

MXenes: Síntese, Propriedades e Aplicações de Carbetos e Nitretos de Metais de Transição

MXenes: Synthesis, Properties, and Applications of Transition Metal Carbides and Nitrides

Murilo H. M. Facure,^a Luiza A. Mercante,^b Daniel S. Correa^{c,*}

^a Universidade de São Paulo (USP), Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Departamento de Engenharia de Materiais, CEP 13563-120, São Carlos-SP, Brasil

^b Universidade Federal da Bahia (UFBA), Instituto de Química, CEP 40170-280, Salvador-BA, Brasil

^c Embrapa Instrumentação, Laboratório Nacional de Nanotecnologia para o Agronegócio (LNNA), CEP 13560-970, São Carlos-SP, Brasil

*E-mail: daniel.correa@embrapa.br

Submissão: 24 de Setembro de 2025

Aceite: 25 de Novembro de 2025

Publicado online: 13 de Janeiro de 2026

MXenes are an emerging class of two-dimensional (2D) materials composed of transition metal carbides and nitrides. Since their discovery in 2011, these materials have attracted increasing interest due to their structural diversity and outstanding properties, including high electrical conductivity, large surface area, and redox-active surfaces. More recently, MXenes with distinct and tunable properties tailored for a wide range of applications have been reported. In this review article, we provide a comprehensive overview of the current state of the art of MXenes, discussing the main synthetic routes employed for their production, their structures and fundamental properties, as well as the most widely used physicochemical characterization techniques. Furthermore, we present a critical analysis of recent literature highlighting the most promising applications of MXenes, including energy storage devices (supercapacitors and batteries), electromagnetic interference shielding, chemical sensing, catalysis, and biomedical applications. Finally, we address the current challenges, perspectives, and opportunities that are expected to guide future advances in the field of MXenes and their applications.

Keywords: MXene; MAX phase; 2D materials; $Ti_3C_2T_x$; nanomaterials.

1. Introdução

A descoberta do grafeno no início do século¹ despertou um crescente interesse científico em materiais bidimensionais (2D), o que, por sua vez, impulsionou a descoberta e o estudo de outros tipos de materiais 2D.² Uma classe que vem ganhando cada vez mais destaque é aquela composta por carbetos, nitretos, oxicarbeto e carbonitretos de metais de transição, conhecidos como MXenes. Esses materiais apresentam fórmula geral $M_{n+1}X_nT_x$, em que M representa um metal de transição, X corresponde a carbono, nitrogênio e/ou oxigênio, e T_x representa os grupos funcionais, ou terminações, presentes na superfície das camadas mais externas do metal de transição.³

A maioria dos MXenes reportados até o momento foi obtida utilizando fases MAX como material precursor.⁴ As fases MAX são carbetos e nitretos ternários lamelares com fórmula $M_{n+1}AX_n$, sendo M o metal de transição, X o carbono e/ou nitrogênio, e A um elemento pertencente aos grupos 13 ou 14 da tabela periódica.⁴ Dessa forma, o elemento A na estrutura da fase MAX pode ser visto como responsável por manter as camadas de MXenes unidas por meio das ligações M–A. Diferentemente de outros materiais 2D que permanecem empilhados apenas por forças de van der Waals, o que possibilita a separação das camadas por cisalhamento ou outras técnicas mecânicas, os MXenes são obtidos a partir da remoção seletiva do elemento A da fase MAX. Essa remoção é favorecida pelo fato de as ligações M–A serem mais fracas do que as ligações M–X, tornando a camada A quimicamente mais reativa.^{5,6}

O nome MXene (pronuncia-se, em inglês, “méquicin”) foi cunhado a partir da fase MAX para refletir a composição do material, indicada pelas letras M e X, bem como para fazer analogia à natureza de sua estrutura bidimensional ao utilizar o sufixo “ene”, usado no termo em inglês para a denominação de materiais 2D.^{2,4} Tanto o termo em inglês quanto o termo traduzido de forma livre, “MXenos”, têm sido utilizados.

O primeiro MXene reportado foi o carbo de titânio ($Ti_3C_2T_x$), obtido em 2011⁴ a partir da remoção da camada de alumínio da fase MAX Ti_3AlC_2 , em um trabalho conduzido pelos grupos de pesquisa de Y. Gogotsi e M. Barsoum, ambos da Drexel University. Desde então, ele tem sido o MXene mais estudado e utilizado em diversas aplicações tecnológicas. Além de apresentar alta resistência mecânica e rigidez,^{7,8} flexibilidade e uma elevada razão área superficial por volume,^{5,9}

diferentemente de outros materiais 2D, o $Ti_3C_2T_x$ apresenta condutividade metálica, com valores de até 20 kS/cm.^{10,11}

Os MXenes podem apresentar diferentes estruturas por meio da variação do número de camadas e da combinação de diferentes elementos químicos no mesmo material. As estruturas com 2 a 5 camadas do metal de transição (elemento M) são conectadas por 1 a 4 camadas de átomos não metálicos (elemento X). Além disso, diferentes metais de transição podem compor o mesmo MXene, e as terminações, a depender da rota sintética utilizada, podem ser de oxigênio, grupos OH, aminas, halogênios e calcogênios, por exemplo.³ A tabela periódica apresentada na Figura 1 destaca os metais de transição já reportados em MXenes com fundo azul claro, os elementos X com fundo cinza e os elementos presentes nas terminações com fundo amarelo. O Mn apresenta um fundo com listras indicando que a sua presença foi reportada apenas nas fases MAX precursoras.¹²

Ao combinar diferentes metais de transição (M) com átomos de carbono e nitrogênio (X), bem como diversas terminações superficiais, é possível obter um número muito elevado de MXenes, resultando em materiais com propriedades distintas e ajustáveis. Considerando uma dúzia de metais de transição passíveis de serem empregados, as quatro estruturas com diferentes números de camadas de MXenes e as terminações já reportadas, estima-se que existam pelo menos mil composições estequiométricas possíveis.³ Dessa forma, o controle da composição e da estrutura do MXene permite modular suas propriedades físico-químicas, ampliando suas possibilidades de aplicação.

Desde a descoberta do primeiro MXene, esses materiais têm despertado crescente interesse da comunidade científica, como evidenciado pelo aumento contínuo do número de publicações relacionadas ao tema ao longo dos anos, conforme ilustrado na Figura 2. Se a quantidade de trabalhos reportados continuar crescendo na velocidade dos últimos anos, a expectativa é que o número de publicações supere 7000 trabalhos em 2025. No entanto,

as contribuições envolvendo instituições e pesquisadores brasileiros, embora em expansão, permanecem relativamente modestas (Figura 2) em comparação ao volume global de trabalhos. Dentre essas publicações, além de artigos de revisão em língua inglesa,^{13,14} se destacam trabalhos que aplicam MXenes, principalmente o $Ti_3C_2T_x$, em geração e armazenamento de energia¹⁵⁻¹⁸ e em sensores,¹⁹⁻²¹ além de estudos teóricos sobre os materiais.²²⁻²⁴

Diante desse cenário e das oportunidades ainda existentes para pesquisa, desenvolvimento e inovação com esses materiais, neste artigo buscamos apresentar os MXenes a partir de uma criteriosa revisão da literatura recente, além de demonstrar como sua utilização tem impactado diversas áreas da tecnologia. Neste contexto, na próxima seção, abordamos as principais rotas sintéticas utilizadas para a fabricação dos MXenes a partir da fase MAX. Será dado destaque às sínteses que utilizam a remoção seletiva da camada A de fases MAX, como ilustrado na Figura 3a, devido à sua maior utilização na obtenção de MXenes. Na seção 3, as estruturas e composições dos MXenes são abordadas para compreensão das suas propriedades finais, abordadas na seção 4. Dentre as principais propriedades dos MXenes, destacam-se a elevada condutividade elétrica, as propriedades mecânicas e flexibilidade, além da superfície com grupos funcionais que favorecem reações redox e conferem hidrofiliabilidade ao material (Figura 3b). As principais técnicas para se caracterizar os MXenes e seus precursores são discutidas na seção 5, visando fornecer informações para correta avaliação da síntese e composição química do material. Na seção 6, são apresentadas de forma crítica as principais aplicações tecnológicas dos MXenes, dando destaque para a sua capacidade de armazenar energia eletroquímica, blindar radiação eletromagnética, catalisar reações específicas, compor plataformas sensoriais e serem utilizados em aplicações biomédicas, como ilustrado na Figura 3c. Por fim, na última seção, resumizamos o estado da arte das pesquisas utilizando estes materiais e oferecemos uma perspectiva dos próximos avanços da área.

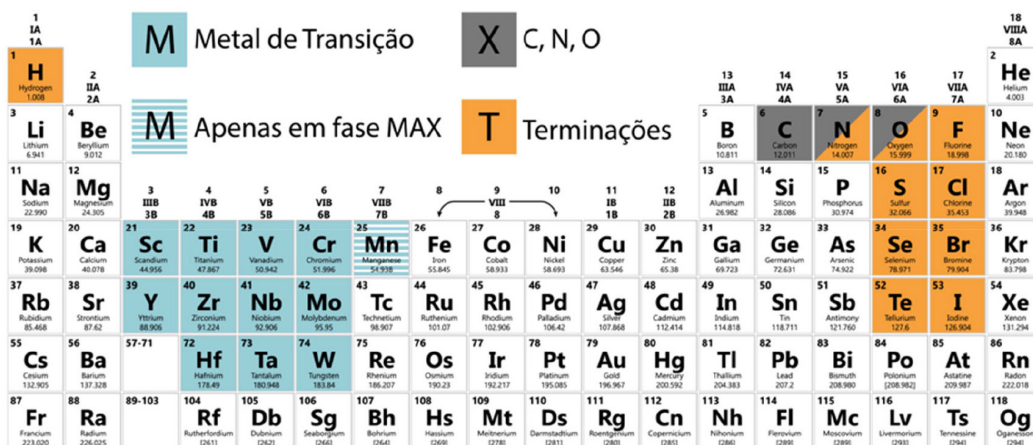


Figura 1. Tabela periódica destacando os elementos já utilizados na obtenção de MXenes

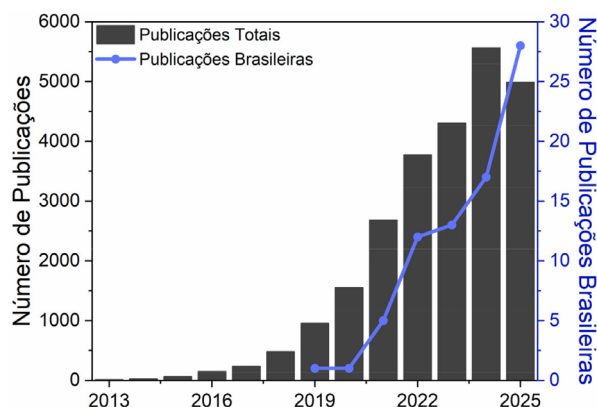


Figura 2. Número de publicações científicas totais (lado esquerdo, na cor preta) e no Brasil (lado direito, na cor azul), contendo “MXene” como palavra-chave. Dados coletados em novembro de 2025 na base de dados *Web of Science*

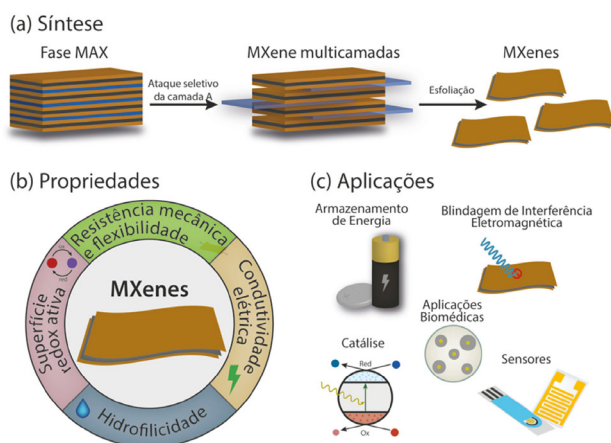


Figura 3. Ilustração esquemática da (a) síntese dos MXenes por meio da remoção seletiva da camada A de fases MAX e da posterior esfoliação, (b) suas principais propriedades e (c) aplicações mais exploradas

2. Obtenção dos MXenes

2.1. Síntese das fases MAX precursoras

A maioria dos métodos reportados para a obtenção de MXenes baseia-se na remoção seletiva da camada A das fases MAX. Estruturalmente, as fases MAX são materiais lamelares hexagonais (grupo espacial $P6_3/mmc$), que podem ser descritos como folhas octaédricas de carbetos ou nitretos de metais de transição, nas quais os átomos X ocupam o centro dos octaedros e permanecem unidos entre si por camadas puras do elemento A.²⁵ Mais de 150 diferentes fases MAX já foram reportadas na literatura,²⁶ evidenciando a ampla variedade de MXenes que podem potencialmente ser obtidos a partir desses materiais precursoras.

Embora existam diferentes métodos para a síntese das fases MAX, quando o objetivo é a obtenção de MXenes, a técnica preferencial (exceto no caso em que se busca a preparação de amostras densas) consiste no tratamento térmico de uma mistura de pós com a estequiometria

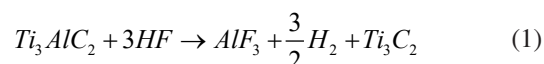
adequada. Como as fases MAX apresentam elevada estabilidade térmica, sua formação ocorre de maneira eficiente quando a estequiometria correta é utilizada. O tratamento térmico é geralmente realizado sob vácuo ou em atmosfera inerte, preferencialmente argônio, a temperaturas entre 1350 e 1600 °C, a depender da fase MAX desejada.²⁷ É fundamental manter o teor de oxigênio o mais baixo possível para obter maior rendimento e melhor qualidade do material precursor. Como a maioria das fases MAX utilizadas para a síntese de MXenes é baseada em alumínio, e este tende a evaporar nessas temperaturas, geralmente utiliza-se um excesso desse elemento na mistura inicial.^{28,29}

Em 2021, foi demonstrado que a adição de alumínio em excesso durante a síntese da fase MAX Ti_3AlC_2 resulta em grãos com maior cristalinidade e estequiometria mais precisa.¹⁰ Como consequência, as folhas de MXene produzidas a partir desse precursor apresentam maior resistência à oxidação e maior condutividade elétrica. Após o tratamento térmico, obtém-se um bloco poroso, levemente sinterizado, que geralmente é moído ou triturado para produzir o pó da fase MAX e, em seguida, peneirado para garantir a remoção de partículas maiores.²⁹

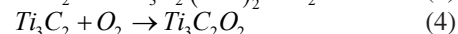
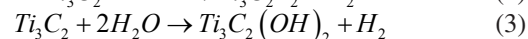
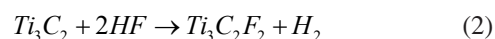
2.2. Remoção seletiva da camada A de fases MAX

Embora seja possível sintetizar MXenes a partir de outros precursores além das fases MAX, a maioria dos trabalhos reporta a utilização de soluções ácidas aquosas contendo flúor para a remoção seletiva da camada A de fases MAX, cujo processo é denominado *etching*. Por esse motivo, este trabalho de revisão foca nas sínteses de MXenes a partir de precursores MAX. No entanto, os leitores são encorajados a consultar outros trabalhos que abordam sínteses de MXenes a partir de outros materiais precursores e métodos *bottom-up*.³⁰⁻³³

Para o Ti_3C_2 , a equação abaixo representa o processo de formação do MXene através do ataque do HF à camada de Al na fase MAX:



A funcionalização do MXene acontece na sequência. O Ti_3C_2 formado reage com água, oxigênio e o excesso de HF presentes no meio, dando origem às terminações do material:^{34,35}



As propriedades dos MXenes estão intrinsecamente relacionadas às condições de síntese empregadas. A remoção da camada A das fases MAX pode demandar desde algumas horas até vários dias de reação, sendo influenciada por parâmetros como a concentração do fluoreto de hidrogênio (HF) e a temperatura na qual o processo é conduzido.²⁸ As

condições otimizadas para a remoção da camada A vão depender do metal de transição, da estrutura do material, das ligações atômicas entre os elementos e do tamanho de partícula do material precursor. A Tabela 1 apresenta algumas condições de síntese (quantidade de fase MAX, reagentes utilizados, temperatura e tempo de síntese) para a remoção seletiva da camada A de fases MAX, visando à obtenção de alguns MXenes.

Resultados experimentais⁶ indicam que o aumento do número atômico do elemento M demanda condições mais rigorosas e maiores tempos de ataque químico. Essa tendência pode ser atribuída a uma maior resistência à quebra da ligação metálica M-A devido a um maior número de elétrons de valência em M.³⁹ Além disso, em geral, MXenes com maiores valores de n na fórmula estrutural apresentam maior resistência ao ataque, exigindo procedimentos mais severos e prolongados para uma síntese eficaz.³⁹ No entanto, os reagentes também podem atacar a camada de carbono do material, resultando em defeitos na estrutura do MXene.⁴⁰

Alguns trabalhos têm investigado e comparado as condições experimentais empregadas na etapa de ataque seletivo da camada A de fases MAX.^{6,39,41} A maioria dos trabalhos que utilizam HF no ataque químico da fase MAX utiliza em concentrações entre 10 e 50%, exigindo, para cada caso, diferentes tempos de reação (Tabela 1).²⁸ Uma estratégia utilizada para se reduzir a quantidade de

HF necessária para a síntese consiste no uso de outro ácido, geralmente o ácido clorídrico (HCl).^{41,42} As escolhas do método de síntese e dos reagentes utilizados serão determinantes para a estrutura e as propriedades dos MXenes produzidos, uma vez que possuem correlação com os defeitos gerados no material, o tamanho das camadas obtidas e o tipo de terminações na superfície do MXene. Após o ataque químico da camada A, é necessário realizar a etapa de lavagem, visando eliminar o ácido residual e os subprodutos da reação. A lavagem é normalmente realizada por meio de sucessivos ciclos de centrifugação, que separam o MXene em multicamadas da solução ácida, seguidos da decantação do sobrenadante ácido.²⁸ A Figura 4a mostra partículas de fases MAX e a Figura 4b, o MXene em multicamadas obtido após o processo de remoção da camada A.

Devido à periculosidade de se trabalhar com HF e à restrição de utilizá-lo em muitos laboratórios, pesquisadores desenvolveram sínteses nas quais se utiliza um agente de ataque contendo HF, como o sal bifluoreto de amônio (NH_4HF_2),⁴³ ou através da geração *in situ* de HF, obtida pela adição do sal fluoreto de lítio (LiF) ao HCl.⁴⁴ Neste último caso, o ataque à camada A da fase MAX pode ser realizado na mesma etapa da esfoliação do MXene, a depender da concentração dos reagentes, devido à intercalação de íons lítio entre as camadas do material.²⁸ Este método foi denominado de MILD (*minimally intensive layer*

Tabela 1. Condições de síntese para a remoção seletiva da camada A de diferentes fases MAX, conforme a literatura científica

MXene (Fase MAX)	Fase MAX (g)	Reagentes	Temperatura (°C)	Tempo (h)	Ref.
Ti_3C_2 (Ti_3AlC_2)	0,5	10 mL de HF (5%)	TA	24	28
	0,5	10 mL de HF (10%)	TA	18	28
	0,5	10 mL de HF (30%)	TA	5	28
	0,5	0,8 g de LiF e 10 mL de HCl (9 M)	TA	24	28
	1	12 mL de HCl (37%), 6 mL de água, 2 mL de HF (50%)	35	24	10
V_2C (V_2AlC)	1	20 mL de HF (50%)	25	96	36
	1	12 mL de HF (50%); 8 mL HCl (12 M)	50	72	36
Nb_2C (Nb_2AlC)	1	HF (50%)	55	40	37
	1	10 mL de HF (50%)	TA	72	38
Ti_3CN (Ti_3AlCN)	1	HF (30%)	TA	18	5
Ti_2C (Ti_2AlC)	1	HF (10%)	TA	10	5
TiNbC (TiNbAlC)	1	HF (50%)	TA	28	5
Ta_4C_3 (Ta_4AlC_3)	1	HF (50%)	TA	72	5
Nb_4C_3 (Nb_4AlC_3)	5	60 mL de HF (50%)	50	168	38
Mo_2C ($\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{C}$)	1	10 mL de HF (50%)	55	100	38
$\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{C}_3$ ($\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{AlC}_3$)	1	20 mL de HF (50%)	35	96	38

TA: temperatura ambiente

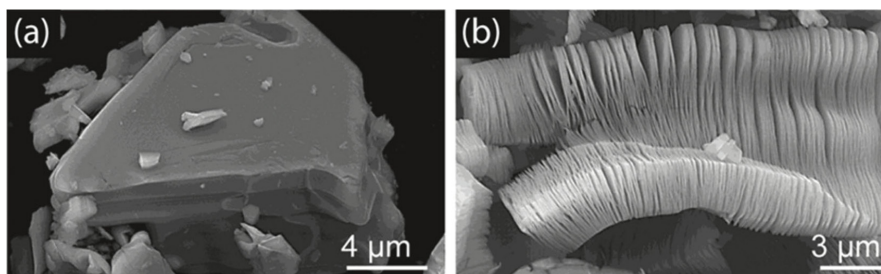


Figura 4. Imagens de microscopia eletrônica de varredura da (a) fase MAX (Ti_3AlC_2) e (b) do MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$) em multicamadas (antes da esfoliação). Reproduzida com autorização da Ref. 5. Copyright 2012 American Chemical Society

delamination), uma vez que é possível obter folhas isoladas do MXene apenas agitando o frasco contendo a dispersão, dispensando o uso de processos de sonicação.⁴⁵ Em 2021, Zeraati *et al.* reportaram uma modificação do método MILD no qual nitrogênio é utilizado durante a síntese do $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$, provocando a evaporação parcial da mistura reacional.⁴⁶ A utilização do nitrogênio leva a um aumento gradual e constante da concentração do sal e do ácido durante a síntese, resultando em um MXene de alta qualidade com uma maior condutividade elétrica e com maiores partículas.

