

NANOMATERIAIS APLICADOS À REMOÇÃO DE METAIS EM ÁGUA: UMA BREVE REVISÃOAna Carolina Boacina de Freitas^{1*}Amanda das Graças Barbosa^{2*}Alberthmeiry Teixeira de Figueiredo^{3*}

Resumo: A poluição por metais pesados nos sistemas hídricos tornou-se uma preocupação global. A poluição por metais pesados na água surge de atividades antropogênicas, como processos industriais, escoamento agrícola, mineração e descarte inadequado de resíduos. O acúmulo de metais pesados em ambientes aquáticos representa um desafio ambiental, o qual exige abordagens inovadoras para mitigação e controle desses contaminantes. Nesse contexto, avanços no campo da nanociência têm demonstrado grande potencial, tanto nos processos de remoção quanto para a detecção e quantificação de contaminantes de metais pesados. A revisão compila estudos recentes que demonstram o potencial desses nanomateriais na remoção eficiente de metais tóxicos, como chumbo, cádmio, cromo e arsênio, em água contaminada. A relevância ambiental deste estudo está na busca por tecnologias inovadoras, sustentáveis e economicamente viáveis para o tratamento de efluentes, contribuindo para a mitigação da poluição por metais pesados e para a preservação dos recursos hídricos, fundamentais à saúde humana e ao equilíbrio dos ecossistemas aquáticos.

Palavras-chave: metais pesados, nanomateriais, adsorção de metais, tratamento de água.

1 INTRODUÇÃO

Por definição, água potável é toda água que atenda a um padrão de potabilidade previsto em Portarias vigentes e que não ofereça riscos à saúde [1]. No entanto, em razão do aumento da industrialização e do uso excessivo de produtos químicos no mundo todo, diversos poluentes são liberados na água destinada ao consumo humano, transformando-se em uma preocupação coletiva.

Dentre os diversos poluentes da água, os íons metálicos causam efeitos adversos graves à saúde humana e aos organismos vivos. Metais pesados tóxicos

^{1*} Instituto de Química – UFCAT: carolinaboacina@gmail.com

^{2*} Instituto de Química – UFCAT: amandadasgracas60@gmail.com

^{3*} Instituto de Química – UFCAT: alberth@ufcat.edu.br

são elementos metálicos de densidade relativamente elevada, capazes de provocar toxicidade mesmo em baixas doses [2]. A poluição por metais pesados aumentou significativamente nos últimos anos, impulsionada pelo desenvolvimento contínuo das atividades urbanas, industriais e agrícolas. De modo geral, as principais fontes de toxicidade por metais pesados incluem lodo de esgoto, pesticidas, minérios metálicos ferrosos, fertilizantes, resíduos urbanos e a queima de combustíveis fósseis [3,4].

Alguns metais são considerados essenciais à vida, ou seja, a sua ausência pode comprometer a sobrevivência das plantas e animais. Em quantidades adequadas, podem ser considerados macro ou micronutrientes. São exemplos de metais que desempenham essa função o cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), molibdênio (Mo) e zinco (Zn) [5].

Em pequenas quantidades, certos metais pesados (por exemplo, ferro, cobre, cobalto, manganês e zinco) são nutricionalmente essenciais para uma vida saudável, enquanto em níveis mais elevados de concentração a sua presença causa problemas devido ao aumento da toxicidade. Alguns metais são prejudiciais em quaisquer teores como o cromo, mercúrio, arsênio, chumbo etc. [6]

O cromo é encontrado na natureza em três formas estáveis, cromo metálico, cromo trivalente (Cr^{3+}) e cromo hexavalente (Cr^{6+}). O cromo, na forma de íon com carga elétrica $3+$, é um oligoelemento essencial para a saúde humana, contribuindo com a melhora da tolerância à glicose em portadores de diabetes *mellitus* tipo II [7-10]. No entanto, o cromo hexavalente é tóxico e carcinogênico, além de ser responsável por disfunções significativas do sistema digestivo, urinário, respiratório e imunológico do corpo humano. A Organização Mundial da Saúde (OMS) estabeleceu um limite de $0,05 \text{ mg L}^{-1}$ para o Cr^{6+} em águas subterrâneas e superficiais [8, 11].

O arsênio também é altamente perigoso para a saúde humana mesmo em concentrações baixas, na ordem de partes por bilhão (ppb). O mercúrio é extremamente perigoso, e em ambientes aquáticos, encontra-se sob a forma de metilmercúrio. A exposição severa resulta em uma tríade de sintomas: eretismo, tremor e gengivite. Além de afetar principalmente o tecido cerebral [12, 13].

Partículas de chumbo são liberadas na natureza, principalmente por atividades de mineração de metais, baterias de chumbo-ácido, indústrias de papel, vidro e

produtos de limpeza. Para o ser humano, traços de chumbo são mais tóxicos do que outras contaminações por metais pesados e a exposição mesmo em baixas concentrações pode causar efeitos cardiovasculares, renais, reprodutivos e neurológicos [14-16].

Nesta revisão, será abordado os avanços mais recentes nas aplicações de nanomateriais, como nanotubos de carbono, óxidos metálicos, nanopartículas magnéticas e zeólitos para o tratamento de água contaminada com metais pesados.

