

Produção de Sais de Ferro e Adsorventes a partir de Rejeito de Mineração em uma Abordagem Educacional

Production of Iron Salts and Adsorbents from Mining Waste in an Education Approach

Ariel V. Pereira,^a Barbara Q. Guimarães,^a Bruno M. M. Siqueira,^a Lucas Lorenzini,^a Sandra A. D. Ferreira,^a Maria de Fátima F. Lelis,^{a,*} Paulo R. G. Moura^a

^a Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Química, Centro de Ciências Exatas, Campus Goiabeiras, CEP 29075-910 Vitória-ES, Brasil.

*E-mail: mfflelis@yahoo.com.br

Recebido em: 6 de Fevereiro de 2021

Aceito em: 24 de Agosto de 2021

Publicado online: 16 de Novembro de 2021

This article aims to use problem-based learning (PBL) as an active teaching methodology in an approach of media and information literacy (MIL) and production of audio-visual content in the context of higher education in chemistry at the Federal University of Espírito Santo (UFES, Brazil), in the discipline of research and pedagogical practice in teaching laboratory (RPPTL) using as a scenario a group of undergraduate students in chemistry. The pedagogical intervention aimed to organize theoretical and practical knowledge regarding the reuse of iron mining waste through five initial teacher training meetings. It's inferred that educational intervention implemented favored improvement of students' skills and competences and the learning process such as: solving the problem situation; communication and teamwork; audiovisual production, socio-scientific and environmental themes. The products obtained at end of this investigative process were iron-based reagents to be used in experimental chemistry classes; a research that demonstrates the efficiency of the residue as an adsorbent under different conditions of pH and mass of adsorbent, whose adsorption occurs in a very promising. A documentary video was also produced by the students who argues in favor of reusing the iron mining waste.

Keywords: Chemistry teaching; mining tailings; iron salts; adsorbent; audiovisual.

1. Introdução

A disposição adequada de resíduos urbanos e industriais é um dos maiores desafios da atualidade. O aumento populacional e o elevado crescimento das atividades industriais têm contribuído com o crescimento acentuado da geração de resíduos sólidos, afetando o meio ambiente, causando impactos ambientais em todos os aspectos, desde uma simples disposição irregular em vias públicas até um desastre de grandes proporções.¹

Associar problemas ambientais com abordagens metodológicas tem sido o desafio atual para melhorar o processo de ensino-aprendizagem. É preciso relacionar a vida cotidiana com temáticas ambientais no sentido de preparar cidadãos para construção de uma sociedade com justiça, cidadania e ética nas relações do homem com a natureza. A utilização de resíduos sólidos neste contexto, justifica-se pela grande quantidade de rejeito gerado no beneficiamento de minério de ferro,² material que sobra quando se separa o minério da rocha para depositá-lo na forma de polpa, formando uma mistura de sólidos e água. Esta mistura é depositada em barragens de contenção, que podem apresentar falhas e riscos de ruptura, levando a dispersão dos rejeitos no meio ambiente. Os efeitos da dispersão associados ao processo de bioacumulação e exposição contínua podem levar os compostos tóxicos presentes no rejeito até o organismo humano e provocar efeitos adversos devido a intoxicação. De acordo com Cordeiro (2019)³ o estado de Minas Gerais, Brasil, possui 40 barragens instáveis, no limite de sua capacidade. O dia 5 de novembro de 2015 ficou marcado pelo desastre socioambiental causado pelo rompimento da barragem de rejeitos da mineradora Samarco, em Mariana/MG provocando sérias consequências para a população.⁴

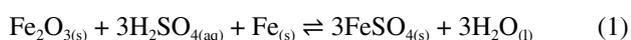
O rejeito é um tipo específico de resíduo cujas possibilidades de reaproveitamento ou reciclagem foram exauridas e não há solução final para ele ou parte dele.⁵ De acordo com suas características químicas e físicas, estes rejeitos podem se tornar matéria-prima para outros setores produtivos. O desperdício de materiais para os quais dispomos de tecnologias capazes de repô-los em uma nova cadeia produtiva, com reduções significativas na extração de recursos naturais é uma forma de minimizar a extração de matérias primas de origem e outros insumos.

De acordo com Pires, *et al.* (2018),⁶ as amostras do resíduo sólido da Barragem de Germano, da Samarco Mineração S.A., localizada no município de Mariana (MG) foram classificadas como

resíduos inertes segundo a norma da ABNT NBR 10004 (2004).⁷ A composição mineralógica do material indica que ele é constituído em sua maior parte de hematita (Fe_2O_3) e quartzo (SiO_2), apresenta grande capacidade de retenção de alguns metais e diminui a dispersão de poluentes. De acordo com Bressiane *et al.* (2020),⁸ o rejeito é classificado como Classe II A, não perigoso e não inerte.

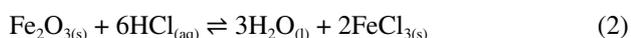
Martins *et al.* (2017)⁹ relataram estudo de recuperação de sílica e ferro a partir do rejeito de minério de ferro que consistiu em classificação de tamanho, separação magnética e remoção de impurezas por lixiviação e digestão ácida. Após essas etapas foi possível obter sílica com pureza de 98%.

Cardoso (2012)¹⁰ produziu sulfato de ferro (II) a partir de um resíduo proveniente da mineração do ferro e do ferro metálico em uma rota utilizando ácido sulfúrico na formação do sal (sulfato de ferro (II)) a $100\text{ }^\circ\text{C} \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ (Equação 1)



A solução foi filtrada e parte do resíduo de mineração permaneceu retido no filtro, composto majoritariamente por SiO_2 .¹⁰

Lopes *et al.* (2017)¹¹ obtiveram o coagulante cloreto de ferro (III) pela reação direta do óxido de ferro III resultante do processo de ustulação dos rejeitos piritosos de carvão, com ácido clorídrico comercial. O produto desta reação é o cloreto de ferro (III) (Equação 2)



Diante da problemática envolvendo o tratamento de efluentes da indústria têxtil, um método que tem sido muito estudado é a adsorção, que se caracteriza principalmente pela alta eficiência na remoção de corantes têxtil. A adsorção do corante reativo Blue 19 foi realizada por Souza e Antunes (2013)¹² utilizando a lama vermelha proveniente da extração do alumínio, tratada com peróxido de hidrogênio e aquecimento. Neste estudo verificaram uma adsorção significativa do corante, concluindo que a lama vermelha pode ser utilizada para o tratamento de efluentes de indústrias têxteis.¹²

Para se avaliar o fenômeno de adsorção, devem-se considerar fatores importantes que interferem na sua efetividade como: temperatura, polaridades das substâncias, pH do meio, pressão, área da superfície, forma de organização das moléculas adsorvidas e a estrutura molecular ou a natureza do adsorvente.¹³ O pH é um importante fator de estudo em processo de adsorção, uma vez que, sua variação altera o equilíbrio químico dos grupos iônicos presentes no adsorvente, influenciando em suas interações eletrostáticas. Em solução ácida, se for necessário adsorver determinados cátions metálicos, estes podem competir com a concentração de íons H_3O^+ presentes no meio.¹⁴

Diante do exposto, propõe-se abordar o ensino de química em uma dimensão ampliada, sendo os conceitos

científicos abordados numa perspectiva crítica e reflexiva à resolução de situações-problemas, buscando aproximar aquilo que é ensinado nos espaços de formação à docência do contexto imediato em que o estudante está inserido.

