

Metal Organic Frameworks, struttura e potenzialità del “materiale del XXI secolo” nell’industria conciaria

A cura di Antonio Medici, Ph.D.23/01/2026

Parte 1

I **Metal–Organic Frameworks** (MOF) costituiscono una classe innovativa di materiali porosi ibridi, ottenuti dalla coordinazione di ioni metallici o cluster metallici con leganti organici funzionalizzati (Figura 1 e 2), che si auto-organizzano in strutture cristalline tridimensionali caratterizzate da elevatissima area superficiale e porosità modulabile[1,2]. Un esempio classico dei MOF è MOF-5 ($\text{Zn}_4\text{O}(\text{1,4-benzodicarboxylate})_3$), di cui pochi grammi hanno una area superficiale grande quanto un campo da calcio.

I MOF sono considerati il potenziale "**materiale del XXI secolo**" per le applicazioni ambientali e per l'immagazzinamento di gas (come l'idrogeno). Infatti, per questo motivo l'otto ottobre 2025 l'Accademia Reale Svedese delle Scienze ha conferito il **Premio Nobel per la Chimica** a **Susumu Kitagawa, Richard Robson e Omar M. Yaghi** “per lo sviluppo di strutture metallo-organiche” (MOF, Metal-Organic Frameworks). I tre scienziati sono stati premiati per aver ideato e perfezionato una nuova e rivoluzionaria architettura molecolare.

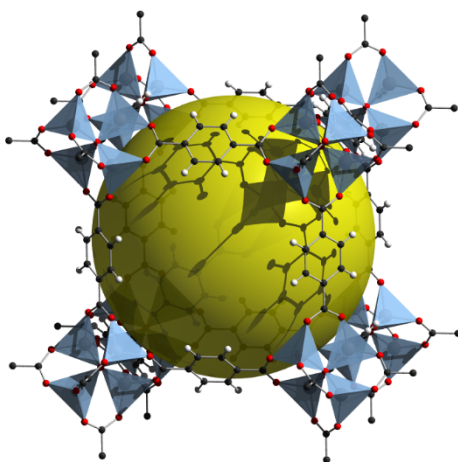


Figura 1 Struttura del MOF-5, la sfera gialla rappresenta lo spazio vuoto all'interno della struttura, i punti rossi gli atomi di ossigeno i punti bianchi e neri gli atomi di idrogeno e di carbonio del linker, al centro dei tetraedri ci sono gli atomi di zinco. (fonte Wikipedia)

La loro elevata porosità, l'ampia superficie e la versatilità strutturale li rendono adatti a una vasta gamma di applicazioni quali catalisi, rilevamento chimico, stoccaggio/separazione di gas, batterie e, in particolare, adsorbimento e raccolta dell'acqua. Lo sviluppo dei MOF ha visto un'evoluzione rapida dagli anni '90 fino ad oggi, ampliando notevolmente il numero di strutture conosciute e le possibili applicazioni. L'elevato numero delle strutture sintetizzate mostra la versatilità di questi materiali e offre la possibilità di selezionare o progettare MOF *ad hoc* per delle funzioni specifiche come la catalisi eterogenea e l'adsorbimento di sostanze tossiche.