2.3. Esfoliação do MXene

A esfoliação (ou delaminação) do MXene em multicamadas se dá com a utilização de compostos visando expandir o espaçamento entre as folhas através de um processo de intercalação e, assim, enfraquecer as interações entre as camadas 2D. O processo geralmente se inicia com (i) uma etapa de mistura, para introduzir o composto entre as camadas 2D, (ii) eventualmente uma etapa de sonicação, para auxiliar na esfoliação do material, e (iii) etapas de centrifugação para separar o material esfoliado daquele que permanece em multicamadas.²⁸

A mistura é geralmente realizada à temperatura ambiente, sob agitação constante. Alguns intercalantes usados são moléculas orgânicas grandes, como o dimetilsulfóxido (DMSO),⁴⁷ compostos de tetraalquilamônio, como hidróxido de tetrabutilamônio (TBAOH) e hidróxido de tetrametilamônio (TMAOH),⁴⁸ e íons Li^+ .^{28,42,49}

A etapa de sonicação pode interferir na quantidade de defeitos, no tamanho do MXene e na concentração final obtida. Tempos de sonicação mais longos e potências mais elevadas resultam em folhas menores, com maior número de defeitos, e podem gerar concentrações maiores em relação às obtidas sem sonicação. A concentração do MXene também depende do método de síntese e do tipo de intercalante utilizado.²⁸ Como ressaltado anteriormente, algumas rotas sintéticas não exigem a etapa de sonicação para separar as camadas do MXene, sendo necessária apenas a agitação da dispersão, muitas vezes manual, para esfoliar o material que foi intercalado na etapa anterior.

Na etapa de coleta do MXene em camadas isoladas, ciclos de centrifugação também são utilizados para separar o material esfoliado daquele ainda em multicamadas. No

processo, o sobrenadante é coletado, contendo o MXene esfoliado, e o material depositado é redisperso através de agitação ou sonicação para esfoliação, em seguida, a centrifugação é repetida. Após a completa esfoliação e coleta de todo o material em monocamadas, a dispersão geralmente apresenta baixa concentração. Dessa forma, centrifugações com maiores tempos e velocidades são empregadas para aumentar a concentração da dispersão.^{28,42}

Alguns trabalhos trazem maiores detalhes e descrevem o passo a passo da síntese de MXenes.^{28,42,50}

3. Estrutura dos MXenes

3.1. Estrutura atômica dos MXenes

De maneira semelhante aos seus precursores da fase MAX, os átomos de metal (M) nos MXenes estão organizados em uma estrutura hexagonal compacta, na qual os átomos do elemento X ocupam os sítios intersticiais octaédricos. Por isso, a estrutura cristalina dos MXenes é, em geral, do tipo compacta hexagonal. No entanto, a ordenação dos átomos metálicos M varia conforme a composição do material. No caso dos MXenes do tipo M_2X , os átomos metálicos seguem uma sequência de empilhamento do tipo ABABAB, como mostrado na Figura 5a, característica de uma estrutura compacta hexagonal. Já nos compostos M_3X_2 e M_4X_3 , a ordenação atômica adota uma sequência ABCABC, típica de um empilhamento cúbico de face centrada (Figura 5b).³⁹ A Figura 5c mostra a estrutura atômica (vista superior) de um MXene do tipo M_3X_2 .

Para uma discussão mais aprofundada sobre as particularidades estruturais e químicas de MXenes específicos, recomendamos consultar outros trabalhos da literatura que exploram esses aspectos em maior detalhe.^{6,39,51–54}

3.2. Grupos funcionais

MXenes sintetizados em soluções contendo fluoretos apresentam, em sua superfície, uma combinação de grupos funcionais -OH, -O e -F, como representado nas eqs. 2, 3 e 4. Sínteses utilizando HCl vão produzir MXenes com terminações -Cl, além das demais.³⁹ Os grupos funcionais

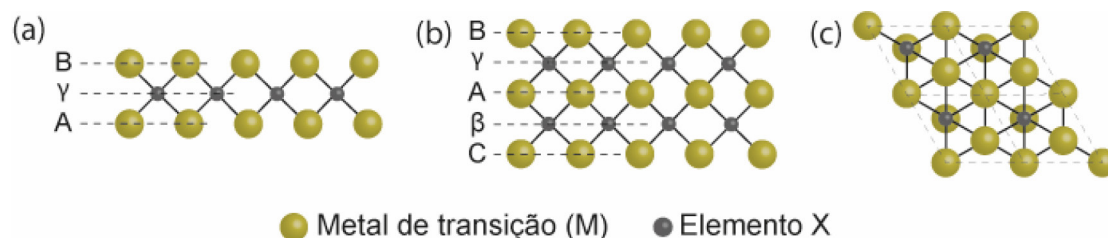


Figura 5. Representação das estruturas atômicas de MXenes do tipo (a) M_2X e (b) M_3X_2 . As letras gregas (γ e β) representam os sítios intersticiais octaédricos, onde estão localizados os elementos X, em relação ao arranjo estrutural do elemento M, representado pelas letras A, B e C. (c) Representação da estrutura atômica (vista superior) de um MXene do tipo M_3X_2 . Em todas as imagens, as terminações superficiais não foram representadas

presentes nos MXenes exercem influência direta sobre diversas propriedades do material, incluindo capacidade de armazenamento de energia,⁵⁵ comportamento magnético, extensão da banda proibida (do inglês, *bandgap*),⁵⁶ entre outras.⁴⁰ A configuração mais estável prevista para essas terminações ocorre quando o átomo do grupo funcional (T) ocupa um sítio distinto em relação aos átomos metálicos vizinhos e ao átomo do elemento X, resultando em uma ordenação do tipo ABCABC para M, X e T, respectivamente. Contudo, existem exceções em que os átomos T se posicionam diretamente sobre os átomos X vizinhos, o que permite maior atração eletrônica.^{56,57}

A presença, a quantidade e o tipo dessas terminações também influenciam a interação entre as diferentes camadas. Relatos da literatura indicam que, com base em medidas de espalhamento de nêutrons, as interações entre as camadas podem ser descritas por ligações de hidrogênio entre átomos de O ou F de uma superfície e grupos -OH da superfície oposta de outra folha, além de interações de van der Waals envolvendo átomos de O e/ou F entre as camadas.³⁹

3.3. Efeito da síntese na estrutura do MXene e geração de defeitos

As condições de síntese, como os reagentes utilizados, suas concentrações, o tempo e a temperatura empregados, têm influência direta na estrutura e nas propriedades finais do MXene obtido.^{28,40} Para se produzir um material com as características desejadas, é necessário, portanto, saber como essas condições podem modificar a estrutura do material sintetizado. O uso de diferentes concentrações de HF durante o processo de síntese, por exemplo, leva à obtenção de materiais com distintas proporções entre os grupos funcionais superficiais. De modo geral, concentrações mais baixas de HF resultam em uma razão mais elevada entre O e F nas terminações.³⁹ Por exemplo, $Ti_3C_2T_x$ sintetizado a partir de soluções de HF menos concentradas⁵⁸ apresentou maior quantidade de O e menor concentração de F em comparação àquele sintetizado utilizando HF a 50%.⁴

Durante a síntese, além da formação de grupos funcionais na superfície dos MXenes, as camadas do material são intercaladas por íons e por moléculas de água. A análise da mudança da constante de rede devido aos processos de intercalação pode revelar informações importantes sobre a

estrutura cristalina, a estrutura entre as camadas e a estrutura da superfície.⁴⁰ De maneira geral, tempos de reação mais longos e temperaturas de síntese mais altas levam a maiores valores de constantes de rede.⁵⁹

Embora o ataque químico das fases MAX para a síntese de MXenes tenha como objetivo remover seletivamente a camada A, inevitavelmente alguns átomos do metal da camada mais externa também são atacados, resultando na formação de vacâncias na superfície do material. As vacâncias dos elementos X, por sua vez, podem ser herdadas da fase MAX precursora, ou serem geradas durante o próprio processo de ataque químico.^{40,60} Em geral, condições mais brandas de síntese e esfoliação produzem partículas maiores de MXene, com menor concentração de defeitos. A presença de vacâncias pode influenciar diretamente a estrutura eletrônica do material, que, por sua vez, determina suas propriedades eletrônicas, ópticas e magnéticas.³⁹

Vacâncias foram observadas em folhas de $Ti_3C_2T_x$ sintetizadas sob condições relativamente brandas,⁶¹ nas quais se observou que a quantidade de defeitos estava relacionada à concentração de HF utilizada durante a síntese (Figuras 6a-6c). Os defeitos atômicos mais recorrentes em $Ti_3C_2T_x$ são as vacâncias de Ti, as quais podem modificar significativamente a estrutura do material. Átomos de Ti localizados na superfície podem expor átomos de Ti da camada interna, atuando como sítios catalíticos ativos.⁴⁰ No entanto, a presença de vacâncias de Ti pode acelerar a degradação do MXene em água, resultando na formação de óxidos metálicos e, conseqüentemente, na redução da sua reatividade de superfície e da condutividade elétrica do material. Stratulat *et al.* demonstraram que as vacâncias de Ti podem ser preenchidas por metais que, ao serem incorporados na estrutura, doam elétrons, formando cátions e se ligando aos grupos funcionais da superfície.⁶⁰ Íons menores, como Li^+ e Mg^{2+} , podem ocupar a própria vacância do Ti (Figura 6d), bloqueando o acesso ao interior da estrutura do MXene. Já íons maiores (Na^+ e K^+) são adsorvidos acima do plano da vacância devido a restrições estéricas (Figura 6e), resultando na formação de um grande momento dipolar entre o cátion carregado positivamente e a vacância carregada negativamente. Esse forte momento dipolar aumenta a estabilidade do MXene à degradação ao impedir a liberação e a subsequente oxidação dos átomos de Ti adjacentes.

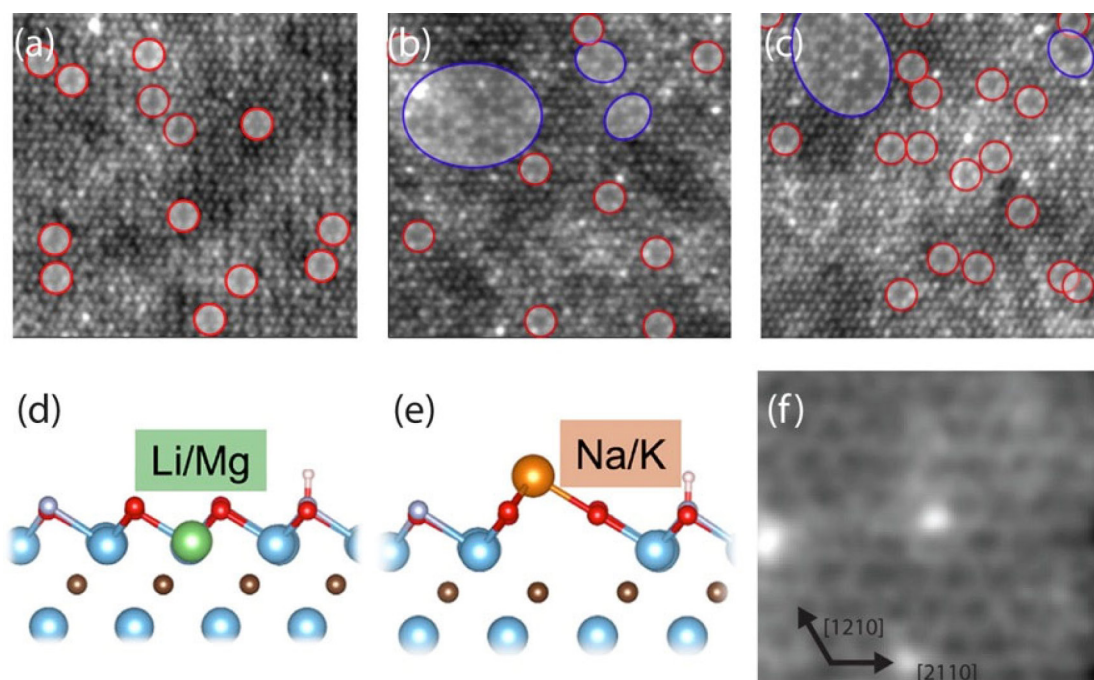


Figura 6. Imagens de microscopia eletrônica de transmissão por varredura de camadas de $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ preparadas usando soluções de HF em diferentes concentrações: (a) 2,7%, (b) 5,3% e (c) 7%. As vacâncias individuais de Ti são indicadas por círculos vermelhos, enquanto os aglomerados de vacâncias são destacados por círculos azuis. Adaptada com autorização da ref. 61. Copyright 2016 American Chemical Society. (d) Adsorção de átomos de Li e Mg na vacância de Ti no $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ e (e) de Na e K acima da vacância devido a efeitos estéricos. Adaptada com autorização da ref. 60. Copyright 2025 American Chemical Society. (f) Presença de átomos de Ti posicionados acima de átomos de Ti na rede do MXene. O contraste observado é atribuído ao O como consequência da formação de grupos TiO_x . Adaptada com autorização da ref. 54. Copyright 2015 American Chemical Society

Um defeito menos explorado é a presença de um átomo extra na superfície da estrutura cristalina do MXene. A Figura 6f mostra a presença de átomos de Ti sobre a superfície de uma única camada de $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$. Neste caso, devido à reatividade entre o Ti e o O, formam-se grupos móveis de TiO_x , que podem passar localmente a superfície do material.⁵⁴

Um tipo de defeito menos pontual é o de nanoporos, os quais, a exemplo do que acontece com as vacâncias, tendem a aumentar de tamanho e em quantidade sob condições mais severas de síntese, como maiores tempos de reação e maior concentração de ácidos.⁴⁰ A utilização de processos de sonicação para a esfoliação do material também tende a aumentar o tamanho dos poros.^{40,62} Embora muitas vezes indesejáveis, os nanoporos em MXenes podem ser intencionalmente provocados para obtenção de materiais aplicados em sistemas de filtragem⁶³ e detecção de moléculas altamente específicas.^{64,65}

4. Propriedades dos MXenes

4.1. Condutividade elétrica

A condutividade elétrica dos MXenes é uma das propriedades mais exploradas em termos de aplicações tecnológicas. Os MXenes sem terminações, ou seja, sem grupos funcionais em sua superfície, são considerados

metais com alta densidade de estados no nível de Fermi e alta concentração de portadores de carga.³ No entanto, a condutividade elétrica dos MXenes pode ser alterada através do tipo e da orientação relativa dos grupos funcionais das terminações na superfície.⁶ A composição do MXene, nesses casos, também tem influência na condutividade elétrica final apresentada pelo material. Alguns MXenes apresentam condutividade elétrica metálica, alcançando valores de até 24 kS/cm,⁴⁶ enquanto outras composições podem ser semicondutoras ou ainda supercondutoras. Por exemplo, o metal da camada M tem direta influência na condutividade elétrica do material.⁶⁶ O $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ tem comportamento metálico, já os MXenes contendo Mo apresentam propriedades similares às de semicondutores,⁶⁷ enquanto MXenes com metais mais pesados, como Cr e W, são teoricamente previstos como isolantes topológicos.³⁹ Por sua vez, MXenes contendo Nb apresentaram supercondutividade ajustável.⁶⁸

Além da composição, a condutividade elétrica dos MXenes é determinada pelas condições de preparo das amostras e pelas sínteses utilizadas. Em geral, a condutividade elétrica dos MXenes é avaliada através de medidas de resistência ou condutividade elétrica, reportada em S/cm. Neste sentido, a espessura do filme também influencia sua condutividade.⁶⁹ Com o aumento da espessura do filme, observa-se, em geral, aumento da resistência elétrica, como mostrado na Figura 7a para filmes de $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$. No que diz respeito às sínteses empregadas,

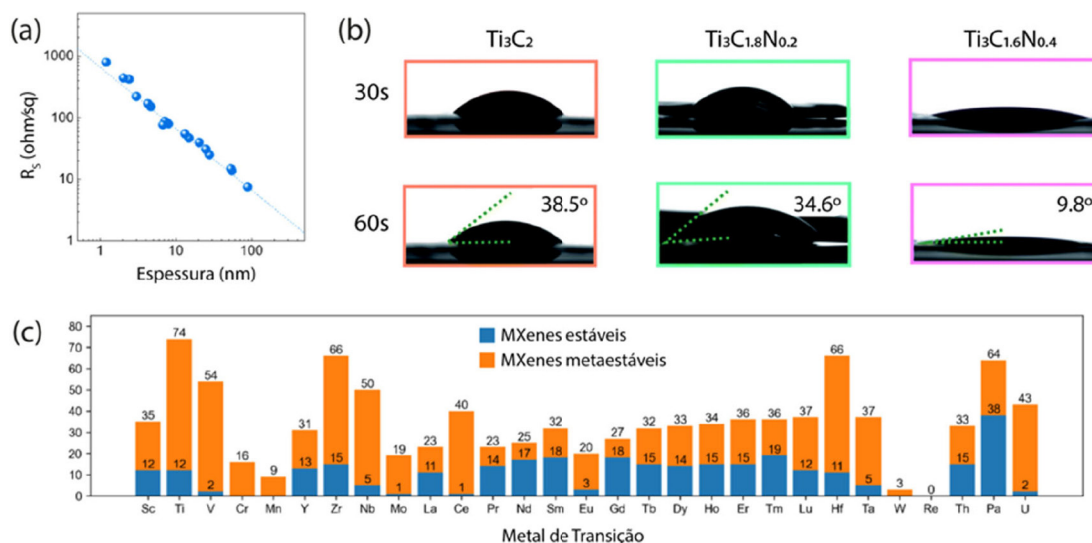


Figura 7. (a) Relação inversa entre a resistência elétrica de folha (R_s) do $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ com a espessura do filme. Adaptada com autorização da ref. 69. Copyright 2023 American Chemical Society. (b) Medidas de ângulo de contato utilizando eletrólito KOH (1 M) para filmes de carbonitreto de titânio com diferentes composições. A hidrofilicidade do MXene aumenta (diminuição do ângulo de contato) com a proporção de nitrogênio na composição do material. Adaptada com autorização da ref. 70. Copyright 2020 Royal Society of Chemistry. (c) Número de estruturas de MXenes estáveis (azul) e metaestáveis (laranja) compostos por metais de transição específicos. Os números acima da barra azul e laranja indicam o número de composições estáveis e o número total de composições metaestáveis e estáveis, respectivamente. Adaptada com autorização da ref. 71. Copyrights 2024 Royal Society of Chemistry

MXenes produzidos por métodos que resultam em menor concentração de defeitos e camadas com dimensões laterais maiores apresentam valores de condutividade elétrica mais elevados. Isso pode ser obtido com rotas sintéticas mais brandas, processos de esfoliação sem a utilização de sonicação e secagem do material para remoção de intercalantes entre as camadas.³⁹

4.2. Propriedades mecânicas

Os MXenes apresentam, simultaneamente, elevada resistência mecânica e alto módulo de elasticidade. Por exemplo, estudos demonstraram que monocamadas de $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ e $\text{Nb}_4\text{C}_3\text{T}_x$ apresentam módulos de Young de aproximadamente 330 GPa e 390 GPa, respectivamente, valores superiores aos observados em outros materiais bidimensionais obtidos por esfoliação em meio líquido, como óxido de grafeno ou MoS_2 .⁷²⁻⁷⁴

Simulações de dinâmica molecular e cálculos de teoria do funcional da densidade (DFT) indicam que os MXenes do tipo M_2X são mais rígidos e resistentes do que os M_3X_2 e M_4X_3 . Além disso, os grupos funcionais influenciam significativamente as propriedades mecânicas. MXenes funcionalizados com O apresentam constantes elásticas mais elevadas do que aqueles com OH ou F, resultado da interação mais forte entre o O e os átomos metálicos.^{75,76}

4.3. Hidrofilicidade

Diferentemente de outros materiais 2D condutores elétricos, MXenes apresentam hidrofilicidade e, como consequência, a capacidade de se dispersar em água sem o

auxílio de surfactantes. Tal propriedade resulta da presença de grupos funcionais no material, que conferem uma elevada carga negativa à sua superfície, com valores de potencial zeta geralmente mais negativos do que -30 mV. A repulsão entre as cargas faz com que o material possa ser facilmente disperso em soluções aquosas.^{25,77}

No entanto, a composição do MXene (dependente dos elementos M e X) também influencia a hidrofilicidade do material. Por exemplo, Tang *et al.* mostraram que uma maior presença de nitrogênio em carbonitreto de titânio aumentou a hidrofilicidade do MXene.⁷⁰ Assim, uma maior molhabilidade pôde ser obtida aumentando-se a proporção de nitrogênio na estrutura, favorecendo uma maior acessibilidade do eletrólito a sítios ativos do material.

