
Molybdenum trioxide (MoO₃) - a scoping review of its properties, synthesis and applications

Trióxido de molibdênio (MoO₃) - uma revisão de escopo de suas propriedades, síntese e aplicações

Received: 01-03-2024 | Accepted: 01-04-2024 | Published: 03-04-2024

Lizandra Viana Maurat da Rocha

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2895-7889>

Instituto de Macromoléculas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil

E-mail: lizandramaurat@nano.ufrj.br

Paulo Sergio Rangel Cruz da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9199-5645>

Instituto de Macromoléculas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil

E-mail: rangel@ima.ufrj.br

Diego de Holanda Saboya Souza

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2313-4311>

Instituto de Macromoléculas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil

E-mail: diegosaboya@ima.ufrj.br

Maria Inês Bruno Tavares

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9620-0319>

Instituto de Macromoléculas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil

E-mail: mibt@ima.ufrj.br

ABSTRACT

Molybdenum trioxide is an inorganic compound of great scientific and technological relevance due to its unique characteristics, which result in wide applicability. This review article discusses several synthesis methodologies and applications of MoO₃, highlighting its physicochemical properties, especially crystalline structure, oxidizing activity and thermal behavior. Furthermore, the industrial specificity of this oxide is addressed, from the areas of catalysis, electrochemistry and electronics, to optics, corroborating the relevance, future research perspectives and potential innovations related to it, especially in the context of nanotechnology.

Keywords: Molybdenum trioxide; Physicochemical properties; Nanotechnology.

RESUMO

O trióxido de molibdênio é um composto inorgânico de grande relevância científica e tecnológica devido às suas características singulares, que resultam numa ampla aplicabilidade. Este artigo de revisão discute as diversas metodologias de síntese e aplicações do MoO₃, destacando suas propriedades físico-químicas, especialmente estrutura cristalina, atividade oxidante e comportamento térmico. Além disso, é abordada a versatilidade industrial deste óxido, desde as áreas de catálise, eletroquímica e eletrônica, até óptica, corroborando a relevância, as perspectivas futuras de pesquisa e as inovações em potencial a ele relacionadas, sobretudo no contexto da nanotecnologia.

Palavras-chave: Trióxido de molibdênio; Propriedades físico-químicas; Nanotecnologia.

INTRODUÇÃO

O trióxido de molibdênio (MoO_3) emerge como um composto químico de relevância ímpar, suscitando um crescente interesse tanto no âmbito acadêmico quanto industrial, em diversas esferas da ciência e da tecnologia contemporânea, devido às suas notáveis propriedades e sua abrangente aplicabilidade. Em condições normais de temperatura e pressão (CNTP = 273,15 K; 101 325 Pa), estes átomos cristalizam na estrutura ortorrômbica, com três eixos cristalográficos mutuamente perpendiculares, de comprimentos diferentes, sendo os três eixos de rotação binários ou apenas um eixo de rotação binário junto a dois planos de imagem reflexa, organizados de maneira regular. O arranjo dos cristais vai sempre depender das condições de temperatura e pressão durante a formação do composto. E, justamente por isso, o MoO_3 tem despertado crescente interesse entre a comunidade científica - devido às propriedades físico-químicas singulares, decorrentes do tunelamento intrínseco à estrutura com comportamento unidimensional e da diversidade de formas cristalinas que pode apresentar: ortorrômbica, monoclínica, hexagonal, tetragonal ou mista. Uma gama de cientistas têm explorado e publicado sobre as aplicações de compósitos à base de MoO_3 , resultando em mais de 500 artigos indexados publicados anualmente na última década (Afridha; Prakash; Roopan, 2024; Chithambararaj; Bose, 2011; Chithambararaj; Yogamalar; Bose, 2016; Nagyné-Kovács *et. al.*, 2020; Rakhi; Preetha, 2023).

O MoO_3 também se destaca pela sua notável atividade oxidante, a qual lhe confere propriedades catalíticas significativas. Sua capacidade de atuar como agente oxidante em reações químicas com catálise heterogênea, oxidação de compostos sulfurosos, síntese orgânica e desidrogenação de álcoois e aminas tem implicações importantes nos mais diversos processos industriais e laboratoriais. Sua versatilidade catalítica é influenciada pelo estado de valência dos íons de molibdênio e pelo ambiente local em que estão inseridos. A capacidade do molibdênio, na forma de trióxido, promover processos de oxirredução o torna uma escolha valiosa em sistemas catalíticos, contribuindo para a eficiência e seletividade de diversas reações, o que amplia consideravelmente sua relevância em campos como catálise heterogênea e processos oxidativos. Também, a presença de MoO_3 em combinação com peróxido de hidrogênio pode potencializar a formação de radicais hidroxila altamente reativos, intensificando a capacidade oxidativa do processo, o que torna sua participação nos processos oxidativos avançados (POAs) relevantes em tratamentos de águas contaminadas, onde a degradação de poluentes

orgânicos é crucial. A sinergia entre os POAs e o MoO_3 destaca-se como uma abordagem promissora para enfrentar desafios ambientais, oferecendo soluções mais eficazes na remoção de contaminantes recalcitrantes (Afridha; Prakash; Roopan, 2024; Brückman *et al.*, 1987; Giordano *et al.*, 1977; Haber; Lalik, 1997; Pinto, B. F. *et al.*, 2019).

Em resposta às variações de temperatura, o MoO_3 pode passar por transições de fase, incluindo mudanças na sua estrutura cristalina, como a transição da fase ortorrômbica para qualquer outra. Além disso, a temperatura pode influenciar a estabilidade térmica do composto, afetando seu comportamento em diferentes aplicações - ela é crucial especialmente em alguns tipos de processos industriais realizados somente em alta temperatura. A desidratação também é observada em determinadas temperaturas, a depender da pressão aplicada, resultando na perda de moléculas de água ligadas à sua estrutura. Esses fenômenos podem impactar suas características físicas e químicas. A influência da temperatura também se estende às propriedades catalíticas deste óxido, sendo capaz de modificar a sua eficiência em diferentes reações. Compreender os aspectos do comportamento térmico do MoO_3 é fundamental para otimizar sua aplicação em diversas áreas, contribuindo para uma utilização mais eficiente e precisa desse composto em contextos científicos e tecnológicos (Liu *et al.*, 2009; Lv *et al.*, 2021; Moura *et al.*, 2018).

Do campo da eletrônica à catálise, ótica e energética, o MoO_3 desempenha uma função fundamental na sociedade moderna. É aplicado em baterias, sensores de gás, dispositivos eletrocromicos e fotodegradação. Na indústria eletrônica, é utilizado em dispositivos semicondutores, tirando proveito de suas propriedades ópticas e elétricas. Além disso, desempenha um papel crucial em materiais foto eletrocromicos, contribuindo para o avanço de tecnologias de vidros inteligentes. Sua capacidade em interagir em POAs é notável para tratamentos de águas contaminadas, impulsionando a degradação eficiente de poluentes. O MoO_3 também encontra aplicação em células solares, explorando suas propriedades como material fotovoltaico (Avani; Anila, 2022; Da Silva Júnior *et al.*, 2023; Li; Liu, 2013; Zhu *et al.*, 2020). Essa diversidade de aplicações destaca a importância deste composto em diversos setores, evidenciando seu papel crucial em progressos científicos e tecnológicos. Assim, reitera-se que uma compreensão aprofundada das suas propriedades e amplas possibilidades torna-se cada vez mais relevante e necessária.

