ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

Desempenho fotocatalítico de material álcali-ativado à base de lama vermelha e escória de alto forno

Photocatalytic performance of alkali-activated material based on red mud and blast furnace slag

Sara Nuza Oliveira dos Reis Gonçalves
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) | Araxá | Brasil | saranuzaeng@gmail.com
Maysa Lorena Figueiredo Martins
Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) | Ouro Preto | Brasil | maysalfm@gmail.com
Paulo Roberto Ribeiro Soares Junior
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) | Araxá | Brasil | pauloroberto.rsoares@gmail.com
Domingos Sávio de Resende
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) | Araxá | Brasil | saviores@cefetmg.br
Augusto Cesar da Silva Bezerra
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) | Belo Horizonte | Brasil | augustobezerra@cefetmg.br

Resumo

Uma das preocupações da indústria da mineração é a grande quantidade de resíduos gerados. Além de causar impactos ao meio ambiente, esses resíduos ocupam extensas áreas para disposição final. Na mesma linha, o tratamento de águas residuárias se torna casa vez mais desafiador, em vista da diversidade de contaminantes. O presente trabalho investigou o desempenho de materiais álcali-ativados (MAAs) aplicados à descontaminação de água, com precursores à base de lama vermelha e escória de alto forno. O MAA foi desenvolvido visando otimização das relações precursor-ativador. A caracterização das matérias primas indicou granulometria composta por partículas finas, alta concentração de elementos formadores de rede e presença de goethita fotoativa. Os resultados reportaram resistência à compressão até 27 MPa, o que indicou matriz álcali-ativada coesa. A remoção de compostos orgânicos atingiu 96,5% e foi confirmada pela descoloração da solução de corante. Além disso, o processo de fotocatálise pode ser o principal mecanismo para descontaminação. Esses achados podem auxiliar no desenvolvimento de novos materiais sustentáveis de baixo custo para aplicações ambientais.

Palavras-chave: Material álcali-ativado. Lama vermelha. Escória granulada de alto forno. Fotocatálise. Descontaminação de água.

Como citar:
REIS GONÇALVES, Sara Nuza Oliveira dos; FIGUEIREDO MARTINS, Maysa Lorena; RIBEIRO SOARES JUNIOR, Paulo Roberto; RESENDE, Domingos Sávio de; BEZERRA, Augusto Cesar da Silva. Desempenho fotocatalítico de material álcali-ativado à base de lama vermelha e escória de alto forno. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

Abstract

One of the concerns in the mining industry is the large amount of waste generated. In addition to environmental impacts, this waste takes up large areas for final disposal. Furthermore, wastewater treatment becomes increasingly challenging, given the diversity of contaminants. This study investigated the performance of alkali-activated materials (AAMs) applied to water decontamination, with precursors based on red mud and blast furnace slag. AAM was developed aiming at optimizing precursor-activator ratios. The characterization of the raw materials indicated particle size composed of fine particles, high concentration of network-forming elements and presence of photoactive goethite. The results reported strength up to 27 MPa, which indicated a cohesive alkali-activated matrix. The removal of organic compounds reached 96.5% and was confirmed by the discoloration of the dye solution. Additionally, the photocatalysis process may be the main mechanism for decontamination. These findings can promote the development of new low-cost, sustainable materials for environmental applications.

Keywords: Alkali-activated material. Red mud. Blast furnace slag. Photocatalysis. Water decontamination.

INTRODUÇÃO

As pesquisas relacionadas à conservação ambiental ganham atenção devido à necessidade de reduzir o uso de recursos não renováveis e promover um futuro sustentável [1]. As mudanças climáticas impulsionam a busca por recursos sustentáveis e medidas para reduzir impactos são importantes [2]. O reaproveitamento de resíduos é uma alternativa para um ambiente limpo e sustentável. Empresas podem utilizar resíduos, tendo uma gestão eficiente [3] e assim, estarão próximas de uma produção limpa [4].

A mineração exerce um papel fundamental na economia, porém, uma preocupação é o volume de resíduos gerados. Para diminuir este passivo é necessária uma destinação para estes materiais, ou seja, agregar valor por meio da utilização em outras indústrias [5]. A construção civil consome grandes volumes de recursos e tem grande potencial para absorver resíduos.

A lama vermelha (LV) é gerada no beneficiamento da bauxita para produção de alumina e são produzidas anualmente 120 milhões de toneladas [6]. Este resíduo é classificado como tóxico devido a elevada basicidade, tornando difícil o descarte. Observa-se que a maior parte da LV são estocadas em barragens ou em lagoas de rejeitos, o que representa um risco para o meio ambiente. Diante deste cenário, a reutilização da lama vermelha torna-se de grande interesse. Embora o caráter básico restrinja a incorporação da LV em alguns materiais de construção, sintetizar materiais álcali-ativados (MAA) é uma opção, uma vez que a alcalinidade e a presença dos óxidos Al_2O_3, Fe_2O_3 e SiO_2 são necessários para produção dos MAA.

