

TECNICHE ANALITICHE AVANZATE PER L'INDAGINE RAPIDA DI PFAS VOLATILI

INTRODUZIONE

Le sostanze per- e polifluoroalchiliche (PFAS) sono contaminanti ubiquitari rilasciati da processi industriali e prodotti di consumo^[1]. Attraverso emissioni dirette e trasporto atmosferico si diffondono capillarmente, sollevando preoccupazioni per la salute pubblica a causa del loro potenziale tossicologico e del bioaccumulo^[2,4]. Sebbene i livelli varino in base alla posizione e al meteo, l'inalazione costituisce la principale via di esposizione umana.

Nei microambienti chiusi (uffici, scuole, abitazioni), i materiali da costruzione e i tessuti tecnici sono le principali sorgenti di emissione interna. Il ridotto ricambio d'aria favorisce l'accumulo di questi composti volatili, determinando concentrazioni indoor significativamente superiori rispetto ai livelli outdoor^[3].

Il monitoraggio dell'aria è quindi fondamentale per quantificare l'esposizione reale, mappare le fonti e supportare lo sviluppo di strategie di mitigazione del rischio.

Questo studio valuta le prestazioni del sistema di desorbimento termico automatizzato Markes TD100-xrTM accoppiato a gascromatografia e spettrometria di massa a triplo quadrupolo (TD-GC-MS/MS).

La tecnologia viene applicata per lo screening mirato di 19 PFAS target in aria indoor (con dati preliminari da un ambiente d'ufficio) e per la caratterizzazione delle emissioni dirette da materiali solidi.



Figura 1: Piattaforma analitica TD-GC/MS. Configurazione strumentale integrata Markes-Agilent dotata di sistema di desorbimento termico automatizzato multi-gas TD100-xrTM e sistema di condizionamento tubi TC-30.

SPERIMENTAZIONE

Obiettivo del metodo

Sviluppo e validazione di un metodo analitico per la determinazione quantitativa di 19 PFAS target, suddivisi in quattro classi funzionali rappresentative della contaminazione indoor:

- Acidi perfluoroalchil carbossilici (PFCA).
- Alcoli fluorotelomerici (FTOH).
- Acidi fluorotelomerici carbossilici (FTCA).
- Perfluorottano sulfonammidi (FOSA).

Campionamento dell'aria

I campioni sono stati prelevati in diversi ambienti di un sito industriale (uffici, laboratori, aree comuni e magazzini) utilizzando una pompa lineare Acti-VOC Plus ad un flusso costante di 100 mL/min (volume nominale: 20 L).

Analisi dei materiali (Emissioni)

Porzioni pesate di un tessuto impermeabile per bambini sono state alloggiate in camerette in alluminio del sistema Micro-Chamber/Thermal ExtractorTM. L'estrazione è stata condotta a temperatura ambiente (secondo normativa EN ISO 16000-25) per simulare le reali condizioni indoor, impiegando un flusso di azoto come gas di purge per prevenire artefatti da ossidazione.



Figura 2: Dispositivi di campionamento ed estrazione. (A sinistra) Pompa lineare Acti-VOC Plus con tubo adsorbente per il monitoraggio dell'aria; (A destra) Unità Micro-Chamber/Thermal ExtractorTM per il campionamento delle emissioni da materiali.

