



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE**

Dipartimento di Scienze Mediche, Chirurgiche e della Salute
CORSO DI LAUREA in TECNICHE DELLA PREVENZIONE
NELL'AMBIENTE E NEI LUOGHI DI LAVORO
TESI DI LAUREA

**Monitoraggio real-time del particolato ultrafine nei fumi di saldatura
a cui sono esposti gli addetti alla saldatura di schede elettroniche**

***Relatore:* Prof.ssa Francesca Larese Filon**

***Correlatore:* Dott. Marco Rizzo**

***Laureanda:* Angelica Visintin**

ANNO ACCADEMICO 2024 - 2025

SOMMARIO

INTRODUZIONE	4
1. IL SETTORE EMS	6
1.1 L'assemblaggio di schede elettroniche	6
1.2. La saldatura di componenti su PCB.....	7
1.2.1 Descrizione del processo	7
1.2.2 Leghe saldanti.....	8
1.2.3 Leghe saldanti impiegate nel ciclo produttivo	9
1.3 Tipologie di saldatura	9
1.3.1 Saldatura automatica - Tecnologia SMT.....	9
1.3.2 Saldatura automatica - Tecnologia PTH (Pin Through Hole).....	10
1.3.3 Saldatura manuale	10
1.4 I fumi di saldatura	10
1.4.1 Caratterizzazione dei fumi di saldatura in elettronica	11
1.4.2 Effetti sulla salute dei fumi di saldatura	12
1.5 L'organizzazione delle postazioni di lavoro per l'addetto alla saldatura	14
1.6 Misure di prevenzione per l'addetto alla saldatura	14
2. SALDATURA E PARTICOLATO ULTRAFINE: UN RISCHIO EMERGENTE.....	16
2.1 Regolamentazione attuale e lacune normative	16
2.2 Processo di formazione e proprietà delle particelle ultrafini.....	18
3. EFFETTI SULLA SALUTE UMANA E VIE DI ESPOSIZIONE	22
3.1 Esposizione inalatoria	22
3.1.1 Effetti sistemici e meccanismi di difesa	24
3.2 Tratto gastrointestinale	25
3.3 Pelle	25
4. SCOPO DELLA TESI.....	26
5. MATERIALI E METODI	27
5.1 Tempi e luoghi	27
5.2 Mansioni soggette a campionamento	28
5.3 Piano di campionamento	29
5.4 Strumentazione di misura	30

5.4.1 Miniature Diffusion Size Classifier.....	31
5.4.2 Lighthouse Handheld 3016 IAQ Airborne Particle Counter	33
5.5 Analisi dei dati.....	34
6. RISULTATI	36
6.1. Statistica descrittiva.....	36
6.2 Andamento temporale - DiSCMini.....	40
Sale riunioni – bianco	40
Fondo.....	41
Postazioni di saldatura	42
6.3 Andamento temporale - Lighthouse 3016 IAQ	45
Sale riunioni - bianco	45
Fondo.....	46
Postazioni di saldatura.....	47
6.4 Distribuzione dei dati.....	50
7. DISCUSSIONE DEI RISULTATI	55
7.1 Statistica descrittiva - DiSCMini.....	55
7.2 Andamento temporale - DiSCMini.....	56
7.3 Distribuzione dei dati - DiSCMini.....	57
7.4 Statistica descrittiva – Lighthouse.....	58
7.5 Andamento temporale - Lighthouse.....	59
7.6 Distribuzione dei dati - Lighthouse	61
ALLEGATI	65
BIBLIOGRAFIA	74

*Un grazie immenso a tutti quelli che, in questi tre anni, mi hanno regalato
innumerevoli attimi di gioia e sostegno incondizionato*

INTRODUZIONE

Il settore industriale di produzione di schede a circuito stampato (PCB, abbreviazione in inglese di *Printed Circuit Board*) impiega nel ciclo produttivo sostanze e materiali di consumo che possono rappresentare una fonte di rischio per la salute e sicurezza dei lavoratori nello svolgimento delle proprie attività e, allo stesso tempo, una criticità per gli aspetti ambientali e di gestione dei rifiuti.

Nei processi di assemblaggio di PCB, la saldatura manuale dei componenti elettronici rappresenta una delle attività più critiche dal punto di vista dell'esposizione dei lavoratori alle polveri e agli inquinanti aerodispersi nei fumi di saldatura¹. In particolare, la generazione di particelle ultrafini (UFP, abbreviazione in inglese di *UltraFine Particles*, caratterizzate da un diametro inferiore a 100 nm ovvero 0,1 μm) dalla fusione della lega saldante può rappresentare un rischio significativo per la salute degli operatori, soprattutto in ambienti indoor scarsamente ventilati o privi di adeguati sistemi di aspirazione. Queste particelle, per le dimensioni estremamente ridotte, sono in grado di penetrare in profondità nel tratto respiratorio e, in alcuni casi, raggiungere il sistema circolatorio, comportando rischi potenzialmente significativi per la salute dei lavoratori esposti².

La tesi sperimentale, svolta presso un'azienda del settore Electronic Manufacturing Services (EMS), ha previsto una campagna di campionamento nelle postazioni di saldatura manuale, con l'obiettivo di valutare concentrazione e dimensione delle UFP generate durante tale lavorazione. Durante queste operazioni, infatti, la combinazione di calore, metalli e fluxanti può portare all'emissione nell'aria di aerosol e particolati, che costituiscono un rischio spesso sottovalutato in assenza di adeguate misure di controllo.

Al fine di caratterizzare l'attività di saldatura e di monitorare l'esposizione professionale a UFP il campionamento è stato effettuato con strumenti di misura in tempo reale. L'attività sperimentale è stata condotta considerando diverse variabili: tipo di lega saldante utilizzata (SnPb vs. Lead-free), durata dell'attività, uso di sistemi di aspirazione, uso di DPI respiratori, prossimità del viso all'area di emissione.

L'analisi dei dati raccolti consente di individuare eventuali criticità nel processo e di suggerire misure preventive e correttive per ridurre al minimo i rischi per la salute dei lavoratori. Oltre alla discussione dei risultati, si è cercato di portare un contributo utile

che sottolinei l'importanza delle misurazioni delle UFP come strumento concreto per la gestione del rischio in ambienti industriali tecnologicamente all'avanguardia. I dati possono supportare la definizione di strategie di valutazione del rischio chimico in conformità a quanto previsto dal D.lgs. 81/08, oltre che contribuire alla letteratura scientifica nel campo dell'esposizione a nanoparticelle in ambito occupazionale.

1. IL SETTORE EMS

L'azienda presso la quale ho intrapreso il percorso di tesi è specializzata nella produzione di apparati e schede elettroniche attraverso le fasi di preformatura, assemblaggio e completamento, saldatura, coating e collaudo.

L'industria EMS ha registrato una significativa crescita nell'ultimo decennio e si sta espandendo in modo continuo. Secondo un'analisi del Fortune Business Inside nel 2023, il mercato globale EMS è stato valutato a 538.24 miliardi di dollari, con previsioni che indicano un'ulteriore crescita fino a 1017.85 miliardi di dollari e un tasso di crescita annuo previsto del 7.4% tra il 2024 e il 2032³. Questo sviluppo riflette la continua innovazione di prodotti e il conseguente aumento della domanda di PCB, fulcro di ogni dispositivo elettronico, dall'elettronica di consumo, a sistemi industriali e alle tecnologie avanzate nei settori automotive, difesa, aeronautica e aerospace, per i quali è richiesto un elevato livello di affidabilità⁴. In questo contesto, l'attività di saldatura dei componenti sulle schede elettroniche risulta di fondamentale importanza per garantire qualità, prestazioni e per minimizzare possibili compromissioni nel funzionamento, ai fini della sicurezza dei dispositivi elettronici nei quali sono inserite.

1.1 L'assemblaggio di schede elettroniche

I PCB sono circuiti costituiti da componenti elettronici assemblati su una scheda non conduttiva, tra i quali, mediante un rivestimento metallico, si instaurano connessioni conduttive. I PCB possono essere classificati in molteplici classi in accordo alle specifiche di processo, così come indicato nelle norme tecniche di settore dell'Institute for Printed Circuits (IPC)⁵.

Variabile è pertanto l'impiego di materiali di fabbricazione e di materiali di consumo specifici per singola tipologia di PCB. In modo da attenzionare tale settore, l'Unione Europea ha adottato diverse misure di prevenzione dell'inquinamento e di produzione sostenibile, quale la restrizione dell'uso di determinate sostanze pericolose nelle apparecchiature elettriche ed elettroniche (RoHS-2002/95/CE).⁶.

Per una migliore comprensione, si riassumono le fasi del processo di produzione:

- preparazione del PCB e dei componenti elettronici: i terminali vengono tagliati e sagomati nella forma corretta

- posizionamento dei componenti su scheda
- saldatura
- coating
- ispezione visiva manuale per la verifica di eventuali difetti ed errori nel montaggio o nell'inserimento dei componenti. In caso di non conformità si attua una riparazione specifica
- collaudo (la scheda viene testata per verificarne il funzionamento complessivo)
- imballaggio

1.2. La saldatura di componenti su PCB

1.2.1 Descrizione del processo

La saldatura in elettronica ha come obiettivo principale quello di garantire una buona connessione elettrica e meccanica tra due superfici metalliche e consiste in quel processo volto ad unire le parti riscaldandole localmente, con o senza l'aggiunta di un metallo d'apporto. Tale processo forma uno strato di transizione sottile, chiamato lega d'interfaccia⁷, costituito da lega saldante e materiale di base.

La saldatura è detta eterogenea quando il materiale d'apporto fuso ha una composizione diversa da quella dei pezzi da saldare (es. brasatura in tutte le sue varianti). La brasatura viene eseguita disponendo il metallo base in modo che, tra le parti da unire, vi sia uno spazio che permetta il riempimento del giunto e l'ottenimento di un collegamento per bagnabilità e azione capillare. A seconda del punto di fusione del metallo d'apporto, la brasatura si distingue in dolce o forte. La saldatura dolce utilizza materiali d'apporto (leghe di stagno/piombo⁷) con temperatura di fusione $< 450\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Nell'operazione di brasatura si hanno, pertanto, le seguenti fasi⁸:

1. Fusione, per riscaldamento, del metallo d'apporto;
2. Riscaldamento, senza però pervenire alla fusione, dei giunti da collegare;
3. Diffusione, per capillarità, del metallo d'apporto tra i giunti;
4. Formazione locale di una lega di composizione gradualmente variabile per la progressiva diffusione del metallo d'apporto nei giunti.

Viceversa, la saldatura autogena prevede l'unione tra un metallo d'apporto e una base a composizione simile (es. saldatura a gas o ad arco elettrico).

Sebbene il termine microsaldatura o saldatura di precisione non identifica un processo specifico e non è riconosciuto come tale dal *AWS Terms and Definitions Committee*, esso rappresenta una descrizione generica di qualsiasi processo applicabile a giunti sottili o molto piccoli con lo scopo di stabilire una connessione permanente⁷.

1.2.2 Leghe saldanti

Una lega saldante è una lega a basso punto di fusione che, una volta riscaldata, fonde e scorre per capillarità tra le superfici metalliche da unire. La composizione tipica è Sn-Ag-Cu, Sn-Zn, Sn-Ag (*Lead-free*).

Esistono e vengono ancora impiegate leghe eutettiche a base di piombo per particolari esigenze⁵. Nel 2003, l'Unione Europea (UE) ha emanato la Direttiva RoHS (Restriction on Hazardous Substances) che vieta l'uso di piombo, mercurio, cadmio, cromo esavalente e alcuni ritardanti di fiamma bromurati (BFR) nella maggior parte dei prodotti elettronici venduti sul mercato dell'UE a partire dal 1 luglio 2006¹.

Il piombo è un metallo tossico con numerosi effetti sulla salute umana. Causa marcata neurotossicità, colpendo il sistema nervoso centrale e periferico, con effetti quali encefalopatia, deficit cognitivi e compromissione della sinaptogenesi. Inoltre, ostacola la sintesi dell'eme e incide negativamente sul sistema riproduttivo (es. infertilità, aborto spontaneo). Altri bersagli includono polmoni, rene e sistema cardiovascolare (es. ipertensione). Non avendo un ruolo fisiologico, anche piccole quantità di piombo sono tossiche¹⁰.

Un ulteriore aspetto critico da considerare nella composizione della lega è rappresentato dal fluxante utilizzato per facilitare il giunto di saldatura e per ottenere superfici non ossidate per l'adesione. È costituito da materiali organici o inorganici, ma il tipo più comune nell'industria elettronica è il fluxante organico di tipo resina (colofonia, prodotto naturale derivato dalla resina di pino, basata su una miscela di diversi acidi diterpenici)¹¹. Attualmente, la colofonia tradizionale è stata in larga parte sostituita da una miscela complessa derivata dalla reazione della stessa colofonia con acido acrilico, generalmente presente in concentrazioni inferiori al 3%.

1.2.3 Leghe saldanti impiegate nel ciclo produttivo

Le principali leghe impiegate, i cui fumi sono stati oggetto di campionamento, sono filo per la saldatura manuale (Sn100, Sn99/Ag0.3/Cu0.7 o Sn60Pb40), barre saldanti (Sn100 o Sn99/Ag0.3/Cu0.7) e paste saldanti per SMT (Sn96.5/Ag3.0/Cu0.5).

Dai campionamenti degli inquinanti aerodispersi effettuati in azienda nel 2024 per la ricerca di polveri inalabili, Cromo VI, metalli (alluminio, ferro come ossido, manganese, nichel, stagno, piombo) tutti i valori rilevati risultavano inferiori ai limiti di legge previsti. Si ricorda che lo stagno e il piombo sono sostanze con un limite di esposizione professionale rispettivamente di 2 mg/m³ (ACGIH-TWA) e 0,15 mg/m³ (OEL-TWA).

1.3 Tipologie di saldatura

Nel processo produttivo di fabbricazione di schede elettroniche la fase di microsaldatura può essere di tipo automatico o manuale.

1.3.1 Saldatura automatica - Tecnologia SMT

In questa fase di lavorazione su linea vengono montati i componenti di piccole dimensioni a montaggio superficiale (SMT, *Surface Mounting Technology*) sulle schede elettroniche.

La zona di PCB dove i componenti vengono posizionati è tipicamente piatta, e vi sono delle piazzole di metallo (rame, alluminio) chiamate *solder pads*, su cui viene applicata la pasta saldante, un composto di lega saldante e flussante, mediante un apposito stampo. Successivamente, mediante un macchinario pick-and-place, che preleva da bobine, vassoi o stecche, i componenti SMT vengono posizionati sulle piazzole. Successivamente le schede vengono inserite nel forno di rifusione, dove transitano nella pre-heat-zone ad aumento di temperatura graduale ed uniforme. Si entra quindi nella zona dove la temperatura è sufficientemente alta da fondere la pasta saldante e permettere ad essa di aderire completamente alle piazzole della PCB.

Dopo la saldatura la scheda può essere lavata per rimuovere i residui di flussante e lega saldante che potrebbero contribuire alla formazione di difetti. Tuttavia, tale processo risulta sempre più spesso di tipo “no clean”, cioè senza necessità di pulizia finale¹².

1.3.2 Saldatura automatica - Tecnologia PTH (Pin Through Hole)

Nel reparto PTH i componenti vengono inseriti negli appositi fori della scheda e successivamente saldati con la tecnologia *wave soldering* (saldatura ad onda). L'assemblato è trasportato sopra un bagno di lega fusa (barra saldante), e la macchina genera un'onda (*wave*) che lo ricopre. La lega saldante fusa risale nei fori della scheda per azione capillare e forma le giunzioni. La scheda elettronica, prima di attraversare l'onda di lega saldante, viene preriscaldata per attivare il flussante, eliminare i solventi utilizzati nel flussante ed evitare shock termici, attraverso raggi infrarossi o flussi di aria calda^{12,13}.

1.3.3 Saldatura manuale

La saldatura manuale viene effettuata presso stazioni di saldatura, tramite l'impiego di stilo saldante per conduzione di calore, o di penna ad aria calda per convezione. Manualmente si effettua anche il "*reflowing*" ovvero la ri-saldatura sui PCB di alcuni componenti particolari o in seguito a difetti di produzione.

Nella saldatura manuale si utilizza principalmente la lega saldante in formato filo con diametro variabile tra 0,3 mm e 1,0 mm. Si tratta di una lega metallica cilindrica, spesso con anima di flussante integrata, che facilita l'adesione eliminando ossidi e migliora la bagnabilità.

1.4 I fumi di saldatura

Il processo di microsaldatura in elettronica è accompagnato dalla formazione di fumi metallici a composizione variabile (in funzione di metallo d'apporto, gas di protezione, processo e rivestimento superficiale dei metalli). I fumi di saldatura si riferiscono alle particelle metalliche in fase gassosa e allo stato solide sospese nell'aria che si formano quando il metallo vaporizzato si condensa in particelle molto piccole. I principali componenti del fumo sono quindi gli ossidi dei metalli utilizzati nella fabbricazione del filo dell'elettrodo consumabile immesso nella saldatura. Oltre alla componente metallica è opportuno citare anche la presenza di vapori organici derivanti dalla presenza di flussante nelle leghe⁷.

Durante le attività di saldatura, la quota di UFP liberata può rappresentare fino al 60% del totale delle emissioni. La composizione tipica delle UFP in ambito elettronico è chiaramente variabile tra diversi ambienti produttivi. Il rischio di esposizione dipende

dalla concentrazione delle specie metalliche nei fumi¹⁴. Anche se i volumi sono piccoli, la frequenza ripetuta e la vicinanza alla fonte rendono l'esposizione significativa¹⁵.

1.4.1 Caratterizzazione dei fumi di saldatura in elettronica

L'esposizione professionale ai contaminanti ultrafini generati dai processi in elettronica non è ben caratterizzata in letteratura, così come la composizione in termini qualitativi dei contaminanti richiede ulteriori studi. Questa complessità deriva da una variabilità temporale e di processo, oltre che da una diversa composizione del materiale d'apporto e dei flussanti^{16,17}. Di seguito espongo i risultati di alcuni articoli al riguardo.

Zhang L. et al. (2023)¹⁷ riscontra un rischio di esposizione professionale nei laboratori di produzione elettronica in Cina. Il contaminante più abbondante rilevato è il fumo di saldatura ($1590 \mu\text{g}/\text{m}^3$), seguito da metalli pesanti presenti sotto forma di particelle di ossidi metallici: Fe ($359 \mu\text{g}/\text{m}^3$ - 22.6%), Mn ($47.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ - 2.96%), Zn ($23.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ - 1.45%), Cu ($7.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ - 0.46%), Pb ($4.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ - 0.28%), Cd e Cr (non rilevati).

Nello studio di Z. Szoboszlai, Zs. Kertész, et al. (2011)¹⁶ gli elementi più abbondanti misurati in uno stabilimento elettronico ungherese comprendono Sn, Fe, Ag e Sb. Quantità relativamente grandi di Pb e Cu erano inoltre presenti nelle fusioni. Si evidenziano anche concentrazioni di Zn, S, K, Cl, P, Br in modalità grossolana dovute alla presenza di polvere risospesa attorno all'attrezzatura di saldatura e/o da fonti di emissione intorno alle saldature. Nonostante l'impianto di filtrazione dell'aria, sono state identificate particelle di aerosol di origine esterna. Tuttavia, gli aerosol creati all'interno hanno contribuito alla maggior parte della concentrazione di PM misurata nell'ambiente. I valori PM10 e PM2.5 risultano al di sotto dei limiti standard di qualità applicabili all'aria ambiente esterna. Nel caso del PM10, i livelli di Pb nel luogo di lavoro erano in media circa 3.8 volte superiori ai livelli di Pb esterni.

Virginia Gómez et al. (2013)¹⁸ ha invece isolato la generazione di nanoparticelle da una operazione di saldatura elettronica, eseguendo il campionamento in una camera chiusa precedentemente filtrata fino ad una concentrazione di nanoparticelle trascurabile. Lo studio conferma che gli agglomerati di particelle raccolte contengono gli stessi metalli presenti nel filo di saldatura, chiaro esempio di generazione involontaria di aerosol di nanoparticelle contenenti metalli. Il processo espone l'operatore ad alte concentrazioni di

nanoparticelle - nell'ordine di 10^6 particelle/cm³ - con distribuzioni dimensionali iniziali a 35–60 nm, ed è probabile che contaminino le superfici vicine. Il processo di riscaldamento iniziale rilascia aerosol di nanoparticelle dai residui depositati sulla punta del saldatore da operazioni precedenti, che formano un aerosol di nanoparticelle non riproducibile.

La concentrazione di particelle diminuisce con la saldatura a causa dei processi di agglomerazione in fase gassosa e, in misura minore, al ricambio d'aria indotto dal campionamento. Allo stesso modo la distribuzione iniziale evolve con il tempo verso dimensioni medie maggiori, a causa dei processi di agglomerazione in fase gassosa. Un'ulteriore agglomerazione può avvenire sulle diverse superfici. La maggior parte delle nanoparticelle è chiaramente inferiore a 100 nm, con solo una piccola percentuale di nanoparticelle che supera i 300 nm.

Dalla Fig. 1 si evidenzia il ruolo svolto dalle particelle ambientali come "collettori" delle nanoparticelle generate nel processo di saldatura. La più ampia gamma di dimensioni nelle particelle ambientali potrebbe essere un fattore che favorisce i processi di coagulazione polidispersi.

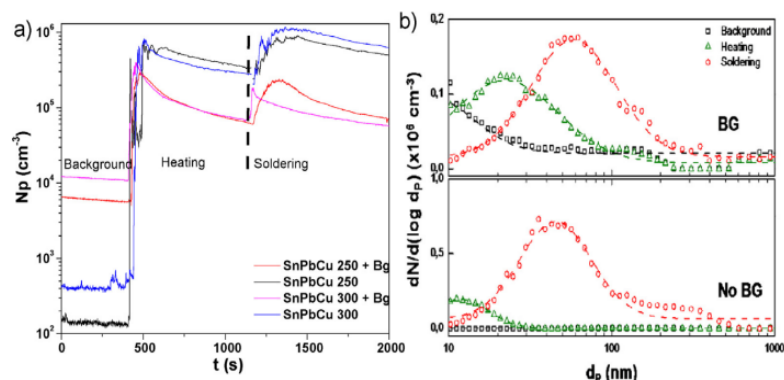


Figura 1: Conta totale delle particelle (a) e distribuzione dimensionale (b) durante il riscaldamento iniziale e la saldatura a 250 e 300 °C di filo SnPbCu in presenza e assenza di nanoparticelle di fondo ambientali

1.4.2 Effetti sulla salute dei fumi di saldatura

L'esposizione professionale ai fumi di saldatura è un grave problema di salute globale. Da studi sulla saldatura, è stato dimostrato che una quantità significativa di fumi metallici entrano nel sistema respiratorio a causa delle loro piccole dimensioni (0.5-2.5 μ m) e della vicinanza del sito di saldatura alla regione respiratoria (bocca e naso). Se inalati, i fumi di saldatura possono entrare nei polmoni, passare nel sangue, nel cervello e in altri organi causando effetti sulla salute a breve e lungo termine. Tra i diversi studi, Mendy A., Gasana

J. et al (2012)¹¹ confermano che la saldatura potrebbe essere un fattore di rischio per il respiro sibilante, ma potrebbe non essere associata a un deterioramento clinicamente significativo della funzionalità polmonare tra i lavoratori dell'elettronica.

Il grado di rischio per la salute del saldatore dovuto a tale esposizione dipende dalla concentrazione, dalla composizione e dalla durata del tempo di esposizione⁷.

L'esposizione all'ossido di stagno dalla fusione causa un effetto avverso sulla salute noto come stannosi. Come già accennato l'esposizione a lungo termine al piombo può causare anemia, neuropatie, nefropatia e dolori addominali simili a coliche, e può portare a una diminuzione delle prestazioni in alcuni test che misurano le funzioni del sistema nervoso¹⁶. Mahmoud Mohammadyan e Mahmood Moosazadeh et al. (2019)¹⁹ mostrano una relazione significativa tra il piombo nel sangue e scarsa qualità del sonno e disturbi digestivi. I lavoratori in uno stabilimento in Iran esposti al piombo al di sopra del limite raccomandato dall'ACGIH presentano una probabilità doppia di soffrire di scarsa qualità del sonno rispetto a quelli meno esposti.

L'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro ha pertanto classificato i fumi di saldatura nel Gruppo 1 - cancerogeni per l'uomo, associandoli a cancro al polmone. L'esposizione ai metalli pesanti presenti nei fumi di saldatura è stata associata a una serie di effetti avversi sulla salute, tra cui broncopneumopatia cronica ostruttiva (BPCO), fibrosi polmonare, polmonite, siderosi, asma, febbre da fumi metallici, malattie cardiovascolari. La febbre da fumi metallici può essere causata da Cu, Zn o Cd vaporizzati presenti nei fumi. Il Cadmio è stato specificamente identificato come causa di lesioni polmonari acute da inalazione chimica¹⁷.

Inoltre, il potenziale della colofonia di causare malattie respiratorie è stato segnalato fin dagli anni '70. Tuttavia, gli studi tra gli esposti hanno prodotto risultati inconsistenti. I meccanismi con cui la colofonia potrebbe indurre disturbi respiratori sono ancora poco chiari. La possibile asma dovuta alla colofonia si pensa abbia le caratteristiche di una reazione sensibilizzante¹¹.

