

# L'esposizione ad agenti chimici e cancerogeni in una fonderia di alluminio.

## Aggiornamento delle conoscenze e valutazione di un caso studio

Noemi Fanari<sup>1</sup>, Enrico Bergamaschi<sup>2</sup>, Maura Fenoglietto<sup>3</sup>, Nicola Santamaria<sup>3</sup>, Roberto Riggio<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Tecnico della Prevenzione nell'Ambiente e nei Luoghi di Lavoro

<sup>2</sup> Dipartimento di Scienze della Sanità Pubblica e Pediatriche, Università degli Studi di Torino

<sup>3</sup> Agenzia Regionale Protezione Ambiente (ARPA) Piemonte

### Indirizzo per la corrispondenza

e-mail: [noemifanari22@gmail.com](mailto:noemifanari22@gmail.com)

### .Abstract in italiano

Lo studio ha origine dall'esigenza, da parte del Servizio SPreSAL di Vercelli (coadiuvato dal Servizio ARPA Piemonte con sede a Grugliasco), di valutare l'esposizione ad inquinanti chimici, cancerogeni e mutageni generati dal processo produttivo di una fonderia di alluminio del territorio piemontese che è presenta particolari criticità passibili di ripercuotersi sia sulla salute che sulla sicurezza dei lavoratori.

Gli agenti chimici e cancerogeni individuati nel processo produttivo, sono i seguenti: polveri (frazione inalabile e frazione respirabile), elementi metallici (Alluminio, Cromo, Nichel, Piombo, Ferro), IPA (Idrocarburi Policiclici Aromatici), diossine e PCD-dl (policrolobifenili diossina simili).

La caratterizzazione dell'esposizione dei lavoratori all'interno della fonderia è stata effettuata a seguito di una serie di campionamenti in ambiente di lavoro, sia ambientali che personali, seguendo la metodologia tracciata dalla norma tecnica UNI-

EN 689 del 2018. Tali misurazioni sono state condotte congiuntamente con l'ente pubblico ARPA Piemonte che ha effettuato le analisi di laboratorio con metodi accreditati e validati.

I risultati ottenuti dall'analisi di laboratorio sono stati successivamente analizzati allo scopo di valutare la conformità rispetto ai valori limite di esposizione, individuati all'interno della normativa nazionale e/o internazionale.

La concentrazione sia delle polveri aerodisperse che degli elementi metallici è risultata conforme ai valori limite di soglia individuati dalla legge e pertanto la probabilità attesa di effetti sulla salute dei lavoratori appare relativamente bassa.

Per altre classi di inquinanti, quali gli IPA, le diossine ed i PCB, i risultati non evidenziano criticità puntuali rispetto ai valori di riferimento indicati da enti nazionali ed europei.

Nonostante questo, i valori di tali inquinanti sono stati relativamente più alti per alcuni siti di campionamento, quali: i forni rotativi 1 e 2, i forni a bacino e l'essiccatore.

In considerazione del fatto che la maggior parte degli agenti riportati sono classificati come cancerogeni certi per l'uomo, appare comunque opportuno ridurre l'esposizione al minimo tecnicamente possibile.

Inoltre, sussiste una notevole distanza tra i valori di concentrazione riscontrati nei campioni di fondo e quelli interni alla fonderia.

Tale situazione dimostra in modo inequivocabile l'esistenza di un inquinamento generalizzato prodotto dalla fonderia e conseguentemente un'esposizione professionale degli stessi lavoratori.

In conclusione, è possibile definire che l'azienda oggetto del nostro caso studio si trovi in una situazione di criticità per cui si rendono necessari notevoli miglioramenti tecnologici ed organizzativi che consentano di abbattere efficacemente l'esposizione sia dei lavoratori, che di ridurre l'inquinamento provocato nell'ambiente circostante.

### **.Abstract in inglese**

The study originates from the need, by the Vercelli SPreSAL Service (assisted by the Piedmont ARPA Service based in Grugliasco), to evaluate the exposure to chemical, carcinogenic and mutagenic pollutants generated by the production process of an aluminum foundry in the Piedmont area which is has particular criticalities likely to affect both the health and safety of workers.

The chemical and carcinogenic agents identified in the production process are as follows: dust (inhalable fraction and respirable fraction), metallic elements (Aluminium, Chromium, Nickel, Lead, Iron), PAHs (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons), dioxins and PCD-dl (dioxin-like polychloro biphenyls).

The characterization of the exposure of the workers inside the foundry was carried out following a series of environmental and personal samplings in the workplace following the methodology outlined by the technical standard UNI-EN 689 of 2018. These measurements were conducted jointly with the public body ARPA Piemonte which carried out the laboratory analyzes with accredited and validated methods.

The results were subsequently analyzed in order to assess their compliance with the exposure limit values, identified within national and/or international legislation.

The concentration of both airborne dust and metallic elements was found to comply with the threshold limit values identified by law and therefore the expected probability of effects on workers' health appears relatively low. Conversely, for other classes of pollutants, such as PAHs, dioxins and PCBs, the results did not highlight punctual criticalities with respect to the reference values indicated by national and European bodies.

Despite this, the values of these pollutants were relatively higher for some sampling sites, such as: rotary kilns 1 and 2, the basin kilns and the dryer. In view of the fact that most of the agents reported are classified as certain carcinogens for humans, it still appears advisable to reduce exposure to the minimum technically possible.

Furthermore, there is a considerable distance between the concentration values found in the background samples and those inside the foundry. This situation unequivocally demonstrates the existence of a generalized pollution produced by the foundry and consequently an occupational exposure of the workers themselves.

In conclusion, it is possible to define that the company object of our case study is in a critical situation for which considerable technological and organizational improvements are

necessary to effectively reduce the exposure of both workers and to reduce pollution caused in the surrounding environment..

### TAKE AT HOME MESSAGE

- Il progetto ha lo scopo di fornire una metodologia pratica e teorica per effettuare una valutazione dell'esposizione professionale a inquinanti chimici e/o cancerogeni in ambiente di lavoro.

## Introduzione e obiettivi dello studio

Lo studio (caso studio) è stato pianificato con lo scopo di valutare le possibili implicazioni per la salute dei lavoratori derivanti dall'esposizione agli agenti chimici, cancerogeni e mutageni individuati rispetto al settore produttivo in esame (fonderia di alluminio).

La caratterizzazione dell'esposizione ha quindi preso in considerazione i seguenti inquinanti:

1. Polveri (frazione inalabile e respirabile);
2. Elementi metallici (Alluminio, Cromo, Nichel, Piombo, Ferro);
3. IPA (Idrocarburi Policiclici Aromatici);
4. Diossine e PCB (Policlorobifenili)

La caratterizzazione dell'esposizione è stata effettuata a seguito di una serie di monitoraggi in ambiente di lavoro, corredati da ricerche bibliografiche utili all'aggiornamento delle conoscenze sulla normativa attuale.

Tali presupposti hanno fornito una base solida per la successiva analisi e valutazione dei risultati di laboratorio.

Lo studio è stato condotto in collaborazione con ARPA Piemonte e l'Azienda Sanitaria Locale – SPreSAL per fornire elementi di conoscenza all'organo di vigilanza, permettendo un confronto con la situazione riscontrata nel 2011.