RISULTATI E DISCUSSIONE

Ottimizzazione performance analitiche

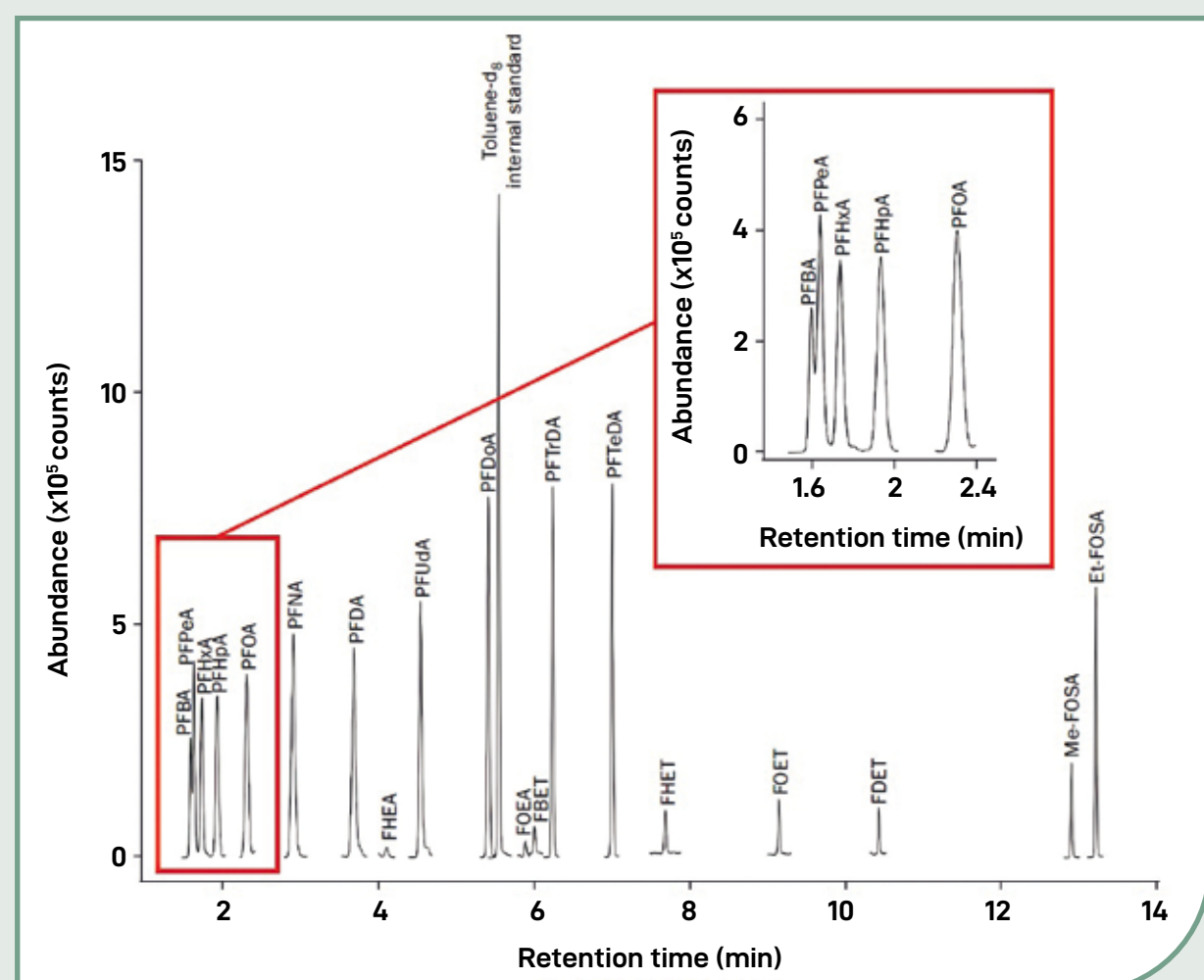


Figura 3: Profilo cromatografico di uno standard di PFAS. Separazione di una miscela standard (500 pg su tubo). Il riquadro mostra l'ingrandimento dei primi cinque analiti appartenenti alla classe dei PFCA.

I parametri GC, la linearità, la ripetibilità e i volumi di breakthrough sui tubi adsorbenti sono stati ottimizzati (rif. *Markes Application Note 166*). L'analisi ha evidenziato che i PFCA, pur mantenendo ottima linearità e riproducibilità, mostrano una parziale degradazione termica in fase di iniezione. Il limite di rilevabilità del metodo (MDL) medio è risultato pari a **4 pg** per i PFCA, **1 pg** per i FOSA, **8 pg** per gli FTOH e **48 pg** per gli FTCA. Applicando un volume di campionamento di 20 L, l'MDL medio complessivo dello screening mirato si attesta a **32~pg/m³** per i 19 composti target (allineato all'intervallo sperimentale di ~7-80~pg/m³).