1.1. Abordagem pedagógica

Dentre os escopos das pesquisas em ensino de ciências se destacam as abordagens educacionais associadas às metodologias instrucionais que oportunizem aos estudantes a compreensão de certos objetos de estudo e que os capacitem a analisar criticamente os diferentes contextos socioambientais. No âmbito do ensino de química torna-se fundamental a adoção de estratégias que enfatizem a autonomia e o protagonismo dos estudantes na produção do conhecimento educacional.¹⁵ É necessário inter-relacionar a informação química e o contexto socioambiental, de modo que os estudantes possam compreender melhor o conhecimento químico e o entorno em que estão inseridos.¹⁶

Numa perspectiva integrativa, a alfabetização midiática e informacional (AMI) trata do processo de comunicação social e da avaliação crítica dos conteúdos das mídias no que se refere ao acesso, à organização, ao uso ético, à comunicação e ao processamento das diferentes informações circulares.¹⁷ Logo, a abordagem AMI associada com estratégias instrucionais, como a aprendizagem baseada em resolução de problemas (ABRP), pode contribuir para a compreensão e organização dos temas sociocientíficos e ambientais.

A aprendizagem baseada em resolução de problemas (ABRP) trata da análise das situações-problema, tendo o estudante como o sujeito ativo para elaborar hipóteses e para definir propostas de investigação na busca de soluções para desafios do mundo real.¹⁸ As situações-problema geram a necessidade da apropriação de novos conhecimentos.^{19,20}

A ABRP ocorre em quatro etapas e nove momentos de um processo cíclico (Figura 1). A primeira etapa (I) inicia com o estabelecimento do contexto real ou cenário (1), para

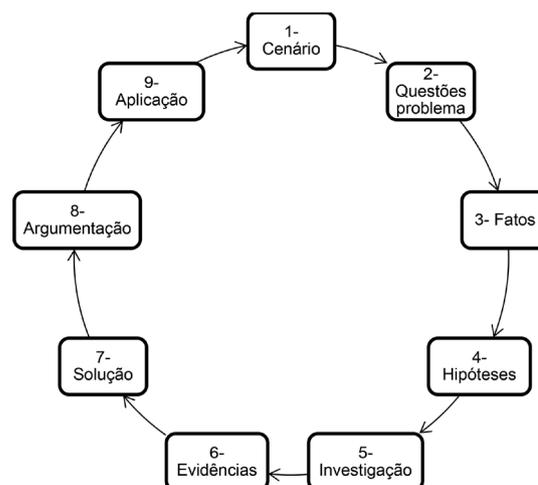


Figura 1. Processo Cíclico da ABRP. Adaptado de Vasconcelos e Almeida (2021)²⁴

a assimilação da situação-problema. A segunda etapa (II) segue com o processo de análise da situação-problema (2), com a verificação dos conhecimentos prévios sobre os fatos (3) e com o levantamento de hipóteses (4) discutidas coletivamente. A terceira etapa (III) envolve o processo investigativo (5, 6, 7), com a apropriação das informações disponíveis por meio de leitura e análise crítica. A última etapa (IV) abarca a sistematização e apresentação das soluções à situação-problema (8, 9) e a avaliação global do processo cíclico.²¹

A ABRP oportuniza a aprendizagem cooperativa e o desenvolvimento de potencialidades e habilidades de comunicação dos estudantes através do trabalho em grupo.²²

A intervenção educacional ocorreu com uma turma de estudantes da licenciatura em química, na disciplina de pesquisa e prática pedagógica em laboratório de ensino, da Universidade Federal do Espírito Santo, Campus Goiabeiras, Vitória (ES). A referida intervenção teve como objetivo organizar o conhecimento teórico e prático a respeito do reaproveitamento de resíduos de mineração de ferro, buscando desenvolver atividades específicas e tendo como abordagem pedagógica a alfabetização midiática e informacional associada a ABRP para a produção de vídeo documentário sobre temas sociocientíficos e ambientais.

2. Metodologia

Para realização da abordagem metodológica inicialmente preparou e caracterizou a amostra de rejeito de mineração de ferro. A amostra foi coletada em um aterro de empilhamento de rejeito na Fazenda Florestas, local de destinação do material dragado da Usina Hidrelétrica Risoleta Neves (Usina de Candongas em Minas Gerais que, após o rompimento da barragem de Fundão no subdistrito de Bento Rodrigues, funcionou como uma espécie de barreira, impedindo o escoamento de um terço do rejeito pelo Rio Doce).

A amostra foi seca ao ar para retirar a umidade. Em seguida foi homogeneizada e passada em uma peneira de 2 mm de malha para retirada das pedras, galhos e outros materiais. Na etapa de caracterização realizou-se as análises de difração de raios X (DRX), Ponto de Carga Zero (pHPCZ) e Espectroscopia no infravermelho (FTIR).

Após preparação e caracterização da amostra procedeu-se a etapa da intervenção educacional empregando a abordagem AMI associada com a aprendizagem baseada em resolução de problemas (ABRP), para tratar da organização do conhecimento teórico e prático sobre reaproveitamento de resíduos de mineração de ferro.

2.1. Caracterização do resíduo

2.1.1. Difração de raios X

O difratograma de raios X da amostra foi obtido utilizando um equipamento D8 DISCOVER (Bruker, EUA)

com radiação $\text{CuK}\alpha$ e comprimento de onda $\lambda=1,5406 \text{ \AA}$, operando a uma voltagem de 40 KV com 30 mA de corrente. A amostra em forma de pó foi analisada em um intervalo de varredura de 2θ , entre 10 à 90° , com passo angular de $0,01^\circ$ e tempo de aquisição de 1 segundos por passo.

2.1.2. Determinação do Ponto de Carga Zero (pHPCZ)

O Ponto de Carga Zero (pHPCZ) é definido como o pH em que a superfície do adsorvente possui carga neutra. A metodologia proposta para a determinação do pHPCZ é denominada “experimento dos 11 pontos” e foi descrita por Guillarduci, *et al* (2006).²³ Neste procedimento é realizada uma mistura de 50,0 mg do adsorvente em 50,0 mL de solução aquosa sob 11 diferentes condições de pH inicial (2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12), ajustados com soluções de HCl ou NaOH 1% (m/V). Após 24 horas de equilíbrio sob agitação realiza-se a medida do pH. A partir da construção de um gráfico de pH final versus pH inicial, encontra-se o valor de pHPCZ.

2.1.3. Espectroscopia no Infravermelho (FTIR)

Os espectros de infravermelho foram realizados nos resíduos após tratamento nas temperaturas de 105°C e 400°C por 2 horas e analisados em espectrofotômetro Perkin Elmer Spectrum 400, modo de Reflectância Total Atenuada (ATR). Todas as análises foram executadas em um intervalo de comprimento de onda de 4000 a 650 cm^{-1} para determinar as frequências de vibrações dos grupos funcionais presentes.

2.2. Intervenção educacional

As atividades relacionadas a investigação foram desenvolvidas durante cinco encontros, totalizando dezoito horas de aplicação educacional. O público alvo foi uma turma formada por doze estudantes do quinto período do curso de licenciatura em química (UFES), que cursavam a disciplina pesquisa e prática pedagógica em laboratório de ensino (PPPPE). Também ocorreu a participação de dois alunos voluntários do programa de pós-graduação de química (PPGQUI/UFES).

No primeiro encontro (E1) foi aplicado um questionário estruturado de modo aberto para os estudantes, visando diagnosticar seus conhecimentos sobre a temática dos rejeitos e resíduos de mineração. Neste encontro também ocorreu a apresentação da AMI e da oficina cinematográfica sobre a produção de vídeo documentário para tratar de temas sociocientíficos e ambientais.