Glukhovsky e Rostovskaja [7] propôs um mecanismo geral para explicar o processo de ativação alcalina em materiais constituídos por sílica e alumina reativa. O modelo é composto por reações de dissolução, coagulação, condensação e cristalização. O primeiro passo consiste na quebra das ligações covalentes Si-O-Si e Al-O-Si, que acontece quando a solução de elevado pH entra em contato com os materiais ricos em aluminossilicatos, de modo que esses compostos são transformados em uma fase

coloidal. Em seguida, ocorre acumulação dos produtos das quebras de ligações, que simultaneamente interagem entre eles para formar uma estrutura coagulada, conduzindo à terceira fase com geração de estrutura condensada e, com o tempo desenvolve a cristalização.

A LV contém material alcalino e aluminossilicatos, assim apresenta um potencial para síntese de MAA. No entanto, a razão molar SiO_2/Al_2O_3 da LV é menor que o necessário para uma boa formulação. Portanto, para produzir um material estável, é necessário utilizar outros silicatos ativos ou aluminossilicatos para regular a dosagem. Diante disto, neste trabalho foi incorporada escória granulada de alto forno (EGAF) na mistura. A EGAF é um produto da fabricação do ferro gusa, sua formação ocorre pela combinação das impurezas do minério de ferro, fundentes (calcário e dolomita) e as cinzas de carvão mineral [8]. O subproduto apresenta composição química próxima a do cimento, o que o torna interessante para ativação alcalina.

Além da valorização de resíduos que seriam dispostos ao meio ambiente, os ligantes alternativos podem ter aplicações além das convencionais. Esse aspecto se relaciona com desempenho otimizado e pode ser atribuído a propriedades avançadas como autolimpeza, autocura, armazenamento de energia e degradação de contaminantes [9]. Esse contexto se alinha aos atuais anseios por redução nas emissões ao meio ambiente, sobretudo à contaminação dos cursos de água. Os processos oxidativos avançados têm sido aplicados com sucesso em remediação ambiental, principalmente a fotocatálise [10]. Nesse processo, a energia dos fótons de luz solar ou ultravioleta é utilizada como força motriz para geração de radicais livres, por exemplo superóxido ($O_2^{\cdot-}$), hidroxila ($OH^{\cdot}$) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2), que atacam contaminantes, sobretudo moléculas orgânicas. O TiO_2 é comumente utilizado como fotocatalizador, ainda assim, outros óxidos de metais de transição possuem atividade fotocatalítica como a goethita [11].

Apesar de extensas pesquisas no campo da valorização de resíduos, as aplicações não convencionais de ligantes alternativos têm sido pouco investigadas. O presente estudo avaliou o potencial descontaminante de materiais álcali-ativados à base de lama vermelha e escória de alto forno. Os parâmetros que afetam a reação de álcali-ativação e os efeitos na resistência mecânica foram investigados. O potencial descontaminante foi avaliado pela degradação de corante orgânico em solução sintética através de processo fotocatalítico.

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

2.1. MATERIAIS

Para a produção do MAA foram utilizados como precursores a LV doada pela empresa Hindalco e a EGAF doada pela empresa Supermix. Como ativador foi utilizado hidróxido de sódio P.A. em micro pérolas (com pureza maior ou igual a 97%) comercializado pela Neon Comercial Ltda sob o CAS n° 1310-73-2, com peso molar 40,00 g; este reagente foi dissolvido em água destilada na concentração 8 M. Para a confecção dos efluentes

sintéticos foi utilizado corante orgânico azul de metileno hidratado P.A. (Color Index – CI 52015), comercializado pela Neon Comercial Ltda sob o CAS nº 122965-43-9.

2.2. CARACTERIZAÇÃO DOS PRECURSORES

Optou-se por utilizar a LV em seu estado natural e apresentava-se úmida. Foi determinada a umidade para quantificar a água contida na amostra, conforme prescrito pela norma [12]. A água presente na LV foi incorporada na mistura, descontando na quantidade de água adicionada para o preparo da solução ativadora. A EGAF, da forma que foi fornecida, já se encontra seca e moída.

A determinação do tamanho das partículas foi realizada por granulometria a laser no CILAS 1090, executada com obscuração de 12 a 13% e 60 s de dispersão por ultrassom. A composição química da lama vermelha e da escória foi realizada por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) utilizando o equipamento EDX-720 da Shimadzu. Difrações de raios X (DRX) foram executadas no equipamento XRD-7000 da Shimadzu, as variáveis de análise foram ângulo 2θ de 5º a 100º, passo de 0,02º e tempo de análise pontual igual a 3 segundos. A identificação dos picos de DRX foi realizada por meio do software EVA, com a utilização do banco de dados cristalográfico aberto (COD).