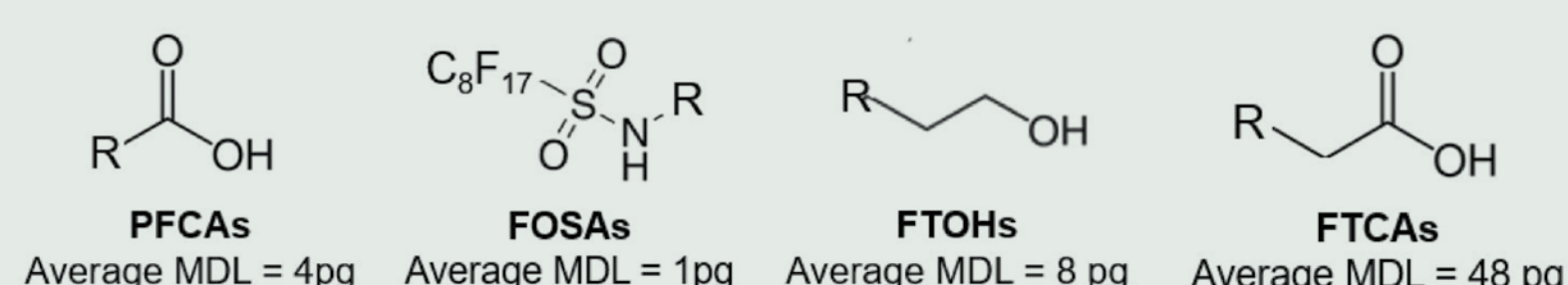


Figura 4: Limiti di rilevabilità del metodo (MDL). Valori medi di MDL calcolati per le quattro classi di composti target (PFCA, FOSA, FTOH, FTCA). Con un volume di 20 L, l'MDL medio complessivo per i 19 composti si attesta a **32~pg/m³**.

Monitoraggio aria indoor

I campioni (prelevati a 100 mL/min per 3h 20 min) sono stati addizionati automaticamente di standard interno (**Toluene-d8**) prima del desorbimento termico sul sistema TD100-xr. Il confronto tra i quattro microambienti ha rivelato la concentrazione totale di PFAS più elevata nel corridoio (**156,95 ng/m³**), fortemente influenzata dal picco di **PFTEDA** (~50 ng/m³). Il livello minimo è stato registrato nel **magazzino vernici** (**38,35 ng/m³**), a fronte di un fondo atmosferico esterno pari a **7,2 ng/m³**.