1.5 L'organizzazione delle postazioni di lavoro per l'addetto alla saldatura

Nel contesto della saldatura manuale di componenti elettronici, l'organizzazione della postazione di lavoro riveste un ruolo fondamentale per garantire efficienza operativa, qualità del prodotto e sicurezza dell'operatore.

Il banco da lavoro è conforme alle normative ESD (Electrostatic Discharge) al fine di proteggere i componenti sensibili dalle scariche elettrostatiche. La superficie del tavolo è solitamente rivestita con tappetini antistatici collegati a terra.

Sopra il tavolo trovano posto gli strumenti essenziali per l'attività: stazione saldante, spesso affiancata da una stazione dissaldante per eventuali riparazioni, supporti per il filo di stagno, pinzette di precisione, tronchesine, lente d'ingrandimento o microscopio per i componenti più piccoli e contenitori per i rifiuti di saldatura. La postazione è sempre dotata di illuminazione diretta, spesso lampade a LED.

Il sistema di aspirazione dei fumi di saldatura è a braccio con bocchetta flessibile e regolabile. I componenti sono ordinati in vaschette o dispenser facilmente accessibili, le schede da lavorare e quelle completate hanno aree dedicate, e spesso sono presenti checklist operative o monitor che guidano l'operatore nella sequenza delle operazioni. Le postazioni distano tra loro circa 1,5 m.

1.6 Misure di prevenzione per l'addetto alla saldatura

A fini preventivi, il Servizio di prevenzione e protezione aziendale ha già attuato una serie di misure volte a mitigare il rischio da esposizione a fumi di saldatura.

L'azienda infatti adotta, ove tecnicamente fattibile, processi di saldatura *Lead-free*, minimizzando l'utilizzo di leghe a base piombo. Viene inoltre privilegiato l'impiego di flussanti di tipo *no-clean* o, in alternativa, a basso tenore di resina, al fine di ridurre la formazione di composti potenzialmente nocivi nei fumi.

Le aree produttive sono dotate di sistemi di ventilazione forzata e ricambio d'aria conformi ai requisiti del D.lgs. 81/08. Tutte le postazioni di saldatura sono equipaggiate con impianti di aspirazione localizzata, finalizzati alla captazione alla fonte degli inquinanti aerodispersi.

Gli addetti alla saldatura ricevono adeguata formazione ed informazione. Sono soggetti a sorveglianza sanitaria, comprensiva anche di spirometria e monitoraggio biologico (piombemia). Periodicamente viene effettuato il monitoraggio personale per verificare il rispetto dei limiti di esposizione professionale (OEL).

Nel contesto operativo, ai lavoratori è richiesto l'utilizzo costante di indumenti idonei, quali camici antistatici (ESD), al fine di garantire la compatibilità con le specifiche esigenze di protezione dei componenti elettronici sensibili. Vengono forniti in dotazione i DPI (guanti protettivi, occhiali di protezione e dispositivi di protezione delle vie respiratorie - facciali filtranti di tipo FFP3) da impiegare nei casi in cui i sistemi di controllo dell'esposizione risultino non sufficienti a garantire livelli di rischio accettabili.

2. SALDATURA E PARTICOLATO ULTRAFINE: UN RISCHIO EMERGENTE

Uno dei rischi emergenti durante le operazioni di saldatura nelle industrie dell'elettronica è l'esposizione dei lavoratori a particelle ultrafini. Il termine "particelle ultrafini" (UFP) è stato tradizionalmente usato per descrivere particelle aerodisperse di dimensioni nanometriche (diametro equivalente 100 nm) non prodotte intenzionalmente ma in modo incidentali da processi naturali (vulcanismo, erosione...) e antropogenici di combustione o dalla generazione di fumi^{14 21}. Nella presente trattazione si utilizza anche il sostantivo "nanoparticelle" (NP) per identificare la componente prodotta in maniera accidentale che ricade nella scala nanometrica, alla stregua di UFP. Nella valutazione del rischio in ambienti occupazionali è essenziale identificare le NP prodotte da processi industriali e distinguerle dalla concentrazione di fondo²². Da diversi studi risulta che la concentrazione di fondo varia e spesso si colloca tra 10.000 e 20.000 nanoparticelle/cm³ in ambienti industriali o uffici in aree urbane moderatamente inquinate²³.

Distribuzione delle dimensioni e composizione delle particelle indoor differiscono significativamente da quelle esterne. La componente generata all'interno rappresenta il 50%-80% del totale UFP rilevate. Quando la concentrazione di particelle indoor è bassa, questa deriva principalmente da aerosol esterni, con un rapporto indoor-outdoor inferiore a 1. Per le UFP, questo è spiegato dall'efficienza di rimozione dei sistemi HVAC o dalla deposizione per diffusione browniana².

2.1 Regolamentazione attuale e lacune normative

Nonostante le UFP rappresentino una delle maggiori preoccupazioni in termini di esposizione umana, attualmente non esistono limiti di legge per il loro monitoraggio in aria ambiente né protocolli standardizzati di valutazione del rischio²³.

Sono state ampiamente discusse e avviati diversi programmi di ricerca relativamente alle metriche più rilevanti da monitorare in relazione all'esposizione a UFP nei luoghi di lavoro²⁴. È riconosciuto che i limiti basati sulla concentrazione in massa delle particelle non controllano efficacemente le particelle più piccole²⁵. L'approccio per il PM_{2.5} non è applicabile alle UFP per diverse ragioni:

- Le UFP sono altamente variabili nello spazio e nel tempo, invalidando l'assunzione di omogeneità spaziale e temporale usata per il PM;
- Le concentrazioni di PM_{2.5} e PM₁₀ sono espresse in massa, mentre la concentrazione di UFP è misurata come numero di particelle per unità di volume, poiché la loro massa è troppo bassa per essere misurata in modo affidabile;
- Le particelle più piccole risultano più pericolose a causa del loro rapporto superficie/volume inversamente proporzionale alla dimensione. La superficie delle particelle è il dosimetrico più appropriato per valutare gli effetti sulla salute dell'esposizione al PM, come confermato da Oberdörster (2005);
- I modelli di deposizione e i meccanismi di clearance nel sistema respiratorio sono molto diversi per UFP e frazioni di PM più grandi. Le UFP possono traslocare rapidamente al cuore, fegato e cervello pochi minuti dopo l'inalazione, mentre le particelle più grandi sono solitamente rilevate solo nel tessuto polmonare.

Le piccole dimensioni e la corrispondente elevata area superficiale delle UFP e delle NP sono responsabili della loro rilevante attività biologica²⁵. La tossicità e gli effetti avversi sulla salute causati dalle UFP sono eterogenei e fortemente dipendenti dalle fonti^{21,23}.

Alcuni studi hanno mostrato che l'area superficiale delle particelle e la concentrazione numerica sembrano essere predittori migliori delle risposte infiammatorie e dello stress ossidativo indotto dalle UFP. Sono stati proposti come parametri di esposizione la concentrazione in numero²².

Per valutare la generazione di UFP, è fondamentale considerare non solo la concentrazione numerica delle particelle, ma anche il tempo necessario per raggiungere il picco e per tornare alla concentrazione di fondo. Le fonti di PM_{0.1} generano particelle con un tempo di raggiungimento del picco da pochi secondi a pochi minuti, indicando tassi di generazione molto elevati (10^{10} - 10^{12} #/min). Il tempo di decadimento per tornare alla concentrazione di fondo è molto più lungo, da decine di minuti a diverse ore, seguendo una legge esponenziale. Un basso tasso di ventilazione prolunga il tempo di decadimento.

2.2 Processo di formazione e proprietà delle particelle ultrafini

Le fasi iniziali della formazione delle UFP comprendono innanzitutto la nucleazione, ovvero la formazione di nuclei stabili di dimensioni inferiori a 2 nm. A questa fase segue la condensazione, che può avvenire in modo omogeneo o eterogeneo, attraverso l'accrescimento delle particelle per deposizione di composti gassosi. Successivamente si verifica la coagulazione, definita come il processo di collisione e fusione tra due particelle, che ne determina l'unione in un'unica entità. Tale processo comporta una riduzione rapida della concentrazione numerica delle particelle, accompagnata da un incremento della loro dimensione media. Tuttavia, l'effetto della coagulazione sulla concentrazione di massa del particolato (PM) risulta trascurabile².

Il diametro inferiore a 0,1 μm permette alle UFP di rimanere sospese nell'aria per un tempo più prolungato rispetto alle particelle più grandi. È stato riscontrato che il tempo di residenza, la dispersione, il trasporto e i processi di emissione delle UFP nell'aria sono influenzati dalle condizioni ambientali. Una caratteristica fondamentale delle UFP è la loro rapida evoluzione, in particolare delle frazioni più piccole. Queste particelle si muovono per moto browniano e si spostano per diffusione lungo i gradienti di concentrazione. In aree vicine alle fonti di emissione, dove la concentrazione è elevata, le UFP collidono facilmente con particelle adiacenti, coagulandosi in particelle più grandi o condensandosi su superfici disponibili²⁶.

Sono tre le principali modalità delle particelle atmosferiche, ovvero la distribuzione delle particelle in base a dimensione e origine, come mostrato in Fig. 2.

- modalità grossolana (coarse mode): particelle di grandi dimensioni emesse attraverso processi meccanici, poche numericamente ma con massa elevata;
- modalità di accumulo (accumulation mode): particelle di dimensioni comprese tra 0,1 μm e 1 μm che derivano da emissioni di particelle fini e successivi eventi dinamici come la loro condensazione e coagulazione. Questa modalità ha una lunga permanenza in atmosfera (7–30 giorni), finché non vengono rimosse;
- modalità di nucleazione (nucleation mode): particelle formate da molecole gassose, solitamente con dimensioni inferiori ai 50 nm, che successivamente crescono tramite condensazione di altre molecole gassose e coagulazione con altre

particelle nucleate. Sono numericamente più abbondanti ma contribuiscono poco alla massa totale²⁷.

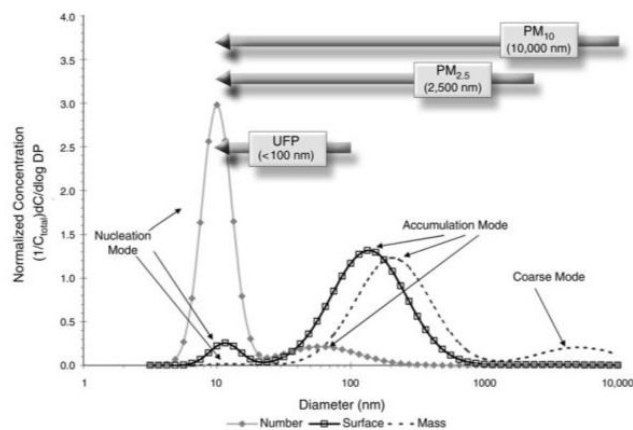


Figura 2: Comprendere gli effetti sulla salute delle particelle ultrafini ambientali²⁸

Proprietà

La concentrazione numerica delle UFP per unità di volume risulta significativamente superiore rispetto a quella delle particelle di dimensioni maggiori. Tale caratteristica determina un'elevata area superficiale specifica complessiva, favorendo l'adsorbimento di ulteriori contaminanti atmosferici, quali composti organici volatili e metalli potenzialmente tossici. Questo processo porta alla formazione di particelle rivestite o agglomerati di dimensioni maggiori, spesso associati a un incremento della loro reattività chimica e della loro tossicità complessiva²⁹.

	10 µm (Coarse)	2.5 µm (Fine)	0.1 µm (Ultrafine)
Total mass	1	1	1
Particle number	1	64	1,000,000
Surface area per particle	1	0.0625	0.0001
Total surface area per mass	1	4	100
	- Filtered in proximal airway - May irritate skin, mucosa	- Reaches peripheral airway - Cannot enter systemic circulation	- Higher adsorbed toxic material on surface - May enter systemic circulation

Figura 3: Confronto delle superfici delle particelle in base ai diversi diametri²⁷

In base a quanto sopra, le proprietà fisico-chimiche delle UFP dipendono dalla natura delle sostanze che formano il loro nucleo e dai diversi componenti chimici che costituiscono le loro superfici.

Difficoltà nella misurazione della massa delle UFP

La massa risulta un parametro problematico per la caratterizzazione delle UFP, in quanto queste presentano un diametro inferiore a 100 nm e una concentrazione di massa (massa totale per unità di volume) estremamente bassa. Tale caratteristica rende complessa la rilevazione mediante tecniche gravimetriche convenzionali, principalmente a causa dei bassi flussi d'aria impiegati dagli strumenti di campionamento (<100 L/min), che richiedono tempi prolungati per l'acquisizione di una massa quantificabile. Di conseguenza, nella pratica operativa, la massa delle UFP viene spesso stimata includendo frazioni dimensionali leggermente superiori, come quelle con diametro inferiore a 0,180 μm o 0,250 μm .

Concentrazione numerica come parametro preferenziale

La valutazione della concentrazione numerica per unità di volume (Particle Number Concentration, PNC) risulta metodologicamente più appropriata per le UFP. L'elevata numerosità è direttamente correlata a un aumento della tossicità potenziale. Inoltre, il comportamento aerodinamico delle UFP, in termini di aggregazione o agglomerazione, influenza significativamente il loro grado di deposizione nei diversi tratti del tratto respiratorio²¹.

Relazione tra diametro, area superficiale e tossicità

Con la riduzione del diametro delle particelle, si osserva un marcato incremento dell'area superficiale specifica. Tale incremento determina un aumento del numero di atomi o molecole esposti sulla superficie, accrescendo la reattività chimica e l'attività biologica della particella. La concentrazione numerica viene pertanto considerata anche un indicatore indiretto dell'area superficiale totale, poiché si assume che le UFP dominino la PNC; secondo modelli geometrici di base, a parità di massa, la superficie totale aumenta esponenzialmente con la diminuzione del diametro².

Una maggiore area superficiale disponibile aumenta il potenziale d'interazione con le strutture cellulari, favorendo la produzione di specie reattive dell'ossigeno (Reactive Oxygen Species, ROS), responsabili della generazione di radicali liberi e dell'induzione di stress ossidativo. L'interazione tra UFP e metalli di transizione adsorbiti può amplificare tali effetti, innescando una risposta infiammatoria più marcata²¹.

Influenza di carica, energia e composizione chimica

La carica superficiale delle nanoparticelle influisce sull'interazione con le molecole biologiche, modulando la capacità di penetrazione attraverso le membrane cellulari. L'energia superficiale gioca un ruolo critico: particelle idrofiliche con bassa carica negativa o neutra mostrano una scarsa affinità con le proteine plasmatiche, riducendone l'accumulo intracellulare. Al contrario, le nanoparticelle idrofobiche, caratterizzate da un'alta energia superficiale, tendono ad accumulare proteine sulla loro superficie, potenzialmente causando alterazioni nella struttura lipidica delle membrane cellulari. La composizione chimica influenza direttamente la reattività superficiale, l'interazione con le biomolecole, la capacità di dispersione e la biopersistenza nell'organismo.

Persistenza e degradabilità delle nanoparticelle

Le nanoparticelle biodegradabili possono risultare tossiche a causa della formazione di metaboliti o sottoprodotti potenzialmente reattivi nell'organo bersaglio. Parallelamente, le nanoparticelle non biodegradabili tendono ad accumularsi nei tessuti e nelle cellule, generando alterazioni biologiche persistenti, anche a lungo termine ¹⁴.

3. EFFETTI SULLA SALUTE UMANA E VIE DI ESPOSIZIONE

L'inalazione di polveri e fumi metallici è stata associata a effetti avversi sulla salute, quali febbre da fumi metallici e altre malattie respiratorie¹⁴. A causa del basso numero di studi sull'uomo, gran parte delle conoscenze sulla potenziale tossicità delle nanoparticelle è stata valutata attraverso studi in vivo e in vitro.

Esistono importanti variabilità nello studio dell'esposizione occupazionale alle UFP e al momento non esiste alcun protocollo standardizzato di valutazione del rischio³⁰.

3.1 Esposizione inalatoria

L'inalazione rappresenta la principale via di esposizione e la più critica, poiché le particelle di dimensioni nanometriche possiedono la capacità di penetrare profondamente nel sistema respiratorio²⁹.

Il principale meccanismo di deposizione per le UFP è la diffusione browniana, causata dallo spostamento dovuto alle collisioni con le molecole d'aria. È stato osservato che la tossicità delle nanoparticelle si correla più adeguatamente all'area superficiale depositata nei polmoni³¹.

Esistono differenze significative per quanto riguarda il comportamento durante la deposizione e la clearance nel tratto respiratorio. Le particelle di diametro maggiore o uguale a 5 μm (frazione coarse) si depositano, di norma, nelle vie aeree superiori (naso, faringe, laringe, trachea e bronchi); quelle più piccole, di diametro compreso tra 1 e 5 μm (frazione fine), raggiungono la porzione terminale dell'albero respiratorio (bronchioli terminali, alveoli). Le particelle ultrafini, di diametro inferiore a 1 μm , si concentrano nella zona alveolare del polmone, dove possono essere rapidamente assorbite³². Le nanoparticelle presentano una tossicità potenzialmente elevata anche a basse concentrazioni, in quanto possono veicolare contaminanti organici adsorbiti sulla loro superficie e generare specie reattive dell'ossigeno (ROS), in virtù della loro elevata area superficiale specifica¹⁶.

Le particelle più piccole (circa 5 nm) riescono a depositarsi all'interno dell'intero apparato fino al 92% del totale presente, di cui il 27% nella regione alveolare.

All'aumentare delle dimensioni (circa 100 nm) si osserva una netta diminuzione del deposito totale (33%), ma con deposizione nella regione alveolare che si attesta al 21%. Risulta quindi evidente come la componente dimensionale delle nanoparticelle ricopra un ruolo fondamentale nella valutazione del rischio espositivo, in quanto all'aumentare delle dimensioni si ha una riduzione globale del deposito all'interno dell'apparato respiratorio totale, ma si denota un aumento preponderante nel comparto alveolare²¹.

La deposizione frazionaria delle particelle nelle tre regioni del tratto respiratorio umano (nasofaringea, tracheobronchiale e alveolare) è riportata nella Fig. 4. Il modello si applica a particelle che vengono inalate come singole particelle di una data dimensione e non come aggregati. In ciascuna delle tre regioni vengono depositate quantità significative di una certa dimensione di NP (1–100 nm).

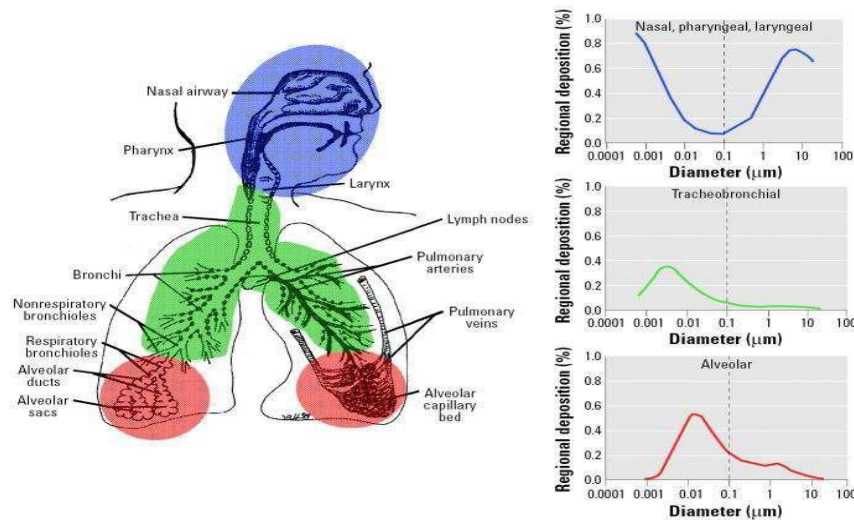


Figura 4: Deposizione frazionaria delle particelle inalate nelle tre regioni del tratto respiratorio umano²⁵

I risultati relativi alla deposizione di Pb, Sn, Fe e S su un campione di saldatori in un'industria elettronica ungherese¹⁶ mostrano una correlazione diretta tra il volume di ventilazione per minuto e l'incremento del tasso di deposizione totale. Tale deposizione risulta superiore negli uomini rispetto alle donne (circa 1–15%) e durante esercizio leggero (8–15%) rispetto alla posizione seduta, a causa dell'aumento della frequenza respiratoria e della ridotta profondità inspiratoria.

In tutti gli scenari, la regione nasofaringea ha registrato la frazione di deposizione più elevata. Lo Sn ha mostrato la massima deposizione totale (85–91%), attribuibile alla sua predominanza nella frazione grossolana e all'elevata efficienza filtrante delle vie aeree superiori.

Sebbene Pb e Fe presentassero distribuzioni dimensionali differenti, i tassi di deposizione totale risultavano simili. Tuttavia, il Pb si depositava maggiormente nella regione nasofaringea, mentre il Fe mostrava una maggiore deposizione nella regione alveolare. La deposizione totale del Pb variava tra il 55% e il 67%, indicando una significativa penetrazione e permanenza nel sistema respiratorio.

Infine, lo Sn ha mostrato i valori più bassi di deposizione totale (24–30%), ma con una quota significativa che raggiungeva la regione alveolare, da cui è possibile una traslocazione sistemica attraverso il flusso sanguigno¹⁶.

3.1.1 Effetti sistemici e meccanismi di difesa

Dopo la deposizione nel tratto respiratorio, le NP sono in grado di sfuggire a specifici meccanismi di sorveglianza e traslocare facilmente tramite differenti percorsi.

I meccanismi di difesa comprendono forme di clearance mucociliare a livello tracheobronchiale e la fagocitosi tramite la clearance dei macrofagi alveolari a livello alveolare. Poiché la fagocitosi da parte dei macrofagi alveolari è inefficiente nel caso delle UFP, vari studi hanno mostrato che le UFP depositate nel tratto respiratorio raggiungono facilmente siti epiteliali e interstiziali³³.

Uno di questi meccanismi di trasferimento implica la transitosi attraverso l'epitelio del tratto respiratorio, raggiungendo l'interstizio e accedendo alla circolazione sanguigna, direttamente o attraverso i vasi linfatici, con conseguente distribuzione sistemica nell'organismo. L'entità della traslocazione extra polmonare dipende fortemente dalle caratteristiche superficiali e dalla chimica delle particelle, oltre che dalla dimensione delle particelle. È stata segnalata la distribuzione al cuore, ai reni, al fegato, alla milza, al midollo osseo e ad altri organi bersaglio²⁵.

Un'altra via di traslocazione coinvolge la captazione da parte delle terminazioni nervose sensoriali incorporate negli epitelii delle vie aeree, seguita da traslocazione assonale alle strutture gangliari e del sistema nervoso centrale. Studi hanno rivelato che il nervo olfattivo e il bulbo olfattivo sono effettivamente portali di ingresso nel SNC per particelle nanometriche instillate per via intra-nasale.

Numerosi studi condotti su ratti esposti a particelle di dimensioni variabili hanno evidenziato importanti differenze nella distribuzione e ritenzione polmonare³⁴.

A distanza di 24 ore dall'esposizione, i polmoni degli animali venivano sottoposti a lavaggio bronco alveolare multiplo, procedimento che consentiva di recuperare circa l'80% dei macrofagi polmonari totali, in accordo con precedenti protocolli sperimentali. I risultati indicavano che circa l'80% delle particelle ultrafini (UFP) rimaneva all'interno del polmone dopo il lavaggio, mentre solo il 20% delle particelle di dimensioni superiori a 0,5 μm risultava trattenuto. Tale differenza suggerisce che le nanoparticelle fossero in gran parte localizzate all'interno delle cellule epiteliali o avessero subito un processo di traslocazione verso l'interstizio polmonare³⁵.

3.2 Tratto gastrointestinale

Le NP eliminate dal tratto respiratorio attraverso l'escalatore mucociliare possono successivamente essere ingerite nel tratto gastrointestinale (GI)²³. Quando ingerite, le NP possono essere assorbite sistemicamente tramite i linfatici, ma la maggior parte viene escreta con le feci. Solo pochi studi hanno investigato l'assorbimento e la distribuzione dei nanomateriali tramite il tratto GI, e la maggior parte ha mostrato una rapida eliminazione. È probabile che ci siano differenze nell'assorbimento gastrointestinale dipendenti sia dalla chimica superficiale sia dalla dimensione delle particelle³⁴.

3.3 Pelle

La contaminazione delle superfici di lavoro e della cute dei lavoratori sembra essere una fonte secondaria di esposizione alle UFP, suggerendo un possibile aumento del rischio di esposizione nei lavoratori principalmente per via inalatoria²³. A causa del gran numero di variabili che influenzano l'assorbimento dermico delle nanoparticelle, i dati trovati in letteratura sono spesso contraddittori²³.

L'assorbimento cutaneo delle NP potrebbe portare ad assorbimento sistemico attraverso due possibili vie:

- via intercellulare, seguendo i canali lipidici tra i corneociti verso strati cutanei più profondi.
- via degli annessi (follicoli piliferi, ghiandole sudoripare).