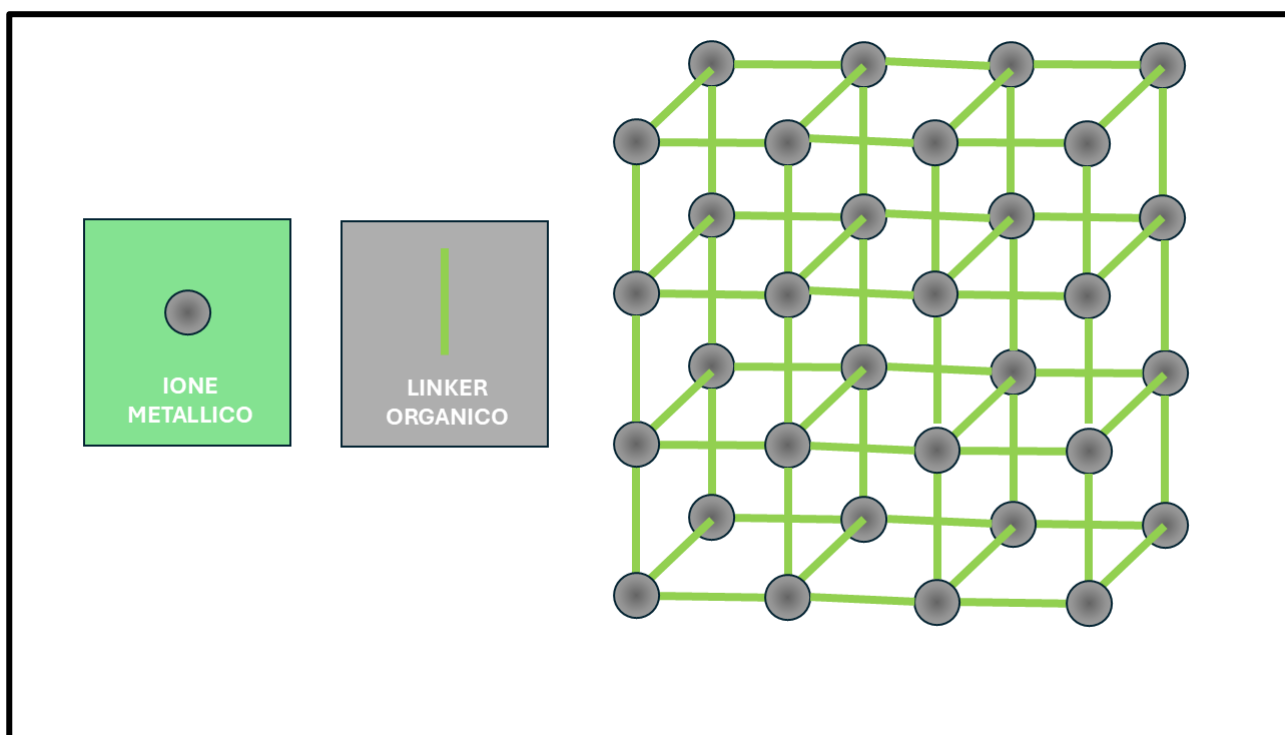


Figura 2 Schema generale dei Metal-Organic Frameworks

La caratteristica fondamentale dei MOF risiede nella possibilità di controllare in maniera fine le proprietà strutturali mediante la scelta accurata dei nodi metallici e dei leganti: questo approccio, noto come “chimica reticolare”, consente di ottenere architetture che variano da strutture unidimensionali e bidimensionali a reti completamente tridimensionali, in cui le dimensioni dei pori e la chimica delle superfici possono essere modulate per scopi specifici [3]. Le proprietà chimico-fisiche dei MOF li rendono candidati ideali per applicazioni trasversali: la possibilità di modificare le superfici con gruppi funzionali, il

controllo sulla dimensione dei pori e la capacità di introdurre difetti strutturali mirati sono elementi che permettono di sfruttare questi materiali in svariati settori tecnologici e ambientali. In particolare, i MOF hanno guadagnato un ruolo di primo piano nella purificazione dell'aria e delle acque, grazie alla loro capacità di adsorbire contaminanti organici e inorganici, inclusi metalli pesanti e sostanze tossiche, offrendo una valida alternativa ai materiali tradizionali come il carbone attivo. Uno studio del 2023 di Song ed al., ha dimostrato come sfruttando semplicemente la radiazione solare è stato possibile ottenere acqua dall'umidità atmosferica utilizzando dei **MOF passivi capaci di raccogliere** tra i 100 e 200 grammi di **H₂O** per chilogrammo di MOF, **in condizioni ambientali estreme del deserto** della Death Valley nel mese di agosto 2022 con una variazione della temperatura tra 21,9 e 60,7 °C [4].

Possibili applicazioni dei MOF nell'industria conciaria

È estremamente interessante la presenza in letteratura di studi **sull'applicazione** o la **sintesi** dei **MOF collegati all'ambito conciario**. Uno degli aspetti più incoraggianti riguarda la **sintesi di MOF** a partire da fonti di scarto industriale, come i reflui conciari "*ricchi*" di metalli derivati dallo **scarico delle conerie** e i leganti ottenuti dalla depolimerizzazione della classica **plastica delle bottiglie**, il PET (polietilene tereftalato). Il riutilizzo di questi due scarti consentono non solo di ridurre i costi di produzione e smaltimento, ma anche di diminuire l'impatto ambientale riuscendo a valorizzare due scarti industriali/urbani[5].