Além de facilitar o processo de lavagem e de síntese do material, que podem ser realizados utilizando água, evitando assim o uso de outros solventes de maior custo e menos acessíveis, essa propriedade facilita o processamento do material. Por exemplo, diferentes concentrações das dispersões de MXenes podem ser obtidas, modificando sua viscosidade, e permitindo a fabricação de filmes de MXenes eletricamente condutores,⁷⁸ utilizando técnicas como a deposição por spray,⁷⁹ filtração a vácuo,⁸⁰ derramamento e evaporação de solvente (*drop-casting*)^{38,81} e centrifugação (*spin-coating*).⁸² Esta variedade de técnicas que podem ser empregadas para a obtenção de filmes de MXene favorece um maior controle das características finais desejadas, como espessura e uniformidade do filme.^{78,83} A partir de dispersões mais viscosas é possível produzir tintas para impressão por jato de tinta^{84,85} ou por serigrafia,^{86,87} podendo também ser utilizadas como tintas de canetas esferográficas,^{88,89} por exemplo.^{69,90} Além disso, as dispersões podem ser

utilizadas na concentração adequada para modificar outras nanoestruturas.⁹¹⁻⁹³

4.4. Superfície redox ativa

Dentre as várias possíveis aplicações dos MXenes, uma das que mais se destaca é a sua utilização como eletrodo de supercapacitores,^{39,94} especialmente o $Ti_3C_2T_x$, como será abordado adiante. Além da excelente condutividade elétrica e da elevada área superficial disponível, a alta performance desses materiais para o armazenamento de energia deve-se principalmente à superfície redox ativa do MXene. Ao se utilizar eletrólitos ácidos, prótons são intercalados entre as camadas do $Ti_3C_2T_x$, o que resulta em processos de protonação e desprotonação. Os prótons intercalados reagem com as terminações O do MXene e formam grupos OH, alterando assim o estado de oxidação do Ti, o que resulta no comportamento pseudocapacitivo.⁹⁵⁻⁹⁸

4.5. Estabilidade

Estudos teóricos têm sido conduzidos para avaliar a estabilidade termodinâmica de diferentes composições de MXenes,^{71,99,100} considerando não apenas os elementos M e X, como também os grupos das terminações superficiais. Tais estudos podem servir de guia para direcionar experimentos. Rems *et al.*, por exemplo, avaliaram a estabilidade de diferentes MXenes através de cálculos da teoria do funcional da densidade, considerando 29 diferentes metais de transição e 11 tipos de terminações superficiais.⁷¹ Os resultados mostraram que tanto o metal de transição quanto os grupos funcionais exercem elevada influência na estabilidade do MXene. Em alguns casos, cálculos realizados com metais de transição específicos não deram origem a nenhuma estrutura termodinamicamente estável, como, por exemplo, Cr e Mn (Figura 7c).

Uma limitação dos MXenes é a sua tendência a se oxidar em ambientes que contenham oxigênio e água. Entretanto, eles se mostram relativamente estáveis em água desgaseificada, livre de oxigênio, ou em ar seco. A exposição à luz é outro fator que pode acelerar o processo de oxidação do material.^{39,101} Embora cada MXene apresente uma resistência à oxidação diferente, as dispersões de MXene apresentam maior estabilidade quando armazenadas sob refrigeração, em ambiente escuro e isento de oxigênio. Outra estratégia que pode ser adotada é a obtenção do MXene em multicamadas, que apresenta uma estabilidade muito superior àquela do material isolado, e a realização da esfoliação pouco antes de sua utilização.³⁹

Em geral, a oxidação inicia-se nas bordas das camadas, com a formação de nanocristais de óxidos metálicos (por exemplo, TiO_2), evoluindo posteriormente por nucleação e crescimento até cobrir toda a superfície do material. A resistência dos MXenes à oxidação também depende do método de fabricação e da estrutura do material. MXenes com menos defeitos tendem a apresentar maior estabilidade.¹⁰²⁻¹⁰⁴

5. Caracterização das Fases MAX e dos MXenes

O primeiro passo para confirmar a conversão da fase MAX no MXene de interesse é a avaliação visual, uma vez que esse processo leva a uma mudança de cor perceptível. Conforme mostrado na Figura 8a, o $Ti_3C_2T_x$ obtido a partir do ataque químico com HF (30%) apresenta cor distinta (cinza escuro a preto) em relação à cor cinza-grafítica do precursor Ti_3AlC_2 .²⁸ Além disso, após o processo de esfoliação, as dispersões coloidais dos MXenes aparentam ser pretas, no entanto, quando diluídas (concentrações em torno de 0,5 mg/mL), apresentam coloração específica e característica da composição do sistema.²⁸ Soluções coloidais diluídas de $Ti_3C_2T_x$, por exemplo, exibem coloração esverdeada, enquanto dispersões de Ti_2CT_x apresentam coloração roxa/magenta (Figura 8b).²⁸ A não conformidade com a cor esperada é o primeiro indicativo do processo de degradação do MXene.¹⁰⁵ Por exemplo, para MXenes à base de titânio ($Ti_3C_2T_x$ ou Ti_2CT_x), a aparência “leitosa” ou branca da solução é sinal da oxidação do material e formação de TiO_2 .^{106,107}

Além da inspeção visual esperada do MXene, para melhor compreender as propriedades e viabilizar sua aplicação, é necessário realizar uma rigorosa investigação dos MXenes e, para isso, diferentes técnicas de caracterização são comumente empregadas, detalhadas a seguir.^{105,109,110}

5.1. Caracterização estrutural e morfológica

A conversão da fase MAX no MXene multicamadas causa alterações significativas no padrão de DRX, conforme ilustrado na Figura 8c. Para a fase MAX (Ti_3AlC_2), por exemplo, o pico acentuado em torno de 38° , relativo ao plano (104), está relacionado à presença de Al, o qual precisa ser removido para a obtenção do MXene multicamadas.¹⁰⁹ Assim, o desaparecimento desse pico indica que a estrutura cristalina compactada das camadas de Ti_3AlC_2 foi desfeita devido à remoção do Al, resultando na formação de novas camadas de MXene.¹⁰⁹ Outra mudança característica durante esse processo está associada ao pico (002) em baixos valores de 2θ (normalmente menores que 10°), o qual está associado ao espaçamento d entre as camadas de MXene.¹¹⁰ Munir *et al.*¹⁰⁸ fizeram uma avaliação por DRX da influência de diferentes concentrações de HF no processo de obtenção do $Ti_3C_2T_x$ (Figura 8c). Conforme indicado pelos difratogramas, o uso de HF em baixa concentração (5%) não é eficaz para formação do MXene, uma vez que a amostra obtida ainda apresentou picos associados à fase MAX. Com o aumento da concentração de HF, a intensidade dos picos característicos da fase MAX começou a diminuir e o pico do MXene (002) se deslocou para menores valores de 2θ . Os autores também avaliaram o efeito do uso de diferentes moléculas (NH_3 , DMSO, água e ureia) durante o processo de esfoliação do MXene obtido com 30% de HF. Eles observaram que para água, NH_3 aquoso e DMSO, o

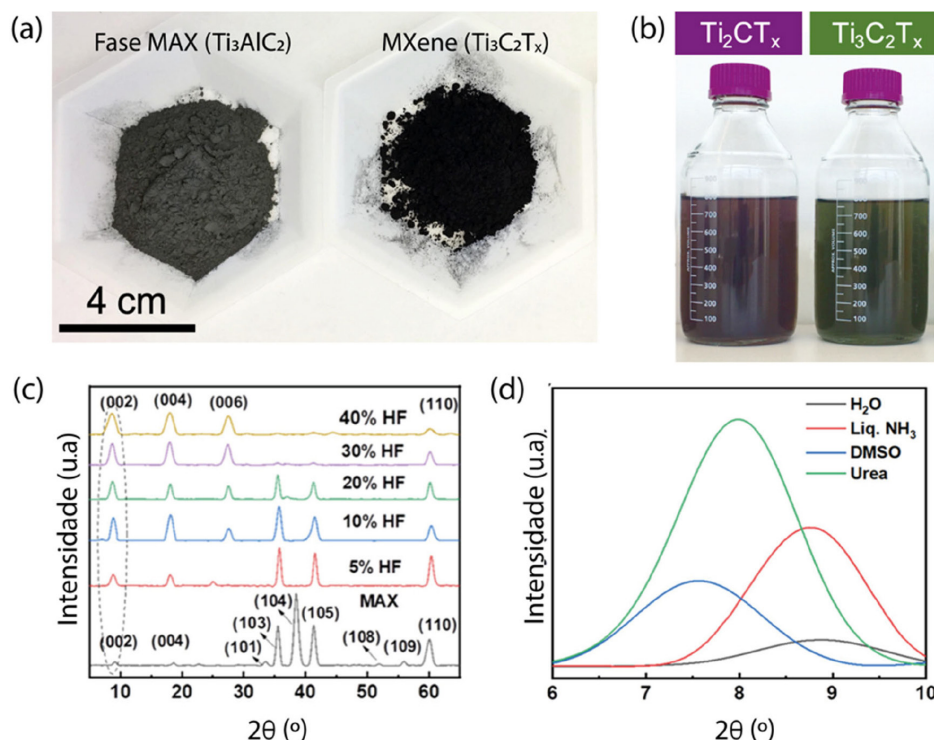


Figura 8. (a) Imagens da fase MAX (cinza) e do MXene multicamadas (preto). (b) Frascos de 1 L contendo dispersões de diferentes MXenes após o processo de delaminação. Adaptada com permissão da ref. 28 Copyright 2017 American Chemical Society. (c) Difratomogramas de raios X do Ti_3AlC_2 puro (fase MAX) e $Ti_3C_2T_x$ preparados usando diferentes concentrações de HF. (d) Padrão de DRX evidenciando o deslocamento do pico referente ao plano (002) para diferentes intercalantes empregados na esfoliação do MXene. Adaptada com autorização da ref. 108. Copyright 2020 American Chemical Society

pico (002) do MXene se apresentou mais alargado, sendo o DMSO o solvente mais adequado para o processo de esfoliação por apresentar o pico (002) em menor valor de 2θ (Figura 8d). No entanto, no caso da ureia, o pico (002) tornou-se notavelmente mais intenso. Os autores atribuíram esse comportamento à reunificação das camadas de MXene.

Imagens de MEV também são amplamente usadas para avaliar o processo de conversão da fase MAX no MXene de interesse. Como os primeiros MXenes foram sintetizados empregando HF altamente concentrado,⁴ a obtenção de um material com estrutura em “sanfona” (Figura 4b) é considerada como indicativa do sucesso da síntese. No entanto, é importante destacar que a formação desse tipo de estrutura está associada ao método de síntese empregado. Conforme demonstrado por Alhabebe *et al.*,²⁸ a morfologia dos sólidos de $Ti_3C_2T_x$ multicamadas dependerá da concentração do HF empregado durante a síntese. Para baixas concentrações de HF (~ 5 – 10%), a estrutura em “sanfona” torna-se menos proeminente e o MXene multicamadas assemelha-se mais à morfologia compacta típica da fase MAX. Essa diferença se deve, essencialmente, ao fato de que, à medida que a concentração de HF aumenta, a produção de H_2 também aumenta, o que leva à expansão da estrutura. MXenes obtidos por métodos que utilizam a formação de HF *in situ*, como o método MILD, também apresentam aparência semelhante à do MXene em HF de baixa concentração, pelas mesmas razões.¹⁰⁵ Após o

processo de esfoliação, dispersões diluídas dos MXenes são geralmente caracterizadas por imagens de MEV ou de microscopia eletrônica de transmissão (MET). Dessa forma, é possível determinar informações sobre o tamanho e a dispersão dos flocos, grandes defeitos de microperfuração, qualidade das bordas e outros parâmetros.

5.2. Caracterização química

A espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDX), geralmente acoplada às técnicas de microscopia eletrônica, é frequentemente utilizada como técnica complementar para fornecer informações qualitativas sobre a composição química dos MXenes. No entanto, é importante destacar que, embora a técnica forneça boas informações qualitativas sobre o(s) elemento(s) M, ela não é considerada adequada para avaliar as terminações ou as razões X (quando são utilizados carbonitretos).¹⁰⁵

A espectroscopia de fotoelétrons de raios X (XPS) é uma técnica importante para confirmar a formação e estudar a química de superfícies dos MXenes.¹⁰⁹ A técnica, por exemplo, pode ser usada para acompanhar a remoção da camada de alumínio da fase MAX Ti_3AlC_2 , a partir do monitoramento do pico associado à ligação Ti-Al, e confirmar a formação de grupos funcionais na superfície do MXene.¹¹¹ Luxa *et al.*¹¹² empregaram a técnica de XPS para confirmar a conversão da fase MAX (Mo_2TiAlC_2)

em seu MXene correspondente ($\text{Mo}_2\text{TiC}_2\text{T}_x$) usando HF à temperatura ambiente. A comparação dos espectros de alta resolução de Ti 2p, Al 2p e O 1s revelou várias diferenças notáveis entre a fase MAX e o MXene esfoliado (Figura 9). A ausência do pico relativo ao Al 2p na amostra de $\text{Mo}_2\text{TiC}_2\text{T}_x$, por exemplo, confirmou a remoção efetiva de Al da superfície do material. Mudanças significativas também ocorreram nos espectros do Ti 2p e do O 1s, podendo-se observar novos picos para o MXene, confirmando a presença de grupos funcionais na superfície do material. Além disso, a técnica de XPS tem sido amplamente utilizada para avaliar diversas abordagens de tratamento de superfícies, processos de intercalação e a estabilidade de MXenes e dos seus respectivos grupos de superfície.¹⁰⁵

Além da análise elementar típica, o XPS também é comumente empregado para avaliar a formação de materiais compósitos contendo MXenes.^{113–115} No entanto, é importante destacar que a interpretação dos dados de XPS de MXenes pode ser desafiadora, uma vez que diferentes fatores podem influenciar os dados obtidos, incluindo o modo de preparação da amostra, a aquisição dos espectros e a qualidade do ajuste das curvas. Como resultado, a determinação da composição do MXene por XPS é suscetível a múltiplos fatores e pode não representar claramente a composição da superfície do material, sendo necessário o uso de diferentes técnicas para obtenção de um resultado confiável.

Complementar à análise de XPS, a técnica de ressonância magnética nuclear (RMN) pode ser muito útil para análise das terminações nas superfícies dos MXenes, devido à grande sensibilidade dos núcleos $-\text{OH}$, $=\text{O}$, ^1H e ^{19}F .^{116–118} Experimentos de RMN revelaram que há menos terminações $-\text{OH}$ do que $-\text{F}$ ou $-\text{O}$ na superfície do $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$, e que

as terminações superficiais são altamente sensíveis ao método de síntese utilizado. Por exemplo, Hope *et al.*¹¹⁹ demonstraram que o material sintetizado com HF possui quase quatro vezes mais terminações $-\text{F}$ do que o MXene obtido a partir de LiF-HCl . Dados de RMN de ^{13}C também podem ser empregados para analisar a conversão da fase MAX no MXene de interesse.^{119,120}

A espectroscopia Raman também tem sido utilizada com frequência para caracterização de MXenes.^{105,121,122} A alta sensibilidade do método permite investigar tanto os grupos de superfície quanto as características estruturais resultantes dos diferentes métodos de síntese. As impressões digitais moleculares do $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ obtido pelo ataque químico com HF/HCl são apresentadas na Figura 10. Diferentes fatores afetam a posição dos picos, incluindo a composição, o tamanho, a orientação e as espécies intercaladas. Assim, por exemplo, um deslocamento do pico Raman durante a intercalação eletroquímica pode ser atribuído tanto à mudança nos grupos de superfície quanto à mudança no espaçamento entre camadas.¹²³ É importante destacar que as altas potências e temperaturas do laser empregado durante a análise podem levar à degradação do material durante a análise. Adomaviciute-Grabusove *et al.*¹²⁴ monitoraram a degradação fototérmica do $\text{Ti}_3\text{T}_2\text{T}_x$ utilizando a espectroscopia Raman. Os autores observaram que um laser com comprimento de onda de 633 nm e intensidade da ordem de 160 kW/cm^2 levou à formação de carbono amorfo e hidrocarbonetos, enquanto nanopartículas de TiO_2 foram formadas quando intensidades da ordem de 550 kW/cm^2 foram utilizadas. No processo de aquecimento, marcadores mais pronunciados de oxidação e redução da água intercamada foram observados a $200\text{--}300 \text{ }^\circ\text{C}$, enquanto a $400 \text{ }^\circ\text{C}$, uma nova banda indicou a formação de TiO_2 anatase.

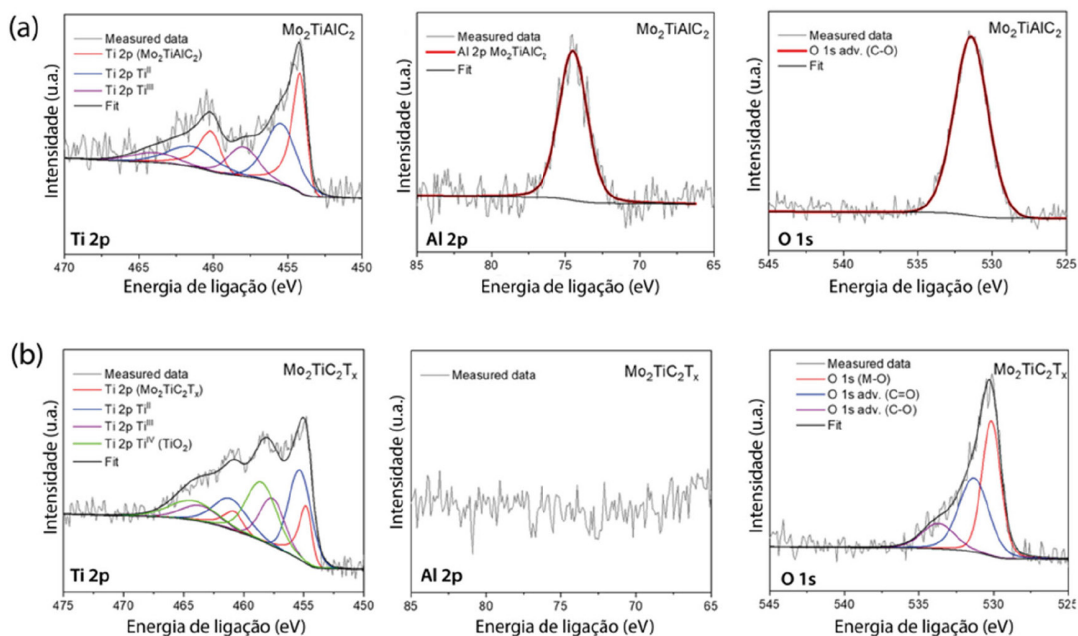


Figura 9. Dados de XPS para as amostras de (a) $\text{Mo}_2\text{TiAlC}_2$ (fase MAX) e (b) $\text{Mo}_2\text{TiC}_2\text{T}_x$ (MXene). Adaptada com permissão da ref. 112 Copyright 2024 American Chemical Society