METODOLOGIA

Para mapeamento dos dados desta revisão, foram delimitados os descritores: “MoO₃”, “trióxido de molibdênio”, “óxido de molibdênio” e “compósito de molibdênio”, empregando os operadores booleanos OR e AND, em seis das principais bases de dados bibliográficos abrangendo química, engenharia e ciência de materiais - Google Acadêmico, SciELO.org, Scopus (Elsevier), Web of Science, Wiley Online Library e ACS Journals Search. Finalizando as pesquisas em cada base, as referências duplicadas, não correlatas ao tema e os registros acadêmicos como dissertações, teses, trabalhos publicados em congressos e sem DOI foram excluídos. Dentre os mais de cinco mil trabalhos levantados na prospecção inicial, foram selecionados e aqui mencionados apenas os artigos escritos em inglês ou português, com texto completo disponível, revisados por pares, publicados em revistas indexadas, no último triênio, e que continham informação com relevância para o esclarecimento das propriedades, obtenção e aplicações do trióxido de molibdênio.

DISCUSSÃO

O molibdênio (Mo) é um metal de transição por vezes erroneamente classificado como metal pesado. Na verdade, além de não ser necessariamente tóxico, ele é basilar para a saúde humana e está presente em diversos alimentos, compondo um dos sais minerais responsáveis pelo metabolismo saudável. O molibdênio é encontrado na natureza em alimentos como leguminosas, carnes e frutas. Em sua forma metálica, também pode ser extraído da molibdenita, um mineral raro, facilmente confundido com a galena, formado por cristais aciculiformes, acinzentados e de brilho metálico, associado com cassiterita, scheelita, wolframita e fluorita, xisto preto e quartzo branco. Sua ingestão ajuda na proteção celular, uma vez que, a depender do seu estado de oxidação, pode agir absorvendo ou inativando toxinas no organismo, o que contribui para o manejo e prevenção de doenças inflamatórias, metabólicas, e até mesmo de câncer. A nível orgânico, em sítios enzimáticos ativos, o heteroátomo molíbdico atua como cofator. Isto ocorre, por exemplo, no processo de oxidação do enxofre, em que a presença de Mo é essencial. A forma hidratada do trióxido de molibdênio também participa da síntese de ácido úrico, através da reação enzimática Mo-dependente da xantina oxidase. Ampliando para biomas terrestres, o Mo também é adjuvante em catálises enzimáticas realizada por bactérias fixadoras de nitrogênio (Balendhran *et al.*, 2013a, 2013b; Behmadi *et al.*, 2023;

Fakhri; Nejad, 2016; Gupta *et al.*, 2011; Novotny, 2011; Zeng *et al.*, 2021; Zollfrank *et al.*, 2012; Tito; Canto, 2005; Atkins; Jones, 2006; Kotz, 2015).

Durante os períodos das grandes guerras mundiais (1914-18 e 1939-45), o Mo substituiu o tungstênio (W) em ligas metálicas, desempenhando resistividade térmica superior. Neste contexto, o molibdênio foi muito apreciado também por outros motivos: ter baixo coeficiente de expansão térmica quando comparado aos demais metais presentes em ligas comerciais; e, pelo seu potencial redutor, mostra elevada resistência à corrosão (Tito; Canto, 2015; Atkins; Jones; Laverman, 2018; Kotz, 2015).

O trióxido de molibdênio (MoO_3) - também conhecido como óxido de molibdênio VI, óxido de molibdênio, molibdato de trioxomolibdênio, anidrido molíbdico ou molibdênio trióxido (termo usual, porém indevido, advindo da tradução literal da língua inglesa) - é formado pela união de um átomo central de molibdênio e três átomos de oxigênio, resultando em um peso molecular de 143,94 g/mol (Rajesham; Kumar, 2023; Sumer, 2021). A geometria do MoO_3 é piramidal trigonal, com uma nuvem eletrônica do par desemparelhado de elétrons no molibdênio.

Em condições ambientais, o MoO_3 apresenta-se sob a forma de pó ou cristais, com tonalidade variando de esbranquiçada a azul ou esverdeada. Seu estado físico, em CNTP, é sólido. Ele demonstra solubilidade em hidróxido de amônia a uma concentração máxima de 30% m/vol. Suas propriedades térmicas incluem um elevado ponto de fusão, em torno de 795°C, e ebulição atingindo os 1155°C. Além disso, o MoO_3 comercial possui densidade na faixa de intervalo de 4,5 a 4,7 g/cm³ (Bandaru *et al.*, 2018; Chiang; Yeh, 2013; De Castro *et al.*, 2017; Raj; Bennie; Xavier, 2021; Wang *et al.*, 2018).

Estrutura Cristalina

O MoO_3 cristaliza naturalmente na forma ortorrômbica, consistindo o arranjo total em camadas alternadas de átomos de molibdênio e oxigênio. Essa estrutura laminar dá origem a sua notável anisotropia em muitas de suas propriedades, como a expansão térmica anisotrópica, que o torna um material ideal em sensores de umidade. Entretanto, sabe-se que o MoO_3 pode assumir diferentes estruturas cristalinas, o que inclui a forma hexagonal (similar a dos polimorfos hidratados) e a estrutura monoclínica, na qual se destaca a presença de um plano de clivagem e a assimetria na disposição dos eixos cristalográficos. Na forma tetragonal do MoO_3 , dois eixos de comprimento igual são perpendiculares entre si e um terceiro eixo, com comprimento diferente, é também perpendicular aos outros dois, criando uma célula unitária retangular, porém,

diferentemente da estrutura ortorrômbica, os dois lados perpendiculares são de mesmo comprimento. Além das estruturas cristalinas, também há ocorrências de uma forma amorfa, na qual não há uma ordem de longo alcance na disposição dos átomos de MoO_3 (Chithambararaj; Bose, 2011; Klinbumrung; Thongtem; Thongtem, 2012; Kumar; Wang; Lee, 2015; Medeiros; Farias; Santos, 2021; Rakhi; Preetha, 2023).

Essas diferentes formas de arranjo podem influenciar as propriedades físicas e químicas do material, tornando-o interessante para várias aplicações, como catálise, baterias, sensores e dispositivos eletrocromáticos. A escolha da estrutura pode ser controlada por meio de diferentes métodos de síntese e condições de processamento (Chithambararaj; Bose, 2011; Chithambararaj; Yogamalar; Bose, 2016; Klinbumrung; Thongtem; Thongtem, 2012; Kumar; Wang; Lee, 2015; Nagyné-Kovács, T. *et al.*, 2020; Rakhi; Preetha, 2023).

