

Vantaggi dell'utilizzo del sistema dosimetrico OSL in caso di emergenza

Abate S., Campi F., Garlati L., Tambussi O.

Politecnico di Milano, Dipartimento di Energia, via La Masa 34, 20156 Milano
luisella.garlati@polimi.it

La dosimetria per corpo intero basata sul sistema dosimetrico OSL (Optically Stimulated Luminescence) si sta sempre più diffondendo in vari paesi. In Europa molti centri di ricerca si sono dotati di un proprio sistema dosimetrico, mentre commercialmente Landauer rappresenta il principale fornitore di tale servizio dosimetrico e del sistema stesso (dosimetri e apparecchio di lettura).

Il vantaggio di questo tipo di dosimetro consiste nella semplicità e velocità di lettura e azzeramento. Inoltre, rispetto ai dosimetri a TL, gli OSL risultano essere più stabili nel tempo, non dovendo subire cicli termici che ne alterano la struttura cristallina e di conseguenza le loro performance. Ciò permette di utilizzare, leggere e azzerare anche il singolo dosimetro e non l'intero lotto di appartenenza.

Questa caratteristica consente di utilizzare il dosimetro a OSL come un dosimetro passivo, ma col vantaggio della lettura indiretta al termine delle operazioni, proprio come per un dosimetro elettronico è possibile effettuare la lettura direttamente su display.

In questo lavoro si vogliono paragonare i vantaggi e gli svantaggi dei sistemi dosimetrici tradizionali (film-badge e TLD) con il sistema OSL. Si presentano i risultati sperimentali delle performance (dipendenza energetica, dosimetrica e angolare) del sistema dosimetrico OSL Inlight con sistema di lettura MicroStar. Infine si mostrano i risultati degli irraggiamenti condotti in parallelo presso un centro LAT tra il sistema OSL e i dosimetri elettronici DMC 2000 GN (Mirion Technologies).

Le caratteristiche di questo dosimetro permettono di concludere che questo tipo di sistema dosimetrico presenta aspetti positivi per il suo utilizzo in caso di emergenza radiologica senza i costi di una dosimetria basata su strumentazione attiva.

INTRODUZIONE

Negli ultimi due decenni ai tradizionali sistemi dosimetrici (film badge e TLD) si è affiancato sempre più l'utilizzo dei dosimetri luminescenti stimolati otticamente (OSL), sebbene come tecnica sia nota fin dagli anni '70 (Yukihara E., 2014). Come per i TLD, si ha la presenza del fenomeno della luminescenza per cui un materiale cristallino semiconduttore immagazzina energia quando sottoposto a irraggiamento e la rilascia sotto forma di fotoni quando viene stimolato da una fonte esterna di calore (termoluminescenza) o di luce di opportuna lunghezza d'onda (stimolazione ottica).

La diffusione di questa tecnica a fini dosimetrici su larga scala è legata alla sintesi di alcuni materiali con opportune caratteristiche. In particolare solo con l'introduzione negli anni '90 dell'ossido di alluminio drogato con carbonio ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$) si è avuta la diffusione di questa tecnica dosimetrica. Le caratteristiche di questo materiale sono: basso Z effettivo ($Z_{\text{eff}}=11.3$) anche se non tessuto equivalente, stabilità delle trappole dominanti a temperatura ambiente, elevata sensibilità alla luce e un'alta concentrazione di trappole con caratteristiche simili. Attualmente questo materiale rappresenta il riferimento OSL per molte applicazioni, sebbene sia in aumento l'utilizzo dell'ossido di berillio (BeO), già utilizzato come TLD, avendo un Z effettivo più simile a quello del tessuto e dell'acqua ($Z_{\text{eff}} = 7.2$ contro 7.5 dell'acqua), un'alta sensibilità alla radiazione ionizzante e una risposta lineare su sei ordini di grandezza (dose minima rilevabile 0.02 mGy).

La caratteristica principale della tecnica OSL è la sua semplicità, attribuibile a tre fattori: a) OSL è simile a TL; b) è una tecnica completamente ottica; c) la lettura degli OSL è semplice, economica e a basso consumo energetico.

Eliminando il riscaldamento, si possono evitare effetti di quenching termico e si possono prevenire variazioni nella struttura dei difetti dovute alla stimolazione termica.

L'alta sensibilità degli OSL porta a dei vantaggi legati alla lettura multipla del dosimetro, dal momento che non sempre è necessario stimolare tutte le cariche intrappolate al fine di avere un segnale luminescente sufficiente alla determinazione della dose. La lettura multipla può migliorare l'accuratezza del risultato o può essere utilizzata per verifiche future. Il dosimetro pertanto può essere riletto più volte, fino a quando non viene effettuato un ciclo di azzeramento.

I tempi di lettura e azzeramento sono molto brevi: la lettura richiede circa 1 – 2 minuti, mentre l'azzeramento 20 - 30 secondi. A tutti gli effetti un dosimetro potrebbe essere letto e azzerato quotidianamente, se l'attività lavorativa comportasse dosi significative nel corso della giornata. Va evidenziato però che lo svuotamento delle trappole non è totale, quindi resta una dose residua (compresa tra 0.130 e 0.160 mSv), che va a influenzare la minima dose rivelabile.

La rilettura del dosimetro può essere molto vantaggiosa per alcuni impieghi di questo sistema, poiché lo colloca a metà via tra il tradizionale dosimetro passivo e il dosimetro elettronico, sicuramente più pratico, più affidabile e più sensibile alle basse dosi, ma con costi decisamente più elevati. Spesso nelle realtà lavorative si hanno a disposizione solo un numero limitato di dispositivi elettronici, mentre tutti i lavoratori esposti sono dotati di dosimetri passivi. Per esempio, nel caso dell'incidente di Fukushima durante il mese di marzo 2011, avendo a disposizione un numero limitato di dosimetri elettronici, questi sono stati assegnati uno per team di lavoro (Etherington G., 2015).