Foram abordadas as seguintes questões: “O que é resíduo?” (P1); “Qual é a diferença entre resíduo e rejeito?” (P2); “Como você classificaria um resíduo?” (P3); e, “Na reportagem é dito que o resíduo é classificado como inerte; vocês acreditam que o resíduo de mineração é realmente inerte?” (P4). As perguntas diagnósticas são essenciais para estimular os estudantes, visto que ao serem questionados surgem as dúvidas e o desejo de aprender. A partir disso, eles buscam encontrar novas informações, estabelecendo

uma ligação entre seus conhecimentos prévios e os conhecimentos adquiridos, o que contribui para aprenderem de modo significativo.²⁴

Na P1, os estudantes responderam o seguinte: é “o que sobra de uma reação química”; “um subproduto de uma reação química”; “algo que não foi tratado”; “material não desejado”. Tais respostas demonstraram que eles possuíam certo conhecimento prévio sobre a temática, porém nenhum estudante abordou o conceito de modo apropriado, conforme a norma ABNT NBR 10004 (2004).⁷

Na P2, eles associaram “rejeito” diretamente com “mineração”, como se verificou na resposta a seguir: “o que sobrou da mineração, o que não serve mais”. Eles não mencionaram que “rejeito” seria um “tipo de resíduo”. Na P3, os alunos responderam que não tinham conhecimento sobre a classificação de resíduos. Quanto a P4, todos os alunos responderam negativamente, desconhecendo o fato correto que o “rejeito” é um “material inerte”. Logo, as respostas para P2, P3 e P4 demonstraram que os estudantes tinham pouco ou nenhum conhecimento sobre a classificação e o reaproveitamento de resíduos de mineração.

No segundo encontro (E2) foi apresentado o cenário, ou estabelecido o contexto real, que caracteriza a primeira etapa do ciclo da ABRP, com o levantamento das situações-problema e das discussões do tema proposto. Na Tabela 1 encontram-se as principais situações-problema elencadas pelos estudantes, que constituem a segunda etapa da ABRP.

As situações-problema propostas pelos estudantes indicam a necessidade da classificação do resíduo e da determinação da composição química do rejeito de mineração.

Em conformidade com o ciclo da ABRP, foram apresentados aos estudantes o cenário e as normas da ABNT NBR 10004 (2004)⁷ tratando das definições técnicas e da metodologia de classificação de resíduos e rejeitos. A seguir foi realizada a terceira etapa da ABRP, com uma pesquisa bibliográfica na qual os alunos identificaram os seguintes fatos:

- Grande parte dos resíduos gerados no processo de beneficiamento é depositado nas barragens de contenção;
- O rejeito de mineração é classificado como um resíduo do tipo IIB ou resíduo inerte;
- O resíduo é composto majoritariamente por óxidos de silício e ferro na forma de hematita (Fe_2O_3) e areia (SiO_2).

Na etapa 4 do ciclo ABRP, surgiram as primeiras hipóteses (Tabela 2).

Os alunos foram divididos em três grupos de quatro integrantes, conforme distribuição: Grupo A (Alunos 1, 2, 3 e 4); Grupo B (Alunos 5, 6, 7 e 8); Grupo C (Alunos 9, 10, 11 e 12), para investigarem as possibilidades de reaproveitamento do resíduo de mineração. Cabe destacar que o processo de investigação proposto pela ABRP, permite o compartilhamento das ideias e do conhecimento científico e oportuniza aos estudantes vivenciarem o método científico.²⁵

A seguir, deu-se o debate dos grupos de estudantes para tratar das hipóteses levantadas e da possível solução à questão motriz, ou situação-principal: O reaproveitamento do resíduo de mineração.

No terceiro e quarto encontros (E3 e E4) foram realizadas as etapas 5, 6 e 7 (investigação, evidências e solução) da ABRP em duas aulas experimentais para tratar da questão motriz. O Grupo A sugeriu a produção de cloreto de ferro (III) e sulfato de ferro (III) a partir da lama de rejeito de mineração usando reações químicas e conceitos de volumetria de oxidação e redução; o Grupo B sugeriu o uso do rejeito de mineração como adsorvente; e o Grupo C, o uso do rejeito de mineração suportado sobre papel de filtro para avaliar a adsorção de corante. Os estudantes filmaram os experimentos para posterior utilização na etapa de produção de vídeo documentário.

As aulas experimentais foram realizadas no Laboratório de Águas (LabÁguas), localizado no prédio do Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Metodologias para Análise de Petróleos (LabPetro) da Universidade Federal

Tabela 1. Situações-problema levantadas pelos estudantes

Aluno	Situação-problema
Aluno 3	<i>Primeiro, teríamos que procurar a classificação do resíduo e depois achar a composição para saber o que fazer.</i>
Aluno 7	<i>Qual a composição química da lama?</i>
Aluno 9	<i>Seria possível fazer uma filtragem na água do rio?</i>

Tabela 2. Hipóteses levantadas pelos alunos

Aluno	Hipóteses
Aluno 9	<i>O ideal seria separar esses dois componentes (hematita e areia) e tentar aplicá-los de diferentes formas.</i>
Aluno 11	<i>Eu já vi um trabalho que usava lama para fazer madeira plástica.</i>
Aluno 9	<i>Eu conheço trabalhos que utilizam como corante para indústria têxtil.</i>
Aluno 10	<i>Na feira de ciências deste ano foi utilizado carvão ativado para filtragem de corantes, talvez pudéssemos fazer o mesmo com a lama.</i>
Aluno 3	<i>Se separar os dois componentes principais talvez seja possível utilizá-los como reagentes.</i>

do Espírito Santo (UFES, Campus, Goiabeiras). A estrutura do LabPetro está dividida no LabSerV e no Núcleo de Competências em Química do Petróleo (NCQP).

2.2.1. Grupo A: produção de sais de ferro a partir do rejeito

Para realização deste experimento os estudantes relataram que utilizaram dos conhecimentos prévios adquiridos na disciplina química analítica quantitativa e se basearam em uma proposta de aula experimental referente à análise de metal em amostra de solo, segundo metodologia proposta por BACCAN *et al.* (2001).²⁶ A amostra de rejeito foi seca em estufa a temperatura de 80 °C por 24 horas para retirada de umidade. Em dois béqueres de teflon foram pesadas 10,0 g do rejeito e adicionou-se 50,0 mL de solução 8,6 mol L⁻¹ de HCl em um dos béqueres, e no outro, 50,0 mL de uma solução 4,35 mol L⁻¹ de H₂SO₄. Ambas foram deixadas a 80 °C durante 2h. Em seguida, filtrou-se as respectivas soluções e transferiu para balão volumétrico de 100,00 mL completando-se o volume com água destilada.

Para determinação de ferro utilizou-se 10,00 mL da solução da amostra, na qual foram adicionados 50,0 mL de água destilada. Aqueceu-se até ebulição e adicionou-se aproximadamente 3,0g de Zn em pó, sob constante agitação, para reduzir íon Fe³⁺ a Fe²⁺, até o desaparecimento da coloração amarela da solução. Na solução, a temperatura ambiente, foram adicionados 20,0 mL de uma solução de mistura ácida (H₂SO₄ e H₃PO₄), 5 gotas do indicador (difenilamina) e titulou-se com uma solução padrão de dicromato de potássio 0,0100 mol L⁻¹.

2.2.2. Grupo B: rejeito de mineração como adsorvente

O segundo grupo abordou o uso do rejeito de mineração como adsorvente. A amostra de rejeito de mineração foi seca na estufa a 105 °C por 24 horas para retirada de água que interfere no processo de adsorção. O experimento foi montado com 0,5 g do adsorvente em 50,0 mL de solução de azul de metileno na concentração de 10,0 mg L⁻¹. A influência do pH foi avaliada em soluções de pH igual a: 2, 4, 6 e 8. A solução foi mantida sob agitação (25 °C), e em determinado intervalo de tempo de 15, 30, 45 e 60 minutos foram retiradas alíquotas para análise da concentração do corante em espectrofotômetro UV/Visível Modelo DR5000 da HACH, no comprimento de onda 660 nm na região do visível, relacionada ao grupo cromóforo do corante.