Relativamente alle diossine, la campagna di monitoraggio all'interno dell'azienda è stata integrata con monitoraggi outdoor in prossimità all'azienda stessa al fine di valutare possibili ricadute degli inquinanti generati all'interno.

### Metodologia dei campionamenti

La procedura per l'attività di valutazione dell'esposizione è descritta nella norma tecnica "UNI EN 689/2019" che definisce una strategia per effettuare misure rappresentative dell'esposizione per inalazione ad agenti chimici in modo da dimostrare la conformità con i limiti di esposizione occupazionale.

L'attività si compone di alcune fasi iniziali, indispensabili al fine di orientare le misurazioni in campo.

In questo capitolo saranno trattate singolarmente tali attività preliminari, applicandole al caso studio.

### 1) Descrizione del processo produttivo aziendale e individuazione delle fasi più critiche.

La prima fase preliminare è lo studio dell'attività produttiva, delle singole fasi di cui si compone per ottenere il prodotto finale.

Nel caso in esame, l'azienda è una fonderia di alluminio di seconda fusione; ciò significa si occupa dell'attività di fusione e raffinazione di alluminio ricavato da rottami e scarti di lavorazione.

Tra le attività considerate più a rischio vi sono le seguenti:

1. Trattamento forni rotativi: in particolare la fase di caricamento e spillaggio;
2. Trattamento forni a bacino;
3. Essiccamento: in particolare nel caso di trucioli di alluminio contaminati da oli di processo industriali. Conseguentemente i lavoratori maggiormente esposti risulteranno quelli addetti a tali fasi produttive. (1)

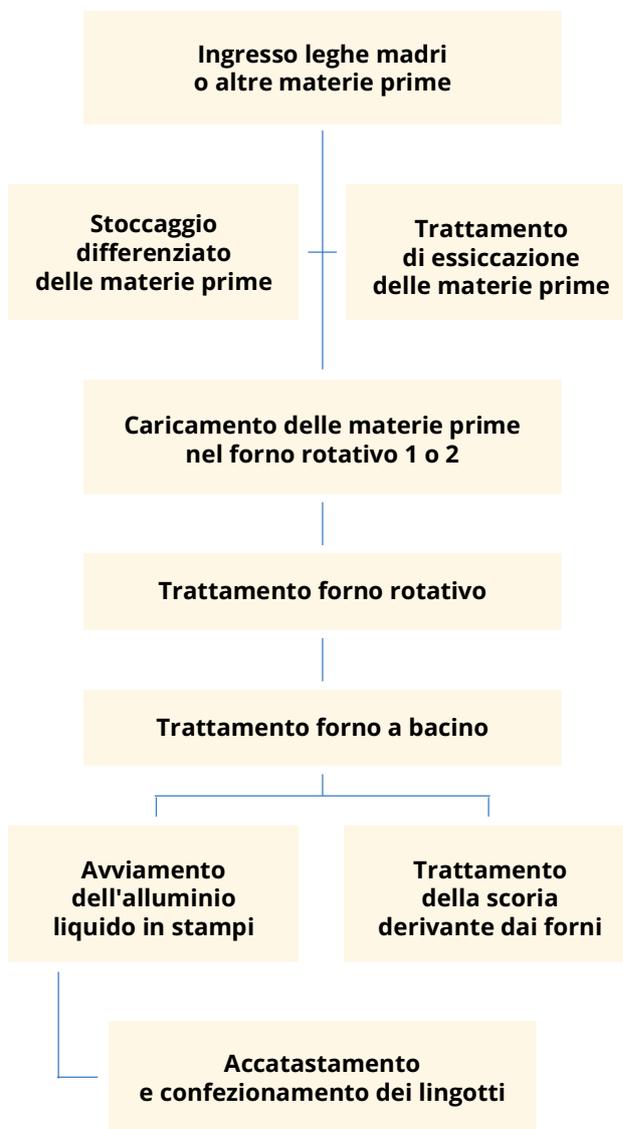
Questo è dovuto al fatto che le sostanze ricercate si formano spesso a seguito di processi produttivi termici, in particolare da una combustione incompleta dei prodotti secondari che possono trovarsi sulla superficie del materiale trattato.

Infatti, come è già stato sottolineato, la realtà lavorativa in questione è una "fonderia di seconda fusione", che raccoglie materie prime il più disparate possibile.

Ciò comporta il fatto che sulla superficie possano persistere delle sostanze che non sono alluminio puro al 100% e conseguentemente, se trattate termicamente,

hanno la possibilità di generare inquinanti anche particolarmente pericolosi.

Lo **Schema 1** fornisce una sintesi del processo produttivo aziendale.



**Schema 1.** Processo produttivo aziendale

## 2) Effetti dannosi dei principali inquinanti

La seconda attività preliminare è quella di definire gli inquinanti che potrebbero generarsi dalle fasi produttive appena descritte e per ognuno di essi identificare, inoltre, quali possano essere i potenziali effetti dannosi sull'uomo se non rispettati limiti di esposizione occupazionale.

La **tabella 1** riassume per ogni inquinante i principali effetti dannosi:

**Tabella 1.**

### POLVERI

- \\ Irritazioni delle vie respiratorie
- \\ Bronchite cronica
- \\ Enfisema
- \\ Pneumoconiosi da polveri miste

### ELEMENTI METALLICI

- \\ Alterazioni ai reni e alle ossa
- \\ Effetti neurocomportamentali e deterioramento cognitivo (2)
- \\ Alterazioni dello sviluppo
- \\ Elevata pressione sanguigna
- \\ Potenzialmente, tumore al polmone (3).

### IPA

- \\ Tumore ai polmoni, alla cute e al tratto genito-urinario (4)

### DIOSSINE E PCB-DL

- \\ Disturbi della funzionalità riproduttiva
- \\ Tumore generico
- \\ Depressione delle difese immunitarie e interferenza con il sistema endocrino (5)

## 3) Inquadramento normativo: limiti di esposizione occupazionale

Una volta definiti gli effetti dannosi di ogni singolo inquinante, è stata svolta una ricerca all'interno della normativa attuale per individuare i valori limite occupazionali.

Essi sono dei valori di riferimento per la concentrazione nella zona di respirazione di un agente chimico.

Sono per lo più stabiliti per periodi di riferimento di 8 ore; tuttavia, possono essere anche stabiliti per periodi o per escursioni di concentrazione più brevi.

Tali limiti sono stati individuati per alcuni elementi e/o composti all'interno della normativa nazionale (D.Lgs 81/2008) <sup>(6)</sup>, in altri casi da autorevoli Enti internazionali (ACGIH) e in altre situazioni non è stato possibile individuarli in quanto il limite è definito al "valore minimo tecnicamente possibile".

Tale dicitura compare nel caso di composti cancerogeni quando anche la presenza di una minima concentrazione potrebbe causare la comparsa degli effetti dannosi (tumori).

Nello **schema 2** sono riportati i valori limite occupazionali individuati per categoria di inquinante e con riferimento specifico alla letteratura da cui è stato possibile reperirli.