In questo studio del 2023, Delhali et al., hanno dimostrato come sia possibile riuscire a sintetizzare questi nuovi materiali, partendo da scarti di differenti origini. In particolare, riescono a sintetizzare alcune specifiche strutture di MOF utilizzando dei reflui conciari ricchi di Cr(III) e mediante l'idrolisi basica del legame estereo del PET per ottenere l'acido tereftalico (figura 3).



Figura 3 Struttura molecolare del polietilene tereftalato a sinistra; acido tereftalico a destra

In questo studio sono stati studiati due protocolli sintetici per ottimizzare la produzione di due classici tipi di MOF ovvero il MIL-101(Cr) e MIL-53(Cr): (i) un approccio diretto “*one-pot*”, che prevede la combinazione dell’effluente ricco in cromo e dell’idrolizzato di PET in condizioni solvotermiche/idrotermiche, e (ii) un processo sequenziale a due stadi, in cui l’acido tereftalico viene isolato e purificato prima della successiva reazione con i reflui conciari per la formazione del MOF. Le analisi di caratterizzazione hanno evidenziato come i MOF derivati da precursori di scarto presentino proprietà comparabili a quelle dei materiali sintetizzati a partire da precursori commerciali di grado elevato, in termini di area superficiale, stabilità idrolitica e termica, nonché capacità di adsorbimento dell’acqua dimostrando come sia possibile ottenere dei MOF funzionalmente equivalenti ottenuti tramite il riutilizzo di rifiuti urbani e industriali.

Nello stesso anno Chen et al., (2023) hanno valutato il potenziale utilizzo di alcuni **MOF come sostanze concianti**, per provare ad ottenere pelli con caratteristiche simili a quelle ottenute tramite concia metallica, ma riducendo notevolmente la quantità di metallo presente nel prodotto finale [6]. (continua)

Bibliografia

1. Gatou, M.-A.; Vagena, I.-A.; Lagopati, N.; Pippa, N.; Gazouli, M.; Pavlatou, E.A. Functional MOF-Based Materials for Environmental and Biomedical Applications: A Critical Review. *Nanomaterials* **2023**, *13*, 2224, doi:10.3390/nano13152224.
2. Delhali, A.; Assen, A.H.; Mohammed, A.; Adil, K.; Belmabkhout, Y. Enabling Simultaneous Valorization of Tannery Effluent and Waste Plastic via Sustainable Preparation of Cr-BDC MOFs for Water Adsorption. *Sci Rep* **2023**, *13*, 14653, doi:10.1038/s41598-023-41840-9.
3. Tang, S.; Wang, Y.; He, P.; Wang, Y.; Wei, G. Recent Advances in Metal–Organic Framework (MOF)-Based Composites for Organic Effluent Remediation. *Materials* **2024**, *17*, 2660, doi:10.3390/ma17112660.

4. Song, W.; Zheng, Z.; Alawadhi, A.H.; Yaghi, O.M. MOF Water Harvester Produces Water from Death Valley Desert Air in Ambient Sunlight. *Nat Water* **2023**, *1*, 626–634, doi:10.1038/s44221-023-00103-7.
5. Delhali, A.; Assen, A.H.; Mohammed, A.; Adil, K.; Belmabkhout, Y. Enabling Simultaneous Valorization of Tannery Effluent and Waste Plastic via Sustainable Preparation of Cr-BDC MOFs for Water Adsorption. *Sci Rep* **2023**, *13*, 14653, doi:10.1038/s41598-023-41840-9.
6. Chen, J.; Ma, J.; Fan, Q.; Zhang, W. An Eco-Friendly Metal-Less Tanning Process: Zr-Based Metal-Organic Frameworks as Novel Chrome-Free Tanning Agent. *Journal of Cleaner Production* **2023**, *382*, 135263, doi:10.1016/j.jclepro.2022.135263.
7. Ramesh, R.R.; Chandrasekar, I.; Rathinam, A.; Jonnalagadda, R.R. Chrome-Free Leather Processing Based on Amine Pendant Metal–Organic Frameworks and Dialdehyde with Enhanced Dye Affinity. *Environ Sci Pollut Res* **2024**, *31*, 66477–66496, doi:10.1007/s11356-024-35501-1.