2.2.3. Grupo C: rejeito de mineração suportado sobre o papel de filtro

Os estudantes planejaram a elaboração de filtros adsorventes contendo o rejeito de mineração suportado sobre o papel de filtro para investigar a retenção do corante azul de metileno. Estes experimentos foram adaptados em um planejamento fatorial²². A partir da solução estoque, foram preparadas soluções de azul de metileno nas concentrações 2, 4, 8 e 16 mg L⁻¹. Os ensaios de adsorção consistiram em percolar a solução do corante pelo rejeito de mineração.

A solução do corante foi adicionada lentamente sobre o rejeito suportado em papel de filtro e o líquido percolado coletado para análise. A influência do pH na adsorção foi avaliada com soluções em pH 4 e 9. Os experimentos foram realizados à temperatura ambiente e a concentração de azul de metileno foi determinada por espectrofotometria UV-Vis após ser percolada.

No último encontro (E5) foi realizada a oficina de edição de vídeos, abordando o uso do software de edição SHOTCUT e a montagem das filmagens produzidas pelos estudantes para a entrega do produto audiovisual final. Neste encontro ocorreram as etapas 8 e 9 do ciclo ABRP (argumentação e aplicação) na qual os alunos argumentaram a respeito das aplicações dos materiais obtidos a partir dos rejeitos de mineração do cenário (Etapa 1).

3. Resultados e Discussões

3.1. Caracterização do resíduo

Na caracterização da amostra de resíduo de mineração por difração de raios X, Figura 2, observa-se a presença de fases cristalinas bem definidas. É possível identificar a presença de hematita (Fe₂O₃) e quartzo (SiO₂) como componentes majoritários, de acordo com picos característicos em 2θ, identificados pelas fichas JCPDS número 13-534 e 5-0490, respectivamente. A presença de caulinita (Al₄Si₄O₁₀(OH)₈), em teores mais baixos é identificada pelo pico 12,52°, em 2θ.²⁷ A caulinita é um argilomineral, geralmente encontrada nos minérios e apresenta sítios de adsorção positivo (AlOH²⁺) ou negativo (AlO⁻), diretamente relacionados com o pHPCZ.^{28,29}

Na Figura 3 é possível observar os valores de pH inicial e pH final das amostras de adsorventes, após 24h de agitação. O valor de pHPCZ foi calculado como a média aritmética dos pontos que apresentaram valores de pH finais constantes, ou seja, onde não se observa uma variação significativa do pH, após a solução atingir o equilíbrio.²²

O valor de pHPCZ encontrado para o rejeito de mineração foi de 5,6 e significa que neste valor de pH a carga elétrica líquida total na superfície do rejeito é nula. Quando o valor de pH da solução ficar acima de 5,6 a tendência é de aumentar as cargas variáveis negativas na superfície da amostra de rejeito, e como consequência ocorre a adsorção de substâncias catiônicas. Em valores abaixo de 5,6 as cargas positivas predominam na superfície da amostra de rejeito e a adsorção de substâncias aniônicas prevalecem.

A Figura 4 mostra os espectros de infravermelho da amostra de resíduo de mineração, com a presença de bandas características em 694 e 796 cm⁻¹ relacionadas ao estiramento vibracional do grupo O-Al-OH,³⁰ e bandas em 911, 1031 e 1112 cm⁻¹ atribuídas ao estiramento vibracional do Si-O da caulinita. A banda em 694 cm⁻¹ também é atribuída às vibrações Fe-O da hematita, entretanto, as bandas características aparecem nas regiões abaixo de

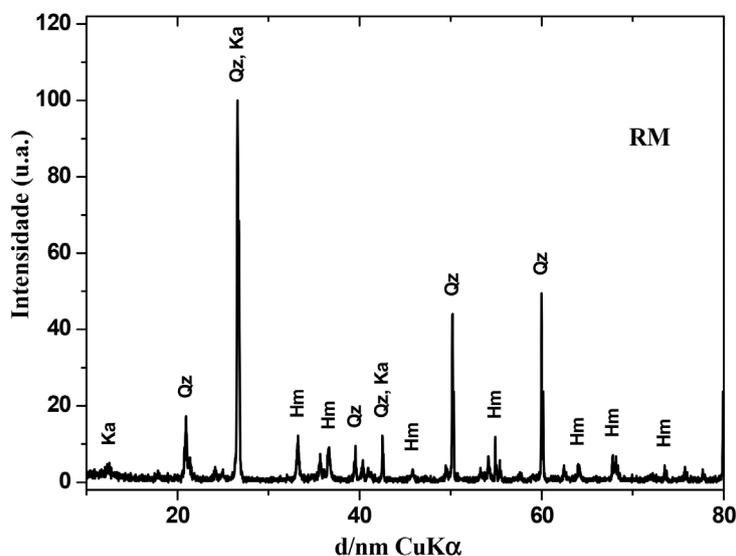


Figura 2. Difratograma de raios-X do resíduo de mineração (Hm = Hematita, Qz = Quartzo e Ka = Caulinita)

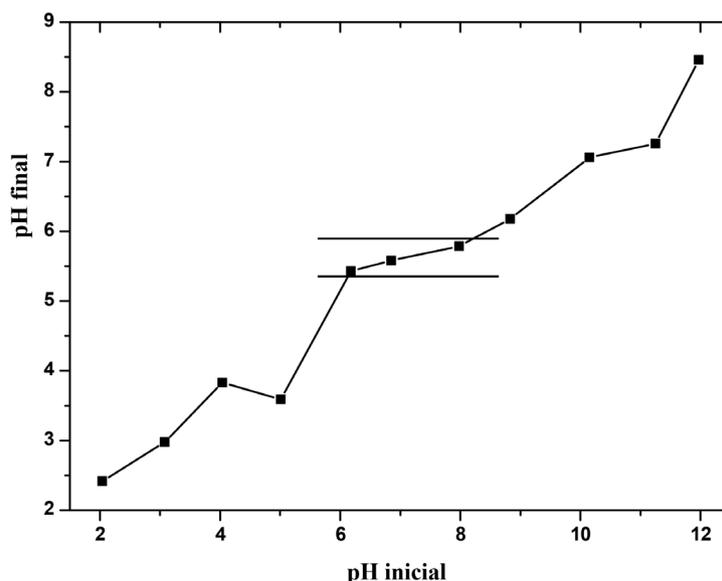


Figura 3. Gráfico de pH final versus pH inicial para determinação do ponto de carga zero (pHPCZ) do resíduo de mineração

600 cm^{-1} , nas quais os modos vibracionais da ligação Fe-O são observados. Na região entre 3600 e 3700 cm^{-1} é observado duas bandas bem definidas, associadas a ligações de hidroxila a alumínio (Al-OH), na caulinita.^{28,29}

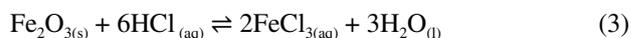
Os resultados da caracterização do resíduo de mineração mostram um subproduto enriquecido com compostos que podem ser aproveitados em outros processos, valorizando o aproveitamento e reduzindo seu descarte nas barragens.

3.2. Grupo A: reagentes de ferro para aulas experimentais

Os estudantes se basearam em seus conhecimentos prévios de química analítica como reações químicas e volumetria de oxirredução, descritos por Baccan *et al.* (2001)²⁶, para realizar os experimentos e produzir soluções

de cloreto de ferro (III) e sulfato de ferro (III) para serem utilizadas em aulas experimentais da universidade.

