

## Il rischio di esposizione a Radiazioni Ottiche Artificiali Inquadramento del fenomeno, misurazioni dei livelli di esposizione, scelta dei DPI idonei e misure di prevenzione e protezione nelle operazioni di saldatura

ALEX SOLDI<sup>(1)</sup>, SANDRA SERENA<sup>(1)</sup>, SIMONE FALSONI<sup>(2)</sup>, DAVIDE SCHIANTARELLI<sup>(3)</sup>,  
IOLE PINTO<sup>(4)</sup>, ANDREA BOGI<sup>(4)</sup>, NICOLA STACCHINI<sup>(4)</sup>, ALESSANDRO MERLINO<sup>(5)</sup>

<sup>(1)</sup> *Eni S.p.A. CSRO/HSEQ/SIGI/RADI*

<sup>(2)</sup> *Eni S.p.A. CSRO/HSEQ/SIGI*

<sup>(3)</sup> *SAIPEM S.p.A.*

<sup>(4)</sup> *Azienda Usl Toscana Sud Est*

<sup>(5)</sup> *CeSNIR s.r.l.*

### Introduzione

La saldatura è un processo industriale ampiamente utilizzato e, in particolare quella ad arco, rappresenta dal punto di vista dell'esposizione una delle più intense sorgenti artificiali di radiazioni ottiche (ROA). Gli effetti nocivi derivanti dall'esposizione a radiazioni ottiche generati da saldatura sono legati a due organi bersaglio: **occhio** e **cute**.

Ogni tipo di processo di saldatura è caratterizzato da un particolare spettro di emissione, tuttavia si nota in generale una prevalenza nella banda degli ultravioletti e nella banda del visibile. In questo lavoro verranno analizzate varie tipologie di saldature ad arco, per le quali corrente di utilizzo, miscela del gas dell'atmosfera protettiva e tipologia dell'elettrodo/filo utilizzato, sono alcuni fattori che possono determinarne le caratteristiche spettrali.

Tali informazioni costituiscono gli “*ingredienti base*” che permettono di procedere ad una corretta valutazione del rischio di esposizione a ROA generato dal processo di saldatura.

### 1.1 Obiettivo

I contenuti del presente articolo costituiscono l'estratto di uno Studio effettuato all'interno delle Società Eni e Saipem al fine di produrre dati mediante misurazioni in sito, riguardo l'emissione di radiazioni ottiche artificiali, in tutte le principali tipologie di saldatura in esse adottate.

L'elemento innovativo è rappresentato dalla predisposizione di uno strumento utile ai fini della valutazione del rischio ROA nell'ambito delle “attività di cantiere” che permette di quantificare l'esposizione dei soggetti terzi rispetto ai saldatori (personale che opera nell'intorno dell'area dove si svolge il processo di saldatura).

La corretta prevenzione e protezione dei saldatori, infatti, non può essere attuata che fornendo loro DPI per gli occhi e la cute, per il dimensionamento dei quali non è necessario conoscere

i livelli di esposizione dal momento che le pertinenti norme tecniche in materia forniscono un prospetto dal quale evincere la corretta graduazione degli oculari.

Per i soggetti diversi dal saldatore, la determinazione del livello di rischio e delle conseguenti misure di prevenzione e protezione, deve invece partire dal livello di esposizione alle radiazioni ottiche che è determinato dalla loro mansione (per tale ragione sono state effettuate misurazioni dirette sulle sorgenti). A tale riguardo lo Studio fornisce una “linea guida” per la scelta del corretto DPI da utilizzare (ovvero grado di protezione) in funzione della tipologia di saldatura e dello scenario espositivo riscontrabile.

## 2. Metodi

### 2.1 Scelta delle grandezze protezionistiche

Le esposizioni alle radiazioni ottiche artificiali sono da valutare separatamente nelle bande UV, visibile e infrarosso. La valutazione del rischio si compie quindi a mezzo della quantificazione delle grandezze:  $H_{\text{eff}}$ ,  $H_{\text{UVA}}$ ,  $L_B$  (o  $E_B$ ),  $L_R$ ,  $E_{\text{IR}}$ ,  $H_{\text{skin}}$ .

Viste le caratteristiche delle emissioni, le sole grandezze rilevanti sono l'irradianza efficace da UV ( $E_{\text{eff}}$ ), l'irradianza totale nella regione UVA ( $E_{\text{UVA}}$ ) e l'irradianza efficace da luce blu ( $E_B$ ). Infatti i rischi di danno termico sono solo a carico della retina, risultando trascurabile la radiazione emessa nell'infrarosso B ( $E_{\text{ir}}$ ). Tuttavia anche il danno termico retinico è tenuto sotto controllo dall'attenuazione necessaria ad evitare il danno da luce blu ( $E_B$ ).

