejeitos, a disposição controlada de rejeitos e estéril em pilhas a adoção de sistema de tratamento de efluentes.

Especificamente no que tange a disposição de rejeitos, após os acidentes com barragens no Brasil, Alves (2020) reitera que, seja por iniciativa das próprias empresas ou por iniciativa de órgãos reguladores, a partir da imposição de novas regras e nova legislação, mudanças no manejo de rejeitos de mineração no Brasil se fazem necessárias, com destaque para a disposição de rejeitos desaguados, filtrados ou a seco.

Neste sentido, implementar medidas que viabilizem os processos de disposição de rejeitos desaguados /filtrados tem sido ao longo dos anos os desafios do setor. Crystal et al. (2018) citado por Alves (2020) afirmam que a disposição de rejeitos filtrados vem provando ser uma alternativa viável para a gestão de rejeitos de mineração, porém destacam que os custos operacionais (OPEX) tendem a ser muito maiores na técnica de rejeitos filtrados e dependem de fatores tais quais: distância média de transporte, locação, compactação. Faz-se necessário, portanto, buscar a sustentabilidade, praticidade de execução, viabilidade de logística e redução dos custos envolvidos de maneira acelerar os processos de empilhamento de rejeitos, reduzindo o tempo de secagem e a melhoria das características mecânicas dos materiais.

Segundo Portes (2013) citada por Alves (2020), destaca que de modo a auxiliar o processo de sedimentação, os reagentes mais utilizados no processo de espessamento de rejeitos são os floculantes e os coagulantes. Floculantes são polímeros naturais ou sintéticos contendo alto peso molecular que auxiliam na sedimentação de partículas suspensas. O mesmo autor afirma que coagulantes são minerais naturais, tais como cal e sais férricos, que são eficazes para suspensões coloidais.

O uso de polímeros no processo de disposição de rejeitos a seco tem sido amplamente estudado, e várias pesquisas destacam sua importância e eficácia nesse contexto. Estudos como o de Huang et al. (2017) demonstraram que a aplicação de polímeros pode melhorar significativamente as propriedades de engenharia dos resíduos sólidos municipais (MSW) e dos sistemas de cobertura de aterros, resultando em uma maior estabilidade e redução da permeabilidade dos rejeitos. Wang e Ng (2015) oferecem uma visão abrangente sobre os materiais poliméricos utilizados em sistemas de barreira de aterros, destacando as tendências atuais de pesquisa e suas implicações para o futuro. Essa pesquisa destaca a importância dos polímeros na otimização dos sistemas de deposição de rejeitos a seco. Zhan et al. (2015), têm investigado o comportamento mecânico dos resíduos sólidos tratados com polímeros, fornecendo insights valiosos sobre como esses materiais afetam a estabilidade e manipulabilidade dos rejeitos durante o processo de deposição. Abichou et al. (2002) exploraram o uso de biopolímeros para reduzir a produção de lixiviados em aterros, destacando o potencial dos polímeros na gestão da umidade e na minimização dos impactos ambientais associados à disposição de rejeitos. Por fim, Martins et al (2022) demonstram o efeito da utilização de componentes a base de acrilamida e quitosana para o tratamento de resíduo de mineração rico em caulim e destacam que o estudo da interação do floculante e do meio a ser tratado é um passo importante para a solução de problemas ambientais relacionados à escassez de recursos. Os autores concluem que o entendimento da estrutura química organizacional floculante se torna uma ferramenta útil para o desenvolvimento de materiais aplicados à recuperação de água em rejeitos de mineração, o que contribui para a redução dos impactos ambientais de mineradoras.

Neste contexto, a Fontes Geotécnica propõe a utilização de produtos para estabilização de rejeitos de mineração, HPA (*High Performance Agglomerate*), e para a tratamento de efluentes, HPF (*High Performance Floculante*). Dentro dessa perspectiva, este trabalho objetiva a exposição, de uma forma qualitativa, da aplicação de ambos os polímeros em amostras de rejeito provenientes da mineração. Dessa forma, expõe se as

vantagens da utilização destes, uma vez que atestam o incremento de eficiência na utilização dos produtos em diversas aplicações e otimização de métodos com destaque para:

- eficácia na formação de barreiras físicas e químicas, reduzindo a permeabilidade e aumentando a estabilidade dos rejeitos depositados. Além disso, sua capacidade de formar aglomerados coesivos promove a formação de estruturas mais estáveis e resistentes, minimizando os riscos de colapso e vazamento;
- relevante capacidade dos polímeros de melhorar as propriedades mecânicas dos rejeitos, tornando-os mais manipuláveis durante o processo de disposição e facilitando a sua compactação. Isso resulta em uma redução significativa do volume ocupado pelos rejeitos, otimizando o espaço disponível nos locais de deposição;
- gestão da umidade dos rejeitos, prevenindo a infiltração de água e reduzindo os problemas associados à geração de lixiviados. Isso contribui para a mitigação dos impactos ambientais negativos e para a preservação da qualidade dos recursos hídricos;
- Melhoria da qualidade de efluentes líquidos industriais com valores abaixo dos limites legais exigidos (resolução CONAMA N° 357 de 2005).