4. SCOPO DELLA TESI

Alla luce delle evidenze scientifiche che dimostrano la correlazione tra esposizione a UFP ed effetti avversi sull'organismo, il presente lavoro di tesi si propone di:

- Identificare le postazioni nei reparti produttivi in cui si verifica la maggiore emissione di particelle fini e ultrafini da processi di saldatura. In specifico, la saldatura, manuale o automatica, è parte integrante di numerosi processi all'interno della produzione, non essendo concentrata in un'unica area o reparto. Proprio per tale motivo il gruppo omogeneo a cui fa riferimento la valutazione è stato individuato considerando tutti quei soggetti accomunati dallo svolgimento della mansione "Plus Saldatura";
- Analizzare i dati dei campionamenti così come da piano, rappresentativi delle attività lavorative svolte, per la caratterizzazione quantitativa e dimensionale delle particelle presenti in aria nell'ambiente di lavoro durante le attività di saldatura;
- Valutare i livelli di esposizione degli addetti saldatura alle particelle fini e ultrafini per il gruppo omogeneo esposto. In specifico, lo scopo è quello di ottenere valori validi e rappresentativi dell'esposizione dei lavoratori, considerate tutte le possibili condizioni ragionevolmente prevedibili durante il turno di lavoro;
- Analizzare l'efficacia delle misure di prevenzione e protezione già adottate in azienda, con riferimento sia ai dispositivi di protezione individuale (DPI) sia a quelli di tipo collettivo (DPC);
- Fornire, in base ai risultati derivanti da questa analisi, laddove necessario, indicazioni per l'adozione di misure di riduzione del rischio, attraverso proposte migliorative in ambito tecnico-impiantistico, organizzativo e formativo al fine di garantire una ottimale protezione dei lavoratori.

5. MATERIALI E METODI

Nel presente capitolo si descrivono materiali e metodi per l'esecuzione di campionamenti significativamente rappresentativi.

Preliminarmente all'esecuzione dei campionamenti, è stata innanzitutto appurata la coerenza dell'attività lavorativa con quanto previsto nella strategia di campionamento. Sono state raccolte le informazioni pertinenti per la futura interpretazione/validazione dei risultati quali i compiti eseguiti, i materiali utilizzati (volumi e composizioni chimico-fisiche), le condizioni ambientali o eventuali interferenze e le misure di prevenzione/protezione attuate.

Non essendo esclusa la liberazione in aria di nanoparticelle, si è quindi proceduto con il secondo livello di valutazione dell'esposizione tramite strumentazione portatile per l'analisi in tempo reale della concentrazione e delle dimensioni di nanoparticelle, fondamentali per l'analisi delle variazioni durante il periodo di campionamento.

Un adeguato programma di monitoraggio dovrebbe inoltre garantire la possibilità di raccogliere il campione su filtri per eseguire la successiva caratterizzazione. Ad oggi non esistono strumenti in grado di soddisfare, in un unico dispositivo, tutti i requisiti citati^{31,37}. Nella presente tesi non si è potuto caratterizzare qualitativamente la componente ultrafine né discriminare la componente di fondo.

5.1 Tempi e luoghi

I campionamenti sono stati effettuati nei due stabilimenti produttivi dell'azienda in quattro diverse giornate, rispettivamente 14 maggio 2025 a San Giovanni in Persiceto (SGP) e 15, 19 maggio e 19 giugno 2025 a Ronchi dei Legionari (RDL).

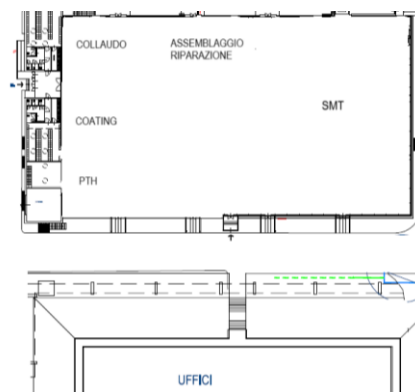


Figura 5: Planimetria aree di campionamento Ronchi dei Legionari (GO)

L'esposizione dei lavoratori ai fumi di saldatura si può verificare in un qualsiasi momento durante l'intero turno lavorativo di otto ore. Dato che i fattori ambientali del luogo di lavoro sono costanti nell'arco della giornata lavorativa, si è optato per una durata totale del campionamento inferiore, ovvero una durata minima di dieci minuti per singola postazione.

5.2 Mansioni soggette a campionamento

È stato costituito il Gruppo di Esposizione ai fumi di saldatura sulla base delle informazioni relative al profilo di esposizione e alla durata delle esposizioni unitarie nei turni di lavoro, riportate nella Scheda mansione del Documento di Valutazione del Rischio chimico aziendale.

Nella sottostante Tab.1 si riassumono brevemente le attività svolte e i materiali impiegati dalle mansioni coinvolte nel progetto di tesi.

MANSIONE	ATTIVITA'	MATERIALI
ADDETTO SMT	Ricarica feeder (bobina, vassoio, stecca) di componenti nella pick&place, introduzione del circuito stampato nella macchina serigrafica, ricarica pasta saldante rimozione manuale eccessi di pasta saldante, sistemazione NC, pulizia telai e racle	Colle per componenti Paste saldanti Detergenti per pulizia racle e telai
ADDETTO SALDATURA	Saldatura manuale	Fili di lega Flussante Detergenti per pulizia residui di flussante

Tabella 1: Estratto DVR aziendale (descrizione mansione)

La scelta delle specifiche postazioni di misura è stata di tipo casuale, considerando preventivamente le condizioni operative, l'esposizione ai fumi di saldatura e gli agenti chimici impiegati ovvero materiale saldante e materiali di consumo manipolato.

È opportuno indicare che la maggior parte dei lavoratori è rimasta in loco durante tutta l'esecuzione del campionamento. Altri invece non sono rimasti per i totali dieci minuti in postazione in quanto la procedura operativa delle fasi di lavoro prevede, per l'addetto SMT, lo spostamento lungo la linea produttiva sulla base delle necessità di stampo tecnico

e, per l'addetto alla saldatura, dal banco di lavoro per la movimentazione dei prodotti finiti nell'area dedicata del reparto produttivo.

I contatori portatili di particelle utilizzati per la campagna di misurazioni sono stati posizionati accanto al tavolo di lavoro, all'altezza della zona di respirazione del lavoratore, ma non rigorosamente al suo interno. È stata utilizzata una tubazione conduttiva appropriata.

I lavoratori sono stati supervisionati e seguiti durante l'esecuzione dell'intero campionamento. Essi sono stati informati sullo scopo della misurazione e sono state fornite le opportune raccomandazioni relativamente al comportamento da tenere per tutta la durata del campionamento, affinché questo fosse rappresentativo dell'effettiva esposizione.

5.3 Piano di campionamento

In Tabella 2 si riassumono le macro aree scelte nell'ambito della campagna di campionamento in reparto produttivo per il gruppo di esposizione ai fumi di saldatura.

<i>Rif. campione</i>	<i>Postazioni di misura</i>	<i>Foto rappresentative</i>
BIANCO	Punto di campionamento: Sala Riunioni	
FONDO ASSEMBLAGGIO	Mansione: Addetto SMT Punto di campionamento: Area Assemblaggio	
FONDO LINEA SMT	Mansione: Addetto SMT Condizioni operative: attività su linea di introduzione/prelievo circuiti stampati, preparazione dei feeder con i componenti, ricarica pasta saldante, rimozione pasta saldante in eccesso.	

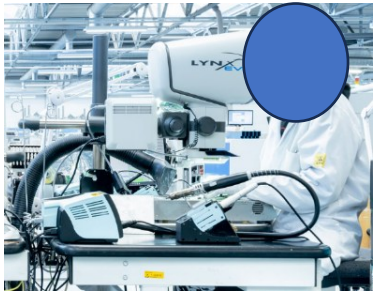
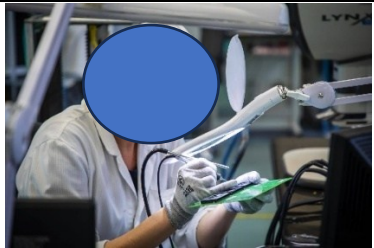
POSTAZIONE RIPARAZIONE	Mansione: Addetto saldatura Condizioni operative: dissaldatura e ri-saldatura con uso di stilo saldante e filo a base stagno su schede per le quali sono richieste delle riparazioni. L'operatore può eseguire riparazioni sulle schede attraverso banchi dedicati con attrezzature manuali (cacciaviti, pinze, stazioni dissaldanti, avvitatori...).	
POSTAZIONE SALDATURA - PTH	Mansione: Addetto saldatura Condizioni operative: attività su stazione di saldatura; in specifico, brasatura per conduzione di calore tramite stilo saldante o per convezione con penna ad aria calda.	

Tabella 2: Estratto del piano di campionamento

L'approccio al campionamento ha previsto preliminarmente l'esecuzione di un campione "bianco" volto, cioè a caratterizzare un'area con le maggiori differenze di comportamento rispetto all'area oggetto di valutazione. Si è optato in questo caso per una sala riunioni. Risulta chiaro che vi è una variazione dei valori delle nanoparticelle tra interno ed esterno, in quanto l'aria filtrata in ingresso nell'ambiente di lavoro, può presentare dei valori di fondo inferiori rispetto all'ambiente esterno.

Secondariamente il piano ha disposto l'esecuzione di più "fondi" ovvero di scenari di background (BKD) nelle quali le condizioni si presumono non tali da raggiungere quelle delle postazioni di saldatura, ma fungibili da confronto. Per brevità si è scelto di prendere come riferimento di fondo l'area assemblaggio e la linea SMT.

5.4 Strumentazione di misura

Data l'elevata variabilità nel tempo e nello spazio delle concentrazioni medie di particelle ultrafini in aria, la valutazione dell'esposizione in ambiente di lavoro a tale fonte di rischio richiede strumenti di misura *real time* a lettura diretta. Il loro utilizzo è stato suggerito da diversi studi poiché consentono di determinare l'esposizione a breve termine alle UFP e risultano di facile uso, rapida risposta e presentano bassi limiti di rilevamento⁴⁰. Ad oggi, nessuno strumento portatile per la misurazione delle nanoparticelle è in grado di fornire contemporaneamente una risposta in termini di numero e concentrazioni di massa⁴¹.

Si riporta di seguito la descrizione dei due strumenti utilizzati.



Figura 6: DiSCMini Testo e Lighthouse Handheld 3016 IAQ Airborne Particle Counter (da destra verso sinistra)

5.4.1 Miniature Diffusion Size Classifier

Il Miniature Diffusion Size Classifier (DiSCMini, *Testo SE & Co. KGaA*) è uno strumento di misurazione real time della PNC (pt/cm^3) in un intervallo di rilevamento di 10^3 e 10^6 pt/cm^3 e del diametro aerodinamico medio delle particelle compreso tra 20 e 700 nm (ottimale 10-300 nm)⁴¹. Il DiSCmini è l'unico strumento che utilizza un pre-separatore (impattatore) che rimuove tutte le particelle in ingresso con diametro aerodinamico 700 nm. Il flusso della pompa è stato impostato a 1 litro al minuto. La risoluzione temporale è di 1 secondo, cioè alla frequenza di 1Hz. La precisione è di $\pm 30\%$ in termini di dimensioni e numero tipici, ± 500 particelle cm^{-3} in numero assoluto³⁹.

Come la maggior parte degli strumenti portatili real time per la misurazione degli aerosol, il DiSCMini è aspecifico, ovvero non distingue la componente differenziandola dall'aerosol di fondo. Sebbene la distinzione richieda metodi offline, il DiSCMini consente comunque di ottenere alcuni risultati molto utili, come avvisi in caso di livelli elevati di concentrazione numerica delle particelle o la localizzazione di una sorgente di emissione.

Secondo M. Fierz (2011), i risultati sperimentali del DiSCMini concordano abbastanza bene (entro il 20%) con quelli ottenuti da strumenti tradizionali quali SMPS e CPC. Pur essendo meno preciso rispetto ad altri metodi, il DiSCMini è valido in tutte le situazioni in cui la facilità d'uso e la portabilità sono più rilevanti dell'elevata precisione⁴¹.

Principio di funzionamento

Il principio di misurazione si basa sulla carica unipolare degli aerosol, seguita dalla rilevazione in due stadi elettrometrici. L'aerosol è campionato a 1 L min^{-1} e riscaldato a 30°C . Le particelle misurate vengono caricate positivamente mediante scarica a corona (+ 5 kV) e passano attraverso una trappola ionica, uno stadio di diffusione e infine un filtro.

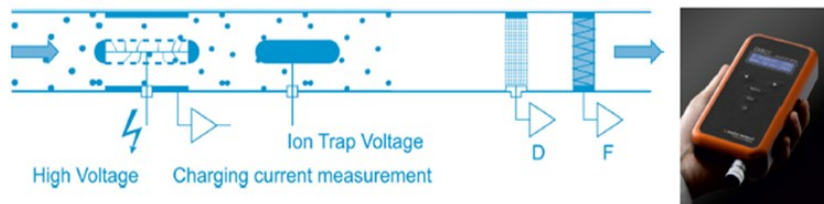


Fig. 7 Funzionamento DiSCMini

In breve, l'aerosol viene prima caricato in un caricatore unipolare standard a diffusione positiva, che impartisce alle particelle una carica media q , approssimativamente proporzionale al diametro delle particelle. Dopo la carica, gli ioni in eccesso vengono rimossi in una trappola ionica. Le particelle cariche passano quindi attraverso lo stadio di diffusione, che consiste in una pila elettricamente isolata di schermi in acciaio inossidabile collegati a un elettrometro sensibile. Alcune delle particelle vengono catturate in questo stadio e generano una corrente di diffusione, mentre le particelle rimanenti passano in un secondo stadio dotato di un filtro HEPA. Qui tutte le particelle vengono catturate e la corrente I_{filter} viene misurata con un elettrometro. Il rapporto $R = I_{\text{filter}}/I_{\text{diffusione}}$ è una misura della dimensione media delle particelle, poiché le particelle più piccole subiscono un moto browniano maggiore e hanno quindi maggiori probabilità di essere catturate nello stadio di diffusione. L'esatta relazione tra R e la dimensione delle particelle viene determinata durante la calibrazione dello strumento e una curva di calibrazione corrispondente viene memorizzata sullo strumento. Da questa curva di calibrazione si determina la dimensione delle particelle e quindi il numero di particelle può essere facilmente calcolato.

Lo strumento consente di stimare la probabilità di deposizione delle particelle nelle regioni tracheobronchiali e alveolari del polmone, espressa come superficie polmonare depositata (Lung-Deposited Surface Area - LDSA - $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$), considerata uno dei parametri più significativi per valutare la tossicità delle nanoparticelle⁴². Come descritto

sopra, gli aerosol aspirati acquisiscono una carica quasi proporzionale al diametro delle particelle, e, di conseguenza, anche approssimativamente proporzionale alla LDSA alveolare.

Sebbene il rapporto tra la carica acquisita dalle particelle e la LDSA non sia perfettamente lineare, esso rappresenta una buona approssimazione della LDSA per particelle comprese tra 20 e 400 nm, con una precisione dell'ordine di $\pm 30\%$. Al di fuori di questo intervallo, le stime risultano meno affidabili: per particelle dell'ordine dei micron la LDSA calcolata è circa dieci volte inferiore a quella reale, mentre per particelle molto piccole, intorno ai 10 nm, tende a essere sovrastimata fino al doppio del valore effettivo^{31,41}. Tuttavia, è stato osservato che le particelle inferiori a 20 nm contribuiscono in misura ridotta alla concentrazione totale di LDSA, mentre le discrepanze nelle stime diventano più rilevanti per le particelle di dimensioni maggiori⁴³.

Infine, la determinazione della LDSA è soggetta ad ulteriori fonti di incertezza legate alle caratteristiche del materiale e alla morfologia delle particelle, nonché alle variazioni nei modelli respiratori individuali³¹.

Campionamento

Per consentire il campionamento più vicino possibile alla zona di respirazione è stata utilizzata la sonda fornita dal fabbricante e l'ugello di entrata dell'aerosol era posizionato sulla spalla del lavoratore, mentre l'analizzatore tramite una tracolla.

Dato che l'analisi dell'aria aspirata dallo strumento avviene in continuo e non è possibile inserire manualmente dei punti di interesse, si è rimasti in loco per registrare gli spostamenti, le attività e relativo orario, in modo da poter identificare eventuali variazioni durante l'elaborazione dei dati.

5.4.2 Lighthouse Handheld 3016 IAQ Airborne Particle Counter

Lo strumento di misura portatile Lighthouse Handheld 3016 IAQ Airborne Particle Counter esegue il conteggio cumulativo o differenziale delle particelle aerodisperse (pt/m^3 o alternativamente pt/l), fornendo inoltre dati su temperatura e umidità relativa. Questo contatore portatile rileva la concentrazione di particelle su sei canali dimensionali a partire da $0,3 \mu\text{m}$ ($0,3$; $0,5$; $1,0$; $2,5$; $5,0$ e $10,0 \mu\text{m}$), consentendo la rilevazione di polveri totali, $\text{PM}_{2,5}$ e PM_{10} .

Per ogni punto di campionamento, il Lighthouse 3016 IAQ è stato impostato in modalità differenziale con una portata costante di 2,83 l/min (0,1 ft³/min), corrispondente ai cicli di misura scelti. La durata complessiva di misurazione per ciascuna postazione è stata di minimo dieci minuti. Durante questo intervallo, il contatore ha effettuato rilevazioni con cicli di un secondo di misura seguiti da un secondo di pausa, registrando la concentrazione di particelle per tutti e sei i canali dimensionali.

Principio di funzionamento

Lo strumento, mediante una pompa integrata, aspira un flusso d'aria che viene attraversato da una sorgente luminosa a diodo laser. Le particelle sospese diffondono la luce emessa dal laser, la quale viene raccolta e focalizzata da un sistema ottico su un fotodiodo. Quest'ultimo converte le variazioni di intensità luminosa in impulsi elettrici, la cui ampiezza è direttamente correlata alla dimensione delle particelle^{42,44}.

Uno dei limiti principali dello strumento consiste nell'incapacità di rilevare particelle ultrafini con diametro inferiore a 0,1 µm. Inoltre, trattandosi di un dispositivo basato su principio ottico, non consente la misurazione diretta né della massa particellare né dell'area superficiale, parametro invece ottenibile con il DiSCMini⁴⁵.

Campionamento

Per garantire un campionamento rappresentativo e in assenza di sonde specifiche per il posizionamento, il dispositivo è stato collocato in prossimità dell'altezza della spalla del soggetto esaminato. In analogia al sistema DiSCMini, data l'impossibilità di inserire manualmente marcatori temporali durante le acquisizioni, si è adottata la procedura di monitoraggio continuo in situ, registrando in modo sistematico i movimenti, le attività svolte e gli orari corrispondenti, allo scopo di permettere una successiva correlazione temporale e spaziale delle variazioni osservate nei dati acquisiti durante l'analisi.

5.5 Analisi dei dati

Tutti i dati registrati dai due strumenti sono stati caricati e integrati nei relativi software database *testo DiSCMini data conversion tool* e *Lighthouse Data Transfer Software*.

L'analisi statistica descrittiva è stata eseguita con il software JAMOVl.

I parametri considerati per l'analisi statistica dei dati acquisiti tramite lo strumento DiSCMini sono la dimensione delle nanoparticelle, espressa in nanometri (nm), e la loro concentrazione numerica in un volume d'aria definito, riportata come numero di particelle per centimetro cubico (NP/cm³) oltre che la LDSA (nm/cm³).

Per quanto concerne i dati acquisiti mediante il contatore Lighthouse 3016 IAQ, nell'analisi statistica si è considerata la concentrazione numerica di particelle aerodisperse, suddivise nelle sei classi dimensionali (0,3; 0,5; 1,0; 2,5; 5,0 e 10,0 µm) per litro d'aria (pt/l). Al fine di consentire un confronto diretto con i dati provenienti dallo strumento DiSCMini, i valori sono stati convertiti da litri a centimetri cubici (pt/cm³).

6. RISULTATI

Nel presente capitolo si presentano i risultati ottenuti dalla campagna di campionamento avvenuta tra maggio e giugno 2025 nei due stabilimenti aziendali, dei quali si sottolinea la variabilità in termini di fattori esterni (ubicazione degli stabilimenti, condizioni climatiche al momento dei campionamenti) e interni (occupazione, impianti di areazione, organizzazione delle postazioni e delle linee). Tali elementi possono chiaramente portare a delle differenze nei risultati.

Le differenze tra i risultati ottenuti per il bianco nei due stabilimenti sono minime.

Data l'inesistenza di un valore limite di esposizione specifico per le particelle ultrafini nelle postazioni di saldatura è stato utilizzato il fondo a fini di confronto, che non contribuisce in alcun modo all'esposizione diretta dei lavoratori a fumi.

6.1. Statistica descrittiva

La Tabella 3 riassume i principali risultati (25, 50 e 75 percentile) del monitoraggio effettuato con i due strumenti DiSCMini e Lighthouse 3061 IAQ. Tali parametri esplicano la parte di statistica descrittiva (Jamovi) di maggior interesse per il presente elaborato, anche al fine di garantire una maggiore chiarezza e leggibilità dei dati. Le due Tabelle Supplementari 8 e 9 in allegato raccolgono in maniera più dettagliata i risultati ottenuti dall'elaborazione dati, suddivisi per i due strumenti (sale riunioni - bianco, area produttiva di fondo e postazioni di saldatura).

In Tabella 4 invece i valori mediani per le singole variabili Size e LDSA, così come risultanti da dati DiSCMini.

	SEDE MISURA	Size	LDSA
Mediana	BIANCO SALA RIUNIONI	56,6	10,2
	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	38,3	31,8
	FONDO SMD LINEE RDL	47,9	13,4
	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	35,2	32
	POSTAZIONE PTH 1 RDL	60,4	20
	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	51,2	56,6
	POSTAZIONE PTH 2 RDL	59,1	22,3

Tabella 3: Valori mediani per i parametri Size e LDSA; dati DiSCMini

		DiSC Mini	Lighthouse					
	Sede di Misura	pt/cm ³	0,3 µm/cm ³	0,5 µm/cm ³	1 µm/cm ³	2,5 µm/cm ³	5 µm/cm ³	10 µm/cm ³
25esimo percentile	BIANCO SALA RIUNIONI	2864	37,7	2,01	0,36	0,106	0,0212	0
	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	15011	86,7	8,39	1,84	0,551	0,0636	0
	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	15801	71,8	7,59	1,59	0,466	0,0636	0
	FONDO SMD RDL	4385	43,4	3,24	0,678	0,191	0,0212	0
	POSTAZIONE PTH 1 RDL	5026	89,9	5,95	1,14	0,254	0,0212	0
	POSTAZIONE PTH 2 RDL	10406	161	13,7	1,4	0,275	0,0212	0
	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	5955	129	7,95	1,23	0,233	0,0212	0
50esimo percentile	BIANCO SALA RIUNIONI	3111	38,8	2,68	0,625	0,244	0,0424	0,0212
	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	16785	90,6	11,6	2,82	0,901	0,106	0
	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	16523	80,7	8,81	2,01	0,636	0,106	0,0212
	FONDO SMD RDL	4931	58,8	7,15	1,42	0,339	0,0424	0
	POSTAZIONE PTH 1 RDL	5651	100	6,62	1,29	0,318	0,0424	0
	POSTAZIONE PTH 2 RDL	20454	172	15,1	1,61	0,339	0,0424	0
	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	6539	152	12,5	1,4	0,297	0,0424	0
75esimo percentile	BIANCO SALA RIUNIONI	6121	40,1	3,48	1,19	0,487	0,0848	0,0424
	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	19386	116	12,8	3,42	1,21	0,17	0,0212
	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	21696	83,3	9,51	2,33	0,805	0,148	0,0212
	FONDO SMD RDL	8325	65,7	9,54	3,43	1,27	0,148	0,0212
	POSTAZIONE PTH 1 RDL	7866	116	7,44	1,46	0,381	0,0636	0,0212
	POSTAZIONE PTH 2 RDL	37087	188	17,2	2	0,424	0,0848	0,0212
	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	7126	163	14,4	1,55	0,35	0,0636	0,0212

Tabella 4: Principali risultati di statistica descrittiva del parametro Number (PCN) per i sette punti di campionamento; rielaborazione dati DiSCMini e Lighthouse

DiSCMini

Di seguito il Grafico 1 confronta i valori mediاني di PNC (barre) e dimensione (linee) delle particelle tra i sette punti di campionamento, mentre il Grafico 2 presenta i valori mediاني della PNC e i rispettivi valori di LDSA per le diverse aree.