2.3. ALCALI-ATIVAÇÃO E ENSAIOS MECÂNICOS

Foi utilizado o planejamento de experimentos de misturas (DOE) do software Minitab, que além de auxiliar na determinação das proporções, avalia o desempenho dos materiais em função da composição de cada formulação. Foram impostos limites inferiores e superiores para LV e EGAF: LV ≥ 0,2; 0,2 ≤ EGAF ≥ 0,8. A existência de limites inferiores e superiores no modelamento impossibilita o uso de experimentos do tipo simplex, comumente adotado em modelamento de misturas. Portanto, foi empregado o DOE do tipo vértices extremos, no qual consiste na seleção dos vértices e dos vários pontos centrais (fases e centro).

Sabe-se que o processo de álcali ativação é dependente das frações molares dos principais componentes construtores de rede (SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 e CaO), por isso na Tabela 1 são mostradas as misturas propostas, bem como as principais relações molares em cada uma. De acordo com a teoria, a razão molar SiO_2/Al_2O_3 da lama vermelha é menor que o necessário para uma formulação satisfatória de um MAA; assim, a ativação de sistemas com 100% deste precursor não foi avaliada.

Tabela 1: Proporções de mistura e principais relações molares.

Nº	(%LV/EGAF)	SiO_2/Al_2O_3	$SiO_2/(Al_2O_3 + Fe_2O_3)$	CaO/SiO_2
G1	0,35/0,65	4,05	2,70	1,47
G2	0,65/0,35	3,24	1,95	0,74
G3	0,80/0,20	2,98	1,74	0,42
G4	0,20/0,80	4,74	3,46	1,89
G5	0,50/0,50	3,58	2,25	1,09

Fonte: Os autores.

A relação molar ideal para SiO_2/Al_2O_3 está entre 3,3 e 4,5 para que o precursor seja apropriado para a produção de material álcali ativado [13-14]. Visto que as relações molares SiO_2/Al_2O_3 propostas para este trabalho estão próximas deste intervalo (3,3 a

4,5), não foi necessário utilizar silicato de sódio para aumentar a proporção de sílica. Portanto, foi empregada somente solução de hidróxido de sódio como ativador.

A relação ativador/precursor foi fixada em 0,50, pois foi o índice com melhor trabalhabilidade (avaliada qualitativamente) para as pastas produzidas. Para o preparo da solução ativadora, o NaOH foi dissolvido em água para atingir a concentração de 8 mol/l, ficando em repouso por 24 h. Após o período de repouso, o ativador foi homogeneizado por cinco minutos. Em seguida, foi adicionada a lama vermelha e escória de alto forno. Toda a mistura foi manualmente misturada e vibrada para obter uma pasta homogênea e viscosa.

As pastas foram vertidas em moldes cilíndricos de PVC (Ø interno de 21 mm x 42 mm de altura) e vibradas por 10 minutos cada, visando a expulsão das bolhas de ar da pasta, para obter um material com mínimo de poros possível. Todos os corpos de prova (CP) foram identificados por etiqueta, e protegidos por plástico filme. Após três dias foram desenformados, os CP foram armazenados por 28 dias em temperatura ambiente. Os ensaios mecânicos foram realizados com auxílio da máquina universal de ensaios EMIC DL-300.

2.4. ENSAIO DE POTENCIAL DESCONTAMINANTE

Esse ensaio foi executado com emprego de uma câmara de emissão UV com duas lâmpadas Philips BL TL-D 15W/10 como fonte de luz UV; esse tipo de lâmpada emite luz na faixa UVA do espectro, com pico de emissão em λ=364 nm.

Para avaliar a degradação de soluções orgânicas foi necessário criar um parâmetro de calibração. Para isso, foram preparadas soluções aquosas de azul de metileno com concentrações conhecidas: 40; 20; 10; 5; 2,5 e 1,25 mg/l; e foram analisadas por espectrofotometria em $325<\lambda<800$ nm, no equipamento Genesys-30 da Thermo-Fisher Scientific; e os picos encontrados para absorbância foram utilizados para determinar a equação linearizada. A partir desta equação, qualquer outro valor de absorção de luz encontrado durante o ensaio poderá ser atribuído a uma respectiva concentração de azul de metileno.

Para avaliar a descontaminação de água, o ensaio foi composto por duas fases, uma de adsorção no escuro e outra de análise de potencial fotocatalítico sob ação de luz UV. Na primeira fase, um CP de cada traço foi submerso em soluções de azul de metileno, com concentração inicial de 40 mg/l e os béqueres foram dispostos na câmara fechada. Alíquotas de 3ml foram coletadas das soluções após 24 h do início do ensaio para monitorar as mudanças em absorbância das soluções de azul de metileno por espectrofotometria e correlacioná-las às respectivas concentrações.

