



ULSS N.6 "VICENZA"
SPISAL

Servizio
Prevenzione Igiene e Sicurezza
negli Ambienti di Lavoro

con il contributo



Istituto Italiano
della Saldatura

SALDATURA

&

**AMBIENTE
DI LAVORO**

**FOCUS DAY REGIONALE
SULLA SALUTE E SICUREZZA
NEL MONDO DELLA SALDATURA**

24 maggio 2007, Vicenza

Il profilo tecnologico e di rischio
Tecnologie e materiali di impiego nella fabbricazione
di prodotti saldati: rischi per la salute e la sicurezza
dei lavoratori addetti alle attività di saldatura.

Ing. Luca Costa

IIS (Istituto Italiano della Saldatura)

Sommario

Le operazioni di saldatura e le tecniche annesse comportano in generale l'esposizione del personale addetto a diversi agenti di rischio, le cui caratteristiche sono fortemente influenzate dalla tipologia del processo, dalle modalità operative (regolazioni dei parametri e condizioni ambientali) e dai materiali su cui si debbano realizzare le giunzioni.

Questo documento presenta una descrizione iniziale delle principali tecnologie di saldatura in uso industriale per la fabbricazione mediante saldatura, passando successivamente alla rassegna delle principali tipologie di rischio associate.

Per ogni agente di rischio sono considerate le caratteristiche chimico-fisiche, le principali fonti di esposizione, ed una valutazione della pericolosità basata sull'aggiornato riesame della documentazione disponibile a livello internazionale. Sono inoltre fornite alcune linee guida per la riduzione del livello di rischio.

Tale analisi supporta la conclusione che un adeguato comportamento nei confronti delle problematiche di sicurezza, sia a livello tecnico che gestionale, garantisce confidenza che i rischi per la salute in saldatura possano essere opportunamente tenuti sotto controllo.

** Dr. Ing., International welding Engineer, Istituto Italiano della Saldatura*

1 Introduzione

Le operazioni di saldatura e le tecniche annesse comportano in generale l'esposizione del personale addetto a diversi agenti di rischio, le cui caratteristiche sono fortemente influenzate dalla tipologia del processo, dalle modalità operative (regolazioni dei parametri e condizioni ambientali) e dai materiali su cui si debbano realizzare le giunzioni.

Da un punto di vista tecnico, la caratterizzazione di questi agenti comporta innanzitutto la comprensione dei fenomeni che portano allo sviluppo degli stessi, comprensione che ancora in



Figura 1- Saldatura manuale ad arco con elettrodi rivestiti

molti casi non può considerarsi completamente acquisita, come ad esempio per quanto riguarda i meccanismi di sviluppo dei fumi di saldatura, con particolare riferimento ai particolari.

Il passo successivo è rivolto alla determinazione degli effetti sui lavoratori e, in particolare, dei livelli di riferimento, o massime dosi di rischio ammissibili, come soglia limite a cui comparare la condizione attuale di esposizione; questi livelli sono tuttavia soggetti a continue ridefinizioni, a causa dei numerosi fattori di disturbo che intervengono nell'ambito delle metodologie di analisi e monitoraggio del personale esposto, per l'impossibilità di scindere in modo epidemiologicamente rilevante i singoli effetti, ed, infine, per la differente sensibilità di ogni individuo.

Al termine di queste due fasi, dovrebbe essere possibile identificare un opportuno livello di rischio, valutato come la combinazione tra la probabilità dell'evento e la sua significanza, in modo da decidere per l'implementazione di opportune azioni di miglioramento, tese alla riduzione dei rischi a livelli minimi, e comunque al di sotto delle eventuali soglie di pericolosità; nel caso specifico della saldatura, questo porta spesso all'individuazione di appropriati dispositivi di protezione, generale o individuale. E' importante sottolineare che la complessità degli argomenti e l'insieme di conoscenze tecnologiche, chimiche ed epidemiologiche, necessarie per affrontare con l'opportuna

competenza questi argomenti, richiede inoltre una stretta collaborazione di personale con background culturali differenti, e lo sviluppo di opportune interfacce di comunicazione.

2 Caratteristiche dei principali processi di saldatura

La saldatura è un tipo di giunzione che consente di unire permanentemente parti solide, realizzando la continuità del materiale.

L'elemento fondamentale di una tecnologia di saldatura, è la presenza di una sorgente termica, la cui caratteristica fondamentale è di fornire calore in modo localizzato, portando dunque alla fusione di una parte limitata di materiale. Inoltre si può fare uso di metallo di apporto, che viene distribuito allo stato fuso fra i lembi opportunamente preparati dei pezzi da collegare, che costituiscono il materiale di base. Questa situazione conduce alla realizzazione di una saldatura autogena per

fusione, poiché una certa quantità del metallo base stesso collabora con il metallo d'apporto a "generare" il bagno di saldatura, dalla cui solidificazione si ottiene il cordone.

Nei tipi di giunzioni in cui il materiale base non viene fuso, ma solo riscaldato ad una temperatura più o meno alta, si parla di saldobrasatura e di brasatura (se si utilizza materiale d'apporto con temperatura di fusione inferiore a quella del materiale base) oppure di saldatura per pressione, che non richiede metallo d'apporto, come nel caso della saldatura a resistenza.

Per eseguire una saldatura è dunque sempre necessario disporre di una certa quantità di energia, che nei più comuni processi industriali di saldatura autogena per fusione viene somministrata al giunto sotto forma di calore per consentire il raggiungimento delle alte temperature richieste.

Detto calore viene fornito da una sorgente termica, che può essere costituita, ad esempio, dalla fiamma ossiacetilenica, oppure, nelle applicazioni più diffuse, dall'arco elettrico o infine dal plasma d'arco o dal laser o dal fascio elettronico.

D'altra parte, durante la permanenza del materiale allo stato fuso è necessario evitare il suo inquinamento da parte dell'ossigeno e dell'azoto presenti nell'atmosfera in quanto questi gas, se assorbiti dal bagno, pregiudicano l'efficienza meccanica e la continuità del materiale del giunto.

Una prima distinzione tra i differenti processi di saldatura, può essere eseguita anche considerando la parte svolta dall'operatore durante l'esecuzione del giunto; si possono infatti distinguere le cinque seguenti categorie:

- Processi manuali (Manual), in cui la sorgente termica ed il materiale d'apporto vengono manovrati manualmente dal saldatore che si sposta progressivamente lungo il giunto;
- Processi semiautomatici (Partly mechanised), in cui il metallo d'apporto, costituito da un filo continuo, esce automaticamente a velocità costante dall'estremità di una torcia o pistola, impugnata dal saldatore che la sposta lungo il giunto da eseguire;
- Processi automatici (Fully mechanised), in cui il metallo di apporto è un filo continuo che fuoriesce automaticamente da una testa fissata ad un carrello che si sposta automaticamente lungo il giunto e l'operatore ha pertanto il solo compito di eseguire il corretto posizionamento della testa saldatrice, controllare il regolare svolgimento della saldatura ed effettuare, quando occorrono, piccoli aggiustamenti;
- Processi completamente automatizzati e robotizzati (Automatic - robotised), che sono processi automatici completamente programmati nel quale l'operatore ha solo da eseguire, se necessario, il posizionamento della saldatrice, avviarla, ed eventualmente interrompere la saldatura se qualcosa non va: non sono infatti possibili aggiustamenti di parametri fuori programma in corso di saldatura.

Un'altra possibilità per classificare i processi di saldatura è considerare le caratteristiche della sorgente termica utilizzata e della tecnologia con cui si provvede alla protezione del bagno contro l'azione dell'aria; nei paragrafi seguenti si fornisce pertanto una breve descrizione dei principali processi di saldatura caratterizzati appunto in base alla sorgente termica.

2.1 Saldatura alla fiamma ossiacetilenica

La saldatura ossiacetilenica è un processo di saldatura manuale autogena nel quale la sorgente termica è fornita dalla reazione di un gas combustibile, l'acetilene, con un gas comburente, l'ossigeno. La scelta del gas acetilene è dovuta al fatto che questo permette di raggiungere

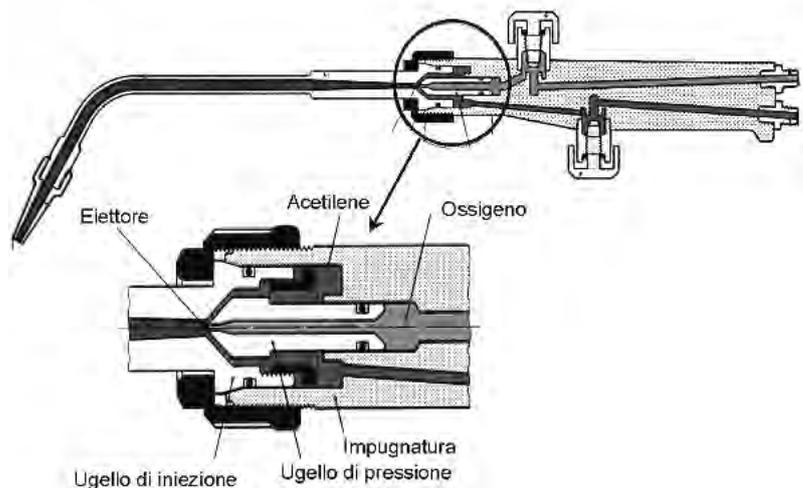


Figura 2- Schema di funzionamento di un cannello a bassa pressione

alla fiamma temperature di circa 3100°C (la più alta temperatura di fiamma ossi - gas conosciuta) e quindi consente di disporre di una sorgente termica sufficientemente potente per gli scopi di saldatura.

L'acetilene e l'ossigeno giungono separatamente al cannello dal quale escono insieme dopo essersi intimamente mescolati. La formazione della miscela acetilene-ossigeno è favorita dalla presenza di un elemento denominato "eiettore" o "iniettore" per i cannelli detti a bassa pressione (ove cioè l'acetilene giunge a pressioni decisamente inferiori a quelle dell'ossigeno) o dalle geometrie dei condotti nel caso dei cannelli ad altra pressione (Figure 2 e 3).

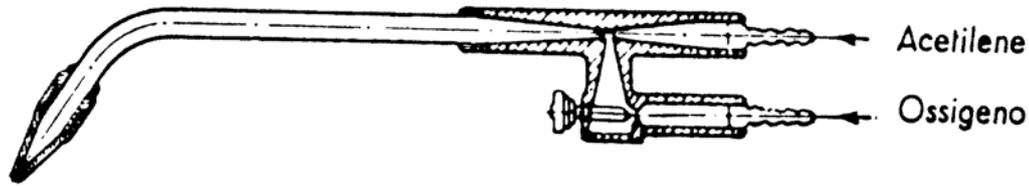


Figura 3- Schema di un cannello ad alta pressione

Analizzando in dettaglio il processo di combustione, si possono mettere in evidenza le tre diverse zone che schematicamente costituiscono la fiamma ossiacetilenica (Figura 4).

Sulla superficie del dardo avviene una prima reazione di combustione tra l'acetilene e l'ossigeno che fuoriesce dal cannello (combustione primaria). Questa parte della fiamma è la più adatta a soddisfare le principali esigenze della fusione di un metallo e della sua protezione allo stato fuso dalla contaminazione atmosferica.

Nella zona riducente i prodotti della combustione avvenuta nel dardo (ancora combustibili) bruciano con l'ossigeno sottratto all'aria circostante, realizzando quindi la combustione completa dell'acetilene.

Vi è infine un'area luminosa che circonda il dardo (il cosiddetto pennacchio), costituita dai prodotti finali della combustione ancora ad elevata temperatura.

La saldatura alla fiamma ossiacetilenica comporta indubbi problemi di sicurezza, legata alla presenza di gas combustibili (acetilene) e comburenti (ossigeno) in elevata quantità e ad elevate pressioni: particolare attenzione deve essere prestata pertanto alle caratteristiche delle apparecchiature e dell'impianto. In particolare, devono essere sempre presenti opportune valvole di sicurezza per impedire il ritorno di fiamma, cioè lo svilupparsi di una combustione all'interno delle tubazioni fino alle bombole o ai dispositivi di generazione dei gas.

L'applicazione del processo

ossiacetilenico, date le caratteristiche termiche della sorgente, viene generalmente limitata alla esecuzione di giunti tra lamiere di limitato spessore (qualche millimetro al massimo) e fornisce una buona penetrazione (ben raccordata e regolare); questa proprietà è particolarmente apprezzata nei casi in cui non sia possibile eseguire la solcatura e la successiva ripresa al rovescio (ad esempio nel caso di giunti di tubi di piccolo diametro e di spessore limitato).

Il processo ossiacetilenico, utilizzando una sorgente termica di impiego assai versatile come la fiamma, permette facilmente l'esecuzione di saldature nei casi in cui l'accessibilità è considerevolmente compromessa da ostacoli che si possono trovare nelle vicinanze del giunto. Inoltre il basso costo dell'apparecchiatura rispetto a quella dei processi MIG/MAG e TIG, descritti

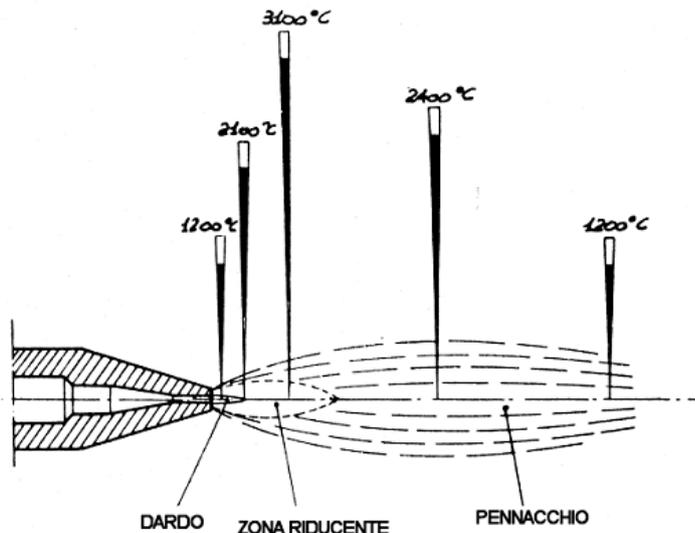


Figura 4- Caratteristica della fiamma ossiacetilenica

più avanti, concorre a rendere questo processo ancora interessante in certi casi particolari, per piccole officine e per lavori di manutenzione, limitatamente ad acciai al carbonio e bassoalegati al cromo - molibdeno.

