

USO DA DOLOMITA COMO ADSORVENTE DE FOSFATO EM ÁGUAS RESIDUAIS: AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE AMOSTRAS IN NATURA E PURIFICADA

USE OF DOLOMITE AS A PHOSPHATE ADSORBENT IN WASTEWATER: COMPARATIVE EVALUATION BETWEEN NATURAL AND PURIFIED SAMPLES

USO DE DOLOMITA COMO ADSORBENTE DE FOSFATO EN AGUAS RESIDUALES: EVALUACIÓN COMPARATIVA ENTRE MUESTRAS NATURALES Y PURIFICADAS



10.56238/revgeov16n5-047

Ghessyca Aparecida do Bonfim

Mestre em Tecnologias Ambientais

Instituição: Universidade Tecnológica Federal do Paraná

E-mail: ghessycabonfim@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4540-1070>

Lattes: <https://lattes.cnpq.br/3978389569132296>

Andréia Cristina Furtado

Doutora em Engenharia Química

Instituição: Universidade Estadual de Maringá

E-mail: andreaia.furtado@unila.edu.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1407-5989>

Lattes: <https://lattes.cnpq.br/0969254728157087>

Victor Vicentin Bentes

Doutor em Agronomia

Instituição: Universidade Federal da Grande Dourados

E-mail: victor.v.bentes@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4115-8563>

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5910836996278573>

RESUMO

A eutrofização de corpos hídricos, intensificada pelo excesso de fósforo proveniente de efluentes domésticos e atividades agroindustriais, constitui um dos maiores desafios ambientais atuais. Nesse contexto, a busca por materiais adsorventes de baixo custo e ampla disponibilidade tem sido considerada estratégica para mitigar a poluição difusa. A dolomita, mineral carbonático abundante no território brasileiro, apresenta potencial para remoção de fósforo, mas sua eficiência depende das condições estruturais e da presença de impurezas. Deste modo, este estudo avaliou comparativamente a eficiência de adsorção de fósforo por dolomita in natura (DN) e dolomita purificada (DP), integrando análises de desempenho em ensaios de adsorção e caracterizações estruturais e superficiais por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), microscopia eletrônica de



varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS). A curva de calibração estabelecida para determinação de fósforo apresentou comportamento linear no intervalo de 1 a 25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Os limites de detecção ($\text{LOD} = 0,178 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) e quantificação ($\text{LOQ} = 0,593 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) confirmaram a sensibilidade da técnica, permitindo monitorar variações sutis após a adsorção. Nos ensaios comparativos, a dolomita in natura apresentou remoções entre 24,3% e 36,7%, com tendência de redução da eficiência em concentrações mais elevadas. Já a dolomita purificada apresentou desempenho consistentemente superior, com remoções entre 89,9% e 95,6%, independentemente da concentração inicial de fosfato. Essa diferença foi atribuída à eliminação de impurezas durante a purificação, o que resultou em maior área superficial, porosidade e disponibilidade de sítios ativos de Ca^{2+} e Mg^{2+} . As análises de caracterização reforçaram os resultados dos ensaios. O FTIR confirmou a presença de bandas típicas de carbonatos (CO_3^{2-}) em ambas as amostras, além do surgimento de novas bandas relacionadas a grupos fosfato (PO_4^{3-}) após o processo de adsorção, mais intensas na dolomita purificada. As imagens de MEV revelaram que a DN possui partículas irregulares, heterogêneas e com presença de fissuras, enquanto a DP apresentou partículas homogêneas, compactas e com maior porosidade. Os resultados de EDS confirmaram a composição elementar característica da dolomita e, de forma decisiva, a presença de fósforo apenas na DP saturada a $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, evidência direta de maior eficiência de fixação do ânion fosfato. A comparação com a literatura mostrou que os resultados deste estudo são consistentes com trabalhos que reportam baixa eficiência de dolomitas não tratadas e remoções superiores a 90% em materiais purificados ou modificados. Nesse sentido, a dolomita purificada demonstrou desempenho comparável a adsorventes sintéticos de maior custo, como zeólitas modificadas e óxidos metálicos, destacando-se pela ampla disponibilidade e viabilidade econômica no Brasil. Assim, a dolomita purificada representa uma alternativa promissora, sustentável e de baixo custo para a remoção de fósforo em soluções aquosas, com potencial aplicação em sistemas descentralizados de saneamento.

Palavras-chave: Adsorção. Fósforo. Caracterização Estrutural. Tratamento de Efluentes. Remoção de Nutrientes. Sustentabilidade. Economia Circular.

ABSTRACT

Eutrophication of water bodies, intensified by excess phosphorus from domestic effluents and agro-industrial activities, constitutes one of the greatest environmental challenges today. In this context, the search for low-cost and widely available adsorbent materials has been considered strategic to mitigate diffuse pollution. Dolomite, a carbonate mineral abundant in Brazil, has potential for phosphorus removal, but its efficiency depends on structural conditions and the presence of impurities. Therefore, this study comparatively evaluated the phosphorus adsorption efficiency of natural dolomite (ND) and purified dolomite (PD), integrating performance analyses in adsorption tests and structural and surface characterizations by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), scanning electron microscopy (SEM), and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). The calibration curve established for phosphorus determination showed linear behavior in the range of 1 to 25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. The limits of detection ($\text{LOD} = 0.178 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) and quantification ($\text{LOQ} = 0.593 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) confirmed the technique's sensitivity, allowing the monitoring of subtle variations after adsorption. In comparative tests, raw dolomite showed removals between 24.3% and 36.7%, with a tendency for efficiency to decrease at higher concentrations. Purified dolomite consistently performed better, with removals between 89.9% and 95.6%, regardless of the initial phosphate concentration. This difference was attributed to the elimination of impurities during purification, which resulted in greater surface area, porosity, and availability of Ca^{2+} and Mg^{2+} active sites. Characterization analyses reinforced the test results. FTIR confirmed the presence of typical carbonate bands (CO_3^{2-}) in both samples, in addition to the emergence of new bands related to phosphate groups (PO_4^{3-}) after the adsorption process, more intense in the purified dolomite. SEM images revealed that the DN had irregular, heterogeneous particles with fissures, while the DP presented homogeneous, compact particles with greater porosity. The EDS



results confirmed the characteristic elemental composition of dolomite and, decisively, the presence of phosphorus only in the DP saturated at 40 mg L^{-1} , direct evidence of greater phosphate anion fixation efficiency. Comparison with the literature showed that the results of this study are consistent with studies reporting low efficiencies in untreated dolomite and removal rates greater than 90% in purified or modified materials. In this sense, purified dolomite demonstrated performance comparable to more expensive synthetic adsorbents, such as modified zeolites and metal oxides, standing out for its widespread availability and economic viability in Brazil. Thus, purified dolomite represents a promising, sustainable, and low-cost alternative for phosphorus removal from aqueous solutions, with potential application in decentralized sanitation systems.

Keywords: Adsorption. Phosphorus. Structural Characterization. Wastewater Treatment. Nutrient Removal. Sustainability. Circular Economy.

RESUMEN

La eutrofización de los cuerpos de agua, intensificada por el exceso de fósforo proveniente de efluentes domésticos y actividades agroindustriales, constituye uno de los mayores desafíos ambientales actuales. En este contexto, la búsqueda de materiales adsorbentes de bajo costo y amplia disponibilidad se ha considerado estratégica para mitigar la contaminación difusa. La dolomita, un mineral carbonatado abundante en Brasil, tiene potencial para la remoción de fósforo, pero su eficiencia depende de las condiciones estructurales y la presencia de impurezas. Por lo tanto, este estudio evaluó comparativamente la eficiencia de adsorción de fósforo de la dolomita natural (ND) y la dolomita purificada (PD), integrando análisis de rendimiento en pruebas de adsorción y caracterizaciones estructurales y superficiales mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS). La curva de calibración establecida para la determinación de fósforo mostró un comportamiento lineal en el rango de 1 a 25 mg L^{-1} . Los límites de detección ($\text{LOD} = 0,178 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) y cuantificación ($\text{LOQ} = 0,593 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) confirmaron la sensibilidad de la técnica, lo que permitió el monitoreo de variaciones sutiles después de la adsorción. En pruebas comparativas, la dolomita cruda mostró remociones entre el 24,3% y el 36,7%, con una tendencia a que la eficiencia disminuya a concentraciones más altas. La dolomita purificada tuvo un mejor rendimiento consistentemente, con remociones entre el 89,9% y el 95,6%, independientemente de la concentración inicial de fosfato. Esta diferencia se atribuyó a la eliminación de impurezas durante la purificación, lo que resultó en una mayor área superficial, porosidad y disponibilidad de sitios activos de Ca^{2+} y Mg^{2+} . Los análisis de caracterización reforzaron los resultados de la prueba. El FTIR confirmó la presencia de bandas típicas de carbonato (CO_3^{2-}) en ambas muestras, además de la aparición de nuevas bandas relacionadas con grupos fosfato (PO_4^{3-}) después del proceso de adsorción, más intensas en la dolomita purificada. Las imágenes de SEM revelaron que el DN tenía partículas irregulares, heterogéneas con fisuras, mientras que el DP presentó partículas homogéneas, compactas y con mayor porosidad. Los resultados de EDS confirmaron la composición elemental característica de la dolomita y, decisivamente, la presencia de fósforo solo en el DP saturado a 40 mg L^{-1} , evidencia directa de una mayor eficiencia de fijación del anión fosfato. La comparación con la literatura mostró que los resultados de este estudio son consistentes con estudios que informan bajas eficiencias en dolomita sin tratar y tasas de remoción superiores al 90% en materiales purificados o modificados. En este sentido, la dolomita purificada demostró un rendimiento comparable al de adsorbentes sintéticos más costosos, como las zeolitas modificadas y los óxidos metálicos, destacando por su amplia disponibilidad y viabilidad económica en Brasil. Por lo tanto, la dolomita purificada representa una alternativa prometedora, sostenible y económica para la eliminación de fósforo de soluciones acuosas, con potencial aplicación en sistemas de saneamiento descentralizados.



Palabras clave: Adsorción. Fósforo. Caracterización Estructural. Tratamiento de Aguas Residuales. Eliminación de Nutrientes. Sostenibilidad. Economía Circular.



1 INTRODUÇÃO

A água doce é um dos recursos mais fundamentais para a manutenção da vida, sustentando não apenas os ecossistemas naturais, mas também o desenvolvimento econômico e social das populações humanas. Entretanto, nas últimas décadas, o crescimento populacional, a intensificação da agricultura e a industrialização têm exercido forte pressão sobre a qualidade e a disponibilidade hídrica, tornando a poluição das águas um dos principais desafios ambientais globais (KARACA *et al.*, 2006; SMITH; SCHINDLER, 2009). No Brasil, essa problemática é ainda mais evidente devido à dependência de reservatórios artificiais para abastecimento e geração de energia, que frequentemente sofrem com processos de degradação decorrentes da entrada excessiva de nutrientes (OLIVEIRA *et al.*, 2021; GUIMARÃES; LIMA NETO, 2023).

Entre os diversos poluentes presentes em águas superficiais e subterrâneas, o fósforo (P) ocupa posição de destaque, pois mesmo em baixas concentrações é capaz de promover alterações profundas no equilíbrio ecológico. Embora seja um nutriente essencial ao metabolismo celular, atuando na síntese de ácidos nucleicos, fosfolipídios e moléculas energéticas como o ATP, sua disponibilidade acima da capacidade de assimilação biológica desencadeia processos de eutrofização (SMITH; SCHINDLER, 2009; PINTO-COELHO *et al.*, 2019).