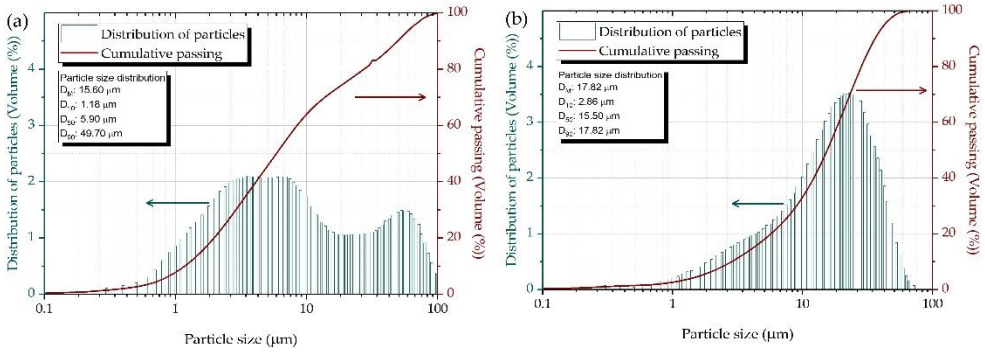
A segunda etapa consistiu em utilizar um novo CP de cada grupo e novas soluções de azul de metileno a 40 mg/l foram adicionadas aos béqueres com estes novos CPs, que foram levados novamente à câmara de ensaio, mas dessa vez somente sob ação de luz UV. Assim, as concentrações das soluções foram monitoradas por espectrofotometria, como feito na etapa anterior. Para avaliar qualitativamente a descoloração das soluções, após decorrido 24 h do início de cada etapa, foram registradas fotografias das amostras.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS PRECURSORES

A lama vermelha apresentou umidade igual a 33,32%. As curvas de distribuição granulométrica da lama vermelha e da escória granulada de alto forno estão mostradas na Figura 1. A maior parte da lama vermelha empregada neste estudo é composta por partículas finas, sendo 90% composta por partículas com tamanhos abaixo de 49,70 µm.

Figura 1: Curva de distribuição granulométrica (a) lama vermelha e (b) escória granulada de alto forno.



Fonte: Os autores.

Os principais óxidos presentes na lama vermelha e na escória granulada de alto forno são apresentados na Tabela 2. Os principais óxidos presentes na LV são os óxidos de alumínio, silício e de ferro, conforme reportado por [15]. Em adição, a lama contém sódio, cálcio e óxido de titânio [16]. O sódio e o cálcio presente na lama são provenientes do processo Bayer, que maximiza a concentração de alumínio [17]. Com relação a composição química da EGAF, foi possível observar uma porcentagem maior de óxido de cálcio, silício e alumínio.

Tabela 2: Composições químicas.

Componente (%)	LV	EGAF
SiO_2	35,0	25,7
Al_2O_5	21,9	6,9
Na_2O	11,5	-
K_2O	0,5	0,6
CaO	1,2	60,6
MgO	-	2,3
Fe_2O_3	26,3	0,5
TiO_2	2,7	0,4
SO_3	0,3	1,7
MnO	-	0,7
SrO	-	0,4
BaO	-	0,3
Outros*	0,4	1,3

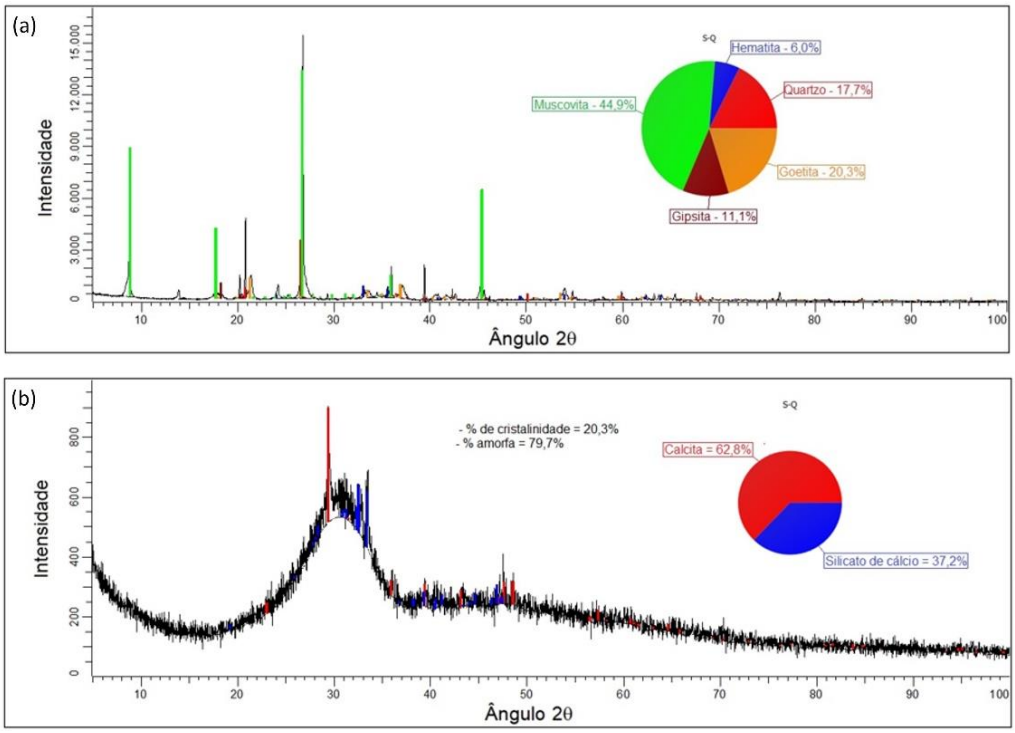
Nota: * Óxidos com porcentagem menor que 0,2%. Fonte: Os autores.