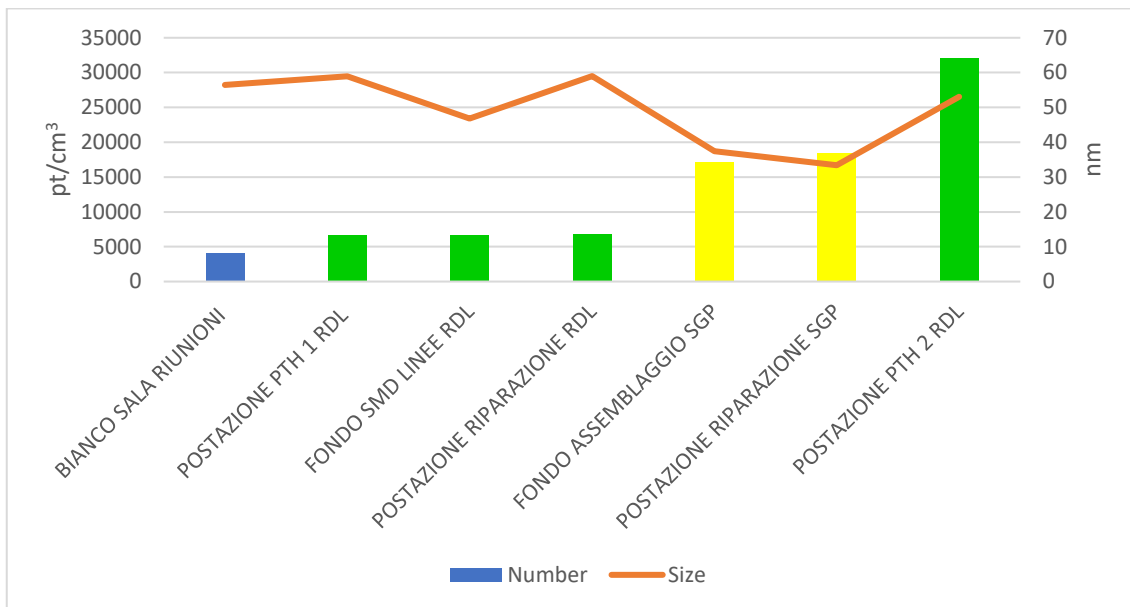


Grafico 1: Valori mediاني (PNC vs Size) delle diverse aree; rielaborazione grafica dati DiSCMini

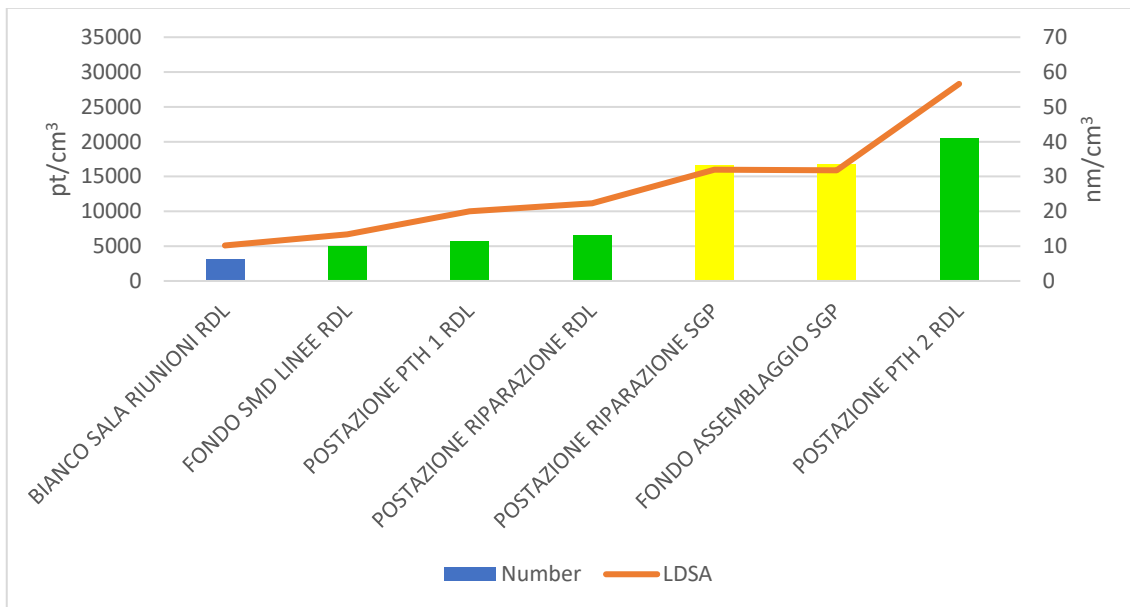


Grafico 2: Valori mediاني (PNC vs LDSA) delle diverse aree; rielaborazione grafica dati DiSCMini

Lighthouse 3016 IAQ

Il Grafico 3 riporta la caratterizzazione dimensionale (espressa in percentuale nelle colonne) dei valori medi dei polveri totali campionate nei sette punti. Si è scelto di soffermarsi sulla frazione 0,3 μm (ovvero 300 nm) in quanto più vicina al limite superiore di rilevamento del DiSCMini, fissato tra 10 e 300 nm e pertanto comparabile. La Tabella 5 correlata al grafico contribuisce con un'informazione utile all'analisi del caso relativamente alla percentuale mediana di particelle da 0,3 μm sulle polveri totali.

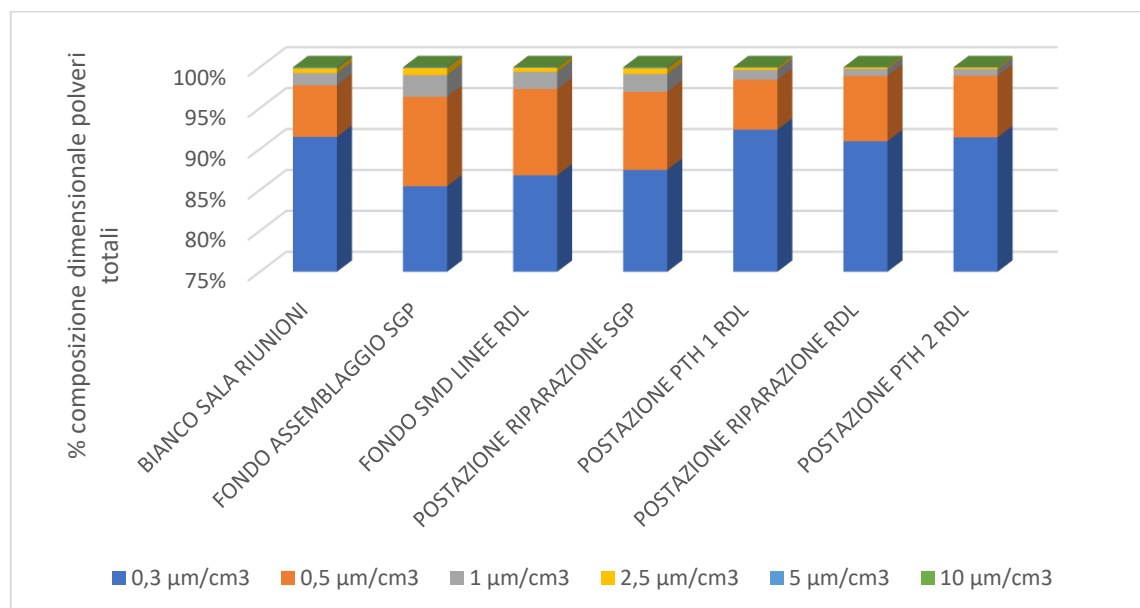


Grafico 3: Valori percentuali della composizione dimensionale polveri totali, suddivisa per area; rielaborazione dati Lighthouse

AREE	% mediana di pt. 0,3 μm su polveri totali
BIANCO SALA RIUNIONI	91,26
FONDO SMD LINEE RDL	87,89
FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	88,32
POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	87,52
POSTAZIONE PTH 1 RDL	88,86
POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	88,85
POSTAZIONE PTH 2 RDL	91,01

Tabella 5: Valori percentuale della mediana di particelle da 0,3 μm su polveri totali; rielaborazione dati Lighthouse

I Grafici 4, 5 e 6 presentano i valori medi PNC suddivisi a due a due per le sei frazioni dimensionali in modo da garantire maggiore chiarezza di lettura.

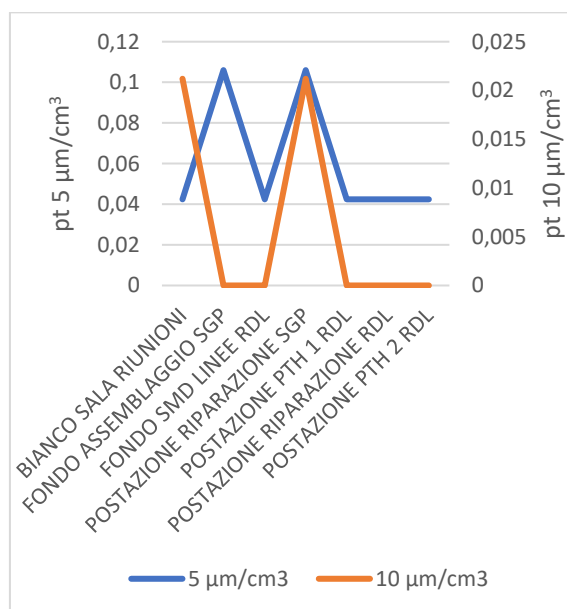
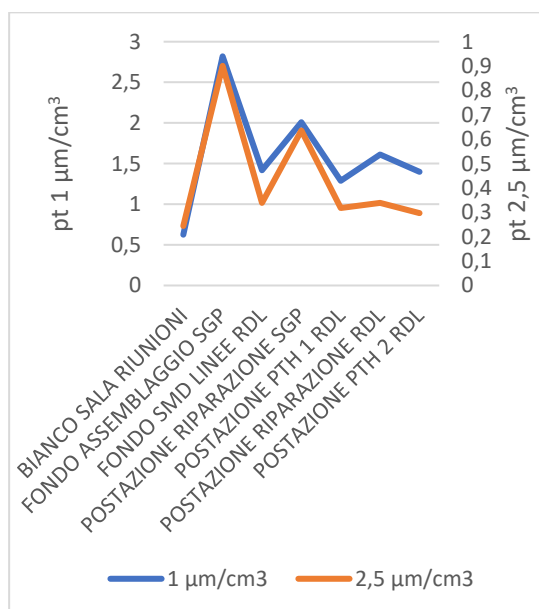
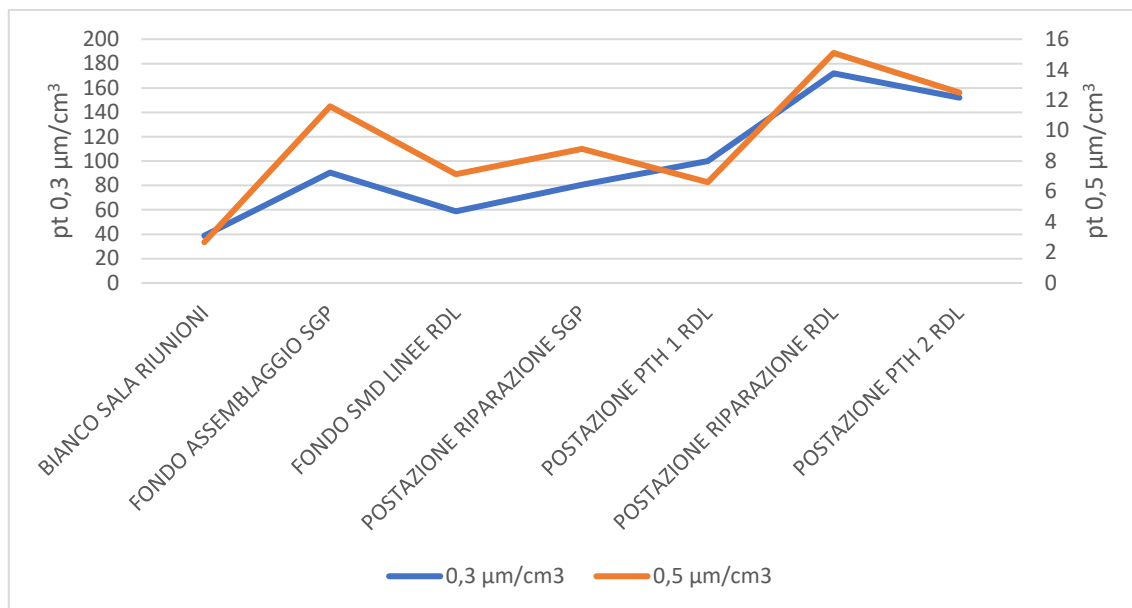


Grafico 4, 5 e 6: Valore mediano della PNC per le diverse frazioni dimensionali nelle diverse aree; rielaborazione grafica dati Lighthouse

6.2 Andamento temporale - DiSCMini

Sale riunioni – bianco

Il Grafico 7, quale rielaborazione grafica dei dati risultanti dai campionamenti con DiSCMini, mostra l'evoluzione temporale della PNC, della dimensione media delle particelle nella sala riunioni come riferimento per il bianco. Generalmente, un aumento

della prima corrisponde a una diminuzione della seconda, risultando in due profili speculari.

Per la Sala Riunioni, la concentrazione mediana di nanoparticelle è 3.111 pt/cm^3 . Il 25° percentile si attesta a 2.864 pt/cm^3 , mentre il 75° percentile è 6.121 pt/cm^3 . Il valore massimo registrato per questo parametro è di 7.609 pt/cm^3 .

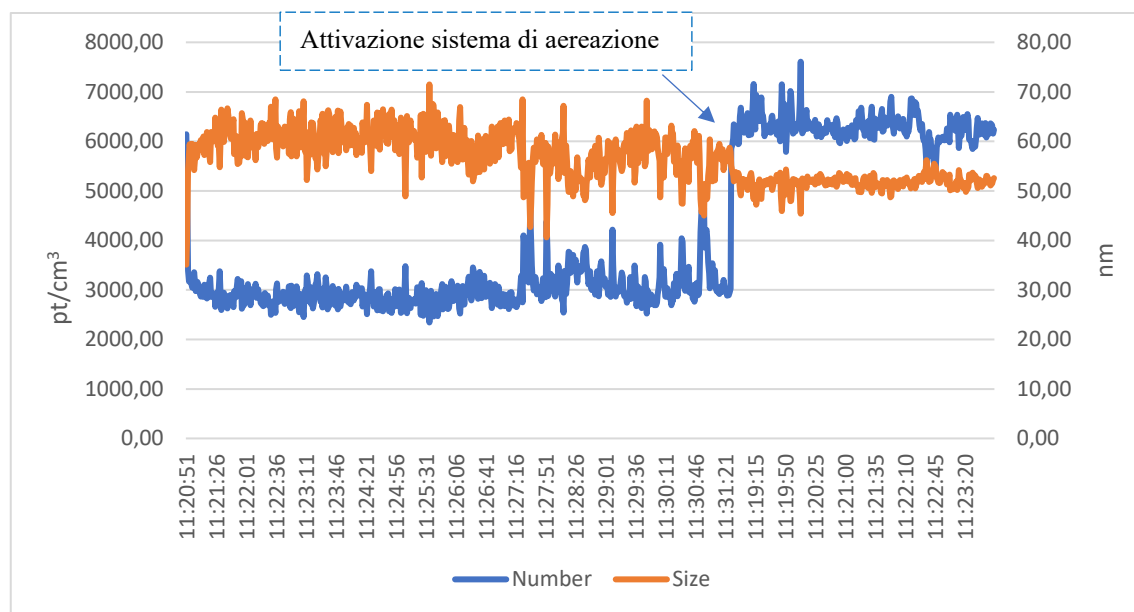


Grafico 5: Andamento temporale dei parametri Number e Size nella sala riunioni; rielaborazione grafica dati DiSCMini

Fondo

I grafici 8 e 9 mostrano l'evoluzione temporale della PNC e dimensione media delle particelle nei fondi (BKD) campionati con DiSCMini rispettivamente a RDL (area linee SMD) e SGP (area assemblaggio). Nell'area di Assemblaggio SGP, la concentrazione mediana di nanoparticelle è 16.785 pt/cm^3 . L'intervallo interquartile va da un 25° percentile di 15.011 pt/cm^3 a un 75° percentile di 19.386 pt/cm^3 . Il picco massimo raggiunto è 23.148 pt/cm^3 . Per il fondo a RDL, il valore mediano PNC è 4.931 pt/cm^3 . Il 25° percentile è 4.385 pt/cm^3 , e il 75° percentile è 8.325 pt/cm^3 . Il valore massimo rilevato è 17.397 pt/cm^3 .

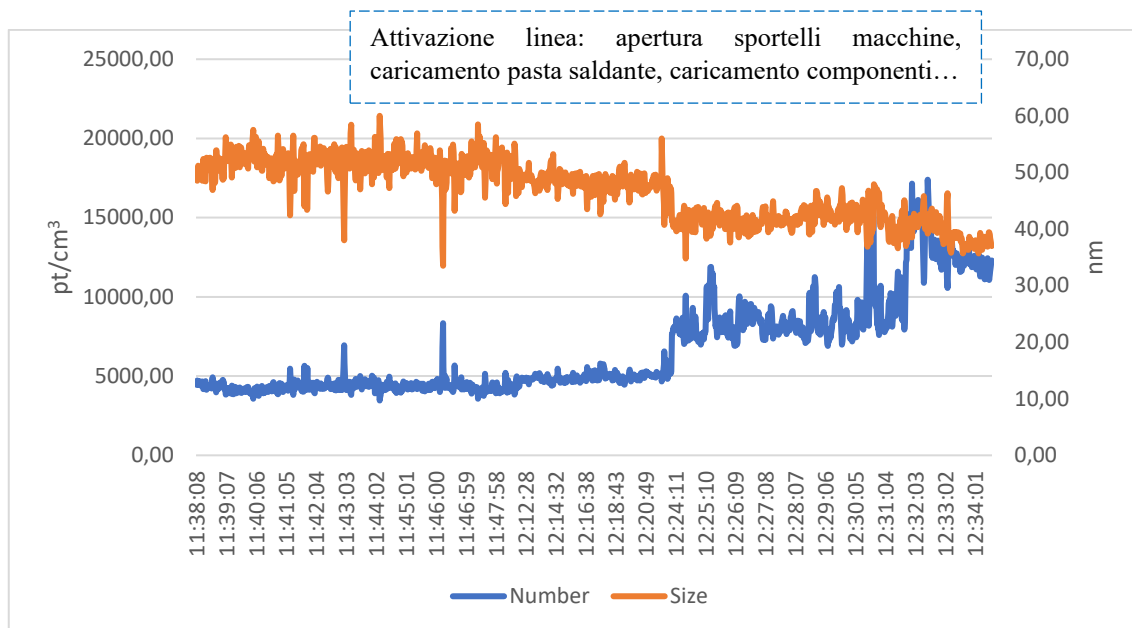


Grafico 6: Andamento temporale dei parametri Number e Size nell'area di BKD (Linea SMT) a Ronchi dei Legionari; rielaborazione grafica dati DiSCMini

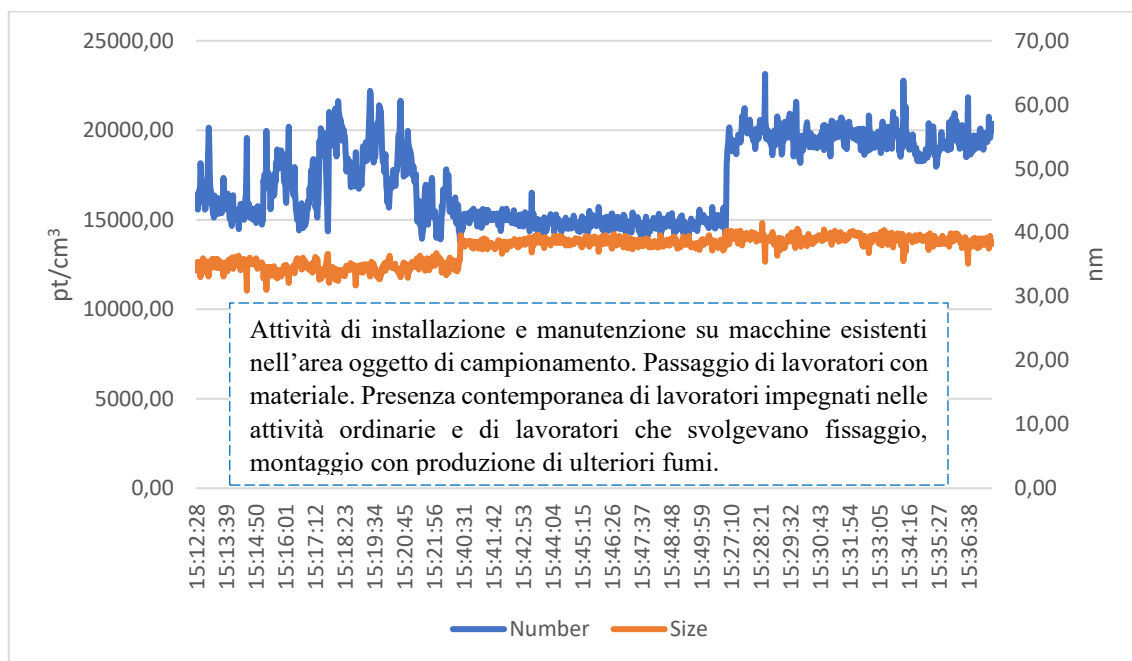


Grafico 7: Andamento temporale dei parametri Number e Size nell'area di BKD (Assemblaggio) a San Giovanni in Persiceto; rielaborazione grafica dati DiSCMini

Postazioni di saldatura

I grafici 10, 11, 12 e 13 mostrano l'evoluzione temporale della PNC e dimensione media delle particelle in quattro postazioni di saldatura manuale. Nella Postazione Riparazione SGP, la concentrazione mediana di nanoparticelle è 16.523 pt/cm³. L'intervallo

interquartile si trova tra 15.801 (25°) e 21.696 pt/cm³ (75°). Il valore massimo è 26.606 pt/cm³. Il sistema di areazione e ricircolo dell'aria è sempre attivo.

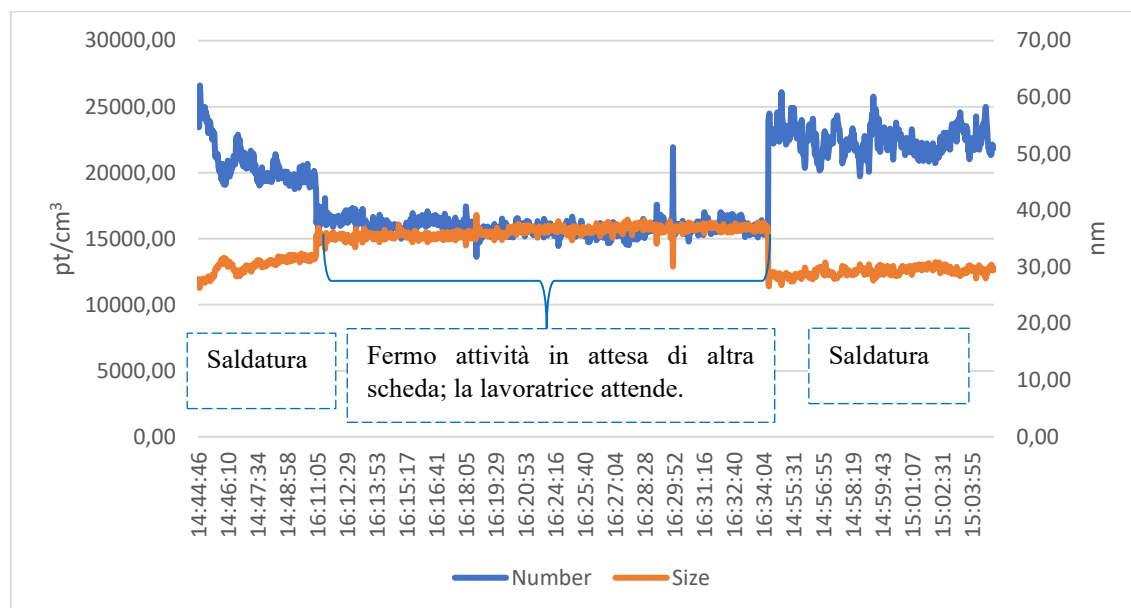


Grafico 8: Andamento temporale dei parametri Number e Size nella postazione riparazione a San Giovanni in Persiceto; rielaborazione grafica dati DiSCMini

Alla Postazione PTH 1 RDL, la concentrazione mediana di nanoparticelle è 5.651 pt/cm³. Il 25° percentile è 5.026 pt/cm³, e il 75° percentile è 7.866 pt/cm³. Il valore massimo registrato in questa sede di misura è significativamente più alto, pari a 34.363 pt/cm³. L'attività è svolta su schede di medie dimensioni. Vi è il corretto posizionamento dell'estrattore in maniera puntuale al di sopra delle schede nella direzione di liberazione dei fumi. La lampada è posta sopra all'estrattore.

Per la Postazione PTH 2 RDL, il valore mediano PNC è 20.454 pt/cm³. Il 25° percentile è 10.406 pt/cm³, e il 75° percentile è 37.087 pt/cm³. Si nota un valore massimo di 816.787 pt/cm³, che indica una grande variabilità dei dati in questo punto. L'attività specifica richiede un tempo di completamento maggiore rispetto la scheda della postazione PTH 1. L'aspiratore è localizzato maggiormente in lontananza rispetto alla zona di emissione dei fumi per interferenza con la lampada di lavoro.