2 USO DA ADSORÇÃO NO TRATAMENTO DE ÁGUA

Diversas estratégias têm sido empregadas para o tratamento de efluentes contendo esse tipo de resíduo, incluindo processos de precipitação química, troca iônica por meio de resinas sintéticas, separação por membranas, tratamentos eletroquímicos baseados na aplicação de corrente elétrica para a desestabilização dos contaminantes no meio aquoso, além de floculação, coagulação, osmose reversa, processos fotoeletroquímicos, processos de oxidação avançada e métodos biológicos [17].

Dentre essas tecnologias, a adsorção destaca-se como uma das abordagens mais eficientes, quando comparada a métodos como coagulação, oxidação avançada e separação por membranas, tendo demonstrado resultados superiores em diversos estudos reportados na literatura, devido a seu baixo custo, ausência de poluição secundária e eficiência mesmo em concentrações baixas de metais [18, 19, 20].

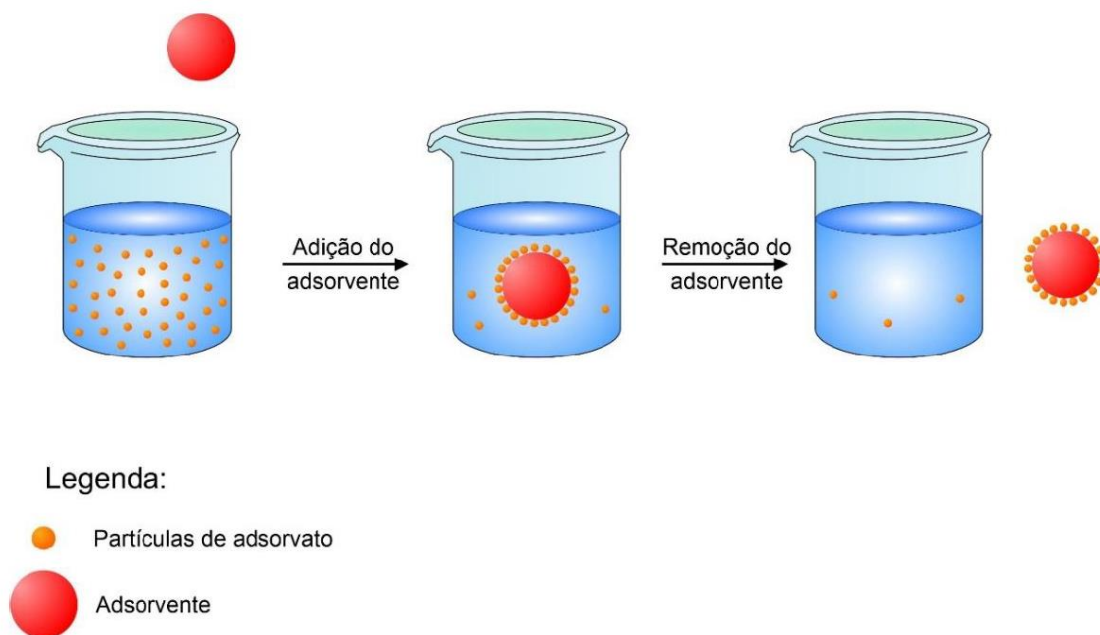
A capacidade de adsorção determina a eficiência e a eficácia das técnicas de adsorção para o tratamento de águas residuais. A capacidade de adsorção refere-se à quantidade de adsorvato que uma determinada massa de adsorvente pode capturar em condições específicas. A capacidade de adsorção é influenciada por uma série de fatores, incluindo características do adsorvente (como área superficial, porosidade e grupos funcionais), propriedades do adsorvato (como tamanho molecular, polaridade e concentração) e as condições em que a adsorção ocorre (incluindo temperatura, pH e tempo de contato) [21, 22].

A adsorção pode ser classificada como fisissorção, no qual a atração é de natureza física e ocorre entre uma superfície sólida e a molécula adsorvida por meio

de interações de Van der Waals, forças de London e dipolo-dipolo, e a quimissorção, também denominada adsorção química, que ocorre quando há transferência de elétrons entre a superfície do sólido adsorvente e o soluto adsorvido (adsorbato), resultando na formação de uma monocamada e uma alta entalpia [23].

Nesse contexto, a adsorção constitui um processo de transferência de massa no qual espécies presentes em uma fase fluida são retidas na superfície de um material sólido em decorrência de interações atrativas entre as fases líquido-sólido. A espécie acumulada na superfície do sólido é denominada adsorbato, enquanto o material sólido responsável pela retenção é denominado adsorvente [24]. A Figura 1 apresenta uma representação esquemática desse mecanismo.

Figura 1 – Representação esquemática do processo de adsorção.



Fonte: BARBOSA, A. G. (2023) [25].

2 MÉTODOS DE ANÁLISE E DETECÇÃO DE METAIS PESADOS

A determinação de metais pesados em níveis de traço, particularmente em amostras de água, pode ser realizada utilizando três abordagens sendo eles, os métodos espectroscópicos, ópticos e eletroquímicos.

Atualmente, as técnicas espectroscópicas mais comumente utilizadas são a espectrometria de absorção atômica em chama (AAS), espectrometria de absorção atômica em forno de grafite (GFAAS), espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) e a espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS). Dentre essas técnicas, a ICP-MS destaca-se como um método multielementar, altamente sensível para a determinação de metais pesados em diferentes matrizes. Para a maioria dos elementos, os limites de detecção podem atingir a faixa de partes por trilhão (ppt), sendo superiores aos obtidos por AAS ou ICP-OES [26].