Síntese

A síntese do MoO_3 pode ser realizada por vários métodos, incluindo oxidação de molibdênio metálico em atmosfera controlada, evaporação de MoO_2 em presença de oxigênio e decomposição térmica de molibdatos. Cada método de síntese pode influenciar as características do produto final, como tamanho de partícula, morfologia e pureza do produto final. A escolha do método de síntese dependerá das propriedades desejadas para uma aplicação específica, bem como das condições experimentais disponíveis. Alguns dos métodos mais comuns de síntese do MoO_3 seguem listados e resumidos abaixo (Bharate, 2020; Carcia; McCarron III, 1987; Ding *et al.*, 2006; Li; Liu; Li, 2002; Shahabud-Din *et al.*, 2018; Siciliano *et al.*, 2009; Song *et al.*, 2017; Xia *et al.*, 2006):

- Precipitação - envolve a reação de um sal de molibdênio, geralmente o molibdato de amônio, com um ácido forte, como o nítrico. A precipitação resultante é, então, lavada, seca e calcinada.
- Decomposição Térmica - consiste na decomposição térmica de compostos de molibdênio, como o molibdato de amônio ou o molibdato de sódio, a temperaturas elevadas, com calcinação subsequente.
- Método Sol-Gel - oferece controle sobre a composição e a estrutura do material por através da preparação de uma solução precursora de molibdênio que é transformada em um gel, que é, então, calcinado.
- Combustão - mistura-se um sal de molibdênio com um agente redutor, seguido por uma reação exotérmica de combustão controlada.

- Hidrotermólise - os sais de molibdênio são reagidos em condições de alta pressão e temperatura e em presença de água.
- Método Eletroquímico - a deposição de filmes finos de MoO₃ se dá a partir de soluções contendo íons de molibdênio.

Comportamento Térmico

O trióxido de molibdênio, em sua forma sólida, funde a uma temperatura bastante elevada - aproximadamente 795 graus Celsius. Entretanto, em temperaturas superiores a 450 graus Celsius, dependendo das condições específicas, a decomposição térmica já pode ser iniciada, resultando na liberação de oxigênio. A ebulição do MoO₃ ocorre a temperaturas ainda mais elevadas, podendo também envolver decomposição do composto. Mediante aquecimento, também ocorrem outros fenômenos - alterações em sua estrutura cristalina, condutividade térmica e outras propriedades físicas. Em termos de transformação microestrutural, ele sofre uma transição de fase ortorrômica para triclinica, o qual se observa macroscopicamente pela mudança da cor de verde-esbranquiçada a amarelada (Khillia *et al.*, 1982; Song *et al.*, 2013; Zhu *et al.*, 2018).

O MoO₃ também exibe uma propriedade notável em termos de armazenamento e liberação de energia térmica durante ciclos de aquecimento e resfriamento, tornando-o de grande interesse para sistemas de armazenamento de energia térmica. Além disso, esse composto é amplamente utilizado em aplicações tecnológicas, especialmente em dispositivos eletrocromáticos, que têm a capacidade de alterar sua cor em resposta a estímulos externos, como a aplicação de corrente elétrica ou variações térmicas. A pirólise em escala supramolecular, por exemplo, já é bastante usada para construir absorvedores de ondas eletromagnéticas com excelente desempenho em baixas frequências, combinando capacidade eletricamente ajustável e valor aprimorado de perda de reflexão, superando absorvedores dielétricos 2D relativos e atendendo aos requisitos de eletrônicos portáteis, através de nanoestruturas sanduíche derivadas de hidrogéis híbridos e dopados. Dessa forma, a versatilidade termoquímica desse composto contribui para sua aplicabilidade em diversas áreas de pesquisa e desenvolvimento tecnológico (Choi *et al.*, 2021; Wu *et al.*, 2020; Yu *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2022).

Aplicações

O MoO₃ é amplamente empregado como catalisador em diversas reações químicas. Por exemplo, é utilizado na oxidação seletiva de compostos orgânicos, como

na conversão de benzeno em fenol. Sua alta atividade catalítica está ligada à presença de sítios ativos de superfície, que promovem a interação entre reagentes e catalisador. A síntese hidrotérmica de trióxido de molibdênio modificado com níquel permite a dessulfurização oxidativa de dibenzotiofeno no sistema bifásico decalina/acetoneitrila com peróxido. Especialmente neste caso, as vacâncias de oxigênio na superfície e os sítios ácidos de Lewis desempenham papéis importantes na sua eficiência como catalisador para a remoção de enxofre (Ateş; Hatipoğlu, 2023; Cao *et al.*, 2020; Iizuka *et al.*, 1980; Ranga *et al.*, 2018; Wang; Ueda, 2009; Xu *et al.*, 2024).

Em eletroquímica, o MoO_3 destaca-se como um dos mais promissores materiais anódicos de lítio, por sua capacidade de armazenar íons em estruturas híbridas de alta capacitância, mantendo estabilidade estrutural durante ciclos de carga e descarga quando ancorado, o que o torna um favorável eletrodo, e base para baterias recarregáveis, supercapacitores e dispositivos de armazenamento de energia (Hassan *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2016; Zhao *et al.*, 2020; Zhou *et al.*, 2010).

O MoO_3 é utilizado em transistores de efeito de campo, sensores de gás e LEDs. Além disso, sua capacidade de alterar suas propriedades ópticas em resposta a estímulos externos faz dele um material valioso em dispositivos ópticos, como moduladores eletro-ópticos e janelas inteligentes. A estrutura de banda eletrônica modificada em super redes de Moiré, com a configuração de torção do $\alpha\text{-MoO}_3$ é demonstrada por diversos pesquisadores como uma plataforma promissora para dispositivos nanofotônicos de funcionalidades ajustáveis. Muitas das propriedades anisotrópicas observadas no trióxido de molibdênio são atribuídas ao índice de refração anisotrópico e às constantes elásticas do material. E, embora a anisotropia no plano tenha recebido atenção, com número expressivo de estudos de Raman e micro-refletância com luz polarizada, ainda faltam análises abrangentes para investigar a dependência angular do índice de refração e a dependência direcional do módulo de Young do material (Alrowaili *et al.*, 2022; Althagafi *et al.*, 2023; Chen *et al.*, 2020; Puebla *et al.*, 2021).

Outros óxidos metálicos como o MoO_3 têm sido estudados como potenciais agentes antimicrobianos devido às suas propriedades antibacterianas, antifúngicas e antivirais. Alguns dos óxidos metálicos mais comumente estudados para esse fim incluem óxido de prata (Ag_2O), óxido de zinco (ZnO), óxido de cobre (Cu_2O e CuO) e óxido de ferro (Fe_2O_3). Esses materiais têm a capacidade de inibir o crescimento e a reprodução de microorganismos patogênicos de várias maneiras. Por exemplo, podem perturbar a membrana celular dos microrganismos, interferir em processos metabólicos vitais, gerar

espécies reativas de oxigênio que são tóxicas para os microorganismos, entre outros mecanismos. Pesquisas têm sido realizadas para entender melhor esses mecanismos de ação, bem como otimizar as propriedades dos óxidos metálicos para maximizar sua eficácia como agentes antimicrobianos, enquanto minimizam quaisquer efeitos adversos sobre células hospedeiras ou o meio ambiente. Esses estudos são importantes para o desenvolvimento de novas abordagens na luta contra infecções microbianas, especialmente à medida que aumenta a preocupação com a resistência aos antibióticos (Dharmaraj *et al.*, 2021; Da Rocha *et al.*, 2024; Dizaj *et al.*, 2014; Gold *et al.*, 2018; Kurniawan *et al.*, 2023; Meghana *et al.*, 2015; Zhai *et al.*, 2023; Zhao *et al.*, 2020).

