

This is the peer reviewed version of the following article:

Rischio sanitario correlato all'esposizione occupazionale nella gestione dei RAEE / Gobba, F., Modenese, A.
- In: WEEENMODELS. LA GESTIONE SOSTENIBILE DEI RIFIUTI ELETTRICI ED ELETTRONICI (RAEE)[s.l], 2016.
- ISBN 9788854897083. - pp. 73-79

Terms of use:

The terms and conditions for the reuse of this version of the manuscript are specified in the publishing policy. For all terms of use and more information see the publisher's website.

22/10/2026 09:38

Rischio sanitario correlato all'esposizione occupazionale nella gestione dei RAEE

FABRIZIOMARIA GOBBA, ALBERTO MODENESE

Abstract

L'attività di riciclo dei rifiuti di apparecchiature elettriche e elettroniche (RAEE) include varie fasi lavorative: smontaggio manuale, separazione manuale o semi-automatica, procedure metallurgiche e di combustione, etc.

I lavoratori addetti a queste lavorazioni sono potenzialmente esposti a molteplici agenti chimici tossici e ad altri fattori di rischio occupazionale, quali rumore, vibrazioni, movimentazione manuale dei carichi, etc.

In accordo con quanto riportato in letteratura scientifica, l'esposizione occupazionale ad agenti chimici, prevalentemente per via inalatoria, è rilevante in ognuna di queste fasi lavorative. Tra i possibili agenti chimici tossici vi sono vari metalli (p.e. rame, piombo, cadmio, mercurio, cromo, etc) e composti organici (p.e. ritardanti di fiamma bromurati "RFB", policlorobifenili "PCB", idrocarburi aromatici policiclici "IPA", policlorodibenzodiossine e policlorodibenzofurani "PCDD/Fs", etc.).

Ad oggi i dati disponibili sui possibili effetti avversi dell'esposizione ad agenti chimici in questi lavoratori sono carenti.

Il nostro obiettivo è stimare il rischio tossicologico e cancerogeno correlato all'esposizione occupazionale ad agenti chimici nell'attività di riciclo dei RAEE. Per raggiungere tale obiettivo è applicata la metodologia del human Health Risk Assessment. Questo metodo è in grado di stimare un Quoziente di Rischio (Hazard Quotient, HQ) per gli agenti chimici tossici, definito come il rapporto tra dose media di esposizione ad uno specifico agente tossico e la massima dose ammissibile senza l'osservazione di alcun effetto avverso per la popolazione lavorativa; lo stesso metodo stima anche il rischio cancerogeno, che è definito come l'aumento di probabilità del numero di casi di cancro dovuti all'esposizione alla sostanza nel corso della vita.

1 1. Fasi lavorative e rischi per la salute nell'attività di riciclo dei RAEE

2 I RAEE sono frequentemente trattati come rifiuto solido urbano, e possono
3 essere soggetti ad incenerimento o deposito nelle discariche. In questi casi i
4 lavoratori sono esposti a rischi derivanti sia dalla gestione dei RAEE che di
5 altre tipologie di rifiuti, e non è quindi possibile valutare specificamente il
6 rischio correlato ai RAEE.

7 Lo smaltimento dei RAEE mediante questa modalità non è ad oggi
8 considerato adeguato, e le attività di riciclo si stanno sempre più diffondendo.

9 In generale, le attività di riciclo dei RAEE possono essere suddivise in due
10 categorie: “*informali*” e “*formali*” (Grant K et al, 2013). Le prime includono un
11 mero smontaggio manuale delle apparecchiature e rudimentali procedure
12 piro-metallurgiche al fine di recuperare materiale “prezioso”. Il riciclo
13 formale invece ha un minor impatto sulla salute dei lavoratori e prevede
14 procedure tecniche complesse per rimuovere in modo sicuro i materiali
15 riutilizzabili dal resto delle apparecchiature elettroniche dismesse.