De modo semelhante, abordagens ópticas, como sensores colorimétricos, espectroscopia baseada em fluorescência e espectrofotometria ultravioleta-visível (UV-Vis) são utilizadas devido à facilidade de uso, uma vez que se baseiam na análise quantitativa de mudanças visuais de cor para a detecção de diferentes metais pesados. Embora sejam de fácil operação, esses métodos tendem a apresentar sensibilidade inferior quando comparados a técnicas analíticas mais avançadas, além de limitações de seletividade [27, 28].

Métodos eletroquímicos são amplamente utilizados para análises *in situ* devido à sua rápida resposta e alta sensibilidade. BANSOD *et al.* [29] publicaram uma revisão sobre métodos eletroquímicos aplicados à análise de metais pesados. Esses métodos incluem técnicas de medição de impedância, eletroquimioluminescência, técnicas potencioestáticas, como amperometria, coulometria e voltametria, além da potenciometria com eletrodos de íons-seletivos, considerada uma das abordagens mais comuns e econômicas.

Contudo, apesar de amplamente difundidos, todos os métodos apresentam limitações e interferências, além de exigir preparo complexo de amostras e alguns dos equipamentos apresentarem alto custo. Nesse contexto, há uma demanda crescente

pelo desenvolvimento de nanomateriais, a fim de incorporar os mesmos nas metodologias analíticas para aumentar a sensibilidade, seletividade e eficiência das técnicas de análise existentes.

3 Nanomateriais para remoção de metais pesados

3.1 Nanotubos de carbono (NTCs)

Os nanotubos de carbono (NTCs) são bastante conhecidos por suas propriedades morfológicas, físicas, térmicas, elétricas e magnéticas, desde que foram relatados por IJIMA em 1991. Estruturalmente, os NTCs consistem em tubos cilíndricos ocos, compostos por átomos de carbono sp^2 , organizados em uma rede hexagonal [30].

Os NTCs são divididos em dois tipos: se constituído por uma única camada de grafeno, são denominados nanotubos de carbono de parede simples (SWCNT), que possuem diâmetro na faixa de 0,4 e 3 nm, quando apresentam múltiplas camadas, são de paredes múltiplas (MWCNT), que possuem dimensões maiores que 100 nm e são classificados como nanotubos de carbono de paredes múltiplas, compostos por vários nanotubos interligados espacialmente [14, 31, 32].

Os NTCs demonstram elevada eficiência na remoção de contaminantes orgânicos tóxicos e metais pesados. A presença de elevada área superficial, de mesoporos e a estrutura oca, proporcionam uma grande quantidade de sítios ativos para adsorção de metais pesados. Além disso, os NTCs apresentam superfícies quimicamente modificáveis, permitindo a otimização da eficiência de remoção por meio da introdução de grupos funcionais que aumentam a área superficial e geram novos sítios de adsorção [14, 32].

ANITHA, NAMSANI E SINGH [33] avaliaram o comportamento de adsorção dos íons de metais pesados Cd^{2+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} e Hg^{2+} em meio aquoso, utilizando nanotubos de carbono de parede simples (SWCNT) funcionalizados com grupos funcionais $-COO^-$, $-OH$ e $-CONH_2$. Os resultados mostram que a capacidade de adsorção é significativamente melhorada com a modificação da superfície dos SWCNT com os grupos funcionais carboxila, hidroxila e amida em comparação com o caso do nanotubo de carbono sem funcionalização. De modo geral, observou-se a seguinte

ordem de adsorção dos íons metálicos nos NTCs funcionalizados: $\text{Pb}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Hg}^{2+}$.

O estudo de ZHOU [34] demonstrou que um nanocompósito de nanotubos de carbono de múltiplas paredes (MWCNTs) modificado com nanopartículas de ZnO pode ser utilizado com sucesso como um eletrodo modificado para a detecção voltamétrica de íons pesados em água. O material foi depositado sobre eletrodos de carbono impressos em tela, e a quantificação dos íons Cu(II), Pb(II) e Hg(II) foi realizada por voltametria de onda quadrada, a partir dos picos de oxidação característicos. O sensor exibiu uma ampla faixa de detecção linear para Cu (II), Pb (II) e Hg (II) e limites de detecção na ordem de ppb, superando significativamente o desempenho de eletrodos não modificados. Além disso, o dispositivo apresentou picos de oxidação bem definidos e alta seletividade e sensibilidade frente a interferentes comuns, indicando sua eficácia para aplicações de monitoramento de metais pesados em água de forma portátil e direta.

Nesse contexto, LI *et al.* [35], demonstraram que os nanotubos de carbono de paredes múltiplas oxidados (O-MWCNTs) apresentam elevada eficiência na remoção de íons Pb (II) e Cd (II) em meio aquoso, com desempenho significativamente superior para o chumbo. A técnica de espectroscopia de fotoelétrons por raios-X (XPS) foi empregada para confirmar a presença e o estado químico dos íons metálicos adsorvidos na superfície dos O-MWCNTs, evidenciando uma interação mais intensa com o Pb(II), compatível com eficiências de remoção próximas a 90 % em pH 6. A oxidação superficial dos nanotubos aumentou a densidade de grupos funcionais oxigenados, favorecendo a interação com os metais, enquanto o Cd (II) apresentou menores taxas de adsorção. Esses resultados confirmam o potencial dos nanotubos de carbono funcionalizados como adsorventes promissores para o tratamento de águas contaminadas por metais pesados.