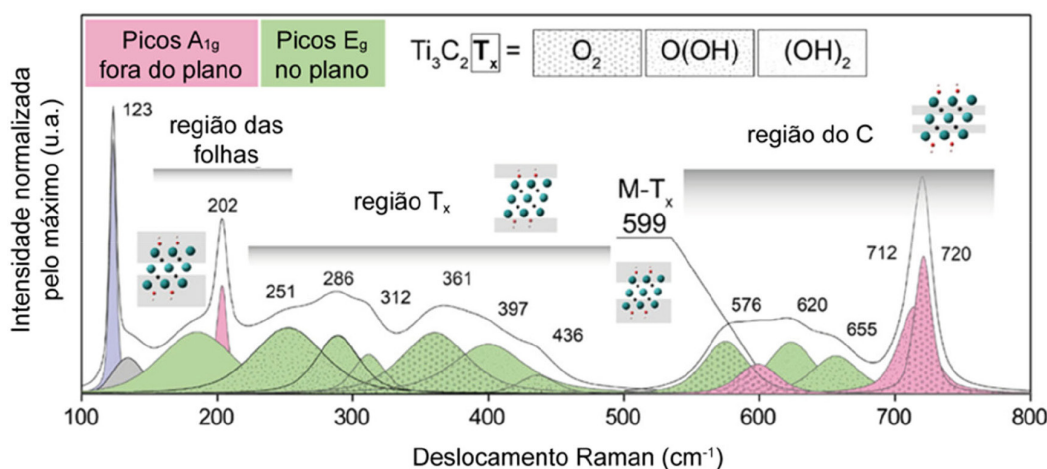


Figura 10. Espectro Raman deconvolvido obtido de um filme de $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ sintetizado pelo ataque químico com HF-HCl e excitado com laser de 785 nm. O espectro é dividido em 3 regiões: (i) região das folhas, que corresponde a uma vibração de grupo de carbono, duas camadas de titânio e grupos de superfície; (ii) região T_x , que representa as vibrações dos grupos de superfície; e (iii) região do carbono, onde se localizam as vibrações no plano e fora do plano dos átomos de carbono. Adaptada com permissão da ref. 121 Copyright 2020 American Chemical Society

6. Aplicações

6.1. Armazenamento de energia

MXenes são materiais extremamente úteis para o desenvolvimento de dispositivos de armazenamento de energia (baterias e supercapacitores), devido à sua condutividade metálica, à superfície redox-ativa, à carga superficial negativa e à capacidade de intercalar cátions entre as camadas bidimensionais.^{39,125} Originalmente, os MXenes eram empregados como eletrodos para armazenamento de carga por meio de um mecanismo pseudocapacitivo. No entanto, com o passar dos anos, os MXenes passaram a ser utilizados em diversos outros componentes de dispositivos de armazenamento de energia, incluindo cátodos, eletrólitos, separadores, ânodos e coletores de corrente flexíveis, tanto em sistemas aquosos quanto orgânicos.^{125,126} Esses materiais podem armazenar energia por meio de três mecanismos diferentes: (i) formação de dupla camada elétrica, (ii) reações faradaicas capacitivas e (iii) armazenamento de carga faradaico não-capacitivo. Como será mostrado a seguir, esses mecanismos dependem da composição química dos MXenes e de seus grupos terminais de superfície, do sistema de armazenamento de energia em que estão sendo utilizados (baterias, supercapacitores etc.) e da natureza da solução eletrolítica.^{127,128}

No caso do mecanismo via formação de dupla camada elétrica (EDL, do inglês *Electric Double Layer*), para carregar um capacitor, uma tensão elétrica é aplicada entre os eletrodos, resultando na atração eletrostática de íons com carga oposta à dos eletrodos, enquanto os íons com a mesma carga são repelidos. O resultado é um espaço interfacial nanoscópico nas proximidades dos eletrodos, a chamada EDL. O desempenho de um eletrodo geralmente é expresso em termos de capacitância, ou seja, a carga armazenada na

EDL por unidade de volt aplicada. Portanto, esse mecanismo exige materiais de eletrodo com alta condutividade elétrica (para minimizar perdas de tensão elétrica) e grandes áreas superficiais específicas (visando maximizar o espaço da EDL).¹²⁸ De modo geral, a formação da EDL não altera a estrutura cristalina e/ou a química do material do eletrodo, o que leva a ciclos de carga/descarga altamente reversíveis e longa vida útil dos dispositivos de armazenamento de energia correspondentes.⁹⁵ Além disso, não há transferência de carga (faradaica) através da interface eletrodo–eletrólito, nem difusão no material do eletrodo, possibilitando assim altas densidades de potência. A capacitância de EDL apresenta um perfil de voltametria cíclica (VC) em forma de retângulo (Figura 11a), sem picos evidentes, em função da ausência de reações redox nesse tipo de mecanismo de armazenamento de energia.^{95,125}

Os MXenes são promissores para uso em capacitores de EDL por apresentarem alta condutividade elétrica e elevada área superficial específica. Além disso, foi demonstrado que a capacitância dos MXenes depende fortemente de sua química de superfície e dos grupos terminais. Por exemplo, Shimada *et al.* demonstraram que quanto mais eletronegativo o grupo terminal de superfície, menor a capacitância de EDL obtida.¹²⁹ Eles realizaram um estudo teórico para avaliar a influência de quatro halogênios (F, Cl, Br e I) como grupos terminais na superfície do Ti_3C_2 . Os cálculos obtidos demonstraram que o elemento mais eletronegativo (–F) atrai mais a densidade eletrônica dos átomos de Ti vizinhos, resultando em uma carga superficial negativa mais densa no eletrodo de MXene. Essa densa carga superficial causa um efeito de blindagem, que enfraquece a interação eletrostática entre o MXene e os íons K^+ do eletrólito, levando a uma menor capacitância entre os grupos terminais halogenados. As EDLs não se formam apenas na superfície externa do eletrodo, mas também no espaço intercadas dos MXenes, desde que o espaçamento seja

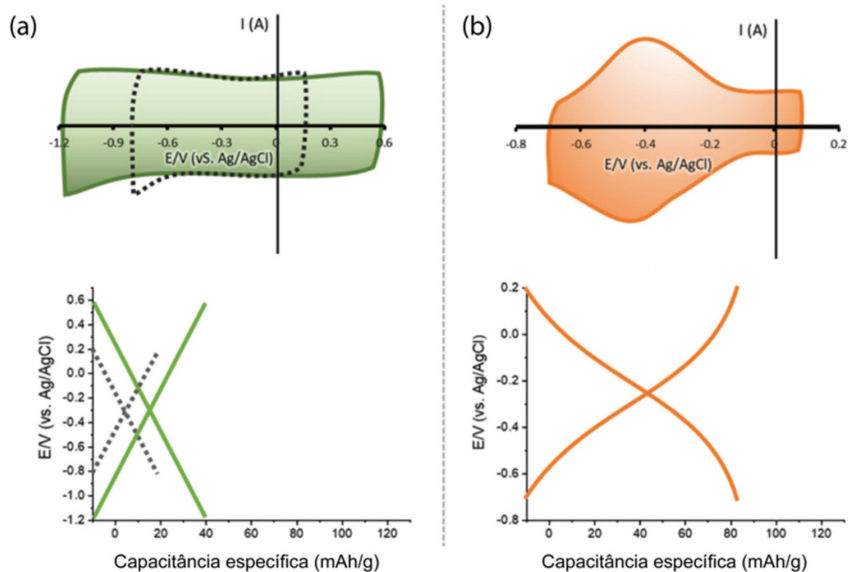


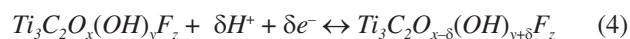
Figura 11. Perfis esquemáticos típicos de voltametria cíclica e curvas de carga-descarga galvanostática para eletrodos de $Ti_3C_2T_x$, que apresentam (a) capacitância de dupla camada elétrica e (b) pseudocapacitância. Adaptada com permissão da ref. 95 Copyright 2023 Wiley-VCH GmbH

suficientemente grande para permitir a difusão dos íons do eletrólito. Portanto, além da química de superfície e do efeito dos grupos terminais, a distância entre as camadas adjacentes dos MXenes impacta na capacitância de EDL. Sun *et al.* investigaram, por meio de cálculos computacionais, o efeito do espaçamento intercamadas e demonstraram que o $Ti_3C_2T_x$ com espaçamento de 7 Å não apresentou capacitância de EDL significativa, enquanto o MXene com espaçamento de 14 Å apresentou uma capacitância 25% maior do que aquele com espaçamento de 10 Å.¹³⁰

Além da formação de EDL, na qual a carga é apenas adsorvida eletricamente na superfície do eletrodo, existem outros mecanismos capacitivos na interface eletrodo-eletrólito. Algumas reações redox e de transferência de carga (faradaicas) ocorrem na interface ou nas proximidades da superfície do eletrodo e não requerem difusão em estado sólido. Portanto, estas reações são reversíveis, relativamente rápidas e apresentam correlação linear entre a carga armazenada e o potencial. Essas são as principais características do comportamento capacitativo e, por isso, esses mecanismos são chamados de reações faradaicas capacitativas ou, mais comumente, de pseudocapacitância.^{96,97} A pseudocapacitância pode ocorrer de três formas diferentes: (1) reações redox na superfície do eletrodo entre espécies iônicas do eletrólito e o material do eletrodo, (2) adsorção de espécies redox do eletrólito na superfície próxima ao eletrodo, e (3) intercalação de espécies iônicas do eletrólito nos canais de difusão do material sem causar transformações estruturais — esse mecanismo ocorre em escala de tempo curta, próxima à formação de EDL.

Os MXenes, devido à sua elevada condutividade elétrica e ao potencial para reações redox, destacam-se como materiais promissores tanto para o armazenamento de carga pseudocapacitivo quanto para a formação de

EDL. No entanto, a ocorrência de reações redox e a pseudocapacitância também dependem do eletrólito e da composição química do MXene. O pH da solução, por exemplo, é um fator que influencia o comportamento eletroquímico dos MXenes. Em soluções eletrolíticas neutras, eletrodos de $Ti_3C_2T_x$ apresentam um comportamento do tipo capacitivo, expresso por curvas de VC retangulares e por variações lineares da capacitância em função do potencial durante a polarização galvânica (Figura 11a). Em soluções eletrolíticas convencionais (isto é, com concentração de $\approx 1 \text{ mol L}^{-1}$), o potencial normalmente varia entre 0,2 e $-0,8 \text{ V (vs. Ag/AgCl)}$, resultando em valores de capacidade da ordem de $18\text{--}20 \text{ mAh g}^{-1}$.⁹⁵ Em contraste, em soluções ácidas, os eletrodos de $Ti_3C_2T_x$ exibem um tipo de carregamento pseudocapacitivo, originado de reações redox entre os prótons da solução e as terminações oxigenadas dos eletrodos de MXene, que alteram o estado de oxidação do titânio. Essa semirreação pode ser representada da seguinte forma:



Esse comportamento resulta em valores de capacitância significativamente mais elevados ($\approx 350 \text{ F g}^{-1}$, equivalente a $\approx 90 \text{ mAh g}^{-1}$), o que se reflete em picos redox bem definidos nos voltamogramas desses sistemas e em uma dependência acentuada da inclinação das curvas de carga-descarga galvanostática em relação à voltagem aplicada (Figura 11b).⁹⁵

Além do pH, a pseudocapacitância também depende das espécies iônicas a serem intercaladas. Zhu *et al.*¹³¹ estudaram o comportamento capacitativo de íons Li^+ e Na^+ no $Ti_3C_2T_x$. Os voltamogramas obtidos mostraram picos redox quando o Li_2SO_4 foi usado como eletrólito, indicando um mecanismo

de pseudocapacitância, enquanto, para o Na_2SO_4 , a curva foi retangular, característica de um mecanismo via EDL.

A composição química do MXene também influencia o tipo de armazenamento. Por exemplo, MXenes à base de Ti não apresentam pseudocapacitância em eletrólitos alcalinos. Entretanto, Zhang *et al.*¹³² demonstraram que o V_2CT_x apresentou comportamento pseudocapacitivo em soluções de LiOH, KOH e NaOH. A diferença foi atribuída aos múltiplos estados de oxidação e à alta atividade redox do vanádio.

Grupos terminais de superfície influenciam fortemente o comportamento pseudocapacitivo dos MXenes, afetando tanto o espaçamento intercamadas quanto as reações redox e processos de transferência de carga. Um espaçamento intercamadas ampliado facilita o acesso de íons, aumentando o valor de capacitância. Além disso, o espaço aberto entre camadas permite a difusão rápida de íons e reduz as alterações volumétricas durante a desintercalação dos íons, aumentando a estabilidade dos ciclos.¹³⁰ Kajiyama *et al.*¹³³ mostraram que o espaçamento ideal para (des)intercalação rápida e estável de Na^+ em $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ é de cerca de 12,5 Å, possível de se obter com grupos terminais –OH. Os grupos terminais também afetam a condutividade elétrica e a mobilidade iônica. Foi mostrado que –OH e –F aumentam a barreira de difusão de íons no espaço intercamadas. Além disso, terminações –F são redox-inativas, o que reduz a capacidade de aceitar elétrons e participar de reações. Nesse sentido, há esforços para substituí-lo por grupos oxigenados.

As reações faradaicas não-capacitivas são mecanismos de armazenamento de carga presentes em materiais comumente utilizados em baterias primárias e secundárias. Semelhantes ao mecanismo faradaico capacitativo, ocorrem processos de transferência de carga interfacial durante o armazenamento não-capacitivo. No entanto, as principais diferenças entre esses dois mecanismos estão na cinética da reação e nas mudanças estruturais do material. Diferentemente do mecanismo faradaico capacitativo, a intercalação não-capacitiva é caracterizada por cinética lenta de reação e, portanto, ocorre em uma escala de tempo relativamente longa. Além disso, as reações faradaicas não-capacitivas são acompanhadas por mudanças estruturais no material do eletrodo durante os processos de carga e descarga, o que resulta em baixa reversibilidade.¹²⁸

No entanto, algumas limitações restringem o desempenho dos MXenes como eletrodos de supercapacitores. Um dos principais desafios é o empilhamento irreversível das folhas bidimensionais durante as medidas eletroquímicas, processo denominado *restacking*. Esse fenômeno reduz a área superficial ativa, dificulta a difusão de íons e compromete a eficiência das reações redox, resultando em menor capacitância.^{134,135} Para contornar essa limitação, estratégias como a construção de estruturas verticalmente alinhadas e o uso de materiais espaçadores, que funcionam como pilares entre as camadas do MXene, vêm sendo exploradas.^{98,136} Diversos nanomateriais, como nanotubos de carbono,

grafeno, polímeros, nanodiamantes e nanofibras, têm sido incorporados entre as camadas de MXene com o objetivo de evitar o *restacking*, melhorar o transporte iônico e conferir maior estabilidade estrutural.^{97,137,138}

Outra limitação importante decorre do uso de eletrólitos aquosos ácidos, que, embora proporcionem alta capacitância, restringem a janela de potencial operacional do dispositivo (geralmente abaixo de 1,0 V) devido à decomposição da água, reduzindo a densidade de energia do dispositivo.^{94,97} Uma alternativa promissora para superar esse desafio é o uso de eletrólitos altamente concentrados, que reduzem a atividade da água e permitem ampliar a janela de potencial, mitigando reações indesejadas. No entanto, essa abordagem também pode aumentar as limitações de difusão dos íons e comprometer a capacitância devido à menor mobilidade iônica e à ausência de uma rede de ligações de hidrogênio eficiente.^{139,140}

A superação dessas limitações passa pela busca por combinações ideais entre a arquitetura dos eletrodos e a composição do eletrólito. A utilização de materiais híbridos baseados em MXenes e estruturas hierárquicas porosas tem mostrado ser uma rota promissora para otimizar o desempenho desses materiais como supercapacitores.^{98,136,139} Tais estratégias visam não apenas ampliar a janela de operação e aumentar a densidade de energia, mas também garantir uma boa estabilidade e capacitâncias elevadas, mesmo em altas taxas de carga e descarga.

Em resumo, independentemente do(s) mecanismo(s) de armazenamento de carga envolvido(s), as propriedades dos MXenes podem ser ajustadas para melhorar o acesso dos íons e a natureza dos sítios eletroquimicamente ativos. Por essa razão, técnicas para otimizar o espaço interlamelar e modificações da química de superfície são essenciais para maximizar o potencial dos MXenes em aplicações de armazenamento de energia.

6.2. Outras aplicações

A química diversa e a variedade de estruturas dos MXenes os tornam candidatos promissores para outras aplicações. Como resumido na Tabela 2, existem relatos na literatura do potencial de uso dos MXenes em processos fotocatalíticos,^{31,141,142} blindagem contra interferência eletromagnética,^{143–147} sensores químicos,^{148–150} adsorção de poluentes,^{151–153} aplicações biomédicas,^{154–158} entre outras aplicações. É importante ressaltar que os MXenes são raramente empregados de forma isolada, sendo mais comum a utilização de seus compósitos. Essa abordagem é adotada com a intenção de obter propriedades complementares às dos MXenes ou explorar efeitos sinérgicos para alcançar um desempenho aprimorado para uma determinada aplicação. Em geral, os MXenes são utilizados principalmente em razão de sua elevada condutividade elétrica, grande área superficial específica e superfícies ricas em grupos funcionais, enquanto os outros materiais do compósito fornecem características adicionais desejáveis para a aplicação pretendida.

Tabela 2. Exemplos recentes de aplicações tecnológicas de diferentes MXenes

Aplicação	Material	Observações	Ref.
Blindagem de Interferência Eletromagnética	Ti ₃ C ₂ T _x /ZIF/CNT	Eficiência de blindagem de 40 dB (banda Ka).	159
	Nanofibra de aramida/Ti ₃ C ₂ T _x	Eficiência de blindagem de 64,9 dB (banda X).	160
	Ti ₃ C ₂ T _x /nanofibra de carbono	Eficiência de blindagem de 63,3 dB (banda X).	161
Produção Fotocatalítica de H ₂	Ti ₃ C ₂ T _x /S-g-C ₃ N ₄ /NiAl-LDH	Taxa de produção: 72,63 mmol H ₂ g ⁻¹ h ⁻¹	162
	Ti ₃ C ₂ T _x /CdS	Taxa de produção de H ₂ : 20,43 mmol g ⁻¹ h ⁻¹	163
	Ti ₃ C ₂ T _x @TiO ₂ /CdIn ₂ S ₄	Taxa de produção de H ₂ : 6,72 mmol g ⁻¹ h ⁻¹	164
Conversão Fotocatalítica de CO ₂	Ti ₃ C ₂ @g-C ₃ N ₄	Conversão de CO ₂ a CO (120,6 μmol g ⁻¹).	165
	Cu ₂ O/BiVO ₄ @Ti ₃ C ₂	Conversão de CO ₂ a CO (94,92 μmol g ⁻¹) e CH ₄ (41,03 μmol g ⁻¹).	166
	In ₂ S ₃ @Ti ₃ C ₂	Conversão de CO ₂ a metanol (567 μmol g ⁻¹).	167
Degradação de Poluentes	ZnO/NiWO ₄ /V ₂ C	Degradação de 93% de azul de metileno e 92% de rodamina em 120 min.	168
	TiO ₂ -SiO ₂ /Ti ₃ C ₂	Degradação de 95% de tetraciclina em 80 min.	169
	Pd/MXene/MIL-101(Fe)	Degradação de ~100% de ofloxacina em 60 min.	170
Sensor Elétrico	Nb ₂ C, Nb ₄ C ₃ , Mo ₂ C, e Mo ₂ Ti ₂ C ₃	Língua eletrônica para detecção de neurotransmissores.	38
	ZnO/Ti ₃ C ₂ T _x	Detecção de trimetialmina (LOD = 32,7 ppb).	171
	Ti ₃ C ₂ T _x -Cu ₂ O	Detecção de NO ₂ (LOD = 10 ppb).	172
	V ₂ CT _x	Detecção de metanol (LOD = 4,49 ppm).	173
Sensor Eletroquímico	Ti ₃ C ₂ /GQDs	Detecção de dopamina (LOD = 1,8 μmol L ⁻¹).	20
	AuNPs@Ti ₃ C ₂ T _x	Detecção de ácido úrico (1,12 μmol L ⁻¹) e dopamina (1,11 μmol L ⁻¹) em amostras de soro humano.	174
	VS ₂ /Ti ₃ C ₂ T _x	Detecção de nitrofurantoína (LOD = 4,7 nmol L ⁻¹) em amostras de água da torneira, água de lago, leite e mel.	175
Sensor Colorimétrico	ZnO-Co ₃ O ₄ NFs/Ti ₃ C ₂ T _x	Detecção de ácido ascórbico (LOD = 0,58 μmol L ⁻¹) em amostras de sucos de laranja.	21
	Ti ₃ C ₂ T _x @AuPt	Detecção de diptex (LOD = 0,479 ng mL ⁻¹) em amostras de inseticidas.	176
Adsorção de Poluentes	Ti ₃ C ₂ T _x	Capacidade de remoção de antibióticos: ciprofloxacino (349 mg g ⁻¹) e levofloxacino (291 mg g ⁻¹).	177
	TiVCT _x	Capacidade de remoção: azul de metileno (1430 mg g ⁻¹) e Cr(VI) (600 mg g ⁻¹).	178
	Fe ₃ O ₄ /ZIF-67/Ti ₃ C ₂ T _x	Capacidade de remoção: corante vermelho do Congo (594,16 mg g ⁻¹) e Cefixima (805,21 mg g ⁻¹)	179
Atividade Antimicrobiana	Quitosana/Ti ₃ C ₂ T _x	Inibição de 99,85% de <i>Staphylococcus aureus</i> e 99,99% de <i>Escherichia coli</i> .	180
	Poliuretano/Ti ₃ C ₂ T _x /SiO ₂	Inibição de 90% de <i>Staphylococcus aureus</i> e 95% de <i>Escherichia coli</i> .	181
	Ti ₃ C ₂ T _x /CNT	Inibição de 98,80% de <i>Staphylococcus aureus</i> e 99,24% de <i>Escherichia coli</i> .	182
Aplicações Biomédicas	TiVNbMoC ₃ T _x	Material se mostrou ser biocompatível na ausência de irradiação de luz, tornaram-se altamente citotóxico após irradiação com laser de 808 nm, com um valor de IC ₅₀ de cerca de 25 μg mL ⁻¹ . Eficiência de conversão de luz em calor de até 56,1% (laser de 808 nm).	183
	PLA/Ti ₃ C ₂ T _x	Experimentos <i>in vivo</i> em animais mostraram que o material limitou efetivamente a recorrência <i>in situ</i> de células tumorais e metástase pulmonar e foi capaz de promover diferenciação osteogênica sob irradiação NIR.	184
	Nb ₂ C@Cu ₂ O	Estudos <i>in vitro</i> e <i>in vivo</i> mostraram que o material possui excelentes propriedades antioxidantes e anti-inflamatórias.	185