La saldatura ossiacetilenica mantiene pertanto un certo campo di applicazione, anche se in continua riduzione.

2.2 Saldatura ad arco con elettrodi rivestiti

La saldatura ad arco con elettrodi rivestiti è un processo di saldatura manuale autogena nel quale la sorgente termica è costituita dall'arco elettrico che, scoccando fra l'elettrodo (manovrato dal saldatore mediante la pinza porta-elettrodi) ed il metallo di base, sviluppa il calore che provoca la rapida fusione sia del metallo di base, sia dell'elettrodo, che è il metallo d'apporto.

L'elettrodo è costituito da una bacchetta cilindrica (lunga 350÷450 mm) con un rivestimento la cui fusione genera dei gas per la protezione della zona in cui scocca l'arco e più o meno elevati quantitativi di scoria a protezione sia delle gocce di metallo fuso che attraversano l'arco, sia del bagno (figura 5). Dopo che un elettrodo è stato consumato, il saldatore ne introduce un altro nella pinza e così procede sino al completamento della saldatura. Questo processo risulta pertanto caratterizzato da bassa produttività.

La combustione del rivestimento, oltre a generare il gas di protezione per la protezione dell'arco, permette anche l'apporto di alcuni elementi al bagno di saldatura, con caratteristiche e funzionalità differenti:

- elementi disossidanti, che permettono la riduzione del tenore di ossigeno nel bagno fuso;
- elementi depuranti, che riducono il tenore di alcuni elementi non metallici (dette impurezze) che possono comportare perdite di caratteristiche meccaniche del giunto e l'insorgere di imperfezioni di saldatura;
- elementi di lega, per migliorare le caratteristiche meccaniche del giunto;
- altri elementi, che consentono l'ottenimento di determinate caratteristiche del giunto (ad esempio cordoni molto regolari, elevata penetrazione del bagno, ecc.).

Combinando tra loro questi elementi, è possibile ottenere diversi tipi di elettrodi, che vengono generalmente classificati come segue.

- Elettrodi basici, difficili da usare in quanto l'arco tende a spegnersi, che producono notevoli quantitativi di scoria, ma che garantiscono ottime caratteristiche meccaniche.
- Elettrodi acidi, più facili da utilizzare dei precedenti, che garantiscono comunque buone caratteristiche meccaniche.
- Elettrodi rutili, simili ai precedenti ma ottimizzati per

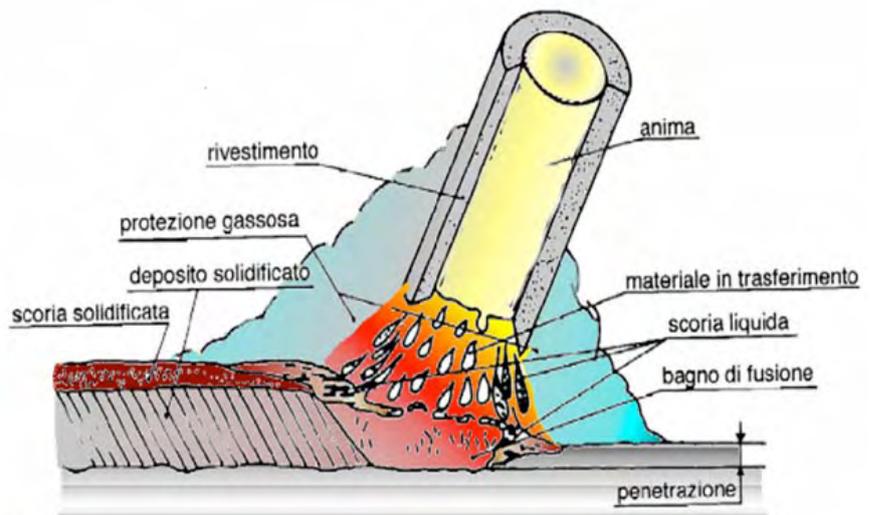


Figura 5- Principio della saldatura ad arco con elettrodi rivestiti.



Figura 6 - Applicazioni della saldatura ad arco con elettrodi rivestiti.

facilitare la saldatura, garantendo la realizzazione di cordoni lisci e regolari anche in posizioni differenti dal piano (sono i cosiddetti elettrodi “scorrevoli” o “di finitura”).

- Elettrodi cellulosici, realizzati opportunamente per ottenere elevate penetrazioni del cordone in giunti accessibili da un solo lato (utilizzati soprattutto per la saldatura di tubi di medio e grande diametro).

Le caratteristiche più interessanti di questo processo sono la notevole flessibilità di impiego (è infatti applicabile alla saldatura di quasi tutti i materiali metallici, ma con l'esclusione di materiali altamente ossidabili come alluminio, rame titanio) e le buone caratteristiche metallurgiche e meccaniche del giunto specialmente utilizzando elettrodi di tipo *basico*.

2.3 Saldatura ad arco sommerso

La saldatura ad arco sommerso è un processo di saldatura autogena per fusione, dove l'energia termica è fornita dall'arco che scocca tra un filo elettrodo fusibile alimentato con continuità ed il pezzo.

La protezione dell'arco è affidata ad uno strato di flusso granulare e fusibile, distribuito sul giunto sopra o avanti all'arco, che copre il bagno fuso ed il metallo base prossimo al giunto; l'arco scocca quindi sotto lo strato di flusso e non è perciò visibile (da cui il nome di “arco sommerso”, Figura 7).

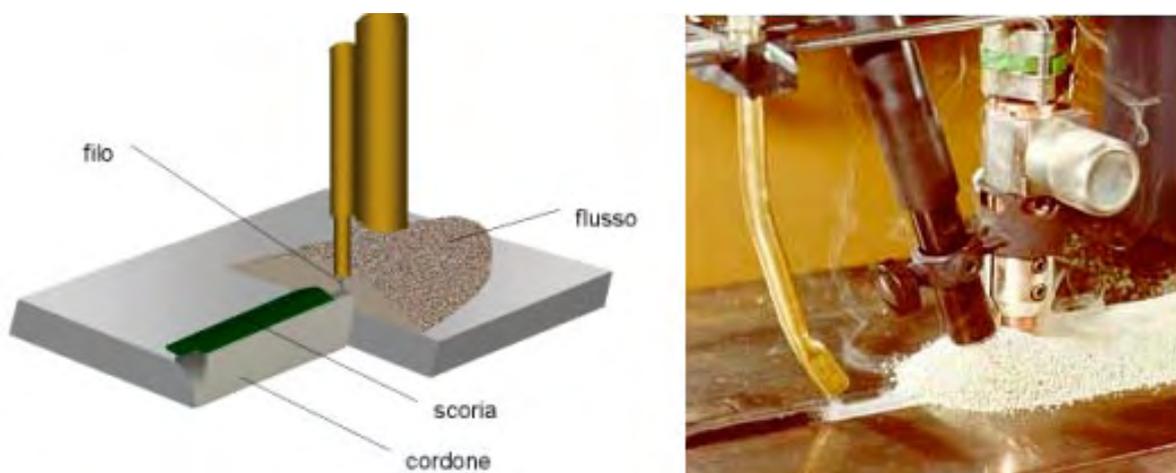


Figura 7- Saldatura ad arco sommerso

L'energia termica sviluppata dall'arco provoca la fusione del filo continuo, del materiale base e di parte del flusso. Materiale base e materiale d'apporto si mescolano allo stato fuso, quindi solidificano formando il cordone di saldatura. La parte di flusso che viene fusa reagisce chimicamente col bagno e va quindi a costituire la scoria, che ricopre il cordone e deve essere successivamente asportata.

La necessità di avere uno strato di flusso distribuito sul giunto ed il grande volume del bagno fuso non permettono l'esecuzione di saldature in posizione. Pertanto la saldatura

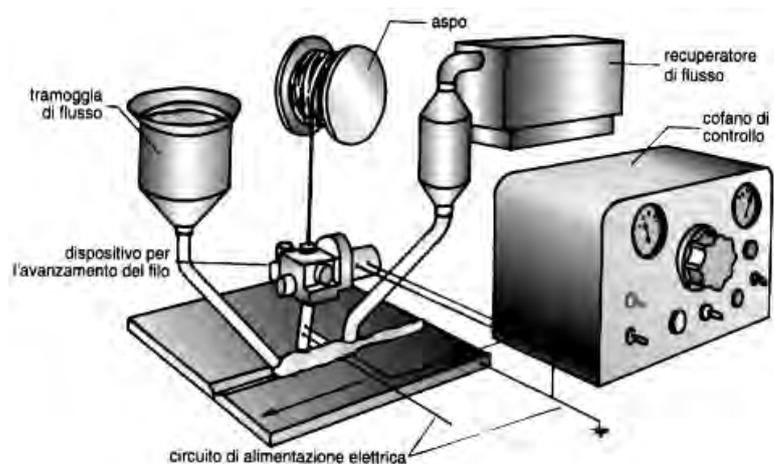


Figura 8 – Schema funzionale di un impianto per saldatura con arco sommerso

ad arco sommerso può essere effettuata solo in piano ed in piano-frontale (è possibile la posizione in frontale con opportuni accorgimenti).

In figura 7 è rappresentata uno schema dell'apparecchiatura per la saldatura automatica ad arco sommerso, ad oggi la più diffusa; in particolare si noti il dispositivo di avanzamento del filo (detto anche *trainafilo*), che provvede alla continua alimentazione del filo alla stessa velocità con cui questo viene fuso, in modo da mantenere costante la lunghezza d'arco: il suddetto dispositivo sostituisce quindi il movimento manuale che il saldatore tradizionale compie avvicinando progressivamente al pezzo la pinza in cui l'elettrodo è inserito e che ha appunto lo scopo di mantenere costante la lunghezza dell'arco.

Le caratteristiche dei giunti realizzati con questo processo dipendono fortemente dalle caratteristiche del flusso di protezione utilizzato; al riguardo si possono distinguere le tre tipologie di flusso, di seguito descritte.

- *Flussi prefusi*: sono costituiti da granuli di dimensione abbastanza fine e controllata e consentono elevate velocità di saldatura; questi flussi hanno comportamento chimico essenzialmente inerte, e pertanto, poiché è comunque importante esercitare un'azione metallurgica sul bagno, è necessario utilizzare fili maggiormente legati rispetto al materiale base.
- *Flussi agglomerati*: la modalità con cui questi flussi vengono prodotti permette di ottenere una certa azione metallurgica durante la saldatura; si ha così la possibilità di apportare determinati elementi nel bagno di fusione che possono svolgere effetti disossidanti o depuranti svolgendo la stessa azione sul bagno assolta, nel processo ad elettrodo rivestito, dal rivestimento degli elettrodi ed è pertanto possibile classificarli in base alla basicità.
- *Flussi miscelati*: sono una miscela attentamente controllata di prefusi ed agglomerati, volta ad ottenere un comportamento intermedio; è importante sottolineare che questa miscela può essere prodotta solo da un fabbricante di materiali d'apporto.

La caratteristica principale della saldatura ad arco sommerso è la possibilità di impiegare intensità di corrente assai più elevate di quelle utilizzate per elettrodi rivestiti di pari diametro; ciò comporta la fusione di notevoli quantitativi di materiale di base e d'apporto e pertanto rende il processo particolarmente adatto alla saldatura di grossi spessori, in quanto si può avere la possibilità di eseguire la saldatura di un giunto con un minimo numero di passate effettuate a velocità sensibilmente superiori a quelle possibili con saldatura manuale.

D'altra parte, la possibilità di ottenere buone caratteristiche meccaniche, grazie alle caratteristiche depuranti ed arricchenti di alcuni flussi, rende questo processo adatto alla saldatura di molti materiali ad elevate prestazioni, come gli acciai per alte temperature, gli acciai inossidabili, ed alcune leghe di Nichel.

Infine, il fatto che l'arco è mantenuto sotto uno strato di flusso granulare elimina la necessità di proteggere la vista e la persona dell'operatore e l'eventualità di spruzzi di saldatura sul materiale base.

2.4 Saldatura a filo continuo con e senza protezione di gas (MIG / MAG / FCAW)

La saldatura a filo continuo con e senza protezione di gas è un processo a filo continuo come il precedente, in cui però la protezione dell'arco non è affidata ad un flusso ma ad un gas effluente da una specifica torcia (figura 9) o sviluppato dalla combustione di opportuni flussi contenuti all'interno di un filo tubolare.

Si possono pertanto distinguere le seguenti quattro varianti del processo.

- Saldatura MIG, in cui la protezione del bagno è affidata ad un gas inerte (Ar, He o loro miscele).
- Saldatura MAG, in cui la protezione del bagno è affidata a una miscela di gas contenente anche piccolissime percentuali di gas chimicamente attivi (CO₂, O₂ o H₂).
- Saldatura a filo animato con protezione di gas (detta anche FCAW) in cui si utilizza un filo tubolare contenente un flusso al suo interno, avente tipicamente caratteristiche rutili o acide, per garantire opportune caratteristiche del bagno ed elevate produttività.