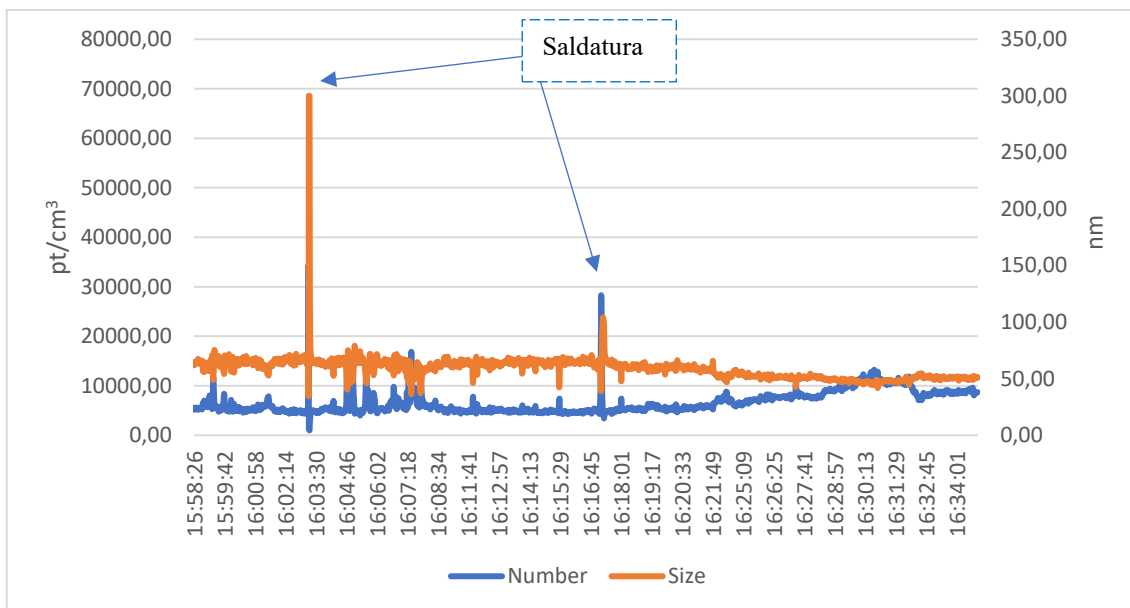


Grafico 9: Andamento temporale dei parametri Number e Size nella postazione saldatura PTH 1 a Ronchi dei Legionari; rielaborazione grafica dati DiSCMini

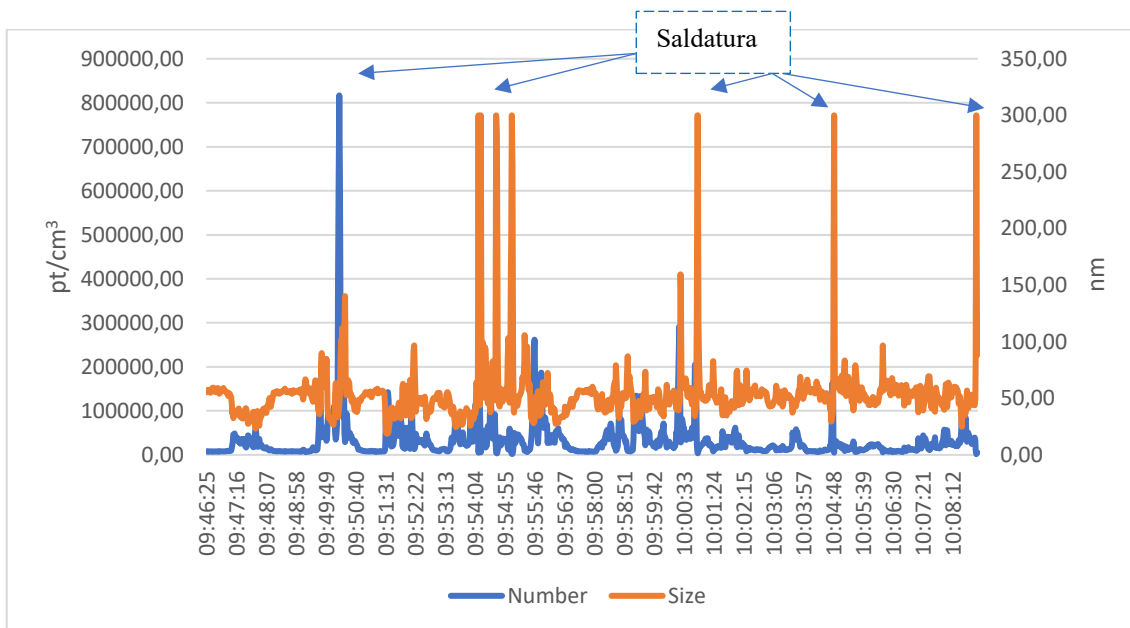


Grafico 10: Andamento temporale dei parametri Number e Size nella postazione saldatura PTH 2 a Ronchi dei Legionari; rielaborazione grafica dati DiSCMini

Infine, alla Postazione Riparazione RDL, la concentrazione mediana di nanoparticelle è 6.539 pt/cm^3 . I percentili interquartili sono 5.955 (25°) e 7.126 (75°). Il valore massimo rilevato è 36.274 pt/cm^3 . In questa postazione si lavorano schede di piccole dimensioni che necessitano di riparazione, ovvero dissaldature e nuove saldature. Si osserva un corretto posizionamento dell'estrattore, in maniera puntuale al di sopra dell'area di lavoro nella direzione di liberazione dei fumi. La lampada è posta al di sopra dell'estrattore.

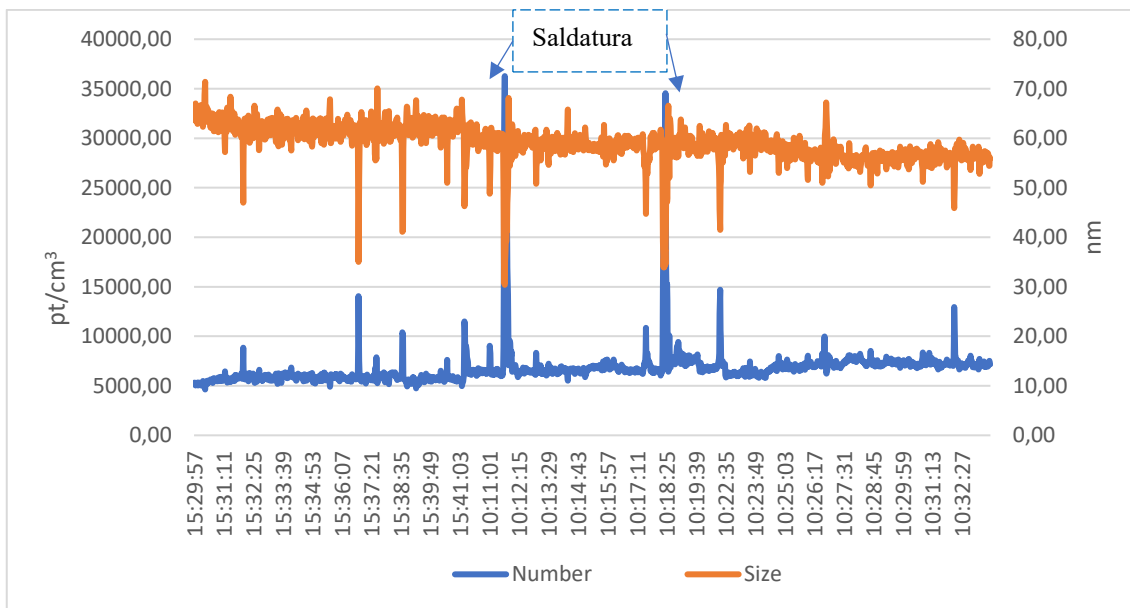


Grafico 11: Andamento temporale dei parametri Number e Size nella postazione di saldatura riparazione a Ronchi dei Legionari; rielaborazione grafica dati DiSCMini

6.3 Andamento temporale - Lighthouse 3016 IAQ

Sale riunioni - bianco

I risultati derivanti dal campionamento condotto nella sala riunioni, impiegando lo strumento Lighthouse, sono illustrati nel Grafico 12. La rappresentazione grafica evidenzia l'evoluzione temporale della PNC, disaggregata in sei distinti stadi dimensionali.

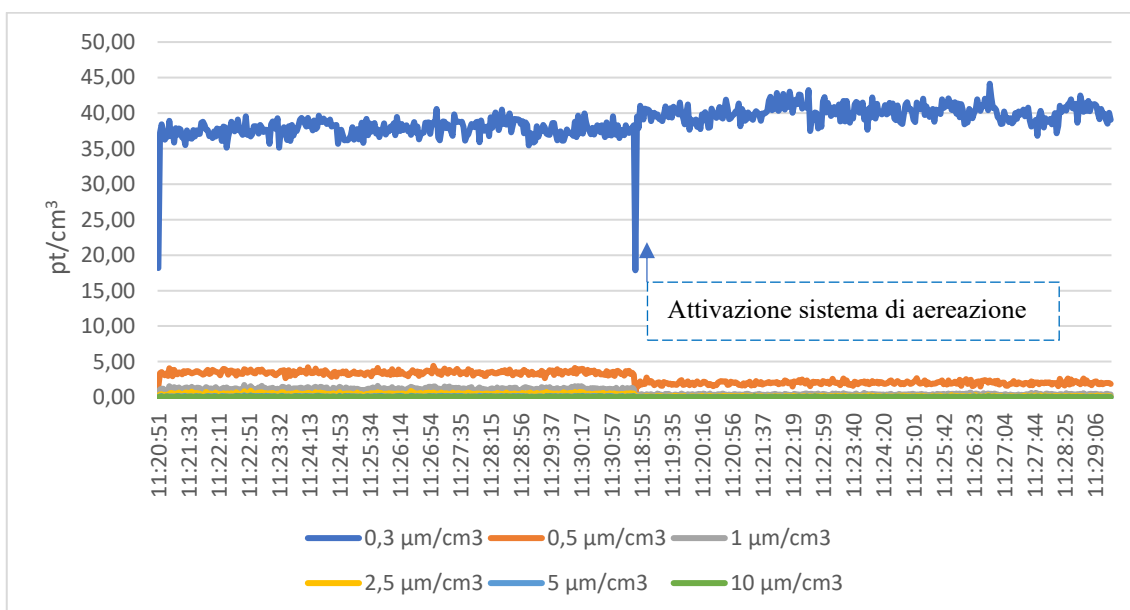


Grafico 12: Andamento temporale della PNC media, suddivisa per i sei diversi stadi dimensionali, nella sala riunioni; rielaborazione grafica dati Lighthouse

Per la Sala Riunioni il valore medio di PNC della componente dimensionale $0,3 \mu\text{m}/\text{cm}^3$ è $38,8 \text{ pt}/\text{cm}^3$. Il 25° percentile è $37,7 \text{ pt}/\text{cm}^3$, mentre il 75° percentile è $40,1 \text{ pt}/\text{cm}^3$. Il valore massimo registrato risulta $44,1 \text{ pt}/\text{cm}^3$.

Fondo

I Grafici 13 e 14 presentano i risultati del campionamento utilizzando lo strumento Lighthouse nelle aree produttive degli stabilimenti a RDL e SGP.

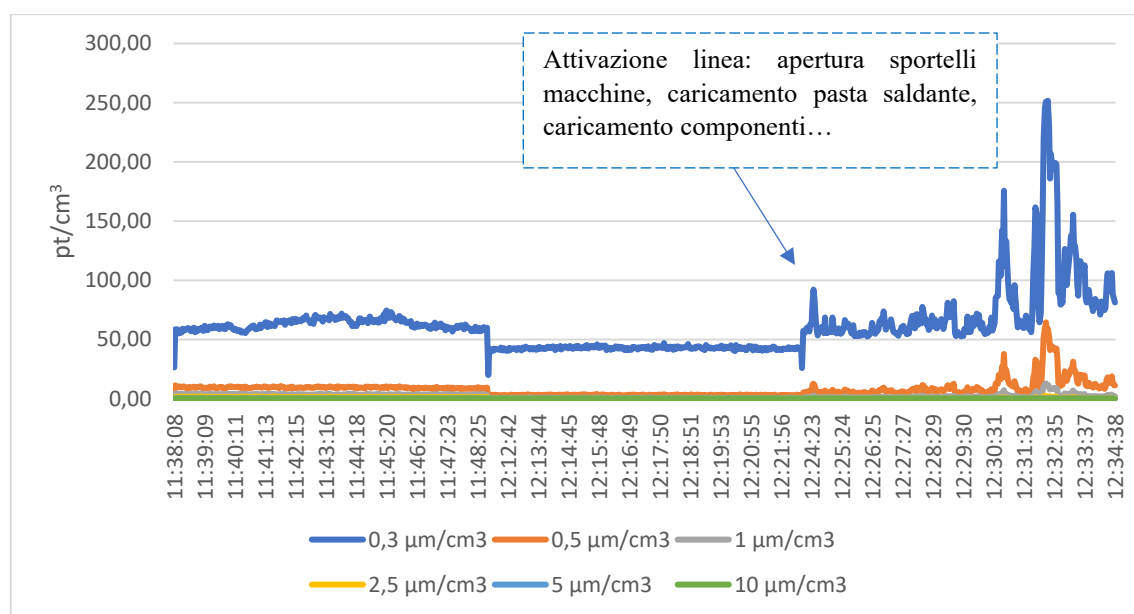


Grafico 13: Andamento temporale del parametro PNC nell'area di fondo (Linea SMT) a Ronchi dei Legionari; rielaborazione grafica dati Lighthouse

Per il fondo delle Linee SMT RDL, il valore medio di PNC della componente dimensionale $0,3 \mu\text{m}/\text{cm}^3$ è $58,8 \text{ pt}/\text{cm}^3$. Il 25° percentile è $43,4 \text{ pt}/\text{cm}^3$, e il 75° percentile è $65,7 \text{ pt}/\text{cm}^3$. Il valore massimo rilevato è $252 \text{ pt}/\text{cm}^3$.

Nell'area di Assemblaggio SGP, la concentrazione mediana di nanoparticelle da $0,3 \mu\text{m}/\text{cm}^3$ è $90,6 \text{ pt}/\text{cm}^3$. L'intervallo interquartile va dal 25° percentile di $86,7 \text{ pt}/\text{cm}^3$ a un 75° percentile di $116 \text{ pt}/\text{cm}^3$. Il picco massimo raggiunto risulta $131 \text{ pt}/\text{cm}^3$.

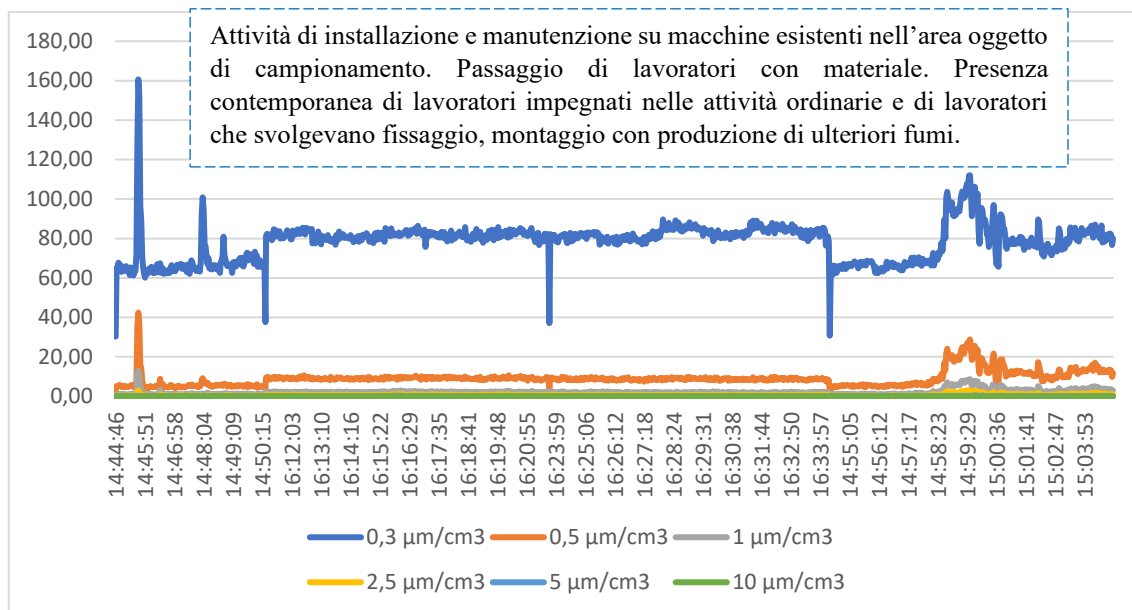


Grafico 14: Andamento temporale del parametro PNC nell'area di fondo (Assemblaggio) a San Giovanni in Persiceto; rielaborazione grafica dati Lighthouse

Postazioni di saldatura

Dai grafici sottostanti 15, 16, 17 e 18 si osserva l'evoluzione temporale della PNC, suddivisa nei sei distinti stadi dimensionali, a cui sono esposti i lavoratori in quattro postazioni di saldatura manuale. Nella Postazione Riparazione SGP, la concentrazione mediana di particelle da $0,3 \mu\text{m}/\text{cm}^3$ è $80,7 \text{ pt}/\text{cm}^3$. L'intervallo interquartile si trova tra $71,8 \text{ pt}/\text{cm}^3$ (25° percentile) e $83,3 \text{ pt}/\text{cm}^3$ (75° percentile). Il valore massimo del parametro è $161 \text{ pt}/\text{cm}^3$.

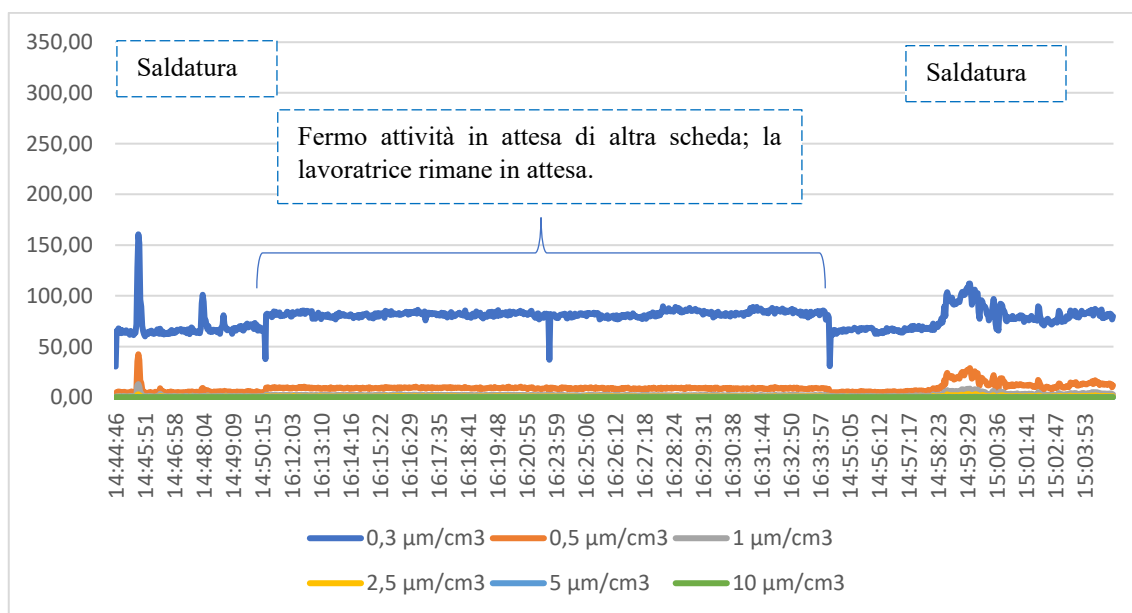


Grafico 15: Andamento temporale della PNC, suddivisa in sei distinti stadi dimensionali, per la postazione di riparazione a San Giovanni in Persiceto; rielaborazione grafica dati Lighthouse

Alla Postazione PTH 1 RDL, il valore mediano di PNC della componente dimensionale $0,3 \mu\text{m}/\text{cm}^3$ è $100 \text{ pt}/\text{cm}^3$. Il 25° percentile è 89,9 e il 75° percentile è $116 \text{ pt}/\text{cm}^3$. Il valore massimo registrato in questa sede di misura è $291 \text{ pt}/\text{cm}^3$. Per la Postazione PTH 2 RDL, il valore mediano è $172 \text{ pt}/\text{cm}^3$. Il 25° percentile è 161, e il 75° percentile è 188. Si nota un valore massimo di 2.463, che indica una grande variabilità dei dati in questo punto.

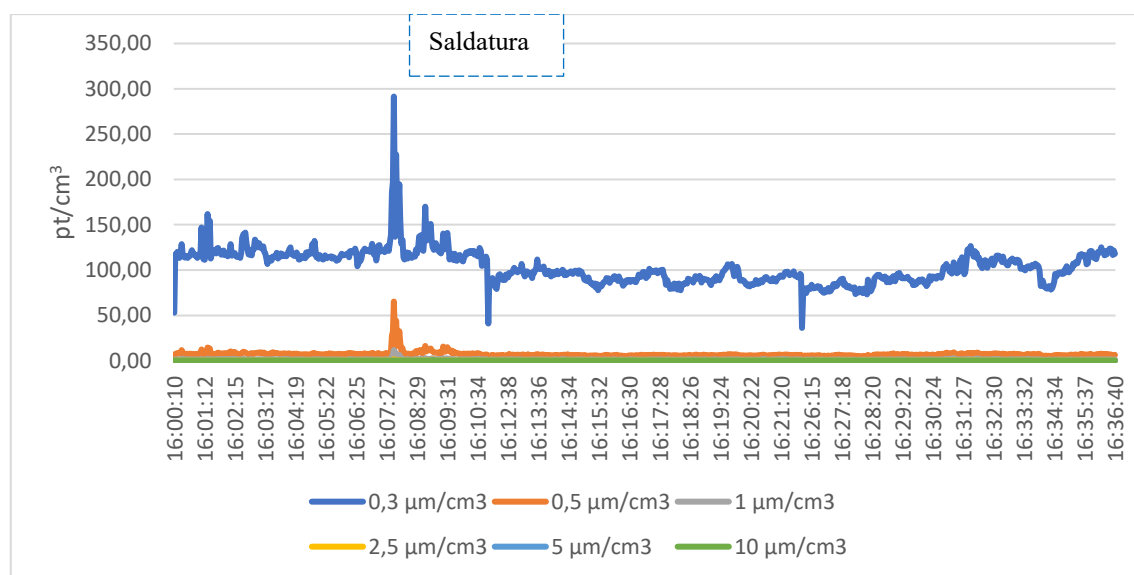


Grafico 16: Evoluzione temporale della PNC, suddivisa in sei distinti stadi dimensionali, per la postazione PTH 1 a Ronchi dei Legionari; rielaborazione grafica dati Lighthouse

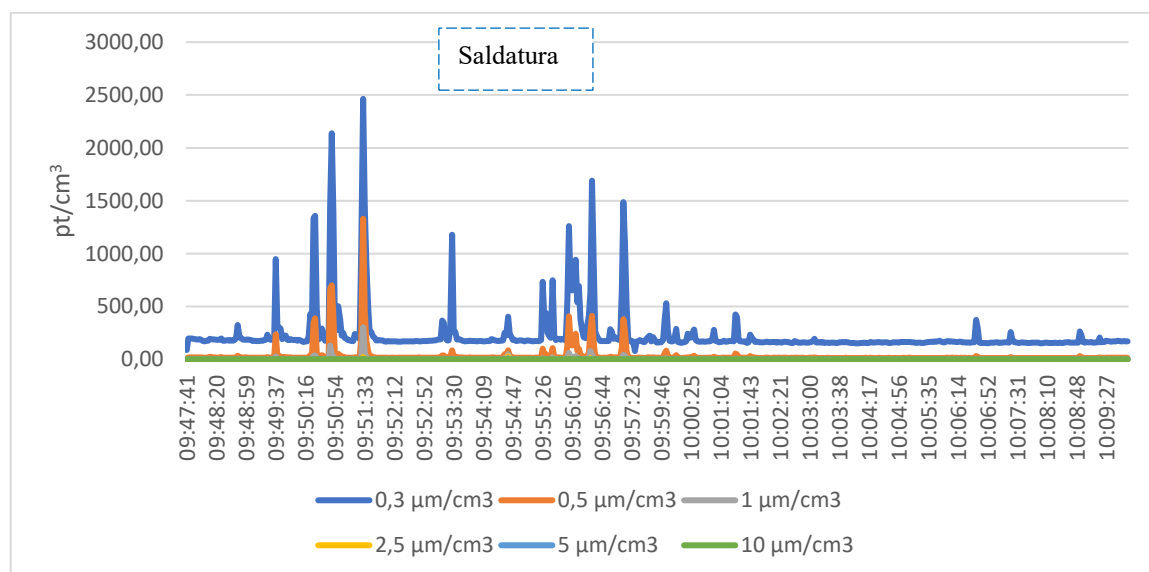


Grafico 19: Evoluzione temporale della PNC, suddivisa in sei distinti stadi dimensionali, per la postazione PTH 2 a Ronchi dei Legionari; rielaborazione grafica dati Lighthouse

Infine, alla Postazione Riparazione RDL, la mediana è 152 pt/cm³. I percentili interquartili risultano 129 pt/cm³ (25°) e 163 pt/cm³ (75°). Il valore massimo rilevato è 334 pt/cm³.

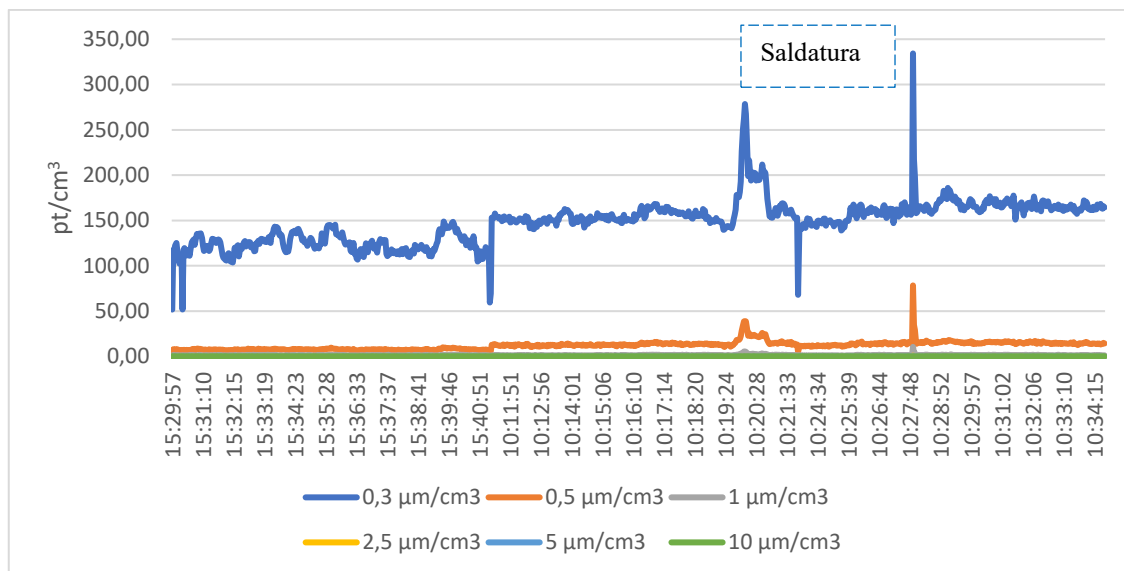


Grafico 20: Evoluzione temporale della PNC, suddivisa in sei distinti stadi dimensionali, per la postazione riparazione a Ronchi dei Legionari; rielaborazione grafica dati Lighthouse

6.4 Distribuzione dei dati

I valori ottenuti con il test Shapiro-Wilk per la normalità sono presentati nelle Tabelle supplementari 10 e 11.

p identifica la significatività statistica, indicando eventualmente una differenza statisticamente significativa tra due coppie. W rappresenta la statistica del test e identifica, cioè, la differenza tra ranghi. Il segno positivo o negativo indica la direzione della differenza.