16 Tra le più diffuse apparecchiature elettriche ed elettroniche che diven-
17 tano parte dei RAEE vi sono i vecchi schermi a tubo a raggi catodici di
18 computers e televisori, che contengono considerevoli quantitativi di piombo
19 nel vetro. All'interno di tutti i computers, così come nei telefoni cellulari ed
20 in quasi la totalità delle apparecchiature elettriche ed elettroniche troviamo i
21 circuiti stampati, che possono contenere metalli quali rame, ferro, stagno,
22 alluminio, oro, argento. Per recuperare questi metalli sono frequentemente
23 adottati processi di combustione, che possono determinare il rilascio di com-
24 posti organici estremamente tossici, tra cui diossine e furani. Una quota
25 importante dei RAEE è inoltre rappresentata dai grandi elettrodomestici,
26 tra cui si ricordano i vecchi frigoriferi e apparecchi per il condizionamento
27 dell'aria, che possono contenere gas refrigeranti tossici, quali i clorofluoro-
28 carburi (CFC). Altri RAEE ubiquitari sono le batterie, contenenti sostanze
29 acide e metalli tossici come il litio, il piombo, il cadmio e il nickel, e le
30 lampade; in particolare è emergente il problema dello smaltimento delle
31 nuove lampade a fluorescenza, che contengono un metallo neurotossico, il
32 mercurio.

33 Considerando specificamente le varie fasi lavorative nell'attività di riciclo
34 dei RAEE, i rischi occupazionali sono diversi in relazione alle diverse pro-
35 cedure utilizzate per recuperare i materiali, così come evidenziato da una
36 recente revisione della letteratura (Tsydenova O & Bengtsson M, 2011). I
37 principali rischi professionali sono:

- 38 a) esposizione ad agenti chimici: è il rischio più rilevante per i lavoratori,
39 sia nei Paesi sviluppati che in quelli in via di sviluppo. L'esposizione
40 ad agenti chimici varia in dipendenza delle sostanze e delle procedu-

re adottate. Usualmente, l'esposizione lavorativa avviene mediante l'inalazione di polveri e vapori, ma è possibile anche il contatto cutaneo diretto con i tossici. L'ingestione accidentale può verificarsi solo in caso di inadeguato rispetto delle norme igieniche e di sicurezza, come ad esempio consumare cibi e fumare sul luogo di lavoro. L'esposizione a metalli può verificarsi durante i processi di recupero delle componenti di apparecchiature elettroniche quali ad esempio circuiti stampati e batterie; l'esposizione a composti organici può essere determinata dall'esecuzione di procedure piro-metallurgiche, o dalla liberazione di gas refrigeranti da vecchi frigoriferi o condizionatori. L'esposizione occupazionale ad agenti chimici sarà discussa in modo dettagliato nella sezione seguente;

- b) sovraccarico biomeccanico del sistema muscolo-scheletrico a causa di movimentazione manuale dei carichi pesanti e dell'effettuazione di movimenti ripetitivi dell'arto superiore, esposizione a vibrazioni per utilizzo di strumenti vibranti: tali rischi possono evidenziarsi nelle attività di smontaggio manuale dei grandi elettrodomestici, oltre che nella separazione manuale dei componenti di piccole apparecchiature elettroniche;
- c) esposizione a rumore elevato durante l'effettuazione di procedure quali la separazione semi-automatica mediante l'utilizzo di macchinari in grado di frantumare e quindi filtrare i materiali;
- d) rischio infortunistico: ad esempio la possibile rottura dei vetri dei tubi a raggi catodici e dei bulbi delle lampade a fluorescenza; l'estrazione di metalli dai RAEE utilizzando acidi forti e combustione diretta mediante l'utilizzo di propellenti estremamente infiammabili quali kerosene e propano (prevalentemente nei Paesi in via di sviluppo); utilizzo di strumenti taglienti ed in grado di rompere i RAEE;
- e) altri possibili rischi occupazionali sono l'esposizione ad agenti biologici da possibile contaminazione dei RAEE da parte di microorganismi, la presenza di condizioni microclimatiche avverse durante il trattamento dei rifiuti elettrici e elettronici, ed altri. Infine, i lavoratori possono essere esposti a rischi legati all'organizzazione del lavoro, quali ad esempio lo stress lavoro-correlato e l'effettuazione di lavoro a turni (Lavoie J et al 2001).