- Saldatura a filo senza protezione di gas (detta anche FCAW-SS o, talvolta, SSAW), in cui si utilizza un filo tubolare contenente un flusso al suo interno, che genera un'opportuna atmosfera protettiva ed influisce metallurgicamente sul bagno (pertanto concettualmente simile all'elettrodo rivestito)

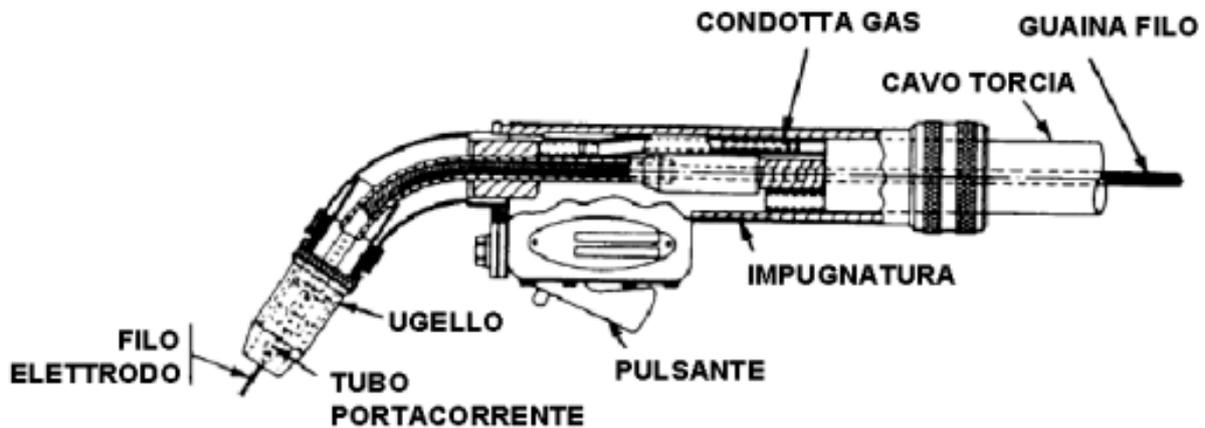


Figura 9- - Torcia per saldatura MIG-MAG

Queste varianti del processo di saldatura a filo continuo sono caratterizzate dai seguenti due aspetti fondamentali.

- Elevata produttività, legata sia alla possibilità di eseguire ininterrottamente lunghe saldature, grazie alla adduzione continua di materiale d'apporto, sia alla assenza di scoria (esclusi i processi a filo animato) che comporta la riduzione dei tempi tra le passate per l'asportazione della scoria stessa.
- Buona facilità operatoria, dovuta alla capacità del sistema arco elettrico – generatore di adattarsi autonomamente alle variazioni della distanza tra torcia e bagno di saldatura.

Va infine sottolineata la possibilità di utilizzare generatori di saldatura sinergici, cioè a controllo elettronico (con inverter), che facilitano le operazioni di saldatura con tecniche, posizioni o materiali particolari (es. alluminio e sue leghe) mediante opportune modulazioni della corrente.



Figura 10 - Applicazioni robotizzate della saldatura GMAW.

Il processo è generalmente usato in forma semiautomatica, anche se in casi particolari, può essere completamente automatizzato o anche robotizzato (figura 10).

2.5 Saldatura con elettrodo infusibile e protezione di gas (TIG)

Anche nel caso del processo con elettrodo infusibile e protezione di gas la sorgente termica è costituita da un arco elettrico, che scocca fra un elettrodo di tungsteno ed il materiale di base. La protezione della zona d'arco viene effettuata con gas inerti (argon o elio) o loro miscele, per non ossidare l'elettrodo di tungsteno, che ne risulterebbe compromesso.

L'elettrodo di tungsteno, eventualmente additivato con ossidi di elementi particolari (torio, lantanio, cerio o zirconio), ha la caratteristica di essere resistente alle alte temperature e contemporaneamente di emettere con facilità elettroni (effetto termoionico); ciò comporta una elevata stabilità dell'arco elettrico, che consente pertanto di saldare con campi di variazione di corrente e tensione molto elevati, garantendo quindi elevata flessibilità di impiego.

Poiché l'elettrodo ha il solo scopo di consentire la formazione dell'arco, il metallo di apporto deve essere introdotto separatamente sotto forma di bacchetta e pertanto, a differenza dei processi ad arco descritti precedentemente, in modo direttamente controllato dal saldatore.

Inoltre, come nel caso della saldatura a filo continuo, la moderna tecnologia dei generatori a controllo elettronico consente la realizzazione di forme d'onda particolari per i diversi materiali e le varie posizioni di saldatura, garantendo risultati qualitativi ottimali in molte condizioni.

Questo processo è caratterizzato da una produttività relativamente bassa, ma la possibilità di controllare con buona precisione l'arco elettrico lo rende tipicamente adatto per la saldatura di tubazioni importanti e molto sollecitate e di tutti i materiali, compresi quelli il cui bagno di saldatura è facilmente ossidabile, come acciai inossidabili, leghe di alluminio, rame, nichel, titanio.

Il processo è usato generalmente in forma manuale, ma vi sono anche numerose applicazioni specifiche in forma automatica, o completamente automatizzata e pure robotizzata (figura 12).

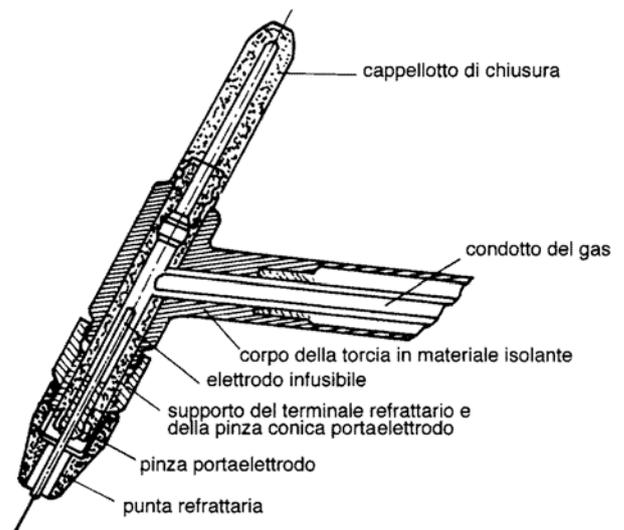


Figura 11 - Torcia per saldatura TIG manuale.



Figura 12- - Applicazioni manuale ed automatica del processo TIG.

2.6 Saldatura laser e a fascio elettronico

Si tratta di due processi automatici o, più frequentemente, completamente automatizzati che effettuano la saldatura portando a fusione i lembi retti accostati del metallo base e pertanto generalmente senza metallo d'apporto.

La fusione dei lembi viene causata da un fascio di energia concentrato in una zona molto ristretta. Nel caso della *saldatura laser* il fascio è costituito da radiazioni elettromagnetiche "monocromatiche" (cioè aventi la stessa lunghezza d'onda, che di solito si trova nel campo della luce visibile o dell'infrarosso) e "coerenti" (cioè aventi tutte la stessa fase), che permettono pertanto una accurata "focalizzazione" sulla zona da saldare. La protezione è realizzata con gas inerte (argon o elio o loro miscele); data la formazione di gas ionizzati (plasma) nella zona da saldare che schermano il raggio laser, l'applicazione di quest'ultimo processo è limitata a spessori



Figura 13- - Camera per la saldatura a fascio elettronico (sotto vuoto)

non elevati (di solito 5÷10 mm); spessori maggiori potrebbero essere saldati nel vuoto in quanto in esso i gas ionizzati vengono eliminati.

Nel caso della *saldatura a fascio elettronico*, il fascio è costituito da elettroni liberi emessi nel vuoto da un catodo riscaldato. La saldatura a fascio elettronico viene generalmente realizzata ponendo sia la sorgente del fascio sia il pezzo da saldare in una camera ove viene realizzato un vuoto spinto (figura 13). Solo rare applicazioni prevedono l'uso di camere a vuoto parziale locale o la fuoriuscita del fascio elettronico per brevissimi tratti in aria. L'apparecchiatura permette di realizzare fasci di elevata potenza (anche varie decine di kilowatt) che accuratamente "focalizzati" da "lenti elettromagnetiche" sui pezzi da saldare permettono di effettuare, in una sola passata e a velocità relativamente elevata, la saldatura di pezzi di notevole spessore (anche un centinaio di millimetri).

Le saldature eseguite con fasci di energia concentrata (laser o fascio elettronico) sono caratterizzate da una forma particolare della zona fusa, molto stretta, che limita le deformazioni ed i ritiri dei pezzi,

I cicli termici sono sempre abbastanza severi, nonostante le elevate energie messe in gioco, data l'elevata velocità di saldatura, che consente elevata produttività e riduce la larghezza della zona termicamente alterata.

2.7 Saldatura a resistenza

La *saldatura elettrica a resistenza* è un procedimento di saldatura autogena per pressione, nel quale il calore necessario per portare localmente le superfici da saldare a temperatura di forgatura o di fusione è fornito *per resistenza elettrica* dal passaggio di una corrente attraverso la zona da unire. La saldatura si effettua senza metallo d'apporto.

Il principio della saldatura a resistenza si basa pertanto sul calore prodotto per effetto Joule grazie al passaggio di una certa intensità di corrente (dell'ordine di migliaia di Ampère) attraverso un circuito costituito dagli elettrodi (generalmente in rame o sue leghe) e dalle lamiere da saldare (figura 14). In particolare, poiché la maggiore resistenza elettrica è localizzata in corrispondenza della zona di contatto tra le due lamiere da saldare, si ottiene una distribuzione del calore tale da realizzare la saldatura opportunamente localizzata al centro del giunto e in tempi brevissimi (generalmente inferiori al secondo).

Il principio descritto, risulta pertanto applicabile a tutti i materiali ferrosi e non ferrosi, eventualmente adottando opportuni accorgimenti specifici per materiali particolari, come l'alluminio e le sue leghe).

Il processo è applicabile anche a geometrie differenti da quella descritta, che consente l'ottenimento di un punto di saldatura, e permette di realizzare con una vasta serie di processi

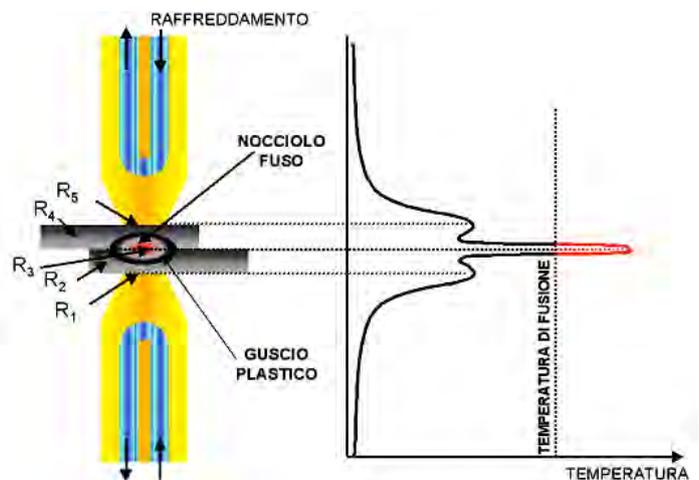


Figura 14- - Principio della saldatura a resistenza

derivati (saldatura a rulli, a rilievi (proiezione), testa a testa, ecc.) giunti dalle caratteristiche molto differenti (figura 15).

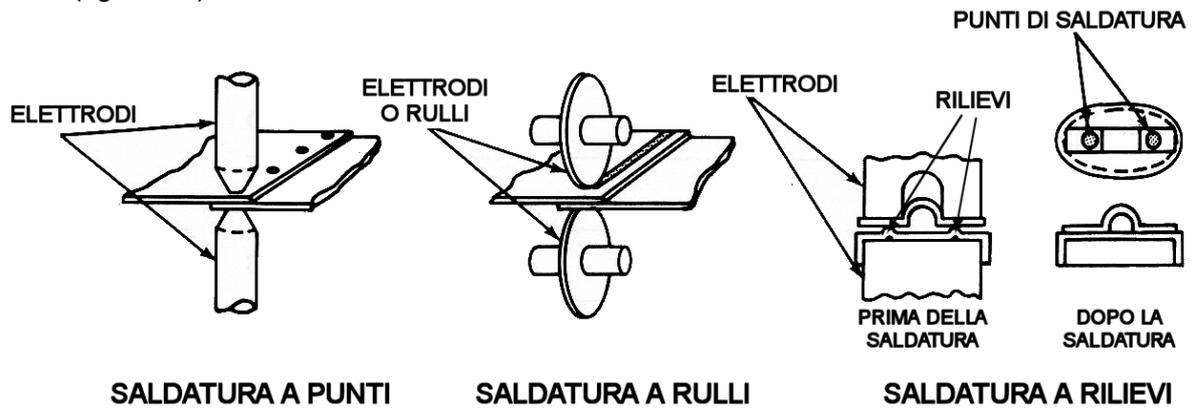


Figura 15- – Alcuni processi di saldatura a resistenza.

La caratteristica principale del processo è pertanto la elevata produttività e flessibilità, anche se è necessario considerare che esistono limiti alle geometrie dei giunti realizzabili e notevoli difficoltà per il controllo non distruttivo dei giunti.