6.2.1. Blindagem contra interferência eletromagnética

Filmes de $Ti_3C_2T_x$ com espessura micrométrica demonstraram excelente capacidade de blindagem contra interferência eletromagnética (EMI, do inglês *electromagnetic interference*), superando materiais comumente empregados para esse fim, como metais e materiais de carbono (grafeno, nanotubos de carbono e fibras de carbono).¹⁴³⁻¹⁴⁷ Desde então, esforços vêm sendo feitos para otimização do desempenho da blindagem EMI de MXenes e para a fabricação de aerogéis de MXenes, e de materiais compósitos a partir da associação de MXenes principalmente com polímeros e materiais carbonáceos.¹⁴⁶

O desempenho de destaque dos MXenes em comparação com outros materiais deve-se principalmente às suas propriedades físico-químicas. Primeiro, a alta condutividade elétrica dos MXenes reduz efetivamente a energia das ondas eletromagnéticas e a sua propagação.^{145,147} A elevada estabilidade térmica dos MXenes também contribui para sua melhor performance, pois permite que o material mantenha o seu desempenho em ambientes de alta temperatura. A estrutura em camadas do MXene também contribui para a reflexão e absorção múltiplas de ondas eletromagnéticas, aumentando a eficiência da blindagem.¹⁴⁷ Além disso, a presença de terminações de superfície (como $-O$, $-OH$ e $-F$) os torna processáveis em solução, possibilitando a obtenção de filmes finos por diferentes técnicas de fabricação de revestimentos, incluindo pulverização, fundição por centrifugação, impressão a jato de tinta, revestimento por imersão e montagem interfacial.¹⁴⁶ Adicionalmente, a química da superfície dos MXenes é ajustável, e seu desempenho de blindagem eletromagnética pode ser otimizado por meio de métodos como oxidação, dopagem e tratamento térmico. Por fim, os MXenes normalmente apresentam baixa densidade e flexibilidade mecânica, tornando-os adequados para aplicações que exigem materiais de blindagem leves e flexíveis.¹⁴⁷

6.2.2. Processos fotocatalíticos

Beneficiando-se da variedade da composição elementar, da estrutura em camadas bidimensionais, da grande área superficial, das abundantes terminações superficiais e das excelentes propriedades eletrônicas, MXenes e seus compósitos têm sido empregados com sucesso em aplicações fotocatalíticas ambientais e energéticas, incluindo redução de CO_2 ,^{165,166,186,187} produção de H_2 ,^{162-164,188} degradação de poluentes,^{169,170,189,190} e fixação de N_2 .^{191,192}

Entre as fases mais investigadas, o $Ti_3C_2T_x$ tem dominado as pesquisas, sendo frequentemente empregado em heteroestruturas híbridas com outros semicondutores (e.g., TiO_2 , $g-C_3N_4$, MoS_2) ou estruturas metal-orgânicas (MOFs).¹⁹³ Recentemente, fases alternativas, como Mo_2TiC_2 ,^{112,194} Nb_2CT_x ¹⁹⁵ e V_2C ,¹⁹⁶ também têm sido exploradas devido à sua maior estabilidade frente à oxidação e à possibilidade de ajustar a estrutura de bandas eletrônicas. Apesar desses avanços, a produção científica e os estudos mecanísticos permanecem concentrados no $Ti_3C_2T_x$, cuja

estrutura e comportamento fotocatalítico são os mais bem compreendidos.

A performance de destaque dos compósitos a base de MXenes em processos fotocatalíticos se deve principalmente aos seguintes fatores: (1) excelente absorção de luz em uma ampla faixa de espectro solar; (2) alta mobilidade de portadores de carga favorecendo a migração acelerada dos portadores fotogerados e separação facilitada dos pares elétron-lacuna; (3) valor de banda proibida ajustável com estruturas de banda de energia controláveis que facilitam várias reações redox; e/ou (4) presença de grupos funcionais de superfície abundantes que facilitam o processo de adsorção e ativação da reação catalítica.^{31,142}

6.2.3. Aplicações biomédicas

MXenes também apresentam potencial para aplicações biomédicas, devido às suas propriedades físico-químicas, como flexibilidade mecânica, alta eficiência de conversão de luz em calor, biocompatibilidade e hidrofiliabilidade.¹⁵⁴⁻¹⁵⁸ No entanto, eles enfrentam desafios como instabilidade oxidativa em ambientes fisiológicos, capacidade limitada de adsorção de fármacos e respostas imunológicas dependente dos grupos funcionais, tamanho das partículas, estado de oxidação, tipo e dose de administração, bem como do tempo de exposição.^{155,197} Para lidar com essas limitações, nanocompósitos de MXene com polímeros sintéticos (e.g., polietilenoglicol, polivinil álcool, polivinilpirrolidona e ácido polilático-co-glicólico) e biopolímeros naturais (e.g., celulose, gelatina, quitosana, ácido hialurônico e fosfolípidios de soja) vêm sendo desenvolvidos e aplicados na engenharia de tecidos,^{184,198,199} terapia fototérmica/fotodinâmica,^{183,200,201} como sistemas de liberação de fármacos^{200,202-204} e agentes antimicrobianos.^{180,205-207}

Dentre as diferentes fases investigadas, o $Ti_3C_2T_x$ destaca-se como o mais explorado. Essa predominância decorre de sua estabilidade química relativa e da facilidade de funcionalização de suas terminações superficiais ($-O$, $-OH$ e $-F$), o que favorece a dispersão coloidal e tende a reduzir a citotoxicidade. Outras fases, como Nb_2C ^{208,209} e V_2C ,²¹⁰ vêm sendo estudadas recentemente com vistas à obtenção de melhores propriedades de biocompatibilidade e de resposta óptica no infravermelho próximo.

No entanto, é importante destacar que os estudos relacionados às aplicações biomédicas dos MXenes ainda estão em fase inicial e, portanto, são necessários mais estudos para avaliar a citotoxicidade e a biocompatibilidade das plataformas multifuncionais baseadas em MXenes. Atualmente, os estudos relacionados a esse aspecto têm sido discutidos majoritariamente sob os aspectos de citotoxicidade *in vitro* em células e interações com tecidos ou organismos em modelos animais *in vivo*. Assim, investigações são necessárias para se avaliar as vias metabólicas *in vivo* dos MXenes bem como se sua circulação interna a longo prazo pode causar danos aos tecidos saudáveis.¹⁵⁷

7. Conclusão e Perspectivas

Desde sua descoberta, os MXenes consolidaram-se como uma das classes mais promissoras de nanomateriais, despertando crescente interesse tanto na pesquisa básica quanto em aplicações tecnológicas avançadas. O rápido avanço no número de composições sintetizadas, aliado à diversidade estrutural e química destes materiais, sugere ainda potenciais avanços. Nesse contexto, as perspectivas para os MXenes envolvem não apenas o aprofundamento do conhecimento científico básico, mas também a superação de desafios práticos que viabilizem sua utilização em larga escala e sua inserção no mercado.

Um dos caminhos mais imediatos para o futuro dos MXenes é a expansão da família para novas composições. Embora o $Ti_3C_2T_x$ continue a ser o membro mais desta família de materiais, já foram relatados MXenes de carbonetos, nitretos e oxicarbeto, e há expectativa de que oxinitretos e outros derivados venham a ser obtidos em breve. Essa diversidade composicional é estratégica, pois permite a modulação das propriedades, ampliando a gama de aplicações possíveis. A síntese de MXenes a partir de fases MAX não convencionais e a exploração de alternativas além do titânio, como metais de transição menos explorados, representam horizontes ainda pouco investigados, mas com grande potencial de impacto. Do ponto de vista das aplicações, permanece em aberto qual será a aplicação capaz de consolidar sua utilização comercial em larga escala. Resultados recentes são particularmente animadores em áreas como eletrônica impressa, dispositivos optoeletrônicos, blindagem eletromagnética e coletores de corrente para baterias. Nesse último caso, os MXenes demonstraram desempenho superior ao de metais tradicionais, não apenas pela leveza e redução de espessura, mas também pela capacidade de operar em eletrólitos agressivos, ampliando as possibilidades para novas arquiteturas de armazenamento de energia. Além disso, a alta condutividade elétrica, a flexibilidade mecânica e a estabilidade em contato com tecidos biológicos tornam os MXenes candidatos de destaque para eletrônicos portáteis, sensores vestíveis e aplicações biomédicas. Especialmente para o contexto brasileiro, embora as pesquisas envolvendo MXenes ainda se encontrem em estágio inicial, os avanços esperados para a área ensejam o fortalecimento de linhas de pesquisa de grupos e pesquisadores brasileiros focadas nesses materiais.

Entretanto, para que tais promessas sejam convertidas em soluções tecnológicas, alguns desafios ainda precisam ser enfrentados. Um dos principais está relacionado à estabilidade química e ambiental dos MXenes. Embora avanços recentes tenham prolongado significativamente a vida útil de dispersões, o controle da oxidação ainda é uma prioridade para garantir confiabilidade em dispositivos práticos. Nesse sentido, o controle das terminações superficiais, o desenvolvimento de métodos de passivação

e a síntese de composições mais estáveis constituem frentes de pesquisa urgentes. Outro desafio crítico é a escalabilidade dos processos de síntese. A maioria das rotas atualmente empregadas, como o *etching* em meio ácido ou o uso de sais fundidos, ainda enfrenta limitações em termos de custo, segurança, impacto ambiental e produção em larga escala. Assim, a busca por métodos de síntese que sejam simultaneamente eficientes, seguros, de baixo impacto ambiental e economicamente viáveis é um passo importante para a transição dos MXenes do ambiente acadêmico para aplicações comerciais. O desenvolvimento de rotas livres de flúor, bem como de técnicas eletroquímicas e hidrotermais otimizadas, mostra-se promissor nesse sentido. Além disso, em algumas aplicações nas quais os MXenes superam o desempenho de materiais convencionais em testes de laboratório, ainda se faz necessário avaliar sua performance em dispositivos reais, submetidos a condições operacionais contínuas e prolongadas, e sua compatibilidade com processos de manufatura em larga escala. É também imperativo ampliar o conhecimento sobre os impactos ambientais e toxicológicos dos MXenes. Como qualquer nova classe de materiais avançados, a avaliação de riscos para a saúde humana e o meio ambiente deve acompanhar o avanço da pesquisa. Estudos sistemáticos sobre a biocompatibilidade, toxicidade e destino ambiental dos MXenes, considerando a grande diversidade de metais de transição e terminações superficiais possíveis, serão fundamentais para estabelecer padrões de segurança e regulamentação.

No plano mais fundamental, espera-se que os próximos anos possibilitem descobertas associadas a fenômenos emergentes em regime de confinamento quântico, à engenharia de defeitos e ao controle fino da química superficial. A possibilidade de produzir filmes monocristalinos de grande área, arquiteturas tridimensionais auto-organizadas e estruturas híbridas complexas abre perspectivas para aplicações ainda não exploradas em eletrônica, fotônica, catálise e dispositivos multifuncionais.

Em síntese, os MXenes apresentam um futuro promissor, mas sua consolidação como materiais-chave aplicados em tecnologias de ponta dependerá da conjugação de esforços entre a comunidade científica e o setor industrial. A superação de desafios relacionados à estabilidade, síntese em larga escala, segurança ambiental e compreensão de suas propriedades será determinante para que esses materiais avancem do laboratório para o mercado. Em razão da persistência atual desses desafios, os MXenes ainda não se mostram adequados para substituir materiais já consolidados nas aplicações em que apresentam bom desempenho em escala laboratorial. Ainda assim, o potencial dessa classe de materiais é inegável e, considerando sua versatilidade composicional e a ampla gama de propriedades ajustáveis, é esperado que os MXenes continuem a ocupar posição central no cenário dos materiais funcionais, com um horizonte vasto de descobertas e aplicações nos próximos anos.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da FAPESP, CNPq e CAPES.

Referências Bibliográficas

- Novoselov, K. S.; Geim, A. K.; Morozov, S. V.; Jiang, D.; Zhang, Y.; Dubonos, S. V.; Grigorieva, I. V.; Firsov, A. A.; Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science* **2004**, *306*, 666. [[Crossref](#)]
- Gogotsi, Y.; Anasori, B.; The Rise of MXenes. *ACS Nano* **2019**, *13*, 8491. [[Crossref](#)]
- Gogotsi, Y.; The Future of MXenes. *Chemistry of Materials* **2023**, *35*, 8767. [[Crossref](#)]
- Naguib, M.; Kurtoglu, M.; Presser, V.; Lu, J.; Niu, J.; Heon, M.; Hultman, L.; Gogotsi, Y.; Barsoum, M. W.; Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti_3AlC_2 . *Advanced Materials* **2011**, *23*, 4248. [[Crossref](#)]
- Naguib, M.; Mashtalir, O.; Carle, J.; Presser, V.; Lu, J.; Hultman, L.; Gogotsi, Y.; Barsoum, M. W.; Two-Dimensional Transition Metal Carbides. *ACS Nano* **2012**, *6*, 1322. [[Crossref](#)]
- Naguib, M.; Mochalin, V. N.; Barsoum, M. W.; Gogotsi, Y.; 25th Anniversary Article: MXenes: A New Family of Two-Dimensional Materials. *Advanced Materials* **2014**, *26*, 992. [[Crossref](#)]
- Salim, O.; Mahmoud, K. A.; Pant, K. K.; Joshi, R. K.; Introduction to MXenes: synthesis and characteristics. *Materials Today Chemistry* **2019**, *14*, 100191. [[Crossref](#)]
- Hatter, C. B.; Shah, J.; Anasori, B.; Gogotsi, Y.; Micromechanical response of two-dimensional transition metal carbonitride (MXene) reinforced epoxy composites. *Composites Part B: Engineering* **2020**, *182*, 107603. [[Crossref](#)]
- Huang, W.-X.; Li, Z.-P.; Li, D.-D.; Hu, Z.-H.; Wu, C.; Lv, K.-L.; Li, Q.; Ti_3C_2 MXene: recent progress in its fundamentals, synthesis, and applications. *Rare Metals* **2022**, *41*, 3268. [[Crossref](#)]
- Mathis, T. S.; Maleski, K.; Goad, A.; Sarycheva, A.; Anayee, M.; Foucher, A. C.; Hantanasirisakul, K.; Shuck, C. E.; Stach, E. A.; Gogotsi, Y.; Modified MAX Phase Synthesis for Environmentally Stable and Highly Conductive Ti_3C_2 MXene. *ACS Nano* **2021**, *15*, 6420. [[Crossref](#)]
- Gogotsi, Y.; Huang, Q.; MXenes: Two-Dimensional Building Blocks for Future Materials and Devices. *ACS Nano* **2021**, *15*, 5775. [[Crossref](#)]
- Anasori, B.; Gogotsi, Y.; MXenes: trends, growth, and future directions. *Graphene and 2D Materials* **2022**, *7*, 75. [[Crossref](#)]
- Kitchamsetti, N.; de Barros, A. L. F.; Recent Advances in MXenes Based Composites as Photocatalysts: Synthesis, Properties and Photocatalytic Removal of Organic Contaminants from Wastewater. *ChemCatChem* **2023**, *15*, e202300690. [[Crossref](#)]
- Fotius, J. A. A.; Oliveira, H. P. de MXene-Based Composites for Energy Harvesting and Energy Storage Devices. *Solids* **2025**, *6*, 41. [[Crossref](#)]
- Gandara, M.; Palley, B. F.; Rakočević, L.; Mladenović, D.; Popović-Bijelić, A.; Šljukić, B.; Gonçalves, E. S.; Electrochemical Performance of Niobium MXenes with Lanthanum. *ACS Applied Materials & Interfaces* **2024**, *16*, 52277. [[Crossref](#)]
- Gandara, M.; de Arruda, M. N.; Assis, J. M. K.; Martins, M. de J. O.; Rakočević, L.; Mladenović, D.; Šljukić, B.; Gonçalves, E. S.; Nb-MXene as promising material for electrocatalysis in energy conversion (OER/ORR) and storage. *Applied Materials Today* **2024**, *40*, 102356. [[Crossref](#)]
- Gonzalo, F. M.; Laranjeira, J. A. S.; Rivera, V. J. R.; Martins, N. F.; Sambrano, J. R.; Piotrowski, M. J.; Flores, E. M.; Enhanced lithium storage in the novel $ZrNbCO_2$ Janus MXene. *Surfaces and Interfaces* **2025**, *73*, 107541. [[Crossref](#)]
- Rossato, J. H. H.; Lemos, H. G.; Gouvea, I. C.; Lounasvuori, M.; Nandayapa, E.; Tarasov, A.; Tomic, M.; Santos, S. F.; Stavale, F.; Unger, E.; Graeff, C. F. O.; Amino-functionalized Ti_3C_2 MXene as efficient additive for high-performance methylammonium-free inverted perovskite solar cells. *Solar Energy* **2025**, *298*, 113668. [[Crossref](#)]
- Alkhudaydi, A. M.; Samy, B. A.; Danish, E. Y.; Lima, E. C.; Gabal, M. A.; Salam, M. A.; Novel sensitive electrochemical detection of paracetamol using magnetite/MXene electrode by differential pulse voltammetry. *International Journal of Electrochemical Science* **2024**, *19*, 100797. [[Crossref](#)]
- Facure, M. H. M.; Sampaio, B. S.; Mercante, L. A.; Correa, D. S.; The beneficial impact of MXene on the electrochemical performance of graphene quantum dots for dopamine detection. *Materials Today Communications* **2025**, *42*, 111197. [[Crossref](#)]
- Facure, M. H. M.; Mercante, L. A.; Gogotsi, Y.; Correa, D. S.; $ZnO-Co_3O_4$ Nanofibers/MXene Composite with Peroxidase-Like Activity for Ascorbic Acid Detection. *ACS Applied Nano Materials* **2025**, *8*, 4291. [[Crossref](#)]
- Sampaio, A. M.; Bi, S.; Salanne, M.; Siqueira, L. J. A.; Molecular dynamics simulations of ionic liquids confined into MXenes. *Energy Storage Materials* **2024**, *70*, 103502. [[Crossref](#)]
- Ronchi, R. M.; Santos, S. F.; Veiga, R. G. A.; Interfacial properties of polyethylene/ $Ti_3C_2T_x$ mxene nanocomposites investigated by first-principles calculations. *Applied Surface Science* **2023**, *609*, 155344. [[Crossref](#)]
- Santos, W. O.; Filho, G. P. S.; Frazão, N. F.; Moreira, E.; Azevedo, D. L.; A DFT study on the substitutional effects on $Hf_3N_2X_2$ ($X = O, S$) MXene monolayers. *Computational Condensed Matter* **2025**, *44*, e01051. [[Crossref](#)]
- Naguib, M.; Barsoum, M. W.; Gogotsi, Y.; Ten Years of Progress in the Synthesis and Development of MXenes. *Advanced Materials* **2021**, *2103393*, 1. [[Crossref](#)]
- Sokol, M.; Natu, V.; Kota, S.; Barsoum, M. W.; On the Chemical Diversity of the MAX Phases. *Trends in Chemistry* **2019**, *1*, 210. [[Crossref](#)]
- Downes, M.; Shuck, C. E.; McBride, B.; Busa, J.; Gogotsi, Y.; Comprehensive synthesis of $Ti_3C_2T_x$ from MAX phase to MXene. *Nature Protocols* **2024**, *19*, 1807. [[Crossref](#)]
- Alhabej, M.; Maleski, K.; Anasori, B.; Lelyukh, P.; Clark, L.; Sin, S.; Gogotsi, Y.; Guidelines for Synthesis and Processing