2. Esposizione occupazionale ad agenti chimici nell'attività di riciclo dei RAEE

2.1. *I composti organici*

- a) Polibromodifenileteri (PBDE) e altri ritardanti di fiamma (Rf). L'esposizione occupazionale a RF è stata recentemente valutata in uno studio Finlandese che ha monitorato per 2 anni quattro impianti di riciclo dei RAEE (Rosenberg C. et al, 2011). La concentrazione media di diversi congeneri di PBDE in campioni di aria delle postazioni lavorative variava tra i 3.5 e i 2320 ng/m³, suggerendo la possibile presenza di un rischio per la salute dei lavoratori, nonostante ad oggi non vi sia un'adeguata conoscenza di valori limite occupazionali per l'esposizione a queste sostanze. In Svezia (Sjödén A et al, 1999) l'esposizione occupazionale a PBDE in un gruppo di lavoratori impiegati in un impianto di riciclo dei RAEE è risultata pari a 37 pmol per grammo di lipidi, significativamente più elevata rispetto ad un gruppo di controlli.
- b) Diossine e furani. Un recente studio effettuato in Ghana (Wittsiepe J et al, 2015) ha mostrato elevati livelli di diossine e furani sia all'interno degli impianti di riciclo dei RAEE che nelle aree limitrofe, con possibili effetti tossici per la salute dei lavoratori e degli abitanti dell'area, ivi compresi effetti cancerogeni.
- c) Polibromobifenili (Pbb) e policlorobifenili (Pcb). In un'area di riciclo dei RAEE del Nord della Cina (Yang et al, 2013) è stata indagata l'esposizione inalatoria e per contatto cutaneo a PBB e PCB in un gruppo di lavoratori e rispettivi controlli. I livelli sierici dei congeneri di PBB sono risultati mediamente 0.52 ng/g di lipidi, circa 9 volte superiori rispetto ai controlli. Per i congeneri dei PCB è stata misurata una concentrazione sierica media di 44.1 ng/g di lipidi, circa 4 volte superiore rispetto ai controlli.
- d) Idrocarburi aromatici policiclici (Ipa). 16 diversi composti sono stati recentemente misurati nell'aria di un sito di riciclo dei RAEE in Cina (Zhang D et al, 2011), rinvenendo una concentrazione media di 744 ng/m³.

2.2. *I Metalli*

In una vasta area di riciclo dei RAEE in Ghana (Caravanos J et al, 2012), la raccolta di campioni d'aria ambientali ha mostrato elevati livelli di esposizione a vari metalli, superiori ai valori limite proposti dall'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). Anche in un recente studio

Svedese (Julander A et al, 2014) è stata indagata l'esposizione a metalli tossici dei lavoratori addetti alla gestione dei RAEE. La maggior concentrazione nell'aria dell'ambiente di lavoro è stata misurata per il Ferro ed è risultata di $98 \mu\text{g}/\text{m}^3$, seguita dallo Zinco ($14 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e dal Piombo ($7 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Le concentrazioni di Cadmio e Rame erano significativamente più elevate durante le attività di disassemblaggio dei RAEE all'interno dell'impianto rispetto alle attività effettuate all'aperto. Anche per il Cromo ed il Piombo è stata osservata questa tendenza, pur non significativa. Per tutti i metalli considerati, i campionamenti in aree di lavoro hanno rivelato concentrazioni significativamente superiori rispetto a quelle di aree di controllo. Considerando le concentrazioni ematiche, plasmatiche e/o urinarie dei metalli, quelle di Cromo ($1.4 \mu\text{g}/\text{l}$), Cobalto, Indio, Piombo e Mercurio sono risultate più elevate nei lavoratori rispetto ai controlli.

