

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Departamento de Engenharia de Minas
Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais

Marcelo Jordão Nascimento Pereira

**ADSORÇÃO DE OURO COM CARVÃO ATIVADO: AVALIAÇÃO DA
REGENERAÇÃO E SEUS EFEITOS NO PROCESSO**

Belo Horizonte
2025

Marcelo Jordão Nascimento Pereira

**ADSORÇÃO DE OURO COM CARVÃO ATIVADO: AVALIAÇÃO DA
REGENERAÇÃO E SEUS EFEITOS NO PROCESSO**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia de Recursos Minerais.

Orientadora: Profa. Dra. Andreia Bicalho
Henriques

Belo Horizonte
2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MINAS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MONOGRAFIA/ARTIGO

Aos vinte e oito dias do mês de junho do ano de dois mil e vinte e cinco, às 09h:20 , o estudante Marcelo Jordão Nascimento Pereira, matrícula 2023700635 defendeu o Trabalho intitulado “**ADSORÇÃO DE OURO COM CARVÃO ATIVADO: AVALIAÇÃO DA REGENERAÇÃO E SEUS EFEITOS NO PROCESSO**”.

Participaram da banca examinadora os professores abaixo indicados, que, por nada mais terem a declarar, assinam eletronicamente a presente ata.

Nota: 97

Situação: Aprovado

Orientadora: Professora Andreia Bicalho Henriques

Examinador: Professor Gilberto Rodrigues da Silva

Examinador: Professor Luciano Fernandes de Magalhães



Documento assinado eletronicamente por **Gilberto Rodrigues da Silva, Professor do Magistério Superior**, em 22/09/2025, às 11:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Andreia Bicalho Henriques, Chefe de departamento**, em 22/09/2025, às 11:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luciano Fernandes de Magalhães, Professor(a)**, em 23/09/2025, às 08:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 4440756 e o código CRC 17F97885.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece à equipe de operação e processos da planta metalúrgica do Projeto Água Azul pelo suporte técnico e operacional durante a realização deste trabalho, bem como à equipe do laboratório químico, pelo apoio constante na execução dos ensaios em bancada. O autor agradece também ao CEERMIN – Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais da Universidade Federal de Minas Gerais.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência da regeneração térmica aplicada ao carvão ativado utilizado no circuito CIL de uma planta metalúrgica de ouro. Foram realizadas duas campanhas experimentais com amostras reais da operação, submetidas a diferentes condições de lavagem ácida e regeneração térmica. A atividade adsorptiva foi determinada por meio de ensaios de cinética em bancada. Os resultados demonstraram que a regeneração térmica promoveu significativa recuperação de desempenho, atingindo atividades superiores a 80%. A lavagem com HCl em maior concentração apresentou melhor resultado em comparação ao HNO₃ (41% contra 22% de atividade, respectivamente), e a purga de finos destacou-se como prática importante para manter a eficiência do processo. Os dados obtidos reforçam a viabilidade técnica da regeneração térmica como estratégia de manutenção da performance adsorptiva.

Palavras-chave: Regeneração térmica; Carvão ativado; Adsorção; Lavagem ácida; Ouro.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the efficiency of thermal regeneration applied to activated carbon used in the CIL circuit of a gold processing plant. Two experimental campaigns were conducted using real operational samples, submitted to different acid washing and thermal treatment conditions. Adsorptive activity was determined through bench-scale kinetic tests. Results showed that thermal regeneration significantly restored performance, with activity levels above 80%. Washing with higher HCl concentration outperformed HNO₃ (41% vs. 22% activity, respectively), and the removal of fine particles proved to be an important practice to preserve process efficiency. The findings reinforce the technical feasibility of thermal regeneration as a strategy to maintain adsorptive performance.

Keywords: Thermal regeneration; Activated carbon; Adsorption; Acid washing; Gold.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	7
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	8
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	9
4. CONCLUSÕES.....	12
REFERÊNCIAS.....	14

1. INTRODUÇÃO

A Bemisa Holding S.A. atua no setor de mineração com projetos de minério de ferro e ouro em operação nos estados de Minas Gerais e Pará, respectivamente. No município de Água Azul do Norte (PA), está localizada a unidade metalúrgica do Projeto Água Azul, que beneficia minério aurífero por meio de um circuito composto por britagem, moagem, concentração gravimétrica, lixiviação com cianeto e adsorção em carvão ativado (*Carbon-In-Leach* - CIL), eluição, eletrodeposição e fundição, além da neutralização de cianeto e filtragem de rejeitos.