- of Two-Dimensional Titanium Carbide ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene). *Chemistry of Materials* **2017**, *29*, 7633. [Crossref]
29. Barsoum, M. W.; Eklund, P.; Em *2D Metal Carbides and Nitrides (MXenes): Structure, Properties and Applications*; Anasori, B., Gogotsi, Y., orgs.; Springer International Publishing: Cham, 2019. [Crossref]
 30. Xu, C.; Chen, L.; Liu, Z.; Cheng, H.-M.; Ren, W. Em *2D Metal Carbides and Nitrides (MXenes): Structure, Properties and Applications*; Anasori, B., Gogotsi, Y., orgs.; Springer International Publishing: Cham, 2019. [Crossref]
 31. Murali, G.; Reddy Modigunta, J. K.; Park, Y. H.; Lee, J.-H.; Rawal, J.; Lee, S.-Y.; In, I.; Park, S.-J.; A Review on MXene Synthesis, Stability, and Photocatalytic Applications. *ACS Nano* **2022**, *16*, 13370. [Crossref]
 32. Akhter, R.; Maktedar, S. S.; MXenes: A comprehensive review of synthesis, properties, and progress in supercapacitor applications. *Journal of Materiomics* **2023**, *9*, 1196. [Crossref]
 33. Nidhi; Tyagi, N.; Bhardwaj, V.; Moka, S.; Singh, M. K.; Khanuja, M.; Sharma, G. An overview on synthesis of MXene and MXene based nanocomposites for supercapacitors. *Materials Today Communications* **2024**, *41*, 110223. [Crossref]
 34. Mendoza-Sánchez, B.; Samperio-Niembro, E.; Dolotko, O.; Bergfeldt, T.; Kübel, C.; Knapp, M.; Shuck, C. E.; Systematic Study of the Multiple Variables Involved in V_2AlC Acid-Based Etching Processes, a Key Step in MXene Synthesis. *ACS Applied Materials & Interfaces* **2023**, *15*, 28332. [Crossref]
 35. López-Alejandro, E. M.; Ramírez-Morales, E.; Arellano-Cortaza, M. C.; Meza-Avenidaño, C. A.; Frías-Márquez, D. M.; Ramírez-Bon, R.; Rojas-Blanco, L.; Effect of etching time on the synthesis of MXene Ti_3C_2 via a short microwave-assisted radiation route. *Ceramics International* **2025**, *51*, 18485. [Crossref]
 36. Matthews, K.; Zhang, T.; Shuck, C. E.; VahidMohammadi, A.; Gogotsi, Y.; Guidelines for Synthesis and Processing of Chemically Stable Two-Dimensional V_2CT_x MXene. *Chemistry of Materials* **2022**, *34*, 499. [Crossref]
 37. Naguib, M.; Halim, J.; Lu, J.; Cook, K. M.; Hultman, L.; Gogotsi, Y.; Barsoum, M. W. New Two-Dimensional Niobium and Vanadium Carbides as Promising Materials for Li-Ion Batteries. *Journal of the American Chemical Society* **2013**, *135*, 15966. [Crossref]
 38. Facure, M. H. M.; Gahramanova, G.; Zhang, D.; Zhang, T.; Shuck, C. E.; Mercante, L. A.; Correa, D. S.; Gogotsi, Y.; All-MXene electronic tongue for neurotransmitters detection. *Biosensors and Bioelectronics* **2024**, *262*, 116526. [Crossref]
 39. Anasori, B.; Lukatskaya, M. R.; Gogotsi, Y.; 2D metal carbides and nitrides (MXenes) for energy storage. *Nature Reviews Materials* **2017**, *2*, 16098. [Crossref]
 40. Sang, X.; Naguib, M.; Alhabeab, M.; Unocic, R. R. Em *2D Metal Carbides and Nitrides (MXenes): Structure, Properties and Applications*; Anasori, B., Gogotsi, Y., orgs.; Springer International Publishing: Cham, 2019. [Crossref]
 41. Anayee, M.; Kurra, N.; Alhabeab, M.; Seredych, M.; Hedhili, M. N.; Emwas, A.-H.; Alshareef, H. N.; Anasori, B.; Gogotsi, Y.; Role of acid mixtures etching on the surface chemistry and sodium ion storage in $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene. *Chemical Communications* **2020**, *56*, 6090. [Crossref]
 42. Thakur, A.; Chandran B.S., N.; Davidson, K.; Bedford, A.; Fang, H.; Im, Y.; Kanduri, V.; Wyatt, B. C.; Nemani, S. K.; Poliukhova, V.; Kumar, R.; Fakhraai, Z.; Anasori, B.; Step-by-Step Guide for Synthesis and Delamination of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene. *Small Methods* **2023**, *7*, 2300030. [Crossref]
 43. Halim, J.; Lukatskaya, M. R.; Cook, K. M.; Lu, J.; Smith, C. R.; Näslund, L.-Å.; May, S. J.; Hultman, L.; Gogotsi, Y.; Eklund, P.; Barsoum, M. W.; Transparent Conductive Two-Dimensional Titanium Carbide Epitaxial Thin Films. *Chemistry of Materials* **2014**, *26*, 2374. [Crossref]
 44. Ghidui, M.; Lukatskaya, M. R.; Zhao, M.-Q.; Gogotsi, Y.; Barsoum, M. W.; Conductive two-dimensional titanium carbide ‘clay’ with high volumetric capacitance. *Nature* **2014**, *516*, 78. [Crossref]
 45. Faisal, S.; Mohamed, A.; B., H. C.; Babak, A.; Soon, M. H.; Min, K. C.; Yury, G.; Electromagnetic interference shielding with 2D transition metal carbides (MXenes). *Science* **2016**, *353*, 1137. [Crossref]
 46. Shayesteh Zeraati, A.; Mirkhani, S. A.; Sun, P.; Naguib, M.; Braun, P. V.; Sundararaj, U.; Improved synthesis of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXenes resulting in exceptional electrical conductivity, high synthesis yield, and enhanced capacitance. *Nanoscale* **2021**, *13*, 3572. [Crossref]
 47. Jothibas, M.; Srinivasan, S.; Nesakumar, N.; Paulson, E.; DMSO delaminated titanium carbide MXene with exalted cyclability for sodium ion batteries. *Journal of Alloys and Compounds* **2025**, *1020*, 179301. [Crossref]
 48. Liu, L.; Orbay, M.; Luo, S.; Duluard, S.; Shao, H.; Harmel, J.; Rozier, P.; Taberna, P.-L.; Simon, P.; Exfoliation and Delamination of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene Prepared via Molten Salt Etching Route. *ACS Nano* **2022**, *16*, 111. [Crossref]
 49. Mashtalir, O.; Naguib, M.; Mochalin, V. N.; Dall’Agnese, Y.; Heon, M.; Barsoum, M. W.; Gogotsi, Y.; Intercalation and delamination of layered carbides and carbonitrides. *Nature Communications* **2013**, *4*, 1716. [Crossref]
 50. Lim, K. R. G.; Shekhirev, M.; Wyatt, B. C.; Anasori, B.; Gogotsi, Y.; Seh, Z. W.; Fundamentals of MXene synthesis. *Nature Synthesis* **2022**, *1*, 601. [Crossref]
 51. Li, H.; Li, A.; Zhang, D.; Wu, Q.; Mao, P.; Qiu, Y.; Zhao, Z.; Yu, P.; Su, X.; Bai, M.; First-Principles Study on the Structural, Electronic, and Lithium Storage Properties of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_2$ (T = O, F, H, OH) MXene. *ACS Omega* **2022**, *7*, 40578. [Crossref]
 52. Yuen, A. C. Y.; Chen, T. B. Y.; Lin, B.; Yang, W.; Kabir, I. I.; De Cachinho Cordeiro, I. M.; Whitten, A. E.; Mata, J.; Yu, B.; Lu, H.-D.; Yeoh, G. H.; Study of structure morphology and layer thickness of Ti_3C_2 MXene with Small-Angle Neutron Scattering (SANS). *Composites Part C: Open Access* **2021**, *5*, 100155. [Crossref]
 53. Shi, C.; Beidaghi, M.; Naguib, M.; Mashtalir, O.; Gogotsi, Y.; Billinge, S. J. L.; Structure of Nanocrystalline Ti_3C_2 MXene Using Atomic Pair Distribution Function. *Physical Review Letters* **2014**, *112*, 125501. [Crossref]
 54. Karlsson, L. H.; Birch, J.; Halim, J.; Barsoum, M. W.; Persson, P. O. Å.; Atomically Resolved Structural and Chemical Investigation of Single MXene Sheets. *Nano Letters* **2015**, *15*, 4955. [Crossref]

55. Xie, Y.; Naguib, M.; Mochalin, V. N.; Barsoum, M. W.; Gogotsi, Y.; Yu, X.; Nam, K.-W.; Yang, X.-Q.; Kolesnikov, A. I.; Kent, P. R. C.; Role of Surface Structure on Li-Ion Energy Storage Capacity of Two-Dimensional Transition-Metal Carbides. *Journal of the American Chemical Society* **2014**, *136*, 6385. [[Crossref](#)]
56. Khazaei, M.; Arai, M.; Sasaki, T.; Chung, C.-Y.; Venkataraman, N. S.; Estili, M.; Sakka, Y.; Kawazoe, Y.; Novel Electronic and Magnetic Properties of Two-Dimensional Transition Metal Carbides and Nitrides. *Advanced Functional Materials* **2013**, *23*, 2185. [[Crossref](#)]
57. Zhang, X.; Ma, Z.; Zhao, X.; Tang, Q.; Zhou, Z.; Computational studies on structural and electronic properties of functionalized MXene monolayers and nanotubes. *Journal of Materials Chemistry A* **2015**, *3*, 4960. [[Crossref](#)]
58. Wang, H.-W.; Naguib, M.; Page, K.; Wesolowski, D. J.; Gogotsi, Y.; Resolving the Structure of $Ti_3C_2T_x$ MXenes through Multilevel Structural Modeling of the Atomic Pair Distribution Function. *Chemistry of Materials* **2016**, *28*, 349. [[Crossref](#)]
59. Mashtalir, O.; Naguib, M.; Dyatkin, B.; Gogotsi, Y.; Barsoum, M. W.; Kinetics of aluminum extraction from Ti_3AlC_2 in hydrofluoric acid. *Materials Chemistry and Physics* **2013**, *139*, 147. [[Crossref](#)]
60. Stratulat, A.-M.; Nesterova, V.; Korostelev, V.; Beidaghi, M.; Mochalin, V.; Klyukin, K.; Defect-Driven Degradation of MXenes in Aqueous Environments and Mitigation Strategies: Insights from First-Principles. *ACS Nano* **2025**, *19*, 36994. [[Crossref](#)]
61. Sang, X.; Xie, Y.; Lin, M.-W.; Alhabeab, M.; Van Aken, K. L.; Gogotsi, Y.; Kent, P. R. C.; Xiao, K.; Unocic, R. R.; Atomic Defects in Monolayer Titanium Carbide ($Ti_3C_2T_x$) MXene. *ACS Nano* **2016**, *10*, 9193. [[Crossref](#)]
62. Rajavel, K.; Yu, X.; Zhu, P.; Hu, Y.; Sun, R.; Wong, C.; Exfoliation and Defect Control of Two-Dimensional Few-Layer MXene $Ti_3C_2T_x$ for Electromagnetic Interference Shielding Coatings. *ACS Applied Materials & Interfaces* **2020**, *12*, 49737. [[Crossref](#)]
63. Lee, S.; Go, S.; Park, H. G.; Suk, M. E.; Ion Selectivity, Current, and Water Flow Regulation in Ti_3C_2 MXene Nanopores. *Nano Letters* **2024**, *24*, 9487. [[Crossref](#)]
64. Yadav, P.; Cao, Z.; Barati Farimani, A.; DNA Detection with Single-Layer Ti_3C_2 MXene Nanopore. *ACS Nano* **2021**, *15*, 4861. [[Crossref](#)]
65. Mojtavavi, M.; VahidMohammadi, A.; Liang, W.; Beidaghi, M.; Wanunu, M.; Single-Molecule Sensing Using Nanopores in Two-Dimensional Transition Metal Carbide (MXene) Membranes. *ACS Nano* **2019**, *13*, 3042. [[Crossref](#)]
66. Anasori, B.; Shi, C.; Moon, E. J.; Xie, Y.; Voigt, C. A.; Kent, P. R. C.; May, S. J.; Billinge, S. J. L.; Barsoum, M. W.; Gogotsi, Y.; Control of electronic properties of 2D carbides (MXenes) by manipulating their transition metal layers. *Nanoscale Horizons* **2016**, *1*, 227. [[Crossref](#)]
67. Li, L.; Lattice dynamics and electronic structures of $Ti_3C_2O_2$ and $Mo_2TiC_2O_2$ (MXenes): The effect of Mo substitution. *Computational Materials Science* **2016**, *124*, 8. [[Crossref](#)]
68. Kamysbayev, V.; Filatov, A. S.; Hu, H.; Rui, X.; Lagunas, F.; Wang, D.; Klie, R. F.; Talapin, D. V.; Covalent surface modifications and superconductivity of two-dimensional metal carbide MXenes. *Science* **2020**, *369*, 979. [[Crossref](#)]
69. Guo, T.; Zhou, D.; Deng, S.; Jafarpour, M.; Avaro, J.; Neels, A.; Heier, J.; Zhang, C.; Rational Design of $Ti_3C_2T_x$ MXene Inks for Conductive, Transparent Films. *ACS Nano* **2023**, *17*, 3737. [[Crossref](#)]
70. Tang, Y.; Yang, C.; Tian, Y.; Luo, Y.; Yin, X.; Que, W.; The effect of in situ nitrogen doping on the oxygen evolution reaction of MXenes. *Nanoscale Advances* **2020**, *2*, 1187. [[Crossref](#)]
71. Rems, E.; Hu, Y.-J.; Gogotsi, Y.; Dominko, R.; Pivotal Role of Surface Terminations in MXene Thermodynamic Stability. *Chemistry of Materials* **2024**, *36*, 10295. [[Crossref](#)]
72. Lipatov, A.; Alhabeab, M.; Lu, H.; Zhao, S.; Loes, M. J.; Vorobeva, N. S.; Dall'Agnese, Y.; Gao, Y.; Gruverman, A.; Gogotsi, Y.; Sinitiskii, A.; Electrical and Elastic Properties of Individual Single-Layer $Nb_4C_3T_x$ MXene Flakes. *Advanced Electronic Materials* **2020**, *6*, 1901382. [[Crossref](#)]
73. Lipatov, A.; Lu, H.; Alhabeab, M.; Anasori, B.; Gruverman, A.; Gogotsi, Y.; Sinitiskii, A.; Elastic properties of 2D $Ti_3C_2T_x$ MXene monolayers and bilayers. *Science Advances* **2025**, *4*, eaat0491. [[Crossref](#)]
74. Kurtoglu, M.; Naguib, M.; Gogotsi, Y.; Barsoum, M. W.; First principles study of two-dimensional early transition metal carbides. *MRS Communications* **2012**, *2*, 133. [[Crossref](#)]
75. Zha, X.-H.; Luo, K.; Li, Q.; Huang, Q.; He, J.; Wen, X.; Du, S.; Role of the surface effect on the structural, electronic and mechanical properties of the carbide MXenes. *Europhysics Letters* **2015**, *111*, 26007. [[Crossref](#)]
76. Ibrahim, Y.; Mohamed, A.; Abdelgawad, A. M.; Eid, K.; Abdullah, A. M.; Elzatahry, A.; The Recent Advances in the Mechanical Properties of Self-Standing Two-Dimensional MXene-Based Nanostructures: Deep Insights into the Supercapacitor. *Nanomaterials* **2020**, *10*, 1916. [[Crossref](#)]
77. Anasori, B.; Gogotsi, Y. *Em 2D Metal Carbides and Nitrides (MXenes): Structure, Properties and Applications*; Anasori, B.; Gogotsi, Y., eds.; Springer International Publishing: Cham, 2019. [[Crossref](#)]
78. Wang, K.; Hussain, I.; Singh, K.; Zhang, K.; Fabrication of MXene films through various techniques: a mini review. *Nanoscale* **2025**, *17*, 15676. [[Crossref](#)]
79. Hantanasirisakul, K.; Zhao, M.-Q.; Urbankowski, P.; Halim, J.; Anasori, B.; Kota, S.; Ren, C. E.; Barsoum, M. W.; Gogotsi, Y.; Fabrication of $Ti_3C_2T_x$ MXene Transparent Thin Films with Tunable Optoelectronic Properties. *Advanced Electronic Materials* **2016**, *2*, 1600050. [[Crossref](#)]
80. Wang, J.; He, J.; Kan, D.; Chen, K.; Song, M.; Huo, W.; MXene Film Prepared by Vacuum-Assisted Filtration: Properties and Applications. *Crystals* **2022**, *12*, 1034. [[Crossref](#)]
81. Guo, T.; Xu, X.; Liu, C.; Wang, Y.; Lei, Y.; Fang, B.; Shi, L.; Liu, H.; Hota, M. K.; Al-Jawhari, H. A.; Zhang, X.; Alshareef, H. N.; Large-Area Metal-Semiconductor Heterojunctions Realized via MXene-Induced Two-Dimensional Surface Polarization. *ACS Nano* **2023**, *17*, 8324. [[Crossref](#)]
82. Abdolhosseinzadeh, S.; Jiang, X.; Zhang, H.; Qiu, J.; Zhang, C. (John); Perspectives on solution processing of two-dimensional MXenes. *Materials Today* **2021**, *48*, 214. [[Crossref](#)]