Considerando specificamente l'esposizione a Piombo, un recente studio condotto ad Hong Kong (Lau WK et al, 2014) ha mostrato elevate concentrazioni di Pb nelle aree di disassemblaggio dei RAEE: tali concentrazioni hanno determinato una stima delle piombemie nei lavoratori comprese tra 10 e $39.5 \mu\text{g}/\text{dl}$, e quindi possibilmente superiori al valore di $30 \mu\text{g}/\text{dl}$ dell'Indice Biologico di Esposizione proposto dall'ACGIH (ACGIH, 2014). Uno studio Cinese (Wang Q et al, 2011) sull'esposizione occupazionale a Pb dei lavoratori addetti al riciclo dei RAEE ha misurato la frequenza di alterazioni nucleari linfocitarie, riscontrando che la presenza di micronuclei e cellule binucleate era maggiormente elevata nei lavoratori rispetto ai controlli e si correlava positivamente con i valori di piombemia, la cui mediana era di $11.5 \mu\text{g}/\text{dL}$. Ancora in Cina, Xue et al hanno stimato il rischio sanitario per i lavoratori esposti a Pb, calcolando un indice di rischio di 1.45, che indica una maggior probabilità di insorgenza di effetti tossici, quali disturbi gastrointestinali,ematologici (anemia, etc) ed altri.

Riguardo alla esposizione occupazionale a Mercurio (Hg), metallo neurotossico, in un recente studio Francese condotto in un impianto di riciclo di lampade a fluorescenza (Zimmermann F et al, 2014) è stata misurata una concentrazione indoor di Hg pari a $15.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, superiore al valore limite proposto dall'ACGIH per i composti alchilici del mercurio.

Considerando il rischio cancerogeno, un recente studio condotto a Hong Kong (Lau WK et al, 2014) ha effettuato un'analisi di *human Health Risk Assessments* e per l'esposizione a Cadmio, Nickel e Cromo il rischio di aumento di frequenza dei tumori nei lavoratori addetti alla gestione dei RAEE nel reparto del disassemblaggio è risultato ad un livello non accettabile.

3. Stima degli effetti avversi per la salute nei lavoratori addetti al riciclo dei RAEE: l'Health Risk assessment

Al fine di quantificare i rischi di tossicità e di cancerogenicità correlati all'esposizione occupazionale ad agenti chimici nell'attività di riciclo dei RAEE può essere condotta un'analisi di *human Health Risk Assessment* (HRA). L'HRA è un procedimento in grado di stimare la tipologia e la probabilità di insorgenza di effetti avversi in una data popolazione esposta ad agenti chimici che hanno contaminato un determinato ambiente, nel presente e nel futuro (*Environmental Protection Agency*, EPA). Il metodo, internazionalmente validato e largamente diffuso, permette la stima del Quoziente di Rischio (*Hazard Quotient*, HQ) per le sostanze tossiche, definito come rapporto tra la dose media giornaliera di uno specifico agente chimico e la massima dose ammissibile senza l'insorgenza di effetti avversi (*Reference Dose*, RfD). La metodologia consente anche di calcolare, per gli agenti chimici cancerogeni, il rischio cancerogeno, definito come probabilità di aumento dei casi di tumore nel corso della vita intera, valore che si ottiene moltiplicando la dose media giornaliera di esposizione al cancerogeno per il potere cancerogeno della sostanza (*Cancer Slope Factor*, CSP). Ulteriore modalità per stimare gli effetti sulla salute dei lavoratori prevede il calcolo dei *Disability-Adjusted Life Years* (DALYs), ovvero una misura dell'impatto delle singole patologie sulla popolazione lavorativa, che rispecchia il numero di anni in salute persi nel corso della vita a causa della malattia, ivi compresa la disabilità e la morte precoce.