As reações químicas entre os óxidos e hidróxidos de ferro (representado por Fe_2O_3) presentes no rejeito de mineração com HCl e H_2SO_4 são mostradas em (3) e (4):



Para a análise do teor de ferro nas duas soluções dos compostos (cloreto de ferro (III) e sulfato de ferro (III)), obtidas a partir do rejeito, o ferro presente na solução foi reduzido com a adição de zinco metálico (Zn_m) (5) para ser titulado com dicromato de potássio, segundo as reações dos íons ferrosos e o dicromato de potássio (6):

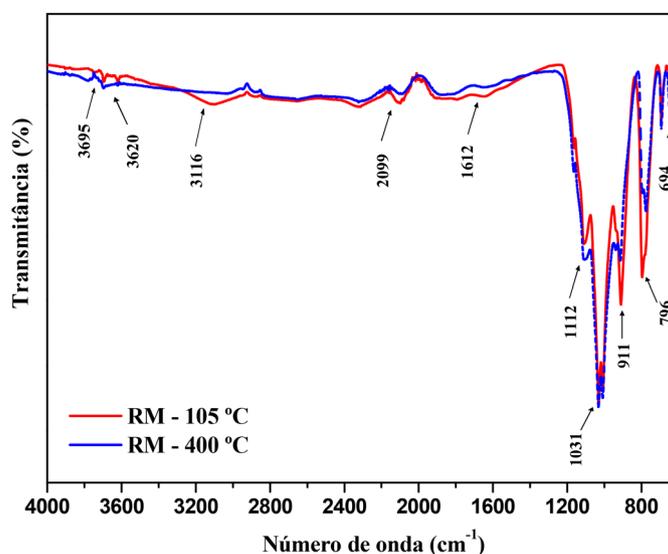
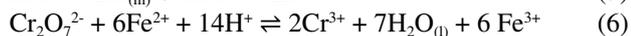
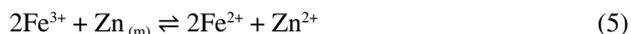


Figura 4. Espectros de infravermelho da amostra de resíduo de mineração, após tratamentos a temperaturas de 105 °C e 400 °C por 2 horas



Neste caso, o excesso de zinco metálico é consumido pela adição de ácido clorídrico concentrado e aquecimento, não interferindo na reação.³¹ Com esse procedimento, a solução torna-se transparente, sem nenhuma suspensão e o ponto final pode ser facilmente identificado.

A eficiência do processo de produção da solução do cloreto de ferro (III) e sulfato de ferro (III) foram avaliados pela concentração de ferro nas soluções, calculadas a partir dos volumes obtidos na titulação com dicromato de potássio. Os resultados mostraram que o rejeito bruto apresenta aproximadamente 11,01% de ferro extraído com HCl e 2,41% de ferro extraído com H₂SO₄ (Tabela 3). Os resultados obtidos foram inferiores ao encontrado por Bressiani *et al.* (2020)⁸ pela metodologia de digestão ácida em uma amostra de resíduo de mineração da Usina de Candonga (18,49%), assim como os resultados obtidos por Figueiredo *et al.* (2019)³² utilizando análise por fluorescência de raios X (22%).

Tabela 3. Características químicas da solução do cloreto de ferro (III) e sulfato de ferro (III)

Material	Fe	FeCl ₃	Fe	Fe(SO ₄) ₃
	% (em massa)			
Solução	11,01	31,95	2,41	8,63

Com a análise quantitativa de ferro, é possível calcular a produção de cloreto de ferro (III) (FeCl₃) e sulfato de ferro (III) (Fe₂(SO₄)₃) que atingiu 319,5 g e 86,3 g por kg de rejeito, respectivamente. Foi utilizado para decomposição da amostra sólida o método de aquecimento com soluções aquosas de ácidos fortes, em frascos abertos. Segundo Skoog *et al.* (2006) os reagentes mais comuns utilizados

na decomposição de analitos inorgânicos em frasco aberto são os ácidos clorídrico e sulfúrico. O ácido clorídrico é excelente para amostras inorgânicas, apesar de possuir uma aplicação limitada na decomposição de materiais orgânicos. É amplamente utilizado para dissolver óxidos metálicos e foi mais eficiente para extração de ferro do rejeito de mineração.³³ O ácido sulfúrico (H₂SO₄) é bastante usado em amostras orgânicas e biológicas, apresenta elevado poder oxidante, porém cinética de reação mais lenta. Normalmente é utilizado associado a outros ácidos para otimização do processo de decomposição de amostras sólidas.³⁴ Estas características justificam as diferenças com relação ao rendimento apresentado na extração do ferro neste trabalho. Verificamos que os custos de produção dos reagentes a partir do rejeito de minério de ferro, corresponde a aproximadamente o preço do produto, sem levar em conta o custo energético de evaporação para obter a concentração férrea esperada.

Dessa forma, a produção da solução de cloreto de ferro (III) e sulfato de ferro (III) é uma alternativa promissora para o reaproveitamento de parte do rejeito de mineração de ferro proveniente do acidente de Mariana (MG) e armazenado no aterro de empilhamento de rejeito na Fazenda Florestas para utilização em aulas experimentais de química analítica.

3.3. Grupo B: rejeito de mineração como adsorvente

O segundo grupo tratou da utilização do rejeito de mineração como adsorvente. As Figuras 5 e 6 apresentam os gráficos de remoção do corante azul de metileno em função do pH da solução, após 15, 30 e 60 minutos. Pela análise dos gráficos foi possível verificar a eficiência da amostra de rejeito no processo de adsorção. Pode-se observar que o resultado foi satisfatório nos valores de pH estudados, com adsorção significativa e crescente nos primeiros 15 minutos. Em pH 2, a eficiência de remoção em

15 minutos foi de 57%, atingido uma remoção máxima de 68% em 60 minutos. Verifica-se um aumento na adsorção do corante a medida que aumenta o pH e o tempo de reação, alcançando valores acima de 98% de eficiência de remoção em pH = 8. Segundo Baccan *et al.* (2001)²⁶, em valores de pH acima de 6 pode ocorrer a formação de espécies pouco solúveis de $\text{Fe}(\text{OH})_x$, que precipitam, removendo o ferro livre da solução. Estas espécies pouco solúveis, em suspensão no líquido, podem provocar uma certa turbidez da solução, o que interfere nos resultados obtidos na espectrofotometria.

Em pH 6 e 8, a amostra apresentou remoção de corante acima de 91% e 98%, respectivamente. Estes resultados satisfatórios estão de acordo com o valor de pHP CZ da amostra. Acima de 5,6 a tendência é aumentar as cargas variáveis negativas na superfície do rejeito, ocorrendo a adsorção de substâncias catiônicas como o corante azul de metileno presente na solução.

3.4. Grupo C: rejeito de mineração suportado sobre o papel de filtro

O terceiro grupo de estudantes preparou um meio filtrante duplo para estudar uma melhor retenção do corante. Avaliaram o uso do papel de filtro associado a camada do resíduo de mineração. O papel de filtro foi suportado por um funil de vidro, e em seguida foi adicionado o rejeito de mineração, que foi denominado auxiliar de filtração, ou ainda, coadjuvante de filtração, que se destina a reter o corante.

Realizaram experimentos de filtração combinados com estatística para um planejamento fatorial completo 2² com objetivo de avaliar os efeitos de dois fatores: pH da solução e massa de adsorvente utilizada, como fatores que influenciam na concentração de azul de metileno na solução.