Estudos mostram que o MoO₃ pode inibir o crescimento de várias cepas bacterianas, incluindo aquelas resistentes a antibióticos comuns. Isso faz com que seja considerado um possível candidato para o desenvolvimento de novos materiais bactericidas, que podem ser utilizados em uma variedade de aplicações, desde revestimentos antibacterianos para superfícies até implantes médicos. No entanto, mais pesquisas são necessárias para entender completamente os mecanismos pelos quais o MoO₃ exerce sua atividade antibacteriana e para otimizar sua eficácia para diferentes aplicações. O MoO₃ desempenha um papel crucial como bacteriostático eficiente e seguro (Esakkirajan *et al.*, 2024; Gao *et al.*, 2023; Rocha *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2021).

Autores já comprovaram que os seus nanopontos demonstram eficiência tripla, combinando atividades fotodinâmicas, fototérmicas e enzimáticas peroxidase-like. Eles regulam a temperatura para otimizar a atividade enzimática, gerando espécies reativas de oxigênio com baixas concentrações de H₂O₂, mostrando eficácia antibacteriana notável até contra cepas resistentes, como *Escherichia coli* e *Methicillin-Resistant Staphylococcus Aureus*. Em experimentos em animais, em sistemas vivos, essas nanoestruturas também são capazes de tratar efetivamente feridas infectadas por MRSA, oferecendo uma promissora estratégia contra infecções bacterianas, especialmente diante da resistência aos antibióticos convencionais (Esakkirajan *et al.*, 2024; Gao *et al.*, 2023; Rocha *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2021; Zhao *et al.*, 2020).

Nanocompósitos de Trióxido de Molibdênio

Nanocompósitos, materiais constituídos por nanoestruturas incorporadas em uma matriz, têm atraído crescente interesse devido às propriedades únicas que podem proporcionar. Os nanocompósitos de MoO₃ combinam as propriedades do MoO₃ com a funcionalidade da matriz e até mesmo com outras nano e micro estruturas, resultando em materiais multifacetados, adequados para catálise, sensores, dispositivos eletrônicos,

embalagens antimicrobianas e muito mais. A atividade antibacteriana – e, possivelmente, também antifúngica – deste material é baseada na formação de uma superfície ácida, dada pela liberação de íons hidroxônio (na presença de água), capazes de deteriorar estruturas de proteção como a parede celular, e assim inibir o crescimento e a proliferação patogênica (Feng *et al.*, 2013; Omanović-Miklićanin *et al.*, 2020; Schoenitz; Umbrajkar; Dreizin, 2007; Zollfrank *et al.*, 2012).

Os nanocompósitos poliméricos são materiais avançados que incorporam cargas como nanotubos, nanofios, nanobastões e as mais diversas nanopartículas (como as de forma esférica, cúbica, octaédrica ou lamelares), em uma matriz baseada em um ou mais polímeros. Esses materiais híbridos oferecem propriedades únicas, que resultam da dispersão homogênea das cargas, combinando e até potencializando características das nanoestruturas e da própria matriz (Albdiry *et al.*, 2012; Fu *et al.*, 2019; Gacitua; Ballerini; Zhang, 2005; Huang; Zhou; Liu, 2022; Winey; Vaia, 2007).

Os nanocompósitos de MoO₃ podem ser sintetizados por vários métodos, que geralmente envolvem a incorporação de nanoestruturas molibdênicas pré-formadas em uma matriz ou na própria disposição de molibdênio como base. Na deposição física, as nanoestruturas, como nanofios de carbono ou óxido de grafeno, são depositadas sobre uma matriz de MoO₃ por meio de técnicas como deposição química a vapor (CVD) ou deposição por pulverização. O processo sol-gel permite a síntese de nanocompósitos de trióxido de molibdênio em solução, com a adição de seus precursores e nanoestruturas. A posterior evaporação controlada do solvente resulta na formação do nanocompósito. Já a eletrodeposição, é usada para depositar nanofios metálicos diretamente sobre um substrato, criando nanocompósitos eletroquimicamente ativos. Em se tratando de nanocompósitos poliméricos, em geral ocorre a dispersão homogênea de nanoestruturas de molibdênio em uma matriz previamente fundida ou solubilizada. O processo frequentemente envolve a mistura de precursores, mas também do próprio trióxido pré-formado com o polímero, seguida pela formação do nanocompósito através de técnicas de mistura, dispersão, distribuição e moldagem, com auxílio de dissolução, fundição, extrusão ou por injeção (Alshammari *et al.*, 2024; Da Rocha; Da Silva; Tavares, 2022; Ding *et al.*, 2017; Elsayed *et al.*, 2023; Sen *et al.*, 2020; Shaheen; Ahmad, 2023; Stamatis; Dreizin; Higa, 2011; Sundeep *et al.*, 2016).

Os nanocompósitos de MoO₃ apresentam propriedades notáveis que incluem (Adhikari; Kim, 2020; Avani; Anila, 2022; Da Rocha *et al.*, 2024; Naresh; Jena; Satyanarayana, 2019; Siddiqui; Khan; Khan, 2019; Wang *et al.*, 2020):

- A incorporação deste trióxido eleva a condutividade elétrica de uma gama de polímeros, tornando-os adequados para dispositivos eletrônicos, sensores e condutores elétricos. Ainda, a incorporação de outras nanoestruturas condutoras, como nanotubos de carbono ou óxido de grafeno, melhora ainda mais a condutividade elétrica do MoO₃.
- A presença das nanoestruturas de molibdênio reforça a matriz polimérica, resultando em maior resistência mecânica, estabilidade térmica e rigidez.
- Esses nanocompósitos podem exibir propriedades úteis em aplicações de sensores ópticos e dispositivos fotônicos, de acordo com sua capacidade de alterar a cor mediante estímulo eletromagnético, absorver e liberar energia, como uma bateria.
- Em nanocompósitos eletroquímicos, a combinação do MoO₃ com determinadas nanoestruturas metálicas ou de carbono pode melhorar as características de armazenamento de energia eletroquímica.
- O fato de estar em escala nano aumenta a área superficial relativa do MoO₃, favorecendo a adsorção de moléculas em aplicações de catálise, remoção de moléculas e sensores.
- Nanocompósitos de MoO₃ têm potencial de promover a remoção de substâncias como antibióticos, metais pesados e corantes da água, através da degradação catalítica, promovendo a limpeza do meio aquoso, por exemplo.
- O nanocompósito de MoO₃ também exibe propriedades antimicrobianas devido à sua capacidade de gerar espécies reativas de oxigênio quando exposto à luz, inibindo o crescimento de microrganismos como bactérias, fungos e vírus, e assim contribuindo em uma variedade de setores - embalagens de alimentos, dispositivos médicos, têxteis e superfícies de contato - ajudando a reduzir a contaminação e a disseminação de doenças.