**Schema 2.** Valori limite occupazionali individuati per categoria di inquinante**POLVERI**

- \\ Frazione RESPIRABILE 3 mg/m<sup>3</sup> ACGIH come TLV-TWA
- \\ Frazione INALABILE 10 mg/m<sup>3</sup> ACGIH come TLV-TWA

**ELEMENTI METALLICI****PIOMBO**

- \\ 0,15 mg/m<sup>3</sup> D.lgs. 81/08 (come "piombo elemento") • 0,050 mg/m<sup>3</sup> ACGIH come TLV-TWA

**CROMO**

- \\ • 0,5 mg/m<sup>3</sup> D.lgs. 81/08
- \\ • 0,5 mg/m<sup>3</sup> ACGIH come TLV-TWA (come "cromo elemento")
- \\ • 0,003 mg/m<sup>3</sup> ACGIH come TLV-TWA (come "Cromo trivalente")
- \\ • 0,0002 mg/m<sup>3</sup> ACGIH come TLV-TWA (come "Cromo esavalente")

**ALLUMINIO**

- \\ 1 mg/m<sup>3</sup> ACGIH come TLV-TWA Frazione respirabile (come "alluminio metallico")

**NICHEL**

- \\ 1,5 mg/m<sup>3</sup> ACGIH come TLV-TWA (come "nichel elemento")
- \\ 0,2 mg/m<sup>3</sup> ACGIH come TLV-TWA (come "composti insolubili inalabili") • Direttiva 2022/431 (11)
- \\ 0,01 (frazione respirabile, misurata come nickel) dal 18/01/2025
- \\ 0,05 (frazione inalabile, misurata come nickel) dal 18/01/2025
- \\ 0,1 mg/m<sup>3</sup> fino al 18/01/2025 frazione inalabile

**FERRO**

- \\ 5 mg/m<sup>3</sup> ACGIH come TLV-TWA Frazione respirabile (come "ossido di ferro")

**IPA**

- \\ "Valore minimo tecnicamente possibile" da ACGIH

**DIOSSINE E PCB-DL**

- \\ **DIOSSINE** 10 pg/m<sup>3</sup> DFG come MAK o 120 fg/m<sup>3</sup> da Commissione Consultiva Nazionale (9)

#### 4. Strategia di valutazione di conformità

La valutazione di conformità delle misure, rispetto dei valori limite di esposizione, è stata effettuata attraverso la norma tecnica "UNI EN 689:2018". Essa illustra le modalità per l'effettuazione di misure rappresentative e omogenee sul campo e la successiva valutazione delle stesse attraverso un sistema di calcolo specifico.

Le modalità di confronto del dato con il valore limite possono essere eseguite attraverso due differenti strategie:

- ▶ Test preliminare (non statistica)
- ▶ Statistica

Nel caso del test preliminare esistono tre possibilità di scelta:

- ▶ **CONFORMITÀ:** tutti i dati sono inferiori a:
  - » 10% del limite, per una serie di 3 risultati
  - » 15% del limite, per una serie di 4 risultati
  - » 20% del limite, per una serie di 5 risultati
- ▶ **NON CONFORMITÀ:** se anche una sola misura è superiore al limite, il limite non è rispettato.
- ▶ **NON DECISIONE:** se tutti i risultati sono inferiori al limite di esposizione, ma anche un solo risultato è maggiore del 10% (test con 3 dati), 15% (test con 4 dati) o 20% (test con 5 dati).

Nel caso in cui si volesse utilizzare la **strategia statistica**, il calcolo per la determinazione della conformità tiene conto a sua volta di due possibilità nella distribuzione dei dati:

- ▶ **Distribuzione log-normale**
- ▶ **Distribuzione normale**

Nel caso della distribuzione log-normale è necessario calcolare la variabile  $U_r$  applicando i logaritmi naturali alla distanza tra la media geometrica di tutti i dati (GM) e il valore limite (OELV), rapportati a loro volta al logaritmo naturale della deviazione standard geometrica (GSD). La formula che descrive tale relazione è la seguente:

$$U_r = \frac{\ln(\text{OELV}) - \ln(\text{GM})}{\ln(\text{GSD})}$$

Il valore della variabile  $U_r$  calcolata deve essere poi confrontato con il valore di  $U_t$  tabellato (in relazione al numero di misurazioni effettuate). [Vedi **Tabella 2**]

In relazione al confronto verranno prese decisioni rispetto alla conformità o meno delle misure al valore limite.

Nel caso, invece, di distribuzione normale varia la formula per il calcolo della variabile  $U_r$ , che diventa la differenza tra media aritmetica dei dati (AM) e il valore limite (OELV), rapportati a loro volta alla deviazione standard (SD).

La formula che segue rappresenta la relazione appena descritta tra le tre variabili:

$$U_r = \frac{\text{OELV} - \text{AM}}{\text{SD}}$$

Come nella distribuzione log-normale, anche in questo caso si confronta il valore di  $U_r$  con quello di  $U_t$ , tenendo conto della tabella sopra riportata. In base ad esso verranno tratte le opportune conclusioni.

Sia nel caso di distribuzione normale, che log-normale, si possono desumere le seguenti conclusioni rispetto al superamento o meno del valore limite:

- ▶ Se  $U_r$  è maggiore o uguale a  $U_t$  si conclude la decisione è di CONFORMITÀ all'OELV;
- ▶ Se  $U_r$  è minore di  $U_t$  la decisione è di NON CONFORMITÀ all'OELV.

Tabella 2.

Numero di misurazioni dell'esposizione		Numero di misurazioni dell'esposizione		Numero di misurazioni dell'esposizione	
$n$	$U_T$	$n$	$U_T$	$n$	$U_T$
6	2,187	15	1,917	24	1,846
7	2,120	16	1,905	25	1,841
8	2,072	17	1,895	26	1,836
9	2,035	18	1,886	27	1,832
10	2,005	19	1,878	28	1,828
11	1,981	20	1,870	29	1,824
12	1,961	21	1,863	30	1,820
13	1,944	22	1,857		
14	1,929	23	1,851		

## Metodi e strumenti

Sono illustrate in tal sede le modalità di conduzione dei campionamenti per le seguenti classi di inquinanti: **polveri, metalli, IPA, diossine e PCB**.

Tali misurazioni sono state condotte congiuntamente con l'ente pubblico ARPA Piemonte; quindi, i campioni sono di tipo fiscale: unici e irripetibili.

Le indagini di laboratorio che seguono la raccolta dei campioni sono state anch'esse svolte da ARPA Piemonte con metodi accreditati e validati.

La **Mappa 1** riporta una panoramica dei confini aziendali e del posizionamento dei siti di campionamento esterni all'azienda



## Campionamento polveri

Il metodo utilizzato per la determinazione delle polveri inalabili e respirabili è quello HSE MDHS 14/4:2014. Nella tabella che segue sono riportati gli estremi dei campionamenti effettuati.

<b>Che cosa</b>	Polveri frazione inalabile Polveri frazione respirabile
<b>Dove</b>	Campionamenti personali sugli addetti della fonderia
<b>Chi</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• N° 4 addetti al forno rotativo 1</li> <li>• N° 4 addetti al forno rotativo 2</li> <li>• N° 4 addetti al forno a bacino</li> <li>• N° 1 addetto alla fase di colata</li> <li>• N° 2 addetti all'escavatore</li> <li>• N° 2 addetti stivatori</li> </ul> TOTALE - 17 campioni
<b>Durata</b>	Il campionamento si è svolto in due giornate distinte. Durata prelievo: coerente con le indicazioni dell'appendice D della UNI EN 689/2019 e comunque non inferiore ai 120 min

## Elementi metallici

Il metodo utilizzato per la determinazione dei metalli è EPA 625/R-96/010a: 1999 - IO-3.1 + IO-3.5. Nella tabella che segue sono riportati gli estremi dei campionamenti effettuati.