Os efeitos dos fatores foram calculados comparando a porcentagem de adsorção (% Ads) obtida através dos valores

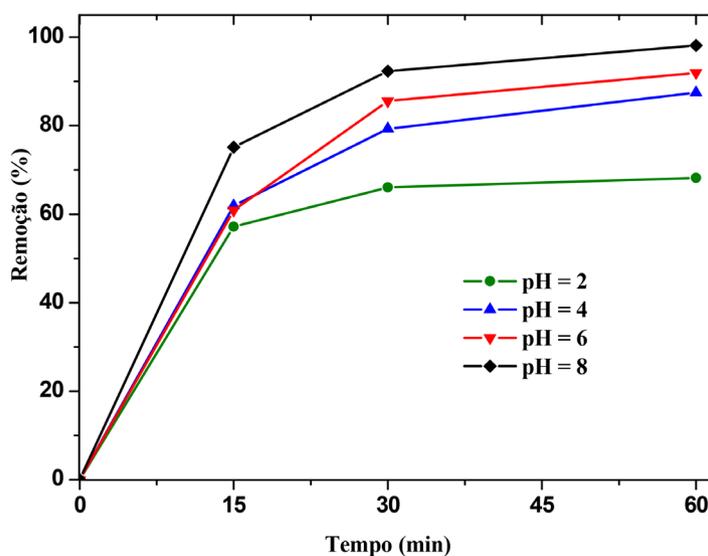


Figura 5. Gráfico de remoção do corante azul de metileno em função do pH

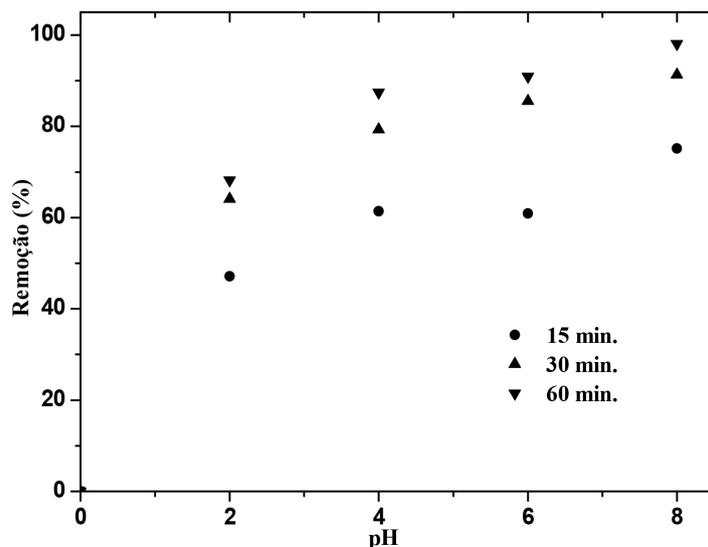


Figura 6. Gráfico de remoção do corante azul de metileno em função do pH e do tempo

de absorvância iniciais (Abs_i) e finais (Abs_f) de acordo com a seguinte equação (7)

$$\% \text{ Ads} = \frac{\text{Abs}_i - \text{Abs}_f}{\text{Abs}_i} \times 100 \quad (7)$$

Os valores das concentrações das soluções de azul de metileno e da massa de adsorvente foram fixados de maneira a viabilizar a realização das análises, pois concentrações muito altas de corante dificultam a leitura no espectrofotômetro e quantidades menores do adsorvente poderiam modificar de maneira quantitativa o sistema hidrodinâmico. Os valores de porcentagem de adsorção (% Ads) são apresentados na Tabela 4.

Cabe destacar que a adsorção é um processo de interação de uma espécie denominada adsorbato com outra contendo sítios adsorventes. Os dados obtidos (Tabela 4) demonstram que para uma solução de concentração 2 mg L⁻¹ de corante são necessárias 50,0 mg de adsorvente para remover 100% do corante azul de metileno da solução, independente do pH. Conforme relatado por Resende (2013)¹⁴, para uma determinada concentração inicial de soluto, aumentando a quantidade de adsorvente, obtêm-se maior área superficial disponível para adsorção, e, por consequência, maior a eficiência de adsorção. Verifica-se que na adsorção da solução de concentração 2 mg L⁻¹, com remoção de 100% de todo azul de metileno, existe ainda uma grande quantidade de locais disponíveis para que ocorra a adsorção. Ao aumentar a concentração de azul de metileno, mantendo a massa do rejeito constante, mais espécies estarão distribuídas na superfície do adsorbato, contribuindo com uma maior formação de ligações químicas na superfície. Com o aumento da concentração do adsorvente, diminui a eficiência de adsorção, indicando uma saturação dos pontos de adsorção. Verifica-se que para uma solução de azul de metileno em concentração superior a 4 mg L⁻¹ é necessária uma quantidade maior de massa de adsorvente presente no filtro, pois 50 mg de adsorvente não

são suficientes para adsorver todo o corante. A adsorção ocorreu de forma mais eficiente utilizando uma massa de 100 mg de adsorvente, independente do pH, removendo 100,0% do azul de metileno presente na solução.

Para concentração de 8 mg L⁻¹ de azul de metileno as condições mais eficientes para a remoção 99,3% do corante foram 100 mg de rejeito de mineração e pH = 4. Em concentrações superiores a 8 mg L⁻¹ a remoção do corante passa a depender do pH do meio. Na concentração de 16 mg L⁻¹, a melhor eficiência na filtração foi 100 mg de rejeito de mineração, independente do pH da solução, alcançando 98,0% de remoção do corante na solução.

Os valores de efeito de cada fator escolhido foram obtidos por intermédio da planilha estatística sugerida por Teófilo e Ferreira (2006),³⁵ na qual foi possível inferir o valor do efeito de cada fator escolhido para análise (Tabela 5).

Analisando os valores dos efeitos, nota-se que os efeitos principais 1 (pH) e 2 (massa) e o efeito de interação entre eles são bastante significativos, sendo a massa a variável mais influente na eficiência da remoção do corante. Vale salientar que os efeitos com valores negativos inferem que o aumento do nível inferior para o superior diminui a resposta e, neste caso, a eficiência da filtração. Os valores positivos dos efeitos sugerem que o aumento do nível inferior para o superior aumenta também a eficiência da filtração (Tuzen, 2018).³⁶ Estes resultados indicam que o resíduo se revela como um adsorvente promissor nas condições estudadas. A partir dos resultados obtidos, o uso de rejeito de mineração de ferro como adsorvente de corante presente em efluentes têxteis poderá contribuir com a minimização dos impactos sobre o meio ambiente.

3.5. Produção de vídeos e feedbacks

Na discussão inicial utilizou-se um questionamento diagnóstico sobre o rejeito, com o objetivo de facilitar o

Tabela 4. Resultados do planejamento fatorial 2² para estudar o efeito do pH e massa de adsorvente em um filtro de adsorção para remoção de azul de metileno.

#	x ₁	x ₂	2 mg L ⁻¹	4 mg L ⁻¹	8 mg L ⁻¹	16 mg L ⁻¹
			% Ads			
1	4	50	100,0%	99,1%	99,0%	92,5%
2	9	50	100,0%	99,0%	96,4%	96,9%
3	4	100	100,0%	100,0%	99,3%	98,0%
4	9	100	100,0%	100,0%	99,0%	98,0%

Tabela 5. Valores de efeito referentes a cada fator do ensaio estudado (pH e massa)

	Concentração			
	2 mg L ⁻¹	4 mg L ⁻¹	8 mg L ⁻¹	16 mg L ⁻¹
Média	100%	99,53%	98,43%	96,35%
1	0	-0,05	-1,45	2,2
2	0	0,95	1,45	3,3
12	0	0,05	1,45	-2,2
Nível de significância	0,05	0,05	0,05	0,05

diálogo e articulação das metodologias como proposta de intervenção didático-pedagógica para promover contextualização e despertar o interesse dos alunos pelo tema. Após planejamento e desenvolvimento de estratégias para minimizar a problemática do acúmulo de rejeitos, os estudantes finalizaram com a produção de um vídeo documentário sobre a situação-problema principal com ênfase no reaproveitamento do resíduo de mineração. A partir da análise dos conteúdos abordados nos vídeos e nos depoimentos durante a apresentação em sala de aula, foi possível observar a construção de conhecimento científico em relação ao rejeito de mineração e aos temas sociocientíficos e ambientais estudados.