A recuperação do ouro em plantas CIL depende fortemente do desempenho do carvão ativado, que atua na remoção do complexo $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ da solução. Esse desempenho, por sua vez, está relacionado à integridade física e à disponibilidade de sítios ativos na matriz porosa do carvão. Ao longo do uso, o material sofre desgaste por abrasão e acúmulo de contaminantes — orgânicos, como graxas e reagentes de flotação, e inorgânicos, como escamas de carbonato e sais metálicos — que comprometem sua atividade adsortiva (Marsden e House, 2006; Kemix, 2020).

Para restaurar a capacidade do carvão, as práticas industriais usualmente adotam a lavagem ácida, que atua na remoção de contaminantes inorgânicos, e a regeneração térmica, voltada à eliminação de compostos orgânico por tratamento térmico conduzido geralmente em atmosfera inerte. Em unidades com menor porte ou estrutura limitada, é comum restringir-se à lavagem ácida. No entanto, observações de campo na planta de Água Azul apontaram que esse procedimento, aplicado isoladamente, não tem sido suficiente para manter os níveis esperados de atividade do carvão, como pode ser observado na Figura 1, resultando em aumento de ouro residual em solução e perdas operacionais.

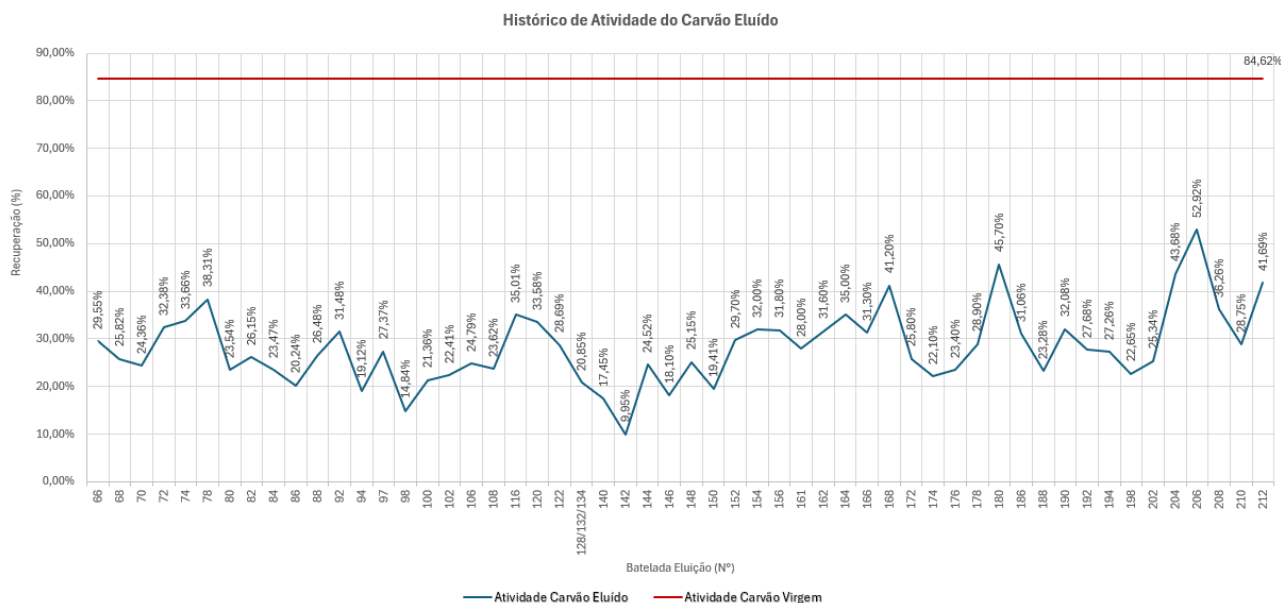


Figura 1: Histórico de atividade do carvão eluído da planta metalúrgica do projeto AGZ.