PERSPECTIVAS FUTURAS

A pesquisa em torno do MoO₃ continua a avançar, explorando diferentes tipos de apresentação do material final, e incluindo junto a ele diferentes polímeros e nanoestruturas, sobretudo, a fim de desenvolver nanocompósitos ainda mais eficientes. Essas investigações estão direcionadas para aprimorar a aplicação do MoO₃ em dispositivos eletrônicos flexíveis, materiais de armazenamento de energia, dispositivos ópticos e muito mais. Os materiais avançados baseados em trióxido de molibdênio apresentam propriedades únicas e uma ampla gama de aplicações em eletrônica, sensores e materiais estruturais. A pesquisa e desenvolvimento contínuos devem abrir novas

possibilidades em uma variedade de campos tecnológicos, incluindo avanços em dispositivos de armazenamento de energia, inovações em sensores e melhorias na catálise seletiva. Sobretudo os materiais híbridos oferecem oportunidades significativas para aplicações em catálise, sensores, eletrônica e armazenamento de energia, representando uma classe altamente promissora de materiais que reúne as propriedades exclusivas do MoO_3 , com as características peculiares das matrizes (poliméricas ou não) e demais nano ou micro estruturas incorporadas. O futuro dos compósitos com associação de molibdênio é promissor, de acordo com o que revelam as numerosas pesquisas e inovações contínuas.

Além disso, especialmente a pesquisa relacionada ao MoO_3 nanoestruturado tende a avançar, impulsionada por suas propriedades únicas e suas aplicações em constante expansão. Algumas áreas de interesse incluem o desenvolvimento de nanomateriais, onde a busca por nanoestruturas avançadas de MoO_3 promete melhorar a eficiência em muitas aplicações, como sensores e dispositivos eletrônicos. Outra área promissora é a fotocatalise, onde o uso de MoO_3 em processos de fotocatalise para degradação de poluentes e produção de hidrogênio está em crescimento, com potencial para aplicações ambientais e de energia renovável. Além disso, a capacidade do MoO_3 de armazenar e liberar calor pode ser explorada em sistemas de armazenamento de energia térmica para aplicações de aquecimento e resfriamento sustentável.

O campo dos nanocompósitos, irrefutavelmente, em constante evolução, mantém um foco crescente na síntese e controle de nanoestruturas para otimizar as propriedades dos materiais. Esforços significativos estão sendo concentrados na capacidade de controlar as estruturas em escala nanométrica por meio de abordagens sintéticas inovadoras. À medida que o campo continua a crescer, espera-se que novos materiais com propriedades surpreendentes e aplicações inovadoras surjam, impulsionando ainda mais o desenvolvimento tecnológico em uma ampla gama de campos. Com a combinação única de propriedades do MoO_3 e das nanoestruturas, os nanocompósitos têm o potencial de revolucionar diversas áreas, desde a eletrônica até a energia renovável, promovendo avanços significativos na ciência e na engenharia de materiais.

CONCLUSÃO

A breve coletânea de pesquisas integradas neste artigo oferece uma visão abrangente das propriedades, meios de síntese e aplicações do trióxido de molibdênio. Com base no que foi discutido neste escopo, é notável que o MoO_3 é um composto inorgânico multifacetado, com propriedades físicas e químicas únicas, o que o torna

crucial em diversas áreas científicas e tecnológicas. Seu potencial em catálise, eletroquímica, eletrônica, óptica e armazenamento de energia sugere contribuições significativas em campos tão variados como energia renovável, medicina, meio ambiente e eletrônicos.

Adicionalmente, a pesquisa em torno da síntese e manipulação do MoO₃ tem sido intensa, em qualidade e números, visando não apenas aprimorar as técnicas de produção, mas também explorar novas formas de nanoestruturas e compósitos, expandindo suas propriedades e aplicações. A presente revisão oferece um ponto de partida crucial para pesquisadores interessados em aprofundar a compreensão das capacidades do MoO₃ e seu potencial para inovação tecnológica.

No futuro, espera-se que a pesquisa sobre o MoO₃ continue a se expandir, impulsionada por avanços na ciência dos materiais e demandas crescentes por soluções tecnológicas inovadoras. O aprimoramento da compreensão de suas propriedades e o desenvolvimento de novas aplicações têm o potencial de contribuir significativamente para o progresso científico e tecnológico, oferecendo soluções mais eficientes e sustentáveis para os desafios do mundo moderno.

AGRADECIMENTOS

Expressamos nossa profunda gratidão à FAPERJ pelo apoio financeiro através do Programa de Pós-doutorado Nota 10 / PDR10 - Edital E_17/2022, projeto 281915 - Produção e estudo de nanocompósitos poliméricos sustentáveis com potencial aplicação em embalagens ativas e inteligentes.

REFERÊNCIAS

ADHIKARI, S.; KIM, D.-H. Heterojunction C₃N₄/MoO₃ microcomposite for highly efficient photocatalytic oxidation of Rhodamine B. **Applied Surface Science**, [s.l.], v. 511, p. 145595, 2020.

AFRIDHA, M. S. H. F.; PRAKASH, S. H.; ROOPAN, S. M. MoO₃ based nanocomposites for the photocatalytic degradation of colourants – A review. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, [s.l.], In Press, 105354, 2024.

ALBDIRY, M. T. et al. A critical review on the manufacturing processes in relation to the properties of nanoclay/polymer composites. **Journal of Composite Materials**, [s.l.], v. 47, n. 9, 2012.

ALROWAILI, Z. A. et al. A significant role of MoO₃ on the optical, thermal, and radiation shielding characteristics of B₂O₃–P₂O₅–Li₂O glasses. **Optical and Quantum Electronics**, [s.l.], v. 54, n. 88, 2022.

ALSHAMMARI, A. H. et al. Processing polymer film nanocomposites of polyvinyl chloride – Polyvinylpyrrolidone and MoO₃ for optoelectronic applications. **Optics & Laser Technology**, [s.l.], v. 168, p.109833, 2024.

ALTHAGAFI, T. M. et al. The Impact of Changing the LiF Concentration on Structural, Thermal, Physical, and Optical Properties of CdO—SiO₂—B₂O₃—MoO₃—LiF Glasses. **Silicon**, [s.l.], v. 15, p. 7047–7056, 2023.

ATEŞ, A.; HATIPOĞLU, H. Synthesis and characterization of molybdenum trioxide with an orthorhombic crystal structure for supercritical water gasification application. **Journal of Molecular Structure**, [s.l.], v. 1275, p. 134563, 2023.

ATKINS, P. W.; JONES, L.; LAVERMAN, L. Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente. 7a edição. Porto Alegre: Bookman, 2018.