A eutrofização é caracterizada pelo crescimento descontrolado de algas e cianobactérias, que reduzem a transparência da coluna d'água, comprometem a fotossíntese subaquática e, na decomposição, consomem o oxigênio dissolvido, provocando a morte de organismos aquáticos sensíveis. Além disso, algumas espécies de cianobactérias produzem toxinas hepatotóxicas e neurotóxicas, tornando-se uma ameaça à saúde humana e animal (PINTO-COELHO *et al.*, 2019). Os impactos ultrapassam a dimensão ecológica: mananciais destinados ao abastecimento público tornam-se impróprios, elevando os custos de tratamento, enquanto atividades econômicas como a piscicultura, a irrigação e o turismo são prejudicados (GUIMARÃES; LIMA NETO, 2023).

No Brasil, diversos estudos apontam concentrações de fósforo em reservatórios acima dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005, confirmando que a eutrofização é um problema recorrente e de grande abrangência (OLIVEIRA *et al.*, 2021; SOTIRI *et al.*, 2022). Essa situação se agrava em função da fertilização agrícola intensiva, do lançamento de esgotos domésticos não tratados e de efluentes industriais ricos em compostos fosfatados.

Diante desse cenário, torna-se urgente o desenvolvimento de tecnologias eficazes, de baixo custo e sustentáveis para a remoção de fósforo em águas residuárias. Tradicionalmente, empregam-se três grandes rotas de tratamento: processos físicos, químicos e biológicos. Entre os métodos físicos, a osmose reversa e sistemas de membranas apresentam elevada eficiência de remoção, mas demandam altos investimentos de implantação e operação, além de consumo energético significativo (KARACA *et al.*, 2006; MARONEZE *et al.*, 2014). A remoção química, baseada principalmente na precipitação



com sais de ferro, alumínio ou cálcio, também é eficiente, mas gera grande quantidade de lodo secundário, cujo gerenciamento eleva os custos e os impactos ambientais (KLEIN; AGNE, 2012). Já os processos biológicos, como a remoção biológica aprimorada de fósforo (EBPR), apresentam grande potencial sustentável, mas são altamente dependentes de condições operacionais estáveis, sendo sensíveis a variações de pH, temperatura e carga orgânica (COSTA *et al.*, 2016).

Nesse contexto, a adsorção surge como alternativa viável, flexível e de custo reduzido, destacando-se pela simplicidade operacional e pela possibilidade de utilização de materiais naturais abundantes. O processo baseia-se na interação entre o adsorvato (fosfato) e um sólido adsorvente, por meio de mecanismos que podem incluir troca iônica, complexação de superfície e precipitação de fases pouco solúveis (MOLINARI, 2007; KOVACEVIC *et al.*, 2019). Além de sua eficiência, a adsorção apresenta a vantagem de permitir a regeneração do material e o reaproveitamento do resíduo saturado, rico em nutrientes, como fertilizante agrícola, aproximando-se dos princípios da economia circular (WITHERS *et al.*, 2018).

Entre os adsorventes estudados, materiais carbonáticos se destacam pela ampla disponibilidade natural e pelo baixo custo. A dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$], um carbonato duplo de cálcio e magnésio, tem recebido atenção crescente como adsorvente de fósforo em águas residuárias (FERREIRA, 2017b). Sua estrutura cristalina, pertencente ao sistema trigonal-rômbico, é caracterizada pela alternância de camadas de Ca^{2+} e Mg^{2+} ligadas a grupos CO_3^{2-} , conferindo ao mineral tanto estabilidade química quanto reatividade em ambientes aquosos.

Do ponto de vista químico, os íons Ca^{2+} e Mg^{2+} presentes no retículo cristalino da dolomita podem ser liberados em solução aquosa, reagindo com o fosfato (PO_4^{3-}) para formar compostos insolúveis, como a hidroxiapatita [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$] e a estruvita [$\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$], dependendo das condições de pH e composição da água (KOVACEVIC *et al.*, 2019; EL ASRI *et al.*, 2021). Além disso, a superfície carbonática da dolomita apresenta grupos funcionais capazes de realizar troca iônica e complexação, mecanismos que favorecem a imobilização do fosfato por adsorção superficial (MRAZ *et al.*, 2023).

A eficiência do processo, no entanto, depende de variáveis como granulometria, tempo de contato, concentração inicial de fósforo e principalmente da pureza do mineral. Impurezas como sílica, óxidos de ferro e matéria orgânica podem recobrir ou bloquear sítios ativos, reduzindo a capacidade de adsorção (FERREIRA, 2017b). Para superar essa limitação, estudos recentes têm explorado modificações físico-químicas da dolomita.

O tratamento térmico, por exemplo, promove a decomposição parcial dos carbonatos, resultando na formação de óxidos e hidróxidos de cálcio e magnésio altamente reativos, além de aumentar a área superficial específica. Essa modificação tem alcançado remoções de fósforo entre 70% e 90% em experimentos laboratoriais (EL ASRI *et al.*, 2021). Já o tratamento por ultrassom tem se



mostrado eficaz na modificação da microestrutura da dolomita, aumentando a porosidade, expondo novos sítios ativos e alcançando remoções superiores a 90% em condições alcalinas (MRAZ *et al.*, 2023).

Outro aspecto de relevância prática é a possibilidade de regeneração da dolomita. Pesquisas indicam que o material saturado pode ser desorvido com soluções salinas, como NH_4Cl , mantendo sua eficiência em múltiplos ciclos de reutilização (KOVACEVIC *et al.*, 2019). O resíduo final, enriquecido em fósforo, pode ser reincorporado ao solo como fertilizante de liberação lenta, reduzindo a dependência de fosfatos de origem mineral, recurso finito e geograficamente concentrado (WITHERS *et al.*, 2018).

Portanto, a dolomita representa uma alternativa promissora para a remoção de fósforo em águas residuárias, conciliando eficiência, baixo custo e sustentabilidade. Sua abundância no Brasil amplia ainda mais a viabilidade dessa aplicação, permitindo a integração de soluções locais de tratamento de efluentes com estratégias de reaproveitamento agrícola.

Diante desse contexto, a avaliação comparativa entre dolomita *in natura* e dolomita purificada assume importância científica e prática. Tal investigação possibilita compreender de que forma modificações simples podem potencializar a eficiência adsorptiva do mineral, fornecendo subsídios para sua aplicação em sistemas de tratamento descentralizados e de baixo custo. Ao mesmo tempo, abre-se espaço para a valorização do resíduo adsorvido como insumo agrícola, promovendo o fechamento do ciclo do fósforo e contribuindo para o enfrentamento de problemas ambientais e socioeconômicos associados à poluição difusa por nutrientes.

2 METODOLOGIA

2.1 LOCAL DE REALIZAÇÃO

Os ensaios laboratoriais foram conduzidos nas instalações da Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA), localizada no Parque Tecnológico Itaipu, em Foz do Iguaçu/PR.

2.2 AMOSTRAS DE DOLOMITA

Foram avaliadas duas amostras distintas:

- Dolomita *in natura*, cedida por uma loja em Ciudad del Este, Paraguai;
- Dolomita purificada (Apis Nutri), adquirida em loja de produtos naturais no Brasil.

As amostras foram previamente lavadas com água destilada deionizada para remoção de impurezas superficiais, secas em estufa a 105 °C durante 24 h e peneiradas até obtenção de partículas com granulometria entre 53 e 500 µm. O procedimento de uniformização visou reduzir variabilidades



experimentais, uma vez que a granulometria está diretamente relacionada à cinética de adsorção e à disponibilidade de sítios ativos na superfície (KARACA *et al.*, 2006; FERREIRA, 2017a).

2.3 SOLUÇÕES DE FOSFATO E REAGENTE MOLIBDOVANADATO

As soluções de fosfato foram preparadas a partir de fosfato monopotássico ($\text{KH}_2\text{PO}_4 \geq 99\%$, grau analítico, Synth®), dissolvido em água destilada deionizada. Para a solução estoque de $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de fósforo, pesaram-se 0,22 g de KH_2PO_4 previamente seco em estufa ($105 \text{ }^\circ\text{C}$, 2 h), que foram dissolvidos em balão volumétrico de 1 L. Essa solução foi mantida em frasco âmbar sob refrigeração ($4 \text{ }^\circ\text{C}$) e utilizada no preparo das diluições subsequentes. A partir dela, foram obtidas soluções de trabalho com concentrações de 20, 30 e $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, destinadas aos ensaios de adsorção.

Para a determinação colorimétrica do fósforo, empregou-se o reagente molibdovanadato, preparado conforme o método descrito pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA (2014) e adaptado por GAMA (2019). Para tanto, dissolveram-se separadamente:

- 25 g de molibdato de amônio ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 99%, P.A., Merck®) em 300 mL de água destilada aquecida ($\sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$);
- 1,25 g de metavanadato de amônio (NH_4VO_3 99%, P.A., Sigma-Aldrich®) em 300 mL de água destilada também sob aquecimento.

Após resfriamento, as duas soluções foram misturadas lentamente sob agitação magnética, e adicionaram-se 300 mL de HCl concentrado (HCl, 37%, P.A., Dinâmica®). O volume final foi ajustado para 1 L em balão volumétrico com água destilada.

Esse reagente permite a formação de um complexo amarelo estável, resultante da reação do ortofosfato com os íons molibdato e vanadato em meio ácido. A intensidade da coloração é diretamente proporcional à concentração de fósforo presente na amostra, possibilitando sua quantificação em espectrofotômetro UV-Vis no comprimento de onda de 420 nm (ZHANG *et al.*, 2020; OLIVEIRA *et al.*, 2021).

2.4 CURVA DE CALIBRAÇÃO

A curva de calibração foi construída a partir de soluções padrão preparadas por diluição da solução estoque de $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de KH_2PO_4 (item 2.3). Foram preparadas soluções de 1, 5, 10, 15, 20 e $25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, conforme descrito na Tabela 1.



Tabela 1 – Soluções padrão para curva de calibração de fosfato (concentração, volume, diluição).

Concentração (mg·L ⁻¹)	Volume da solução padrão 50 mg·L ⁻¹ (mL)	Volume final (mL)	Procedimento de diluição
1	2	100	Diluir 2 mL da solução padrão em balão volumétrico de 100 mL, completando com água deionizada
5	10	100	Diluir 10 mL da solução padrão em balão volumétrico de 100 mL, completando com água deionizada
10	20	100	Diluir 20 mL da solução padrão em balão volumétrico de 100 mL, completando com água deionizada
15	30	100	Diluir 30 mL da solução padrão em balão volumétrico de 100 mL, completando com água deionizada
20	40	100	Diluir 40 mL da solução padrão em balão volumétrico de 100 mL, completando com água deionizada
25	50	100	Diluir 50 mL da solução padrão em balão volumétrico de 100 mL, completando com água deionizada

Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

Para cada solução padrão (50 mL), adicionaram-se 10 mL do reagente molibdovanadato e 35 mL da solução de fosfato, completando-se o volume com água deionizada. As soluções foram homogêneas e deixadas em repouso por 10 min em temperatura ambiente, tempo suficiente para estabilização da coloração amarela característica.

As leituras foram realizadas em espectrofotômetro UV-Vis (Bel Photonics SP 1105) a 420 nm, utilizando cubetas de quartzo de 1 cm de caminho óptico. A cada série de análises foi preparada uma solução - branco - (10 mL de reagente molibdovanadato + água destilada deionizada até 50 mL), utilizada para zerar o equipamento.

2.5 ENSAIOS DE ADSORÇÃO

Para os ensaios, 3 g de cada amostra (in natura e purificada) foram adicionados a 50 mL de solução de fosfato (20, 30 e 40 mg·L⁻¹), em triplicata. As misturas foram agitadas em mesa orbital (150 rpm, 30 min) e mantidas em repouso por 24 h, em temperatura ambiente (~25 °C).