Data la non normalità dei valori misurati si è proceduto all'esecuzione del test Kruskal-Wallis ANOVA a una via (non parametrico), per entrambi gli strumenti impiegati.

Il test verifica la presenza di differenze significative tra i gruppi rispetto a ciascuna variabile (frazioni dimensionali per Lighthouse e Number, Size, LDSA per DiSCMini).

Le tabelle 6 e 7 sottostanti presentano le informazioni restituite.

ANOVA a una via (Non parametrico)			
Kruskal-Wallis			
	χ^{21}	gdl ²	p
0,3 $\mu\text{m}/\text{cm}^3$	4966	6	<0,001
0,5 $\mu\text{m}/\text{cm}^3$	3327	6	<0,001
1 $\mu\text{m}/\text{cm}^3$	2168	6	<0,001
2,5 $\mu\text{m}/\text{cm}^3$	2044	6	<0,001
5 $\mu\text{m}/\text{cm}^3$	1146	6	<0,001
10 $\mu\text{m}/\text{cm}^3$	277	6	<0,001

Tabella 6: Anova a una via (non parametrico); dati Lighthouse

ANOVA a una via (Non parametrico)			
Kruskal-Wallis			
	χ^2	gdl ³	p
Number	8778	6	<0,001
Size	8999	6	<0,001
LDSA	9487	6	<0,001

Tabella 7: Anova a una via (non parametrico); dati DiSCMini

¹ χ^2 rappresenta la statistica del test chi-quadrato (più è alto, più forte è l'evidenza contro l'ipotesi nulla).

^{2,3} gdl = 6 (ovvero gradi di libertà), indica la presenza di un confronto tra 7 gruppi (perché $gdl = k - 1$).

In seguito ad un confronto a coppie post-hoc (test di Dwass-Steel-Critchlow) tutte le coppie presentano un p-value minore di 0,05. Nello specifico, il p-value per ogni coppia è $< 0,001$, un risultato che indica una differenza altamente significativa tra le sedi di misura. Il parametro "Number" presenta una distribuzione e valori mediani che sono statisticamente diversi in ogni singola sede di misurazione. Non esistono due sedi che possano essere considerate statisticamente equivalenti in termini di questo parametro.

Ambiente e attività specifiche di ogni postazione di lavoro influenzano in modo unico e misurabile la concentrazione di particelle, creando un profilo di esposizione distinto. Non è possibile considerare i dati di una postazione come rappresentativi di un'altra. Inoltre, le differenze significative tra i gruppi supportano l'ipotesi che le specifiche operazioni svolte in ciascuna postazione siano la causa principale delle variazioni nelle concentrazioni e nelle distribuzioni granulometriche del particolato. Questo risultato statistico valida la necessità di analisi granulometriche dettagliate e di un monitoraggio specifico per le attività che generano UFP.

I box-plot successivi (Grafici 17 - 20) illustrano il confronto tra la distribuzione della concentrazione di nanoparticelle nel fondo e nella relativa postazione, misurate dallo strumento DiSCMini.

A San Giovanni in Persiceto la mediana e la dispersione per il parametro Number sono simili tra il "Fondo Assemblaggio SGP" e la "Postazione Riparazione SGP", sebbene quest'ultima presenti un leggero aumento dei valori più elevati.

In generale, le postazioni di saldatura a Ronchi dei Legionari mostrano mediane di Number più elevate rispetto al fondo, indicando una maggiore produzione di particelle. La mediana (linea all'interno del box) tra l'area fondo SMD LINEE RDL e la Postazione PTH 1 RDL è simile per entrambe le sedi, indicando un valore centrale comparabile. Tuttavia, la Postazione PTH 1 RDL mostra una maggiore variabilità dei dati e la presenza di numerosi outlier, che indicano picchi di concentrazione molto più elevati e frequenti rispetto al fondo. Questo suggerisce che, pur avendo un valore tipico simile, la Postazione PTH 1 RDL è soggetta a eventi di emissione di particolato più intensi.

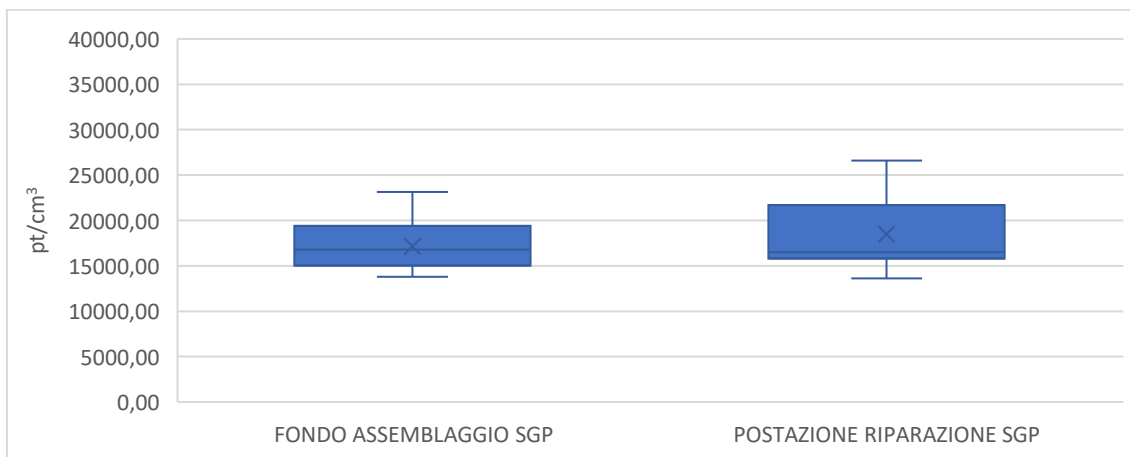


Grafico 17: Distribuzione del parametro Number per area di lavoro a San Giovanni in Persiceto; rielaborazione dati DiSCMini

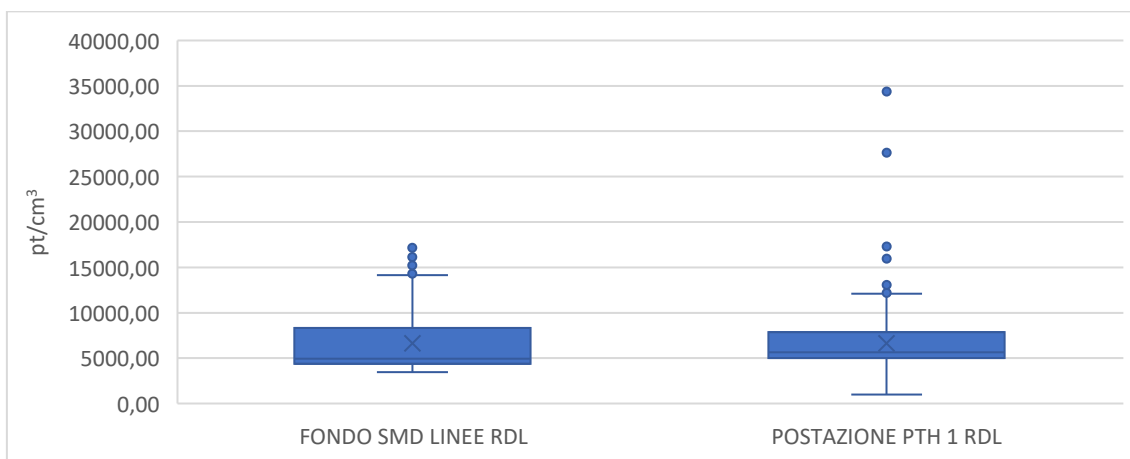


Grafico 18: Distribuzione del parametro Number: confronto tra fondo e postazione di saldatura PTH 1 a Ronchi dei Legionari; rielaborazione dati DiSCMini

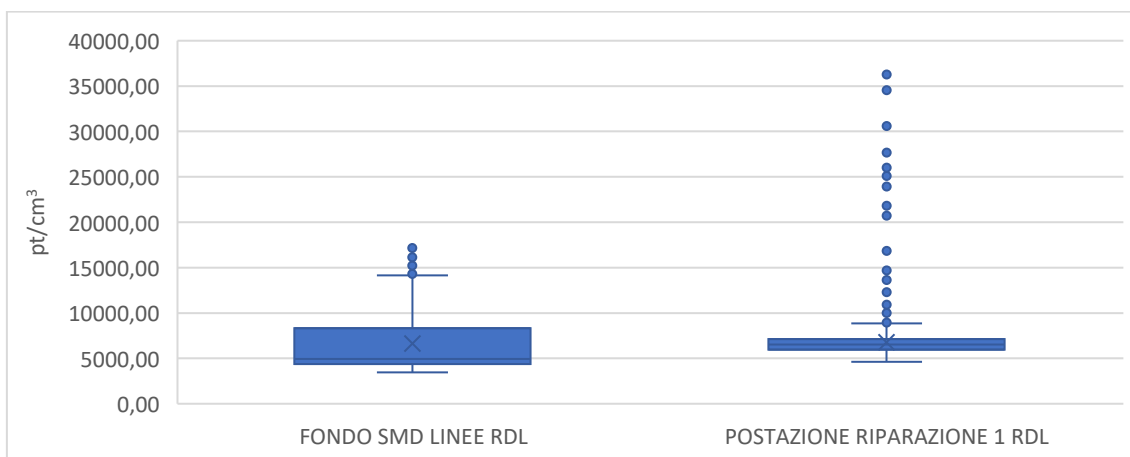


Grafico 19: Distribuzione del parametro Number: confronto tra fondo e postazione di riparazione a Ronchi dei Legionari; rielaborazione dati DiSCMini

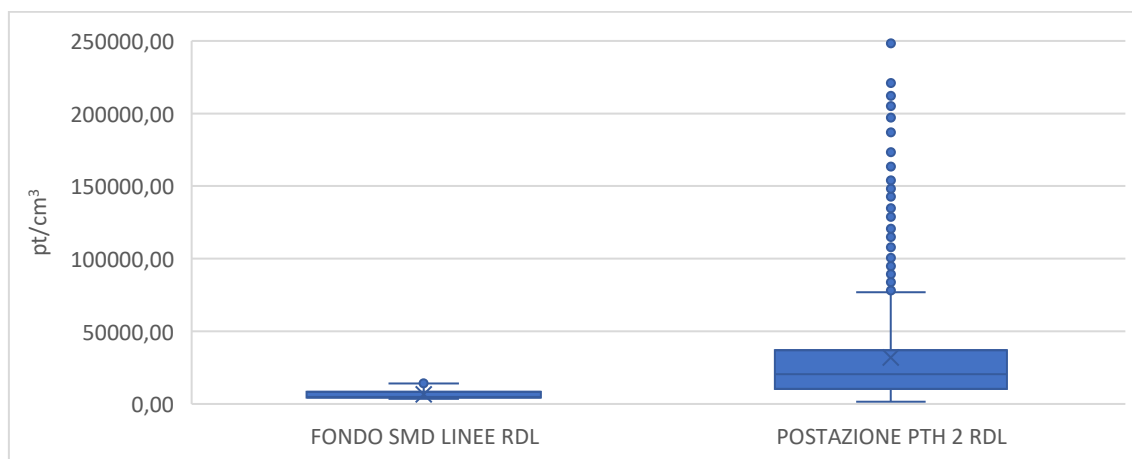


Grafico 20: Distribuzione del parametro Number: confronto tra fondo e postazione di saldatura PTH 2 a Ronchi dei Legionari; rielaborazione dati DiSCMini

I box-plot (Grafici 21 - 24) presentano la distribuzione del parametro PNC relativo esclusivamente alla variabile dimensionale $0,3 \mu\text{m}/\text{cm}^3$ nelle diverse sedi di misura, in seguito ad elaborazione statistica dei dati Lighthouse. Vi è chiaramente una maggiore dispersione nella fase di saldatura del parametro PCN per la frazione da $0,3 \mu\text{m}/\text{cm}^3$ rispetto al relativo fondo a SGP.

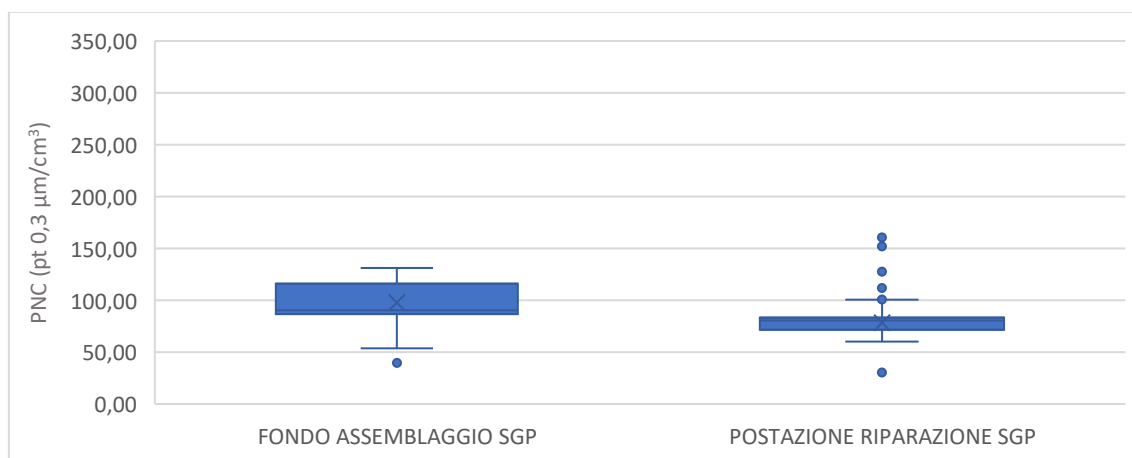


Grafico 21: Distribuzione del parametro PNC (pt $0,3\mu\text{m}/\text{cm}^3$) per aree di lavoro a San Giovanni in Persiceto; rielaborazione dati Lighthouse

Le due postazioni PTH RDL presentano mediane di PCN da $0,3 \mu\text{m}/\text{cm}^3$ significativamente più alte e con maggiore variabilità rispetto ai fondi. La Postazione PTH 2 in particolare mostra una mediana molto elevata e una dispersione notevole, con outlier che rispecchiano i numerosi picchi di concentrazione e sottolineano come le attività di saldatura siano fonte di particelle in questa specifica frazione dimensionale.

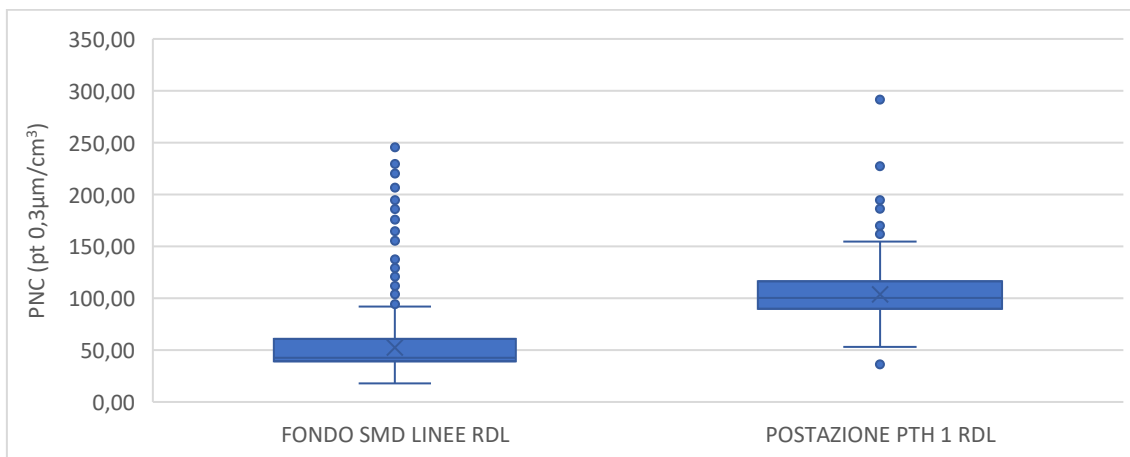


Grafico 22: Distribuzione del parametro PNC (pt 0,3µm/cm³): confronto tra fondo e postazione saldatura PTH 1; rielaborazione dati Lighthouse

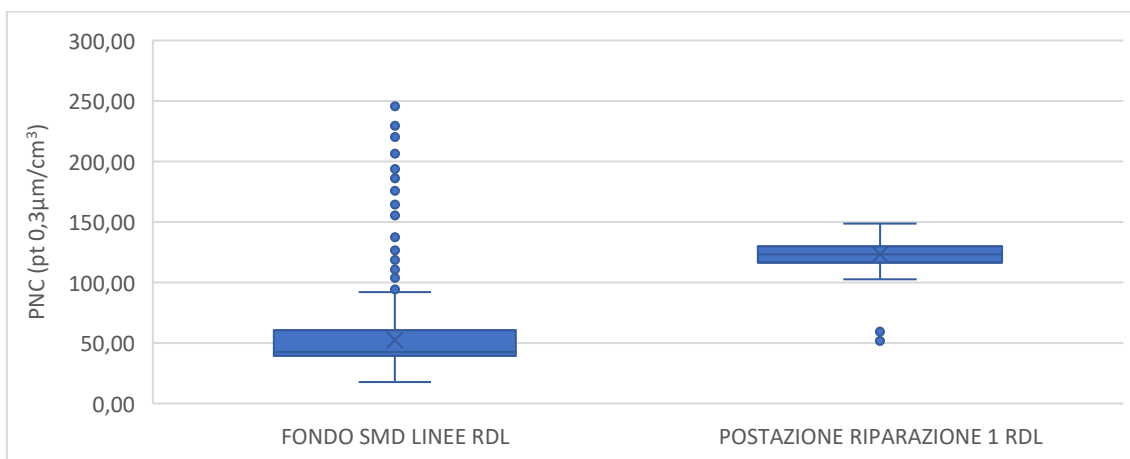


Grafico 23: Distribuzione del parametro PNC (pt 0,3µm/cm³): confronto tra fondo e postazione riparazione; rielaborazione dati Lighthouse

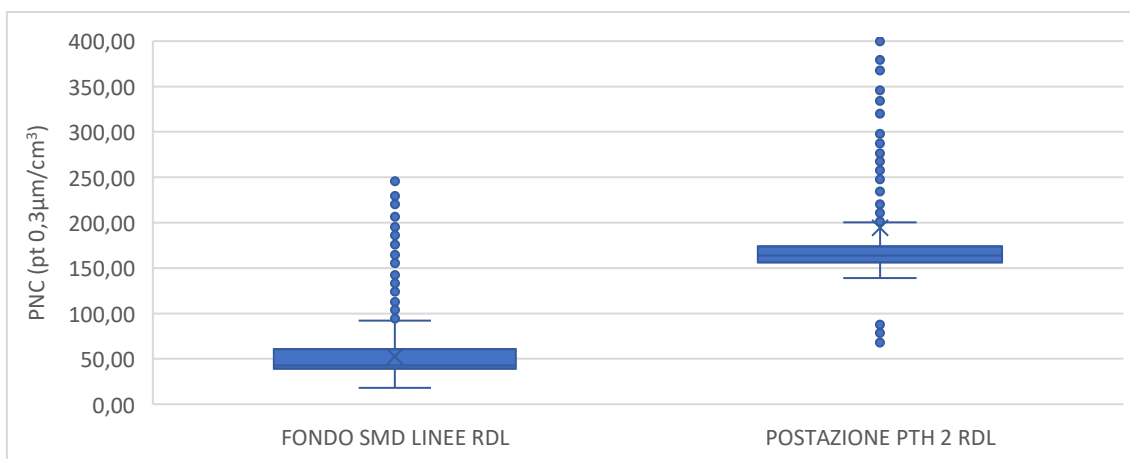


Grafico 24: Distribuzione del parametro PNC (pt 0,3µm/cm³): confronto tra fondo e postazione PTH 2; rielaborazione dati Lighthouse

7. DISCUSSIONE DEI RISULTATI

7.1 Statistica descrittiva - DiSCMini

I dati sulle concentrazioni numeriche mediane rivelano che le aree di fondo e le postazioni di saldatura presentano concentrazioni notevolmente superiori rispetto all'area di controllo, il Bianco Sala Riunioni, che ha un valore di riferimento di 3.111 pt/cm³. Durante le ore lavorative, l'impianto di ricircolo dell'aria è in funzione continuamente, garantendo l'ingresso di aria filtrata nelle aree produttive.

In specifico, la Postazione PTH 2 RDL registra il valore di concentrazione mediano più alto di 20.454 pt/cm³, seguita dal Fondo Assemblaggio SGP con 16.785 pt/cm³ e dalla Postazione Riparazione SGP con 16.523 pt/cm³.

I valori mediani riassunti in Tabella 4 per la Dimensione (Size, nm) e la Superficie Depositata nei Polmoni (LDSA, $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$) evidenziano che la Postazione PTH 1 RDL presenta la dimensione mediana più elevata (60,4 nm), mentre la Postazione Riparazione SGP registra la più piccola (35,2 nm). Per la LDSA, la Postazione Riparazione RDL si distingue con il valore mediano più alto di 56,6 nm/cm³, suggerendo una maggiore esposizione in termini di superficie attiva delle particelle. Come presumibile, l'area Bianco Sala Riunioni mantiene i valori mediani più bassi per entrambi i parametri.

Vi è una relazione inversa generale tra PNC e Size: quando la concentrazione di particelle aumenta, la loro dimensione media tende a diminuire. Alti valori di PNC per particelle più piccole (1-30 nm) potrebbero indicare eventi di nucleazione, mentre valori più bassi di PNC per particelle più grandi (20-100 nm) potrebbero essere compatibili con la crescita o la coagulazione delle particelle in modalità nucleazione.

Si osserva una correlazione positiva tra PNC e LDSA per le diverse aree, indicando che un'elevata concentrazione numerica di particelle è generalmente associata a una maggiore superficie totale depositabile nel tratto respiratorio. La postazione riparazione RDL presenta un valore elevato di LDSA (mediana 56,6 nm/cm³) in relazione alla sua PNC. Questo dato rafforza l'importanza di considerare la superficie delle particelle, oltre al loro numero, per una valutazione completa del rischio occupazionale.

7.2 Andamento temporale - DiSCMini

Nella sala riunioni presa come bianco si osservano delle concentrazioni mediane di nanoparticelle significativamente inferiori rispetto alle diverse postazioni di lavoro. La presumibile influenza data dall'attivazione del sistema di aereazione corrisponde a un picco di PNC (circa 7.000-8.000 pt/cm³) e a una concomitante diminuzione della dimensione media delle particelle a circa 30 nm, dimostrando la generazione di particelle più piccole durante tale evento.

Nel fondo di Ronchi dei Legionari l'attivazione e il funzionamento della linea SMT è associata a variazioni nei livelli di PNC e Size. Le fasi di "attivazione linea", "apertura sportelli macchine" e "caricamento componenti" sono associate a picchi significativi del valore, con un aumento progressivo da circa 5.000 pt/cm³ fino a superare i 15.000 pt/cm³. in corrispondenza di una riduzione della dimensione media. L'andamento suggerisce una produzione di UFP diffusa, ma di intensità moderata, correlata al normale ciclo operativo. L'andamento dei valori di fondo a San Giovanni in Persiceto presenta delle fluttuazioni dei parametri, che osservano incrementi sostanziali, portando le concentrazioni di nanoparticelle oltre i 20.000 pt/cm. Queste sono probabilmente influenzate dalle attività di installazione e manutenzione di macchine che si stava compiendo nel momento di campionamento, oltre che dal passaggio continuo di lavoratori impegnati in attività ordinarie, in concomitanza con gli addetti che operavano fissaggio/montaggio sulle macchine, producendo fumi. L'andamento del parametro "*Number*" mostra una dinamica simile a quella registrata nella sede di Ronchi dei Legionari, ma con valori di base più elevati, oscillando tra 15.000 e 20.000 pt/cm³.

Il quadro cambia drasticamente quando si analizzano le singole postazioni.

I grafici mostrano picchi di concentrazione molto elevati in corrispondenza delle attività di saldatura, seguiti da un rapido rientro a valori di fondo. Questo suggerisce un'emissione istantanea e localizzata di particelle, e l'efficacia dei sistemi di aspirazione locale.

Il grafico 10, relativo alla postazione di riparazione a SGP è particolarmente interessante in quanto mostra una chiara distinzione tra periodi di attività e di inattività, e pertanto, offre una delle prove più dirette della correlazione tra attività e concentrazione di UFP. Si osserva un valore di base di circa 20.000 pt/cm³ durante l'attività iniziale, che si riduce a circa 15.000 pt/cm³ durante la pausa, per poi risalire nuovamente a circa 20.000 pt/cm³

quando l'attività riprende. Questo è un dato statistico cruciale che dimostra come l'interruzione della saldatura in un'area localizzata influenzi immediatamente il livello di particolato, confermando che l'attività lavorativa è la causa principale della sua elevata concentrazione. Il grafico mostra un valore di base più alto, ma con una minore volatilità rispetto alle postazioni di Ronchi dei Legionari.