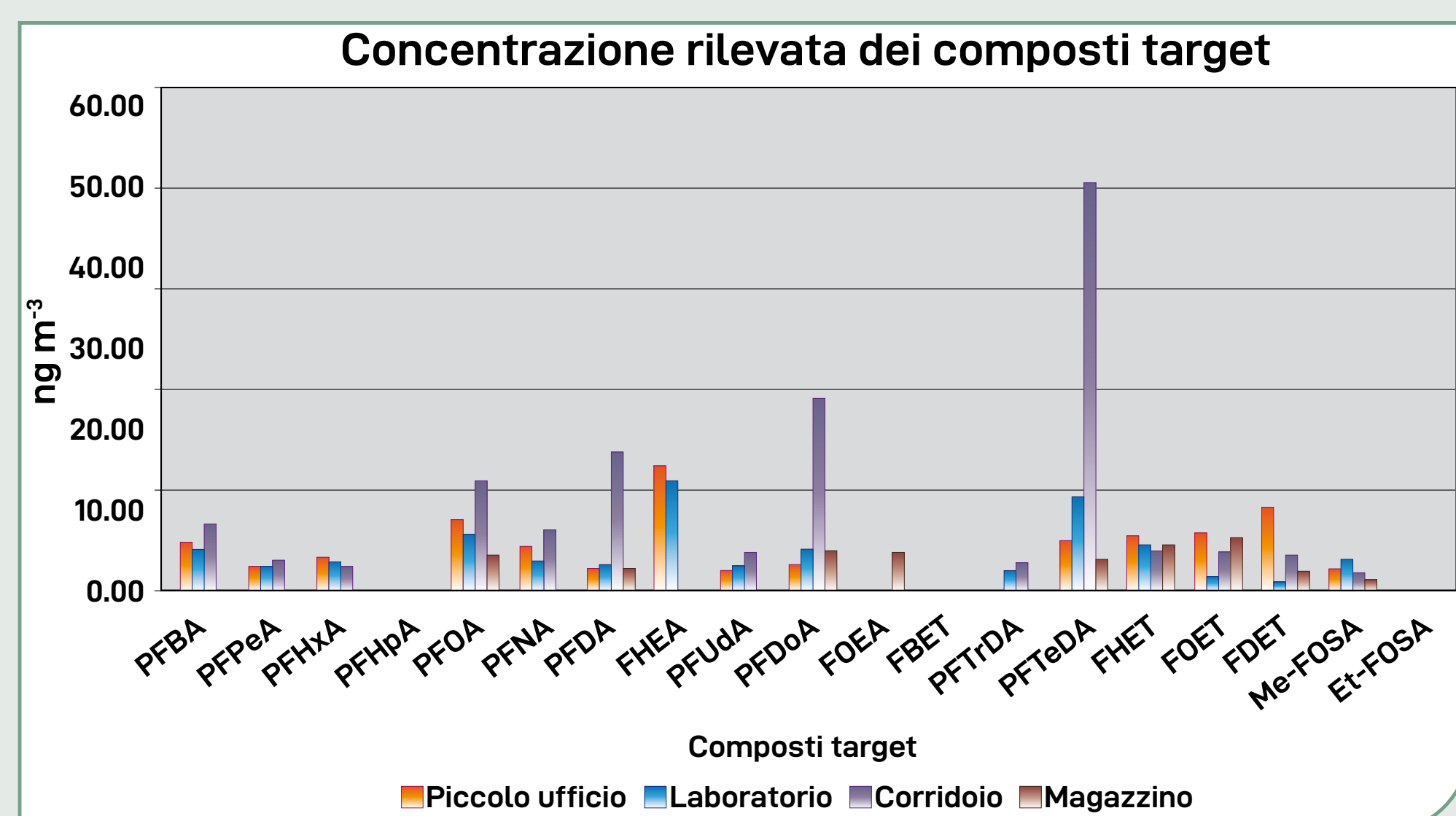


Figura 5: Profilo di contaminazione nei microambienti indoor. Concentrazioni totali dei PFAS target rilevati nei quattro spazi di lavoro, incluso l'ambiente d'ufficio. Si evidenzia l'elevato contributo del PFTEDA (~50 ng/m³) nel corridoio.

Caratterizzazione del materiale

Il profilo di emissione del tessuto impermeabile ha mostrato come composto maggioritario l'alcol fluorotelomerico **2-perfluorooctiltenolo (FTOH 8:2 o FOET)**, con un rilascio a temperatura ambiente di **3,9 ng/g**. Il tasso di emissione specifico calcolato è risultato pari a **0,131 ng/g/min**, un parametro chiave per i futuri limiti normativi sui materiali.