Em suma, este artigo destaca o potencial dos polímeros como uma ferramenta promissora para melhorar a eficiência e sustentabilidade do processo de disposição de rejeitos a seco, oferecendo insights valiosos para pesquisadores, profissionais da indústria e tomadores de decisão no campo da gestão de resíduos sólidos.

## 2 MATERIAIS

### 2.1 HPA

O HPA é um produto à base de um polímero superabsorvente de substâncias desenvolvido no Japão, como novo material geotécnico atuante na melhoria das condições de trabalhabilidade dos rejeitos de mineração, ao entrar em contato com o rejeito úmido, capta a água do meio e a mantém em sua estrutura, transformando-a em uma consistência gelatinosa e liberando a água gradativamente. esse tipo de material absorve água imediatamente após a sua adição a uma mistura cimentícia, atingindo a saturação cerca de 5 a 10 minutos após; ao longo do tempo, o polímero vai liberando a água para a matriz, sendo que ao final do processo, cerca de 7 dias depois, as cavidades permanecerão como poros vazios.

O HPA é um polímero superabsorvente que consegue reter substâncias em sua estrutura, como a água, liberando-as gradativamente no meio ao qual estão inseridas, promovendo, assim, uma solidificação rápida dos rejeitos de mineração e reduzindo a retração nestes materiais. Esta solidificação proporciona a melhoria da trabalhabilidade dos rejeitos e otimiza os processos de empilhamento desses materiais. Promove melhoria das propriedades mecânicas, contudo, deve-se levar em conta variáveis como umidade, densidade, tempo de cura e temperatura em contato com o material a ser estabilizado.

Entende-se, enquanto o produto HPA, possuindo propriedades solidificantes, absorvendo a umidade do meio ao qual é inserido, formando um agregado sólido e estável de qualquer mistura sólido-líquida, e conferindo, também, uma melhora na trabalhabilidade do material. Dessa forma, pode ser aplicado de forma prática em processos de estabilização de rejeitos, bem como seu transporte de forma mais adequada e segura, assim como os desdobramentos destes procedimentos. Devido a isso, nota-se o incremento da eficiência nos processos de disposição de rejeitos e adquire-se mais qualidade no processo, bem como tempo e, consequentemente, custo-benefício.

### 2.2 HPF

O HPF (*High Performance Flocculant*) é um polímero inorgânico natural à base de cinzas vulcânicas, amplamente utilizado como material de tratamento de efluentes devido à sua alta capacidade de floculação e velocidade de sedimentação. Este aditivo de alta tecnologia desempenha um papel essencial na melhoria das condições dos efluentes, reduzindo significativamente a turbidez das águas, especialmente em barragens descomissionadas. Ele atende aos padrões exigidos pelas normativas estaduais e federais para lançamento de efluentes.

Além disso, o HPF também é aplicado no desaguamento de rejeitos, na mineração, promovendo o aumento da velocidade de sedimentação, a redução da turbidez do clarificado (*overflow*) e o aumento do percentual de sólidos na polpa (*underflow*). Essas características proporcionam uma maior compactação aos sólidos, qualidade na formação dos flocos, redução do número de vazios, otimizando o processo de tratamento.

Um dos principais benefícios deste produto é sua natureza em pó, com densidade de  $0,95 \text{ g/cm}^3$  e 100% de biodegradabilidade, o que o torna ecologicamente mais viável e uma opção sustentável para a gestão de resíduos. A concentração recomendada para aplicação do HPF varia de  $50 \text{ g/t}$  a  $200 \text{ g/t}$ , e é notável que sua adição não resulta em alterações significativas do pH do efluente. Isso o torna uma solução conveniente para uso tanto no processo de espessamento quanto diretamente nas barragens.

A utilização do HPF é simples e requer apenas uma breve homogeneização com o efluente, podendo ser realizada através de processos mecânicos, como o uso de pás em espessadores, ou por meio de uma agitação suave em uma estrutura apropriada.