Após esse período, as soluções foram filtradas em membrana de 0,45 µm. Do filtrado, coletaram-se 17,5 mL, aos quais foram adicionados 5 mL do reagente molibdovanadato em balão de 25 mL, completando-se o volume com água destilada. Após 10 min, as leituras foram realizadas em espectrofotômetro UV-Vis a 420 nm.

Esse procedimento é semelhante ao adotado em estudos de cinética e equilíbrio de adsorção de fosfato por minerais carbonáticos e óxidos (KOVACEVIC *et al.*, 2019; MRAZ *et al.*, 2023).



2.6 CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO

A eficiência de remoção (%) foi determinada pela Equação (1) a seguir:

$$\%Remoção = \frac{C_1 - C_a}{C_1} \cdot 100 \quad (1)$$

em que:

- C_1 = concentração inicial da solução ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$);
- C_a = concentração após o contato com a dolomita ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

Esse cálculo é padrão em experimentos de adsorção (MOLINARI *et al.*, 2007; KOVACEVIC *et al.*, 2019).

2.7 CARACTERIZAÇÃO DA DOLOMITA

A caracterização das amostras após a saturação com fosfato foi realizada por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e por microscopia eletrônica de varredura acoplada à energia dispersiva de raios X (MEV-EDS).

2.7.1 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

As análises foram realizadas em espectrômetro Frontier MIR+SP10 STD – Perkin Elmer, com varredura na faixa de $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$. O objetivo foi identificar grupos funcionais característicos da dolomita, como carbonatos (CO_3^{2-}), e avaliar o surgimento de bandas atribuídas a fosfatos (PO_4^{3-}) após a adsorção. Essa técnica é amplamente utilizada para investigar mecanismos de ligação em adsorventes minerais (ZHANG *et al.*, 2020; MRAZ *et al.*, 2023).

2.7.2 Microscopia Eletrônica de Varredura acoplada a Energia Dispersiva de Raios X (MEV-EDS)

A morfologia das amostras foi avaliada por MEV, acoplado a sistema de EDS. Essa análise permite observar características superficiais, como rugosidade, porosidade e presença de aglomerados, além de fornecer informações elementares sobre a composição química, confirmando a presença de fósforo após o processo de adsorção (COSTA *et al.*, 2016; EL ASRI *et al.*, 2021).



3 RESULTADOS

3.1 CURVA DE CALIBRAÇÃO

Para a construção da curva de calibração (Figura 1), foram preparadas soluções padrão de fosfato com concentrações de 1, 5, 10, 15, 20 e 25 mg·L⁻¹, cujas leituras de absorvância estão apresentadas na Tabela 2.

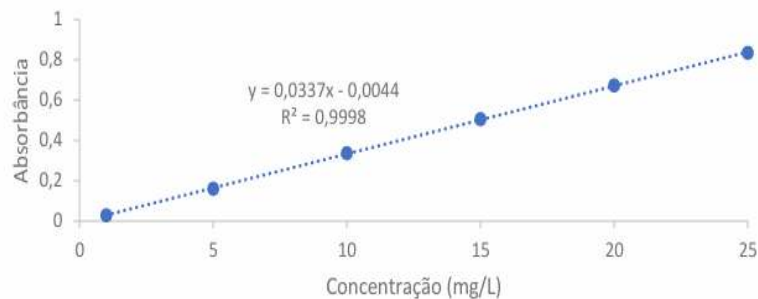
Tabela 2 – Dados obtidos por espectrofotômetro para padronização da curva de fosfato

Concentração (mg/L)	Absorbância
1	0,028
5	0,160
10	0,337
15	0,506
20	0,672
25	0,834

Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

A relação entre concentração e absorvância segue a Lei de Lambert-Beer, que estabelece proporcionalidade direta entre a concentração de uma espécie absorvente e a intensidade da radiação monocromática absorvida. Esse princípio constitui a base da espectrofotometria UV-visível, amplamente utilizada na determinação de nutrientes, metais e compostos orgânicos em solução (SKOOG *et al.*, 2018).

Figura 1 – Curva de calibração de fósforo.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

O coeficiente de determinação R^2 evidencia um ajuste quase perfeito ao modelo linear, como pode ser visto na Figura 1 acima. Esse valor elevado de R^2 indica que praticamente toda a variação na absorvância é explicada pela concentração de fosfato, reforçando a confiabilidade da curva analítica.

Com base nos parâmetros da regressão, foram estimados os limites analíticos de detecção (LOD) e de quantificação (LOQ), de acordo com as equações $LOD = 3\sigma/s$ e $LOQ = 10\sigma/s$, em que σ corresponde ao desvio-padrão do branco e s à inclinação da curva. Os valores calculados para o LOD e o LOQ estão apresentados na Tabela 3, juntamente com os parâmetros da curva de calibração.



Tabela 3 – Parâmetros da curva de calibração para determinação de fósforo

Parâmetro	Valor
Equação da reta	$y = 0,0337x - 0,0044$
Inclinação (s)	0,0337
Intercepto	-0,0044
R ²	0,9998
LOD (mg·L ⁻¹)	0,178
LOQ (mg·L ⁻¹)	0,593

Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

Esses valores confirmam a alta sensibilidade do método colorimétrico e asseguram a capacidade de detectar pequenas variações de concentração após o contato das soluções com a dolomita, aspecto fundamental para a avaliação da eficiência adsortiva.

Os valores obtidos neste estudo foram comparados com dados de literatura recente, apresentados na Tabela 4. Observa-se que os parâmetros encontrados estão dentro da faixa reportada por outros autores, confirmando a sensibilidade e adequação do método colorimétrico adotado.

Tabela 4 – Comparação dos parâmetros analíticos da curva de calibração com a literatura

Referência	Matriz / Material estudado	R ²	LOD (mg·L ⁻¹)	LOQ (mg·L ⁻¹)	Observações
Este estudo (2023)	Fosfato em soluções padrão	0,9998	0,178	0,593	Alta sensibilidade
Costa <i>et al.</i> , (2016)	Fosfato em águas superficiais	>0,99	0,20	0,65	Método colorimétrico
El Asri <i>et al.</i> , (2021)	Fosfato em águas residuais tratadas	0,998	0,25	0,80	UV-visível
Zhang <i>et al.</i> , (2020)	Adsorção em carbonatos ativados	0,999	~0,20	~0,70	Alta linearidade
Mraz <i>et al.</i> , (2023)	Adsorventes modificados à base de Mg/Ca	0,999	0,15	0,50	Adsorção avançada
Oliveira <i>et al.</i> , (2021)	Monitoramento ambiental (Brasil)	>0,99	0,18–0,25	0,60–0,80	Relevância nacional

Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

Diversos estudos relatam parâmetros similares, reforçando a robustez do método adotado. Costa *et al.*, (2016) e El Asri *et al.*, (2021) reportaram linearidade superior a R² = 0,99 em análises de fosfato em soluções aquosas, com limites de detecção próximos a 0,20 mg·L⁻¹. Zhang *et al.*, (2020), ao investigar a adsorção de fosfato em carbonatos ativados, observaram LOD de ~0,20 mg·L⁻¹, enquanto Mraz *et al.*, (2023) relataram LOD de 0,15 mg·L⁻¹ em adsorventes modificados à base de cálcio e magnésio, confirmando a equivalência dos resultados aqui obtidos. A comparação evidencia que os valores de LOD e LOQ obtidos neste trabalho são compatíveis e até ligeiramente superiores



aos reportados em literatura, inclusive em estudos com materiais avançados, o que reforça a confiabilidade do método mesmo em uma proposta experimental simplificada.

No cenário nacional, Oliveira *et al.*, (2021) e Guimarães e Lima Neto (2023) destacam a relevância de métodos colorimétricos sensíveis e de baixo custo para o monitoramento ambiental de fósforo, especialmente em sistemas descentralizados. Nesse contexto, os resultados deste estudo não apenas demonstram robustez metodológica, mas também confirmam sua aplicabilidade prática em pesquisas com minerais naturais abundantes, como a dolomita, alinhando-se à necessidade de soluções acessíveis e eficazes.

Adicionalmente, a inclinação da curva (0,0337) representa a sensibilidade instrumental, ou seja, a variação da absorvância por unidade de concentração. Esse valor é comparável ao reportado por Xu *et al.*, (2014) e Yuan *et al.*, (2015), que obtiveram inclinações próximas a 0,030 em estudos similares, reforçando que o sistema adotado neste trabalho apresenta desempenho competitivo. A baixa dispersão dos dados, evidenciada pelo reduzido desvio-padrão residual da regressão, reforça a precisão do método — aspecto fundamental em estudos de adsorção, nos quais pequenas variações de concentração residual impactam diretamente no cálculo da eficiência de remoção.

Por fim, destaca-se que a espectrofotometria UV-visível para determinação de fósforo é reconhecida como técnica oficial por normas internacionais (APHA, 2017) e amplamente utilizada em monitoramento de águas naturais, efluentes industriais e sistemas de tratamento (WITHERS *et al.*, 2018; ALMEIDA *et al.*, 2022). Assim, a curva de calibração estabelecida neste trabalho apresenta elevada precisão, sensibilidade e compatibilidade com a literatura, sendo plenamente adequada para monitorar as variações de fósforo em soluções submetidas ao processo de adsorção.

3.2 ENSAIOS DE ADSORÇÃO DE FÓSFORO

3.2.1 Ensaios de adsorção

Os ensaios de adsorção foram conduzidos com dolomita in natura (DN) e dolomita purificada (DP), utilizando soluções de fosfato com concentrações iniciais de 20, 30 e 40 mg·L⁻¹. Cada ensaio foi realizado em triplicata, sendo os resultados expressos como média ± desvio padrão (Tabela 5).

Os resultados demonstram diferenças marcantes entre as duas amostras. A dolomita purificada apresentou valores de remoção entre 89,9% e 95,6%, enquanto a dolomita in natura variou entre 24,3% e 36,7%. A representação gráfica da eficiência de remoção é mostrada na Figura 2.

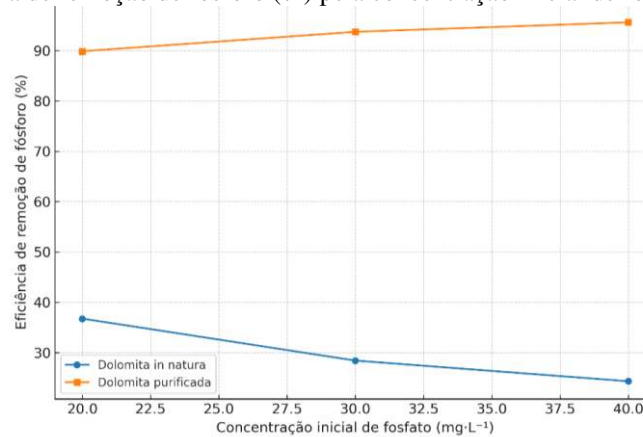


Tabela 5 – Teor de fosfato adsorvido nas amostras de dolomita in natura e purificada

Concentração (ppm)	Dolomita in natura		Dolomita purificada	
	(Média±desvio-padrão)	Teor fosfato adsorvido (%)	(Média±desvio-padrão)	Teor fosfato adsorvido (%)
20	13,30±1,36	36,76	2,15±0,16	89,87
30	22,25±1,02	28,43	1,95±0,14	93,73
40	30,53±0,42	24,32	1,74±0,24	95,61

Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

Figura 2. Eficiência de remoção de fósforo (%) pela concentração inicial de fosfato para DN e DP.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

A dolomita in natura apresentou tendência de redução da eficiência com o aumento da concentração de fósforo, sugerindo saturação precoce dos sítios ativos e possível competição iônica. Em contrapartida, a dolomita purificada manteve desempenho elevado e estável, indicando maior número de sítios disponíveis e maior área superficial efetiva após a remoção de impurezas.