AVANI, A.V.; ANILA, E.I. Recent advances of MoO₃ based materials in energy catalysis: Applications in hydrogen evolution and oxygen evolution reactions. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s.l.], v. 47, n. 47, p. 20475-20493, 2022.

BALENDHRAN, S. et. al. Enhanced Charge Carrier Mobility in Two-Dimensional High Dielectric Molybdenum Oxide. **Advanced Materials**, [s.l.], v. 25, n. 1, p. 109–114, 2013a.

BALENDHRAN, S. et al. Two-Dimensional Molybdenum Trioxide and Dichalcogenides. **Advanced Functional Materials**, [s.l.], v. 23, n. 32, p. 3952–3970, 2013b.

BANDARU, S. et al. Tweaking the Electronic and Optical Properties of α -MoO₃ by Sulphur and Selenium Doping – a Density Functional Theory Study. **Scientific Reports**, [s.l.], v. 8, p. 10144, 2018.

BEHMADI, R. et al. Investigation of chalcopyrite removal from low-grade molybdenite using response surface methodology and its effect on molybdenum trioxide morphology by roasting. **RSC Advances**, [s.l.], v. 13, n.22, p. 14899-14913, 2023.

BHARATE, B. G. Synthesis of Molybdenum Oxide Nanoparticles by Sol-Gel Method for Ammonia Gas Sensing. **Biomedical Journal of Scientific & Technical Research**, Westchester, v. 37, n. 1, p. 29172-29175, 2020.

BRÜCKMAN, K. et al. The role of different MoO₃ crystal faces in elementary steps of propene oxidation. **Journal of Catalysis**, [s.l.], v. 104, n. 1, p. 71-79, 1987.

CAO, Y. et al. Highly efficient oxidative desulfurization of dibenzothiophene using Ni modified MoO₃ catalyst. **Applied Catalysis A: General**, [s.l.], v. 589, p. 117308, 2020.

CARCIA, P. F.; MCCARRON III, E.M. Synthesis and properties of thin film polymorphs of molybdenum trioxide. **Thin Solid Films**, [s.l.], v. 155, n. 1, p. 53-63, 1987.

CHEN, M. et al. Configurable phonon polaritons in twisted α -MoO₃. **Nature Materials**, [s.l.], v. 19, p. 1307–1311, 2020.

- CHIANG, T. H.; YEH, H. C. The Synthesis of α -MoO₃ by ethylene glycol. **Materials**, [s.l.], v. 6, n. 10, p. 4609–4625, 2013.
- CHITHAMBARARAJ, A.; BOSE, A. C. Hydrothermal synthesis of hexagonal and orthorhombic MoO₃ nanoparticles. **Journal of Alloys and Compounds**, [s.l.], v. 509, n. 31, p. 8105-8110, 2011.
- CHITHAMBARARAJ, A.; YOGAMALAR, N. R.; BOSE, A. C. Hydrothermally Synthesized h-MoO₃ and α -MoO₃ Nanocrystals: New Findings on Crystal-Structure-Dependent Charge Transport. **Crystal Growth & Design, Washington**, v. 16, n. 4, p. 1984–1995, 2016.
- CHOI, D. K. et al. Highly efficient, heat dissipating, stretchable organic light-emitting diodes based on a MoO₃/Au/MoO₃ electrode with encapsulation. **Nature Communications**, [s.l.], v. 12, 2864, 2021.
- DA ROCHA, L. V. M.; DA SILVA, P. S. R. C.; TAVARES, M. I. B. Thermostructural evaluation of poly(butylene adipate-co-terephthalate)/molybdenum trioxide nanocomposites through time domain nuclear magnetic resonance and other conventional techniques. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 8, n. 5, p. 36588–36601, 2022.
- DA ROCHA, L. V. M. et al. Biodegradable packing food films based on PBAT containing ZnO and MoO₃. **Journal of Applied Polymer Science**, [s.l.], Online Version of Record before inclusion in an issue, e55294, 2024.
- DA SILVA JÚNIOR, M. G. et al. A Brief Review of MoO₃ and MoO₃-Based Materials and Recent Technological Applications in Gas Sensors, Lithium-Ion Batteries, Adsorption, and Photocatalysis. **Materials**, Basel, v. 16, n. 24, p. 7657, 2023.
- DE CASTRO, I. A. et al. Molybdenum Oxides – From Fundamentals to Functionality. **Advanced Materials**, [s.l.], v. 29, n. 40, p. 1–31, 2017.
- DHARMARAJ, D. et al. Antibacterial and cytotoxicity activities of biosynthesized silver oxide (Ag₂O) nanoparticles using *Bacillus paramycoides*. **Journal of Drug Delivery Science and Technology**, [s.l.], v. 61, n. 102111, 2021.
- DING, J. et al. Facile synthesis of carbon/MoO₃ nanocomposites as stable battery anodes. **Journal of Power Sources**, [s.l.], v. 348, p. 270-280, 2017.
- DING, Q. P. et al. Molybdenum trioxide nanostructures prepared by thermal oxidization of molybdenum. **Journal of Crystal Growth**, [s.l.], v. 294, n. 2, p. 304-308, 2006.
- DIZAJ, S. M. et al. Antimicrobial activity of the metals and metal oxide nanoparticles. **Materials Science and Engineering: C**, [s.l.], v. 44, p. 278–284, 2014.
- ELSAYED, A. M. et al. Highly Uniform Spherical MoO₂-MoO₃/Polypyrrole Core-Shell Nanocomposite as an Optoelectronic Photodetector in UV, Vis, and IR Domains. **Micromachines**, Basel, v. 14, n. 9, p. 1694, 2023.
- ESAKKIRAJAN, M. et al. Environmentally sustainable synthesis of MoO₃ nanoparticles: Antibacterial efficacy and biocompatibility assessment. **Chemical Physics Impact**, [s.l.], v. 8, p. 100487, 2024.