Nella banda delle radiazioni ottiche visibili, le disposizioni di legge impongono di verificare un limite fissato per la radianza derivante dall'osservazione di una sorgente con emissione nel blu e definito dall'indice  $L_B$ . Inoltre se le dimensioni apparenti della sorgente sono tali da poterla considerare puntiforme ( $\alpha < 11$  mrad), risulta sufficiente verificare il rispetto del limite posto per l'irradianza all'organo bersaglio (la retina) da parte della medesima sorgente e definito dall'indice  $E_B$ .

### 2.2 Quadro Normativo

Le norme tecniche adottate durante la campagna di misure<sup>1</sup> sono riportate di seguito [1,2,3]

- UNI EN 14255-1 (2005-10)
- UNI EN 14255-2 (2006-02)
- UNI EN 14255-4 (2007-03)

Per il confronto con i limiti di legge, ci si è riferiti all'allegato XXXVII del D.Lgs. 81/08 e s.m.i. [Rif.4]

### 2.3 Ipotesi di base

Con riferimento alla sola esposizione dell'occhio, viene definito il tipo di esposizione ovvero se diretta o indiretta. Questo tipo di distinzione non ha senso nell'esposizione della cute.

1. Anno 2011/2012

Tipologia di Esposizione	Definizione Adottata
Diretta (intenzionale)	Esposizione che si ha quando vige la necessità di osservare direttamente la fonte della radiazione ottica artificiale per l'espletamento della propria mansione lavorativa (esposizione con fissazione della sorgente).
Indiretta (accidentale)	Esposizione che si ha quando si transita o si permane in un ambiente in cui sono diffuse radiazioni ottiche artificiali, che non devono essere osservate dal lavoratore per l'espletamento della propria mansione lavorativa, ma in cui viene inclusa un'esposizione diretta (con fissazione) accidentale di 100 secondi/die (considerata a mero obiettivo cautelativo).

**Tabella I**

Nell'ambito dello Studio oggetto del presente articolo sono state adottate le seguenti ipotesi di base:

- Esposizione a singole sorgenti → le misurazioni dei livelli espositivi sono state effettuate su singole sorgenti di radiazioni ottiche<sup>2</sup> (non considerando i punti di riflessione della radiazione).
- Tempi di esposizione → per la radiazione UV il requisito di legge da considerare è il tempo di esposizione complessivo entro l'intera giornata lavorativa, di conseguenza si assume di garantire il rispetto dei valori limite entro il tempo massimo<sup>3</sup> di:

$$\Delta t_{exp}^{UV/UV A} = 28800s$$

Per la radiazione BLU, considerato che gli effetti si producono solo nel caso di fissazione della sorgente, si assume di garantire il rispetto dei valori limite entro il tempo massimo di:

$$\Delta t_{exp}^{B,int} = 10000s$$

per gli addetti con compiti lavorativi che prevedono l'osservazione intenzionale della sorgente e che in questo articolo è definita "esposizione diretta" (intenzionale).

2. Si segnala che nei casi in cui l'esposizione giornaliera sia determinata dalla composizione di esposizioni a diversi tipi di sorgenti e con diversi livelli di emissione, all'interno dello Studio, vengono forniti due metodi (non riportati all'interno del presente articolo) per procedere alla valutazione.

Il primo metodo non richiede alcun calcolo perché suggerisce di considerare tutte le diverse esposizioni alla stessa stregua della peggiore di queste e lo si trova descritto all'interno della sezione "Procedura semplificata per la determinazione dei tempi limite e della graduazione dei DPI nel caso di esposizione a sorgenti multiple". Il secondo metodo propone invece una procedura analitica e richiede di pesare le diverse esposizioni ricorrendo all'esposizione radiante complessiva che andrà quindi calcolata caso per caso; questo secondo metodo lo si trova descritto nell'Appendice 1: "Determinazione analitica dei tempi limite e della graduazione dei DPI nel caso di esposizione a sorgenti multiple".

3. Notazione:  $A_{exp}$  = Livello di esposizione misurato della grandezza fisica A;  $A_{lim}$  = Limite di esposizione misurato della grandezza fisica A.