Esse comportamento está de acordo com trabalhos prévios. Karaca *et al.*, (2006) observaram que modificações químicas em minerais carbonáticos aumentaram a capacidade adsorvida ao reduzir impurezas bloqueadoras de superfície. El Asri *et al.*, (2021) destacaram que tratamentos ácidos expõem grupos funcionais superficiais e favorecem a interação entre fosfato e carbonatos. Da mesma forma, Samudio Legal (2018) verificou remoções próximas a 100% em concentrações até 60 mg·L⁻¹ utilizando dolomita modificada.

No contexto internacional, Xu *et al.*, (2014) e Yuan *et al.*, (2015) apontaram que dolomitas não tratadas raramente superam 40% de eficiência, resultado compatível com o observado para a DN neste estudo. Em contraste, a DP apresentou desempenho comparável a materiais modificados de maior custo, como zeólitas e óxidos de ferro, relatados em trabalhos de Zhang *et al.*, (2020) e Kovacevic *et al.*, (2019).

Os resultados reforçam que a purificação simples da dolomita já é capaz de promover ganhos expressivos de eficiência, tornando-a um adsorvente de baixo custo e alto potencial de aplicação em



sistemas de tratamento de águas residuárias. Além disso, a estabilidade do desempenho da DP em concentrações elevadas sugere robustez operacional, aspecto fundamental para aplicações práticas.

3.3 CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL E SUPERFICIAL

3.3.1 FTIR

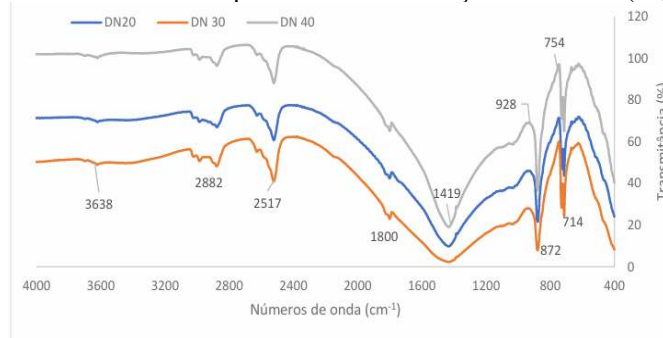
As análises de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) forneceram informações fundamentais sobre a composição funcional das amostras antes e após a adsorção de fosfato. Em ambas as amostras de dolomita (in natura e purificada), foram observadas bandas características atribuídas ao íon carbonato (CO_3^{2-}), típicas de minerais carbonáticos, com destaque para o estiramento assimétrico (ν_3 , 1430–1480 cm^{-1}), a deformação fora do plano (ν_2 , ~875 cm^{-1}) e a deformação no plano (ν_4 , ~713 cm^{-1}), amplamente reportadas na literatura (CHANG *et al.*, 1998; FERREIRA, 2017a; SALAMEH *et al.*, 2015). A dolomita purificada apresentou picos mais definidos e intensos, enquanto a amostra in natura exibiu bandas mais difusas, sugerindo maior homogeneidade estrutural e menor conteúdo de impurezas na amostra purificada. Esse comportamento já foi descrito por Ferreira (2017b) e El Asri *et al.*, (2021), que ressaltaram que processos de purificação removem fases secundárias (argilas, óxidos de ferro e matéria orgânica), resultando em espectros mais nítidos e melhor caracterização das vibrações carbonáticas.

Os espectros de FTIR das amostras de dolomita in natura (DN) e purificada (DP), após contato com soluções de fosfato em diferentes concentrações (20, 30 e 40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), estão apresentados nas Figuras 3 e 4. Em ambas as amostras foram identificadas bandas características atribuídas ao grupo carbonato (CO_3^{2-}), confirmando a natureza carbonática predominante do material. Destacam-se os modos vibracionais em torno de 1419–1427 cm^{-1} , correspondentes ao estiramento assimétrico (ν_3); 872–877 cm^{-1} , atribuídos à deformação fora do plano (ν_2); e 714–730 cm^{-1} , referentes à deformação no plano (ν_4). Esses picos são consistentes com a literatura para minerais carbonáticos, em especial dolomita e calcita, servindo como referência para a detecção de modificações estruturais decorrentes da interação com fosfato.

As Figuras 3 e 4 ilustram de forma comparativa os espectros de FTIR para DN e DP, evidenciando as diferenças de intensidade e definição dos picos característicos. Essa representação permite observar de maneira clara as alterações estruturais promovidas pelo contato com fosfato, constituindo base para a interpretação dos novos sinais vibracionais associados ao ânion adsorvido.

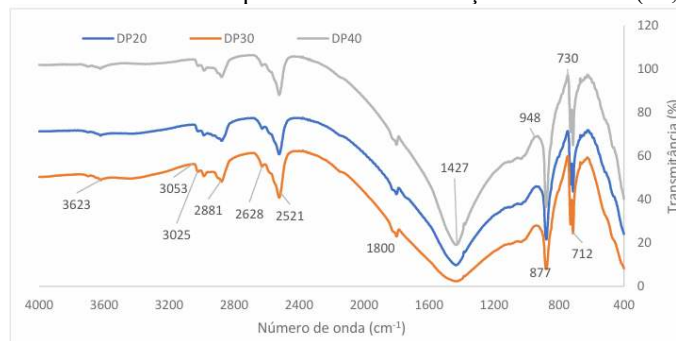


Figura 3. Espectros de FTIR da DN após contato com soluções de fosfato (20, 30 e 40 mg·L⁻¹).



Fonte: Bonfim, 2023.

Figura 4. Espectros de FTIR da DP após contato com soluções de fosfato (20, 30 e 40 mg·L⁻¹).



Fonte: Bonfim, 2023.

Na dolomita purificada, os espectros apresentaram picos mais definidos e intensos, evidenciando maior homogeneidade estrutural e menor interferência de impurezas em relação à dolomita in natura. Além disso, observou-se o surgimento de bandas adicionais na região de 928–948 cm⁻¹, atribuídas ao estiramento P–O do grupo fosfato (PO₄³⁻), indicando interação do mineral com o fosfato após o processo de adsorção. Essas bandas foram menos evidentes na dolomita in natura, sugerindo menor eficiência adsorptiva. Conforme apresentado na Tabela 6 a seguir.

Tabela 6 – Principais bandas de absorção encontradas no FTIR das amostras de DN e DP

Número de onda (cm ⁻¹)	Atribuição	DN	DP	Referência
~3630–3620	O–H (estiramento, água adsorvida)	✓	✓	Zhang <i>et al.</i> , (2020)
2880–2517	Estiramento C–H / combinações	✓	✓	Costa <i>et al.</i> , (2016)
1420–1427	Estiramento assimétrico CO ₃ ²⁻	✓	✓	Mraz <i>et al.</i> , (2023)
872–877	Deformação fora do plano CO ₃ ²⁻	✓	✓	El Asri <i>et al.</i> , (2021)
714–730	Deformação no plano CO ₃ ²⁻	✓	✓	Ferreira (2017a)
928–948	Estiramento P–O (PO ₄ ³⁻)	± (fraco)	✓ (intenso)	Zhang <i>et al.</i> , (2020)

Legenda: ✓ = banda presente; ± = banda pouco definida.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

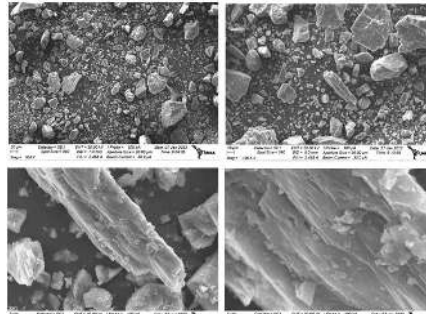


Esses resultados confirmam que a dolomita purificada apresentou maior afinidade química com o fosfato, possivelmente devido à maior disponibilidade de sítios ativos na superfície. Conforme apresentado na Tabela 6, observam-se as principais bandas de absorção no FTIR das amostras de dolomita in natura (DN) e purificada (DP) após contato com fosfato, evidenciando alterações estruturais relacionadas à interação com o ânion. Estudos recentes também relatam o aparecimento de novas bandas atribuídas a fosfatos em materiais carbonáticos após adsorção, como observado por Zhang *et al.*, (2020) e Mraz *et al.*, (2023).

3.3.2 MEV e EDS

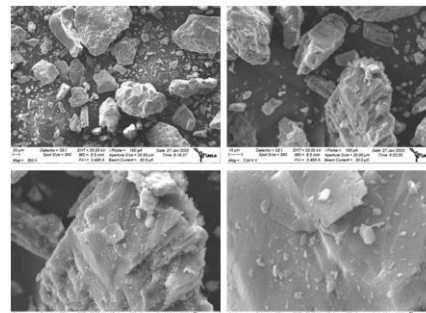
A caracterização morfológica e elementar das amostras de dolomita foi realizada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) associada à Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios X (EDS). O MEV fornece micrografias de alta resolução, permitindo avaliar morfologia, textura e distribuição das partículas (GOLDSTEIN *et al.*, 2017), enquanto o EDS possibilita identificar, de forma qualitativa e semi-quantitativa, os elementos químicos presentes na superfície (SALAMEH *et al.*, 2015; SAUFFI *et al.*, 2020). As micrografias evidenciaram diferenças marcantes entre dolomita in natura e dolomita purificada após contato com fosfato (Figuras 5–7 para DN; Figuras 8–10 para DP).

Figura 5 - Imagens do MEV da dolomita in natura saturada com solução de 20ppm.



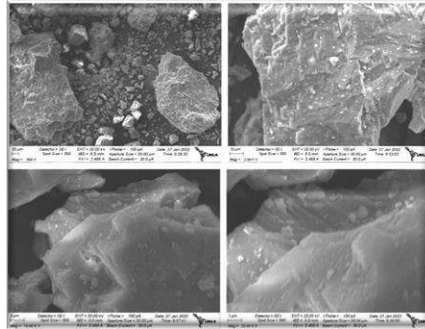
Fonte: Laboratórios Multiusuários PTI, 2022.

Figura 6 - Imagens do MEV da dolomita in natura saturada com solução de 30ppm.



Fonte: Laboratórios Multiusuários PTI, 2022.

Figura 7 - Imagens do MEV da dolomita in natura saturada com solução de 40ppm.



Fonte: Laboratórios Multiusuários PTI, 2022.

Essas técnicas são amplamente aplicadas em estudos de adsorção, pois permitem correlacionar modificações superficiais, como purificação química, com a disponibilidade de sítios ativos e a incorporação de espécies adsorvidas (ZHANG *et al.*, 2020; EL ASRI *et al.*, 2021).

Deste modo, a dolomita in natura apresentou superfície áspera e irregular, com partículas de tamanhos heterogêneos, muitas delas exibindo formas pontiagudas e angulosas (SAUFFI *et al.*, 2020). Nas micrografias correspondentes às amostras saturadas com fosfato (Figuras 5, 6 e 7), é possível observar que:

- Em $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Figura 5), predominam aglomerados irregulares de menor dimensão, distribuídos de forma heterogênea.
- Em $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Figura 6), esses aglomerados tornam-se relativamente maiores, sugerindo início de deposição superficial mais intensa.
- Em $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Figura 7), os aglomerados mantêm morfologia irregular, porém apresentam dimensões superiores às observadas nas concentrações anteriores.