- FAKHRI, A.; NEJAD, P. A. Antimicrobial, antioxidant and cytotoxic effect of Molybdenum trioxide nanoparticles and application of this for degradation of ketamine under different light illumination. **Journal of photochemistry and photobiology. B, Biology**, [s.l.], v. 159, p. 211–217, 2016.
- FENG, C. et al. Synthesis and electrochemical properties of MoO₃/C nanocomposite. **Electrochimica Acta**, [s.l.], v. 93, p. 101-106, 2013.
- FU, S. et al. Some basic aspects of polymer nanocomposites: A critical review. **Nano Materials Science**, [s.l.], v. 1, n. 1, p. 2-30, 2019.
- GACITUA, W.; BALLERINI, A.; ZHANG, J. Polymer Nanocomposites: Synthetic And Natural Fillers A Review. Maderas: **Ciencia y Tecnología, Concepción**, v. 7, n. 3, p. 159-178, 2005.
- GAO, Q. et al. Oxygen vacancy mediated α -MoO₃ bactericidal nanocatalyst in the dark: Surface structure dependent superoxide generation and antibacterial mechanisms. **Journal of Hazardous Materials**, [s.l.], v. 443, Part B, p. 130275, 2023.
- GIORDANO, N. et al. Structure and catalytic activity of MoO₃ · SiO₂ systems: III. Mechanism of oxidation of propylene. **Journal of Catalysis**, [s.l.], v. 50, n. 2, p. 342-352, 1977.
- GOLD, K. et al. Antimicrobial Activity of Metal and Metal-Oxide Based Nanoparticles. **Advanced Therapeutics**, [s.l.], v. 1, n. 3, p. 1700033, 2018.
- GUPTA, U. C. et al. Role of Micronutrients: Boron and Molybdenum in Crops and in Human Health and Nutrition. **Current Nutrition & Food Science**, [s.l.], v. 7, n. 2, p. 126-136, 2011.
- HABER, J.; LALIK, E. Catalytic properties of MoO₃ revisited. **Catalysis Today**, [s.l.], v. 33, n. 1–3, p. 119-137, 1997.
- HASSAN, M. F. et al. Carbon-coated MoO₃ nanobelts as anode materials for lithium-ion batteries. **Journal of Power Sources**, [s.l.], v. 195, n. 8, p. 2372-2376, 2010.
- HUANG, J.; ZHOU, J.; LIU, M. Interphase in Polymer Nanocomposites. **JACS Au**, Washington, v. 2, n. 2, p. 280–291, 2022.
- IIZUKA, Y. et al. The catalysis of carbon monoxide oxidation with oxygen on molybdenum trioxide. **Journal of Catalysis**, [s.l.], v. 64, n. 2, p. 437-447, 1980.
- KHILLA, M.A. et al. Transport properties of molybdenum trioxide and its suboxides. **Thermochimica Acta**, [s.l.], v. 54, n. 1–2, p. 35-45, 1982.
- KLINBUMRUNG, A.; THONGTEM, T.; THONGTEM, S. Characterization of Orthorhombic α -MoO₃ Microplates Produced by a Microwave Plasma Process. Nanocrystals-Related. **Synthesis, Assembly, and Energy Applications**, [s.l.], v. 2012, 2012.
- KOTZ, J. C. et al. Química Geral e Reações Químicas. 3a edição - 3a edição - Tradução da 9a edição norte-americana ed. [s.l.] Editora Cengage, 2015.

KUMAR, V.; WANG, X.; LEE, P. S. Formation of hexagonal-molybdenum trioxide (h-MoO₃) nanostructures and their pseudocapacitive behavior. **Nanoscale**, [s.l.], v. 7, p. 11777-11786, 2015.

KURNIAWAN, T. A. et al. Influence of Fe₂O₃ and bacterial biofilms on Cu(II) distribution in a simulated aqueous solution: A feasibility study to sediments in the Pearl River Estuary (PR China). **Journal of Environmental Management**, [s.l.], v. 329, n. 117047, 2023.

LI, J.; LIU, X. Preparation and characterization of α -MoO₃ nanobelt and its application in supercapacitor. **Materials Letters**, [s.l.], v. 112, p. 39-42, 2013.

LI, X.-L.; LIU, J.-F. ; LI, Y.-D. Low-temperature synthesis of large-scale single-crystal molybdenum trioxide (MoO₃) nanobelts. **Applied Physics Letters**, [s.l.], v. 81, p. 4832–4834, 2002.

LIU, D. et al. High-pressure Raman scattering and x-ray diffraction of phase transitions in MoO₃. **Journal of Applied Physics**, [s.l.], v. 105, n.2, p. 023513, 2009.

LV, X. et al. In-situ investigation on the thermal decomposition of van der Waals MoO₃. **Chemical Physics Letters**, [s.l.], v. 779, p. 138840, 2021.

MEDEIROS, S. A. S. L.; FARIAS, A. F. F.; SANTOS, I. M. G. Síntese de Trióxido de Molibdênio com Diferentes Estruturas e Microestruturas pelo Método Pechini Modificado: Uma Nova Proposta Metodológica. **Revista Virtual de Química**, [s.l.], v. 13, n. 2, p. 494-508, 2021.

MEGHANA, S. et al. Understanding the pathway of antibacterial activity of copper oxide nanoparticles. **RSC Advances**, [s.l.], v. 5, n. 16, p. 12293-12299, 2015.

MOURA, J. V. B. et al. Temperature-induced phase transition in h-MoO₃: Stability loss mechanism uncovered by Raman spectroscopy and DFT calculations. **Vibrational Spectroscopy**, [s.l.], v. 98, p. 98-104, 2018.

NAGYNÉ-KOVÁCS, T. et al. Hydrothermal Synthesis and Gas Sensing of Monoclinic MoO₃ Nanosheets. **Nanomaterials**, Basel, v. 10, n. 5, p. 891, 2020.

NARESH, N.; JENA, P.; SATYANARAYANA, N. Facile synthesis of MoO₃/rGO nanocomposite as anode materials for high performance lithium-ion battery applications, **Journal of Alloys and Compounds**, [s.l.], v. 810, p. 51920, 2019.

NOVOTNY, J. A. Molybdenum Nutriture in Humans. **Journal of Evidence-Based Complementary & Alternative Medicine**, [s.l.], v. 16, n. 3, p. 164-168, 2011.

OMANOVIĆ-MIKLIČANIN, E. et al. Nanocomposites: a brief review. **Health and Technology**, [s.l.], v. 10, p. 51–59, 2020.

PINTO, B. F. et al. Effect of calcination temperature on the application of molybdenum trioxide acid catalyst: Screening of substrates for biodiesel production. **Fuel**, [s.l.], v. 239, p. 290-296, 2019.

PUEBLA, S. et al. In-plane anisotropic optical and mechanical properties of two-dimensional MoO₃. **npj 2D Materials and Applications**, [s.l.], v. 5, n. 37, 2021.

RAJ, A. N. P.; BENNIE, R.B.; XAVIER, G.A.I. Influence of Ag Doped MoO₃ Nanoparticles in the Seedling Growth and Inhibitory Action Against Microbial Organisms. **Journal of Cluster Science**, [s.l.], v. 8, 2021.

RAJESHAM, S.; KUMAR, J. S. Physical and optical properties of MoO₃ doped B₂O₃-CdO-Al₂O₃-CaF₂ glasses. **Materials Today: Proceedings**, [s.l.], v. 92, n. 2, p. 1587-1590, 2023.

RAKHI, C.; PREETHA, K. C. An Investigation of the Thermal Treatment Effects on the Structural, Morphological, and Optical Properties of Hydrothermally Synthesized Hexagonal Molybdenum Oxide Micro-Rods. **Journal of Electronic Materials**, [s.l.], v. 52, p. 3719–3728, 2023.

RANGA, C. et al. Effect of composition and preparation of supported MoO₃ catalysts for anisole hydrodeoxygenation. **Chemical Engineering Journal**, [s.l.], v. 335, p.120-132, 2018.

SCHOENITZ, M.; UMBRAJKAR, S.; DREIZIN, E. L. Kinetic Analysis of Thermite Reactions in Al-MoO₃ Nanocomposites. **Journal of Propulsion and Power**, Reston, v. 23, n. 4, p. 683, 2007.