### 3 USO E APLICAÇÃO DOS POLIMEROS

#### 3.1. Aplicação do HPA em pilha de rejeitos – Resíduos sólidos

Dentre os trabalhos realizado buscou-se avaliar a eficácia do uso e aplicação do polímero superabsorvente no processo de disposição de rejeito em pilhas A Figura 3 apresenta o esquema de teste de aplicação do HPA na estabilização de rejeitos de ferro visando a otimização dos processos de empilhamento, desde a filtração, transporte e disposição. Considerou-se a aplicação em 03(três) áreas teste com diferentes materiais:

- Área 1 – Rejeito Filtrado tratado com Polímero compactado em duas camadas de 30 cm;
- Área 2 – Rejeito Filtrado compactado;
- Área 3 – Rejeito proveniente das baias com presença do polímero aplicado na fase de transporte.

Os pontos indicados foram os pontos de coleta das amostras para verificação dos parâmetros de controle. Ensaio Hilf. Na sequência, procedeu-se com a homogeneização do material com o rejeito e após isso, sua compactação conforme Figura 4.

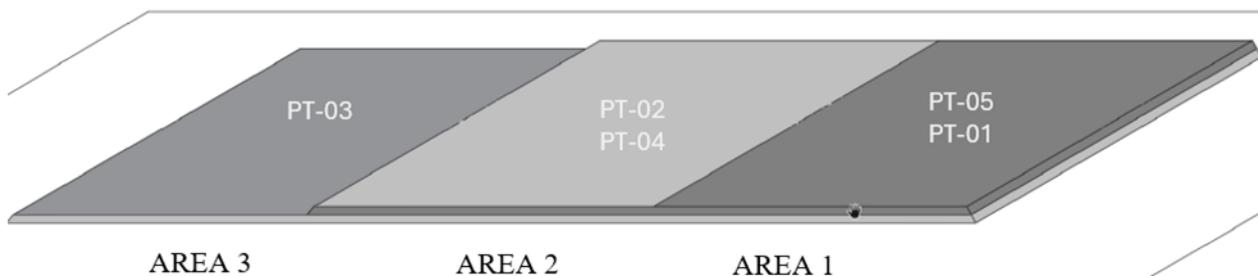


Figura 1. Esquema da área teste de aplicação do HPA na pilha de rejeito de mineiro de ferro.



Figura 2. Processo de aplicação (1) do HPA, homogeneização (2) e compactação.

Após a disposição tratamento das camadas, foram coletadas amostras de ambos os rejeitos, bruto e tratado, e levadas para laboratório para a realização de ensaios de caracterização e especiais. Os resultados podem ser sumarizados na Tabela 1 a seguir:

Tabela 1. Resultados dos ensaios de controle de compactação.

Ensaio	Área	Tratado HPA	Camada	Grau de Compactação – HILF	Status da Camada
1	1	Sim	1	97,4%	Liberada
2	2	Não	1	90,7%	Não liberada
3	3	Não	1	88,7%	Não liberada
4	2	Não	2	94,5%	Não liberada
5	1	Sim	2	95,5%	Liberada
6	1	Sim	2	98,9%	Liberada

### 3.1. Aplicação do HPF em efluente contaminado – Resíduos líquidos

Como forma de elucidar os benefícios do uso do floculante HPF em tratamento de efluentes líquidos apresenta-se a seguir síntese dos resultados do estudo de avaliação do potencial do floculante HPF como agente acelerador do processo de sedimentação e quantificação do potencial de redução de turbidez do HPF nas amostras de efluentes de uma área de mina.

Foi realizada a aplicação em campo do HPF através da dosadora fabricada pela empresa Fontes Geotécnica (ver Figura 3), que dispensa a quantidade ideal definida em estudo preliminar de dosagem, neste caso foram utilizadas 200 g/m<sup>3</sup> (aproximadamente 2 kg por min).



Figura 3. Máquina dosadora de HPF Adaptada por Fontes Geotécnica.

O local de inserção do polímero foi diretamente no canal de drenagem que direciona o efluente da mina para a barragem de clarificação a jusante. Em razão do produto possuir ação instantânea, fez-se necessário apenas uma pequena agitação proporcionada pela própria escada hidráulica existente no canal em campo, promovendo a agitação do material de forma natural e sem interferir na estrutura do canal (Figura 4) que registra o efluente antes da utilização do floculante e o resultado da aplicação do HPF com clarificação imediata do efluente.

De forma complementar ao observado visualmente em campo, foram realizadas comparações entre a turbidez inicial do efluente a alteração depois de se utilizar o floculante. Após a aplicação foram coletadas amostras à montante e à jusante, sem e com a adição do HPF para a medição da turbidez por meio de um turbidímetro digital, modelo HI95703 da marca HOMIS. Também foram coletadas outras amostras a fim de se realizar análises posteriores, sendo essas: análises visuais, testes de bancada, testes de dosagens, testes

industriais e análises químicas. Diante disso, a Figura 5 a seguir registra a turbidez avaliada no início dos estudos.