Per quanto riguarda gli addetti con compiti lavorativi che non prevedono l'osservazione intenzionale della sorgente (che saranno quindi formati affinché non la osservino mai) si assume, cautelativamente, che possano esservi esposizioni accidentali della retina sino a 100 s al giorno. Tale esposizione è definita in questo Articolo "esposizione indiretta" (accidentale).

$$\Delta t_{exp}^{B,acc} = 100s$$

- Legge di dispersione dell'intensità di radiazione in funzione della distanza → tenuto conto che l'arco elettrico di saldatura ha dimensioni dell'ordine di qualche millimetro di lunghezza (entro i 6 mm) e della frazione di millimetro di larghezza, alle distanze di nostro interesse (dell'ordine del metro) si può considerare una sorgente puntiforme e l'intensità della radiazione ottica da questo emessa subisce pertanto una dispersione pari all'inverso del quadrato della distanza.

Si può quindi scrivere la seguente relazione tra la grandezza radiometrica di interesse (sia questa l'irradianza o l'esposizione radiante) determinata ad una distanza  $r_1$  e il valore che questa assume ad una diversa distanza  $r_2$ :

$$A(r_2) = \frac{A(r_1)}{(r_2/r_1)^2}$$

- Calcolo fattori trasmissivi ( $\tau$ ) per la scelta della graduazione dei DPI oculari → individuato il fattore di cui deve essere attenuata la radiazione ottica affinché risulti rispettato il limite di esposizione valido per tutta la durata dell'esposizione, si può definire la graduazione del DPI ricorrendo alla norma tecnica UNI EN 169:2003 che, al *prospetto 1*, pubblica una tabella dove restituisce i fattori trasmissivi degli oculari in ogni banda di emissione al variare della graduazione.

Il fattore trasmissivo corretto nella banda dell'UV e nella sotto-banda dell'UVA si può calcolare tramite il rapporto tra il livello limite di esposizione radiante e il livello di esposizione ottenuto moltiplicando l'irradianza misurata per il tempo di esposizione corrispondente:

$$\tau_{UV} = \frac{H_{eff,lim}}{2 \cdot H_{eff,exp}} ; \tau_{UVA} = \frac{H_{UVA,lim}}{2 \cdot H_{UVA,exp}}$$

il fattore 2 al denominatore viene aggiunto come ulteriore margine di sicurezza.

Nella banda del visibile il fattore trasmissivo può invece essere calcolato tramite il rapporto tra il livello limite di irradianza definito per la durata della specifica esposizione e il livello di esposizione:

$$\tau_v = \frac{E_{B,lim}}{2 \cdot E_{B,exp}}$$

Anche in questo caso, è stato applicato un fattore pari a 2 al denominatore come ulteriore fattore di sicurezza.

## 2.4 Riepilogo procedimento analisi – misure

Si fornisce di seguito il riepilogo di quanto utilizzato per il calcolo dei tempi limite di esposizione, delle distanze di sicurezza e della graduazione dei dpi oculari pubblicati nelle schede con i risultati del progetto.

Si ricorda che quanto segue vale nell'ipotesi semplificativa per cui l'esposizione complessiva è riferita ad un'unica sorgente ad emissione costante (eventualmente con esposizioni ripetute nella giornata).

Descrizione	Banda Spettrale		
	UV	UVA	VIS (BLU)
Calcolo tempo limite in assenza di DPI in ogni situazione espositiva, per ogni banda di interesse, a partire dalle misure ottenute	$\Delta t_{lim}^{UV} = \frac{30}{E_{eff,exp}} (s)$	$\Delta t_{lim}^{UVA} = \frac{10^4}{E_{UVA,exp}} (s)$	$\Delta t_{lim}^B = \frac{100}{E_{B,exp}} (s)$
Il tempo limite complessivo di esposizione è definito come: $\Delta t_{lim}(s) = \min(\Delta t_{lim}^{UV}; \Delta t_{lim}^{UVA}; \Delta t_{lim}^B)$			
Calcolo delle distanze di sicurezza a partire dai valori di irradianza $r_1$ alla quale i valori sono stati misurati (tipicamente 1.5 m dalla sorgente)	$r_{lim}^{UV} = \sqrt{\frac{E_{eff,exp}(r_1) \cdot 28800}{30}} \cdot r_1 (m)$	$r_{lim}^{UVA} = \sqrt{\frac{E_{UVA,exp}(r_1) \cdot 28800}{10^4}} \cdot r_1 (m)$	$r_{lim}^B = \sqrt{\frac{E_{B,exp}(r_1) \cdot 100}{100}} \cdot r_1 (m)$ esposizioni accidentali (100 s)
La distanza di sicurezza complessiva è definita come: $r_{lim}(m) = \max(r_{lim}^{UV}; r_{lim}^{UVA}; r_{lim}^B)$			
La determinazione della graduazione dei DPI oculari prevede innanzitutto di calcolare i fattori di trasmissione relativi alle due righe di riferimento dell'UV (323 nm; 365 nm) e al visibile e quindi di associarvi il corrispondente numero di scala sulla base del prospetto 1 della norma UNI EN 169:2003	$\tau_{313} = \frac{30}{E_{eff,exp} \cdot 2 \cdot 28800} \leftrightarrow \#_{313}$	$\tau_{365} = \frac{10^4}{E_{UVA,exp} \cdot 2 \cdot 28800} \leftrightarrow \#_{365}$	$\tau_v^{int} = \frac{100}{E_{B,exp} \cdot 10000 \cdot 2} \leftrightarrow \#_v$ esposizioni intenzionali $\tau_v^{acc} = \frac{100}{E_{B,exp} \cdot 100 \cdot 2} \leftrightarrow \#_v$ esposizioni accidentali (100 s)
Il numero di scala complessivo è definito come: $\# = \max(\#_{313}; \#_{365}; \#_v)$			