Considerando a relevância operacional e econômica do tema, este trabalho propõe a avaliação da eficácia da regeneração térmica na recuperação da atividade adsorptiva do carvão ativado utilizado na planta. Além da lavagem ácida com ácido clorídrico (HCl) a 3%, já adotada rotineiramente na operação, foram realizados testes complementares com regeneração térmica em forno mufla e novas lavagens com HCl em diferentes concentrações e com ácido nítrico (HNO₃), visando comparar o desempenho entre os tratamentos. Para essa avaliação, conduziram-se ensaios de cinética de adsorção em laboratório com amostras reais do processo, submetidas ou não às diferentes condições de tratamento.

A análise comparativa permitiu observar o efeito dos diferentes tratamentos sobre a performance do carvão, além de avaliar perdas de massa e impacto físico decorrente da regeneração. Os resultados contribuem para embasar decisões operacionais quanto ao programa de reativação do carvão e apoiar futuras melhorias no circuito CIL da unidade.

2. MATERIAL E MÉTODOS

As amostras utilizadas nos testes foram compostas de carvão ativado granular coletado em diferentes bateladas do processo de eluição. Conforme o procedimento padrão da planta, o carvão é submetido previamente à lavagem ácida com solução de HCl a 3%, etapa realizada antes da eluição, salvo em exceções ocasionais por limitações operacionais.

Os testes consistiram na aplicação de tratamentos térmicos em forno mufla, com temperaturas controladas de 450 °C e 550 °C, por 10 e 15 minutos, visando à

regeneração do carvão por tratamento térmico. A regeneração foi conduzida de forma estática, em cadinhos fixos dentro da mufla, sem agitação ou movimentação do material durante o processo. Também foram realizados ensaios adicionais de lavagem ácida em béquer agitado, com concentrações elevadas de HCl e HNO₃, de forma a comparar a efetividade desses tratamentos em condições controladas de laboratório.

Antes dos testes, as amostras foram secas em estufa a 105 °C por quatro horas. Também foram avaliadas amostras com e sem peneiramento prévio, com o objetivo de analisar o impacto da presença de finos na resposta à regeneração.

A atividade do carvão foi determinada por meio de ensaios de cinética de adsorção, conforme metodologia descrita no procedimento operacional padrão - POP-LAB-018 (Bemisa, 2024). Para cada ensaio, 3,0 g de carvão seco foram adicionados a 1 L de solução cianetada contendo 10 ppm de ouro, com pH entre 10 e 10,5. A solução foi mantida sob agitação contínua em béqueres de 2 L, com coleta de alíquotas em intervalos regulares ao longo de 180 minutos. As concentrações de ouro em solução foram determinadas por espectrofotometria de absorção atômica (EAA), com calibração realizada a partir de padrões específicos.

A análise comparativa considerou o desempenho de adsorção ao longo do tempo, perdas de massa durante os tratamentos e alterações visuais nas amostras, como coloração, integridade física e presença de incrustações superficiais.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A campanha experimental realizada em julho de 2024 avaliou o efeito da regeneração térmica sobre a atividade do carvão ativado utilizado na planta. As amostras analisadas foram compostas por carvão previamente eluído e lavado com HCl a 3% na operação, oriundas das bateladas 128, 132 e 134, sendo submetidas em laboratório a tratamentos térmicos em forno mufla a 450 °C e 550 °C, por 10 e 15 minutos. Também foram incluídas amostras peneiradas e não peneiradas, visando avaliar o impacto da presença de partículas finas.

Os resultados indicaram recuperação significativa da atividade adsortiva, com valores variando entre 68% e 86%. A regeneração foi eficaz mesmo em temperaturas moderadas, e não houve diferença substancial entre os tempos de residência avaliados. De forma geral, as amostras peneiradas apresentaram desempenho ligeiramente superior às não peneiradas, reforçando o impacto negativo que a presença de finos pode ter na cinética de adsorção, por obstrução de poros maiores (principalmente

macroporos), ou aumento da resistência à difusão interna, conforme discutido por Marschner e Watling (2013). A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos para as diferentes combinações de temperatura, tempo e peneiramento.

Tabela 1: Premissas e resultados obtidos na primeira campanha de testes.

