

II-465 - NANOFILTRAÇÃO APLICADA AO TRATAMENTO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINA DE OURO

Alice Oliveira Aguiar⁽¹⁾

Engenheira Química pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Mestranda em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos na UFMG.

Laura Hamdan de Andrade

Engenheira Química pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Mestre e doutoranda em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG.

Wadson Luciano Pires

Graduando em Química pela UFMG.

Gisele Alves Miranda

Graduanda em Engenharia Ambiental pela UFMG.

Míriam Cristina Santos Amaral

Engenheira Química pela UFMG, mestre e doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG. Professora Adjunta do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG.

Endereço⁽¹⁾: Avenida Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - Belo Horizonte - MG - CEP: 31.270-901 - Brasil - Tel: (31) 8898-5368 - email: aliceoa00@gmail.com

RESUMO

A mineração e o processamento do ouro são atividades de grande importância econômica. Entretanto, ela pode acarretar em diversos impactos ambientais, sendo o principal deles a drenagem ácida de mina (DAM). A DAM é uma consequência da mineralização de sulfetos metálicos na presença de oxigênio e água. Por outro lado, o uso de processos de separação por membranas (PSM) têm crescido em todo mundo, inclusive no tratamento de efluentes industriais. A nanofiltração (NF) é de especial interesse no tratamento de efluentes uma vez que oferece elevados fluxos de permeado e promove elevada retenção de íons e pequenas moléculas. O grau de recuperação é um dos principais parâmetros na operação de um PSM. Nesse sentido, o presente estudo visou estabelecer o grau de recuperação máximo da etapa de nanofiltração no processo de tratamento da DAM do ouro com pH ajustado para 5,5 com a membrana NF270 - Dow Filmtec. Essas condições foram definidas em etapas anteriores do projeto. Conforme o esperado observou-se uma redução lenta do fluxo de permeado pelo fluxo da água até um grau de recuperação igual a 60%, e a partir desse valor há uma rápida queda no fluxo de permeado. Isso indica que um grau de recuperação superior a 60% não é recomendado para essa aplicação. Além disso, observou-se um aumento da condutividade do permeado com o grau de recuperação, que, assim como os resultados para fluxo, aumentou mais acentuadamente a partir de um grau de recuperação de 60%. Nesse grau de recuperação, obteve-se um fluxo de permeado equivalente a 53,9 L/h.m² e condutividade igual a 545 µS/cm².

PALAVRAS-CHAVE: Drenagem Ácida de Mina de Ouro, Nanofiltração, Grau de Recuperação, Reuso de Água.

INTRODUÇÃO

O ouro tem sido empregado desde a Antiguidade, devido à sua beleza e suas propriedades físico-químicas, como elevada resistência à corrosão, alta condutividade elétrica e alta refletância. Suas aplicações são diversas, indo desde a fabricação de joias até o uso medicinal [1]. A mineração e o processamento do ouro são atividades de grande importância econômica, em especial no estado de Minas Gerais. De acordo com o Sumário Mineral de 2012, mais de 90% da produção aurífera brasileira é proveniente de apenas cinco estados, sendo Minas Gerais responsável por 52,4% [2].

Entretanto, a exploração e o processamento desse material leva a impactos ambientais que devem ser mitigados visando ao desenvolvimento sustentável. A drenagem da mina (DAM) é um dos principais problemas da mineração, não só pelos impactos associados, mas também pela dificuldade de controle uma vez iniciada, pelos elevados volumes envolvidos e custos associados, e pela sua perpetuidade. A DAM é um processo antrópico, ou seja, ele resulta da ação do homem [3].

A DAM é o resultado de uma série complexa de reações químicas, iniciada pela oxidação do sulfeto e pela geração do ácido sulfúrico. A mineralização dos sulfetos, em especial da pirita (FeS_2), ocorre em rochas não perturbadas, entretanto em taxas tão lentas que o sistema é capaz de tamponar o ácido gerado. Devido à mineração, há uma redução no tamanho de grão e um aumento da superfície de contato do minério; assim, os minerais tornam-se mais propensos à oxidação ultrapassando a capacidade de tamponamento do sistema. A oxidação do sulfeto ocorre quando o minério é exposto à atmosfera (oxigênio e água); nestas condições ele se transforma em sulfatos, enquanto o ferro e demais metais são liberados. Essa reação é autocatalítica e sua taxa pode ser acelerada pela ação bacteriana [3].