Os minerais que compõem a lama vermelha foram revelados por DRX (Fig. 2 (a)): A partir desta avaliação semiquantitativa, percebe-se que a lama vermelha exibe uma

composição mineralógica muito complexa, sendo os principais minerais identificados: 17,7% de Quartzo (SiO_2), 6,0% de Hematita (Fe_2O_3), 44,9% de Muscovita 2M1 ($KAl_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2$), 11,1% de Gipsita ($Al(OH)_3$), 20,3% Goetita - (FeO(OH)).

A escória pode ser considerada um material predominantemente amorfo (79,7%), como pode ser observado na Figura 2 (b). O difratograma deste material não apresenta picos característicos, e dessa forma, há praticamente uma ausência de um arranjo ordenado e periódico de átomos. A estrutura amorfa da EGAF evidenciada neste ensaio mostra o potencial para gerar um MAA, porque o caráter amorfo aumenta a reatividade [18].

Figura 2: DRX dos resíduos (a) lama vermelha (b) escória granulada de alto forno.



Fonte: Os autores.

A reatividade das partículas está relacionada a vários fatores, como composição química e cristalinidade [19]. Para materiais cimentícios, o tamanho das partículas é um atributo importante [20], e quanto menor o tamanho das partículas do material, mais reativo será, considerando a mesma composição química e cristalinidade. Apesar da ausência de padrões internacionais para o tamanho máximo de partículas de precursores para determinar a reatividade adequada na ativação alcalina, a literatura indica que a fineza para este fim é semelhante a granulometria apresentada por materiais empregados em cimentos suplementares, como pozolanas. Além disto, precursores mais finos podem produzir misturas mais homogêneas e consequentemente, originar matrizes menos porosas. Vale destacar que, segundo a norma brasileira [21], para um material ser considerado pozolânico ele deve ser composto por 20% de partículas com tamanhos abaixo de 45 µm.

3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS ÁLCALI-ATIVADOS

Na Tabela 3 são mostrados os valores obtidos no ensaio de resistência à compressão realizado aos 28 dias. Como esperado, nota-se que existe evidências de correlação entre o aumento da proporção de escória de alto forno e a maior resistência mecânica observada para os MAAs. Foi observado que o traço composto por 80% de lama vermelha e 20% de escória de alto forno (0,80; 0,20), apresentou valores de resistência à compressão baixos quando comparado com os resultados obtidos para os outros traços; isso indica que não ocorreu reação de álcali-ativação em níveis significativos para este traço.

Tabela 3: Valores obtidos no ensaio de resistência à compressão.

Mistura	Proporção de Lama Vermelha (LV) x Escória de Alto forno (EGAF)				
	(0,35; 0,65)	(0,65; 0,35)	(0,80; 0,20)	(0,20; 0,80)	(0,50; 0,50)
	G1	G2	G3	G4	G5
CP 1	16,23	6,91	1,55	23,14	11,10
CP 2	12,62	5,55	1,61	27,43	8,65
CP 3	15,85	7,29	1,19	25,43	8,81
CP 4	16,17	4,52	2,45	19,43	12,97
CP 5	20,94	6,65	2,19	24,56	12,36
$\overline{x}$	16,36	6,18	1,80	24,00	10,78
σ	2,66	1,01	0,46	2,67	1,78

Nota: Valores de resistência à compressão expressos em MPa, $\overline{x}$ - média e σ – desvio padrão.