Teste	Massa Antes (g)	Massa Depois (g)	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Peneiramento	Atividade (%)	Certificado
1	10,086	7,995	550	15	SIM	85,90	PR2024-07-002
2	10,078	7,993	550	15	NÃO	80,20	PR2024-07-003
3	10,072	7,684	550	10	SIM	85,80	PR2024-07-005
4	10,068	8,025	550	10	NÃO	84,90	PR2024-07-006
5	10,070	8,146	450	10	SIM	77,20	PR2024-07-008
6	10,078	8,011	450	10	NÃO	71,50	PR2024-07-007
7	10,043	7,739	450	15	SIM	68,60	PR2024-07-009
8	10,050	7,823	450	15	NÃO	76,80	PR2024-07-010
9	10,092	8,222	450	15	SIM	81,70	PR2024-08-001
10	10,082	8,168	450	15	NÃO	82,90	PR2024-08-002

A perda de massa observada após a regeneração variou entre 15% e 24%, evidenciando a remoção de contaminantes orgânicos. Durante a inspeção visual das amostras regeneradas, observou-se que algumas apresentaram coloração esbranquiçada, especialmente sob condições de maior temperatura e tempo. Essa aparência pode estar associada a um possível processo de carbonização parcial ou mesmo início de calcinação da matriz carbonácea, indicando degradação do material por exposição térmica excessiva. Considera-se que esse efeito tenha sido favorecido pela natureza estática do ensaio térmico, realizado em mufla com cadinhos fixos, sem movimentação do carvão durante o tratamento, o que pode ter provocado acúmulo de calor na superfície superior do leito. Ressalta-se que o uso da mufla neste estudo teve como objetivo apenas simular o componente térmico do processo, não representando a dinâmica dos regeneradores industriais normalmente empregados, como os fornos de leito fluidizado ou rotativos. Nestes, há movimentação contínua do material e maior homogeneidade térmica, o que evita exposições prolongadas de uma mesma camada superficial à fonte de calor. As Figuras 2 e 3 ilustram, respectivamente, amostras de carvão antes e após a regeneração térmica, evidenciando a alteração visual observada nas amostras calcinadas.



Figura 2: Amostra de carvão preparada para regeneração térmica (Teste 06).



Figura 3: Amostra de carvão após teste de regeneração térmica (Teste 06), com aspecto visual esbranquiçado.

Na segunda campanha, realizada em fevereiro de 2025, foram avaliadas amostras compostas por carvões coletados nos tanques de lixiviação e carvões eluídos. O foco da

campanha foi testar a eficiência da lavagem ácida com HCl a 10% e HNO₃ a 5%. Os testes mostraram que o HCl a 10% resultou em melhor desempenho, atingindo atividade de até 41%, valor superior ao obtido com HNO₃. A Tabela 2 apresenta os resultados dessa segunda etapa experimental. Após a aplicação da regeneração térmica nas amostras previamente lavadas, os níveis de atividade voltaram a superar 80%, reafirmando o potencial do tratamento térmico para recuperação da performance adsortiva.

Tabela 2: Premissas e resultados obtidos na segunda campanha de testes.

Teste	Identificação	Atividade (%)	Certificado
1	1° Composta de Carvão sem Lavagem Ácida	35,27	PR2025-02-007
2	1° Composta de Carvão com Lavagem Ácida (HCL 10%)	40,67	PR2025-02-008
3	2° Composta de Carvão sem Lavagem Ácida	14,79	PR2025-02-012
4	2° Composta de Carvão com Lavagem Ácida (HNO3 5%)	21,76	PR2025-02-013
5	3° Composta de Carvão com Lavagem Ácida (HCl 10%) + Reg. Térmica (10 min / 500 °C)	81,49	PR2025-02-009
6	3° Composta de Carvão com Lavagem Ácida (HCl 10%) + Reg. Térmica (20 min / 500 °C)	87,24	PR2025-02-010

Com a consolidação dos dados das duas campanhas, reforça-se a efetividade da regeneração térmica na restauração da atividade adsortiva do carvão ativado utilizado na planta. Os resultados também evidenciam o papel da lavagem ácida na remoção de contaminantes inorgânicos, potencializando os efeitos do tratamento térmico. Por fim, a influência da preparação das amostras (como o peneiramento) e o controle adequado de temperatura e tempo se mostram fatores importantes para a manutenção da performance do circuito de lixiviação.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nas campanhas experimentais demonstram que a regeneração térmica é uma alternativa tecnicamente viável e eficaz para restaurar a atividade adsortiva do carvão ativado utilizado no circuito CIL da planta. Em condições controladas de laboratório, mesmo amostras já utilizadas e lavadas com HCl a 3% apresentaram significativa recuperação de desempenho, com atividades superiores a 80%.