Nella Postazione Saldatura PTH 1 RDL (Grafico 11) l'attività di saldatura si manifesta con un andamento più stabile rispetto alla postazione precedente, con una chiara identificazione dell'attività di saldatura. Si osservano picchi di notevole entità, attorno ai 25.000 pt/cm³, con rispettive dimensioni delle particelle che scendono a 30-40 nm.

Il grafico 12 relativo alla postazione PTH 2 a RDL mostra una dinamica estremamente volatile. I valori di base sono relativamente bassi, ma l'attività in loco genera picchi di grandissima intensità di una grandezza notevolmente superiore a tutte le altre postazioni, con un picco che supera gli 800.000 pt/cm³. Questi picchi istantanei indicano la presenza di sorgenti di emissione altamente concentrate e potenti. La frequenza dei picchi suggerisce un'attività di lavorazione continua e intermittente, tipica di processi che rilasciano particolato in maniera non uniforme. Nonostante la corretta attivazione e funzionamento del sistema di aspirazione, il posizionamento dell'aspiratore in un punto più lontano dalla area dove è locata la scheda e nella quale si liberano i fumi, anche a causa di possibili interferenze con lampade o altri strumenti di lavoro, potrebbe contribuire a questi livelli elevati di esposizione. Anche per tale ragione, la postazione dovrebbe essere valutata con una campagna di campionamento più specifica e dettagliata.

L'andamento della concentrazione nanoparticellare nella postazione di riparazione a RDL (Grafico 13) è caratterizzato da una elevata variabilità. I valori di base si mantengono tra 5.000 e 10.000 pt/cm³, ma si notano numerosi e significativi picchi, alcuni dei quali superano i 15.000 pt/cm³, simili a quelli registrati nella stessa postazione a SGP, ma con dimensioni mediamente maggiori attorno ai 60 nm. La frequenza dei picchi riflette un'operatività ciclica e mirata.

7.3 Distribuzione dei dati - DiSCMini

Dai risultati dell'ANOVA Kruskal-Wallis, il p-value è <0,001. Questo conferma l'esistenza di differenze statisticamente significative tra i gruppi di campionamento per

ciascuna variabile. Ciò indica che altamente improbabili che le differenze osservate nelle mediane tra i gruppi siano dovute al caso.

I quattro grafici boxplot confrontano la distribuzione del parametro Number in diverse sedi di misura, evidenziando le differenze statistiche tra le distribuzioni dei dati.

Il Grafico 21 (Fondo Assemblaggio SGP vs. Postazione Riparazione SGP) presenta un boxplot della Postazione Riparazione SGP più allungato e con maggiore dispersione e un numero più elevato di outlier, suggerendo una maggiore variabilità e picchi di concentrazione più frequenti e intensi rispetto al fondo.

Dal Grafico 22 (Fondo SMD Linee RDL vs. Postazione PTH 1 RDL) la Postazione PTH 1 RDL presenta un'alta dispersione e la presenza di numerosi outlier fino a 35.000 pt/cm³, indicando che, pur avendo un valore centrale simile all'area di fondo, è soggetta a eventi di emissione di particolato significativamente più elevati e meno prevedibili.

Anche nel Grafico 23 (Fondo SMD Linee RDL vs. Postazione Riparazione RDL) le mediane sono confrontabili, ma la Postazione Riparazione RDL mostra una dispersione ancora maggiore rispetto alla Postazione PTH 1 RDL, con un'elevata frequenza di outlier che raggiungono valori superiori ai 30.000 pt/cm³. Questo suggerisce che le attività di riparazione sono una fonte di particolato altamente variabile e che produce valori estremi.

Il boxplot 24 (Fondo SMD Linee RDL vs. Postazione PTH 2 RDL) evidenzia la differenza più marcata tra le distribuzioni. La Postazione PTH 2 RDL non solo ha una mediana più alta rispetto al Fondo SMD, ma mostra una variabilità dei dati e una frequenza di outlier estrema. Si notano valori anomali che raggiungono picchi oltre 200.000 pt/cm³. Questo indica che le attività svolte in questa specifica postazione generano livelli di concentrazione di un ordine di grandezza superiore rispetto a tutte le altre aree analizzate. Come detto sopra, ciò è presumibilmente da ricondurre al posizionamento non preciso del sistema di estrattore sul punto di liberazione fumi.

7.4 Statistica descrittiva – Lighthouse

La frazione di particelle da 0,3 µm/cm³ è la più prevalente in tutte le aree, con mediane che spaziano da 38,8 pt/cm³ nel "Bianco Sala Riunioni" a 172 pt/cm³ nella "Postazione PTH 2 RDL". Le frazioni dimensionali maggiori (5,0 e 10,0 µm/cm³) mostrano

concentrazioni mediane molto basse, spesso pari o prossime allo zero, indicando una scarsa presenza della componente più grossolana.

Analizzando le mediane della PNC per le sei diverse frazioni dimensionali, la frazione $0,3 \mu\text{m}/\text{cm}^3$ è consistentemente la più abbondante in tutte le aree, con valori mediani elevati nelle postazioni operative e nei fondi rispetto alla sala riunioni.

Vi è chiaramente una differenza nei due fondi presi a riferimento in quanto Ronchi dei Legionari si attesta su un valore mediano di $58,8 \text{ pt}/\text{cm}^3$, mentre San Giovanni in Persiceto raggiunge $90,6 \text{ pt}/\text{cm}^3$. Nientemeno, il fondo di San Giovanni in Persiceto presenta valori mediani superiori alla rispettiva postazione di saldatura.

Le frazioni di $1 \mu\text{m}/\text{cm}^3$ e $2,5 \mu\text{m}/\text{cm}^3$ sono presenti in concentrazioni mediane notevolmente inferiori rispetto alle frazioni più piccole. Infine, le frazioni da $5 \mu\text{m}/\text{cm}^3$ e $10 \mu\text{m}/\text{cm}^3$ sono le meno abbondanti, con valori mediani spesso trascurabili o nulli, confermando una predominanza di particelle più fini.

Soffermandosi sulla composizione dimensionale percentuale delle polveri totali, suddivisa per area, si evidenzia una chiara predominanza della frazione da $0,3 \mu\text{m}$ in tutte le aree, che costituisce la percentuale maggiore del particolato totale. La percentuale di questa frazione varia da circa l'87,52% (Postazione Riparazione SGP) a oltre il 91% (Bianco Sala Riunioni), come dettagliato nella Tabella 5. Questo indica che le particelle vicine al limite superiore di rilevamento del DiSCMini (300 nm) costituiscono la maggior parte della massa delle polveri rilevate dal Lighthouse.

7.5 Andamento temporale - Lighthouse

Nella sala riunioni la PNC per la frazione da $0,3 \mu\text{m}/\text{cm}^3$ è predominante e relativamente stabile, mentre le frazioni maggiori mantengono concentrazioni molto basse. L'accensione e attivazione del sistema di areazione si riflette principalmente nella frazione da $0,3 \mu\text{m}/\text{cm}^3$.

L'andamento della concentrazione delle UFP $0,3 \mu\text{m}$ nell'area di BKD a Ronchi dei Legionari (Grafico 15) rimane relativamente stabile, oscillando tra 50 e $70 \text{ pt}/\text{cm}^3$. Un aumento significativo si verifica in concomitanza con l'attivazione linea dove la concentrazione supera i $250 \text{ pt}/\text{cm}^3$. Le particelle più grandi ($0,5$ - $10 \mu\text{m}$) hanno una

concentrazione trascurabile. Questo andamento suggerisce che il fondo mantiene livelli di particolato moderati.

A differenza di Ronchi dei Legionari, l'area BKD di San Giovanni in Persiceto (Grafico 16) presenta una concentrazione di base del particolato da 0,3 μm più alta, attestandosi tra 60 e 80 pt/cm^3 . Le attività di "installazione e manutenzione" e il "passaggio di lavoratori" sono associate a incrementi che portano la concentrazione a superare i 100 pt/cm^3 . Si nota una maggiore presenza anche di particelle più grandi (da 0,5 a 10 μm), che raggiungono picchi di circa 20 pt/cm^3 .

L'analisi rivela un'ampia variabilità nei livelli di concentrazione e nelle dinamiche temporali del particolato da 0,3 μm tra le diverse sedi di misura, evidenziando una forte dipendenza dalle specifiche attività lavorative. I grafici evidenziano come l'attività di saldatura influisca in modo differente sulle varie frazioni granulometriche del particolato. I picchi di concentrazione non sono uniformi tra le diverse classi dimensionali, confermando la complessità del processo di emissione.

Concentrandosi in dettaglio sul contributo della frazione da 0,3 $\mu\text{m}/\text{cm}^3$ sulla PNC, Le postazioni PTH mostrano i livelli di concentrazione più elevati e volatili, a testimonianza di processi di lavorazione ad alta intensità.

L'andamento del PNC nella Postazione PTH 1 a RDL (Grafico 18) mostra una concentrazione di base di circa 100-120 pt/cm^3 per le particelle da 0,3 μm . Sebbene non si osservino picchi di magnitudine estrema come in altre sedi, durante le operazioni si superano concentrazioni di 250 pt/cm^3 , indicando un aumento dell'esposizione durante l'attività. Le particelle da 0,5 μm mostrano picchi che raggiungono i 50 pt/cm^3 . Questo suggerisce che le attività di questa postazione generano un'alta concentrazione di particelle fini con una componente significativa di quelle sub-microniche.

Nella Postazione PTH 2 a RDL (Grafico 19) l'andamento del PNC è molto volatile. Si notano picchi di concentrazione molto più elevati rispetto a tutte le altre postazioni, con il parametro da 0,3 μm che sfiora i 2500 pt/cm^3 . Inoltre, in questa postazione si osserva una maggiore presenza di particelle più grandi (1 e 2,5 μm), che raggiungono picchi di 1000 e 1500 pt/cm^3 , rispettivamente. Questi dati indicano un'emissione di particolato non solo estremamente elevata ma anche di dimensioni maggiori, suggerendo l'utilizzo di

processi o materiali specifici che generano una gamma più ampia di particelle rispetto agli altri punti di campionamento.

Nella Postazione di Riparazione a RDL (Grafico 20) la concentrazione di particelle da $0,3\ \mu\text{m}$ mostra un andamento più dinamico. Il valore si mantiene stabilmente tra 100 e $150\ \text{pt}/\text{cm}^3$, ma con picchi notevoli che superano i $250\ \text{pt}/\text{cm}^3$, meno frequenti rispetto ad altre sedi. L'andamento delle particelle più grandi ($0,5\ \mu\text{m}$) è visibile, ma a una concentrazione molto inferiore, con un picco massimo che sfiora i $50\ \text{pt}/\text{cm}^3$, e contribuisce in misura minore al totale. Le attività di riparazione generano una produzione di particolato più costante e elevata rispetto alle attività di fondo.

Il grafico 17 relativo alla Postazione di Riparazione a SGP è particolarmente informativo, mostrando una chiara distinzione tra periodi di attività e di inattività. Durante la fase di "saldatura", la concentrazione di particelle da $0,3\ \mu\text{m}$ è elevata, raggiungendo picchi sopra i $120\ \text{pt}/\text{cm}^3$. Quando l'attività si ferma ("fermo attività in attesa di altra scheda"), la concentrazione di particelle cala sensibilmente, mantenendosi al di sotto dei $100\ \text{pt}/\text{cm}^3$. La ripresa della saldatura riporta i livelli a salire. Questo comportamento è un'evidenza diretta che l'operazione di saldatura è il fattore causale primario dell'aumento della concentrazione di particelle in questa postazione.

7.6 Distribuzione dei dati - Lighthouse

Il Grafico 25 (Fondo Assemblaggio SGP vs. Postazione Riparazione SGP) mostra che la Postazione Riparazione SGP presenta una maggiore variabilità dei dati e un numero più elevato di outlier. Questo risultato statistico riassume l'andamento temporale del grafico 17, che mostra una linea di base inferiore durante le pause di saldatura ma picchi significativi durante l'attività.

A Ronchi dei Legionari invece il Grafico 26 (Fondo SMD Linee RDL vs. Postazione PTH 1 RDL) evidenzia una dispersione significativamente maggiore e un'abbondanza di outlier per la Postazione PTH 1 RDL. Ciò è coerente con il grafico 18, che mostra una linea di base relativamente stabile ma con picchi acuti e ricorrenti, direttamente correlati all'attività di saldatura.

Visualizzando invece il boxplot 27, la Postazione Riparazione RDL mostra sia una mediana più elevata sia una maggiore variabilità (IQR più ampio) rispetto all'area di

fondo. Anche in questo caso, la presenza di numerosi outlier conferma un'esposizione a eventi di emissione di particolato più frequenti e intensi. Questo risultato statistico è un'efficace sintesi dell'andamento temporale del grafico 19, che mostra un livello di fondo più alto e una maggiore volatilità dei dati.

Il confronto più significativo è rappresentato nel Grafico 28. La distribuzione della Postazione PTH 2 RDL si distingue nettamente, con una mediana notevolmente superiore e una variabilità estrema, evidenziata da un'enorme quantità di outlier che raggiungono concentrazioni quasi 10 volte superiori a quelle del Fondo SMD. Questi dati descrivono statisticamente l'andamento osservato nel grafico 20, dove i picchi di concentrazione raggiungono valori estremi, superando i 2.500 pt/cm³.

CONCLUSIONI

È stato dimostrato che durante un'operazione di saldatura manuale si verifica una maggiore generazione di particelle ultrafini dai fumi di saldatura, rispetto ai valori di fondo. I picchi di concentrazione rilevati sono eventi singolari e limitati nel tempo, seguiti da una rapida riduzione dei valori quando la saldatura si interrompe, come chiaramente osservabile nella Postazione Riparazione SGP. Con tutta probabilità tali livelli non influiscono in modo significativo sull'esposizione cumulativa dei lavoratori e i valori ottenuti dal monitoraggio risultano tutto sommato contenuti rispetto a quelli rilevati in studi simili.

L'analisi dei dati rivela che l'andamento delle concentrazioni di nanoparticelle è fortemente influenzato dalle specifiche attività svolte in ogni postazione e dall'efficace posizionamento dei sistemi di estrazione dei fumi. Tutte le postazioni mostrano un aumento del parametro "Number" in corrispondenza della saldatura, rispetto ai valori di BKG. Le operazioni di saldatura sono associate ai picchi di maggiore intensità, a conferma della loro natura di fonte di emissione di particolato ultrafine.

In particolare, la Postazione PTH 2 a RDL, con un posizionamento della cappa di aspirazione dei fumi sub-ottimale (ridotta efficacia del sistema di contenimento), presenta picchi di concentrazione fino a 50 volte superiore rispetto ai livelli di fondo.

Il confronto tra le due sedi aziendali evidenzia che, pur essendo le attività di saldatura la principale fonte di UFP in entrambi i siti, l'intensità e loro dinamica variano notevolmente. I dati devono tenere in considerazione anche delle diverse condizioni ambientali interne ed esterne delle zone nelle quali sono localizzati i due stabilimenti; tali differenze potrebbero essere oggetto di un'indagine più approfondita.

Non potendo escludere totalmente un'esposizione a nanoparticelle nelle postazioni, si sottolinea quindi l'importanza dell'applicazione di misure di prevenzione e protezione. Queste includono l'adeguato utilizzo dei sistemi di estrazione il più vicino possibile alla fonte e la periodica e approfondita pulizia delle postazioni, allo scopo di impedire alle nanoparticelle depositate sulle superfici di entrare nuovamente nei flussi d'aria.

Al netto degli interventi prevenzionistici è fondamentale garantire ai lavoratori la dotazione di adeguati dispositivi di protezione individuale, quali protezioni delle vie respiratorie (di tipo FFP3), guanti e indumenti di lavoro (camice) che coprano interamente mani, polsi e braccia.

In virtù delle osservazioni fatte durante i campionamenti e dei risultati ottenuti, ovvero di un valore di esposizione maggiore durante le fasi di saldatura lontano dal sistema di estrazione dei fumi, un intervento migliorativo potrebbe prevedere la configurazione di un relay layout in senso ergonomico e funzionale della postazione di lavoro. Si è pensato, ad esempio, a una cappa aspirante dotata di filtri HEPA con un sistema “funzionale” in termini di regolazione di altezze e localizzazione rispetto agli altri strumenti di lavoro presenti quali stazione saldante, lampada, lente di ingrandimento/visore e supporti.

Ad implementazione delle misure di prevenzione sarebbe infine opportuno trasmettere in maniera chiara ed esaustiva a tutti gli addetti alla saldatura, anche tramite immagini, le informazioni relativamente al corretto posizionamento delle cappe aspiranti.

Questa tesi è stata condotta durante un periodo in cui l'attività di saldatura manuale non era costante e continua nell'arco delle otto ore lavorative. Si reputa interessante lo svolgimento di ulteriori indagini durante un periodo con carico di lavoro maggiore. Ulteriori indagini sarebbero necessarie su un campione più ampio di lavoratori.

Alcune considerazioni riguardo agli strumenti sono necessarie. Innanzitutto, il posizionamento degli stessi deve considerare molti fattori (flussi d'aria e loro direzione, fonti di contaminazione esterna) ed essere svolto accuratamente per evitare bias, dovuti ad esempio a condizioni di ventilazione non intenzionali. Un altro problema riscontrato è stata l'imprecisione e la non sincronizzazione degli orologi interni dei due strumenti nell'arco della campagna. Inoltre, le misurazioni nei luoghi di lavoro spesso presentano spettri di particelle di composizione sconosciuta. Pertanto, la valutazione richiederebbe una combinazione di strumenti di monitoraggio e campionamento qualitativo affinché vengano determinate non solo concentrazione numerica, ma anche identità e origine delle particelle.

ALLEGATI

	SEDE MISURA	Number	Size	LDSA
Media	BIANCO SALA RIUNIONI	4073	56,5	12,8
	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	17155	37,4	34,9
	FONDO SMD LINEE RDL	6649	46,8	16,6
	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	18480	33,4	32,5
	POSTAZIONE PTH 1 RDL	6621	58,9	21,5
	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	32052	53,1	84,2
	POSTAZIONE PTH 2 RDL	6763	59	22,7
Errore std, media	BIANCO SALA RIUNIONI	51,3	0,161	0,128
	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	50,9	0,0479	0,118
	FONDO SMD LINEE RDL	75,5	0,133	0,136
	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	66,2	0,0726	0,036
	POSTAZIONE PTH 1 RDL	51,4	0,245	0,0913
	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	1262	0,721	3,28
	POSTAZIONE PTH 2 RDL	44,3	0,0861	0,0712
Mediana	BIANCO SALA RIUNIONI	3111	56,6	10,2
	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	16785	38,3	31,8
	FONDO SMD LINEE RDL	4931	47,9	13,4
	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	16523	35,2	32
	POSTAZIONE PTH 1 RDL	5651	60,4	20
	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	20454	51,2	56,6
	POSTAZIONE PTH 2 RDL	6539	59,1	22,3
Deviazione standard	BIANCO SALA RIUNIONI	1576	4,95	3,94
	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	2221	2,09	5,17
	FONDO SMD LINEE RDL	2990	5,25	5,4
	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	3139	3,44	1,71
	POSTAZIONE PTH 1 RDL	2273	10,8	4,04
	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	45840	26,2	119
	POSTAZIONE PTH 2 RDL	1981	3,85	3,18
Minimo	BIANCO SALA RIUNIONI	2342	35,1	9,4
	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	13781	30,9	27
	FONDO SMD LINEE RDL	3460	33,5	11,7
	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	13627	26,3	29,3
	POSTAZIONE PTH 1 RDL	998	34,5	16,9
	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	1657	18,8	23
	POSTAZIONE PTH 2 RDL	4632	30,4	18,9
Massimo	BIANCO SALA RIUNIONI	7609	71,5	19,7
	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	23148	41,5	46
	FONDO SMD LINEE RDL	17397	60	37,3
	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	26606	39,2	37,3
	POSTAZIONE PTH 1 RDL	34363	300	67,9
	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	816787	300	1999
	POSTAZIONE PTH 2 RDL	36274	71,4	64,3
Curtosi	BIANCO SALA RIUNIONI	-1,4	-0,397	-1,43
	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	-1,55	-0,951	-1,38
	FONDO SMD LINEE RDL	0,535	-1,16	1,79
	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	-1,36	-1,63	-0,786

	POSTAZIONE PTH 1 RDL	19,3	252	19,8
	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	110	56,6	114
	POSTAZIONE PTH 2 RDL	90	11,3	58,5
Err. Std. di Curtosi	BIANCO SALA RIUNIONI	0,159	0,159	0,159
	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	0,112	0,112	0,112
	FONDO SMD LINEE RDL	0,124	0,124	0,124
	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	0,103	0,103	0,103
	POSTAZIONE PTH 1 RDL	0,111	0,111	0,111
	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	0,135	0,135	0,135
	POSTAZIONE PTH 2 RDL	0,11	0,11	0,11
Shapiro-Wilk W	BIANCO SALA RIUNIONI	0,742	0,972	0,656
	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	0,878	0,866	0,84
	FONDO SMD LINEE RDL	0,813	0,951	0,777
	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	0,84	0,847	0,944
	POSTAZIONE PTH 1 RDL	0,79	0,558	0,786
	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	0,455	0,466	0,402
	POSTAZIONE PTH 2 RDL	0,405	0,86	0,518
Shapiro-Wilk p	BIANCO SALA RIUNIONI	<,001	<,001	<,001
	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	<,001	<,001	<,001
	FONDO SMD LINEE RDL	<,001	<,001	<,001
	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	<,001	<,001	<,001
	POSTAZIONE PTH 1 RDL	<,001	<,001	<,001
	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	<,001	<,001	<,001
	POSTAZIONE PTH 2 RDL	<,001	<,001	<,001
25esimo percentile	BIANCO SALA RIUNIONI	2864	52,1	9,98
	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	15011	35,2	31
	FONDO SMD LINEE RDL	4385	41,8	12,8
	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	15801	29,7	31,1
	POSTAZIONE PTH 1 RDL	5026	51,6	18,7
	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	10406	42,8	32,2
	POSTAZIONE PTH 2 RDL	5955	57	21,2
50esimo percentile	BIANCO SALA RIUNIONI	3111	56,6	10,2
	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	16785	38,3	31,8
	FONDO SMD LINEE RDL	4931	47,9	13,4
	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	16523	35,2	32
	POSTAZIONE PTH 1 RDL	5651	60,4	20
	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	20454	51,2	56,6
	POSTAZIONE PTH 2 RDL	6539	59,1	22,3
75esimo percentile	BIANCO SALA RIUNIONI	6121	60,3	18,3
	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	19386	38,9	40,9
	FONDO SMD LINEE RDL	8325	51,4	19,2
	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	21696	36,5	33,9
	POSTAZIONE PTH 1 RDL	7866	64,4	23,6
	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	37087	56,6	94,9
	POSTAZIONE PTH 2 RDL	7126	61,3	23,3

Tabella 8: Tabella supplementare dei risultati di statistica descrittiva Jamovi per i sette punti di campionamento; rielaborazione dati DiscMini

	SEDE MISURA	0,3 µm/cm3	0,5 µm/cm3	1 µm/cm3	2,5 µm/cm3	5 µm/cm3	10 µm/cm3
Media	BIANCO SALA RIUNIONI	38,9	2,74	0,778	0,302	0,0622	0,0255
	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	98	11,2	2,88	0,955	0,131	0,0129
	FONDO SMD LINEE RDL	61,5	7,83	2,09	0,661	0,0813	0,011
	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	78,5	9,07	2,2	0,716	0,107	0,0204
	POSTAZIONE PTH 1 RDL	104	7,1	1,37	0,338	0,0507	0,0158
	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	230	30,8	3,85	0,603	0,096	0,0187
	POSTAZIONE PTH 2 RDL	148	12,1	1,45	0,297	0,0397	0,0101
Errore std, media	BIANCO SALA RIUNIONI	0,082	0,0318	0,0176	0,00832	0,00214	0,00114
	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	0,537	0,0956	0,0369	0,0151	0,00308	5,87E-04
	FONDO SMD LINEE RDL	0,879	0,227	0,056	0,0188	0,00268	6,48E-04
	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	0,296	0,118	0,0392	0,0131	0,00199	7,33E-04
	POSTAZIONE PTH 1 RDL	0,628	0,105	0,0201	0,0045	0,00169	9,51E-04
	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	9,44	3,5	0,637	0,0708	0,0177	0,00368
	POSTAZIONE PTH 2 RDL	0,791	0,158	0,0171	0,00318	0,0011	5,30E-04
Mediana	BIANCO SALA RIUNIONI	38,8	2,68	0,625	0,244	0,0424	0,0212
	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	90,6	11,6	2,82	0,901	0,106	0
	FONDO SMD LINEE RDL	58,8	7,15	1,42	0,339	0,0424	0
	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	80,7	8,81	2,01	0,636	0,106	0,0212
	POSTAZIONE PTH 1 RDL	100	6,62	1,29	0,318	0,0424	0
	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	172	15,1	1,61	0,339	0,0424	0
	POSTAZIONE PTH 2 RDL	152	12,5	1,4	0,297	0,0424	0
Deviazione standard	BIANCO SALA RIUNIONI	2,01	0,779	0,431	0,204	0,0525	0,028
	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	16,1	2,87	1,11	0,454	0,0925	0,0176
	FONDO SMD LINEE RDL	26,4	6,82	1,68	0,564	0,0804	0,0194
	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	9,6	3,83	1,27	0,424	0,0646	0,0238
	POSTAZIONE PTH 1 RDL	18,8	3,16	0,602	0,135	0,0507	0,0285
	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	226	83,6	15,2	1,69	0,424	0,0881
	POSTAZIONE PTH 2 RDL	23,9	4,76	0,516	0,0961	0,0331	0,016
Minimo	BIANCO SALA RIUNIONI	17,9	0,636	0,106	0	0	0
	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	39,5	4,24	0,89	0,212	0	0
	FONDO SMD LINEE RDL	19,9	1,25	0,318	0,0212	0	0