83. Li, X.; Ran, F.; Yang, F.; Long, J.; Shao, L.; Advances in MXene Films: Synthesis, Assembly, and Applications. *Transactions of Tianjin University* **2021**, *27*, 217. [[Crossref](#)]
84. Huang, W.; Liu, X.; Zhou, Y.; Yang, S.; Huang, W.; Chen, Z.; Feng, J.; Chen, Z.; Li, X.; Gui, X.; Inkjet-Printing $Ti_3C_2T_x$ MXene Nanosheet-Based Metamaterials for Terahertz Absorption. *ACS Applied Nano Materials* **2024**, *7*, 15308. [[Crossref](#)]
85. Jiang, X.; Li, W.; Hai, T.; Yue, R.; Chen, Z.; Lao, C.; Ge, Y.; Xie, G.; Wen, Q.; Zhang, H.; Inkjet-printed MXene micro-scale devices for integrated broadband ultrafast photonics. *NPJ 2D Materials and Applications* **2019**, *3*, 34. [[Crossref](#)]
86. Azadmanjiri, J.; Reddy, T. N.; Khezri, B.; Děkanovský, L.; Parameswaran, A. K.; Pal, B.; Ashtiani, S.; Wei, S.; Sofer, Z.; Prospective advances in MXene inks: screen printable sediments for flexible micro-supercapacitor applications. *Journal of Materials Chemistry A* **2022**, *10*, 4533. [[Crossref](#)]
87. Ding, B.; Yao, L.; Tang, J.; Li, C.; Zheng, X.; Screen-printed MXene-based all-solid-state textile supercapacitors. *Materials Today Communications* **2024**, *38*, 108170. [[Crossref](#)]
88. Pei, Y.; An, J.; Wang, K.; Hui, Z.; Zhang, X.; Pan, H.; Zhou, J.; Sun, G.; $Ti_3C_2T_x$ MXene Ink Direct Writing Flexible Sensors for Disposable Paper Toys. *Small* **2023**, *19*, 2301884. [[Crossref](#)]
89. Quain, E.; Mathis, T. S.; Kurra, N.; Maleski, K.; Van Aken, K. L.; Alhabeab, M.; Alshareef, H. N.; Gogotsi, Y.; Direct Writing of Additive-Free MXene-in-Water Ink for Electronics and Energy Storage. *Advanced Materials Technologies* **2019**, *4*, 1800256. [[Crossref](#)]
90. Abdolhosseinzadeh, S.; Schneider, R.; Jafarpour, M.; Merlet, C.; Nüesch, F.; Zhang, C. (John); Heier, J.; MXene Inks for High-Throughput Printing of Electronics. *Advanced Electronic Materials* **2025**, *11*, 2400170. [[Crossref](#)]
91. Bi, L.; Garg, R.; Noriega, N.; Wang, R. J.; Kim, H.; Vorotilo, K.; Burrell, J. C.; Shuck, C. E.; Vitale, F.; Patel, B. A.; Gogotsi, Y.; Soft, Multifunctional MXene-Coated Fiber Microelectrodes for Biointerfacing. *ACS Nano* **2024**, *18*, 23217. [[Crossref](#)]
92. Li, J.; Hashemi, P.; Liu, T.; Dang, K. M.; Brunk, M. G. K.; Mu, X.; Nia, A. S.; Sacher, W. D.; Feng, X.; Poon, J. K. S.; 3D printed titanium carbide MXene-coated polycaprolactone scaffolds for guided neuronal growth and photothermal stimulation. *Communications Materials* **2024**, *5*, 62. [[Crossref](#)]
93. Dharmasiri, B.; Usman, K. A. S.; Qin, S. A.; Razal, J. M.; Tran, N. T.; Coia, P.; Harte, T.; Henderson, L.; C. $Ti_3C_2T_x$ MXene coated carbon fibre electrodes for high performance structural supercapacitors. *Chemical Engineering Journal* **2023**, *476*, 146739. [[Crossref](#)]
94. Thakur, A.; Zhang, Y.; Gogotsi, Y.; Anasori, B.; Electrochemistry of MXenes and their sustainable energy applications. *MRS Energy & Sustainability* **2025**, *12*, 270. [[Crossref](#)]
95. Bergman, G.; Ballas, E.; Gao, Q.; Nimkar, A.; Gavriel, B.; Levi, M. D.; Sharon, D.; Malchik, F.; Wang, X.; Shpigel, N.; Mandler, D.; Aurbach, D.; Elucidation of the Charging Mechanisms and the Coupled Structural-Mechanical Behavior of $Ti_3C_2T_x$ (MXenes) Electrodes by In Situ Techniques. *Advanced Energy Materials* **2023**, 2203154. [[Crossref](#)]
96. Zhan, C.; Naguib, M.; Lukatskaya, M.; Kent, P. R. C.; Gogotsi, Y.; Jiang, D.; Understanding the MXene Pseudocapacitance. *The Journal of Physical Chemistry Letters* **2018**, *9*, 1223. [[Crossref](#)]
97. Mu, X.; Wang, D.; Du, F.; Chen, G.; Wang, C.; Wei, Y.; Gogotsi, Y.; Gao, Y.; Dall'Agness, Y.; Revealing the Pseudo-Intercalation Charge Storage Mechanism of MXenes in Acidic Electrolyte. *Advanced Functional Materials* **2019**, *29*, 1902953. [[Crossref](#)]
98. Facure, M. H. M.; Matthews, K.; Wang, R.; Lord, R. W.; Correa, D. S.; Gogotsi, Y.; Pillaring effect of nanodiamonds and expanded voltage window of $Ti_3C_2T_x$ supercapacitors in $AlCl_3$ electrolyte. *Energy Storage Materials* **2023**, *61*, 102919. [[Crossref](#)]
99. Ashton, M.; Mathew, K.; Hennig, R. G.; Sinnott, S. B.; Predicted Surface Composition and Thermodynamic Stability of MXenes in Solution. *The Journal of Physical Chemistry C* **2016**, *120*, 3550. [[Crossref](#)]
100. Sharma, G.; Naguib, M.; Feng, D.; Gogotsi, Y.; Navrotsky, A.; Calorimetric Determination of Thermodynamic Stability of MAX and MXene Phases. *The Journal of Physical Chemistry C* **2016**, *120*, 28131. [[Crossref](#)]
101. Mashtalir, O.; Cook, K. M.; Mochalin, V. N.; Crowe, M.; Barsoum, M. W.; Gogotsi, Y.; Dye adsorption and decomposition on two-dimensional titanium carbide in aqueous media. *Journal of Materials Chemistry A* **2014**, *2*, 14334. [[Crossref](#)]
102. Wang, K.; Zhou, Y.; Xu, W.; Huang, D.; Wang, Z.; Hong, M. Fabrication and thermal stability of two-dimensional carbide Ti_3C_2 nanosheets. *Ceramics International* **2016**, *42*, 8419. [[Crossref](#)]
103. Naguib, M.; Mashtalir, O.; Lukatskaya, M. R.; Dyatkin, B.; Zhang, C.; Presser, V.; Gogotsi, Y.; Barsoum, M. W.; One-step synthesis of nanocrystalline transition metal oxides on thin sheets of disordered graphitic carbon by oxidation of MXenes. *Chemical Communications* **2014**, *50*, 7420. [[Crossref](#)]
104. Rakhii, R. B.; Ahmed, B.; Hedhili, M. N.; Anjum, D. H.; Alshareef, H. N.; Effect of Postetch Annealing Gas Composition on the Structural and Electrochemical Properties of Ti_2CT_x MXene Electrodes for Supercapacitor Applications. *Chemistry of Materials* **2015**, *27*, 5314. [[Crossref](#)]
105. Shekhirev, M.; Shuck, C. E.; Sarycheva, A.; Gogotsi, Y.; Characterization of MXenes at every step, from their precursors to single flakes and assembled films. *Progress in Materials Science* **2021**, *120*, 100757. [[Crossref](#)]
106. Zhang, C. J.; Pinilla, S.; McEvoy, N.; Cullen, C. P.; Anasori, B.; Long, E.; Park, S. H.; Seral-Ascaso, A.; Shmeliov, A.; Krishnan, D.; Morant, C.; Liu, X.; Duesberg, G. S.; Gogotsi, Y.; Nicolosi, V.; Oxidation Stability of Colloidal Two-Dimensional Titanium Carbides (MXenes). *Chemistry of Materials* **2017**, *29*, 4848. [[Crossref](#)]
107. Marquez, K. P.; Sisican, K. M. D.; Ibabao, R. P.; Malenab, R. A. J.; Judicpa, M. A. N.; Henderson, L.; Zhang, J.; Usman, K. A. S.; Razal, J. M.; Understanding the Chemical Degradation of $Ti_3C_2T_x$ MXene Dispersions: A Chronological Analysis. *Small Science* **2024**, *4*, 2400150. [[Crossref](#)]
108. Munir, S.; Rasheed, A.; Rasheed, T.; Ayman, I.; Ajmal, S.; Rehman, A.; Shakir, I.; Agboola, P. O.; Warsi, M. F.; Exploring the Influence of Critical Parameters for the Effective Synthesis of High-Quality 2D MXene. *ACS Omega* **2020**, *5*, 26845. [[Crossref](#)]

109. Zhang, J.; Usman, K. A. S.; Judicpa, M. A. N.; Hegh, D.; Lynch, P. A.; Razal, J. M.; Applications of X-Ray-Based Characterization in MXene Research. *Small Methods* **2023**, *7*, 2201527. [Crossref]
110. Sarkar, S.; Hossain, S. A.; Chakraborty, P.; Ghosh, S.; Bhattacharya, S.; Mukherjee, S.; das, P.; MXene: Recent advances in synthesis, characterization and emerging applications in energy, biomedical and environmental remediation. *Surfaces and Interfaces* **2024**, *51*, 104628. [Crossref]
111. Naslund, L. Å.; Persson, P. O. Å.; Rosen, J.; X-ray photoelectron spectroscopy of Ti_3AlC_2 , $Ti_3C_2T_x$, and TiC provides evidence for the electrostatic interaction between laminated layers in max-phase materials. *The Journal of Physical Chemistry C* **2020**, *124*, 27732. [Crossref]
112. Luxa, J.; Kupka, P.; Lipilin, F.; Šturala, J.; Subramani, A.; Lazar, P.; Sofer, Z.; Hydrogen Evolution Reaction Activity in $Mo_2TiC_2T_x$ MXene Derived from Mo_2TiAlC_2 MAX Phase: Insights from Compositional Transformations. *ACS Catalysis* **2024**, *14*, 15336. [Crossref]
113. Han, M.; Shen, W.; Corriou, J. P.; Polydopamine-modified MXene/cellulose nanofibers composite film for self-powered humidity sensing and humidity actuating. *Nano Energy* **2024**, *123*, 109445. [Crossref]
114. Shivade, D. S.; Kurade, A. N.; Bhosale, R. K.; Kundale, S. S.; Shelake, A. R.; Patil, A. D.; Waifalkar, P. P.; Kamat, R. K.; Teli, A. M.; Dongale, T. D.; Folic acid-assisted in situ solvothermal synthesis of Ni-MOF/MXene composite for high-performance supercapacitors. *Journal of Energy Storage* **2024**, *100*, 113754. [Crossref]
115. Zhang, D.; Jiang, J.; Wang, T.; Li, F.; Yu, H.; Dong, X.; Yang, Y.; Flexible room temperature gas sensor based on $\alpha-Fe_2O_3/Ti_3C_2T_x$ MXene composites for ppb-level H_2S detection. *Sensors and Actuators B: Chemical* **2024**, *421*, 136543. [Crossref]
116. Abid, M. Z.; Rafiq, K.; Aslam, A.; Jin, R.; Hussain, E.; Scope, evaluation and current perspectives of MXene synthesis strategies for state of the art applications. *Journal of Materials Chemistry A* **2024**, *12*, 7351. [Crossref]
117. Bashir, T.; Ismail, S. A.; Wang, J.; Zhu, W.; Zhao, J.; Gao, L.; MXene terminating groups O, -F or -OH, -F or O, -OH, -F, or O, -OH, -Cl? *Journal of Energy Chemistry* **2023**, *76*, 90. [Crossref]
118. Brette, F.; Kourati, D.; Paris, M.; Loupias, L.; Célérier, S.; Cabioch, T.; Deschamps, M.; Boucher, F.; Mauchamp, V.; Assessing the Surface Chemistry of 2D Transition Metal Carbides (MXenes): A Combined Experimental/Theoretical ^{13}C Solid State NMR Approach. *Journal of the American Chemical Society* **2023**, *145*, 4003. [Crossref]
119. Griffith, K. J.; Hope, M. A.; Reeves, P. J.; Anayee, M.; Gogotsi, Y.; Grey, C. P.; Bulk and Surface Chemistry of the Niobium MAX and MXene Phases from Multinuclear Solid-State NMR Spectroscopy. *Journal of the American Chemical Society* **2020**, *142*, 18924. [Crossref]
120. Hope, M. A.; Forse, A. C.; Griffith, K. J.; Lukatskaya, M. R.; Ghidui, M.; Gogotsi, Y.; Grey, C. P.; NMR reveals the surface functionalisation of Ti_3C_2 MXene. *Physical Chemistry Chemical Physics* **2016**, *18*, 5099. [Crossref]
121. Sarycheva, A.; Gogotsi, Y.; Raman Spectroscopy Analysis of the Structure and Surface Chemistry of $Ti_3C_2T_x$ MXene. *Chemistry of Materials* **2020**, *32*, 3480. [Crossref]
122. Shevchuk, K.; Sarycheva, A.; Shuck, C. E.; Gogotsi, Y.; Raman Spectroscopy Characterization of 2D Carbide and Carbonitride MXenes. *Chemistry of Materials* **2023**, *35*, 8239. [Crossref]
123. Stark, M. S.; Kuntz, K. L.; Martens, S. J.; Warren, S. C.; Intercalation of Layered Materials from Bulk to 2D. *Advanced Materials* **2019**, *31*, 1808213. [Crossref]
124. Adomaviciute-Grabusove, S.; Popov, A.; Ramanavicius, S.; Sablinskas, V.; Shevchuk, K.; Gogotsi, O.; Baginskiy, I.; Gogotsi, Y.; Ramanavicius, A.; Monitoring $Ti_3C_2T_x$ MXene Degradation Pathways Using Raman Spectroscopy. *ACS Nano* **2024**, *18*, 13184. [Crossref]
125. Li, X.; Huang, Z.; Shuck, C. E.; Liang, G.; Gogotsi, Y.; Zhi, C.; MXene chemistry, electrochemistry and energy storage applications. *Nature Reviews Chemistry* **2022**, *6*, 389. [Crossref]
126. Yuan, H.; Hua, J.; Wei, W.; Zhang, M.; Hao, Y.; Chang, J.; Progress and prospect of flexible MXene-based energy storage. *Carbon Energy* **2025**, *7*, e639. [Crossref]
127. Okubo, M.; Sugahara, A.; Kajiyama, S.; Yamada, A.; MXene as a Charge Storage Host. *Accounts of Chemical Research* **2018**, *51*, 591. [Crossref]
128. Bandpey, M.; Barz, D. P. J.; Effects of interlayer space engineering and surface modification on the charge storage mechanisms of MXene nanomaterials: A review on recent developments. *Nanoscale* **2024**, *16*, 15078. [Crossref]
129. Shimada, T.; Takenaka, N.; Ando, Y.; Otani, M.; Okubo, M.; Yamada, A.; Relationship between Electric Double-Layer Structure of MXene Electrode and Its Surface Functional Groups. *Chemistry of Materials* **2022**, *34*, 2069. [Crossref]
130. Sun, X.; Li, Y.; Wang, Y.; Liu, Z.; Dong, K.; Zhang, S.; Effect of Interlayer Spaces and Interfacial Structures on High-Performance MXene/Ionic Liquid Supercapacitors: A Molecular Dynamics Simulation. *Langmuir* **2024**, *40*, 2220. [Crossref]
131. Zhu, K.; Zhang, H.; Ye, K.; Zhao, W.; Yan, J.; Cheng, K.; Wang, G.; Yang, B.; Cao, D.; Two-Dimensional Titanium Carbide MXene as a Capacitor-Type Electrode for Rechargeable Aqueous Li-Ion and Na-Ion Capacitor Batteries. *ChemElectroChem* **2017**, *4*, 3018. [Crossref]
132. Zhang, T.; Matthews, K.; Vahidmohammadi, A.; Han, M.; Gogotsi, Y.; Pseudocapacitance of Vanadium Carbide MXenes in Basic and Acidic Aqueous Electrolytes. *ACS Energy Letters* **2022**, *7*, 3864. [Crossref]
133. Kajiyama, S.; Szabova, L.; Sodeyama, K.; Iinuma, H.; Morita, R.; Gotoh, K.; Tateyama, Y.; Okubo, M.; Yamada, A.; Sodium-Ion Intercalation Mechanism in MXene Nanosheets. *ACS Nano* **2016**, *10*, 3334. [Crossref]
134. Tang, J.; Mathis, T.; Zhong, X.; Xiao, X.; Wang, H.; Anayee, M.; Pan, F.; Xu, B.; Gogotsi, Y.; Optimizing Ion Pathway in Titanium Carbide MXene for Practical High-Rate Supercapacitor. *Advanced Energy Materials* **2021**, *11*, 2003025. [Crossref]
135. Venkateshalu, S.; Grace, A. N.; MXenes—A new class of 2D layered materials: Synthesis, properties, applications as supercapacitor electrode and beyond. *Applied Materials Today* **2020**, *18*, 100509. [Crossref]

136. Gao, X.; Du, X.; Mathis, T. S.; Zhang, M.; Wang, X.; Shui, J.; Gogotsi, Y.; Xu, M.; Maximizing ion accessibility in MXene-knotted carbon nanotube composite electrodes for high-rate electrochemical energy storage. *Nature Communications* **2020**, *11*, 6160. [Crossref]
137. Lukatskaya, M. R.; Kota, S.; Lin, Z.; Zhao, M.-Q.; Shpigel, N.; Levi, M. D.; Halim, J.; Taberna, P.-L.; Barsoum, M. W.; Simon, P.; Gogotsi, Y.; Ultra-high-rate pseudocapacitive energy storage in two-dimensional transition metal carbides. *Nature Energy* **2017**, *2*, 17105. [Crossref]
138. Lukatskaya, M. R.; Mashtalir, O.; Ren, C. E.; Dall'Agnesse, Y.; Rozier, P.; Taberna, P. L.; Naguib, M.; Simon, P.; Barsoum, M. W.; Gogotsi, Y.; Cation intercalation and high volumetric capacitance of two-dimensional titanium carbide. *Science* **2013**, *341*, 1502. [Crossref]
139. Wang, X.; Mathis, T. S.; Sun, Y.; Tsai, W. Y.; Shpigel, N.; Shao, H.; Zhang, D.; Hantanasirisakul, K.; Malchik, F.; Balke, N.; Jiang, D. E.; Simon, P.; Gogotsi, Y.; Titanium Carbide MXene Shows an Electrochemical Anomaly in Water-in-Salt Electrolytes. *ACS Nano* **2021**, *15*, 15274. [Crossref]
140. Tian, X.; Zhu, Q.; Xu, B.; "Water-in-Salt" Electrolytes for Supercapacitors: A Review. *ChemSusChem* **2021**, *14*, 2501. [Crossref]
141. Zhang, Y.; Dong, C.; Ye, Z.; Hou, Y.; Ye, S.; Engineering space dimension and surface chemistry of MXene-based nanocomposite photocatalysts for sustainable environmental applications. *Chemical Communications* **2025**, *61*, 7158. [Crossref]
142. Kuang, P.; Low, J.; Cheng, B.; Yu, J.; Fan, J.; MXene-based photocatalysts. *Journal of Materials Science & Technology* **2020**, *56*, 18. [Crossref]
143. Song, P.; Liu, B.; Qiu, H.; Shi, X.; Cao, D.; Gu, J.; MXenes for polymer matrix electromagnetic interference shielding composites: A review. *Composites Communications* **2021**, *24*, 100653. [Crossref]
144. Oliveira, F. M.; Azadmanjiri, J.; Wang, X.; Yu, M.; Sofer, Z.; Structure Design and Processing Strategies of MXene-Based Materials for Electromagnetic Interference Shielding. *Small Methods* **2023**, *7*, 2300112. [Crossref]
145. Deng, Y.; Chen, Y.; Liu, W.; Wu, L.; Wang, Z.; Xiao, D.; Meng, D.; Jiang, X.; Liu, J.; Zeng, Z.; Wu, N.; Transparent electromagnetic interference shielding materials using MXene. *Carbon Energy* **2024**, *6*, e593. [Crossref]
146. Han, M.; Shuck, C. E.; Rakhmanov, R.; Parchment, D.; Anasori, B.; Koo, C. M.; Friedman, G.; Gogotsi, Y.; Beyond Ti₃C₂Tx: MXenes for Electromagnetic Interference Shielding. *ACS Nano* **2020**, *14*, 5008. [Crossref]
147. Liu, Y.; Liu, Y.; Zhao, X.; MXene Composite Electromagnetic Shielding Materials: The Latest Research Status. *ACS Applied Materials & Interfaces* **2024**, *16*, 41596. [Crossref]
148. Pargoletti, E.; Gogotsi, Y.; MXene-Based Nanozymes: Current Challenges and Future Prospects. *ChemCatChem* **2025**, *17*, e00730. [Crossref]
149. Khan, M.; Sun, X.; Attique, F.; Saleh, M. T.; Ahmad, N.; Atiq, K.; Shafi, M.; Ahmed, I. A.; Barsoum, I.; Rafique, M. S.; Ullah, A.; Hussain, A.; Zada, A.; Unveiling the future: Breakthroughs and innovations in MXene-based electrochemical sensors. *Chemical Engineering Journal* **2025**, *507*, 160392. [Crossref]
150. Xia, Q.; Fan, Y.; Li, S.; Zhou, A.; Shinde, N.; Mane, R. S.; MXene-based chemical gas sensors: Recent developments and challenges. *Diamond and Related Materials* **2023**, *131*, 109557. [Crossref]
151. Assad, H.; Fatma, I.; Kumar, A.; Kaya, S.; Vo, D. V. N.; Al-Gheethi, A.; Sharma, A.; An overview of MXene-Based nanomaterials and their potential applications towards hazardous pollutant adsorption. *Chemosphere* **2022**, *298*, 134221. [Crossref]
152. Park, D.; Nam, S.-N.; Jung, B.; Soo Choi, J.; Min Park, C.; Earn Choong, C.; Jang, M.; Cho, K.-S.; Jun, B.-M.; Yoon, Y.; Removal of selected contaminants of dyes and pharmaceuticals using MXene-based nanoadsorbents: A review. *Separation and Purification Technology* **2024**, *341*, 126864. [Crossref]
153. Zhang, Y.; Wang, L.; Zhang, N.; Zhou, Z.; Adsorptive environmental applications of MXene nanomaterials: a review. *RSC Advances* **2018**, *8*, 19895. [Crossref]
154. Avinashi, S. K.; Mishra, R. K.; Singh, R.; Shweta; Rakhi; Fatima, Z.; Gautam, C. R.; Fabrication Methods, Structural, Surface Morphology and Biomedical Applications of MXene: A Review. *ACS Applied Materials & Interfaces* **2024**, *16*, 47003. [Crossref]
155. Amani, A. M.; Tayebi, L.; Vafa, E.; Azizli, M. J.; Abbasi, M.; Vaez, A.; Kamyab, H.; Simancas-Racines, D.; Chelliapan, S.; Biomedical MXene-polymer nanocomposites: advancing photothermal therapy, antibacterial action, and smart drug delivery: a review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications* **2025**, *10*, 100863. [Crossref]
156. Ponnada, S.; Kiai, M. S.; Yadav, S.; Palariya, A.; Vusa, C. S. R.; Bose, R. S. C.; Nehra, A.; Datta, S.; Pawar, R.; Martynkova, G. S.; Gadkari, S.; Naskar, S.; Sharma, R. K.; Advances of MXene heterostructure composites in the area of sensing and biomedical applications: An overview. *Applied Materials Today* **2024**, *39*, 102310. [Crossref]
157. Saxena, A.; Tyagi, A.; Vats, S.; Gupta, I.; Gupta, A.; Kaur, R.; Tiwary, S. K.; Elzatahry, A. A.; Singh, M.; Karim, A.; MXene-Integrated Composites for Biomedical Applications: Synthesis, Cancer Diagnosis, and Emerging Frontiers. *Small Science* **2025**, *5*, 2400492. [Crossref]
158. Dutta, T.; Alam, P.; Mishra, S. K.; MXenes and MXene-based composites for biomedical applications. *Journal of Materials Chemistry B* **2025**, *13*, 4279. [Crossref]
159. Jang, J. M.; Kim, J. H.; Lee, J.; Hong, J.; Kim, D. W.; Kim, S. J.; Gradient-structured MXene/ZIF/CNT hybrid films for largely enhanced electromagnetic absorption in EMI shielding. *Chemical Engineering Journal* **2025**, *503*, 158691. [Crossref]
160. Ma, Z.; Jiang, R.; Zhang, Y.; Ma, L.; Bai, Y.; Zhang, K.; Zuo, X.; Zuo, Y.; Jing, H.; Qin, J.; Zhang, G.; Lightweight and mechanically strong MXene-Based microcellular nanocomposite foams for integrated electromagnetic interference shielding and thermal management. *Composites Science and Technology* **2025**, *260*, 110988. [Crossref]
161. Wang, N.; Li, X.; Cao, W.; Yang, X.; Zou, X.; Fang, Y.; Shen, X.; Li, Q.; Song, N.; Xu, T.; Ding, P.; Lightweight Polyimide