**Tabella II**

## 3. Conclusioni

Le misurazioni sono state eseguite focalizzandosi sulle tipologie di saldature maggiormente adottate all'interno del Gruppo Eni e Saipem. Per ogni tipologia di saldatura sono stati prodotti i seguenti risultati in funzione della variazione dello specifico parametro che la caratterizza (es. corrente utilizzo, atmosfera gas protettivo, tipologia filo elettrodo) e della distanza dalla sorgente:

- Tempo limite giornaliero di esposizione senza DPI oculari.
- Tempo limite giornaliero di esposizione senza DPI per la cute.
- Graduazione DPI oculare per esposizione continuativa diretta.
- Graduazione DPI oculare per esposizione accidentale indiretta (100 s/giorno).
- Valutazione della necessità o meno di adottare il DPI per la cute.

- Distanza di sicurezza alla quale non è necessario l'utilizzo di DPI occhio/cute.

A titolo informativo si riportano i risultati ottenuti (adottabili ai fini di una valutazione delle esposizioni) nel caso di una saldatura GTAW al variare della corrente.

distanza	miscela dei gas	intensità di corrente	tempo limite giornaliero senza DPI oculari	tempo limite giornaliero senza DPI per la cute	graduazione oculare esposizione continuativa diretta	graduazione oculare esposizione accidentale (100 s/g) indiretta	protezione cute necessaria
saldatore	100% Ar	10 A – 30 A	--	--	8	--	SI
		30 A – 70 A			9		SI
		70 A – 125 A			10		SI
		125 A – 200 A			11		SI
		200 A – 300 A			12		SI
		300 A – 350 A			13		SI
1.5 m	100% Ar	120 A	89 s	89 s	6	1.2	SI
	100% Ar	150 A	56 s	56 s	7	1.7	SI
	100% Ar	180 A	38 s	38 s	7	1.7	SI
3.0 m	100% Ar	120 A	102 s	102 s	5	1.2	SI
	100% Ar	150 A	96 s	96 s	6	1.2	SI
	100% Ar	180 A	15 s	15 s	6	1.2	SI
10 m	100% Ar	120 A	18.8 min	18.8 min	1.7	1.2	SI
	100% Ar	150 A	17.8 min	17.8 min	2.5	1.2	SI
	100% Ar	180 A	163 s	163 s	2.5	1.2	SI
<b>distanza di sicurezza</b>							
	100% Ar	120 A	27 m	--	--	--	NO
	100% Ar	150 A	34 m	--	--	--	NO
	100% Ar	180 A	41 m	--	--	--	NO

**Tabella III**

La varietà nei processi di saldatura osservati consente di trarre delle considerazioni in merito a quali parametri di saldatura, di ogni specifica tecnica, incidono in modo significativo sulle emissioni di radiazioni ottiche (per quanto riguarda i “range” di variabilità dei parametri di saldatura adottati all’interno del Gruppo Eni e Saipem).

Nelle tabelle che seguono si fornisce un breve quadro relativamente alle risultanze più evidenti.