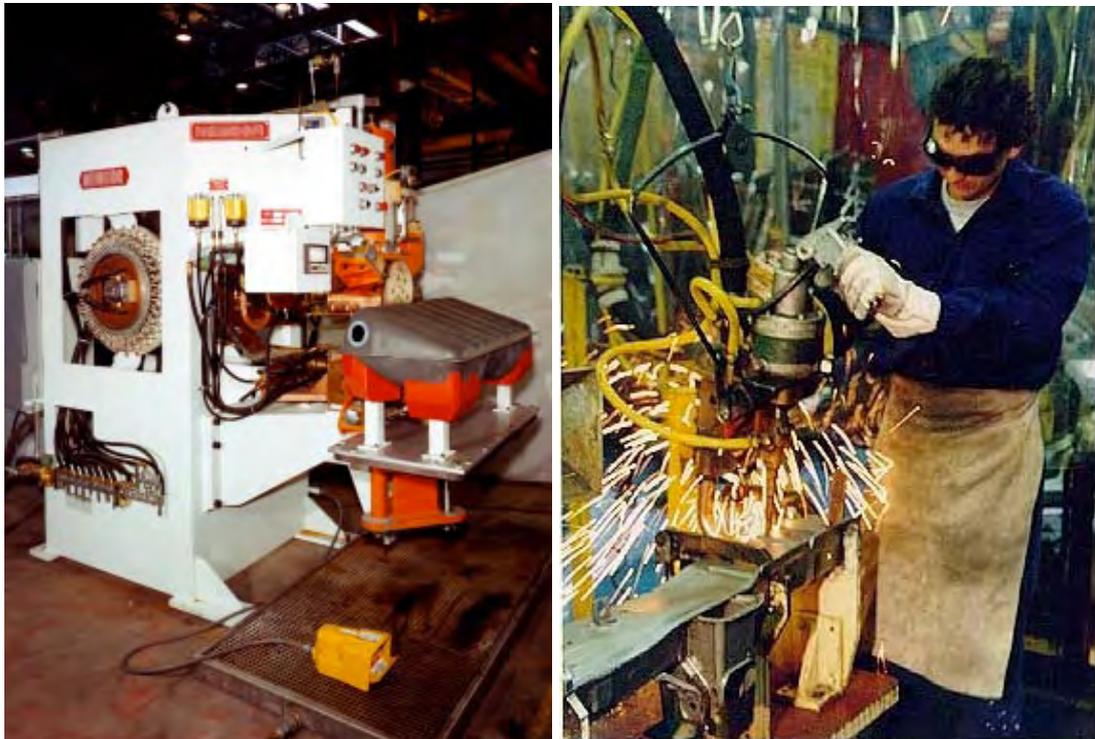


Figura 16- Applicazioni industriali della saldatura a resistenza

3 Principali agenti di rischio in saldatura

Dovendo eseguire una prima e molto generale suddivisione di tali agenti, è possibile distinguere tra agenti chimici ed agenti fisici, tenendo in considerazione il modo in cui tali situazioni interagiscono con la salute e la sicurezza del personale esposto.

Per quanto riguarda gli agente chimici, particolare interesse può essere rivolto ai fumi di saldatura, costituiti da un insieme di gas e particelle di varie dimensioni (una parte delle quali risulta inalabile) che interagiscono chimicamente con l'organismo, attraverso i diversi meccanismi di scambio a livello polmonare.

I principali agenti fisici direttamente connessi con le attività possono essere i seguenti:

- impiego di correnti elettriche di elevata intensità;
- presenza di radiazioni elettromagnetiche (raggi ultravioletti a bassa lunghezza d'onda, e raggi infrarossi ad elevata lunghezza d'onda);
- presenza di campi elettromagnetici;
- elevate temperature localizzate ed ambientali.

Oltre a questi, è possibile individuare una serie di agenti non specificamente connessi alle peculiari attività di saldatura, ma comunque tipiche della fabbricazione di prodotti saldati (ad esempio la movimentazione di carichi, l'uso di bombole in pressione, il rumore, ecc), la cui enumerazione però risulterebbe particolarmente complessa ed esulerebbe dallo scopo di questa trattazione.

3.1 Background

Da questo punto di vista si segnala l'attività svolta, a livello internazionale, dall'International Institute of Welding (IIW), una associazione degli istituti nazionali della saldatura, attiva fin dal 1948 (anno della sua fondazione) con lo scopo di promuovere gli studi sui fenomeni scientifici associati alla saldatura ed alle tecniche annesse, la loro applicazione industriale ed i mezzi di comunicazione per condividere tali tecnologie a livello internazionale¹. In particolare, l'IIW è composto da sedici commissioni tecniche e da oltre dieci gruppi di lavoro, tra cui è di particolare interesse la commissione VIII "Salute e Sicurezza", della quale fanno parte i maggiori esperti internazionali appartenenti a diverse esperienze professionali, comprendendo medici del lavoro, epidemiologi, biologi, chimici ed ingegneri di saldatura.

Tutto ciò ha portato nel corso degli anni allo sviluppo di studi epidemiologici, di modelli di riferimento e di livelli di rischio tecnicamente significativi, riconosciuti a livello internazionale e di comprovata valenza tecnica.

Tali risultati sono racchiusi nei circa duemila documenti che sono stati presentati e discussi nell'ambito delle riunioni della commissione (di norma tre all'anno), tra cui assumono particolare rilevanza i cosiddetti "Best practice document", cioè documenti di buona pratica industriale, condivisi dalla commissione e che rappresentano il punto di vista dell'IIW su alcune tematiche fondamentali della salute e sicurezza in saldatura. Parallelamente a ciò la stessa Commissione VIII è anche impegnata nell'elaborazione delle principali norme internazionali, essendo attualmente in discussione parecchi progetti di norma sull'argomento (ne è ad esempio dimostrazione la pubblicazione della norma UNI EN ISO 15011-1 "Salute e sicurezza nella saldatura e nelle tecniche affini: Metodo di laboratorio per il campionamento dei fumi e dei gas generati dalla saldatura ad arco - Parte 1: Determinazione del tasso di emissione e campionamento per l'analisi del particolato").

3.2 Fumi di saldatura

Durante le attività di saldatura, le particolari condizioni termiche, generalmente connesse all'uso di sorgenti di calore ad elevata densità di energia, provocano lo sviluppo di un significativo quantitativo di fumi. Da un punto di vista generale, tali fumi sono composti in parte dai gas sviluppati o utilizzati durante la saldatura, ed in parte da

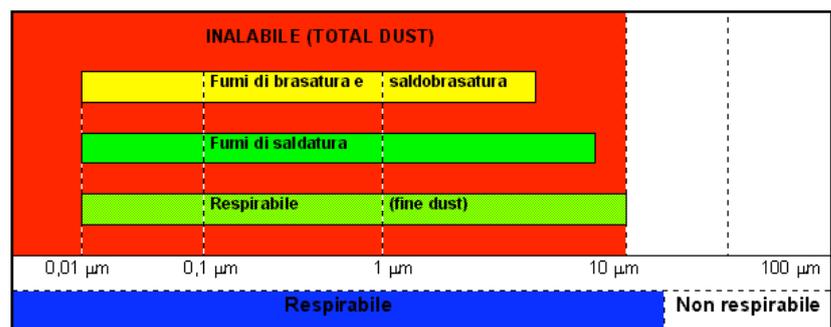


Figura 17 - Suddivisione dei particolati presenti nei fumi di saldatura in base alla dimensione

¹ L'Istituto Italiano della saldatura è membro fondatore dell'IIW, oltre ad esserne membro attivo e storicamente coinvolto sulle tematiche della salute, sicurezza e gestione ambientale.

particelle metalliche più o meno fini (particolati), una parte delle quali può avere dimensioni inferiori ai 10 µm, e pertanto è in grado di agire a livello degli alveoli polmonari interagendo con il personale esposto (frazione respirabile [1]).

La figura 17 riporta una schematica rappresentazione della suddivisione di tali particolati in relazione alla tecnica di saldatura utilizzata.

3.2.1 Meccanismo di formazione e principali caratteristiche dei fumi

I gas che si possono individuare nei fumi di saldatura si sviluppano in seguito a vari meccanismi di associazione e dissociazione e alla decomposizione di sostanze presenti nella zona di saldatura (solventi, vernici, ecc.), spesso per effetto delle elevate temperature in gioco (anche oltre a 10.000°C all'interno dell'arco) e dell'azione delle radiazioni elettromagnetiche (raggi UV) prodotte dall'arco.

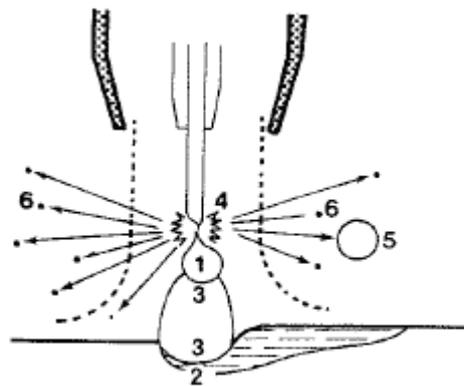
Il meccanismo sulla base del quale si sviluppano i particolati, invece, risulta tuttora poco chiaro, anche perché influenzato da numerosi parametri tecnologici, tra cui il tipo di processo di saldatura e le sue varianti tecniche, i parametri di saldatura, la posizione, etc.

Ad esempio è stato mostrato come in alcune applicazioni della saldatura a filo continuo sotto protezione di gas la formazione del particolato sia legato sia a fenomeni di evaporazione-condensazione, sia allo sviluppo di particelle più o meno grandi (figura 18), alcune delle quali si riassociano formando particelle fini ed ultrafini [2,3] formando catene grossolane, fini o irregolari [4].

Particolarmente interessante dal punto di vista degli effetti sull'organismo è anche la struttura di queste particelle, che risultano fortemente condizionate dai fenomeni di ossidazione che si possono verificare nella zona dell'arco (e conseguentemente anche dal tipo di atmosfera in cui questo si sviluppa); le particelle osservate con microscopio elettronico (con tecniche a scansione - SEM e a trasmissione - TEM) ed analizzate con sistemi appropriati (X-Ray Energy Dispersive Spectroscopy - XEDS) appaiono spesso caratterizzate dalla presenza di un guscio esterno (costituito da silicati e, per i processi che fanno uso di flussi, fluoruri di sodio e calcio) e da un cuore metallico interno (costituito da ossidi vari dei metalli costituenti il metallo d'apporto) [4,5], come ad esempio mostra l'immagine TEM di figura 18.

Per quanto riguarda la composizione chimica, è possibile fare riferimento, in mancanza di dati più precisi, a specifiche tabelle redatte in ambito internazionale, che propongono valori di riferimento per le principali sostanze pericolose sviluppate durante la saldatura [6]; come evidente i valori riportati in tabella 1 vanno opportunamente integrati con dati più precisi, forniti dai produttori di consumabili, ed ottenuti sulla base di procedure standardizzate (da cui l'interesse recente posto nello sviluppo delle normative della serie EN 15011).

Va inoltre sottolineato che una notevole difficoltà può essere riscontrata nella esatta determinazione delle sostanze prodotte nei fumi di saldatura, vista l'assenza di tecniche di valutazioni sufficientemente precise e comunque applicabili ad analisi dei fumi in campo chimico industriale [7].



- [1] Formazione delle gocce all'estremità dell'elettrodo e durante il trasferimento
- [2] Bagno di saldatura
- [3] Zone elettrodiche (anodo e catodo)
- [4] Esplosione del filo
- [5] Particelle esplose di grandi dimensioni
- [6] Particelle esplose di piccole dimensioni

Figura 18 – Meccanismo di formazione dei fumi nella saldatura a filo continuo

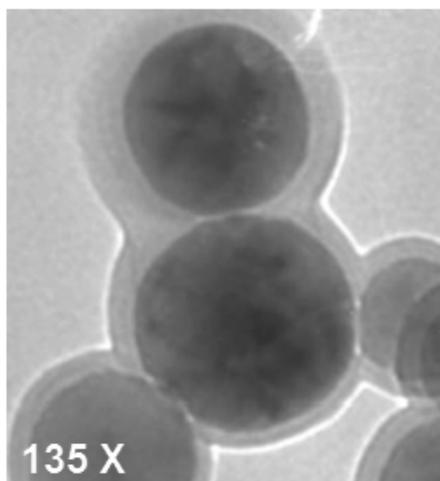


Figura 19 - Immagine TEM dei fumi nella saldatura FCAW.

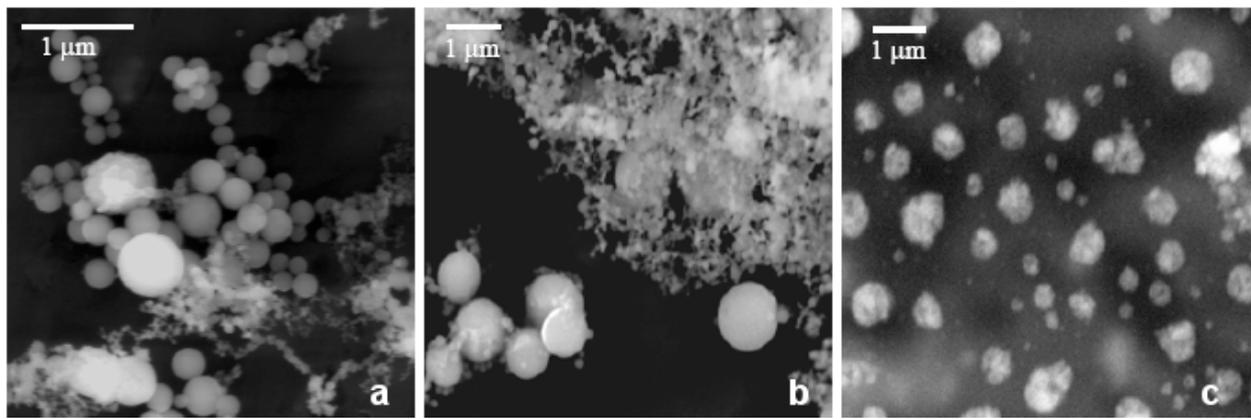


Figura 20 – Diverse tipologie di particolati agglomerati sviluppati nella saldatura a filo continuo sotto protezione di gas

E' infine estremamente importante considerare che nell'ambito di una specifica procedura di saldatura (abbinamento materiale base – processo di saldatura) la quantità di fumi che si sviluppa è fortemente legata ai parametri di saldatura e che, in termini generali, quelli che garantiscono i migliori risultati in termini di qualità della giunzione corrispondono nella maggioranza dei casi alle condizioni di minore emissioni di fumi; la composizione chimica e la struttura dei particolati, invece, non sembra esserne significativamente alterata.