- Nanocomposites with 3D Cocarbonized MXene/Carbon Fiber Networks for Electromagnetic Interference Shielding and High-Temperature Stability. *ACS Applied Nano Materials* **2025**, *8*, 7347. [Crossref]
162. Bilal, A.; Bahadur, A.; Khan, M. S.; Khan, I.; Ali, S.; Iqbal, S.; Asimov, A.; Alhabradi, M.; Alruwaili, M.; Mahmood, S.; Alyami, N. M.; Farouk, A. E. A.; A high-performance S-scheme based $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene-enhanced S-g- $\text{C}_3\text{N}_4/\text{NiAl}$ layered double hydroxide ternary heterojunction photocatalyst for sustainable hydrogen production. *Journal of Power Sources* **2025**, *635*, 237792. [Crossref]
 163. Liu, X.; Ma, J.; Zhang, S.; Guan, G. W.; Yang, Q. Y.; Wang, J.; $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene coupled with CdS for enhanced photocatalytic H_2 production. *International Journal of Hydrogen Energy* **2025**, *101*, 1191. [Crossref]
 164. Niu, X.; Lu, X.; He, B.; Xiao, X.; Wang, S.; Liang, Z.; Shi, Q.; Ma, L. F.; Dual electron transfer path and $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ LSPR photothermal enhancement in 2D/2D/2D $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene@ $\text{TiO}_2/\text{CdIn}_2\text{S}_4$ ternary heterojunction for enhanced photocatalytic H_2 production: Construction, kinetics, and mechanistic insights. *Applied Catalysis B: Environment and Energy* **2025**, *361*, 124703. [Crossref]
 165. Asghar, Z.; Habib, H.; Bilal, M.; Rehman, Z. U.; Butt, F. K.; Zheng, K.; Liu, Y.; Lin, H.; Zhang, Y.; Wang, X.; Hou, J.; Enhancing electron-hole pair generation by Ti_3C_2 MXene-derived TiO_2 integrated with g- C_3N_4 heterojunction for excellent photocatalytic H_2 production and CO_2 reduction. *International Journal of Hydrogen Energy* **2025**, *149*, 150052. [Crossref]
 166. Zhang, Y.; Ali, A. B. M.; Osman, H.; Samad, S.; Abdulrahman, A.; Zhang, K.; Mahariq, I.; Kutliev, U.; Abdvokhidov, A.; Engineering a Multifunctional $\text{Cu}_2\text{O}/\text{BiVO}_4/\text{Ti}_3\text{C}_2$ MXene Z-Scheme heterojunction for photocatalytic environmental Detoxification, H_2 Generation, and CO_2 reduction to CO and CH_4 : Experimental modeling and mechanistic insights. *Separation and Purification Technology* **2025**, *369*, 133110. [Crossref]
 167. Kalita, S. J.; Bhatt, S.; Mudoi, R.; Jain, S. L.; Saikia, L.; Facile construction of $\text{In}_2\text{S}_3/\text{Ti}_3\text{C}_2$ MXene heterostructure: A bifunctional catalyst for selective reduction of CO_2 coupled with benzylamine oxidation. *Journal of Environmental Chemical Engineering* **2025**, *13*, 116895. [Crossref]
 168. Zhou, W.; Sun, L.; Xiang, S.; Tian, S.; Enhanced photocatalytic degradation of organic dyes by dual heterojunction of $\text{ZnO}/\text{NiWO}_4/\text{V}_2\text{C}$ MXene. *Applied Surface Science* **2025**, *679*, 161260. [Crossref]
 169. Mousavi, S. M.; Mohtaram, M. S.; Rasouli, K.; Mohtaram, S.; Rajabi, H.; Sabbaghi, S.; Efficient visible-light-driven photocatalytic degradation of antibiotics in water by MXene-derived TiO_2 -supported $\text{SiO}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2$ composites: Optimisation, mechanism and toxicity evaluation. *Environmental Pollution* **2025**, *367*, 125624. [Crossref]
 170. Eslaminejad, S.; Rahimi, R.; Fayazi, M.; Green decoration of Pd nanoparticles on MXene/metal organic framework support for photocatalytic degradation of ofloxacin. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* **2025**, *141*, 94. [Crossref]
 171. Xu, X.; Ma, W.; Jiang, H.; Wang, X.; Liu, W.; Wang, M.; Sun, G.; Ma, N.; Ma, S.; Wang, J.; Chang, G.; Highly selective triethylamine gas sensor based on $\text{ZnO}/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene self-assembly heterostructure. *Sensors and Actuators B: Chemical* **2025**, *422*, 136595. [Crossref]
 172. Ren, W.; Luan, J.; Yin, L.; Chen, H.; Wang, C.; Zhang, P.; Cui, G.; Lv, L.; Ultrasensitive Room-Temperature NO_2 Gas Sensor Based on MXene- Cu_2O Composites. *ACS Sensors* **2025**, *10*, 3579. [Crossref]
 173. Seekaew, Y.; Traiwatcharanon, P.; Kamlue, T.; Wongchoosuk, C.; 2D V_2CTx MXene-based resistive gas sensor for methanol sensing. *Materials Science in Semiconductor Processing* **2025**, *199*, 109821. [Crossref]
 174. Chen, Y.; Zhang, X.; Liu, Y.; Liu, Z.; Li, Z.; Li, Z.; Chen, X.; Liu, J.; Chen, Z.; Mo, G.; Xia, Y.; Mou, L.; A Gold Nanoparticles and MXene Nanocomposite Based Electrochemical Sensor for Point-of-Care Monitoring of Serum Biomarkers. *ACS Nano* **2025**, *19*, 16980. [Crossref]
 175. Liu, M.; Zhe, T.; Zhu, L.; Li, F.; Ma, K.; Xuan, C.; Feng, Q.; Ouyang, S.; Wang, L.; Interfacial engineering of $\text{VS}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene heterojunctions for portable electrochemical sensing of nitrofurantoin residues in food and water samples. *Food Chemistry* **2025**, *486*, 144624. [Crossref]
 176. Yi, Y.; Li, J.; Bi, X.; Zhang, L.; Ren, Y.; Li, L.; You, T.; Highly active $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene nanoribbons@AuPt bimetallic nanozyme constructed in a “two birds with one stone” manner for colorimetric sensing of dipterox. *Talanta* **2025**, *281*, 126881. [Crossref]
 177. Gupta, K.; Park, J.; Im, S. H.; Kim, W. S.; Efficient adsorption of antibiotics using MXene nanosheet delaminated by Taylor vortex flow. *Separation and Purification Technology* **2025**, *357*, 130095. [Crossref]
 178. Luo, X.; Wang, H.; Ren, X.; Liu, G. Bin; Luo, H.; Zheng, Z.; Wu, F.; Effective adsorptive removal of heavy metal anion Cr(VI) and dye cation methylene blue by the novel 2D material TiVCTx MXene. *Journal of Alloys and Compounds* **2025**, *1010*, 177409. [Crossref]
 179. Huang, J.; Ali, A. B. M.; Samad, S.; Abdulrahman, A.; Osman, H.; Jumanazarov, D.; Atamurotov, F.; Mahariq, I.; Sustainable and Electrostatically Engineered MXene-Based composite for environmental pollution remediation of Congo red dye and Cefixime from wastewater. *Separation and Purification Technology* **2025**, *369*, 133164. [Crossref]
 180. Sha, J.; Zhu, Z.; Lin, M.; Zhu, L.; Wang, Z.; Xiao, K.; Chitosan/MXene/ ϵ -polylysine based biodegradable packaging films with synergistic photothermal antimicrobial properties. *Food Packaging and Shelf Life* **2025**, *50*, 101544. [Crossref]
 181. Huang, Y.; Huang, H.; Guo, Y.; Ding, Y.; Zhou, Y.; Yu, H.; Liu, Y.; Li, W.; Thermoplastic Polyurethane/MXene Nanosheet/ SiO_2 Nanoparticle Composites for Superhydrophobic Surfaces and Wearable Strain Sensors. *ACS Applied Nano Materials* **2025**, *8*, 9849. [Crossref]
 182. Shi, M.; Jin, L.; Wang, C.; Mao, C.; Liu, X.; Li, Z.; Zhu, S.; Jiang, H.; Cui, Z.; Zheng, Y.; Wu, S.; Diverse loss mechanism enhanced microwave thermal effects of capacitor-like structure $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene/CNT for rapid treatment of osteomyelitis. *Chemical Engineering Journal* **2025**, *507*, 160540. [Crossref]

183. Zou, Q.; Qiu, A.; He, Y.; Xue, E. Y.; Wang, L.; Yang, G.; Shen, Y.; Luo, D.; Liu, Q.; Ng, D. K. P.; Fabrication of Polydopamine-Coated High-Entropy MXene Nanosheets for Targeted Photothermal Anticancer Therapy. *Advanced Science* **2025**, *12*, 2410537. [Crossref]
184. Zhao, Y.; Chen, H.; Fu, J.; wang, A.; Liu, X.; Jiang, X.; Drug-Loaded Microspheres on NIR-Responsive PLA/MXene Scaffolds: Controlled Release and Bone Tissue Regeneration. *ACS Applied Bio Materials* **2025**, *8*, 285. [Crossref]
185. Xiong, T.; Cai, C.; Luo, S.; Deng, X.; Chen, S.; Guo, D.; Chen, Y.; Ye, J.; Hao, L.; Accelerating the healing of rotator cuff tear through comprehensive repair strategy based on bioactive Cu₂O-Decorated MXene Nanosheet. *Chemical Engineering Journal* **2025**, *503*, 158569. [Crossref]
186. Wang, W.; Wu, J.; Chen, X.; Shen, X.; Jin, X.; Sun, Y.; Yan, C.; Li, Y.; Zhang, P.; MXene-Induced Construction of SnS₂ Nano-Arrays with Sulfur Vacancies for High-Efficiency Photocatalytic CO₂ Reduction. *Chemistry an Asian Journal* **2025**, *20*, 2500086. [Crossref]
187. S, M. S.; V, A.; Jaffar, J. A.; Hydroxyl functionalised 2D/2D Ti₂CT_x MXene @ g-C₃N₄ photocatalyst confer selectivity for CO₂ reduction to ethanol. *Applied Surface Science* **2025**, *686*, 162104. [Crossref]
188. Potapenko, K. O.; Vasilchenko, D. B.; Kurenkova, A. Y.; Saraev, A. A.; Mishchenko, D. D.; Gerasimov, E. Y.; Kozlova, E. A.; Expanding g-C₃N₄ capabilities for photocatalytic H₂ production by modification with Ti₃C₂T_x MXene. *International Journal of Hydrogen Energy* **2025**, *99*, 291. [Crossref]
189. Qi, N.; Mo, L.; Tang, Y.; He, Y.; Wang, Y.; Shi, X.; Fang, Y.; Liu, X.; Wei, S.; The Schottky junction between Ti₃C₂ MXene quantum dots and Bi₂WO₆ with oxygen vacancies accelerates charge separation and improves the photocatalytic degradation efficiency of tetracycline. *Journal of Environmental Chemical Engineering* **2025**, *13*, 115886. [Crossref]
190. Sangarimotlagh, Z.; Fattah-alhosseini, A.; Karbasi, M.; In situ synthesis of partially oxidized Ti₃C₂-MXene photocatalyst for enhanced MB photodegradation upon visible light illumination. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **2025**, *710*, 136238. [Crossref]
191. Sun, A.; Sun, M.; Zhang, R.; Zhu, H.; Xing, Y.; Surface and interface engineering of CAU-17/MXene Schottky heterojunction for efficient photocatalytic nitrogen fixation. *Separation and Purification Technology* **2025**, *362*, 131939. [Crossref]
192. Wu, C.; Lin, J.; Xie, Z.; Kai, X.; Yu, X.; Yan, Z.; Fang, J.; Chen, S.; Guo, J.; Wang, W.; Peng, F.; Near-infrared driven N₂ fixation on ZnO-MXene (Ti₃C₂) heterostructures through pyroelectric catalysis. *Journal of Materials Chemistry A* **2024**, *13*, 2251. [Crossref]
193. Ali, M. M.; Hossen, M. A.; Aziz, A. A.; Recent advances in synthesis of emerging MXenes photocatalysts: A systematic review. *Journal of Environmental Chemical Engineering* **2025**, *13*, 116877. [Crossref]
194. Fan, Y.; Hao, X.; Yi, N.; Jin, Z.; Strong electronic coupling of Mo₂TiC₂ MXene/ZnCdS ohmic junction for boosting photocatalytic hydrogen evolution. *Applied Catalysis B: Environment and Energy* **2024**, *357*, 124313. [Crossref]
195. Li, S.; Li, Y.; Yuan, Z.; Li, J.; Butenko, D.; Ji, Y.; Shanenkov, I.; Li, G.; Han, W.; A novel MXene-bridged Z-scheme ZnO@Nb₂CT_x MXene@carbon nitride nanosheets photocatalyst for efficient enrofloxacin degradation. *Chemical Engineering Journal* **2024**, *489*, 151505. [Crossref]
196. Xu, R.; Wei, G.; Xie, Z.; Diao, S.; Wen, J.; Tang, T.; Jiang, L.; Li, M.; Hu, G.; V₂C MXene-modified g-C₃N₄ for enhanced visible-light photocatalytic activity. *Journal of Alloys and Compounds* **2024**, *970*, 172656. [Crossref]
197. Lim, G. P.; Soon, C. F.; Ma, N. L.; Morsin, M.; Nayan, N.; Ahmad, M. K.; Tee, K. S.; Cytotoxicity of MXene-based nanomaterials for biomedical applications: A mini review. *Environmental Research* **2021**, *201*, 111592. [Crossref]
198. Polak, M.; Berniak, K.; Szewczyk, P. K.; Knapczyk-Korczak, J.; Marzec, M. M.; Purbayanto, M. A. K.; Jastrzębska, A. M.; Stachewicz, U.; Modulating cell adhesion and infiltration in advanced scaffold designs based on PLLA fibers with rGO and MXene (Ti₃C₂T_x). *Materials Today Bio* **2025**, *32*, 101785. [Crossref]
199. Jang, J. H.; Chung, H. R.; Lee, S. M.; Lee, E. J.; Han, C. M.; Injectable in situ-forming silk fibroin-based hydrogel dressing with MXene/polydeoxyribonucleotide for wound protection and regeneration. *International Journal of Biological Macromolecules* **2025**, *320*, 145773. [Crossref]
200. Lee, S. Bin; Park, J. M.; Park, R.; Choi, H. E.; Hong, S. W.; Kim, K. S.; Synergistic chemo-photothermal treatment via MXene-encapsulated nanoparticles for targeted melanoma therapy. *Journal of Controlled Release* **2025**, *382*, 113729. [Crossref]
201. Won, S. Y.; Singhmar, R.; Sahoo, S.; Kim, H.; Kim, C. M.; Choi, S. M.; Sood, A.; Han, S. S.; Fabrication of albumin-Ti₃C₂ MXene quantum dots-based nanohybrids for breast cancer imaging and synergistic photo/chemotherapeutics. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* **2025**, *245*, 114207. [Crossref]
202. Elbeltagi, S.; Al-zharani, M.; Nasr, F. A.; Ismail, A. M.; El-Tohamy, H. M.; Abdelbased, K. M.; Eldin, Z. E.; Multifunctional sorafenib-loaded MXene for enhanced cancer therapy: In vitro and in vivo study based on chemotherapy/photothermal therapy approach. *International Journal of Pharmaceutics* **2025**, *674*, 125492. [Crossref]
203. Cao, H.; Ijaz, M. F.; Song, W.; Shahzad, K.; Mushtaq, S.; Iqbal, Y.; Fabrication and characterization of Fe₃O₄/MXene composite nanofiber membranes for synergistic photothermal/chemotherapy. *Journal of Drug Delivery Science and Technology* **2025**, *110*, 107061. [Crossref]
204. Krasian, T.; Daranarong, D.; Punyodom, W.; Manokruang, K.; Somsunan, R.; Jantrawut, P.; Chaiwarit, T.; Panraksa, P.; Jantanasakulwong, K.; Rachtanapun, P.; Worajittiphon, P.; Electrospun composite membranes of ethyl cellulose and MXene (Ti₃C₂T_x): Biocompatible platforms for enhanced drug delivery and antibacterial wound healing. *International Journal of Biological Macromolecules* **2025**, *287*, 138596. [Crossref]
205. Gnanasekar, S.; He, X.; Nagay, B. E.; Xu, K.; Rao, X.; Duan, S.; Murugesan, S.; Barão, V. A. R.; Kang, E.-T.; Xu, L.; Antibacterial MXenes: An emerging non-antibiotic paradigm for surface engineering of orthopedic and dental implants. *Bioactive Materials* **2025**, *51*, 150. [Crossref]

206. Sun, Y.; Liu, Q.; Yu, Z.; Ren, L.; Zhang, Z.; Mussel-Inspired MXene/Antimicrobial Peptide-Integrated Photosensitive Poly(vinyl alcohol)-Based Hydrogel with Antibacterial, Anti-Inflammatory, and Electroactive Properties for Accelerated Wound Healing. *ACS Biomaterials Science & Engineering* **2025**, *11*, 2857. [[Crossref](#)]
207. Yin, H.; Zhao, J.; Zhong, H.; Zhu, N.; Zhang, Y.; Li, J.; Luo, J.; Liang, K.; Han, B.; Yang, J.; Enhanced Photothermal Antimicrobial Effect of MXene-Doped PVA Electrospun Membranes via “Bedquilt-like” Synergistically Heat Modulation and Biological Effects of Bacteria-Derived OMVs for Infected Wound Treatment. *ACS Applied Materials & Interfaces* **2025**, *17*, 27937. [[Crossref](#)]
208. Tang, H.; Zhang, Y.; Chen, Y.; Wang, J.; Huang, C.; Yang, H.; Wang, Q.; Bai, Y.; Li, P.; Gu, X.; Fan, Y.; Fabrication of Nb₂C MXene coated zinc for improved degradation, antibacterial activity, and osteogenesis for guided bone regeneration applications. *Journal of Materials Science & Technology* **2025**, *237*, 201. [[Crossref](#)]
209. Zhang, Y.; Li, M.; Zhang, H.; You, J.; Zhou, J.; Ren, S.; Feng, J.; Han, Y.; Zhang, Y.; Zhou, Y.; 3D-printed intelligent photothermal conversion Nb₂C MXene composite scaffolds facilitate the regulation of angiogenesis-osteogenesis coupling for vascularized bone regeneration. *Materials Today Bio* **2025**, *31*, 101647. [[Crossref](#)]
210. He, X.; Lv, Y.; Lin, Y.; Yu, H.; Zhang, Y.; Tong, Y.; Zhang, C.; Platinum Nanoparticles Regulated V₂C MXene Nanoplatforms with NIR-II Enhanced Nanozyme Effect for Photothermal and Chemodynamic Anti-Infective Therapy. *Advanced Materials* **2024**, *36*, 2400366. [[Crossref](#)]