<i>Tipologia di saldatura</i>	<i>Parametri e relazioni analizzate</i>		
SMAW Shielded Metal Arc Welding	<i>Rapporto tra radiazione ottica e corrente</i>	<i>Rapporto tra radiazione ottica e materiale del rivestimento dell'elettrodo</i>	<i>Rapporto tra radiazione ottica e materiale costitutivo anima elettrodo</i>
	Conferma della stretta dipendenza dell'intensità della radiazione ottica dispersa dall'arco di saldatura e la corrente di alimentazione della torcia. Si osserva inoltre che la crescita dell'irradiazione da parte dell'arco elettrico al variare della corrente è più lenta nel caso del rivestimento basilico, rispetto a quello celluloso.	L'emissione di radiazione ottica nelle bande UV e visibile è decisamente maggiore nel caso degli elettrodi con rivestimento celluloso, rispetto al caso degli elettrodi con rivestimento basilico o rutile.	Le prove condotte a parità di corrente, distanza e rivestimento, ma con elettrodi con diverso materiale dell'anima (carbon steel in un caso e duplex inox nell'altro) evidenziano che l'elettrodo con anima in duplex inox produce un arco con emissione nelle bande UV di intensità pari a circa la metà di quella generata dall'arco prodotto con l'elettrodo con anima in carbon steel (il rapporto diventa pari a 1/3 nella banda del visibile).
GMAW Gas Metal Arc Welding	<i>Rapporto tra radiazione ottica e corrente</i>		<i>Rapporto tra radiazione ottica e composizione dell'atmosfera gassosa</i>
	Conferma della stretta dipendenza dell'intensità della radiazione ottica dispersa dall'arco di saldatura e la corrente di alimentazione della torcia. Si osserva che la crescita dell'emissione con l'aumentare della corrente è più veloce nel caso di atmosfera gassosa di solo Ar rispetto al caso della miscela CO <sub>2</sub> -Ar. Nel caso di atmosfera costituita dalla miscela CO <sub>2</sub> -Ar, ad un raddoppio della corrente corrisponde un aumento dell'irradianza efficace compreso tra 3 e 4 volte. Nel caso di atmosfera costituita da solo Ar al raddoppiare della corrente l'irradianza efficace cresce di circa 7 volte.		L'emissione di radiazione ottica aumenta con l'aumentare della frazione di Ar nella miscela di gas che costituisce l'atmosfera protettiva e formata da CO <sub>2</sub> e Ar. Nel passaggio dall'atmosfera contenente la minima frazione di argon (pari al 20%) a quella contenente solo argon, l'irradianza efficace aumenta di oltre 3 volte a parità di tutti gli altri parametri, corrente di saldatura compresa.
FCAW Flux Cored Arc Welding	<i>Rapporto tra radiazione ottica e corrente</i>		
	Dai rilievi effettuati si ottiene l'informazione che al raddoppio della corrente d'arco l'irradianza del target aumenta di circa 7 volte.		
GTAW Gas Tungsten Arc Welding	<i>Rapporto tra radiazione ottica e corrente</i>		
	Dai rilievi si ha il riscontro che, nel range di intensità di corrente considerato (120-180A), quando la corrente cresce di una volta e mezzo, l'irradianza del target cresce di oltre due volte.		

	<i>Rapporto tra radiazione ottica e corrente</i>	<i>Rapporto tra radiazione ottica e frequenza impulso</i>
PAW Plasma Arc Welding	La radiazione ottica rimane costante al variare della corrente di picco, mentre varia, seppur debolmente, al variare della corrente di base (ad un aumento del 50% nella corrente di base, corrisponde un aumento del 15% nell'irradianza del target).	Dai rilievi si osserva che l'irradianza del target non cresce con l'aumentare della frequenza di pulsazione.
	<i>Rapporto tra radiazione ottica e diametro dell'elettrodo</i>	
AAG Arc Air Gouging	Dai risultati si osserva che l'irradianza del target cresce di quasi tre volte nel passaggio dall'elettrodo di diametro 6 mm a quello di diametro 10 mm, a parità di intensità della corrente elettrica della torcia.	

**Tabella IV**

## BIBLIOGRAFIA

1. UNI EN 14255-1 (2005-10) "Misurazione e valutazione dell'esposizione personale a radiazioni ottiche incoerenti. Parte 1: Radiazioni ultraviolette emesse da sorgenti artificiali nei posti di lavoro".
2. UNI EN 14255-2 (2006-02) "Misurazione e valutazione dell'esposizione personale a radiazioni ottiche incoerenti. Parte 2: Radiazioni visibili e infrarosse emesse da sorgenti artificiali nei posti di lavoro".
3. UNI EN 14255-4 (2007-03) "Misurazione e valutazione dell'esposizione personale a radiazioni ottiche incoerenti. Parte 4: Terminologia ed grandezze utilizzate per le misurazioni delle esposizioni a radiazioni UV, visibili e IR"
4. Decreto Legislativo 9 aprile 2008, n. 81 e s.m.i.
5. ICNIRP "Limits of exposure to incoherent visible and infrared radiation", Health Physics, 1 (105), 2007
6. Li, P.J., Zhang, Y.M. "Analysis of an arc light mechanism and its application in sensing of the GTAW", process. Welding Journal 79, 2000