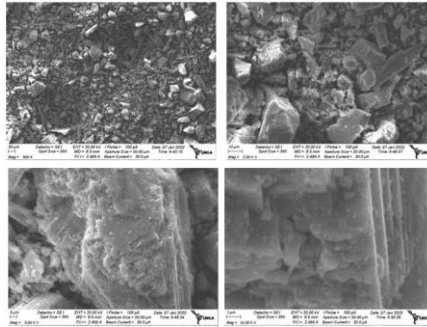
Em todas as concentrações, foram identificadas partículas finas aderidas à superfície, evidenciando a fragilidade mecânica da dolomita e sua propensão à fragmentação (SALAMEH *et al.*, 2015). No entanto, na amostra de $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ a superfície mostrou-se relativamente mais uniforme, possivelmente em decorrência de um processo limitado de precipitação de fosfatos de cálcio, o que explicaria a menor remoção de fosfatos da solução aquosa em comparação às amostras de $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

Esse comportamento indica que, em concentrações mais elevadas, a DN pode sofrer saturação precoce dos sítios ativos e redução da eficiência adsortiva, resultado consistente com a menor eficiência de remoção obtida experimentalmente (XU *et al.*, 2014; YUAN *et al.*, 2015).

Por outro lado, a dolomita purificada (DP) apresentou superfície distinta, com fragmentações irregulares e partículas finas, também demonstrando fragilidade mineralógica, as quais podem ser vistas nas Figuras 8, 9 e 10 a seguir.

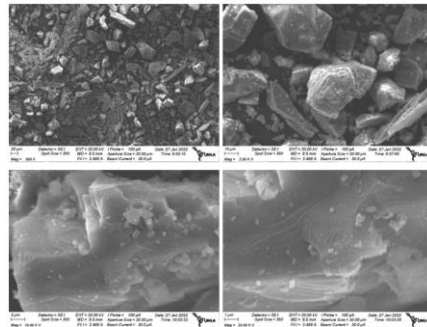


Figura 8 - Imagens do MEV da dolomita putrificada saturada com solução de 20ppm.



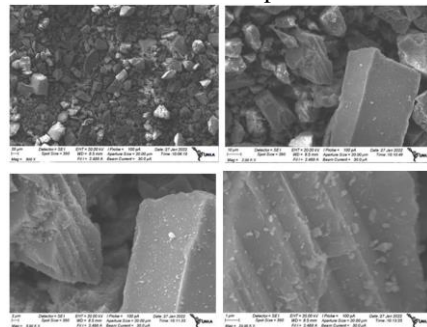
Fonte: Laboratórios Multiusuários PTI, 2022.

Figura 9 - Imagens do MEV da dolomita purificada com solução de 30ppm



Fonte: Laboratórios Multiusuários PTI, 2022.

Figura 10 - Imagens do MEV da dolomita purificada com solução de 40ppm.



Fonte: Laboratórios Multiusuários PTI, 2022.

A micrografias apresentadas da dolomita purificada e saturada (Figuras 15, 16 e 17) evidenciam um padrão mais homogêneo de agregação. Observa-se que:

- Em $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (Figura 15), a superfície exibe pequenas formações granulares dispersas.
- Em $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (Figura 16), essas formações tornam-se mais densas, indicando intensificação da deposição de fosfato.
- Em $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (Figura 17), há a formação de aglomerados de maior porte e maior uniformidade, confirmando a ocorrência de maior adsorção de fosfato da solução aquosa.

Esse comportamento evidencia que a purificação da dolomita aumentou a área superficial efetiva e a exposição de sítios ativos (Ca^{2+} e Mg^{2+}), o que favoreceu não apenas a adsorção física, mas também a precipitação superficial de compostos fosfatados (ZHANG *et al.*, 2020; MRAZ *et al.*, 2023).



Além disso, a maior homogeneidade da superfície contribuiu para um processo mais eficiente e estável, reduzindo a influência de impurezas que competem pelos sítios ativos, como observado na DN.

Essas diferenças morfológicas observadas entre DN e DP corroboram resultados de outros trabalhos que relacionam a eficiência de adsorção à textura superficial e à porosidade dos adsorventes minerais. Ferreira (2017a) descreveu que minerais carbonáticos com partículas mais homogêneas e porosas apresentam desempenho superior, enquanto Roques *et al.*, (1991) destacaram que a disponibilidade de Ca^{2+} é determinante na formação de complexos estáveis de Ca-P.

Portanto, a análise das micrografias reforça a interpretação dos resultados quantitativos: a dolomita purificada apresentou maior remoção de fósforo devido à morfologia mais favorável à adsorção e precipitação, enquanto a dolomita in natura, apesar de apresentar aglomerados crescentes com o aumento da concentração, mostrou-se limitada em termos de eficiência, resultado da combinação entre heterogeneidade superficial, saturação de sítios ativos e presença de impurezas minerais.

De modo geral, as imagens revelaram que tanto a granulometria quanto a textura superficial variam conforme o tipo de dolomita e o tratamento aplicado, sugerindo que a purificação promoveu modificações na morfologia.

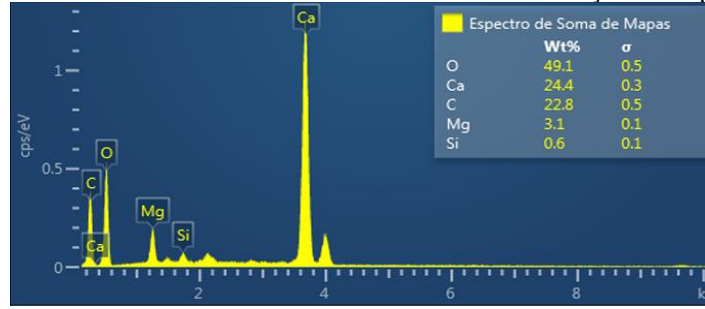
As análises de MEV mostraram diferenças claras na morfologia das amostras de dolomita in natura e purificada, após saturação com soluções de fosfato de diferentes concentrações (20, 30 e 40 ppm).

- Dolomita in natura: partículas de formato irregular e anguloso, com presença de fissuras, porosidade e rugosidade superficial. Em algumas regiões, observou-se aglomerados de partículas menores aderidas às maiores.
- Dolomita purificada: partículas com morfologia mais definida, lamelar e em alguns casos prismáticos, apresentando superfícies mais homogêneas e compactas em comparação à amostra in natura.

Como complemento às micrografias, foram realizadas análises de Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios X (EDS), cujos espectros estão apresentados nas Figuras 11 a 16. Os resultados confirmaram a presença dos principais constituintes da dolomita em todas as amostras, incluindo oxigênio (O), cálcio (Ca), carbono (C), magnésio (Mg) e silício (Si), este último associado a impurezas da matriz mineral (DE MELLO; PIMENTEL, 2021). Além de confirmar a composição química característica da dolomita, os espectros permitiram avaliar diferenças sutis entre as amostras in natura e purificada, reforçando os resultados obtidos por EDS pontual e mapeamento elementar. Essa abordagem complementar aumenta a confiabilidade da caracterização, fornecendo evidências adicionais da interação entre a matriz mineral e as espécies fosfatadas.

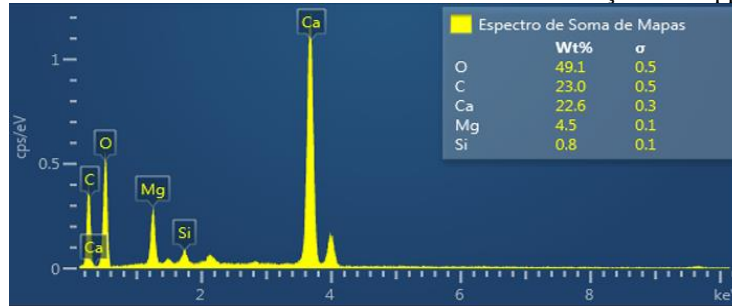


Figura 11 - EDS da amostra de dolomita in natura saturada com solução de 20 ppm de fosfato.



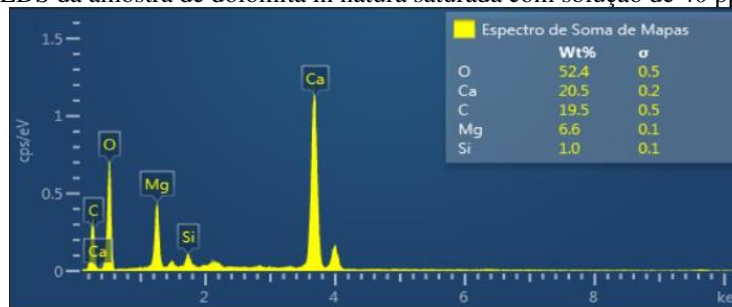
Fonte: Laboratórios Multiusuários PTI, 2022.

Figura 12 - EDS da amostra de dolomita in natura saturada com solução de 30 ppm de fosfato.



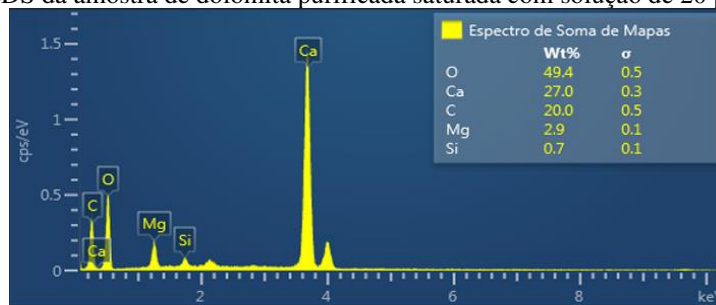
Fonte: Laboratórios Multiusuários PTI, 2022.

Figura 13 - EDS da amostra de dolomita in natura saturada com solução de 40 ppm de fosfato.



Fonte: Laboratórios Multiusuários PTI, 2022.

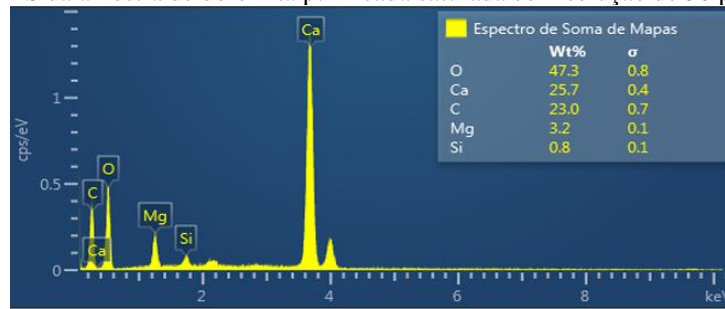
Figura 14 - EDS da amostra de dolomita purificada saturada com solução de 20 ppm de fosfato.



Fonte: Laboratórios Multiusuários PTI, 2022.

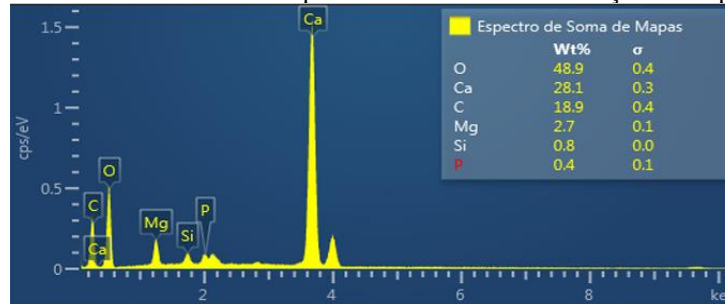


Figura 15 - EDS da amostra de dolomita purificada saturada com solução de 30 ppm de fosfato.



Fonte: Laboratórios Multiusuários PTI, 2022.

Figura 16 - EDS da amostra de dolomita purificada saturada com solução de 40 ppm de fosfato.



Fonte: Laboratórios Multiusuários PTI, 2022.