Os processos de separação por membranas (PSM) são processos que utilizam uma barreira seletiva (membrana) que sob a ação de uma força motriz podem promover a separação seletiva de componentes de uma solução [4]. A alimentação separa-se, portanto, em duas correntes: o fluido que atravessa a membrana, chamado de permeado; e o que permanece ao lado da alimentação, denominado concentrado. As aplicações dos PSM têm crescido em todo mundo, podendo ser utilizadas também na indústria mineraria. Dentre os PSM, ressalta-se a importância da nanofiltração (NF), que oferece elevados fluxos de permeado que a osmose inversa e promove a retenção de íons e pequenas moléculas expressivamente melhores que a ultrafiltração [5].

O grau de recuperação é um dos principais parâmetros na operação de um PSM. O aumento do grau de recuperação causa um aumento da polarização da concentração. Consequentemente, há um aumento não só da passagem de solutos, como também da pressão osmótica da solução e da incrustação na superfície da membrana. Assim, pequenas variações no grau de recuperação podem alterar consideravelmente o custo global do sistema [6].

Song et al. (2013) estudaram o uso da membrana de nanofiltração ESNA3 em um sistema integrado NF-RO na dessalinização de água do mar para diferentes graus de recuperação. Os resultados obtidos indicaram que um grau de recuperação de até 60% poderia ser obtido desde que anti-incrustantes fossem adicionados. Os autores afirmam ainda que um precipitado de CaSO_4 formaria na superfície da membrana a um elevado grau de recuperação [7].

Dessa forma, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o grau de recuperação ótimo da membrana de nanofiltração NF270 tratando DAM com pH ajustado para 5,5. Essa condições (membrana NF270 e pH) foram estabelecidas em testes anteriores por apresentarem maior potencial no tratamento da DAM.

MATERIAIS E MÉTODOS

DRENAGEM ÁCIDA DE MINA DO OURO

Nesse trabalho foi estudada a drenagem ácida de mina coletada em uma mineradora de ouro do estado de Minas Gerais, Brasil, a qual possui duas minas de ouro subterrâneas e uma planta industrial de beneficiamento. A DAM foi coletada em uma das minas subterrâneas, no quarto nível abaixo do solo. As características da DAM variam ao longo do ano, as principais características da DAM utilizada nesse estudo estão resumidas na Tabela 1.

Tabela 1: Principais características da drenagem ácida de mina estudada.

	pH	Conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}^2$)	Sulfate (mg/L)	Chloride (mg/L)	Calcium (mg/L)	Magnesium (mg/L)
DAM	3,2	2.780	2.458	70	50	25

DESCRIÇÃO DA UNIDADE DE BANCADA

Para os testes de nanofiltração (NF) foi utilizada uma unidade de bancada constituída de um tanque de alimentação, uma bomba, uma válvula para ajuste da pressão, um rotâmetro, um manômetro, um medidor de temperatura e uma célula de filtração de aço inox. A Figura 1 apresenta um esquemático da unidade utilizada no presente estudo. A célula de filtração possui 9,8 cm de diâmetro, proporcionando uma área de filtração de 75 cm^2 . Um espaçador na célula de filtração promovia uma distribuição homogênea da alimentação. A vazão de permeado foi calculada através da coleta de permeado em uma proveta durante um minuto.

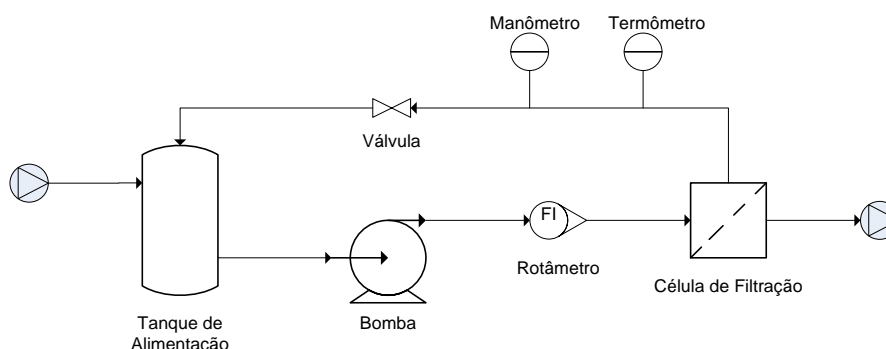


Figura 1: Esquema da unidade de NF utilizada no presente estudo.