<b>Che cosa</b>	<b>Alluminio - Ferro - Cromo - Nichel - Piombo</b>
<b>Dove</b>	Campionamenti personali sugli addetti della fonderia
<b>Chi</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• N° 4 addetti al forno rotativo 1</li> <li>• N° 4 addetti al forno rotativo 2</li> <li>• N° 4 addetti al forno a bacino</li> <li>• N° 1 addetto alla fase di colata</li> <li>• N° 2 addetti all'escavatore</li> <li>• N° 2 addetti stivatori</li> </ul> TOTALE - 17 campioni
<b>Durata</b>	Il campionamento si è svolto in due giornate distinte. Durata prelievo: coerente con le indicazioni dell'appendice D della UNI EN 689/2019 e comunque non inferiore ai 120 min

## Idrocarburi Policiclici Aromatici

Il metodo per la determinazione degli IPA è un metodo interno validato e accreditato dal laboratorio di ARPA Piemonte.

Nella tabella che segue sono riportati gli estremi dei campionamenti effettuati.

<b>Che cosa</b>	<p><b>IPA:</b> Acenaftilene, Acenaftene, Fluorene, Fenantrene, Antracene, Fluorantene, Pirene, Benzo(g,h,i)perilene, Indeno(1,2,3-cd) crisene</p> <p><b>IPA H350:</b> Benzo(a)antracene, Crisene, Benzo(b)fluorantene, Benzo(k)fluorantene, Benzo(a)pirene, Dibenzo(a,h)antracene</p>
<b>Dove</b>	<p>Campionamenti personali sugli addetti della fonderia</p> <p>Campionamenti in postazione fissa per i campioni di fondo</p>
<b>Chi</b>	<p><b>Addetti fonderia</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• N° 1 addetto al forno rotativo 1</li> <li>• N° 1 addetto al forno rotativo 2</li> <li>• N° 1 addetto ai forni a bacino</li> <li>• N° 1 addetto all' escavatore</li> <li>• N° 1 addetto essiccatoio</li> </ul> <p><b>Campioni di fondo</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• N° 1 presso ufficio RSPP</li> <li>• N° 1 presso azienda esterna</li> </ul>
<b>Durata</b>	<p>Il campionamento si è svolto in una giornata.</p> <p>Durata prelievo: coerente con le indicazioni dell'appendice D della UNI EN 689/2019 e comunque non inferiore ai 120 min</p>

## Diossine e PCB-dl

Il prelievo è stato effettuato in conformità al metodo EPA TO9A "Determination Of Polychlorinated, Polybrominated And Brominated/Chlorinated Dibenzo-p-Dioxins And Dibenzofurans In Ambient Air".

Nella tabella che segue sono riportati gli estremi dei campionamenti effettuati.

<b>Che cosa</b>	<p><b>CONGENERI DI DIOSSINE</b></p> <p><b>CONGENERI DI PCB-dl</b></p>
<b>Dove</b>	<p>Campionamenti in postazione fissa sia per i campioni in fonderia che per i campioni di fondo</p>
<b>Chi</b>	<p><b>Campioni in fonderia</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Essiccatore</li> <li>• Cabina forno rotativo 1</li> <li>• Cabina forno bacino</li> </ul> <p><b>Campioni di fondo</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Casello autostradale</li> </ul>
<b>Durata</b>	<p>Il campionamento si è svolto in una giornata.</p> <p>Durata prelievo: coerente con le indicazioni dell'appendice D della UNI EN 689/2019 e comunque non inferiore ai 120 min</p>

### Monitoraggio outdoor (esclusivo per diossine)

Nel caso specifico di diossine e PCB è stata svolta un'indagine parallela rispetto ai campionamenti condotti all'interno dell'azienda. Tale indagine è stata effettuata raccogliendo alcuni campioni posizionati esternamente rispetto ai confini aziendali.

Lo scopo principale è stato quello di registrare la quantità delle particelle di diossine e PCB-dl che si depositano al suolo e quindi valutare se possa sussistere un rischio per la popolazione o la vegetazione circostante.

La strumentazione si compone in questo caso di deposimetri, costituiti da un recipiente aperto superiormente che raccoglie le deposizioni atmosferiche e un fondo formato da materiale fibroso che trattiene gli inquinanti; questi ultimi vengono poi recuperati dal filtro tramite estrazione in laboratorio ARPA (10).

Che cosa	CONGENERI DI DIOSSINE CONGENERI DI PCB-dl
<b>Dove</b>	Campionamenti in postazione fissa
<b>Chi</b>	<b>Sito 1</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 300 metri dai forni in fonderia</li> <li>• 360 metri dall'essiccatoio</li> </ul> <b>Sito 2</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 600 metri dai forni in fonderia</li> <li>• 610 metri dall'essiccatoio</li> </ul>
<b>Durata</b>	La strumentazione rimane esposta in atmosfera per circa un mese

### • Risultati e valutazione di conformità

La valutazione di conformità è stata condotta tenendo conto dei risultati delle misure sul campo per ogni singola categoria di inquinante.

#### a. Polveri ed elementi metallici

Dall'esame dei dati ottenuti, i valori degli elementi metallici (Piombo, Nichel, Ferro e Cromo) sono risultati ampiamente al di sotto degli standard o valori limite di esposizione (VLE). In genere, le concentrazioni aerodisperse riscontrate non superano il 5 % del VLE.

Ciò è relazionato al fatto che tali metalli sono presenti solo sporadicamente all'interno della fonderia. Di conseguenza, non è necessario applicare il metodo per la valutazione di conformità, in quanto il rispetto del limite o standard è facilmente deducibile.

Per quanto riguarda, invece, le polveri inalabili, le polveri respirabili e l'alluminio, i valori sono risultati più significativi ed il numero di dati a disposizione consente di effettuare la valutazione di conformità secondo le procedure della norma tecnica UNI EN 689/2018.

Nel caso delle polveri inalabili è stata condotta la procedura statistica, mentre per le polveri respirabili e l'alluminio la procedura condotta è, invece, di tipo formale.

Relativamente alle polveri inalabili è stata applicata la procedura statistica.

I dati a disposizione sono nove, da cui sono stati calcolati i seguenti parametri al fine di ottenere l'indice  $U_r$  (**Tabella 3**).

L'indice  $U_r$  è stato successivamente confrontato con l'indice  $U_t$  tabellare in relazione al numero di misurazioni effettuate. Nel caso in esame il numero di misurazioni è di 9 e valore di  $U_t$  corrispondente è di 3,6.

Al fine di garantire la conformità al valore limite di esposizione è necessario che il valore calcolato di  $U_r$  sia maggiore o uguale al valore tabellato di  $U_t$ . In questo caso è possibile osservare che 3,6 è maggiore di 2,035 per cui la conformità al valore limite per le polveri inalabili è garantita.

Riguardo alle polveri e all'alluminio nella frazione respirabile, è stata condotta una procedura formale, secondo la quale, per garantire la conformità al valore limite di esposizione, è necessario che tutti i dati ottenuti dalle misure sul campo siano inferiori al 20% dello stesso valore limite.

Sia per le polveri respirabili, sia per l'alluminio è stata soddisfatta questa condizione. Per cui

è garantita anche per essi la conformità con il valore limite di esposizione.