Process	Filler Metal	Shielding Gases	Components in Consumable	Range of Key Components in Welding Fume Fume Analysis, Wt (%)										
				Fe	Mn	Si	Na	F	K	Mg	Li	Ni	CrVI	Cr(total)
Manual	Mild - low alloy steel	NA	Fe, Mn, Si, Na, F, K	12.0 - 62.0	1.0 - 8.0	1.0 - 14.0	.6 - 9.0	.6 - 21.0	<.01 - 25.0	–	–	–	–	–
	Stainless steel	NA	Fe, Mn, Si, F, K, Ni, Cr	5.0 - 15.0	1.0 - 8.0	.2 - 13.0	1.0 - 15.0	8.0 - 23.0	1.0 - 29.0	–	2.0 - 7.0	.5 - 6.0	< 1.0 - 6.0	4.0 - 12.0
	Nickel-Nickel alloy	NA	Fe, Ni, Ba, Cr, Ca, Cu, Si, Sr	1.0 - 9.0	.8 - 3.0	1.0 - 2.0	2.0 - 3.0	4.0 - 15.0	1.0 - 2.0	<.01 - 3.0	–	3.0 - 8.0	14.0 - 38.0	–
	Hardfacing	NA	Fe, Mn, Si, K, F, Cr	2.0 - 57.0	4 - 31.0	1.0 - 6.0	.2 - 8.0	2.0 - 15.0	1.0 - 14.0	.9 - 5.0	–	–	–	6 - 20.0
Automatic Semi-automatic	Mild - low alloy steel (Self-Shielded)	NA	Fe, Mn, Ba, Si, F, Ca	7.0 - 42.0	.5 - 7.0	.1 - 6.0	2 - 22.0	4.0 - 24.0	<.01 - 15.0	.9 - 28.0	.4 - 8.0	.02 - 2.0	Ba(sol)	Ba(total)
	Mild - low alloy steel (Gas-Shielded)	CO ₂	Fe, Mn, Si, F, Na, K, Cr	28.0 - 62.0	5.0 - 18.0	1.0 - 5.0	.3 - 13.0	.6 - 17.0	.1 - 9.0	<.01 - 4.0	.1 - 1.0	–	1.0 - 24.0	4.0 - 42.0
	Hardfacing	NA	Fe, Mn, Si, F, Cr	4.0 - 37.0	1.0 - 38.0	<.01 - 2.0	<.01 - 6.0	1.0 - 18.0	2 - 6.0	.6 - 25.0	–	–	CrVI	Cr(total)
	Stainless steel (Gas-Shielded)	CO ₂	Fe, Mn, Si, F, K, Cr	12.0 - 19.0	5.0 - 8.0	5.0 - 8.0	5.0 - 12.0	3.0 - 6.0	1.0 - 3.0	<.01 - .04	–	1.0 - 3.0	4 - 1.0	.5 - 11.0
	Stainless steel (Gas-Shielded)	NA	Fe, Mn, Si, F, K, Cr	13.0	6.0	4.0	5.0	21.0	18.0	<.01 - 3.0	–	3.0	CrVI	Cr(total)
Automatic Semi-automatic	Mild - low alloy steel (Wire)	CO ₂	Fe, Mn, Si, Cu	52.0 - 63.0	4.0 - 12.0	1.0 - 6.0	–	–	–	–	–	–	–	–
Automatic Semi-automatic	Stainless wire	98Ar/2O ₂	Fe, Mn, Si, Ni, Cr	29.0 - 38.0	7.0 - 12.0	–	–	–	–	–	–	5.0 - 6.0	CrVI	Cr(total)

Tabella 1 – composizione chimica dei fumi, valori indicativi [7]

3.2.2 Effetti dei fumi di saldatura

Dal punto di vista degli effetti sull'organismo, diverse segnalazioni di malattie riferibili ai saldatori sono disponibili. In particolare sono stati registrati, sia effetti acuti (febbre da fumi metallici, irritazione delle vie respiratorie, fibrosi ed edema), sia a lungo termine (sierosi, riduzione della capacità respiratoria, bronchite cronica, cancro) [9]; la tabella 2 riporta, in forma schematica, una classificazione delle principali sostanze pericolose specifiche che possono essere presenti nei fumi, senza però una diretta correlazione con studi epidemiologici riferiti al caso dei saldatori [3]. È fondamentale sottolineare, già a questo punto, che tali casi non sono direttamente riferibili alle sole attività di saldatura, ma all'insieme di attività connesse alla fabbricazione di prodotti saldati, e che i casi segnalati di intossicazione acuta sono direttamente riferibili ad esposizioni significative legate all'uso incorretto (o mancato) degli appropriati sistemi di protezione [10].

SOSTANZA PERICOLOSA	STATO	EFFETTI
Ossido di alluminio	<i>Particolato</i>	Accumulo di polveri nei polmoni, alluminosi
Ossidi di ferro	<i>Particolato</i>	Accumulo di polveri nei polmoni, siderosi
Ossido di sodio	<i>Particolato</i>	Accumulo di polveri nei polmoni
Bioossido di titanio	<i>Particolato</i>	Accumulo di polveri nei polmoni
Monossido di carbonio (CO)	<i>Gassoso</i>	Tossico impedisce il trasporto dell'ossigeno nel sangue Mal di testa Intossicazione Paralisi respiratoria Eventuale perdita di conoscenza
Ozono (O ₃)	<i>Gassoso</i>	Tossico irritazione delle mucose Intossicazione acuta Edema polmonare
Fosgene (COCl ₂) Bioossido di Azoto (NO ₂)	<i>Gassoso</i>	Tossico irritazione delle mucose Intossicazione Edema polmonare ritardato
Fluoruri	<i>Particolato</i>	Tossici irritazione alle mucose Danni al sistema nervoso
Ossido di rame	<i>Particolato</i>	Tossico febbre da fumi metallici
Ossidi di manganese	<i>Particolato</i>	Tossici irritazione alle mucose Danni al sistema nervoso
Pentossido di vanadio	<i>Particolato</i>	Tossico irritazione agli occhi e alle vie respiratorie Danni ai polmoni
Ossido di zinco	<i>Particolato</i>	Tossico Febbre da fumi metallici
Composti cromo esavalente	<i>Particolato</i>	Cancerogeno (per il sistema respiratorio) Irritazione alle mucose
Ossido di cobalto	<i>Particolato</i>	Cancerogeno Danneggiamento al sistema respiratorio
Ossidi di nickel	<i>Particolato</i>	Cancerogeno (per il sistema respiratorio)
Bioossido di torio	<i>Particolato</i>	Radioattivo esposizione dei bronchi e dei polmoni Può avere effetti cancerogeni

Tabella 2 – Principali effetti di possibili sostanze presenti nei fumi di saldatura

Tre aspetti, tra quelli menzionati in tabella, possono essere considerati di particolare rilevanza in ambito industriale e per l'igiene del lavoro: la cancerogenicità dei fumi di saldatura, l'effetto degli ossidi di manganese presenti negli stessi sul sistema nervoso e la radioattività del bioossido di torio presente nella saldatura TIG.

Per quanto riguarda il primo aspetto, l'attenzione è posta principalmente agli ossidi di Nichel ed ai composti di Cromo esavalente che possano essere presenti nei fumi di saldatura. I principali studi presenti in ambito IARC (International Agency for Research on Cancer) concludono che i rischi

siano non direttamente riferibili al caso della saldatura degli acciai inossidabili², ma ai saldatori in genere [11,12]. A ciò si aggiunga che i dati epidemiologici tuttora disponibili sono riferiti a esposizioni combinate a fumo di sigaretta e polvere di asbesto, la cui comprovata cancerogenicità permette di considerarli più che fattori di disturbo [10]. L'insieme delle pubblicazioni internazionali considerate e l'analisi dei dati relativi supporta pertanto la conclusione che, sebbene i fumi di saldatura possano contenere sostanze cancerogene (la cui quantità non è tuttavia ancora quantificabile), il maggior rischio di cancro per i saldatori sia fundamentalmente legato al problema dell'amianto e, in seconda battuta, al fumo di sigarette. Prova ne è che i fumi di saldatura non siano neanche inseriti nell'elenco delle sostanze cancerogene da parte dell'IARC [11].

Per quanto riguarda l'aspetto della neurotossicità degli ossidi di manganese, i fumi di saldatura sono stati messi in correlazione sia con una maggiore facilità a contrarre il morbo di Parkinson sia con il Manganismo, malattia tipica dei lavoratori in miniere di manganese. Gli effetti sono legati, anche se in modo diverso, alle interazioni tra la produzione di dopamina ed il suo ruolo di neurotrasmettitore nel cervello che esercita un'influenza fondamentale nella gestione dei movimenti degli individui. E' innanzitutto importante sottolineare che i meccanismi di trasferimento di questo metallo dagli alveoli polmonari al sangue sono in antagonismo con quelli di trasferimento del ferro, molto più ampiamente presente nei fumi di saldatura [13]. Un esame della letteratura che copre gli ultimi quarant'anni, inoltre, ha messo in evidenza soltanto cinque casi che superano la soglia diagnostica per il manganismo, seppur con un certo grado di dubbio. Inoltre, è importante sottolineare che il manganese, se venisse comunque assorbito dall'organismo, potrebbe avere un effetto di accelerare la diagnosi di un Parkinson idiomatico, ma non di provocarne la contrazione [13,14].

L'uso di elettrodi non consumabili toriati, infine, è tipico della saldatura ad elettrodo infusibile sotto protezione di gas inerte (TIG) in cui tenori variabili di ossido di torio sono utilizzati, con valori fino al 4,2% in peso rispetto al Tungsteno, come elemento addittivante allo scopo di prolungare la vita dell'elettrodo o per consentire l'uso di più elevate correnti di saldatura. In particolare, i risultati ottenuti su base sperimentali hanno dimostrato che l'esposizione a radiazioni ionizzanti (raggi beta e gamma) durante l'immagazzinamento, la saldatura e la molatura (della saldatura) è trascurabile, essendo molto al di sotto del livello di radiazione naturale stabilito da ICRP (Commissione Internazionale per la Protezione Radiologica) [15]. Il potenziale rischio di irradiazione interna è soltanto legato all'eventuale polvere inalata dal saldatore durante le operazioni di rifacimento della punta se non vengano svolte secondo le comuni pratiche industriali, ad esempio la molatura in corrispondenza dei sistemi di aspirazione dei fumi o con dispositivi appositi – figura 21) o, soltanto in casi estremi (valori di corrente molto spinti) nella saldatura delle leghe di alluminio e magnesio (situazione comunque sconsigliabile anche da un punto di vista tecnico a causa della conseguente inefficacia del processo di saldatura).



Figura 21 - Dispositivo per la raccolta delle polveri durante il rifacimento della punta all'elettrodo

3.2.3 Valutazione del rischio e misure protettive

Un'analisi dei dati di cui al paragrafo precedente permette pertanto di concludere che esiste una certa potenzialità di rischio associata alla inalazione di fumi di saldatura; tuttavia, le analisi ambientali eseguite mostrano inconfutabilmente che le pratiche di protezione dei saldatori attualmente in uso (ed il conseguente rispetto dei corrispondenti riferimenti legislativi nazionali) consentono una più che efficace riduzione delle concentrazioni dei fumi di saldatura in prossimità

² I fumi della saldatura degli acciai inossidabili risultano potenzialmente più pericolosi, date le elevati percentuali di Cromo (sempre superiore al 13%) e di Nichel (spesso presente in percentuali superiore all'8%) che caratterizzano la composizione chimica di questi materiali.

dell'apparato respiratorio dei saldatori e pertanto riducono a livelli bassissimi, se non trascurabili, l'esposizione dei saldatori a detti fumi.

Oltre a questo, è possibile prendere in considerazione alcuni spunti per una strategia di controllo dei rischi per la salute derivanti dai fumi sviluppati durante le attività di saldatura:

- sostituire o modificare i processi di saldatura che emettono grossi quantitativi di fumi, se possibile;
- ottimizzare parametri e procedure di saldatura;
- utilizzare elettrodi additivati con ossidi diversi da quelli di torio (lantano, cerio, zirconio) nella saldatura TIG;
- progettare l'ambiente di lavoro per ridurre o eliminare i rischi;
- prevedere un sistema di estrazione locale, o direttamente sulla torcia (se applicabile);
- prevedere una buona ventilazione generalizzata;
- curare pulizia delle superfici e dell'ambiente di lavoro;
- usare i dispositivi di protezione individuale solo qualora non siano disponibili alternative.

Risulta comunque evidente che la gestione di queste problematiche richiede un insieme di competenze relative alla tecnologia in uso (la saldatura ed i processi correlati) e alla sicurezza per evitare di privilegiare troppo l'aspetto della produzione rispetto a quello della sicurezza o viceversa. E' infine da sottolinearsi un crescente interesse su queste tematiche, che ha portato al fiorire di ricerche mirate alla diminuzione dei fumi alla fonte attraverso variazioni tecnologiche dei processi di saldatura tradizionali, allo sviluppo di specifiche categorie di consumabili a bassa emissione di fumi e alla nascita di nuovi processi di saldatura concorrenziali ed a basso rischio.

3.3 Rischio elettrico

Le caratteristiche dei processi di saldatura in generale, e quelli ad arco in particolare, prevedono un certo rischio correlato alla presenza di polarità elettriche libere. A ciò si aggiungono le condizioni di lavoro non sempre ottimali, con conduttori sfilacciati e correnti vaganti all'interno dei componenti saldati (ad esempio la figura 22 si riferisce ad una tipica situazione di saldatura in ambiente confinato).