A lavagem ácida com HCl a 10% também se mostrou mais eficiente do que aquela realizada com ácido nítrico a 5%, destacando-se como uma alternativa mais eficaz para remoção de contaminantes inorgânicos antes do tratamento térmico. A presença de partículas finas no carvão teve impacto negativo sobre os resultados de adsorção, reforçando a importância da purga de finos no circuito CIL. A retenção desses finos pode obstruir os macroporos, dificultar a difusão dos complexos de ouro e comprometer a eficiência global do processo.

Durante os testes térmicos, algumas amostras regeneradas apresentaram coloração esbranquiçada, indicando possível calcinação parcial da matriz carbonácea. Esse comportamento visual foi mais evidente em condições de maior temperatura e tempo de residência, sugerindo que há um limite operacional a ser respeitado para evitar a degradação estrutural do carvão. Considera-se que esse efeito possa ter sido intensificado pela condução estática dos ensaios térmicos, que favorece o acúmulo localizado de calor. A adoção de sistemas com movimentação contínua do material, como os fornos rotativos, permitiria a exposição homogênea de todo o conteúdo a ser regenerado, evitando a sobre-exposição de leitos estáticos como no caso do uso da mufla nos testes em questão. Estudos futuros com caracterizações físico-químicas complementares poderão confirmar esse fenômeno e auxiliar na definição de parâmetros mais seguros e representativos da realidade industrial para o processo de regeneração.

O estudo contribui diretamente para embasar decisões técnicas sobre a otimização do preparo do carvão ativado na unidade, evidenciando que a utilização de maiores concentrações de ácido na lavagem ácida e a aplicação de regeneração térmica podem ampliar significativamente a vida útil do material e sua atividade adsorptiva. Embora a planta ainda não possua forno para regeneração térmica, os resultados obtidos neste trabalho comprovam a eficácia dessa alternativa, caso venha a ser implementada. No entanto, a decisão sobre a implantação de um forno deve considerar também fatores econômicos, especialmente em plantas de pequeno porte. Nesses casos, uma análise de viabilidade pode indicar que a reposição sistemática de carvão pode, em certos contextos, compensar a perda de eficiência adsorptiva. Ou seja, a escolha entre regenerar ou repor carvão deve ser embasada não apenas na performance técnica, mas também em critérios de viabilidade financeira. A manutenção de carvões com alta atividade impacta positivamente na recuperação metalúrgica do ouro, podendo reduzir perdas em solução e otimizar o desempenho do circuito como um todo.

REFERÊNCIAS

Aylmore, M.G. Advances in the cyanidation of gold. In: Adams, M.D. (ed.). Advances in gold ore processing. Amsterdam: Elsevier, 2005. p. 245–281.

Cetem – Centro de Tecnologia Mineral. Tecnologia de processamento de minérios de ouro. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 268 p.

Habashi, F. Handbook of extractive metallurgy. Weinheim: Wiley-VCH, 1997. 1232 p.

Kemix (Pty) Ltd. Activated carbon in gold recovery. Johannesburg: Kemix, 2020. 46 p.

Marsden, J.O.; House, I.M. The chemistry of gold extraction. 2nd ed. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2006. 651 p.

Marschner, N.C.; Watling, H.R. The influence of activated carbon properties on the kinetics of adsorption of gold cyanide. Minerals Engineering, v. 46–47, p. 90–97, 2013.

Mitchell, C.J.; Johnson, G.I.; Smith, R.A. Gold extraction and recovery processes. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, v. 36, n. 4, p. 223–236, 2015.

Nunes, L.F.; Carvalho, T. Efeito da lavagem ácida no carvão ativado utilizado na adsorção do ouro. In: XXIV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa – ENTMME, 2011, Salvador. Anais... ABM, 2011. p. 1073–1075.

POP-LAB-018. Determinação de cinética em carvão. Rev. 02. Água Azul do Norte, PA: Bemisa, 2024. 2 p.