3.2 Nanomateriais magnéticos

A maioria dos estudos voltados à remoção de íons metálicos concentra-se no uso de nanopartículas magnéticas de óxido de ferro, devido ao seu comportamento

superparamagnético, alta resistência à corrosão [36] e baixa toxicidade [37], além de apresentarem adsorção rápida.

Para aprimorar ainda mais a remoção de íons metálicos por nanopartículas de óxido de ferro, algumas modificações foram realizadas. FENG *et al.* [38], relataram que o Fe_3O_4 revestido com ácido ascórbico apresentou elevadas capacidades de adsorção para arsênio, nas formas de As(V) e As(III), em função do aumento da área superficial e da maior dispersibilidade.

AMIN *et al.* [39], combinaram a capacidade de adsorção reversível da quitosana com as propriedades magnéticas das nanopartículas de Fe_3O_4 , tendo a sílica mesoporosa como agente modificador de superfície, para a remoção de íons Pb^{2+} e Cd^{2+} em meio aquoso. Os resultados demonstraram que o adsorvente obtido apresentou capacidades máximas de adsorção, evidenciando seu potencial em processos de remoção de metais pesados.

Nesse contexto, ZARABADIPOUR, SOLEIMANI e AFSHAR [40] em seu recente estudo, sintetizaram pelo método de co-precipitação nanopartículas de $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ funcionalizadas com moléculas de polímero dendrímero, para a extração de íons Cu(II) e Cd(II) de soluções aquosas. A quantificação dos íons metálicos foi realizada por espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES), a partir da qual foram determinadas capacidades máximas de adsorção de aproximadamente $99,7 \text{ mg.g}^{-1}$ para Cu(II) e $115,7 \text{ mg.g}^{-1}$ para Cd(II). O nanoadsorvente apresentou excelente eficiência de adsorção, além de poder ser reutilizado em ciclos sucessivos de adsorção-dessorção por até 8 vezes sem uma diminuição significativa na atividade.

Seguindo essa mesma abordagem, de utilização de nanopartículas funcionalizadas, KALEEM *et al.* [41] sintetizaram nanopartículas de óxido de ferro utilizando extrato de cianobactérias para remoção de cádmio (Cd) e chumbo (Pb) de águas residuais. As eficiências de remoção foram determinadas por espectrometria de absorção atômica de chama (FAAS), para quantificar as concentrações iniciais e finais dos íons metálicos em solução, evidenciando remoções de 80,41% para Cd e 88,35% para Pb após cinco ciclos de adsorção/dessorção. Esses resultados

demonstram a eficiência das nanopartículas de óxido de ferro ao longo de múltiplos ciclos de reutilização.

No estudo de LEI *et al.* [42], nanopartículas magnéticas de $\text{Fe}_3\text{O}_4@DA\text{-DMSA}$ foram preparadas pela funcionalização de Fe_3O_4 com dopamina (DA), e um agente desintoxicante de metais pesados, como o ácido 2,3-dimercaptosuccínico (DMSA), para a adsorção eficiente e rápida de Pb^{2+} , Cu^{2+} e Cd^{2+} . Em amostras reais de águas residuais e em amostras simuladas de água com múltiplos componentes, o adsorvente manteve uma boa capacidade de remoção de Pb^{2+} , com baixa influência da força iônica e de íons interferentes, além de apresentar excelente seletividade.

Em contrapartida, MWEBEMBEZI *et al.* [43] propuseram a utilização do pó de óxido de ferro residual obtido a partir do processo de decapagem do aço, para a síntese de nanopartículas de óxido de ferro destinadas a remoção de íons de chumbo e cromo de água sintética. A quantificação das concentrações dos íons metálicos antes e após a adsorção foi realizada por espectroscopia de absorção atômica de chama, resultando na eficiência de remoção de 100% de chumbo e cromo, em uma solução contendo 1 ppm, para a dosagem de 0,35 g de nanopartículas em efluente sintético. Essa aplicação visa oferecer um uso alternativo para resíduos da decapagem de aço.

3.3 Óxidos metálicos

Os óxidos metálicos em nanoescala têm apresentado um grande potencial como adsorventes, uma vez que podem remover facilmente metais pesados e corantes de meios aquosos, devido sua grande área superficial, estruturas de poros bem definidas e sua alta capacidade de adsorção [14].

Além disso, apresentam uma ampla gama de características funcionais, que são determinadas por sua estrutura cristalina, composição, morfologia, defeitos intrínsecos, dopagem e outros fatores [24]. Existem diversos óxidos metálicos em nanoescala utilizados como adsorventes, como TiO_2 , MnO_2 , MgO , CdO , ZnO , CuO , Al_2O_3 , CeO_2 , ZrO_2 dentre outros. Nesta revisão, serão discutidos três tipos de óxidos metálicos e suas aplicações recentes.

Dentre os inúmeros óxidos metálicos comumente empregados como adsorventes, as nanopartículas de TiO_2 têm recebido muita atenção nas últimas décadas. O nanometal TiO_2 é menos dispendioso que outros nanomateriais e apresenta estabilidade térmica e química, estabilidade à luz e biológica, além de toxicidade mínima em humanos [24, 44].

As nanopartículas de TiO_2 possuem forte atividade adsorvente, devido a área superficial bem desenvolvida e resistência a meios ácidos e alcalinos. Ademais, sua superfície apresenta uma maior concentração de grupos hidroxila ($-\text{OH}$), que podem adsorver contaminantes da água por interação com a superfície OH [24, 44].