É possível observar que os MAAs com menores relações molares SiO_2/Al_2O_3 - Grupo G2 e G3 (conforme Tabela 1) - apresentaram menores valores para a resistência mecânica. Do ponto de vista do ramo da construção civil e da substituição do cimento, estes MAAs devem ser limitados a aplicações sem funções estruturais, as quais aceitam cimentos com resistências abaixo de 20 MPa aos 28 dias. De um modo geral, o MAA com maior relação molar – Grupo G4 (conforme Tabela 1), composto por 80% de escória de alto forno e 20% de lama vermelha, apresentou um bom valor de resistência à compressão ($\overline{x}$ ≈ 24 MPa) que o torna uma alternativa para suprir determinadas demandas na área cimentícia.

Os testes fotocatalíticos foram realizados para investigar a capacidade do material álcali-ativado em degradar compostos orgânicos. Esta investigação foi feita através da correlação dos dados obtidos das curvas de degradação do corante azul de metileno (Figuras 3a e 3b) com as fotografias registradas das amostras (Figura 4).

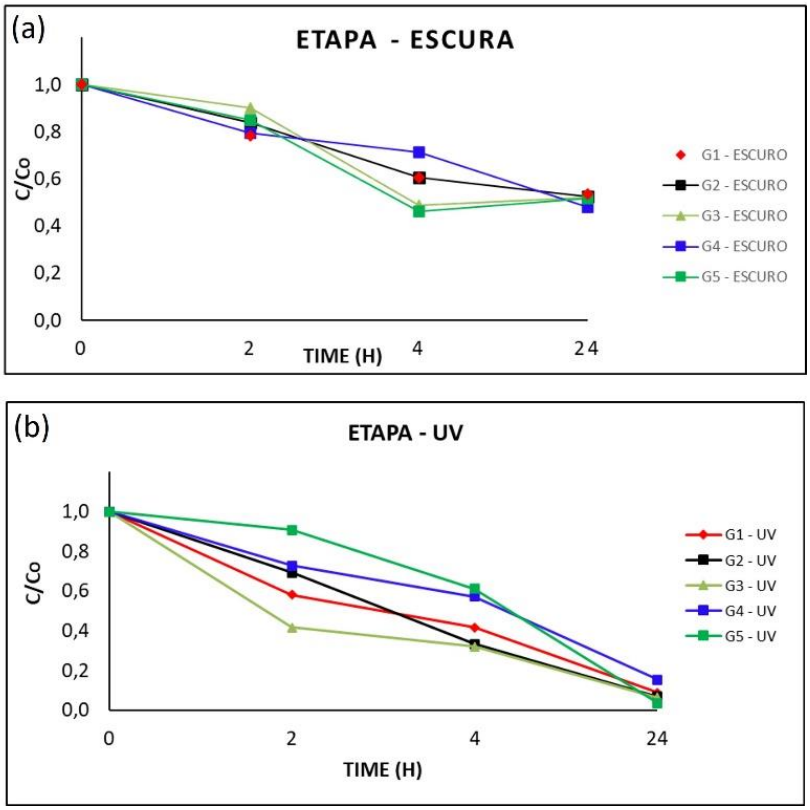
A primeira fase do ensaio consistiu em avaliar a degradação do corante azul de metileno sem a ação da luz UV. Observa-se na Figura 3a que houve uma degradação parcial da solução dentro do período de 24 horas para todos os grupos avaliados (G1=46,4%, G2=47,6%, G3=47,9%, G4=51,9% e G5=48,2%). Este fato pode estar associado a processos de adsorção.

A segunda fase do ensaio consistiu em analisar o potencial fotocatalítico dos materiais álcali ativados sob a ação da luz UV. Com relação as concentrações encontradas na Figura 3b, para o período final de 24 horas, obteve degradação do corante de G1=91,2%, G2=93,2%, G3=93,7%, G4=84,6% e G5=96,5%. A partir destes resultados,

observa-se que a degradação do corante foi intensificada no sistema que estava sob ação da luz UV. No final desta etapa, algumas soluções foram praticamente limpas dos contaminantes orgânicos.

Outro parâmetro para avaliar a descontaminação de um efluente líquido que contém corante é a avaliação da cor da solução. Ainda que essencialmente qualitativa, esse tipo de análise torna evidente a discussão dos mecanismos e taxas de degradação observados [22]. Vale ressaltar que dependendo do material que promove a descontaminação, podem surgir fases intermediárias durante a degradação (ou desmetilação) do AM por fotocatálise, que poderá ser convertido em Azure B, Azure A, Azure C e Tionina.

Figura 3: Curvas de degradação do corante azul de metileno no escuro e sob ação da luz UV.