A inserção da cultura digital ocorreu durante o processo de gravação dos vídeos dos experimentos e apresentação das soluções propostas para o cenário. Nesta etapa ocorreu o acesso, produção, comunicação de informações e conhecimentos onde os alunos utilizaram de habilidades e competências adquiridas nas abordagens utilizadas e conseguiram se expressar, exercer protagonismo e autoria utilizando de tecnologias digitais de informação.

Segundo Clebsch e Mors (2004),³⁷ as discussões geradas na produção do conteúdo audiovisual suscitam uma ponte para o desenvolvimento cognitivo dos estudantes, que convivem com as exigências do uso da habilidade visual e do processamento dinâmico das informações.

Com relação ao levantamento dos depoimentos, destacamos os alunos, (A11) “A lama é composta majoritariamente por sílica e por ferro, ou seja, não contém componentes que apresentam toxicidade”; e (A5) “O material presente nas barragens é inerte, ou seja, não contém componentes tóxicos, é composto em sua maior parte por sílica, que é areia, e não apresenta nenhum componente químico danoso à saúde humana” que demonstram bom entendimento sobre o assunto.

A consciência socioambiental é evidenciada pela percepção dos alunos em relação aos rompimentos de barragens, suas consequências para a população local e o interesse pessoal em propor formas de reaproveitamento dos rejeitos como inferem os alunos (A10) “Partindo disso, podemos propor formas de reaproveitamento dos rejeitos de minério”; e (A7) “Na feira de ciências desse ano foi utilizado carvão ativado para filtragem de corantes, que são efluentes têxteis. Talvez pudéssemos fazer o mesmo com a lama, assim é possível tratar outro resíduo utilizando um resíduo”.

O conhecimento científico relacionado aos materiais desenvolvidos pode ser evidenciado a seguir: (A10) “Para fazer a análise do teor dos produtos obtidos adicionou-se zinco metálico nas soluções para que esse ferro de oxidação três reduzisse para oxidação dois tornando viável a titulação com dicromato de potássio”; e (A5) “ao final da etapa de filtração a solução estava incolor e foi analisado por espectrofotometria UV-vis, apresentando baixos valores de absorvância. Isso significa que o azul de metileno foi adsorvido pelo rejeito de minério durante a filtração com porcentagens maiores que 95%”.

Na etapa da avaliação global do processo cíclico da ABRP, as respostas do debate final demonstraram que o trabalho em equipe beneficiou o desenvolvimento da atividade educacional, como inferiu o aluno (A11): “Trabalhar em grupo, incentiva o trabalho colaborativo durante a pesquisa e a análise de informações”. De acordo com Barbosa e Soares (2004),³⁸ as tarefas que requerem maior interação entre os estudantes melhoram efetivamente seu aprendizado.

Desenvolver capacidade de trabalhar em equipe é uma das habilidades importantes da ABRP e AMI, sendo crucial para o desempenho de atividades profissionais. Esta habilidade evidenciou os pontos fortes de cada integrante da equipe, como o espírito de liderança, capacidade de extroversão, capacidade de escutar, afinidade com escrita e capacidade de organização. A partir de questões-problema elaboradas pelos discentes e dos resultados obtidos é possível constatar que o interesse dos alunos pelas informações e conteúdos ao longo das etapas da ABRP, permitiram relacionar os conhecimentos adquiridos durante a pesquisa ao seu cotidiano, percebendo a importância e utilidade dos materiais produzidos. Esta dinâmica de interação é fator determinante para despertar interesse e apresenta potencial para utilização conforme ressalta o aluno (A8): “Esse tipo de metodologia favorece a aprendizagem devido à quebra de paradigma na sala de aula e faz com que o aluno aprenda de forma criativa”. Os alunos puderam compreender e explicar a realidade, usando informações confiáveis para defender suas propostas de reaproveitamento dos rejeitos, além de exercitarem sua capacidade cognitiva e criativa e utilizar da ciência para elaborar e testar hipóteses, formular e resolver problemas e criar soluções práticas.³⁹

4. Considerações Finais

Na etapa inicial de caracterização da amostra de rejeito de mineração, por difratometria de raios X foi possível verificar a presença de picos característicos de hematita (Fe_2O_3) e quartzo (SiO_2) e, em menor quantidade de caulinita, de acordo com as bandas que indicam a presença de alumina (Al_2O_3) e quartzo (SiO_2) nos espectros de FT-IR.

Os estudantes apresentaram alternativas promissoras para a utilização do rejeito de mineração no sentido de minimizar o problema das barragens. Uma das alternativas foi a preparação de reagentes de ferro para utilização em aulas experimentais. Obteve-se uma solução de 11,0% de ferro extraído com HCl e 2,4% de ferro quando extraído com H_2SO_4 . Esta alternativa abre a possibilidade de substituir reagentes químicos utilizados no preparo da solução de ferro por rejeito de mineração. Outra alternativa apresentada foi em relação a aplicação do resíduo de mineração na remoção do corante azul de metileno em solução aquosa. Verificou-se em pH 6 e 8, uma eficiência de remoção do corante de 95% que caracteriza uma excelente eficiência na adsorção

do corante, mostrando ser esta uma alternativa promissora na destinação do resíduo de mineração, além de sugestão para o tratamento dos efluentes de indústrias que utilizam corantes. O procedimento utilizando o rejeito de mineração como auxiliar de filtração, demonstrou que a partir de 100,0 mg de rejeito foi possível adsorver até 98,0% do corante azul de metileno em concentração até 16 mg L⁻¹, independente do pH utilizado. A produção de material didático, na forma de vídeo documentário, ressaltou a importância da reutilização desses materiais.

Os resultados obtidos na presente pesquisa, empregando a abordagem AMI associada a ABRP indicam a importância da criação de espaços para uma aprendizagem mais significativa, permitindo ao estudante exercitar atitudes e procedimentos para resolver uma situação-problema, além de aproximá-lo da realidade ambiental. A intervenção educacional favoreceu o aprimoramento de habilidades e competências dos estudantes e contribuiu com a resolução da situação-problema, a comunicação e o trabalho em equipe, a produção de vídeo documentário, tomada de decisão, responsabilidade e consciência socioambiental, compreensão e avaliação das mídias e veículos de informação e comunicação.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos estudantes do quinto período de licenciatura em química que aceitaram participar dessa pesquisa, à UFES, CAPES, FAPES, Rede Candonga e ao NCQP pelo suporte financeiro, em especial ao laboratório de águas e ao laboratório de Difração de Raios-X do NCPQ.