No trabalho de KARAPINAR *et al.* [45], nanofibras de óxido de titânio (TiO_2) foram sintetizadas pelo método de eletrofiação e testadas como adsorvente dos íons Ni(II) , Pb(II) e Cu(II) em soluções aquosas. A concentração residual dos íons metálicos após a adsorção foi determinada utilizando a técnica de espectrometria de absorção atômica com chama (FAAS).

Os autores relataram um tempo de equilíbrio de adsorção de 28 minutos e capacidade de adsorção de $834,56 \text{ mg.g}^{-1}$ para íons Cu(II) , $756,67 \text{ mg.g}^{-1}$ para íons Ni(II) e $685,56 \text{ mg.g}^{-1}$ para íons Pb(II) , todos em soluções com pH igual a 6. Os resultados mostraram que o adsorvente pode remover metais pesados de soluções aquosas de forma rápida e eficaz, além de ser ecologicamente correto, de baixo custo, altamente estável e atóxico [45].

Wang *et al* [46], desenvolveram uma matriz mesoporosa de TiO_2 com superfície funcionalizada por um líquido iônico à base de imidazol contendo o grupo carboxila, denominado CarILT, obtendo um adsorvente de alta afinidade e reciclável. O CarILT apresenta capacidades máximas de adsorção de 282,6, 345,9 e $409,9 \text{ mg.g}^{-1}$ para os íons Cu^{2+} , Pb^{2+} e Hg^{2+} em solução aquosa, respectivamente, superando significativamente as dos adsorventes comerciais convencionais. Além disso, o adsorvente manteve alta eficiência de adsorção após um ciclo de regeneração e permanecendo acima de 83% mesmo após cinco ciclos.

O óxido de zinco apresenta elevada eficiência quântica e propriedades semicondutoras relevantes, atribuídas à sua estrutura micro/nanoporosa, caráter atóxico e elevada estabilidade térmica.

Nesse contexto, HOSSEINKHANI *et al.* [47] desenvolveram um nanocompósito visando superar limitações associadas à ampla banda proibida do ZnO, promovendo o retardamento da recombinação eletrônica, além do aumento da área superficial e da capacidade de adsorção. O nanocompósito óxido de grafeno-óxido de zinco (GO-ZnO) foi sintetizado e avaliado como adsorvente para a remoção de contaminantes orgânicos e inorgânicos em meio aquoso, apresentando elevadas capacidades de adsorção de 99,00 mg.g⁻¹ para azul de metileno, 125 mg.g⁻¹ para alaranjado de metila, 121,95 mg.g⁻¹ para Cd²⁺ e 277,78 mg.g⁻¹ para Pb²⁺ o que demonstra que o nanocompósito é adequado para aplicação em águas superficiais e efluentes [47].

No estudo de MUDASSAR *et al.* [48], foi desenvolvido um nanocompósito de ZnO–biocarvão e avaliada sua aplicação na remoção de Pb²⁺ por adsorção em água contaminada. Os autores avaliaram a influência do pH da solução, dosagem do adsorvente, tempo de contato e concentração inicial do metal. Foi utilizada a espectroscopia UV-Vis para determinar a concentração de íon metálico após o contato com o adsorvente.

As condições ótimas de adsorção foram obtidas em pH 5,5, alcançando eficiência de remoção de 94,66%. A maior remoção de Pb²⁺ (96,17%) foi observada para uma concentração inicial de 100 mg L⁻¹ após 120 min de contato, enquanto a dosagem de adsorvente de 0,05 g resultou em eficiência de 95,27%, evidenciando o elevado potencial do nanocompósito ZnO–biocarvão para o tratamento de águas contaminadas por chumbo [48].

Óxidos de zircônio mesoporosos, micro ou nanoestruturados, caracterizados por elevada área superficial e funcionalidades específicas, podem ser sintetizados por diferentes rotas. A estrutura e a morfologia desses materiais estão diretamente associadas ao método de síntese empregado [49].

ALHAN *et al.* [50], sintetizaram nanopartículas de ZrO₂ e seu nanocompósito com carvão ativado (ZrO₂@CA) pelo método de decomposição térmica sob agitação magnética. O material foi testado como adsorvente de íons Pb(II), cuja concentração na solução foi determinada através da espectrometria de absorção atômica (AAS).

O nanocompósito ZrO₂@CA apresentou elevada capacidade de adsorção para Pb(II), atingindo 179,53 mg.g⁻¹. Após três ciclos consecutivos de reutilização, as

eficiências de remoção de Pb(II) mantiveram-se significativas, alcançando 56,75% para ZrO_2 e 71,25% para $\text{ZrO}_2\text{@CA}$, indicando bom potencial de reutilização dos adsorventes [50].

Nesse sentido, KAPTANOGL; KAYNAR e YUSAN [51] desenvolveram um novo adsorvente de nanozircônia dopada com cobre (Cu-ZrO_2) sintetizado pelo método de ignição para a remoção eficiente de urânio (VI) de água contaminada. O processo de adsorção avaliou parâmetros como, pH (3–8), temperatura (20–60 °C), concentração de urânio (VI) (25–125 mg L⁻¹) e dosagem do adsorvente (0,0025–0,04 g). Os estudos de adsorção demonstraram uma capacidade máxima de adsorção de urânio (VI) de 246,21 mg.g⁻¹ para Cu-ZrO_2 , significativamente superior à do ZrO_2 puro (24,12 mg.g⁻¹), fornecendo uma solução para mitigar os riscos associados à contaminação por urânio.