Os resultados de EDS confirmaram a presença dos principais constituintes da dolomita: O, Ca, C, Mg e Si em todas as amostras. Após a saturação com fosfato:

- A dolomita in natura manteve composições relativamente constantes, com variação nos teores de Ca (24,4% em 20 ppm → 20,5% em 40 ppm) e Mg (3,1% → 6,6%).
- A dolomita purificada apresentou maiores teores de Ca (27,0% em 20 ppm; 28,1% em 40 ppm) e, no caso da amostra saturada com 40 ppm, observou-se a presença do elemento P (0,4%), indicando maior eficiência na adsorção do fosfato.

Dolomita in natura

Os espectros de EDS das amostras de dolomita in natura saturadas com soluções de fosfato (20, 30 e 40 mg·L⁻¹) confirmaram a presença dos constituintes típicos do mineral: O, Ca, C, Mg e Si (Figuras 11-13).

Observou-se tendência de redução do teor de cálcio com o aumento da concentração de fosfato (24,4% → 20,5%), enquanto o magnésio apresentou incremento (3,1% → 6,6%).

Essa variação sugere que a presença de impurezas e a heterogeneidade da superfície comprometeram a interação entre o fosfato e os sítios de Ca²⁺, favorecendo processos competitivos. Em nenhuma das amostras foi detectada a presença de fósforo, o que corrobora os baixos percentuais de remoção obtidos experimentalmente.

Dolomita purificada

Na dolomita purificada (Figuras 14-16), os teores de cálcio permaneceram elevados e relativamente estáveis (27,0%–28,1%), indicando maior disponibilidade de sítios reativos. O



magnésio, por sua vez, variou pouco (2,7%–3,2%). O aspecto mais relevante foi a detecção do elemento fósforo (0,4%) na amostra saturada com 40 mg·L⁻¹, evidência direta da retenção do ânion fosfato na superfície do adsorvente.

Esse resultado está em consonância com os altos percentuais de remoção obtidos nos ensaios e sugere que a purificação aumentou a acessibilidade de grupos carbonáticos e a participação do cálcio nos mecanismos de adsorção.

Comparando as duas amostras, observa-se que:

- Dolomita in natura: apresentou redução de Ca e aumento de Mg com a elevação da concentração de fosfato, sem detecção de P nos espectros.
- Dolomita purificada: manteve altos teores de Ca e possibilitou a identificação de P em 40 mg·L⁻¹, indicando maior eficiência de adsorção.

Tabela 7 – Composição elementar (%) das amostras obtida por EDS.

Amostra	Concentração (mg·L ⁻¹)	O (%)	Ca (%)	C (%)	Mg (%)	Si (%)	P (%)
Dolomita in natura	20	49,1	24,4	22,8	3,1	0,6	–
	30	49,1	22,6	23,0	4,5	0,8	–
	40	52,4	20,5	19,5	6,6	1,0	–
Dolomita purificada	20	49,4	27,0	20,0	2,9	0,7	–
	30	47,3	25,7	23,0	3,2	0,8	–
	40	48,9	28,1	18,9	2,7	0,8	0,4

Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

Esses resultados dispostos na Tabela 7, confirmam a importância do cálcio como principal cátion envolvido na fixação de fosfato, em acordo com Hanna *et al.*, (2008), que destacam a relevância de Ca²⁺ e Mg²⁺ na formação de precipitados pouco solúveis, como hidroxiapatita e estruvita. A maior proporção de Ca na dolomita purificada, associada à eliminação de impurezas, favoreceu a interação com o fosfato, permitindo a sua detecção pelo EDS.

Nugroho *et al.*, (2014) também observaram que o aumento da concentração inicial de fosfato intensifica a força motriz de difusão e promove maior adsorção, comportamento compatível com os resultados da dolomita purificada neste estudo. Adicionalmente, estudos recentes indicam que a dissolução preferencial de Ca²⁺ em relação ao Mg²⁺ eleva a reatividade da superfície carbonática (DE MELLO; PIMENTEL, 2021), o que explica a correlação entre maiores teores de Ca e a presença de P nos espectros.

Em síntese, a análise de EDS reforça que a purificação da dolomita é um procedimento simples e eficaz para aumentar a disponibilidade de sítios ativos de Ca²⁺, favorecendo a adsorção de fosfato e tornando o material mais promissor para aplicações no tratamento de águas residuárias.



3.4 COMPARAÇÃO GERAL DE ADSORÇÃO E CARACTERÍSTICAS SUPERFICIAIS

A correlação entre eficiência de remoção de fósforo e características estruturais superficiais mostra:

- Dolomita purificada → maior porosidade e superfície homogênea → maior remoção (~95%).
- Dolomita in natura → irregularidades e impurezas → menor remoção (24–37%).

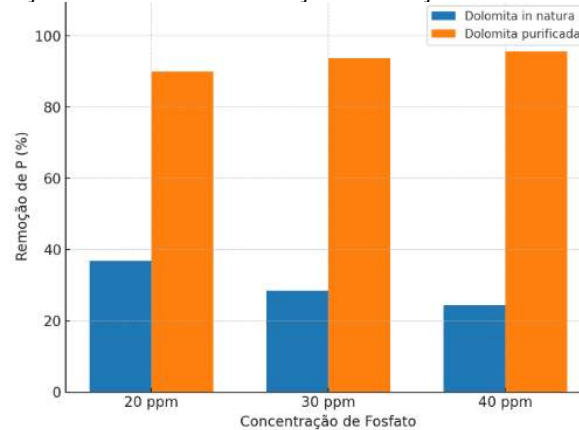
Tabela 8 – Resumo comparativo das características estruturais e eficiência de remoção de fósforo.

Amostra	Superfície	Porosidade	Remoção de P (%)
Dolomita in natura	Irregular	Baixa	24 – 37
Dolomita purificada	Homogênea	Alta	90 – 96

Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

Os resultados obtidos (Tabela 8), permitem estabelecer uma análise integrada da eficiência de remoção de fósforo pelas amostras de dolomita in natura (DN) e purificada (DP). A dolomita purificada apresentou desempenho superior em todos os ensaios, mantendo elevada eficiência de remoção, independentemente da concentração inicial de fosfato. Em contraste, a dolomita in natura apresentou desempenho significativamente inferior, com tendência de redução da eficiência à medida que a concentração aumentou, evidenciando a influência negativa das impurezas presentes em sua composição, como mostra a Figura 17.

Figura 17 – Comparação da eficiência de remoção em relação a concentração inicial da DN e DP.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

As análises de caracterização (FTIR, MEV e EDS) reforçam essa diferença. O FTIR revelou modificações nas bandas relacionadas aos grupos carbonato após o processo de adsorção, bem como o surgimento de bandas associadas a fosfatos, confirmando a interação química entre o adsorvato e a superfície do adsorvente. O MEV mostrou que a dolomita purificada apresenta partículas mais homogêneas e porosas, enquanto a dolomita in natura possui morfologia irregular e heterogênea, o que reduz a disponibilidade de sítios ativos. Já o EDS evidenciou variações na composição elementar, com



destaque para a detecção do fósforo apenas na amostra purificada saturada com solução de $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, resultado que confirma sua maior capacidade de adsorção.

Assim, a correlação entre a eficiência de adsorção e as características estruturais e superficiais das amostras é clara: a maior homogeneidade, porosidade e teor de cálcio na dolomita purificada proporcionam maior disponibilidade de sítios reativos, favorecendo a retenção de fosfato. Esses achados não apenas corroboram estudos prévios sobre a influência de modificações físico-químicas em minerais carbonáticos (KARACA *et al.*, 2006; EL ASRI *et al.*, 2021; MRAZ *et al.*, 2023), como também confirmam o potencial da dolomita purificada como adsorvente eficiente, sustentável e de baixo custo para o tratamento de águas enriquecidas em fósforo.

4 DISCUSSÃO

A curva de calibração apresentou comportamento linear no intervalo estudado, com equação $y = 0,0337x - 0,0044$ e coeficiente de determinação $R^2 = 0,9998$, confirmando ajuste quase perfeito ao modelo linear. Esse resultado evidencia a confiabilidade do método colorimétrico adotado para quantificação de fósforo, em conformidade com recomendações metodológicas (COSTA *et al.*, 2016; EL ASRI *et al.*, 2021). Os limites de detecção (LOD) e de quantificação (LOQ), determinados a partir dos parâmetros da regressão, reforçam a sensibilidade do procedimento, garantindo a detecção de variações sutis de concentração após a adsorção.

Nos ensaios comparativos, a dolomita in natura (DN) apresentou remoções entre 24 e 37%, com redução da eficiência em concentrações mais elevadas, comportamento que pode estar associado à saturação dos sítios ativos e à competição entre íons fosfato e hidroxila em pH alcalino (YUAN *et al.*, 2015). Por outro lado, a dolomita purificada (DP) exibiu desempenho superior em todas as concentrações, com remoções de 89 a 96%. A eliminação de impurezas e a maior homogeneidade estrutural obtida no processo de purificação aumentaram a disponibilidade de sítios ativos, favorecendo a interação com o fosfato e explicando o elevado desempenho observado.

4.1 MECANISMOS DE ADSORÇÃO E INFLUÊNCIA DO PH

A remoção de fósforo por dolomita ocorre por mecanismos combinados e interdependentes. O primeiro envolve a troca iônica, na qual íons fosfato substituem íons Ca^{2+} e Mg^{2+} superficiais, liberando carbonato para a solução (XU *et al.*, 2014). Em seguida, ocorre a precipitação superficial, com a formação de compostos pouco solúveis como hidroxiapatita [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$] e estruvita [$\text{MgNH}_4\text{PO}_4\cdot 6\text{H}_2\text{O}$], que permanecem aderidos à matriz mineral (KOVACEVIC *et al.*, 2019; MRAZ *et al.*, 2023). Além disso, a adsorção química (complexação) desempenha papel importante, caracterizada pela ligação estável do fosfato a sítios ativos contendo Ca^{2+} e Mg^{2+} expostos na superfície da dolomita.



O pH da solução exerce papel decisivo nesses processos. Em meio alcalino, intensifica-se a dissolução parcial da dolomita, aumentando a liberação de Ca^{2+} e Mg^{2+} disponíveis para reagir com o fosfato, o que favorece a formação de precipitados insolúveis e complexos superficiais estáveis. Esse efeito foi particularmente evidente na dolomita purificada (DP), que, devido à maior homogeneidade estrutural, apresentou disponibilidade mais elevada de sítios ativos, resultando em remoções de até 96%.

Na dolomita in natura (DN), em contrapartida, a presença de impurezas e a menor área superficial dificultaram a difusão dos íons e promoveram competição entre fosfato e hidroxilas (OH^-), o que levou a uma queda na eficiência de remoção em concentrações mais altas, comportamento descrito também por Yuan *et al.*, (2015). Essa diferença evidencia que, embora o pH alcalino favoreça a reação de fosfato com Ca^{2+} e Mg^{2+} , o benefício só se concretiza plenamente em superfícies mais limpas e homogêneas, como observado na DP.

Portanto, os resultados indicam que a eficiência de adsorção da dolomita depende não apenas da composição química e disponibilidade de cátions, mas também da interação entre pH, solubilidade e pureza mineral, confirmando que a purificação amplia a estabilidade das interações com o fósforo e potencializa o processo de remoção mesmo em condições mais adversas.

4.2 COMPARAÇÃO COM A LITERATURA

Os resultados obtidos neste estudo são consistentes com pesquisas internacionais que reportam elevada eficiência de minerais carbonáticos modificados na remoção de fósforo. Zhang *et al.*, (2020) observaram remoções superiores a 90% em carbonatos ativados quimicamente, reforçando que o tratamento superficial amplia significativamente a afinidade pelo fosfato. De forma semelhante, Samudio Legal (2018) relatou remoções próximas a 100% em soluções de até $60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ utilizando dolomita, resultado comparável ao alcançado neste trabalho com a amostra purificada (DP).