A ultrafiltração (UF) foi empregada como pré-tratamento da DAM. A UF foi realizada em uma unidade simplificada constituída de uma bomba, uma válvula agulha para ajuste de pressão e um manômetro. Foi utilizado um módulo de membrana submerso comercial (ZeeWeed) com área de filtração 0,047 m², polímero base PVDF e diâmetro médio de poros 0,04 µm.

AVALIAÇÃO DO GRAU DE RECUPERAÇÃO

Primeiramente, foi realizada a limpeza da membrana NF270 em banho de ultrassom, primeiramente com ácido cítrico (pH 2,5) seguido por NaOH (0,1%) durante 20 minutos cada. A permeabilidade com água da membrana limpa foi obtida através do monitoramento do fluxo de permeado normalizado com a temperatura estabilizado nas pressões de 10,0; 8,0; 6,0 e 4,0 bar, conforme apresentado na Equação 1:

$$K = \frac{J_w \cdot \mu(T)}{\Delta P \cdot \mu(25^\circ C)} \quad (1)$$

Em seguida o pH da DAM foi ajustado para 5,5. Uma vez estabilizado o pH, a DAM foi submetida a um pré-tratamento com UF a uma pressão de 0,7 bar até um grau de recuperação de 60%. 10 litros desse efluente pré-tratado foram alimentados no sistema de NF. A NF ocorreu em pressão fixa de 10 bar, com vazão de alimentação de 2,4 LPM, temperatura entre 25 e 35°C, retirada contínua de permeado e retorno do concentrado para o tanque de alimentação, até que um grau de recuperação de 80% fosse atingido. A razão do fluxo de permeado pelo fluxo de água pura foi obtida através da equação apresentada na Equação 2.

$$\frac{J}{J_w} = \frac{V}{t \cdot A} \cdot \frac{\mu(T)}{\mu(25^\circ C)} \quad (2)$$

A cada 100 mL de permeado coletados, o fluxo de permeado e a temperatura eram medidos; a cada 500 mL, era realizada análise de condutividade (condutivímetro Hanna HI 9835) e pH (pHmetro Qualxtron QX 1500); e a cada 1.000 mL, era realizada análise de íons (cromatógrafo iônico Dionex ICS-1000 equipado com as colunas AS-22 e ICS 12-A). As análises foram realizadas de acordo com o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater [8].

RESULTADOS E DISCUSSÃO

AVALIAÇÃO DO FLUXO DE PERMEADO

A Figura 2 apresenta a razão do fluxo de permeado pelo fluxo com água da membrana limpa em função do grau de recuperação. Observa-se que após um grau de recuperação de 60% há um rápido decaimento da razão do fluxo de permeado pelo fluxo com água da membrana limpa, chegando a uma razão de apenas 42%.

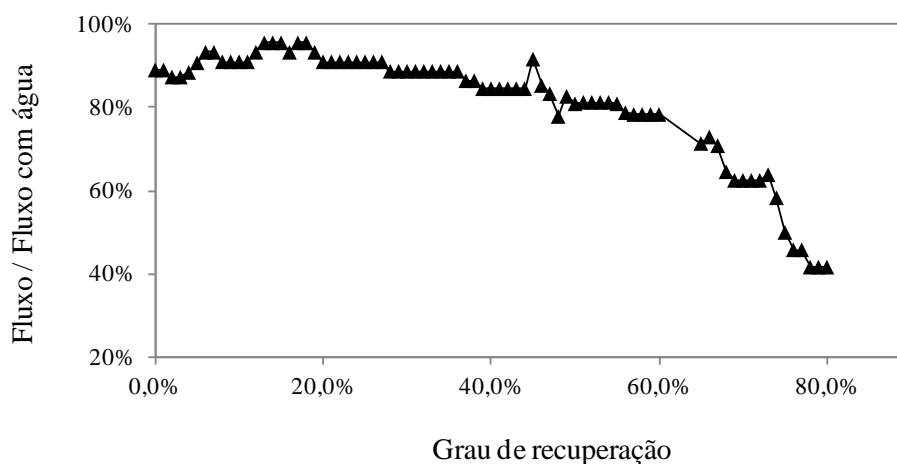


Figura 2: Fluxo de permeado pelo fluxo com água da membrana limpa em função do grau de recuperação

O fluxo de permeado inicial do sistema normalizado para 25°C equivalia a 61,2 L/h.m², diminuindo para 53,8 L/h.m² com 60% de recuperação e atingindo no final do experimento 28,7 L/h.m². Esses valores são semelhantes aos obtidos por Song et al. (2013), que obtiveram fluxos de permeado próximos a 20 L/h.m².Mpa, operando a pressões semelhantes a 1,8 Mpa [7].

AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO EFLUENTE TRATADO

A Figura 3 apresenta a condutividade do permeado em função do grau de recuperação, e sua respectiva eficiência de retenção. Esses valores de condutividade não representam a condutividade do permeado total acumulado, mas sim a condutividade dos 500 mL de permeado obtido naquele grau de recuperação.

Observa-se que quando o grau de recuperação atinge 60% a condutividade do permeado começa a aumentar rapidamente. Com 60% de recuperação a condutividade é 545 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$, subindo para 835 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ com 65% de recuperação.

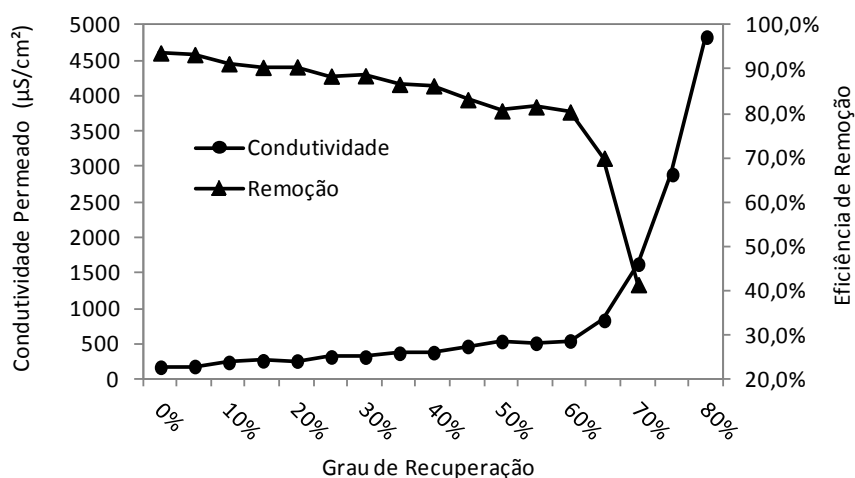


Figura 3: Condutividade do permeado e sua respectiva eficiência de retenção em função do grau de recuperação

Esse resultado vem a corroborar o valor ideal do grau de recuperação de 60%. Acima desse valor o fluxo de permeado diminui rapidamente, assim como a qualidade final do permeado.

CONCLUSÕES

No tratamento da DAM de ouro, observou-se uma rápida diminuição no fluxo de permeado e um rápido aumento na condutividade final do permeado quando o grau de recuperação era superior a 60%. A partir desses resultados, pode-se concluir que o valor ideal para o grau de recuperação nesse estágio da operação seria 60%. Nesse grau de recuperação, obteve-se um fluxo de permeado equivalente a 53,9 L/h.m² e a condutividade igual a 545 µS/cm².

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. SAVAGE, N. (2013). Resources: Mine, all mine!. *Nature*, 495(7440), S2-S3.
2. DNPM (2013). Sumário Mineral. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral
3. Grande, J. A., de la Torre, M. L., Cerón, J. C., Beltrán, R., & Gómez, T. (2010). Overall hydrochemical characterization of the Iberian Pyrite Belt. Main acid mine drainage-generating sources (Huelva, SW Spain). *Journal of hydrology*, 390(3), 123-130.
4. HABERT, A.C.; BORGES, C.P.; NOBREGA, R. (2006). Escola Piloto em Engenharia Química: Processos de separação com membranas. Programa de Engenharia Química, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
5. LUO, J., & WAN, Y. (2013). Effects of pH and salt on nanofiltration—a critical review. *Journal of Membrane Science*, 438, 18-28.
6. GREENLEE, L. F., D. F. LAWLER, et al. (2009). "Reverse osmosis desalination: water sources, technology, and today's challenges." *Water Research* 43(9): 2317-2348.
7. SONG, Y., SU, B., GAO, X., & GAO, C. (2013). "Investigation on high NF permeate recovery and scaling potential prediction in NF–SWRO integrated membrane operation". *Desalination*, 330, 61-69.
8. APPA, WEF (2005) Standard methods for the examination of water and wastewater, in, American Public Health Association, Washington 2005.