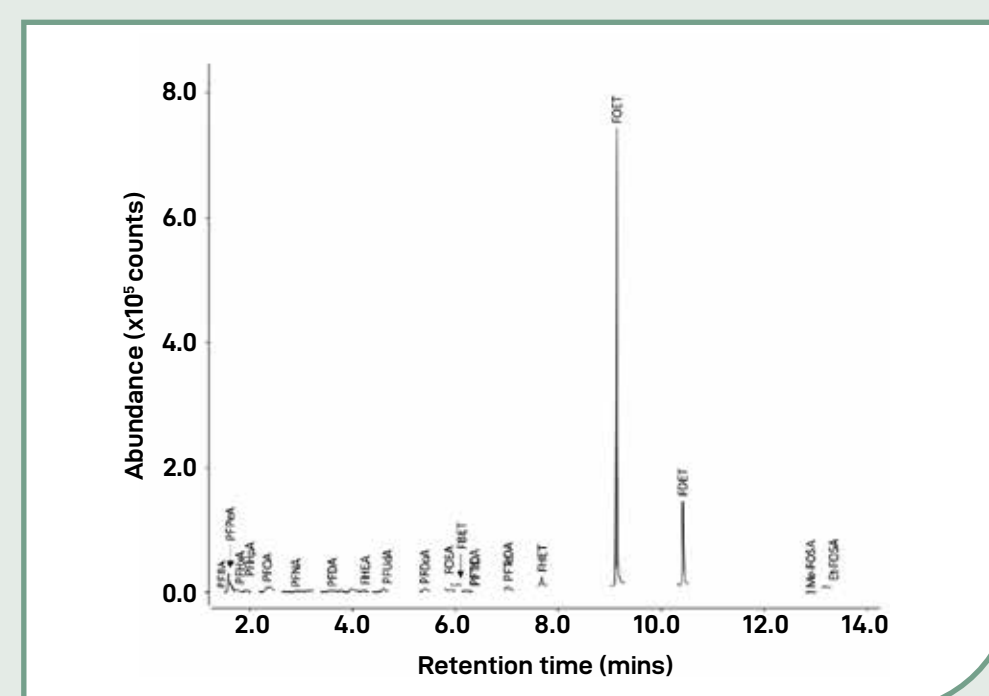


Figura 6: Cromatogramma SRM di un tessuto impermeabile. Profilo delle emissioni gassose a temperatura ambiente; i picchi maggioritari corrispondono agli alcoli fluorotelomerici FTOH 8:2 (FOET) e FTOH 10:2 (FDET) (1).



Figura 7: Sistema di estrazione termica. Camera di micro-estrazione dinamica Markes Micro-Chamber/Thermal ExtractorTM utilizzata per la caratterizzazione delle emissioni da matrici solide.

CONCLUSIONI

- La tecnologia TD-GC-MS/MS si dimostra una soluzione altamente sensibile e robusta per il monitoraggio dei PFAS nell'aria indoor, raggiungendo un MDL medio di screening pari a **32~pg/m³**.
- L'accoppiamento con camere di micro-estrazione termica (Micro-Chamber) permette l'identificazione univoca dei PFAS volatili emessi dai materiali e la quantificazione dei relativi tassi di emissione specifica a temperatura ambiente.
- I dati confermano un forte arricchimento indoor: i livelli nel corridoio sono risultati **oltre 22 volte superiori** rispetto all'aria esterna, evidenziando la necessità di ventilazione controllata come prima strategia di mitigazione.
- La metodologia sviluppata fornisce uno strumento standardizzato e indispensabile per la valutazione dell'esposizione umana per inalazione ai PFAS emergenti e per supportare le future normative sui limiti emissivi dei materiali di consumo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M.E. Morales-McDevitt et al., the air that we breathe: Neutral and volatile PFAS in indoor air, *Environmental Science & Technology Letters*
- [2] J.A. Leech, W.C. Nelson, R.T. Burnett, S. Aaron and M.E. Raizenne, It's about time: A comparison of Canadian and American time-activity patterns, *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*
- [3] C.M.A. Eichler and J.C. Little, A framework to model exposure to per- and polyfluoroalkyl substances in indoor environments, *Environmental Science: Processes and Impacts*
- [4] Perfluorooctanoic acid (PFOA), its salts and PFOA related compounds - Factsheet, Secretariat of the Basel, Rotterdam and Stockholm Conventions, 2020.