Por outro lado, estudos como os de Xu *et al.*, (2014) e Yuan *et al.*, (2015) demonstraram que dolomitas não tratadas raramente superam 40% de remoção, especialmente em concentrações mais elevadas de fósforo, devido à competição iônica e à obstrução de sítios ativos por impurezas. Essa tendência foi confirmada experimentalmente na dolomita in natura analisada neste estudo, que apresentou eficiências entre 24 e 37%, evidenciando as limitações desse material sem purificação prévia.

Em contexto nacional, a busca por materiais adsorventes de baixo custo e ampla disponibilidade tem sido apontada como estratégica para mitigar a poluição difusa por fósforo em reservatórios e corpos d'água eutrofizados (OLIVEIRA *et al.*, 2021; GUIMARÃES; LIMA NETO, 2023). Nesse sentido, a dolomita purificada demonstrou desempenho comparável a adsorventes de maior custo, como zeólitas modificadas e óxidos de ferro e alumínio, mas com a vantagem da abundância geológica



em estados como Minas Gerais, Bahia e Paraná, o que confere elevada viabilidade de aplicação em larga escala (PEREIRA *et al.*, 2020).

Além do aspecto econômico, destaca-se também a sustentabilidade da aplicação: ao contrário de materiais sintéticos ou importados, a dolomita purificada pode ser integrada a sistemas descentralizados de saneamento e posteriormente reutilizada como insumo agrícola, fechando o ciclo do fósforo em consonância com princípios de economia circular e segurança alimentar (WITHERS *et al.*, 2018).

Tabela 9 – Comparação entre resultados da literatura e do presente estudo.

Material/Estudo	Condição experimental	Remoção de fósforo (%)	Referência
Dolomita modificada	Solução 20–60 mg·L ⁻¹	90–100	Samudio Legal (2018)
Dolomita natural	Solução 10–50 mg·L ⁻¹	20–40	Xu <i>et al.</i> , (2014)
Carbonatos modificados	Solução 30–80 mg·L ⁻¹	>90	Zhang <i>et al.</i> , (2020)
Dolomita (diferentes pHs)	Solução 10–40 mg·L ⁻¹	30–70	Yuan <i>et al.</i> , (2015)
Dolomita purificada (este estudo)	Solução 20–40 mg·L ⁻¹	89–96	Autoria própria (2025)
Dolomita in natura (este estudo)	Solução 20–40 mg·L ⁻¹	24–37	Autoria própria (2025)

Fonte: Adaptado de Xu *et al.*, (2014); Yuan *et al.*, (2015); Samudio Legal (2018); Zhang *et al.*, (2020);

A Tabela 9 sintetiza essa comparação, demonstrando que a dolomita purificada atingiu desempenho equivalente ao de materiais modificados de alto custo, enquanto a dolomita in natura confirmou a baixa eficiência já reportada na literatura, reforçando a necessidade de tratamento prévio para aplicação prática.

4.3 EVIDÊNCIAS ESTRUTURAIS E QUÍMICAS

As análises de FTIR confirmaram a presença de bandas típicas de carbonatos (CO₃²⁻) em ambas as amostras, incluindo picos em 1419–1427 cm⁻¹ (estiramento assimétrico), 872–877 cm⁻¹ (deformação fora do plano) e 714–730 cm⁻¹ (deformação no plano), em concordância com estudos de minerais carbonáticos (EL ASRI *et al.*, 2021; MRAZ *et al.*, 2023). No entanto, após o processo de adsorção, foram observadas bandas adicionais na região de 928–948 cm⁻¹, atribuídas ao estiramento P–O do fosfato, mais intensas na dolomita purificada (DP). Esse resultado evidencia a maior afinidade química da DP com o fósforo, sugerindo não apenas adsorção física, mas também interações químicas estáveis na superfície, conforme reportado por Zhang *et al.*, (2020) e confirmado por Mraz *et al.*, (2023).

As micrografias de MEV mostraram diferenças morfológicas expressivas entre as amostras:



- Dolomita in natura (DN) → partículas de morfologia irregular, com fissuras, rugosidades e tendência à aglomeração de partículas menores. Essa configuração pode dificultar a difusão do fosfato até os sítios ativos e favorecer o bloqueio de poros por impurezas, limitando a eficiência adsortiva.
- Dolomita purificada (DP) → partículas com morfologia mais homogênea, textura lamelar e estrutura porosa, resultando em maior área superficial efetiva. Essa condição favorece a acessibilidade dos íons fosfato aos sítios de Ca^{2+} e Mg^{2+} , promovendo interações mais eficientes e estáveis.

Esses achados foram corroborados pela análise de EDS, que identificou os elementos característicos da dolomita (O, C, Ca e Mg) em ambas as amostras, mas detectou fósforo apenas na DP saturada a $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. A presença de P exclusivamente na dolomita purificada confirma sua maior capacidade de fixação, associada à maior disponibilidade de Ca^{2+} exposto para formação de complexos Ca–P estáveis (ROQUES *et al.*, 1991; MRAZ *et al.*, 2023). Em contrapartida, a ausência de P detectável na DN sugere que a adsorção nessa amostra ocorreu em menor escala e de forma menos estável, provavelmente restrita a processos físicos superficiais.

Do ponto de vista mecanístico, os resultados de FTIR, MEV e EDS integram-se de forma coerente: a purificação promoveu uma superfície mais homogênea, aumentou a área porosa, expôs mais sítios ativos de $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ e reduziu a interferência de impurezas, condições que explicam o desempenho adsortivo superior da DP observado nos ensaios de remoção.

Em comparação com a literatura, estudos semelhantes também identificaram a importância da morfologia e da composição química na eficiência de adsorção de minerais carbonáticos. Ferreira (2017a) descreveu que partículas mais homogêneas e porosas apresentam melhor desempenho em processos de remoção de fósforo, enquanto Roques *et al.*, (1991) destacaram o papel do Ca^{2+} disponível na formação de precipitados Ca–P como mecanismo central. Assim, os resultados deste trabalho não apenas corroboram evidências internacionais, mas também reforçam a aplicabilidade prática da dolomita purificada como um adsorvente competitivo e sustentável no contexto brasileiro.

Após o processo de adsorção, verificou-se o surgimento de novas bandas atribuídas ao grupo fosfato (PO_4^{3-}), principalmente na região entre $1040\text{--}1100 \text{ cm}^{-1}$ (estiramento ν_3) e próximo a $560\text{--}600 \text{ cm}^{-1}$ (dobramentos ν_4). Essas alterações confirmam a interação química do fosfato com os grupos superficiais da dolomita, evidenciando a substituição parcial dos íons carbonato por fosfato ou a formação de precipitados superficiais, como apatita ou fosfatos de magnésio e cálcio (XU *et al.*, 2014; KOVACEVIC *et al.*, 2019; MRAZ *et al.*, 2023). A presença dessas novas bandas, ausentes nas amostras sem contato com fosfato, constitui um diagnóstico claro da incorporação do ânion, corroborando os resultados de remoção obtidos nos ensaios adsortivos.



Na microscopia eletrônica de varredura (MEV), a DN apresentou superfície heterogênea, composta por partículas de morfologia irregular, tamanho variado e presença de agregados de contornos angulosos. Esse aspecto é compatível com minerais naturais não processados, em que impurezas e heterogeneidade cristalina dificultam a difusão e a interação de solutos nos sítios ativos (SAUFFI *et al.*, 2020). Por outro lado, a DP revelou partículas mais homogêneas, com maior uniformidade e evidência de porosidade superficial. Essa morfologia mais aberta favorece a difusão dos íons fosfato e amplia a área de contato efetivo, justificando a maior eficiência de remoção observada para a DP (FERREIRA, 2017b; EL ASRI *et al.*, 2021).

Após os ensaios de adsorção, em ambas as amostras foram observadas mudanças na textura superficial. A DN mostrou aglomerados irregulares de maior dimensão à medida que a concentração inicial de fosfato aumentava, sugerindo a deposição heterogênea de compostos fosfatados. Em concentrações mais altas ($40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), observou-se recobrimento mais uniforme da superfície, mas ainda associado a baixa eficiência global devido à limitação de sítios ativos disponíveis. Já a DP apresentou fragmentações e agregados mais consistentes, especialmente na concentração de $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, indicando deposição de fosfatos em maior extensão e de forma mais homogênea. Esse comportamento confirma que a purificação do material aumentou a disponibilidade de sítios e melhorou a acessibilidade estrutural, potencializando os mecanismos de adsorção e/ou precipitação superficial.

Os resultados de EDS complementaram as observações de FTIR e MEV, permitindo identificar a composição elementar das amostras. Antes da adsorção, ambas as dolomitas apresentaram majoritariamente cálcio (Ca), magnésio (Mg), oxigênio (O) e carbono (C), característicos de carbonatos de Ca-Mg. Após o processo de adsorção, detectou-se a presença inequívoca de fósforo (P) nos espectros, o que comprova a retenção do elemento no material. Na DP, a intensidade relativa do pico de P foi superior à observada na DN, resultado coerente com a maior capacidade de remoção obtida experimentalmente. Além disso, os espectros indicaram variações na proporção relativa de Ca e Mg, sugerindo que processos de troca iônica também podem ter ocorrido, com liberação desses cátions para a solução em contrapartida à incorporação de fosfato (YUAN *et al.*, 2015; ZHANG *et al.*, 2020).

Portanto, a combinação das técnicas de FTIR, MEV e EDS forneceu evidências consistentes e complementares de que o processo de purificação da dolomita promoveu alterações morfológicas e estruturais significativas, aumentando a porosidade, homogeneidade e acessibilidade dos sítios ativos. Essas mudanças explicam a maior eficiência adsortiva da DP em relação à DN. Além disso, a identificação de bandas fosfatadas no FTIR, depósitos superficiais no MEV e picos de fósforo no EDS constituem provas diretas da retenção do ânion fosfato, corroborando os mecanismos discutidos de troca iônica, adsorção superficial e precipitação de fosfatos de cálcio e magnésio.

4.4 IMPLICAÇÕES PRÁTICAS E SUSTENTABILIDADE

Do ponto de vista prático, os resultados obtidos neste trabalho indicam que a dolomita purificada representa uma solução promissora para sistemas de tratamento de efluentes, especialmente em contextos descentralizados e em regiões rurais com baixa infraestrutura de saneamento. A combinação de elevada eficiência de remoção de fósforo (~95%), baixo custo de obtenção e ampla disponibilidade geológica no território brasileiro confere ao material um potencial de aplicação em larga escala. Essa característica é particularmente relevante no Brasil, onde a carência de tecnologias acessíveis limita o avanço do saneamento em áreas periurbanas e comunidades isoladas (OLIVEIRA *et al.*, 2021; GUIMARÃES; LIMA NETO, 2023).

A versatilidade da dolomita purificada permite sua integração em diferentes configurações tecnológicas, como filtros de leito fixo, barreiras reativas permeáveis e wetlands construídos, atuando como meio suporte e adsorvente simultaneamente. Estudos recentes têm demonstrado que a incorporação de minerais carbonáticos em sistemas de tratamento natural aumenta a remoção de nutrientes e contribui para a mitigação da eutrofização em corpos d'água receptores (EL ASRI *et al.*, 2021; ZHANG *et al.*, 2020).