### b. Idrocarburi policiclici aromatici

Per gli Idrocarburi Policiclici Aromatici non sono presenti dei valori limite nazionali che consentano l'applicazione del metodo per la valutazione di conformità inserito nella norma UNI EN 689:2018. Inoltre, essendo alcuni di questi composti mutageni e/o cancerogeni è auspicabile che l'esposizione sia per quanto possibile "tendente a zero". L'analisi è stata effettuata attraverso alcune tabelle e grafici che riportano le concentrazioni della classe "IPA TOTALI" e della sua sottoclasse "IPA H350", ovvero quella parte di IPA che è stata classificata dalla IARC come mutagena e/o cancerogena.

Il **Grafico 1** rappresenta un confronto tra la media delle concentrazioni riscontrate tra gli addetti in fonderia e quelle riscontrate nei campioni di controllo.

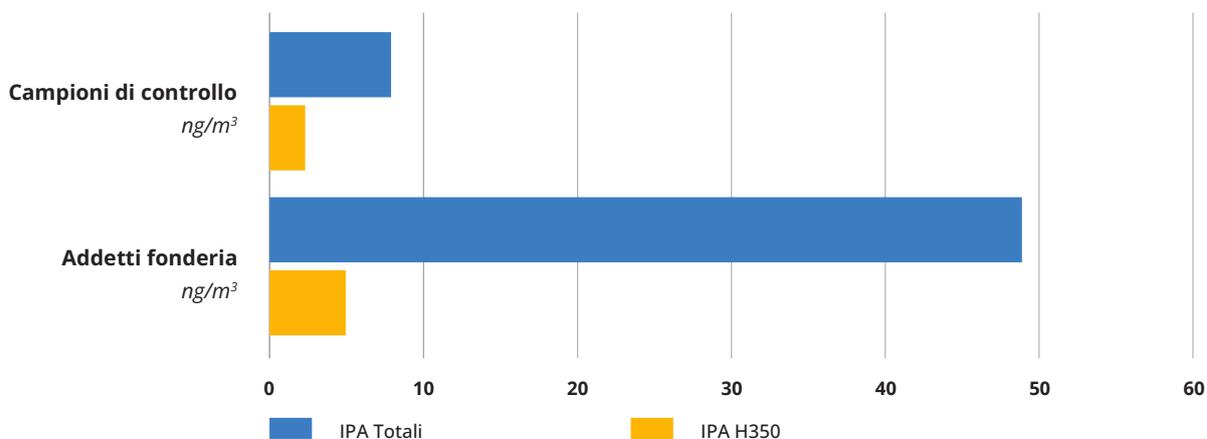
La differenza tra le concentrazioni negli addetti e nei campioni di controllo è risultata significativa, per cui è possibile affermare che sussista effettivamente un'esposizione dei lavoratori generata proprio dalle lavorazioni di fonderia. Infatti i valori di tali inquinanti erano relativamente più alti in alcuni siti di campionamento, quali: i forni rotativi 1 e 2, i forni a bacino e l'essiccatore.

**Tabella 3.**

InMedia Geometrica (InGM) <i>mg/m<sup>3</sup></i>	In Deviazione standard (InGSD) -	In Limite di esposizione $U_r$ (InOELV) <i>mg/m<sup>3</sup></i>	$U_r$ -
0,31	0,55	2,30	3,6

**Grafico 1.**

Concentrazione per IPA TOTALI e IPA H350: confronto tra addetti alle lavorazioni e campioni di controllo



In particolare, i valori di IPA totali nei siti di campionamento più critici erano compresi fra 17 e 86 ng/m<sup>3</sup>, con concentrazioni aerodisperse di IPA classificati H350 (cancerogeni certi per l'uomo) comprese fra 4 e 7 ng/m<sup>3</sup>. La causa appare legata all'utilizzo di alte temperature in presenza di materie prime contaminate in origine (essendo una fonderia di seconda fusione); questi due fattori, combinati insieme, producono concentrazioni più elevate di inquinanti.

Tale esposizione diventa potenzialmente più pericolosa trattandosi in parte di IPA H350.

Dal confronto fra i dati attuali e quelli ottenuti nella campagna di monitoraggio del 2011, è emerso che i valori attuali sono minori di quelli precedenti; tale differenza, però, potrebbe essere legata principalmente a una diversa contaminazione delle materie prime, che varia di giorno in giorno e, in parte, dal fatto che durante il campionamento tutti gli addetti sono rimasti all'interno delle loro cabine, che seppur dotate di un sistema di filtrazione poco efficiente, rappresentano comunque una barriera meccanica per l'ingresso di almeno una parte di inquinante.

**c. Diossine**

Per quanto concerne le diossine, i valori sono contenuti in un range compreso fra 464 e 3.291 fg/m<sup>3</sup>, con punte comprese fra 0,19 e 1,54 pg/m<sup>3</sup> se alla somma vengono aggiunti anche i PCB-dl.

Il dato più alto per le diossine è riscontrabile nel sito "essiccatore" (3.291 fg/m<sup>3</sup>) che, come definito in precedenza, rappresenta uno dei punti critici dell'azienda. L'essiccatore, infatti, è un'attrezzatura che tratta i trucioli di alluminio contaminati da oli di processo industriali, che devono essere rimossi.

ale trattamento permette, quindi, di eliminare tali sostanze indesiderate, ma nel frattempo, a contatto con le alte temperature, causano la formazione di inquinanti, quali le diossine e i PCB. Anche il dato della "cabina forno a bacino" si distingue rispetto agli altri con un valore di diossine di circa 1.500 fg/m<sup>3</sup>.

Questo è legato sempre alle alte temperature e alla presenza nei forni di materie prime contaminate in parte da composti organici. Rispetto ai dati relativi ai campionamenti effettuati nel 2011, i dati dei campionamenti attuali in fonderia sono più alti.

In particolare, per l'essiccatore è 10 volte più alto rispetto al dato 2011, mentre i dati dei forni e dei bacini sono 1,7 volte più alti di quelli del 2011. L'incremento comunque è molto simile tra prima e dopo per tutte le diossine.