Figura 4. Águas antes da aplicação de HPF. Figura 6. Águas depois da aplicação de HPF



Figura 5. Análise comparativa da amostra de efluente com medida da Turbidez da amostra sem e com a aplicação do HPF.

De forma qualitativa, tem-se na Tabela 2 os resultados de turbidez obtidos por meio do equipamento.

Tabela 2. Resultados de turbidez da amostra do efluente		
Ensaio	Turbidez (NTU)	
	Sem HPF	Com HPF
Efluente	*	16

\*O aparelho utilizado consegue determinar turbidez de no máximo 1000 NTU.

## 4 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

### 4.1. Conclusões aplicação do HPA – Resíduos sólidos

A aplicação de polímeros no tratamento de rejeitos filtrados tem demonstrado ser uma solução eficaz para a gestão e disposição de resíduos industriais e de mineração, particularmente pela melhoria de parâmetros geotécnicos que permitem a disposição desses resíduos sob a forma de pilhas. Esses polímeros, ao serem

aplicados ao rejeito filtrado, atuam modificando suas propriedades físicas e mecânicas, como a permeabilidade, a resistência ao cisalhamento e a compressibilidade, tornando-o mais estável e menos suscetível a erosão e lixiviação.

Considerando que o processo pós filtragem até a compactação e liberação de camadas em pilhas tem demandado tempo considerável, tendo em vista a fase intermediária de secagem do rejeito de forma natural em áreas espalhadas pelo complexo minerador, os testes realizados demonstraram um incremento significativo de trabalhabilidade do material podendo realizar a sua compactação no mesmo dia de aplicação do polímero. Entende-se, dessa forma, que os ganhos com a utilização do HPA não dizem respeito apenas as características mecânicas do rejeito e condições de compactação, mas podem ser mensurados a partir da qualificação dos processos, que desdobram na eficiência do procedimento a ser executado e principalmente na otimização da operação, que implica qualitativamente a redução do tempo e do custo envolvido na realização da atividade.

#### **4.2. Conclusões aplicação do HPF – Resíduos líquidos**

Visualmente é perceptível a ação do floculante nas amostras; percebe-se a coagulação das partículas sólidas, que se aglomeraram e se depositaram no fundo dos béqueres, e assim, clarificaram as amostras de efluentes. Entende-se, dessa forma, que por meio dos resultados dos ensaios, é possível constatar que, quando da adição do floculante HPF, a amostra de água atingiu valores abaixo do limite de 100 NTU de turbidez, exigido pela resolução CONAMA Nº 357 (2005). Ao se utilizar deste material, constata-se ganhos na qualidade da água tratada bem como a velocidade de decantação dos resíduos sobrenadantes.

Em resumo, o HPF é um floculante altamente eficiente e versátil, que desafia as limitações dos tratamentos convencionais. Sua utilização não só atende aos padrões regulatórios de lançamento de efluentes, mas também contribui para o avanço da sustentabilidade ambiental no setor de tratamento de efluentes e na mineração.

#### **AGRADECIMENTOS**

Agradecimento a toda a equipe da Fontes Geotécnica, bem como a parceria com todos os clientes que têm proporcionado condições para os estudos e pesquisas que buscam trazer soluções inovadoras ao setor.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Abichou, T., Barlaz, M. A., Foose, G. J., & Thurner, R. L. (2002). Application of a biopolymer to reduce leachate production in landfills. *Environmental Science & Technology*, 36(17), 3721-3728.
- Alves, P. I. A. (2020) Empilhamento de rejeito filtrado: a expansão de uma alternativa para substituição de barragens. Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Mineral, Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto / UFOP, 114 p.
- Huang, Q., Zhang, W., Xue, Q., & Gersberg, R. M. (2017). Effect of polymer application on the engineering properties of municipal solid waste (MSW) and landfill cover systems. *Waste Management*, 59, 414-422.
- Martins et al (2022). Aplicação de polímeros na floculação de rejeito de caulim: efeitos da variação de concentração e tipo de floculante. *Quim. Nova*, Vol. 45, No. 5, 543-549, 2022
- Silva, A.C. et al. (2001). Impactos ambientais causados pela mineração e beneficiamento de caulim. *Rev. Esc. Minas* 54 (2) • Jun 2001 • <https://doi.org/10.1590/S0370-44672001000200010>;
- Wang, L., & Ng, C. W. W. (2015). Polymeric materials in waste landfill barrier systems: Current research and future trends. *Waste Management*, 45, 171-185.
- Zhan, L. T., Feng, S. J., & Wang, Y. H. (2015). Mechanical behavior of polymer-treated municipal solid waste. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(9), 04014219.