3.3.1 Caratteristiche dell'agente di rischio

Il parametro su cui si concentra l'attenzione per la valutazione della pericolosità nei processi che fanno uso di apparecchiature elettriche è l'intensità di corrente elettrica, i cui effetti sul corpo umano dipendono, tra l'altro, dalla durata dell'impulso elettrico, dal percorso effettuato dalla corrente e dalla frequenza di alimentazione. Dal punto di vista fisico, il parametro

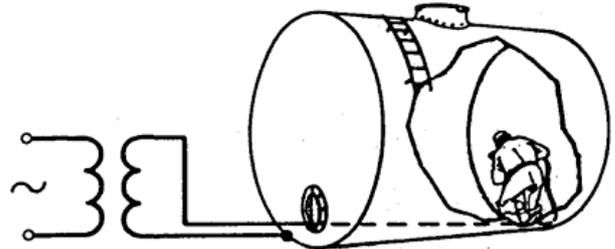


Figura 22 - Schema elettrico per le attività di saldatura all'interno di un recipiente

determinante è la resistenza elettrica offerta dal corpo del saldatore (il conduttore in questione) al passaggio della corrente, che è fortemente legata al percorso e, soprattutto, alle condizioni di contatto con le polarità libere (in questo caso potrebbero essere la torcia o una parte elettrificata ed il pezzo, a sua volta direttamente connesso con la saldatrice). Risulta pertanto maggiore la pericolosità delle operazioni svolte a circuito aperto, soprattutto per i processi manuali (Elettrodo rivestito e TIG) poiché il generatore di saldatura fornisce valori di tensione a vuoto più alti (anche di alcune decine di Volt) rispetto alle condizioni di arco acceso.

3.3.2 Valutazione del rischio ed azioni correttive

La sensibilità del corpo umano al passaggio di corrente ha in genere un valore di soglia di 0,5 mA; superato tale valore il corpo reagisce in modo sempre più grave al crescere dell'intensità, e con effetti proporzionali al tempo di passaggio di tale corrente.

In particolare, gli effetti che si possono riscontrare sono: contrazioni muscolari, difficoltà respiratorie, disturbi reversibili legati alla fibrillazione ventricolare e la possibilità di arresti cardiaci e anche gravi bruciature (si veda anche il diagramma di figura 23).

Le probabilità, tuttavia, che tali situazioni si possano verificare, risultano estremamente basse, in quanto le apparecchiature di saldatura rispondono a specifici requisiti normativi che prevedono una massima tensione di 48V in condizioni di funzionamento (arco acceso) e di 90V in condizioni di spunto, valori assolutamente insufficienti a determinare effetti sensibili qualora il saldatore indossi gli opportuni indumenti protettivi (i guanti isolanti, in particolare). Tuttavia è da segnalarsi l'importanza di posizionare la presa di massa il più possibile vicino alla zona di saldatura, evitando quindi il passaggio di correnti parassite all'interno del pezzo (ancora una volta, questa condizione associa le problematiche di sicurezza quelle di opportunità tecniche per il miglioramento della qualità della saldatura).

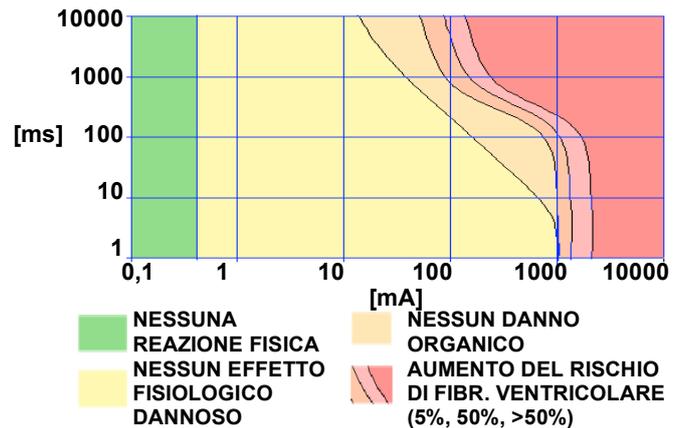


Figura 23 – Diagramma di pericolosità per il passaggio di corrente nell'organismo.

3.4 Campi elettromagnetici

A causa degli sviluppi industriali e tecnologici degli ultimi decenni, un numero crescente di persone risulta esposto a vari tipi di campo elettromagnetico. In alcuni casi sono state registrate reazioni di ipersensibilità all'elettricità, aventi come effetto problemi alla pelle.

Sicuramente più allarmanti sono alcune pubblicazioni che ipotizzano una relazione tra la presenza di campi elettromagnetici e la formazione di leucemia e/o di tumori al cervello; i gruppi potenzialmente a rischio potrebbero essere proprio i saldatori, gli operatori di stazioni di trasformazione, i conduttori di locomotori. Recentemente inoltre sarebbero state evidenziate sperimentalmente correlazioni tra esposizione a campi anche a bassa frequenza in alcuni gruppi di lavoratori ed una accresciuta incidenza di tumori.

3.4.1 Caratteristiche dell'agente di rischio

Per quanto riguarda il caso dei saldatori, non è da ritenersi particolarmente significativa l'esposizione ai campi elettrici dati i bassi valori di tensione in gioco, mentre risultano sicuramente tra i gruppi di lavoratori più esposti ai campi magnetici, dati gli elevati valori di corrente e le piccole distanze tra i conduttori ed il corpo: intorno al cavo di alimentazione vengono superati facilmente i 200 μT , mentre in un normale ufficio non si supera di fatto 1 μT ed il valore dell'induzione magnetica dovuta al campo terrestre è di circa 50 μT .

Sicuramente significativo, nell'analisi della pericolosità dei campi magnetici, è anche lo studio della distribuzione delle frequenze, essendo, in ogni caso, potenzialmente più pericolose quelle più elevate.

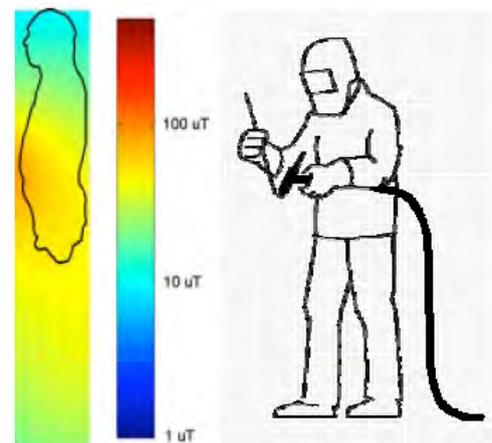
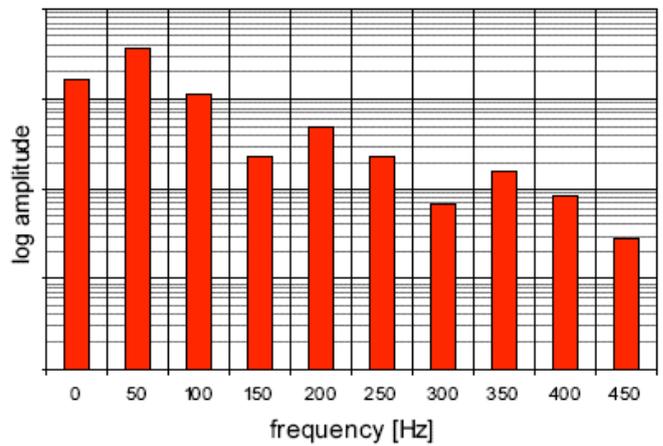


Figura 24– Distribuzione del campo magnetico nella saldatura TIG (simulazione, 100A)

Recenti studi sono stati rivolti all'argomento, particolarmente interessanti nel caso di uso di generatori di saldatura a controllo elettronico (spesso definiti come generatori "ad inverter") per la saldatura TIG ed a filo continuo, caratterizzati da forme di corrente complesse articolate su frequenze molto elevate (la figura 25 si riferisce, ad esempio, alle frequenze rilevate nella forma d'onda per una saldatura TIG, ad onda quadra con duty cycle del 30% per la saldatura delle leghe di alluminio).



3.4.2 Valutazione del rischio e misure protettive

Figura 25 – Frequenze rilevate nella forma d'onda per una saldatura TIG

Nel campo degli studi sugli effetti dei campi elettromagnetici, non si è addivenuti, al momento, a risultati definibili, soprattutto per quanto riguarda gli effetti a lungo termine, sia in termini generali sia con riferimento al caso dei saldatori.

Per quanto riguarda invece gli effetti a breve termine riferiti (la stimolazione di cellule dei tessuti nervosi muscolari, elettricamente eccitabili, ed il riscaldamento delle regioni interessate), è possibile considerare le tabelle previste dalle linee guida ICNIRP, che riportano limiti di riferimento per l'intensità del campo magnetico in funzione della relativa frequenza.

L'analisi della pericolosità potrebbe essere quindi riferito ad un effetto cumulativo, valutabile in base alla seguente relazione:

$$\sum_i J_i / J_{LBi} \leq 1$$

essendo J_i la densità di corrente associata al campo con l' i -esima frequenza e J_{LBi} il limite base per tale i -esima frequenza.

Oltre a ciò è importante tenere in considerazione che la presenza di campi elettromagnetici può avere influenza sui portatori di pacemaker [17], per cui è fortemente sconsigliato al personale dotato di tali dispositivi di essere direttamente coinvolti nell'esecuzione delle saldature.

In ogni caso, a titolo di precauzione, è conveniente ridurre l'esposizione, incrementando la distanza tra corpo e generatore, disponendo il più vicino possibile i cavi di "andata" e "ritorno" della corrente ed in ogni caso evitando di avere il corpo del saldatore all'interno di una spira (è ad esempio pratica alquanto diffusa quella di appoggiare il cavo della torcia per la saldatura a filo continuo sulla spalla o, peggio, attorno al collo).

3.5 Radiazioni elettromagnetiche emesse dal processo di saldatura

Durante il funzionamento dei processi di saldatura possono essere emesse radiazioni elettromagnetiche di intensità e caratteristiche differenti; se si esclude il caso della saldatura a fascio elettronico (che produce radiazioni ionizzanti) ed i campi elettromagnetici di cui al capitolo precedente, tali radiazioni ricadono nell'ambito del infrarosso, del visibile e dell'ultravioletto.

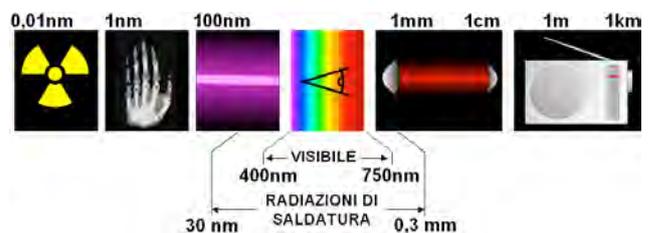


Figura 26 – Radiazioni elettromagnetiche in saldatura

3.5.1 Caratteristiche dell'agente di rischio

Le radiazioni prodotte possono essere caratterizzate in base alla lunghezza d'onda (inversamente proporzionale all'energia) e dall'intensità; queste dipendono dai seguenti fattori:

- processo di saldatura;
- metalli coinvolti (materiali base e d'apporto);
- stato superficiale del metallo;
- potenza termica della sorgente (tensione e intensità di corrente per i processi ad arco o portata di gas per i processi alla fiamma).

Ad esempio risultano maggiormente critici i casi di saldatura delle leghe di alluminio con processi sotto protezione di gas, ove il materiale base ha in genere elevata riflettività e l'atmosfera protettiva non provvede a schermare l'arco elettrico; mentre risulta praticamente nulla l'esposizione durante la saldatura ad arco sommerso, essendo l'arco completamente coperto da una spessa coltre di flusso.

3.5.2 Valutazione del rischio ed azioni correttive

I principali pericoli che le radiazioni emesse dai processi di saldatura presentano per gli occhi sono [19]:

- infiammazioni alla cornea con rischio di danni al cristallino dovuti alle radiazioni UV (le più pericolose, che comportano anche dolori agli occhi, fotofobia e infiammazione delle palpebre);
- mal di testa, ipertensione agli occhi, diminuzione dell'acutezza visiva e danni alla retina dovuti alle radiazioni visibili;
- problemi alla vista o infiammazione dell'iride (fino alla cataratta) dovuti a radiazioni IR.

Le stesse radiazioni possono anche provocare bruciature alla pelle e, in certi casi, anche danni ai tessuti. Pertanto è necessario operare solo con opportune protezioni.

In relazione al fatto che i tre tipi di radiazioni agiscono contemporaneamente, la sola protezione adeguata per i processi di saldatura all'arco è costituita da uno schermo (cioè da una maschera o un casco) in grado di

proteggere tutta la testa e di filtrare adeguatamente la luce con appositi filtri inattinici aventi valori di gradazione adeguati (si veda la tabella 4) [3,20].

Per proteggere il personale ubicato nelle vicinanze, è opportuno sistemare intorno alla zona di saldatura tende o opportune paratie schermanti, facendo attenzione anche alle

radiazioni indirette (dovute soprattutto ai raggi UV), riflesse per esempio dalle pareti e dal soffitto (talvolta risulta opportuno utilizzare colorazioni scure).

Nel caso di saldatura e taglio con processi alla fiamma, sono invece sufficienti appositi occhiali, anch'essi dotati di filtri scelti in base al criterio seguente:

- per portate di ossigeno comprese tra 900 e 2000 l/h, grado 5
- per portate di ossigeno comprese tra 2.000l/h e 4.000l/h, grado 6
- per portate di ossigeno comprese tra 4.000l/h e 8.000l/h, grado 7

Per quanto riguarda infine l'opportunità di impiegare lenti a contatto durante le operazioni di saldatura ad arco elettrico, specifiche ricerche hanno dimostrato invece che gli allarmi esistenti non erano tecnicamente giustificati, essendo di norma sufficiente rispettare le normali condizioni di utilizzo delle lenti stesse. Qualche difficoltà addizionale può invece insorgere non tanto per via

PROCESSO DI SALDATURA E TECNICHE CONNESSE	INTENSITÀ DI CORRENTE IN AMPERE																							
	0,5	2,5	10	20	40	80	125	175	225	275	350	450	0,5	2,5	10	20	40	80	125	175	225	275	350	450
	1	5	15	30	60	100	150	200	250	300	400	500	1	5	15	30	60	100	150	200	250	300	400	500
Elettrodi rivestiti	9												10	11			12			13			14	
MIG (leghe leggere)	10												11	12		13		14		15				
TIG	9												10	11		12		13		14		15		
Filo continuo	10												11	12		13			14		15			
Saldatura plasma	5	6	7	8	9	10	11	12		13			14		15									
Taglio (arco carbone)	10												11	12		13		14		15				
Taglio plasma	11												12		13			14		15				

Tabella 4 - Gradazione consigliata dei vetri filtranti per saldatura e tecniche connesse

radiazioni indirette (dovute soprattutto ai raggi UV), riflesse per esempio dalle pareti e dal soffitto (talvolta risulta opportuno utilizzare colorazioni scure).