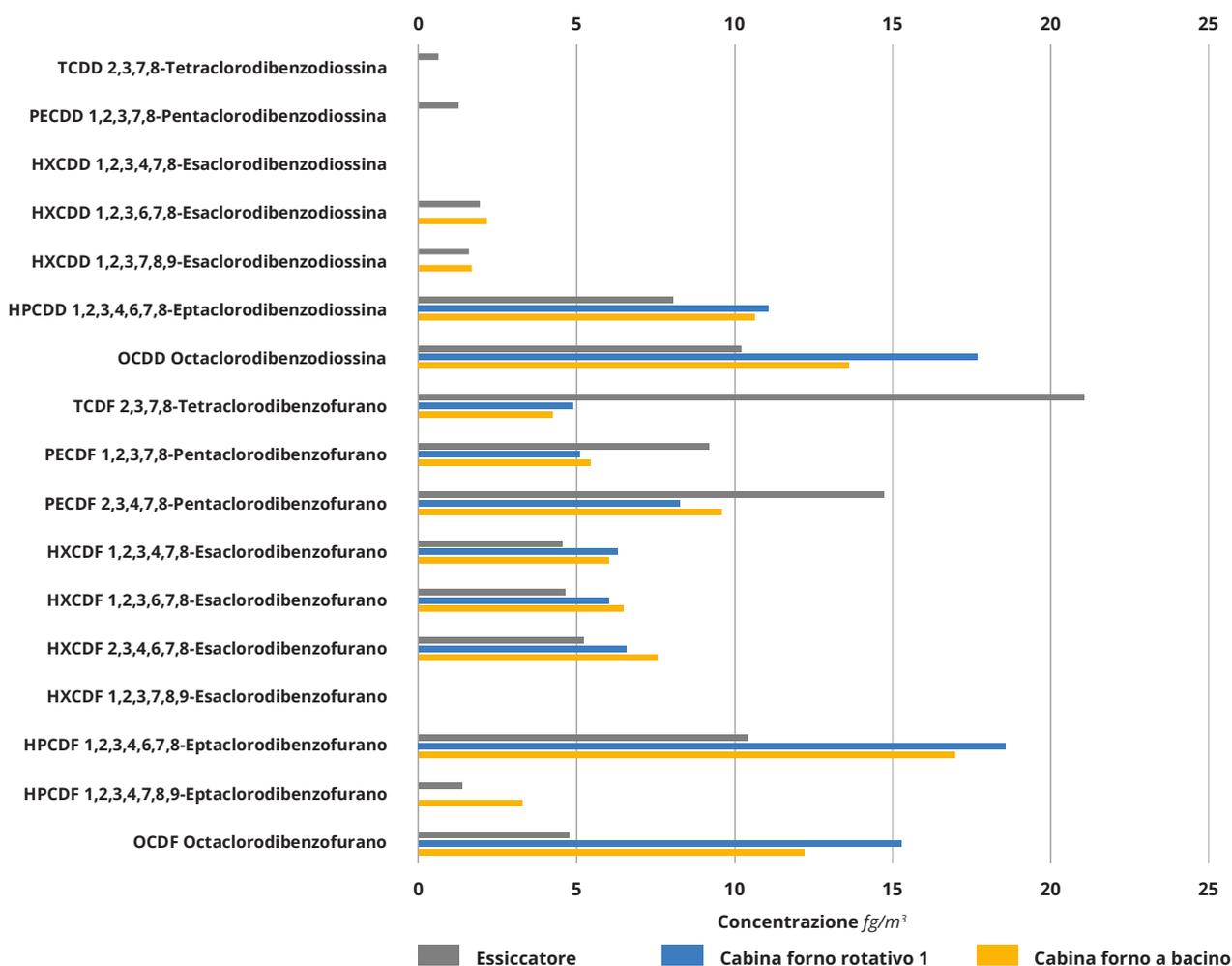
Il grafico mostra la distribuzione per ogni congenero di diossina nei rispettivi siti di campionamento: essiccatore, forno rotativo 1 e forno a bacino. Dal **Grafico 2** emerge una somiglianza tra il profilo qualitativo delle diossine generate del forno rotativo e quelle generate dal forno a bacino, mentre il distacco è visibile chiaramente nel caso del profilo dell'essiccatore.

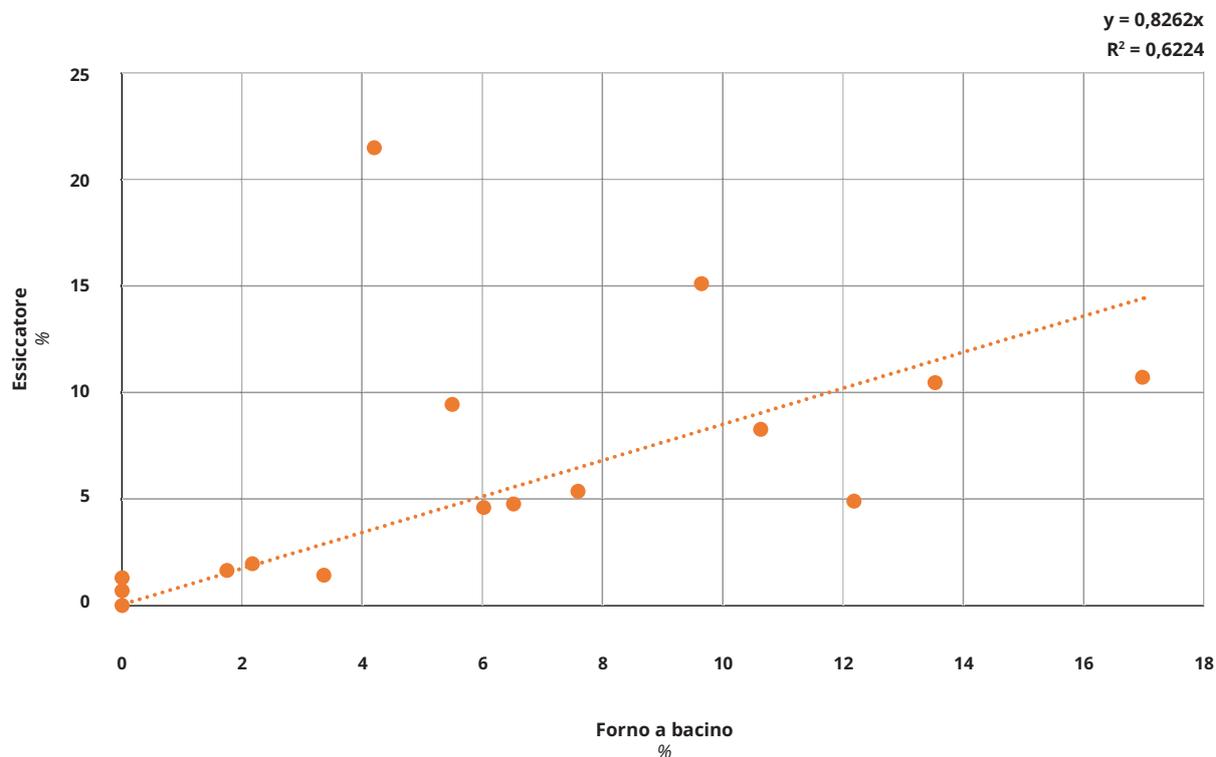
Per valutare con maggior approfondimento la situazione, è stato creato a tal scopo il **Grafico 3** di tendenza che definisce la correlazione lineare tra i dati relativi ai diversi siti di campionamento.

Dal seguente grafico si evince che la correlazione è molto bassa in quanto le modalità di formazione della miscela di diossine tra l'essiccatore e i forni rotativi e a bacino sono diverse. Di conseguenza, risulta importante sottolineare che le sorgenti identificate in questo caso sono 2, una corrispondente alla zona dell'essiccatore e una in corrispondenza dei forni rotativi e a bacino.

### Grafico 2.

Distribuzione percentuale dei congeneri di diossine nei siti di campionamento interni alla fonderia



**Grafico 3.** Grafico di tendenza: Essiccatore - Cabina forno a bacino

#### d. Diossine (monitoraggio outdoor)

I dati ricavati in seguito ai campionamenti hanno evidenziato che nell'anno 2022 il dato relativo al "casello" (l'unico punto di campionamento esterno all'azienda) si conferma al di sotto del LOQ e quindi si può sostenere con relativa certezza che le diossine non siano presenti o siano presenti in bassissime concentrazioni all'esterno della ditta.