	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	30,3	2,63	0,403	0,127	0	0
	POSTAZIONE PTH 1 RDL	36,2	2,61	0,445	0,0636	0	0
	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	78,4	6,61	0,89	0,0848	0	0
	POSTAZIONE PTH 2 RDL	51,8	3,33	0,509	0,0636	0	0
Massimo	BIANCO SALA RIUNIONI	44,1	4,41	1,72	0,911	0,254	0,127
	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	131	19,5	6,27	2,29	0,509	0,106
	FONDO SMD LINEE RDL	252	64,5	12,8	2,27	0,403	0,148
	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	161	42,4	13	3,11	0,466	0,191
	POSTAZIONE PTH 1 RDL	291	65,3	11,8	1,57	0,848	0,551
	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	2463	1330	303	29,7	9,58	2,01
	POSTAZIONE PTH 2 RDL	334	78,3	10,5	0,89	0,212	0,106
Curtosi	BIANCO SALA RIUNIONI	37,2	-1,55	-1,63	-1,16	0,0744	1,03
	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	-0,844	-0,517	-0,292	-0,149	0,87	2,67
	FONDO SMD LINEE RDL	18,7	23,3	6,34	-1,2	0,238	11
	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	9,95	13,9	14,1	7,55	2,2	5,23
	POSTAZIONE PTH 1 RDL	13,9	159	131	18	69,5	141
	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	37,2	119	269	188	439	462
	POSTAZIONE PTH 2 RDL	6,66	44,5	117	2,34	1,61	3,64
Err, Std, di Curtosi	BIANCO SALA RIUNIONI	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199
	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	0,163	0,163	0,163	0,163	0,163	0,163
	FONDO SMD LINEE RDL	0,163	0,163	0,163	0,163	0,163	0,163
	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	0,151	0,151	0,151	0,151	0,151	0,151
	POSTAZIONE PTH 1 RDL	0,163	0,163	0,163	0,163	0,163	0,163
	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	0,204	0,204	0,204	0,204	0,204	0,204
	POSTAZIONE PTH 2 RDL	0,162	0,162	0,162	0,162	0,162	0,162
Shapiro-Wilk W	BIANCO SALA RIUNIONI	0,793	0,889	0,862	0,911	0,913	0,825
	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	0,861	0,956	0,948	0,948	0,916	0,72
	FONDO SMD LINEE RDL	0,63	0,605	0,805	0,83	0,862	0,607
	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	0,861	0,742	0,722	0,791	0,933	0,778
	POSTAZIONE PTH 1 RDL	0,881	0,372	0,446	0,823	0,699	0,504
	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	0,331	0,2	0,137	0,177	0,12	0,129

	POSTAZIONE PTH 2 RDL	0,913	0,752	0,529	0,953	0,892	0,659
Shapiro-Wilk p	BIANCO SALA RIUNIONI	<,001	<,001	<,001	<,001	<,001	<,001
	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	<,001	<,001	<,001	<,001	<,001	<,001
	FONDO SMD LINEE RDL	<,001	<,001	<,001	<,001	<,001	<,001
	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	<,001	<,001	<,001	<,001	<,001	<,001
	POSTAZIONE PTH 1 RDL	<,001	<,001	<,001	<,001	<,001	<,001
	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	<,001	<,001	<,001	<,001	<,001	<,001
	POSTAZIONE PTH 2 RDL	<,001	<,001	<,001	<,001	<,001	<,001
25esimo percentile	BIANCO SALA RIUNIONI	37,7	2,01	0,36	0,106	0,0212	0
	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	86,7	8,39	1,84	0,551	0,0636	0
	FONDO SMD LINEE RDL	43,4	3,24	0,678	0,191	0,0212	0
	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	71,8	7,59	1,59	0,466	0,0636	0
	POSTAZIONE PTH 1 RDL	89,9	5,95	1,14	0,254	0,0212	0
	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	161	13,7	1,4	0,275	0,0212	0
	POSTAZIONE PTH 2 RDL	129	7,95	1,23	0,233	0,0212	0
50esimo percentile	BIANCO SALA RIUNIONI	38,8	2,68	0,625	0,244	0,0424	0,0212
	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	90,6	11,6	2,82	0,901	0,106	0
	FONDO SMD LINEE RDL	58,8	7,15	1,42	0,339	0,0424	0
	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	80,7	8,81	2,01	0,636	0,106	0,0212
	POSTAZIONE PTH 1 RDL	100	6,62	1,29	0,318	0,0424	0
	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	172	15,1	1,61	0,339	0,0424	0
	POSTAZIONE PTH 2 RDL	152	12,5	1,4	0,297	0,0424	0
75esimo percentile	BIANCO SALA RIUNIONI	40,1	3,48	1,19	0,487	0,0848	0,0424
	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	116	12,8	3,42	1,21	0,17	0,0212
	FONDO SMD LINEE RDL	65,7	9,54	3,43	1,27	0,148	0,0212
	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	83,3	9,51	2,33	0,805	0,148	0,0212
	POSTAZIONE PTH 1 RDL	116	7,44	1,46	0,381	0,0636	0,0212
	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	188	17,2	2	0,424	0,0848	0,0212
	POSTAZIONE PTH 2 RDL	163	14,4	1,55	0,35	0,0636	0,0212

Tabella 9: Tabella supplementare dei risultati di statistica descrittiva Jamovi per i sette punti di campionamento; rielaborazione dati Lighthouse

Confronto a coppie Dwass-Steel-Critchlow-Fligner			
Confronti a coppie - 0,3 $\mu\text{m}/\text{cm}^3$			
		W	p
BIANCO SALA RIUNIONI	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	46,42	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	FONDO SMD LINEE RDL	45,32	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	47,55	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE PTH 1 RDL	46,35	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE PTH 2 RDL	41,9	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	46,57	<0,001
FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	-43,5	<0,001
FONDO SMD LINEE RDL	POSTAZIONE PTH 1 RDL	46,01	<0,001
FONDO SMD LINEE RDL	POSTAZIONE PTH 2 RDL	44,53	<0,001
FONDO SMD LINEE RDL	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	49,5	<0,001
POSTAZIONE PTH 1 RDL	POSTAZIONE PTH 2 RDL	44,95	<0,001
POSTAZIONE PTH 1 RDL	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	45,65	<0,001
POSTAZIONE PTH 2 RDL	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	-32,46	<0,001
Confronti a coppie - 0,5 $\mu\text{m}/\text{cm}^3$			
		W	p
BIANCO SALA RIUNIONI	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	46.461	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	FONDO SMD LINEE RDL	32.859	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	47.786	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE PTH 1 RDL	46.349	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE PTH 2 RDL	41.899	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	46.493	<0,001
FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	-21.605	<0,001
FONDO SMD LINEE RDL	POSTAZIONE PTH 1 RDL	-0,213	1.000
FONDO SMD LINEE RDL	POSTAZIONE PTH 2 RDL	40.828	<0,001
FONDO SMD LINEE RDL	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	30.496	<0,001
POSTAZIONE PTH 1 RDL	POSTAZIONE PTH 2 RDL	44.540	<0,001
POSTAZIONE PTH 1 RDL	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	41.585	<0,001
POSTAZIONE PTH 2 RDL	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	-26.619	<0,001
Confronti a coppie - 1 $\mu\text{m}/\text{cm}^3$			
		W	p
BIANCO SALA RIUNIONI	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	45,9	<0,001

BIANCO SALA RIUNIONI	FONDO SMD LINEE RDL	25,08	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	40,35	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE PTH 1 RDL	30,08	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE PTH 2 RDL	37,64	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	35,46	<0,001
FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	-21,35	<0,001
FONDO SMD LINEE RDL	POSTAZIONE PTH 1 RDL	-3,19	0,266
FONDO SMD LINEE RDL	POSTAZIONE PTH 2 RDL	6,06	<,001
FONDO SMD LINEE RDL	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	-1,18	0,982
POSTAZIONE PTH 1 RDL	POSTAZIONE PTH 2 RDL	25,51	<0,001
POSTAZIONE PTH 1 RDL	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	10,59	<0,001
POSTAZIONE PTH 2 RDL	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	-19,58	<0,001
Confronti a coppie - 2,5 $\mu\text{m}/\text{cm}^3$			
		W	p
BIANCO SALA RIUNIONI	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	38.579	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	FONDO SMD LINEE RDL	15.028	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	34.020	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE PTH 1 RDL	6.128	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE PTH 2 RDL	9.395	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	2.645	0,5
FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	-18.752	<0,001
FONDO SMD LINEE RDL	POSTAZIONE PTH 1 RDL	-5.312	0,003
FONDO SMD LINEE RDL	POSTAZIONE PTH 2 RDL	-0,764	0,998
FONDO SMD LINEE RDL	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	-9.400	<0,001
POSTAZIONE PTH 1 RDL	POSTAZIONE PTH 2 RDL	5.259	0,004
POSTAZIONE PTH 1 RDL	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	-10.263	<0,001
POSTAZIONE PTH 2 RDL	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	-13.381	<0,001
Confronti a coppie - 5 $\mu\text{m}/\text{cm}^3$			
		W	p
BIANCO SALA RIUNIONI	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	22.246	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	FONDO SMD LINEE RDL	3.350	0,212
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	20.235	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE PTH 1 RDL	-5.384	0,003
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE PTH 2 RDL	-0,816	0,997

BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	-10.595	<0,001
FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	-6.233	<0,001
FONDO SMD LINEE RDL	POSTAZIONE PTH 1 RDL	-7.408	<0,001
FONDO SMD LINEE RDL	POSTAZIONE PTH 2 RDL	-2.498	0,571
FONDO SMD LINEE RDL	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	-12.347	<0,001
POSTAZIONE PTH 1 RDL	POSTAZIONE PTH 2 RDL	4.239	0,043
POSTAZIONE PTH 1 RDL	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	-6.624	<0,001
POSTAZIONE PTH 2 RDL	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	-9.739	<0,001
Confronti a coppie - 10 µm/cm3			
		W	p
BIANCO SALA RIUNIONI	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	-127.389	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	FONDO SMD LINEE RDL	-164.627	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	-43.337	0,036
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE PTH 1 RDL	-107.379	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE PTH 2 RDL	-109.094	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	-168.991	<0,001
FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	105.480	<0,001
FONDO SMD LINEE RDL	POSTAZIONE PTH 1 RDL	68.949	<0,001
FONDO SMD LINEE RDL	POSTAZIONE PTH 2 RDL	44.241	0,029
FONDO SMD LINEE RDL	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	-0,1219	1.000
POSTAZIONE PTH 1 RDL	POSTAZIONE PTH 2 RDL	-16.663	0,903
POSTAZIONE PTH 1 RDL	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	-71.398	<0,001
POSTAZIONE PTH 2 RDL	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	-45.947	0,02

Tabella 10: Tabella dei valori *W* e *p* ottenuti dal test post-hoc di Dwass-Steel-Critchlow-Fligner distinta per le sei frazioni dimensionali; rielaborazione dati Lighthouse

Confronto a coppie Dwass-Steel-Critchlow-Fligner			
Number			
		W	p
BIANCO SALA RIUNIONI	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	61,54	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	FONDO SMD LINEE RDL	35,89	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	63,17	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE PTH 1 RDL	37,63	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE PTH 2 RDL	56,81	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	46,12	<0,001
FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	24,99	<0,001
FONDO SMD LINEE RDL	POSTAZIONE PTH 1 RDL	15,14	<0,001

FONDO SMD LINEE RDL	POSTAZIONE PTH 2 RDL	54,64	<0,001
FONDO SMD LINEE RDL	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	16,34	<0,001
POSTAZIONE PTH 1 RDL	POSTAZIONE PTH 2 RDL	59,91	<0,001
POSTAZIONE PTH 1 RDL	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	17,04	<0,001
POSTAZIONE PTH 2 RDL	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	-64,77	<0,001
Confronti a coppie - Size			
		W	p
BIANCO SALA RIUNIONI	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	-61,45	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	FONDO SMD LINEE RDL	-48,13	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	-63,1	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE PTH 1 RDL	12,22	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE PTH 2 RDL	-22,85	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	20,23	<0,001
FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	-51,09	<0,001
FONDO SMD LINEE RDL	POSTAZIONE PTH 1 RDL	55,28	<0,001
FONDO SMD LINEE RDL	POSTAZIONE PTH 2 RDL	16,68	<0,001
FONDO SMD LINEE RDL	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	69,68	<0,001
POSTAZIONE PTH 1 RDL	POSTAZIONE PTH 2 RDL	-32,19	<0,001
POSTAZIONE PTH 1 RDL	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	-3,39	0,2
POSTAZIONE PTH 2 RDL	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	42,31	<0,001
Confronti a coppie - LDSA			
		W	p
BIANCO SALA RIUNIONI	FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	61,54	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	FONDO SMD LINEE RDL	32,49	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	63,17	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE PTH 1 RDL	54,35	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE PTH 2 RDL	57,46	<0,001
BIANCO SALA RIUNIONI	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	62	<0,001
FONDO ASSEMBLAGGIO SGP	POSTAZIONE RIPARAZIONE SGP	-9,33	<0,001
FONDO SMD LINEE RDL	POSTAZIONE PTH 1 RDL	43,24	<0,001
FONDO SMD LINEE RDL	POSTAZIONE PTH 2 RDL	63,3	<0,001
FONDO SMD LINEE RDL	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	51,9	<0,001
POSTAZIONE PTH 1 RDL	POSTAZIONE PTH 2 RDL	64,59	<0,001
POSTAZIONE PTH 1 RDL	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	26,91	<0,001
POSTAZIONE PTH 2 RDL	POSTAZIONE RIPARAZIONE RDL	-67,21	<0,001

Tabella 11: Tabella dei valori *W* e *p* ottenuti dal test post-hoc di Dwass-Steel-Critchlow-Fligner (per le tre variabili Number, Size e LDSA); rielaborazione dati DiSCMini

BIBLIOGRAFIA

1. LaDou J. Printed circuit board industry. *Int J Hyg Environ Health*. 2006;209(3):211-219. doi:10.1016/j.ijheh.2006.02.001
2. Marval J, Tronville P. Ultrafine particles: A review about their health effects, presence, generation, and measurement in indoor environments. *Build Environ*. 2022;216:108992. doi:10.1016/j.buildenv.2022.108992
3. Electronic Manufacturing Services [EMS] Market Size, 2032. Accessed June 5, 2025. <https://www.fortunebusinessinsights.com/electronic-manufacturing-services-ems-market-105519>
4. Quality, productivity, occupational health and safety and cost effectiveness of ergonomic improvements in the test workstations of an electronic factory | Request PDF. *ResearchGate*. Published online February 6, 2025. doi:10.1016/S0169-8141(03)00051-9
5. Esfandyari A, Härter S, Javied T, Franke J. A Lean Based Overview on Sustainability of Printed Circuit Board Production Assembly. *Procedia CIRP*. 2015;26:305-310. doi:10.1016/j.procir.2014.07.059
6. Hall WJ, Williams PT. Separation and recovery of materials from scrap printed circuit boards. *Resour Conserv Recycl*. 2007;51(3):691-709. doi:10.1016/j.resconrec.2006.11.010
7. Avino P, Manigrasso M, Pandolfi P, Tornese C, Settimi D, Paolucci N. Submicron Particles during Macro- and Micro-Weldings Procedures in Industrial Indoor Environments and Health Implications for Welding Operators. *Metals*. 2015;5(2):1045-1060. doi:10.3390/met5021045
8. Yeow PHP, Nath Sen R. Quality, productivity, occupational health and safety and cost effectiveness of ergonomic improvements in the test workstations of an electronic factory. *Int J Ind Ergon*. 2003;32(3):147-163. doi:10.1016/S0169-8141(03)00051-9
9. Büyükbay B, Ciliz N, Goren GE, Mammadov A. Cleaner production application as a sustainable production strategy, in a Turkish Printed Circuit Board Plant. *Resour Conserv Recycl*. 2010;54(10):744-751. doi:10.1016/j.resconrec.2009.12.004
10. (PDF) The toxic effect of lead on human health: A review. *ResearchGate*. doi:10.52905/hbph2022.3.45
11. Mendy A, Gasana J, Forno E, Vieira ER, Dowdye C. Work-related respiratory symptoms and lung function among solderers in the electronics industry: a meta-analysis. *Environ Health Prev Med*. 2012;17(3):183-190. doi:10.1007/s12199-011-0236-8
12. (PDF) Chemicals Used in the Electronics Industry. In: *ResearchGate*. ; 2025. Accessed July 22, 2025.

https://www.researchgate.net/publication/365174648_Chemicals_Used_in_the_Electronics_Industry

13. Chemicals Used in the Electronics Industry. OECD. September 2, 2014. Accessed July 22, 2025. https://www.oecd.org/en/publications/chemicals-used-in-the-electronics-industry_9789264221062-en.html
14. Qytyku M. Esposizione a particelle ultrafini durante l'attività di saldatura su acciai speciali. 2021. Accessed May 29, 2025. https://drive.google.com/file/d/1jTPNKIrUsPf7JyxquDjSJmghYXXI6NyX/view?usp=drive_open&usp=embed_facebook
15. (PDF) Evaluation of the sources of ultrafine particles in residential indoor. Extended abstract. *ResearchGate*. Accessed July 22, 2025. https://www.researchgate.net/publication/285788300_Evaluation_of_the_sources_of_ultrafine_particles_in_residential_indoor_Extended_abstract
16. Szoboszlai Z, Kertész Zs, Szikszai Z, et al. Identification and chemical characterization of particulate matter from wave soldering processes at a printed circuit board manufacturing company. *J Hazard Mater*. 2012;203-204:308-316. doi:10.1016/j.jhazmat.2011.12.030
17. Zhang L, Yu JM, Shan XY, Shao J, Ye HP. Characterization of welding fume and airborne heavy metals in electronic manufacturing workshops in Hangzhou, China: implication for occupational population exposure. *Environ Sci Pollut Res*. 2023;30(20):57398-57409. doi:10.1007/s11356-023-26569-2
18. Gómez V, Irusta S, Balas F, Santamaria J. Intense generation of respirable metal nanoparticles from a low-power soldering unit. *J Hazard Mater*. 2013;256-257:84-89. doi:10.1016/j.jhazmat.2013.03.067
19. Mohammadyan M, Moosazadeh M, Borji A, Khanjani N, Rahimi Moghadam S. Investigation of occupational exposure to lead and its relation with blood lead levels in electrical solderers. *Environ Monit Assess*. 2019;191(3):126. doi:10.1007/s10661-019-7258-x
20. (PDF) Occupational lead exposure on electronic soldering workers in Malaysia. In: *ResearchGate*. Accessed July 22, 2025. https://www.researchgate.net/publication/271207615_Occupational_lead_exposure_on_electronic_soldering_workers_in_Malaysia
21. Lorenzini A. Valutazione della contaminazione ambientale e dell'esposizione cutanea a nanoparticelle di arsenurio di gallio in un laboratorio di ricerca. 2023. Accessed May 29, 2025. https://drive.google.com/file/d/17miFVxkjrDlbcGNsHMfr7e_7B6WEXS/view?usp=drive_open&lsrp=1&usp=embed_facebook
22. Debia M. *Characterization and Control of Occupational Exposure to Nanoparticles and Ultrafine Particles*. Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail; 2013.

23. Baracchini E. Ultrafine particles in working environment and ambient air: real-time measurements, characterization and evaluation of exposure routes. 2017. Accessed May 29, 2025. https://drive.google.com/file/d/1hJc-vwea_qT3o_Lv8ZkbA7QqyacqZ6eB/view?usp=drive_open&usp=embed_facebook
24. Tsai CJ, Huang CY, Chen SC, et al. Exposure assessment of nano-sized and respirable particles at different workplaces. *J Nanoparticle Res.* 2011;13(9):4161-4172. doi:10.1007/s11051-011-0361-8
25. Oberdörster G, Oberdörster E, Oberdörster J. Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environ Health Perspect.* 2005;113(7):823-839. doi:10.1289/ehp.7339
26. Kelly FJ, Fussell JC. Size, source and chemical composition as determinants of toxicity attributable to ambient particulate matter. *Atmos Environ.* 2012;60:504-526. doi:10.1016/j.atmosenv.2012.06.039
27. Kwon HS, Ryu MH, Carlsten C. Ultrafine particles: unique physicochemical properties relevant to health and disease. *Exp Mol Med.* 2020;52(3):318-328. doi:10.1038/s12276-020-0405-1
28. Moreno-Ríos AL, Tejeda-Benítez LP, Bustillo-Lecompte CF. Sources, characteristics, toxicity, and control of ultrafine particles: An overview. *Geosci Front.* 2022;13(1):101147. doi:10.1016/j.gsf.2021.101147
29. Panizzolo M, Barbero F, Ghelli F, et al. Assessing the inhaled dose of nanomaterials by nanoparticle tracking analysis (NTA) of exhaled breath condensate (EBC) and its relationship with lung inflammatory biomarkers. *Chemosphere.* 2024;358:142139. doi:10.1016/j.chemosphere.2024.142139
30. Prodi A, Larese Filon F. Nano-scaled particles and fibres occupational exposure assessment: An integrated approach from air sampling to skin and surface contamination. Published online 2016. doi:10.5101/nbe.v8i2.p91-104
31. Asbach C, Alexander C, Clavaguera S, et al. Review of measurement techniques and methods for assessing personal exposure to airborne nanomaterials in workplaces. *Sci Total Environ.* 2017;603-604:793-806. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.03.049
32. Pedata P, Garzillo EM, Sannolo N. [Ultrafine particles and effects on the body: review of the literature]. *G Ital Med Lav Ergon.* 2010;32(1):23-31.
33. Oberdörster G. Pulmonary effects of inhaled ultrafine particles. *Int Arch Occup Environ Health.* 2000;74(1):1-8. doi:10.1007/s004200000185
34. Gomes JF, Miranda RM. Emission of airborne ultrafine particles during welding of steel plates. *Ciênc Tecnol Mater.* 2014;26(1):1-8. doi:10.1016/j.ctmat.2014.09.001
35. Gómez V, Irusta S, Balas F, Santamaria J. Intense generation of respirable metal nanoparticles from a low-power soldering unit. *J Hazard Mater.* 2013;256-257:84-89. doi:10.1016/j.jhazmat.2013.03.067

36. Larese Filon F, Mauro M, Adami G, Bovenzi M, Crosera M. Nanoparticles skin absorption: New aspects for a safety profile evaluation. *Regul Toxicol Pharmacol RTP*. 2015;72(2):310-322. doi:10.1016/j.yrtph.2015.05.005
37. Marcias G, Fostinelli J, Sanna AM, et al. Occupational Exposure to Fine Particles and Ultrafine Particles in a Steelmaking Foundry. *Metals*. 2019;9(2):163. doi:10.3390/met9020163
38. Viana M, Rivas I, Reche C, et al. Field comparison of portable and stationary instruments for outdoor urban air exposure assessments. *Atmos Environ*. 2015;123:220-228. doi:10.1016/j.atmosenv.2015.10.076
39. Viana M, Fonseca AS, Querol X, et al. Workplace exposure and release of ultrafine particles during atmospheric plasma spraying in the ceramic industry. *Sci Total Environ*. 2017;599-600:2065-2073. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.05.132
40. Bémer D, Bau S. Using a DiSCmini classifier for real-time determination of ultrafine particle mass concentration—application to diesel particle measurement. *J Nanoparticle Res*. 2019;21(2):41. doi:10.1007/s11051-019-4483-8
41. Fierz M, Houle ,C., Steigmeier ,P., and Burtscher H. Design, Calibration, and Field Performance of a Miniature Diffusion Size Classifier. *Aerosol Sci Technol*. 2011;45(1):1-10. doi:10.1080/02786826.2010.516283
42. Yu X, Liu H, Kang F, et al. Air pollution in the operating room: A case study of characteristics of airborne particles, PAHs and environmentally persistent free radicals. *Atmospheric Pollut Res*. 2021;12(12):101257. doi:10.1016/j.apr.2021.101257
43. Fierz M, Meier ,Dominik, Steigmeier ,Peter, and Burtscher H. Aerosol Measurement by Induced Currents. *Aerosol Sci Technol*. 2014;48(4):350-357. doi:10.1080/02786826.2013.875981
44. Ghosh N, Goyal S, Howard A, Banerjee P, Vitale J. Application of Nanotechnology in a Novel Air Purifier for Remediation of Airborne Pathogen and to Prevent the Spread of COVID-19. *Eur Sci J ESJ*. 2023;19(12):1-1. doi:10.19044/esj.2023.v19n12p1
45. Lans JLA, Mathijssen NMC, Bode A, Dobbelsteen JJ van den, Elst M van der, Luscuere PG. Operating room ventilation systems: recovery degree, cleanliness recovery rate and air change effectiveness in an ultra-clean area. *J Hosp Infect*. 2022;122:115-125. doi:10.1016/j.jhin.2021.12.018