Riferimenti bibliografici

- AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS (ACGIH), 2014 TLVs and BEIs, ACGIH, US, 2014.
- CARAVANOS J., CLARK E., FULLER R., LAMBERTSON C., *Assessing Worker and Environmental Chemical Exposure Risks at an e-Waste Recycling and Disposal Site in Accra, Ghana*, «Journal of Health and Pollution», February 2011, vol. 1, n. 1, pp. 16–25.
- GRANT K., GOLDIZEN F.C., SLY P.D., BRUNE M.N., NEIRA M., VAN DEN BERG M., NORMAN R.E., *Health consequences of exposure to e-waste: a systematic review*, *Lancet Glob Health*, 2013 Dec., 1(6): e350–61.
- JULANDER A., LUNDGREN L., SKARE L., GRANDÉR M., PALM B., VAHTER M., LIDÉN C., *Formal recycling of e-waste leads to increased exposure to toxic metals: an occupational exposure study from Sweden*, «Environ. Int.» 2014 Dec., 73: 243–51.
- LAVOIE J., GUERTIN S., *Evaluation of health and safety risks in municipal solid waste recycling plants*, «J Air Waste Manag Assoc.» 2001 Mar., 51(3): 352–60.

- 1 LAU W.K. et al., *Human health risk assessment based on trace metals in suspended air*
2 *particulates, surface dust, and floor dust from e-waste recycling workshops in Hong*
3 *Kong, China*, «Environ Sci Pollut Res Int.» 2014 Mar., 21(5): 3813–25.
- 4 ROSENBERG C. et al., *Exposure to flame retardants in electronics recycling sites*, «Ann
5 *Occup Hyg.*» 2011, 55(6): 658–65.
- 6 SJÖDIN A., HAGMAR L., KLASSON-WEHLER E., KRONHOLM-DIAB K., JAKOBSSON E.,
7 BERGMAN A., *Flame retardant exposure: polybrominated diphenyl ethers in blood*
8 *from Swedish workers*, «Environ Health Perspect.» 1999 Aug., 107(8): 643–8.
- 9 TSYDENOVA O., BENGTSSON M., *Chemical hazards associated with treatment of waste*
10 *electrical and electronic equipment*, «Waste Manag.» 2011 Jan., 31(1): 45–58.
- 11 WANG Q. et al., *Increased levels of lead in the blood and frequencies of lymphocytic mi-*
12 *cronucleated binucleated cells among workers from an electronic-waste recycling site.*
13 *J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng.* 2011;46(6):669–76.
- 14 WITTISIEPE J., FOBIL J.N., TILL H., BURCHARD G.D., WILHELM M., FELDT T., *Le-*
15 *vels of polychlorinated dibenzo-p-dioxins, dibenzofurans (PCDD/Fs) and biphenyls*
16 *(PCBs) in blood of informal e-waste recycling workers from Agbogbloshie, Ghana, and*
17 *controls*, «Environ Int.» 2015 Jun., 79: 65–73.
- 18 XUE M., YANG Y., RUAN J., XU Z., *Assessment of noise and heavy metals (Cr, Cu, Cd,*
19 *Pb) in the ambience of the production line for recycling waste printed circuit boards,*
20 «Environ Sci Technol.» 2012 Jan., 3;46(1): 494–9.
- 21 ZHANG D. et al., *Source identification and health risk of polycyclic aromatic hydrocar-*
22 *bons associated with electronic dismantling in Guiyu town, South China*, «J Hazard
23 *Mater*», 2011, 192(1): 1–7.
- 24 ZIMMERMANN F. et al., *Occupational exposure in the fluorescent lamp recycling sector in*
25 *France*, «Waste Manag.» 2014 Jul., 34(7): 1257–63.