3.4 Zeólitas

As zeólitas são aluminossilicatos microporosos cristalinos, amplamente utilizados como catalisadores, adsorventes e trocadores iônicos. Pertencem à classe dos tectossilicatos e algumas ocorrem naturalmente. Suas características incluem tamanho de poro bem definido, composição ajustável, estabilidade térmica e disponibilidade comercial desde a década de 1950 [52, 53].

No estudo de KULDEYEV *et al.* [54], os autores buscam aprimorar a compreensão de como as zeólitas naturais de Shankanay podem ser modificadas para aumentar a capacidade de adsorção de metais pesados em água bruta. As zeólitas foram modificadas por meio de tratamento térmico em alta temperatura. A adsorção pelas zeólitas tratadas termicamente a 550 °C foi de 87% para níquel, 99% para cobre e cádmio e 100% para chumbo. A adsorção por zeólitas tratadas termicamente a uma temperatura de 500 °C foi de 78% para níquel, 98% para cobre, 83% para cádmio e 88% para chumbo. O estudo demonstra que as zeólitas naturais de Shankanay modificadas apresentam grande potencial como material adsorvente de baixo custo para a purificação de água contaminada com metais pesados.

Para aprimorar as propriedades físico-químicas das zeólitas na remoção de metais pesados em soluções aquosas, diversos materiais têm sido incorporados à sua

estrutura, incluindo nanopartículas de óxidos metálicos, carvão ativado, nanotubos de carbono, óxido de grafeno, hidroxiapatita e silicatos. Esses compósitos de zeólita são obtidos por diferentes rotas de síntese, como co-precipitação, métodos hidrotérmicos e solvotérmicos, sol–gel, técnicas assistidas por ultrassom e micro-ondas. [55]

Nesse contexto, RAHMAN *et al.* [56] relataram que um nanocompósito de ferro zero-valente/zeólita de cobre apresentou capacidade máxima de adsorção de 81,44 mg.g⁻¹ para a remoção de Cs(I) em meio aquoso, evidenciando a eficiência dos compósitos ferro–zeólita. Os autores utilizaram a espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS) para quantificação dos íons de Cs(I).

De forma semelhante, PARIS *et al.* [57] desenvolveram um nanocompósito de zeólita faujasita revestida com nanopartículas de ferrita de cobalto para adsorção de íons Pb(II). Utilizando a espectrometria de absorção atômica com chama (FAAS) como técnica de quantificação, os autores relataram elevada capacidade de adsorção de Pb(II) (602,4 mg.g⁻¹) e eficiência de remoção de 99%, além de facilitar a recuperação magnética do adsorvente.

Já NEOLAKA *et al.* [58] sintetizaram um compósito magnético de zeólita natural ativada (ANZ–Fe₃O₄) por coprecipitação de Fe(II) e Fe(III). O material foi aplicado como adsorvente de íons Cr(VI), cuja concentração residual foi determinada por espectrometria UV-Vis. O compósito ANZ–Fe₃O₄ apresentou capacidade de adsorção de 2,850 mg.g⁻¹ para Cr(VI), conforme descrito pelo modelo de Langmuir.

4 CONCLUSÕES

A contaminação de recursos hídricos por metais pesados tem se intensificado significativamente nas últimas décadas, demandando o desenvolvimento de estratégias, políticas, tecnologias e materiais capazes de mitigar seus impactos adversos à saúde humana e ao meio ambiente. Nesse cenário, a nanotecnologia destaca-se como uma abordagem promissora para o enfrentamento desse problema, uma vez que as propriedades físico-químicas singulares dos nanomateriais possibilitam elevado desempenho na remoção de íons metálicos tóxicos de águas contaminadas.

Esta revisão reuniu de forma sucinta, alguns dos diferentes nanomateriais aplicados no processo de adsorção para a remoção de metais pesados, incluindo nanotubos de carbono, zeólitas, nanomateriais magnéticos e óxidos metálicos. Mesmo em concentrações traço, esses materiais apresentam elevada eficiência, capacidade e seletividade de adsorção para diversos metais pesados, evidenciando seu potencial para aplicações no tratamento de águas.

5 REFERÊNCIAS

1. BRASIL, M. d. S. Portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, 2011.
2. RAJKUMAR, V.; LEE, V. R.; GUPTA, V. Heavy metal toxicity. 2020.
3. HEMBROM, S. et al. A comprehensive evaluation of heavy metal contamination in foodstuff and associated human health risk: a global perspective. In: Contemporary environmental issues and challenges in era of climate change. Singapore: Springer Singapore, 2019. p. 33–63.
4. AHAMAD, M. I. Impact of heavy metals on aquatic life and human health: a case study of River Ravi Pakistan. **Frontiers in Marine Science**, v. 11, p. 1374835, 2024.
5. ALVES, A. C. M. et al. Avaliação do tratamento de efluentes líquidos contendo cobre e chumbo por adsorção em carvão ativado. 2007.
6. GIAKISIKLI, G.; ANTHEMIDIS, A. N. Magnetic materials as sorbents for metal/metalloid preconcentration and/or separation: a review. **Analytica Chimica Acta**, v. 789, p. 1–16, 2013.
7. BARUTHIO, F. Toxic effects of chromium and its compounds. Biological Trace Element Research, v. 32, p. 145–153, 1992.
8. LIANG, J. et al. A review of the formation of Cr(VI) via Cr(III) oxidation in soils and groundwater. **Science of the Total Environment**, v. 774, p. 145762, 2021.
9. SHANKAR, A.; VENKATESWARLU, B. Chromium: environmental pollution, health effects and mode of action. In: Encyclopedia of Environmental Health. 2011.