Nel caso di saldatura e taglio con processi alla fiamma, sono invece sufficienti appositi occhiali, anch'essi dotati di filtri scelti in base al criterio seguente:

- per portate di ossigeno comprese tra 900 e 2000 l/h, grado 5
- per portate di ossigeno comprese tra 2.000l/h e 4.000l/h, grado 6
- per portate di ossigeno comprese tra 4.000l/h e 8.000l/h, grado 7

Per quanto riguarda infine l'opportunità di impiegare lenti a contatto durante le operazioni di saldatura ad arco elettrico, specifiche ricerche hanno dimostrato invece che gli allarmi esistenti non erano tecnicamente giustificati, essendo di norma sufficiente rispettare le normali condizioni di utilizzo delle lenti stesse. Qualche difficoltà addizionale può invece insorgere non tanto per via

della saldatura in sé quanto per la presenza, in ambienti quali cantieri, officine o reparti di saldatura, di polvere, sporcizia o altri agenti che portino un eccessivo essiccamento del bulbo oculare [21].

4 Relazione tra sostanze pericolose, processi di saldatura e materiali saldati

Le considerazioni esposte riguardo ai fumi di saldatura mettono in evidenza alcuni risultati fondamentali:

- la composizione chimica dei gas e delle sostanze particellari dipende dal processo di saldatura e dai materiali saldati;
- le sostanze pericolose non si manifestano singolarmente ma sotto forma di miscugli di vari composti;
- in funzione del processo e del materiale vi possono essere uno, due o tre componenti predominanti, per cui divengono significative soprattutto la loro concentrazione e la loro pericolosità.

Ogni sostanza pericolosa predominante è chiamata componente chiave (per una specifica combinazione di processo e materiale saldato).

La saldatura produce spesso sostanze pericolose sotto forma di particolato e fumi. Le particelle disperse in aria hanno una dimensione (il cosiddetto diametro aerodinamico) inferiore ad 1 μm , sono respirabili e sono di norma chiamate *fumi di saldatura*.

La frazione respirabile è naturalmente di particolare importanza: tale frazione, chiamata normalmente polvere fine, viene normalmente misurata come polvere totale nel corso delle misurazioni personali condotte in saldatura. Ci sono notevoli difficoltà, a questo proposito, per posizionare il captatore utilizzato per le misure in prossimità della zona di respirazione del saldatore a causa della presenza della maschera. La polvere totale (frazione inalabile) è per questa ragione misurata come un componente chiave nei processi di saldatura.

Poiché la saldatura produce particelle molto fini, classificabili tutte come frazione respirabile, le misure di polvere totale risultano comunque più conservative rispetto a quelle di polvere fine. La quantità di sostanze pericolose generata varia tra i diversi processi di saldatura. Le emissioni di fumi in (mg/s) sono generalmente inferiori in saldatura che non durante il taglio termico o la spruzzatura a caldo.

Studi recenti sull'emissione di sostanze pericolose hanno evidenziato che circa il 95% dei fumi di saldatura derivano dal materiale d'apporto e solo il 5% circa dal materiale base.

4.1 Saldatura a per combustione gassosa

La saldatura per combustione gassosa di acciai non legati o bassolegati produce soprattutto gas di azoto (in particolare, ossidi d'azoto). Il componente chiave è pertanto il biossido d'azoto, come anche nel caso di riscaldamento alla fiamma e in quello della raddrizzatura alla fiamma.

La concentrazione di biossido d'azoto nell'aria in prossimità del posto di lavoro aumenta in funzione della lunghezza della fiamma e della dimensione della torcia, così come della distanza tra l'estremità della fiamma ed il materiale base.

La concentrazione di biossido d'azoto diviene critica per lavorazioni effettuate in spazi ristretti, senza adeguato ricambio. Prendendo a riferimento una fiamma lunga 15 mm, tale concentrazione può diventare 10 volte maggiore di quella relativa ad una fiamma generata in aria libera.

Eventuali problemi connessi con la produzione di fumi possono derivare dalla lavorazione di leghe non ferrose (come leghe base piombo, rame) e dalla presenza di rivestimenti contenenti tali sostanze.

4.2 Saldatura ad arco manuale con elettrodo rivestito

Come accennato, i livelli di fumo ed i componenti chiave possono variare significativamente in relazione al metallo saldato.

4.2.1 Acciai non legati e bassolegati

A paragone con la saldatura a gas questo processo genera elevate quantità di particelle aerodisperse. Non sono per contro significativi i rischi connessi con la presenza di ossidi d'azoto.

Nella saldatura in arco manuale il componente chiave è dunque la polvere totale.

La composizione chimica dei fumi di saldatura rispecchia quella del rivestimento degli elettrodi e dell'anima metallica. Le sostanze principali risultano dunque essere l'ossido di ferro Fe_2O_3 , il biossido di silicio SiO_2 , l'ossido di potassio K_2O , l'ossido di manganese MnO , l'ossido di sodio Na_2O , il biossido di titanio TiO_2 ed il biossido di alluminio Al_2O_3 .

In funzione del tipo di rivestimento (acido, cellulosico, basico, rutilico) queste sostanze possono essere presenti in varie proporzioni: il fumo relativo ad elettrodi basici contiene ossidi di calcio CaO e fluoruri, per cui i fluoruri devono essere considerati i composti chiave.

Il risultato di numerose misurazioni effettuate durante la saldatura in arco manuale con elettrodi non legati o bassolegati ha permesso di valutare un valore tipico di emissione di polvere totale tra 0,8 e 40 mg/s. Per speciali elettrodi contenenti rame l'ossido di rame può essere un componente chiave aggiuntivo.

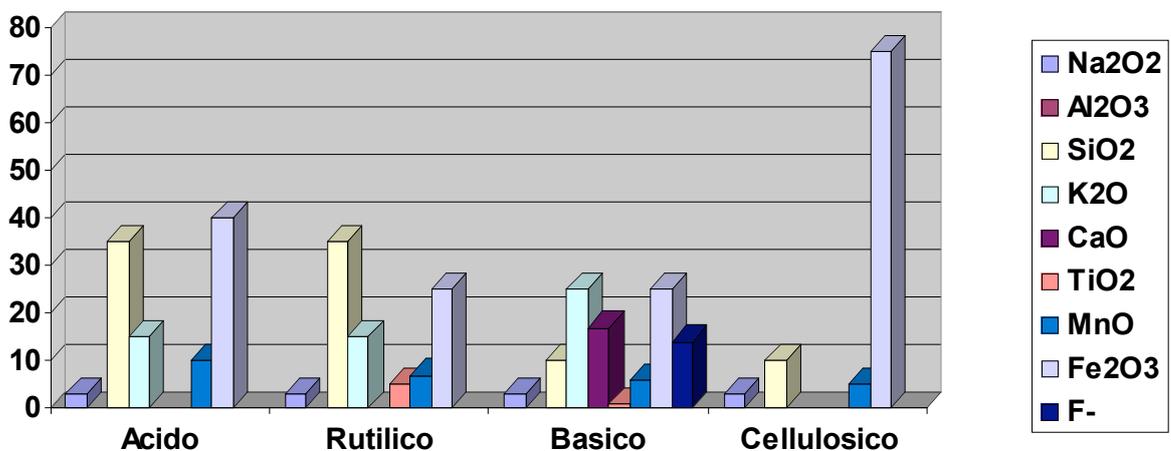


Figura 27 – Analisi delle emissioni per tipologia di rivestimento (saldatura SMAW)

4.2.2 Acciai inossidabili al Cr - Ni (Cr ≥ 20%, Ni ≤ 30%)

Oltre al contenuto in ferro e al rivestimento questi elettrodi per saldatura di acciai altolegati contengono intorno al 20% di cromo e fino al 30 % di Ni nell'anima metallica.

Durante la saldatura in arco manuale con elettrodi altolegati si generano fumi di saldatura la cui composizione chimica può contenere fino al 16% di composti di Cr. Di tali composti i cromati rappresentano fino al 90% (composti cromo esavalente), classificati nella maggior parte dei casi come cancerogeni.

Gli ossidi di nickel possono variare dall'1 al 3%.

Per la saldatura in arco manuale con questi materiali il primo componente chiave è il cromato, il secondo è sicuramente la polvere totale. In particolare, il fumo sprigionato da un rivestimento basico contiene proporzioni molto maggiori di cromo esavalente rispetto a quello del rivestimento rutilico.

L'esame di fluidi biologici e numerosi studi epidemiologici hanno evidenziato che la saldatura in arco manuale di acciai inossidabili rappresenta il maggiore rischio per i saldatori. Devono pertanto essere previste specifiche misure protettive sul posto di lavoro, come il prelievo dei fumi immediatamente alla fonte. Sono inoltre opportune visite mediche preventive particolarmente mirate.

Il risultato di numerose misurazioni effettuate durante la saldatura in arco manuale con elettrodi di acciai altolegati ha permesso di valutare un valore tipico di emissione di polvere totale tra 2 e 16mg/s.

4.2.3 Nickel e leghe base nickel (Ni > 30%)

Nella saldatura ad elettrodo di nickel puro o leghe base nickel il primo componente chiave è l'ossido di nickel sebbene la percentuale di tale ossido nei fumi di saldatura non superi il 5%. Gli ossidi di nickel sono però classificati come cancerogeni in classe 1 e richiedono pertanto l'adozione di specifiche misure protettive sul posto di lavoro.

Oltre all'ossido di nickel occorre considerare come secondo componente la polvere totale e, in certi casi, l'ossido di rame. Nel caso dell'overlaying con elettrodi rivestiti (esecuzione di riporti di placcatura) contenenti cobalto occorre inoltre considerare opportunamente la formazione di ossido di cobalto (CoO).

Il risultato di numerose misurazioni effettuate durante la saldatura in arco manuale con elettrodi di leghe di nichel ha permesso di valutare un valore tipico di emissione di polvere totale tipica di circa 7 mg/s.

4.3 Saldatura con protezione gassosa

Nei processi con protezione di gas o miscele attive si producono significative quantità di sostanze pericolose sotto forma di fumi di saldatura. La quantità di tali sostanze è dello stesso ordine di grandezza del processo con elettrodi rivestiti.

Per contro, le quantità prodotte con l'uso di gas o miscele inerti è notevolmente inferiore.

Oltre alla polvere totale, considerata il primo componente chiave, possono esservi altri componenti in forma gassosa o particellare in funzione del materiale d'apporto e del gas di protezione impiegato.

Si noti inoltre che i parametri di saldatura influenzano in modo estremamente significativo l'emissione di fumi, perciò risulta particolarmente importante per questo processo l'ottimizzazione di tali parametri e la qualificazione degli operatori, misure da considerarsi fondamentali per la riduzione dell'esposizione alla fonte.

4.3.1 Saldatura con protezione gassosa (MIG/MAG): influenza del gas di protezione impiegato nella generazione di fumi

Nel caso della saldatura *con protezione attiva di anidride carbonica (CO₂) di acciai non legati o bassolegati* il monossido di carbonio diviene il componente chiave; esso è generato per dissociazione dell'anidride carbonica usata come gas protettivo. I fumi di saldatura sono qui composti per lo più da ossidi di ferro.

Le emissioni per la polvere totale ed il monossido di carbonio di tabella 5 sono il

risultato di misure condotte durante la saldatura di acciai non legati o bassolegati in protezione gassosa attiva:

Nella *saldatura con miscele di gas attive* di acciai non legati o debolmente legati rimane fondamentale la presenza di monossido di carbonio se l'anidride carbonica è tra i costituenti della miscela. I fumi di saldatura sono composti soprattutto da ossidi di ferro.

Nel caso della saldatura di acciai inossidabili al Cr - Ni l'ossido di Ni deve essere considerato un ulteriore possibile componente chiave. I fumi possono contenere infatti fino al 17% di composti di Cr e fino al 5% di ossidi di Ni; i composti di Cr sono esclusivamente in forma di Cr trivalente, non considerato cancerogeno.

Per la *saldatura con protezione gassosa inerte (MIG) di leghe base alluminio* la formazione di ozono (derivante dalla riflessione dei raggi UV sulle superfici estremamente riflettenti) deve essere

Sostanza pericolosa	Emissioni (mg/s)
Polvere totale	2-12
Monossido di carbonio	2-12,5

Tabella 5 - Emissioni per processo MIG/MAG (acciai non legati)

opportunamente valutata oltre alla polvere totale (nella forma di allumina, biossido di alluminio). Nella maggioranza dei casi lo sviluppo di fumi è inferiore al caso del MAG.

Le concentrazioni di ozono con le leghe alluminio – silicio sono maggiori rispetto al caso del puro alluminio e considerevolmente superiori a quello delle leghe alluminio - magnesio.

Nel caso della *saldatura MIG su leghe base nickel* l'ossido di nickel diviene evidentemente il componente chiave principale. A causa dell'elevato tenore di nickel nel materiale d'apporto la percentuale di nickel nei fumi di saldatura può avere valori variabili tra il 30 e l'87%.

Le emissioni per la polvere totale e per l'ossido di nickel di tabella 6 sono il risultato di misure condotte durante la saldatura di nickel o leghe di nickel con processo MIG:

Alcune leghe di nickel contenenti rame possono dar luogo ad emissioni superiori di polvere totale rispetto alla leghe base nickel con altri elementi di lega quali Cr, Co e Mo. L'ossido di rame deve essere in questo caso un componente chiave oltre all'ossido di nickel.

Devono essere adottate le misure protettive specifiche per sostanze cancerogene e devono essere previste opportune misurazioni delle concentrazioni di ozono.