SEN, S. K. et al. Structural and optical properties of sol-gel synthesized h-MoO₃ nanorods treated by gamma radiation. **Nano Express**, [s.l.], v. 1, n.2, p. 020026, 2020.

SHAHAB-UD-DIN et al. Hydrothermal synthesis of molybdenum trioxide, characterization and photocatalytic activity. **Materials Research Bulletin**, [s.l.], v. 100, p. 120-130, 2018.

SHAHEEN, I.; AHMAD, K. S. Modified sol gel synthesis of MoO₃ NPs using organic template: synthesis, characterization and electrochemical investigations. **Journal of Sol-Gel Science and Technology**, [s.l.], v. 97, p. 178–190, 2021.

SICILIANO, T. et al. Characteristics of molybdenum trioxide nanobelts prepared by thermal evaporation technique. **Materials Chemistry and Physics**, [s.l.], v. 114, n. 2–3, p. 687-691, 2009.

SIDDIQUI, M. F.; KHAN, E. A.; KHAN, T. A. Synthesis of MoO₃/polypyrrole nanocomposite and its adsorptive properties toward cadmium(II) and nile blue from aqueous solution: Equilibrium isotherm and kinetics modeling. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, [s.l.], v. 38, n. 6, e13249, 2019.

SONG, J. et al. Preparation and optical properties of hexagonal and orthorhombic molybdenum trioxide thin films. **Materials Letters**, [s.l.], v. 95, p. 190-192, 2013.

SONG, Y. et al. Aqueous synthesis of molybdenum trioxide (h-MoO₃, α -MoO₃·H₂O and h-/ α -MoO₃ composites) and their photochromic properties study. **Journal of Alloys and Compounds**, [s.l.], v. 693, p. 1290-1296, 2017.

STAMATIS, D.; DREIZIN, E. L.; HIGA, K. Thermal Initiation of Al-MoO₃ Nanocomposite Materials Prepared by Different Methods. **Journal of Propulsion and Power**, Reston, v. 27, n. 5, p. 1079, 2011.

SUMER, A. Molybdenum Oxide Clusters: Structure, Stability, and Electronic Properties. **Journal of Physical Chemistry A**, Washington, v. 125, n. 23, p. 5201–5211, 2021.

- SUNDEEP, D. et al. Spectral characterization of mechanically synthesized MoO₃-CuO nanocomposite. **International Nano Letters**, [s.l.], v. 6, p. 119–128, 2016.
- TITO, Miragaia Peruzzo; CANTO, Eduardo Leite. Química na Abordagem do Cotidiano - Volume único. 1ª edição. São Paulo: Saraiva, 2015.
- WANG, B. et al. Flexible and stretchable metal oxide nanofiber networks for multimodal and monolithically integrated wearable electronics. **Nature Communications**, [s.l.], v. 11, n. 2405, 2020.
- WANG, F.; UEDA, W. High Catalytic Efficiency of Nanostructured Molybdenum Trioxide in the Benzylation of Arenes and an Investigation of the Reaction Mechanism. **Chemistry A European Journal**, [s.l.], v. 15, n. 3, p. 742-753, 2009.
- WANG, W. et al. Achieving Fully Reversible Conversion in MoO₃ for Lithium Ion Batteries by Rational Introduction of CoMoO₄. **ACS Nano** [s.l.], v. 10, n. 11, p. 10106–10116, 2016.
- WANG, X. et al. Redox Chemistry of Molybdenum Trioxide for Ultrafast Hydrogen-Ion Storage. **Angewandte Chemie - International Edition**, [s.l.], v. 57, n. 36, p. 11569–11573, 2018.
- WINEY, K.I.; VAIA, R. A. Polymer Nanocomposites. **MRS Bulletin**, [s.l.], v. 32, p. 314–322, 2007.
- WU, C. et al. Confining Tiny MoO₂ Clusters into Reduced Graphene Oxide for Highly Efficient Low Frequency Microwave Absorption. **Small**, [s.l.], v. 16, n. 30, p. 2001686, 2020.
- XIA, T. et al. Morphology-Controllable Synthesis and Characterization of Single-Crystal Molybdenum Trioxide. **Journal of Physical Chemistry B**, Washington, v. 110, n. 5, p. 2006–2012, 2006.
- XU, J. et al. Synergistic co-catalytic nanozyme system for highly efficient one-pot colorimetric sensing at neutral pH: Combining molybdenum trioxide and Fe(III)-Modified covalent triazine framework. **Analytical Biochemistry**, [s.l.], v. 685, p. 115391, 2024.
- YU, M. et al. Interlayer gap widened α -phase molybdenum trioxide as high-rate anodes for dual-ion-intercalation energy storage devices. **Nature Communications**, [s.l.], v.11, n. 1348, 2020.
- ZENG, W., et al. Up-down conversion luminescence and drug-loading capability of novel MoO₃-x based carriers. **Advanced Powder Technology**, [s.l.], v. 32, n. 11, p. 4373–4383, 2021.
- ZHAI, X. et al. Fe₂O₃ Nanorod/Bacterial Cellulose Carbon Nanofiber Composites for Enhanced Acetone Sensing. **ACS Applied Nano Materials**, [s.l.], v. 6, n. 13, p. 12168–12176, 2023.
- ZHANG, Y. et al. Near-Infrared Regulated Nanozymatic/Photothermal/Photodynamic Triple-Therapy for Combating Multidrug-Resistant Bacterial Infections via Oxygen-Vacancy Molybdenum Trioxide Nanodots. **Small**, [s.l.], v. 17, n. 1. p. 39, 2021.

ZHAO, X. et al. Ultrafine MoO₃ anchored in coal-based carbon nanofibers as anode for advanced lithium-ion batteries. **Carbon**, [s.l.], v. 156, p.445-452, 2020.

ZHAO, Y. et al. In vitro antibacterial properties of MoO₃/SiO₂/Ag₂O nanocomposite coating prepared by double cathode glow discharge technique. **Surface and Coatings Technology**, [s.l.], v. 397, n. 125992, 2020.

ZHOU, J. et al. PVDF reinforced with core-shell structured Mo@MoO₃ fillers: effects of semi-conductor MoO₃ interlayer on dielectric properties of composites. **Journal of Polymer Research**, [s.l.], v. 29, n. 72, 2022.

ZHOU, L. et al. α -MoO₃ Nanobelts: A High Performance Cathode Material for Lithium Ion Batteries. **Journal of Physical Chemistry C**, v. 114, n. 49, p. 21868–21872, 2010.

ZHU, H.-Y. et al. Reduction characteristics of molybdenum trioxide with aluminum and silicon. **Rare Metals**, [s.l.], v. 37, p. 621–624, 2018.

ZHU, Y. et al. Nanostructured MoO₃ for Efficient Energy and Environmental Catalysis. **Molecules**, Basel, v. 25, n. 1, p. 18, 2020.

ZOLLFRANK, C. et al. Antimicrobial activity of transition metal acid MoO₃ prevents microbial growth on material surfaces. **Materials Science and Engineering C**, [s.l.], v. 32, n. 1, p. 47–54, 2012.