Referências Bibliográficas

- Kunz, A.; Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. *Química Nova* **2002**, *25*, 78. [CrossRef]
- Ministério de Minas e Energia (2001). *Normas Reguladoras de Mineração*. Departamento Nacional de Produção Mineral. RJ: Diário Oficial da União. Disponível em: <<https://supremoambiental.com.br/wp-content/uploads/2016/10/portaria-n.-237-dnpm-2001-normas-reguladoras-de-mineracao-nrm.pdf>>. Acesso em: 23 dezembro 2020.
- Cordeiro, M. C.; Garcia, G. D.; Rocha, A. M.; Tschoeke, D. A.; Campeão, M. E.; Appolinario L. R.; Soares, A. C.; Leomil, L.; Froes, A.; Bahiense, L.; Rezende, C. E.; Almeida, M. G.; Rangel, T. P.; Oliveira, B. C. V.; Almeida, D. Q. R.; Thompson, M. C.; Thompson C. C.; Thompson F. L.; Insights on the freshwater microbiomes metabolic changes associated with the world's largest mining disaster. *Science of The Total Environment* **2019**, *654*, 1209. [CrossRef] [PubMed]
- Losekann, C.; Mayorga, C.; *Desastre na Bacia do Rio Doce: desafios para a universidade e para instituições estatais*. Folio Digital: Rio de Janeiro, 2018.
- Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial de União. Brasília, DF: Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 23 dezembro 2020.
- Pires, J. M. M.; Lena, J. C.; Machado, C. C.; Pereira, R. S.; Potencial poluidor de resíduo sólido da Samarco Mineração: estudo de caso da barragem de Germano. *Revista Árvore* **2018**, *27*, 393. [CrossRef]
- Associação Brasileira de Normas Técnicas; *NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação*. Rio de Janeiro, 2004.
- Bressiani, T. S. C.; Oliveira, M. L. de; Rainha, K. P.; Santana, I. L.; Barros, J. R. P. M.; Lelis, M. F. F.; Moura, P. R. G.; Aprendizagem baseada em projetos na disciplina tratamento de resíduos e meio ambiente: um estudo de caso. *Revista Virtual de Química* **2020**, *12*, 356. [CrossRef]
- Martins, P. F. F.; Morais, C. A.; Lameiras, F. S.; Albuquerque, R. O.; Silica and iron recovery from a residue of iron ore flotation. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering* **2017**, *5*, 153. [CrossRef]
- Cardoso, K. A. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal de Santa Catarina, 2012. [Link]
- Lopes, F. A.; Miotelli, H.; Schneider, I. A. H.; Menezes, J. C. S. S.; *Resumos do 26º Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa Poços de Caldas-MG*, Poços de Caldas, Brasil, 2015.
- Souza, K. C.; Antunes, M. L. P.; Adsorção do corante reativo azul 19 em solução aquosa por lama vermelha tratada quimicamente com peróxido de hidrogênio. *Química Nova* **2013**, *36*, 651. [CrossRef]
- Furlan, F. R.; *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.
- Resende, S. M.; *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal de São João del Rei. Ouro Branco, 2013.
- Freire, P.; *Pedagogia da autonomia: Saberes necessários à prática educativa*. 25a ed. Paz e Terra: São Paulo, 1996.
- Santos, W.; Schnetzler, R.; *Educação em Química: compromisso com a cidadania*. 1a. ed., Editora Ijuí: Porto Alegre, 2000.
- Wilson, C.; Grizzle, A.; Tuazon, R.; Akyempong, K.; Cheung, C.; *Alfabetização midiática e informacional: currículo para formação de professores*. UNESCO, UFTM: Brasília, 2013. [Link]
- Camargo, F. Daros, T.; *A sala de aula inovadora: estratégias pedagógicas para fomentar o aprendizado ativo*. Penso: Porto Alegre, 2018.
- Delizoicov, D.; La educación en ciencias y la perspectiva de Paulo Freire. *Alexandria Revista de Educação em Ciência e Tecnologia* **2008**, *1*, 37. [Link]
- Araújo, U.; Sastre, G. (Eds.). *Aprendizagem baseada em problemas no ensino superior*. São Paulo: Summus Editorial, 2009.
- Vasconcelos, C.; Almeida, A.; *Aprendizagem Baseada na Resolução de Problemas no Ensino das Ciências: Propostas de trabalho para Ciências Naturais, Biologia e Geologia*. 1a ed., Coleção Panorama. Porto: Porto Editora, 2012

22. Ribeiro, L. R. C.; *Aprendizagem Baseada em Problemas (PBL): uma experiência no ensino superior*. 1a. ed. E-book. EdUFSCar: São Carlos, 2008.
23. Guillarduci, V. Mesquita, J. P. Martelli P. B.; Gorgulho, H. F.; Adsorção de fenol sobre carvão ativado em meio alcalino. *Química Nova* **2006**, *29*, 1226. [[CrossRef](#)]
24. Reis, D. L.; *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal do Espírito Santo, 2020.
25. Overton, T. L.; Randlesb, C. A.; Beyond problem-based learning: using dynamic PBL in chemistry. *Chemistry Education Research and Practice* **2015**, *16*, 251. [[CrossRef](#)]
26. Baccan, N. Andrade, J. C., Godinho, O. E. S., Barone, J. S.; *Química Analítica Quantitativa Elementar*. Ed. 3a ed. Edgard Blücher Ltda: São Paulo, 2001.
27. PCPDFWIN. International Center for Diffraction Data. 1996. Version 1.20 JCPDS-ICCD.
28. Castellano, M.; Turturro, A.; Riani, P.; Montanari, T.; Finocchio, E.; Ramis, G.; Busca, G.; Bulk and surface properties of commercial kaolins. *Applied Clay Science* **2010**, *48*, 446. [[CrossRef](#)]
29. Zhang, L.; Lu, Q.; Xu, Z.; Liu, Q.; Zeng, H.; Effect of polycarboxylate ether comb-type polymer on viscosity and interfacial properties of kaolinite clay suspensions. *Journal of Colloid and Interface Science* **2012**, *378*, 222. [[CrossRef](#)]
30. Nakamoto, K.; *Infrared and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds*. 4a. Ed. John Wiley & Sons: New York, 1986.
31. Lichtig, J.; Rocha, M.; Táboas, R. G. Z.; Röpke, S.; Determinação Permanganométrica de Íons Fe³⁺ com o uso de Zinco Metálico como Redutor - Uma Contribuição ao Ensino de Química Analítica. *Química Nova* **1998**, *21*, 659. [[CrossRef](#)]
32. Figueiredo, M. D.; Lameiras, F. S.; Ardisson, J. D.; Araujo, M. H.; Teixeira, A. P.; Tailings from Fundão tragedy: physical-chemical properties of the material that remains by the Candonga Dam. *Integrated Environmental Assessment and Management* **2019**, *1*, 4227. [[CrossRef](#)]
33. Skoog, D. A.; West, D. M., Holler, F. J.; Crouch, S. R.; *Fundamentos de Química Analítica*. 8a. ed. São Paulo: Editora Thomson: São Paulo, 2006.
34. Krug, F. J.; *Métodos de preparo de amostras: fundamentos sobre o preparo de amostras orgânicas e inorgânicas para análise elementar*. 1a ed. Brasil, Edit: SBQ: Brasil, 2010.
35. Teófilo, R. F.; Ferreira, M. M. C.; Quimiometria II: planilhas eletrônicas para cálculos de planejamentos experimentais, um tutorial. *Química Nova* **2006**, *29*, 338. [[CrossRef](#)]
36. Tuzen, M. A.; Simple, Rapid and Green Ultrasound Assisted and Ionic Liquid Dispersive Microextraction Procedure for the Determination of Tin in Foods Employing ETAAS. *Food Chemistry* **2018**, *245*, 380. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
37. Clebsch, A. B.; Mors, P. M.; Explorando recursos simples de informática e audiovisuais: Uma experiência no ensino de Fluidos. *Revista Brasileira de Ensino de Física* **2004**, *26*, 323. [[CrossRef](#)]
38. Barbosa, R. M. N.; Soares, Z. M.; Cooperative learning and chemistry teaching – a partnership which works. *Ciência e Educação* **2004**, *10*, 55. [[CrossRef](#)]
39. Bacich, L.; Moran, J.; *Metodologias ativas para uma educação inovadora: uma abordagem teórico prática*, 1a. ed., Penso: Porto Alegre, 2018.