Il monitoraggio outdoor è stato significativo per comprendere se sussiste una correlazione tra i dati esterni (sito 1 e sito 2) ed interni all'azienda (essiccatore e forni), e quindi se la ricaduta nel suolo di diossine e PCB sia effettivamente causata dall'azienda stessa.

Per valutare con maggior approfondimento la situazione, sono stati creati dei grafici di tendenza (**Grafico 4**) che definiscono il livello

di correlazione lineare tra i dati relativi ai siti di campionamento esterni e quelli interni.

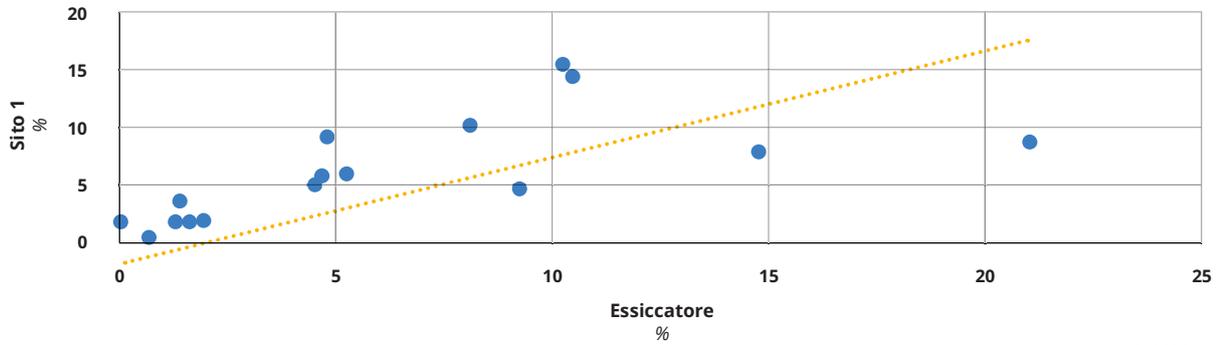
Dall'esame delle linee di tendenza e dal calcolo dei rispettivi coefficienti lineari emerge che i siti esterni sono correlati maggiormente al profilo distributivo dei congeneri derivanti dal forno a bacino e dai forni rotativi. Per quanto riguarda l'essiccatore, la correlazione più debole, ma comunque in parte significativa. Questo perché i siti esterni risentono in parte anche dei congeneri generati da tale macchinario per l'essiccazione, ma in modo molto più debole.

La correlazione riscontrata tra i dati dei siti interni (soprattutto i forni) e i dati dei siti esterni dimostra inequivocabilmente che le deposizioni al suolo di diossine sono legate all'azienda e quindi ad essa è attribuibile l'inquinamento nelle aree subito circostanti.

Grafico 4.

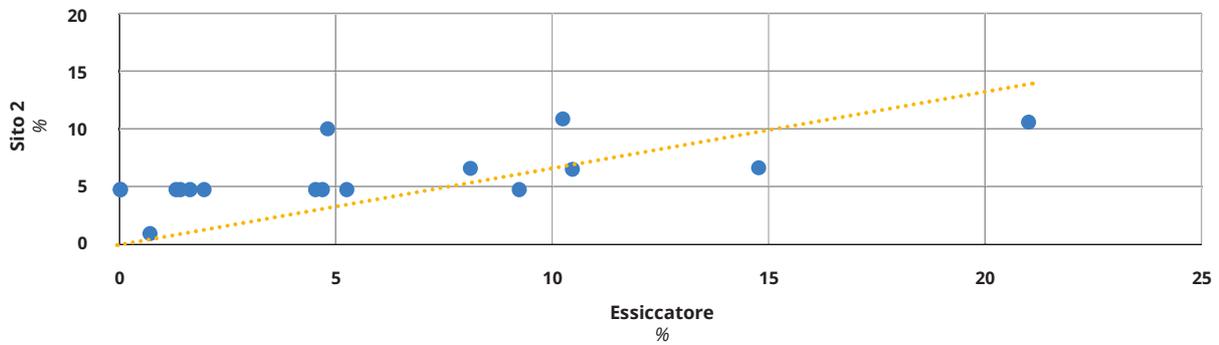
Essiccatore - Sito 1

$y = 0,7738x$   
 $R^2 = 0,7351$



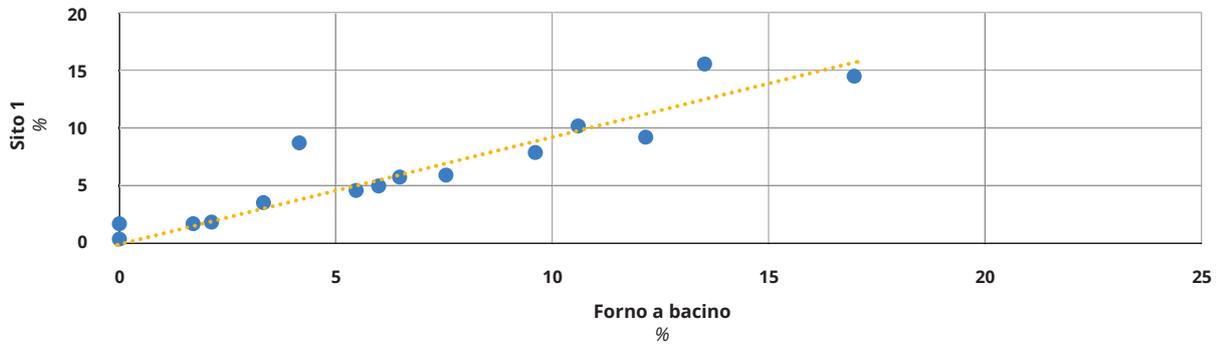
Essiccatore - Sito 2

$y = 0,6608x$   
 $R^2 = 0,7141$



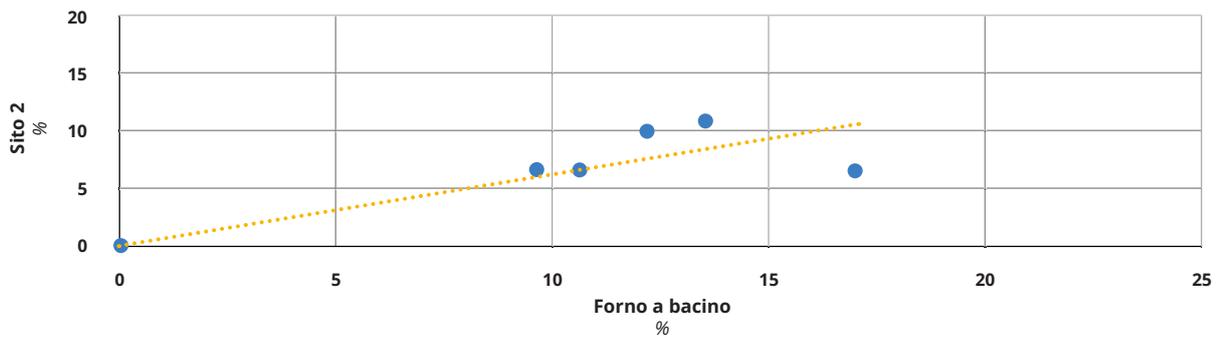
Forno a bacino - Sito 1

$y = 0,9187x$   
 $R^2 = 0,9447$



Forno a bacino - Sito 2

$y = 0,6231x$   
 $R^2 = 0,9178$



## .Conclusioni

Il progetto ha analizzato un caso studio ben definito, ossia, la valutazione dell'esposizione ad agenti chimici e cancerogeni pericolosi in una fonderia di alluminio.