10. CEFALU, W. T.; HU, F. B. Role of chromium in human health and in diabetes. **Diabetes Care**, v. 27, n. 11, p. 2741, 2004.
11. PELLERIN, C.; BOOKER, S. M. Reflections on hexavalent chromium: health hazards of an industrial heavyweight. **Environmental Health Perspectives**, v. 108, n. 9, p. A402, 2000.
12. LANGFORD, N. J.; FERNER, R. E. Toxicity of mercury. *Journal of Human Hypertension*, v. 13, n. 10, p. 651–656, 1999.
13. DE SILVA, M.; CAO, G.; TAM, K. C. Nanomaterials for the removal and detection of heavy metals: a review. **Environmental Science: Nano**, v. 12, n. 4, p. 2154–2176, 2025.
14. LEVALLOIS, P. et al. Public health consequences of lead in drinking water. **Current Environmental Health Reports**, v. 5, n. 2, p. 255–262, 2018.
15. KARRARI, P.; MEHRPOUR, O.; ABDOLLAHI, M. A systematic review on status of lead pollution and toxicity in Iran: guidance for preventive measures. **DARU Journal of Pharmaceutical Sciences**, v. 20, n. 1, p. 2, 2012.
16. ISLAM, M. Z.; MOSTAFA, M. G. Iron, manganese, and lead contamination in groundwater of Bangladesh: a review. **Water Practice & Technology**, v. 19, n. 3, p. 745–760, 2024.
17. SOARES, M. D. A.; ALVES, V. N. Avaliação do potencial adsorptivo da palha de café frente a íons metálicos. **Revista Processos Químicos**, v. 14, n. 27, p. 59–66, 2020.
18. BHATNAGAR, A. et al. Valorization of solid waste products from olive oil industry as potential adsorbents for water pollution control: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 21, n. 1, p. 268–298, 2014.
19. TRAN, H. N. Adsorption technology for water and wastewater treatments. *Water*, v. 15, n. 15, p. 2857, 2023.
20. SATYAM, S.; PATRA, S. Innovations and challenges in adsorption-based wastewater remediation: a comprehensive review. *Heliyon*, v. 10, n. 9, 2024.
21. KARUNAKARAN, K.; USMAN, M.; SILLANPÄÄ, M. A review on superadsorbents with adsorption capacity $\geq 1000 \text{ mg g}^{-1}$ and perspectives on their upscaling for water/wastewater treatment. **Sustainability**, v. 14, n. 24, p. 16927, 2022.

22. RASHID, R. et al. A state-of-the-art review on wastewater treatment techniques: the effectiveness of adsorption method. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 8, p. 9050–9066, 2021.
23. GHOSH, N. et al. Review on some metal oxide nanoparticles as effective adsorbent in wastewater treatment. **Water Science and Technology**, v. 85, n. 12, p. 3370–3395, 2022.
24. SINGH, N. B.; NAGPAL, G.; AGRAWAL, S.; RACHNA. Water purification by using adsorbents: a review. **Environmental Technology & Innovation**, v. 11, p. 187–240, 2018.
25. BARBOSA, A. d. G. Adsorção de íons Cd(II) por SrTiO₃ sintetizado por diferentes métodos. 2023. 95 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química, Universidade Federal de Catalão, Catalão, 2023.
26. HARRIS, D. C. Análise química quantitativa. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
27. SULTHANA, S. F. et al. Electrochemical sensors for heavy metal ion detection in aqueous medium: a systematic review. **ACS Omega**, v. 9, n. 24, p. 25493–25512, 2024.
28. GONCHAROVA, I. et al. Laser-induced breakdown spectroscopy application for heavy metals detection in water: a review. **Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy**, v. 217, p. 106943, 2024.
29. BANSOD, B. et al. A review on various electrochemical techniques for heavy metal ions detection with different sensing platforms. **Biosensors and Bioelectronics**, v. 94, p. 443–455, 2017.
30. IJIMA, S. Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, v. 354, p. 56–58, 1991.
31. YAHYAZADEH, A.; NANDA, S.; DALAI, A. K. Carbon nanotubes: a review of synthesis methods and applications. **Reactions**, v. 5, n. 3, p. 429–451, 2024.
32. ABDULLAH, T. A. et al. A comprehensive review of the application of modified carbon nanotubes for the removal of metals from wastewater. **Materials Research Express**, v. 10, n. 12, p. 122005, 2024.
33. ANITHA, K.; NAMSANI, S.; SINGH, J. K. Removal of heavy metal ions using a functionalized single-walled carbon nanotube: a molecular dynamics study. **The Journal of Physical Chemistry A**, v. 119, n. 30, p. 8349–8358, 2015.