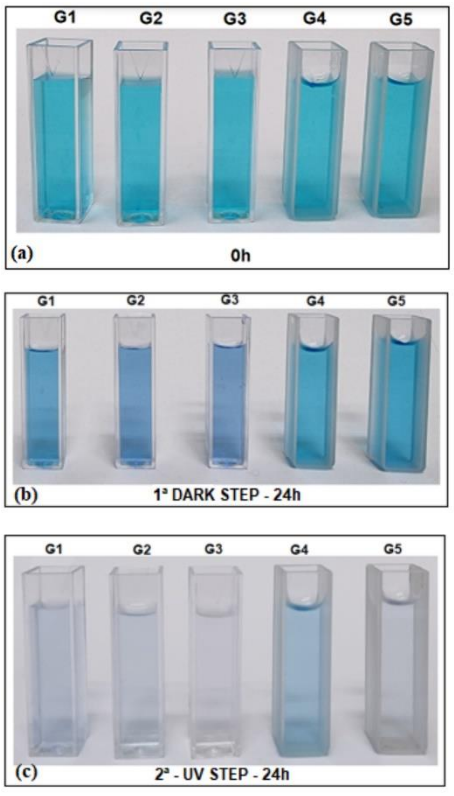
Fonte: Os autores.

Na Figura 4 (a) são mostradas as soluções no tempo 0h (antes do ensaio) para servir como parâmetro para análise da coloração das soluções nas próximas etapas. Na Figura 4 (b) são apresentadas as soluções na primeira etapa (escura) do ensaio no tempo 24 h. É possível observar uma pequena variação na tonalidade do grupo G3 devido ao aumento da concentração de TN no intervalo de 4 a 24 h. Segundo Marbán et al. [23], à medida que a desmetilação ocorre, as soluções podem ficar com tons de azul mais escuros, podendo atingir tons de roxo se a formação de tionina for considerável. Além disso, para sistemas eficientes, a degradação pode ocorrer até que as soluções fiquem transparentes, o que indica que os corantes orgânicos foram completamente degradados em CO_2 + água [24-26].

Na Fig. 4 (c) são apresentadas as soluções utilizadas na segunda etapa (sob ação da luz UV). Apesar de todas as soluções terem sofrido intensa descoloração após 24 h no UV, defende-se que G2, G3 e G5 são os melhores MAAs para serem empregados em processos de descontaminação de água.

Vale ressaltar que os três melhores MAAs para descontaminação possuem uma proporção de lama vermelha maior em sua composição (amostras dos grupos G2, G3 e G5) e o MAA com o pior resultado foi aquele com menor quantidade de LV (amostra do grupo G4). A lama vermelha é um resíduo que tem sido bastante empregado em trabalhos que envolvem os processos fotocatalíticos, pois este processo utiliza o semicondutor TiO_2 contida na lama vermelha para a descontaminação ambiental e tratamento de efluentes líquidos e ou gasosos. O dióxido de titânio (TiO_2) é usualmente o mais empregado na fotocatálise pois reuni características como resistência à corrosão, fotoestabilidade e estabilidade química, o que garante sua eficiência e estabilidade em diferentes condições reacionais e capacidade de continuar plenamente ativo sob situações de repetido uso.

Figura 4: (a) Soluções de azul de metileno antes do ensaio (b) Soluções de azul de metileno após etapa escura (c) Soluções de azul de metileno após etapa UV.



Fonte: Os autores.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho investigou o potencial fotocatalítico de MAAs à base de lama vermelha e escória de alto forno. A partir do programa experimental e resultados alcançados, podem ser extraídas as seguintes conclusões:

1. A formulação (G4) com 20% de lama vermelha e 80% de escória atingiu a maior resistência mecânica (27 MPa). Isso indica alto nível de álcali-ativação para está proporção, que gerou uma microestrutura coesa.
2. O MAA removeu entre 85% e 96% de azul de metileno sob luz UV, o que indica alta eficiência de descontaminação.
3. Sugere-se que o processo de fotocatálise seja o principal mecanismo responsável pela degradação de corante, justificado pela presença de 20,3% de goethita na lama vermelha.

Nesse contexto, este trabalho mostrou que é possível obter MAAs com propriedades especiais a partir da valorização de resíduos industriais, o que contribui para impulsionar o desenvolvimento de novos materiais sustentáveis aplicados ao tratamento de águas residuárias.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) por seu apoio para participação no evento e com infraestrutura de equipamentos [Convênio: PCE-00405-24, APQ-01425-22 e RED-00191-23], e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo incentivo de produtividade em pesquisa [Convênio: PQ 316846/2023-6], bem como à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) [Código de Financiamento 001].

REFERÊNCIAS

[1] NIŽETIĆ, Sandro et al. Smart technologies for promotion of energy efficiency, utilization of sustainable resources and waste management. **Journal of Cleaner Production**, v. 231, p. 565-591, 2019.