Outro aspecto de destaque é o reaproveitamento do material saturado com fósforo. Após a sua utilização como adsorvente, a dolomita enriquecida em P pode ser aplicada ao solo como fertilizante de liberação lenta, promovendo a reciclagem de nutrientes e reduzindo a dependência de fertilizantes solúveis importados. Essa possibilidade é estratégica no cenário nacional, uma vez que o Brasil é altamente dependente da importação de fósforo para a agricultura, setor que responde por mais de 20% do consumo global (WITHERS *et al.*, 2018; ALMEIDA *et al.*, 2022). A aplicação agrícola de dolomita saturada alinha-se, portanto, aos princípios da economia circular e à valorização de resíduos, contribuindo para o fechamento do ciclo do fósforo e para a segurança alimentar.

Adicionalmente, a adoção de dolomita purificada como material de tratamento pode gerar impactos socioeconômicos positivos, estimulando cadeias produtivas locais em estados com grandes jazidas, como Minas Gerais, Bahia e Paraná, e reduzindo a pressão sobre recursos importados de alto custo. No âmbito ambiental, a tecnologia contribui para a redução da poluição difusa por fósforo, mitigando processos de eutrofização que comprometem a biodiversidade aquática e os usos múltiplos da água.

Em síntese, a dolomita purificada apresenta não apenas eficácia técnica, mas também viabilidade ambiental, econômica e social, configurando-se como uma alternativa sustentável para o manejo de fósforo em sistemas de saneamento e agricultura. Sua aplicação está alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial o ODS 6 – Água potável e saneamento e o ODS 12 – Consumo e produção responsáveis, reforçando o papel de soluções minerais abundantes e de baixo custo no enfrentamento dos desafios ambientais globais.



4.5 LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Apesar dos resultados promissores, algumas limitações devem ser consideradas. Os ensaios foram conduzidos em condições controladas de laboratório, com soluções sintéticas de fosfato. Em efluentes reais, a presença de íons competitivos (sulfato, nitrato, bicarbonato) e matéria orgânica pode reduzir a eficiência, como relatado para carbonatos e óxidos modificados (KOVACEVIC *et al.*, 2019; EL ASRI *et al.*, 2021). Assim, a aplicação em escala real exige testes em matrizes mais complexas.

Parâmetros operacionais como granulometria, tempo de contato e carga inicial de fósforo também precisam ser explorados em faixas mais amplas e sob diferentes regimes hidrodinâmicos, para definir condições ótimas de operação.

A regeneração e o reuso do adsorvente são temas centrais. Embora a aplicação agrícola do material saturado se alinhe à economia circular, a viabilidade técnica e econômica da regeneração deve ser avaliada. Futuras pesquisas podem testar rotas químicas ou térmicas e seus efeitos na estrutura mineral.

Quanto à escalabilidade, a abundância de jazidas de dolomita no Brasil é favorável, mas o uso em sistemas piloto e de maior porte requer estudos sobre extração, purificação, logística e aceitação regulatória e social, sobretudo quanto ao reaproveitamento agrícola.

Outra frente de desenvolvimento é a integração da dolomita purificada a materiais híbridos, como compósitos com óxidos metálicos, carvão ativado ou biopolímeros, estratégia já promissora em estudos internacionais (ZHANG *et al.*, 2020; MRAZ *et al.*, 2023).

Em síntese, a dolomita purificada demonstrou alta eficiência e potencial de uso sustentável, mas sua consolidação depende de ensaios em condições reais, estratégias de regeneração e estudos de viabilidade econômica e ambiental, ampliando sua inserção como alternativa estratégica no manejo do fósforo.

5 CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo demonstraram que a dolomita purificada (DP) apresenta elevado potencial como adsorvente para remoção de fósforo de soluções aquosas. Enquanto a dolomita in natura (DN) apresentou eficiências limitadas, variando entre 24 e 37%, a dolomita purificada manteve remoções consistentes entre 89 e 96%, independentemente da concentração inicial de fosfato.

As análises estruturais e superficiais (FTIR, MEV e EDS) confirmaram que a purificação promoveu aumento da homogeneidade, maior porosidade e maior exposição de sítios ativos de Ca^{2+} , fatores determinantes para a maior eficiência de adsorção. A detecção de fósforo na superfície da DP após o processo reforça a participação de mecanismos combinados de troca iônica, precipitação superficial e complexação química.



Do ponto de vista prático, a dolomita purificada configura-se como uma alternativa sustentável, de baixo custo e ampla disponibilidade geológica no Brasil, podendo ser aplicada em sistemas descentralizados de tratamento de efluentes e ainda reaproveitada como insumo agrícola, em consonância com princípios de economia circular.

Por fim, apesar da elevada eficiência em condições controladas, recomenda-se a realização de estudos futuros em matrizes reais de efluentes, bem como investigações sobre regeneração, reuso e integração da dolomita purificada em sistemas híbridos de tratamento, visando ampliar sua aplicabilidade em larga escala.



REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. R.; SOUZA, F. J.; CARVALHO, R. A. Application of UV-Vis spectrophotometry in phosphorus monitoring of natural and wastewaters. *Environmental Monitoring and Assessment*, Dordrecht, v. 194, p. 1-12, jan. 2022.

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23. ed. Washington, DC, jan. 2017.

BONFIM, G. B. *Incorporação de dolomita em hidrogel superabsorvente para retenção de fósforo em sistemas agrícolas*. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso – UNILA, Foz do Iguaçu.

CHANG, R. et al. Infrared spectra of carbonate minerals. *American Mineralogist*, v. 83, p. 1120–1130, 1998.

COSTA, R. H. R.; MENDONÇA, M. C. S.; SILVA, A. P. Limites de detecção e quantificação em métodos colorimétricos aplicados à determinação de fósforo em águas. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 21, n. 3, p. 543-552, jun. 2016.

DE MELLO, R. L.; PIMENTEL, P. M. Calcium–magnesium interactions in dolomitic surfaces: implications for phosphate adsorption. *Applied Geochemistry*, Amsterdam, v. 134, p. 105123, abr. 2021.

EL ASRI, O.; BENAABIDATE, L.; EL KHADIR, L. Removal of phosphate from treated wastewater using carbonates: adsorption study by UV-Vis spectrophotometry. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Amsterdam, v. 9, n. 4, p. 105-112, jul. 2021.

FERREIRA, L. C. *Caracterização de minerais carbonáticos e avaliação de sua aplicação na adsorção de fosfato*. 2017. 142 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017a.

FERREIRA, L. M. S. Avaliação da dolomita como material adsorvente na remoção de fósforo em águas residuárias. *Revista Matéria*, Rio de Janeiro, v. 22, n. 2, p. 1-10, abr. 2017b.

GAMA, M. A. Desenvolvimento de método colorimétrico para determinação de fósforo em águas naturais. 2019. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

GOLDSTEIN, J. I. et al. *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*. 4. ed. New York: Springer, 2017.

GUIMARÃES, R. S.; LIMA NETO, J. M. Métodos colorimétricos aplicados ao monitoramento ambiental de fósforo em sistemas descentralizados. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 28, n. 3, p. 375-384, mar. 2023.

HANNA, K.; CHAZAL, P. M.; CHENEVOT, B. Mechanisms of phosphate interaction with calcium and magnesium ions in aqueous systems. *Chemosphere*, Oxford, v. 71, n. 11, p. 2089-2096, nov. 2008.

KARACA, S.; GURSES, A.; AÇIKYILDIZ, M.; EJDER, M. Adsorptive removal of phosphate from aqueous solutions using raw and activated dolomite. *Journal of Hazardous Materials*, Amsterdam, v. 128, n. 2, p. 273-279, mar. 2006.



KLEIN, T.; AGNE, S. A. Aspectos ambientais e de saúde pública relacionados ao uso de coagulantes na remoção de fósforo. *Química Nova*, São Paulo, v. 35, n. 2, p. 227-234, mar. 2012.

KOVACEVIC, D. et al. Phosphate adsorption onto thermally modified dolomite: mechanisms and modeling. *Chemical Engineering Journal*, Lausanne, v. 358, p. 1229-1240, jan. 2019.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos*. Brasília: MAPA, 2014.

MARONEZE, M. M.; GOMES, R. C.; SANTOS, M. A. Processos avançados de tratamento de águas e efluentes: estado da arte e tendências. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 19, n. 3, p. 247-258, set. 2014.

MOLINARI, R. et al. Phosphate removal from wastewaters by adsorption on dolomite and hydroxyapatite. *Desalination*, Amsterdam, v. 217, n. 1-3, p. 276-287, dez. 2007.

MRAZ, R. et al. Enhanced phosphate removal by ultrasound-modified dolomite: structural characterization and adsorption mechanisms. *Science of the Total Environment*, Amsterdam, v. 870, p. 161-171, jan. 2023.

NUGROHO, R. A.; TANAKA, S.; FUJII, T. Diffusion-driven phosphate adsorption on carbonate minerals: role of initial concentration. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Amsterdam, v. 452, p. 143-150, jan. 2014.

OLIVEIRA, L. P.; SANTOS, A. C.; SILVA, D. M. Avaliação de fósforo em águas naturais no Brasil: métodos colorimétricos e aplicações ambientais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 26, n. 1, p. 1-13, fev. 2021.

PEREIRA, M. L.; SILVA, R. A.; SOUZA, V. H.; OLIVEIRA, F. G. Potencial de uso de dolomita brasileira como adsorvente de fósforo em águas residuárias. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 25, e15, p. 1-12, 2020.

PINTO-COELHO, R. M.; FONSECA, R.; BECKER, V. Eutrofização em ecossistemas aquáticos tropicais: causas, consequências e perspectivas de manejo. *Oecologia Australis*, Rio de Janeiro, v. 23, n. 4, p. 753-772, dez. 2019.

ROQUES, H.; NOUAILHAS, D.; CABROL, R. Phosphate removal by precipitation with calcium: application to waters and wastewaters. *Water Research*, Oxford, v. 25, n. 8, p. 979-986, 1991.

SALAMEH, Y. et al. Surface properties of dolomite and implications for phosphate adsorption. *Applied Surface Science*, v. 357, p. 1185-1194, 2015.

SAMUDIO LEGAL, D. *Adsorção de fósforo em dolomitas modificadas: estudo experimental*. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2018.

SAUFFI, M. S. et al. Morphological features of natural dolomite for pollutant adsorption. *Minerals Engineering*, v. 146, 2020.

SKOOG, D. A.; WEST, D. M.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R. *Fundamentals of Analytical Chemistry*. 9. ed. Belmont: Brooks/Cole, 2018.



SMITH, V. H.; SCHINDLER, D. W. Eutrophication science: where do we go from here? *Trends in Ecology & Evolution*, Amsterdam, v. 24, n. 4, p. 201-207, abr. 2009.

SOTIRI, R. F.; ALVES, M. C.; GONÇALVES, A. P. Monitoramento de fósforo em reservatórios brasileiros: desafios para o enquadramento legal. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 27, n. 5, p. 765-778, out. 2022.

WITHERS, P. J. A.; HAYGARTH, P. M.; SHARPLEY, A. N. Environmental significance of phosphorus monitoring: applications of spectrophotometry. *Environmental Science & Technology*, Washington, v. 52, n. 3, p. 1324-1335, fev. 2018.

XU, Y.; LI, J.; WANG, L. Adsorption of phosphate on dolomite and modified carbonates: kinetics and isotherms. *Chemical Engineering Journal*, Amsterdam, v. 237, p. 403-410, jan. 2014.

YUAN, Z.; CHEN, H.; WANG, S. Phosphate adsorption by carbonates: comparison of natural and treated minerals. *Journal of Environmental Sciences*, Beijing, v. 32, p. 120-128, mar. 2015.

ZHANG, T. et al. Phosphate removal from aqueous solution by natural and modified carbonate minerals: performance and mechanisms. *Journal of Environmental Management*, London, v. 255, p. 109-121, fev. 2020.