34. ZHOU, X. Electrochemical detection of heavy metal ions in water using MWCNT/ZnO nanocomposite. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 19, n. 5, p. 100559, 2024.
35. LI, X. et al. Adsorption kinetics and mechanism of Pb(II) and Cd(II) adsorption in water through oxidized multiwalled carbon nanotubes. **Applied Sciences**, v. 14, n. 5, p. 1745, 2024.
36. KARGIN, D. B. et al. Structure, morphology and magnetic properties of hematite and maghemite nanopowders produced from rolling mill scale. **Steel in Translation**, v. 50, n. 3, p. 151–158, 2020.
37. LIU, Y. et al. Studies of Fe₃O₄–chitosan nanoparticles prepared by co-precipitation under the magnetic field for lipase immobilization. **Catalysis Communications**, v. 12, n. 8, p. 717–720, 2011.
38. FENG, L.; CAO, M.; MA, X.; ZHU, Y.; HU, C. Superparamagnetic high-surface-area Fe₃O₄ nanoparticles as adsorbents for arsenic removal. **Journal of Hazardous Materials**, v. 217–218, p. 439–446, 2012.
39. AMIN, K. F. et al. Synthesis of mesoporous silica and chitosan-coated magnetite nanoparticles for heavy metal adsorption from wastewater. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v. 20, p. 100801, 2023.
40. ZARABADIPOUR, M.; SOLEIMANI, M.; AFSHAR, M. G. Application of functionalized Fe₃O₄@SiO₂ nanoparticles as an adsorbent for heavy metal removal. **Results in Chemistry**, p. 102514, 2025.
41. KALEEM, M. et al. Biogenic synthesis of iron oxide nanoparticles and experimental modeling studies on the removal of heavy metals from wastewater. **Journal of Saudi Chemical Society**, v. 28, n. 1, p. 101777, 2024.
42. LEI, T. et al. A multifunctional adsorbent based on 2,3-dimercaptosuccinic acid/dopamine-modified magnetic iron oxide nanoparticles for the removal of heavy-metal ions. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 636, p. 153–166, 2023.
43. MWEBEMBEZI, T. et al. Synthesis, characterization and application of steel waste-based iron oxide nanoparticles for removal of heavy metals from industrial wastewaters. **Heliyon**, v. 10, n. 6, 2024.

44. MIRONYUK, I. et al. Highly efficient adsorption of strontium ions by carbonated mesoporous TiO_2 . **Journal of Molecular Liquids**, v. 285, p. 742–753, 2019.
45. KARAPINAR, H. S. et al. Fast and effective removal of Pb(II) , Cu(II) and Ni(II) ions from aqueous solutions with TiO_2 nanofibers: synthesis, adsorption–desorption process and kinetic studies. **International Journal of Environmental Analytical Chemistry**, v. 103, n. 16, p. 4731–4751, 2023.
46. WANG, S. et al. Carboxyl-functionalized TiO_2 as a highly efficient adsorbent for separation, enrichment, and immobilization of Cu(II) , Pb(II) , and Hg(II) . *Chemical Engineering Journal*, v. 520, p. 165774, 2025.
47. HOSSEINKHANI, O. et al. Graphene oxide/ ZnO nanocomposites for efficient removal of heavy metal and organic contaminants from water. *Arabian Journal of Chemistry*, v. 16, n. 10, p. 105176, 2023.
48. MUDASSAR, H. et al. Adsorptive removal of Pb^{2+} from wastewater using ZnO –biochar nanocomposite. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 29517, 2025.
49. ZHAO, D.; YANG, Y.; CHEN, J. P. Performance of removing aqueous contaminant by zirconium-based adsorbents: a critical review. **Frontiers in Chemical Engineering**, v. 6, p. 1282076, 2024.
50. ALHAN, S. et al. Synthesis of ZrO_2 and its composite with activated carbon for lead adsorption and antibacterial applications. **Hybrid Advances**, v. 7, p. 100321, 2024.
51. KAPTANOGLU, I. G.; KAYNAR, U. H.; YUSAN, S. Adsorption of uranium(VI) ions by nano Cu-doped ZrO_2 : a response surface methodology approach. **Ceramics International**, 2025.
52. FLANIGEN, E. M. Molecular sieve zeolite technology: the first twenty-five years. *Pure and Applied Chemistry*, v. 52, n. 9, p. 2191–2211, 1980.
53. PÉREZ-BOTELLA, E.; VALENCIA, S.; REY, F. Zeolites in adsorption processes: state of the art and future prospects. **Chemical Reviews**, v. 122, n. 24, p. 17647–17695, 2022.
54. KULDEYEV, E. et al. Modifying natural zeolites to improve heavy metal adsorption. *Water*, v. 15, p. 2215, 2023.
55. ABDELWAHAB, O.; THABET, W. M. Natural zeolites and zeolite composites for heavy metal removal from contaminated water and their applications in

aquaculture systems: a review. **Egyptian Journal of Aquatic Research**, v. 49, n. 4, p. 431–443, 2023.

56. RAHMAN, M. M. et al. Statistical techniques for the optimization of cesium removal from aqueous solutions onto iron-based nanoparticle–zeolite composites. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 10, p. 12918–12931, 2021.
57. PARIS, E. C. et al. Faujasite zeolite decorated with cobalt ferrite nanoparticles for improving removal and reuse in Pb^{2+} ions adsorption. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 28, n. 7, p. 1884–1890, 2020.
58. NEOLAKA, Y. A. B. et al. Efficiency of activated natural zeolite-based magnetic composite (ANZ– Fe_3O_4) as a novel adsorbent for removal of Cr(VI) from wastewater. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 18, p. 2896–2909, 2022.