I parametri valutati sono stati i seguenti:

- ✓ Polveri ed elementi metallici come macroelementi presenti nella maggior parte delle attività produttive industriali.
- ✓ Idrocarburi policiclici aromatici (IPA), diossine e policlorobifenili (PCB) come microinquinanti individuati a seguito di un'attenta analisi del processo produttivo aziendale (in quanto presenti come prodotti di formazione secondaria).

Per ognuno di questi agenti chimici è stato effettuato il campionamento durante il periodo tra maggio 2022 e luglio 2022 in collaborazione con l'ente pubblico deputato alla protezione ambientale: ARPA Piemonte.

Per quanto concerne le polveri e agli elementi metallici, i risultati si mostrano conformi ai limiti di esposizione individuati dalla legge e quindi non rilevanti per la salute e la sicurezza dei lavoratori.

Per quanto riguarda gli IPA, le diossine ed i PCB, i risultati non evidenziano criticità puntuali rispetto ai valori di riferimento indicati da enti nazionali ed europei. È da considerare però che la maggior parte di essi sono classificati come cancerogeni certi per l'uomo, di conseguenza sarebbe opportuno ridurre il più possibile l'esposizione, comunque, al minimo tecnicamente possibile. Inoltre, è stato verificato che sussiste una notevole distanza tra i valori di concentrazione riscontrati nei campioni di fondo e quelli interni alla fonderia. Tale situazione dimostra in modo inequivocabile che sussiste un

inquinamento generalizzato prodotto dalla fonderia e conseguentemente un'esposizione professionale degli stessi lavoratori. Per questo motivo è opportuno studiare eventuali misure di prevenzione che riducano la generazione di tali microinquinanti o misure di protezione verso i lavoratori più esposti.

In contemporanea è stato condotto un monitoraggio esterno esclusivo per le diossine, proprio in funzione dell'elevata pericolosità di quest'ultime nei confronti della popolazione e dell'ambiente circostante. Dai risultati ricavati si evince che il profilo qualitativo della miscela di diossine tra i dati *indoor* e i dati *outdoor* è molto simile, soprattutto tra i campioni dei forni rotativi e a bacino e quello del sito esterno più vicino alla ditta. Per questo motivo l'azienda in esame risulta responsabile dell'inquinamento da diossine nell'ambiente circostante.

I campionamenti relativi al 2022 non solo confermano la situazione aziendale, osservata in precedenza solo undici anni prima, ovvero nel 2011; attraverso un'attenta analisi dei dati relativi al 2011 è emerso che vi è stato un aumento sostanziale della concentrazione di polveri, elementi metallici, diossine e PCB rispetto alla situazione attuale. L'unico dato in calo risulta quello degli IPA, in funzione del fatto che il valore di tale microinquinante è strettamente connesso con la variabilità delle materie prime che vengono inserite nel processo produttivo.

È pertanto possibile sostenere che l'azienda oggetto del nostro caso studio si trovi in una situazione di criticità per cui si rendono necessari notevoli miglioramenti tecnologici ed organizzativi che consentano di abbattere efficacemente l'esposizione sia dei lavoratori, che di ridurre l'inquinamento provocato nell'ambiente circostante.

In considerazione del fatto che la maggior parte degli agenti riportati sono classificati come cancerogeni certi per l'uomo, appare comunque opportuno ridurre l'esposizione al minimo tecnicamente possibile.

Il tecnico della prevenzione può contribuire a identificare le sorgenti di inquinamento, a caratterizzarle e definirne l'impatto sulla salute dei lavoratori, suggerendo e contribuendo ad implementare una serie di misure di prevenzione e protezione che possano ridurre del tutto o almeno in parte la generazione dei microinquinanti nocivi.

## Riferimenti bibliografici

1. A.R.P.A.T. (Arpa Toscana) [Internet]. *Profilo di rischio fonderie di alluminio di Il fusione*; 2004 [consultato il 10/09/2022]. Disponibile all'indirizzo web: [file:///C:/Users/utente/Downloads/Profilo%20di%20rischio%20nel%20comparto\\_%20Fonderie%20di%20alluminio%20di%20Il%20...%20-%20Ispesl.pdf](file:///C:/Users/utente/Downloads/Profilo%20di%20rischio%20nel%20comparto_%20Fonderie%20di%20alluminio%20di%20Il%20...%20-%20Ispesl.pdf)
2. Mohammed, R. S., Ibrahim, W., Sabry, D., & El-Jaafary, S. I. NeuroToxicology [Internet]. *Occupational Metals Exposure and cognitive performance among foundry workers using Tau protein as a biomarker*; 05/10/2019 [consultato il 10/09/2022]. Disponibile all'indirizzo web: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0161813X1930107X?via=ihub#bib0205>
3. EpiCentro. Istituto Superiore di Sanità [Internet]. *L'inquinamento da metalli pesanti in Europa*; [consultato il 10/09/2022]. Disponibile all'indirizzo web: L'inquinamento da metalli pesanti in Europa ([iss.it](http://iss.it))
4. Potenz. D., Pansini G. *Inquinamento da idrocarburi policiclici aromatici (IPA)*. 2012 [consultato il 15/09/2022]. Disponibile all'indirizzo web: CNS\_1\_2012.pdf ([chim.it](http://chim.it))
5. Saccares S., Condoleo R., Saccares Serena, Marozzi S.. *Diossina. Norme e linee guida: la sicurezza è servita*. 04/04/2011 [consultato il 15/09/2022]. Disponibile all'indirizzo web: [https://www.researchgate.net/publication/256993010\\_Diossina\\_Norme\\_e\\_linee\\_guida\\_la\\_sicurezza\\_e\\_servita](https://www.researchgate.net/publication/256993010_Diossina_Norme_e_linee_guida_la_sicurezza_e_servita)
6. **DECRETO LEGISLATIVO 9 aprile 2008, n. 81**. Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro. [consultato il 15/09/2022]

7. **UNI EN 689:2018**. Esposizione nei luoghi di lavoro – Misurazione dell'esposizione per inalazione agli agenti chimici – Strategia per la verifica della conformità coi valori limite di esposizione occupazionale. [consultato il 15/09/2022].
8. ACGIH Associazione Italiana Degli Igienisti Industriali. *Valori limite di soglia e Indici biologici di esposizione*. Milano: AIDII; 2019. [consultato il 15/09/2022]
9. Deutsche Forschungsgemeinschaft. *List of MAK and BAT Values 2015*; 2015 [consultato il 15/09/2022]. Disponibile all'indirizzo web: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9783527695539.oth1>
10. Treccani [Internet]. *Deposimetro*; n.d. [consultato il 20/09/2022]. Disponibile al sito web: <https://www.treccani.it/enciclopedia/deposimetro/#:~:text=Apparecchio%20per%20la%20determinazione%20quantitativa,mediante%20lavaggio%20del%20fondo%20fibroso.>
11. **DIRETTIVA (UE) 2022/431 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 9 marzo 2022** che modifica la direttiva 2004/37/CE sulla protezione dei lavoratori contro i rischi derivanti da un'esposizione ad agenti cancerogeni o mutageni durante il lavoro. [consultato il 15/09/2022].