[2] NIDHEESH, P. V.; KUMAR, M. Suresh. An overview of environmental sustainability in cement and steel production. **Journal of Cleaner Production**, v. 231, p. 856-871, 2019.

[3] CHERTOW, Marian; PARK, Jooyoung. Reusing nonhazardous industrial waste across business clusters. In: **Waste**. Academic Press, 2011. p. 197-206.

[4] MIKULČIĆ, Hrvoje; BALETA, Jakov; KLEMEŠ, Jiří Jaromír. Sustainability through combined development of energy, water and environment systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 251, p. 119727, 2020.

[5] YELLISHETTY, Mohan et al. Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: A case study. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 52, n. 11, p. 1283-1289, 2008.

[6] ABL, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO. **Estatísticas**. 2019. Disponível em: https://abal.org.br/estatisticas/. Acessado em: outubro de 2022.

[7] GLUKHOVSKY, V. D.; ROSTOVSKAJA, G. S.; RUMYNA, G. V. High strength slag-alkaline cements. In: **Proceedings of the seventh international congress on the chemistry of cement**. 1980. p. 164-168.

[8] GRUEN, Richard. Blast Furnace Slag. **Scientific American**, v. 125, n. 16, p. 273-273, 1921.

[9] ZHANG, Yao Jun et al. Geopolymer-based catalysts for cost-effective environmental governance: A review based on source control and end-of-pipe treatment. **Journal of cleaner production,** v. 263, p. 121556, 2020.

[10] LEE, Seul-Yi; PARK, Soo-Jin. TiO2 photocatalyst for water treatment applications. **Journal of industrial and engineering chemistry**, v. 19, n. 6, p. 1761-1769, 2013.

[11] KAKUTA, Seiji; NUMATA, Taiki; OKAYAMA, Toru. Shape effects of goethite particles on their photocatalytic activity in the decomposition of acetaldehyde. **Catalysis Science & Technology**, v. 4, n. 1, p. 164-169, 2014.

[12] ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo-Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, 2016.

[13] DAVIDOVITS, Joseph. Geopolymers: inorganic polymeric new materials. **Journal of Thermal Analysis and calorimetry,** v. 37, n. 8, p. 1633-1656, 1991.

[14] KHALE, Divya; CHAUDHARY, Rubina. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. **Journal of materials science**, v. 42, n. 3, p. 729-746, 2007.

[15] SILVEIRA, Nathália CG et al. Red mud from the aluminium industry: production, characteristics, and alternative applications in construction materials—a review. **Sustainability**, v. 13, n. 22, p. 12741, 2021.

[16] XU, Xiaohong et al. The microstructure and properties of ceramic tiles from solid wastes of Bayer red muds. **Construction and Building Materials**, v. 212, p. 266-274, 2019.

[17] TABEREAUX, Alton T.; PETERSON, Ray D. Aluminum production. In: **Treatise on process metallurgy**. Elsevier, 2024. p. 625-676.

[18] LAU, Chee Keong et al. Investigation of geopolymers containing fly ash and ground-granulated blast-furnace slag blended by amorphous ratios. **Construction and Building Materials**, v. 222, p. 731-737, 2019.

[19] SOARES, Marcela Maira NS et al. The effect of calcination conditions on the physical and chemical characteristics of sugar cane bagasse ash. **REM: Revista Escola de Minas**, v. 67, p. 33-39, 2014.

[20] TAVARES, Ludmila Rodrigues Costa et al. Influence of quartz powder and silica fume on the performance of Portland cement. **Scientific reports**, v. 10, n. 1, p. 21461, 2020.

[21] ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos, 2015.

[22] HAJJAJI, W. et al. Natural Portuguese clayey materials and derived TiO2-containing composites used for decolouring methylene blue (MB) and orange II (OII) solutions. **Applied Clay Science**, v. 83, p. 91-98, 2013.

[23] MARBÁN, Gregorio; VU, Tan T.; VALDÉS-SOLÍS, Teresa. A simple visible spectrum deconvolution technique to prevent the artefact induced by the hypsochromic shift from masking the concentration of methylene blue in photodegradation experiments. Applied Catalysis A: General, v. 402, n. 1-2, p. 218-223, 2011.

[24] RAUF, Muhammad A. et al. Photocatalytic degradation of Methylene Blue using a mixed catalyst and product analysis by LC/MS. **Chemical Engineering Journal**, v. 157, n. 2-3, p. 373-378, 2010.

[25] YOGI, Chihiro et al. Photocatalytic degradation of methylene blue by TiO2 film and Au particles-TiO2 composite film. **Thin Solid Films**, v. 516, n. 17, p. 5881-5884, 2008.

[26] ZHANG, Tianyong et al. Photooxidative N-demethylation of methylene blue in aqueous TiO2 dispersions under UV irradiation. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, v. 140, n. 2, p. 163-172, 2001.