Sostanza pericolosa	Emissioni (mg/s)
Polvere totale	2-6
Ossido di nickel	Fino a 5

Tabella 6 - Emissioni per processo processo MIG (nickel e sue leghe)

4.3.2 Saldatura con protezione gassosa (MIG/MAG): influenza della tipologia di filo nella generazione di fumi.

La quantità di fumi emessi nella saldatura con filo animato dipende in modo significativo dalla tipologia di filo impiegato, per cui è particolarmente difficile presentare valori di emissione di riferimento; nel caso particolare di fili di tipo Self Shielded (per saldatura senza protezione di gas, generalmente svolta all'aperto) sono prodotte quantità di fumi notevolmente superiori rispetto a quella con fili pieni (fino a 97 mg/s, nella saldatura di acciai non legati).

In generale, l'anima dei fili animati contiene componenti analoghi al rivestimento dei corrispondenti elettrodi.

4.4 Saldatura con elettrodo infusibile (TIG)

Nel caso della saldatura TIG la formazione di ozono è favorita dalle basse emissioni di fumi. Nel caso dell'alluminio ed ancora di più delle leghe alluminio - silicio i valori di ozono risultano particolarmente alti; se invece si considera il caso della saldatura di nickel o leghe ad alto nickel gli ossidi di nickel divengono il componente chiave principale.

L'uso di elettrodi toriati (addizionati con ossidi di torio) nella saldatura TIG, in particolare nella saldatura dell'alluminio, può determinare esposizione interna a radiazioni ionizzanti in seguito all'inalazione di fumi contenenti ossido di torio: in genere vengono superati i limiti relativi alle dosi per persone non professionalmente esposte, per cui è preferibile adottare specifiche misure preventive (in particolare, l'uso di elettrodi *thorium – free*, quindi ceriati o lantaniati).

4.5 Saldatura a resistenza

Nella saldatura a resistenza con materiali dissimili le concentrazioni di fumi di saldatura (ossidi metallici derivanti da impurezze o dall'evaporazione del materiale) generate durante le lavorazioni sono di norma inferiori ai rispettivi limiti di riferimento per le sostanze considerate.

Occorrerebbe evitare la saldatura di lamiere unte o grasse che determinano maggiori concentrazioni, con presenza anche di sostanze organiche. Si è verificato sperimentalmente che la saldatura di lamiere unte o grasse comporta un aumento di circa il 30% dei fumi sviluppati.

4.6 Saldatura LASER

L'elevata energia della sorgente laser produce una certa evaporazione del materiale base che comporta emissione di sostanze pericolose (fumi), la cui composizione chimica rispecchia quella del materiale base. La quantità di sostanze pericolose sviluppate nella saldatura laser senza materiale d'apporto è confrontabile con quella relativa al processo MAG. Ad esempio, la saldatura laser di acciai inossidabili al Cr - Ni produce emissioni di polvere totale tra 1,2 e 2 mg/s.

Le maggiori emissioni di sostanze pericolose sono tipiche degli acciai zincati, essendo i fumi sviluppati soprattutto dal rivestimento.

Le emissioni di sostanze pericolose in mg/s sono comunque di norma limitate impiegando parametri di saldatura ottimali sia nel caso dei laser allo stato solido (YAG) che in quello dei laser CO₂.

4.7 Taglio termico

Questo gruppo di processi comprende l'ossitaglio, il taglio plasma ed il taglio laser. La composizione chimica del materiale base determina la composizione chimica delle particelle aerodisperse (polvere fine e fumi), il cui diametro è maggiore di quello dei fumi di saldatura ma comunque per lo più respirabile.

Nel caso specifico *dell'ossitaglio* (che si ricorda è eseguibile solamente su acciai non legati, o, al limite, bassolegati), oltre alla polvere totale (il componente chiave principale in questo processo) deve essere anche considerata la produzione di gas d'azoto, essendo quindi il biossido d'azoto il secondo componente principale.

Il *taglio plasma*, invece, è accompagnato generalmente da una significativa emissione di particelle aerodisperse. Le sostanze pericolose emesse dipendono principalmente dalla composizione chimica del materiale base, dai parametri di taglio impiegati e dal tipo di gas; la polvere totale è il componente chiave nel caso degli acciai non legati o di quelli debolmente legati (con particolare riferimento agli ossidi di ferro); nel taglio plasma di acciai al Cr - Ni sono invece componenti chiave gli ossidi di nickel ed i composti di cromo esavalente; le leghe di nickel ed il nickel stesso, infine, producono analogamente elevate quantità di ossidi di nickel nella polvere totale. Oltre alla polvere totale, l'ozono può essere il secondo componente chiave per il taglio di materiali a base di alluminio fortemente riflettenti (per esempio: le leghe alluminio silicio).

Il *taglio laser* genera quantità di polveri relativamente abbondanti per quanto inferiori al caso dell'ossitaglio o del taglio plasma. Le maggiori emissioni si registrano nel caso di taglio di acciai inossidabili al cromo - nickel. Il taglio di acciai zincati genera emissioni superiori rispetto al taglio di acciai non legati. In ogni caso risulta difficile generalizzare, considerando le possibili varianti del processo, riferite al tipo di sorgente impiegata (laser gas o allo stato solido), al tipo di gas impiegato (Inerte, azoto, ossigeno e, più raramente, aria compressa).

5 Criteri addizionali per la gestione dei rischi in saldatura

L'insieme delle situazioni di rischio potenziali in saldatura risulta particolarmente complesso, essendo fortemente legato alle differenti tecnologie produttive in uso, ai vari materiali utilizzati, alla possibilità di svolgere queste attività in cantiere o in officina. A ciò si aggiunga che un'analisi esaustiva del problema non può trascurare tutte le attività complementari, per delineare in modo completo le problematiche della fabbricazione mediante saldatura.

Numerosi modelli e riferimenti per la gestione dei rischi sono disponibili sia a livello legislativo, sia normativo; essi sono di carattere generale, applicabili quindi ad ogni tipo di attività industriale e quindi privi di riferimenti specifici e concreti alle attività di saldatura.

Per questo motivo la “*Federazione europea della saldatura*” (EWF³ – European Federation for Welding, joining and cutting”) ha sostenuto le attività del gruppo di lavoro “Quality, Environment, Health and Safety in Welding Fabrication” verso la produzione di una linea guida per i fabbricanti di prodotti saldati che tenga in particolare considerazione tutte le specificità della fabbricazione di un prodotto saldato. Tale linea guida prende il nome di EWF Safety Management Scheme (EWF SMS), ed è basata sui seguenti elementi essenziali:

- Messa a punto dei processi produttivi allo scopo di ottimizzarne l’efficacia, sia dal punto di vista produttivo che della salute e sicurezza;
- esecuzione di un’analisi dei rischi con la messa a punto di opportune azioni correttive;
- definizione del ruolo di un coordinatore della sicurezza per la saldatura, adeguatamente qualificato e coadiuvato dal responsabile della qualità per la saldatura;
- opportuna qualificazione ed addestramento di tutto il personale coinvolto nelle operazioni di saldatura e nelle attività ad esse correlate.

Il documento costituisce dunque una sorta di guida, comprensiva di check list, diagrammi di flusso e tabelle che guidano il fabbricante nella opportuna gestione degli aspetti inerenti la sicurezza, senza tuttavia provocare appesantimenti del sistema produttivo.

6 Conclusioni

L’analisi dei principali agenti di rischio connessi con le operazioni di saldatura, fornisce risultati tutto sommato confortanti, mostrando che un adeguato comportamento nei confronti delle problematiche di sicurezza, sia a livello tecnico che gestionale, garantisce confidenza che i rischi per la salute in saldatura possano essere opportunamente tenuti sotto controllo. E’ comunque importante sottolineare che la salvaguardia della salute in saldatura non può prescindere dall’uso di opportuni dispositivi di protezione generale ed individuale, che richiedono pertanto competenza per la scelta e conoscenza per l’uso.

Ciò pone in evidenza, ancora una volta, il ruolo fondamentale ricoperto dalla formazione dei responsabili della sicurezza, degli addetti di reparti produttivi e, non ultimo, dei singoli lavoratori, che devono essere adeguatamente a conoscenza dei rischi che corrono, delle pratiche per minimizzarli e dell’uso dei dispositivi di protezione individuale.

7 Principali riferimenti bibliografici

- [1] UNI EN 481 “Atmosfera nell’ambiente di lavoro - Definizione delle frazioni granulometriche per la misurazione delle particelle aerodisperse”, 1994
- [2] Proceedings of the Gas Metal Arc Welding for the 21th Century Conference; Orlando, FL, December 2000. P.F.Mendez, N.T.Jenkins, T.W.Eagar.
- [3] Sicurezza e prevenzione degli infortuni in saldatura, Istituto italiano della Saldatura (Istituto Italiano della Saldatura, 1999).
- [4] Method for sampling and characterising arc welding fumes particles, J W Sowards (Documento tecnico IIW, commissione VIII-2018-06, Vincitore premio Henri Granjon categoria D)
- [5] Studio della formazione di fumi emessi da un processo FCAW sotto protezione di CO₂, G. Liberati, P. Rouault, S. Liu (Rivista Italiana della Saldatura, n. 3, 2004)
- [6] Fume composition related to welding process and consumables, K. Brown (Documento tecnico IIW, commissione VIII-1876-99, 1999).

³ L’EWF è nata con il nome di European Council for Co-operation in Welding (ECCW) nel 1974, come associazione senza scopo di lucro fondata da 8 istituti nazionali della saldatura (tra cui l’IIS); ha cambiato nome nel 1992 in EWF (acronimo per European Welding Federation) ed è ad oggi costituita da 27 istituti dell’Europa fisica. Tra gli obiettivi dell’associazione ci sono la formulazione di linee guida per la qualificazione e la certificazione del personale, per la gestione aziendale delle attività di saldatura, la messa a punto di un sistema europeo comune per la certificazione delle aziende che si occupano di fabbricazione mediante saldatura, e la spinta verso la cooperazione internazionale nelle attività di ricerca

- [7] Ancora in tema di cancerogenicità dei fumi di saldatura, T. Valente (Rivista Italiana della Saldatura, n. 5, 2004)
- [8] Occupational health in metal arc welding , P. Hewitt (Documento tecnico IIW, commissione VIII-1817-97, 1997).
- [9] Fume information sheet on ventilation and respiratory protection for welding” Commissione VIII dell’IIW (Documenti tecnici IIW, commissione VIII n° 438-88, 1441-88, 1468-89, 1556-90, 1988-90)
- [10] Lung Cancer and Electric arc welding, GHG McMillan (Documento tecnico IIW, commissione VIII-1988-05, 2005)
- [11] IARC Evaluation of carcinogenic Risk to Humans: Chromium, Nickel and Welding, IARC (IARC Vol. 49, 1990)
- [12] A meta-analysis of epidemiologic studies of lung cancer in welders, Moulun JJ (Scand J Work Environ Health, 23(2), 1997)
- [13] Is electric arc linked to Manganism or Parkinson’s disease?, GHG McMillan (Toxical review, 24(4), 2005)
- [14] Parkinson’s disease and exposure to Manganese during welding, V-E Spiegel-Ciobanu (Welding and Cutting, 5, 2006)
- [15] Welding with non-consumable thoriated tungsten electrodes, GHG McMillan (Documento tecnico IIW, commissione VIII-1901-00, 2000).
- [16] Assessment of EMF (Electromagnetic fields) and biological effects in arc welding applications, P. Mair (Documento tecnico IIW, commissione XII – 1848-05, 2005)
- [17] Health hazards from exposure to electro-magnetic fields in welding, Commissione VIII dell’IIW (Documento tecnico IIW, commissione VIII-1858-98, 1998).
- [18] Salute e sicurezza in saldatura: panorama dello stato dell’arte in sede nazionale e internazionale, N. Panicucci (Rivista italiana della saldatura, n.4, 1996)
- [19] UNI EN 169 Protezione personale degli occhi - Filtri per la saldatura e tecniche connesse - Requisiti di trasmissione e utilizzazioni raccomandate, 2003
- [20] Contact lens use in industry (Documento tecnico IIW, commissione VIII-1298-85, 1985).
- [21] Welding adds hazards to work in confined spaces, Commissione VIII dell’IIW (Documento tecnico IIW, commissione VIII-1856-98, 1998).
- [22] Statement on welding and cutting containers, Commissione VIII dell’IIW (Documento tecnico IIW, commissione VIII-1823-97, 1997).
- [23] Interlaboratory calibration of a standardised analytical method for hexavalent and total chromium in welding fumes (Documento tecnico IIW, commissione VIII-1036-82, 1982).
- [24] Schede sui fumi sviluppati in Saldatura e tecniche affini, Commissione VIII dell’IIW (Istituto Italiano della Saldatura, 1995)
- [25] EWF safety management scheme: Guideline for manufacturers of welded products, Working group “quality, Environment Health and Safety in welding Fabrication” (Documento tecnico EWF, 00/15/October 04/EWF WG-QUA_ENV-H&S, 2004)
- [26] La Saldatura per fusione, Voll. 1 e 2, Istituto Italiano della saldatura, Hoepli, 1996.
- [27] Characterization of arc welding fume, American Welding Society, 1983;
- [28] Health and safety in welding and allied processes, Balchin N.C., Abington Publishing, 1991;
- [29] Hazardous substances in welding and allied processes, BG Arbeitsgemeinschaft der Metall - Berufsgenossenschaften, 1996;
- [30] Environmental aspects of fume in air and water, Brown K.L., Document 1804, Commission VIII of International Institute of Welding, 1997;
- [31] Emissions of fumes and nitrogen oxides from plasma cutting of stainless steel, Lillienberg L., et al., Document 1805, Commission VIII of International Institute of Welding, 1997;
- [32] Welding workplace 2000, Boekholt R., Document 1807, Commission VIII of International Institute of Welding, 1997;
- [33] Emissions generated during laser cutting and safety precautions, Haferkamp H., et al., Document 1808, Commission VIII of International Institute of Weding, 1997;