Come sistema dosimetrico, esistono sistemi commerciali (per esempio InLight della Landauer Inc.) e sistemi propri sviluppati presso centri di ricerca o laboratori. La loro diffusione e le performance sono evidenziate anche dai risultati degli interconfronti Eurados per dosimetri a corpo intero (Eurados, 2016).

In generale le principali caratteristiche di questi dosimetri sono: bassa dipendenza energetica per fotoni ed elettroni ad alta energia, mentre si ha una dipendenza energetica per fotoni relativi a fasci di diagnostica; risposta lineare fino a circa 2 Gy, seguita da una zona di sovrilinearità fino alla zona di saturazione a 100 Gy; indipendenza dal rateo di dose; indipendenza angolare per fasci di fotoni ad alta energia, mentre è maggiore per fasci di diagnostica (fino al 70% nel caso della mammografia a causa della bassa energia dei raggi X). Per quanto riguarda il fading, si ha una perdita di segnale nei primi 10 -15 minuti dopo l'irraggiamento, probabilmente legata alle trappole superficiali; trascorso questo tempo il segnale si mantiene circa stabile (si ha la perdita dell'1% del segnale ogni tre mesi).

MATERIALI E METODI

In questo lavoro si è utilizzato il sistema MicroStar® coi dosimetri InLight® della Landauer (Landauer, 2016). Una prima fase di irraggiamenti è servita a testare alcune caratteristiche del sistema dosimetro - lettore. Una seconda serie di irraggiamenti ha messo a confronto la risposta del sistema OSL con quella dei dosimetri elettronici DMC 2000 GN (Mirion, 2016). Tutti gli irraggiamenti sono stati condotti presso il Centro di Taratura LAT n. 104 – Settore Radiazioni Ionizzanti del Politecnico di Milano, utilizzando i fasci descritti nella norma ISO 4037-1 e con le modalità previste dalla norma ISO 4037-3.

SISTEMA MICROSTAR® PACK CON DOSIMETRI INLIGHT®

Il sistema MicroStar® Pack si compone del lettore portatile MicroStar®, del PC portatile associato, del lettore dei codici a barre e del sistema di azzeramento (fig. 1). Tutto il sistema ha dimensioni tali da essere alloggiato su una singola scrivania.

Il lettore permette la lettura sia delle card del dosimetro InLight®, sia dei nanoDot™. Il dosimetro InLight risulta composto da un holder e una card, dove è alloggiata una slitta con 4 elementi OSL e un case con altrettante filtrazioni (finestra e filtri di plastica, alluminio e rame). Questo dosimetro registra la dose dovuta a radiazione gamma, X e beta, in termini sia di $H_p(10)$, sia di $H_p(0.07)$. Ognuna di queste componenti ha riportato sul supporto plastico il codice identificativo dell'elemento OSL, così da permetterne l'identificazione automatica. La slitta viene sfilata dal case direttamente nel lettore, minimizzando la possibilità di scambiare i vari elementi di diversi dosimetri. Il produttore indica per questi dosimetri un range di utilizzo da 0.05 mGy fino a 10 Gy per fotoni di energia maggiore di 5 keV e per elettroni di energia maggiore di 150 keV (Bøtter-Jensen L., 2003).

Il dosimetro nanoDot™ è composto da un unico elemento OSL (diametro 4 mm) incapsulato in una struttura plastica identificata da un proprio codice alfanumerico. In genere è utilizzato per i controlli in radioterapia o per la verifica dei livelli di riferimento in radiodiagnostica.

Figura 1: Il sistema MicroStar® pack



Per la produzione degli elementi OSL, Landauer utilizza una forma di polvere di ossido di alluminio che è stata modificata in fase di produzione aggiungendo del carbonio: i cristalli di ossido di alluminio sono scaldati, si aggiunge il carbonio come drogante, il prodotto viene ricristallizzato e poi ridotto a polvere fine. Per aumentarne la stabilità questa polvere viene incorporata in una matrice liquida epossidica e poi depositata tra due fogli di plastica al fine di formare un rotolo di materiale OSL. A questo rotolo viene assegnato un fattore di sensibilità in base alle letture effettuate su tutta la sua lunghezza: i singoli elementi OSL ricavati da questo rotolo saranno caratterizzati da questo fattore di sensibilità. Questo fattore di sensibilità viene riportato nel codice alfanumerico che caratterizza il singolo dosimetro. Ovviamente i 4 elementi del dosimetro InLight appartengono allo stesso rotolo.

Questa caratteristica permette di considerare ogni dosimetro a sé, senza più la necessità di mantenere i dosimetri legati al lotto di produzione, come succede per le pellicole fotografiche o per i chip di TL (sia per la caratterizzazione, sia per la lettura). Inoltre non è più necessario avere dosimetri irraggiati a dose nota appartenenti ad ogni lotto e per ogni sessione di lettura, ma basta avere un set di dosimetri per la taratura del lettore (da effettuare almeno una volta all'anno) e un set di dosimetri per i controlli di qualità.

IRRAGGIAMENTI EFFETTUATI

Ai fini di valutare l'utilizzo in campo dei dosimetri InLight, sono stati effettuati alcuni irraggiamenti mirati a mettere in luce i punti deboli del dosimetro e alcuni irraggiamenti in doppio per paragonare le performance del dosimetro passivo rispetto a quello elettronico.

Per quanto riguarda il primo punto, sono stati effettuati una serie di irraggiamenti alla stessa dose con tutti i fasci W (wide-spectrum) a disposizione del centro LAT (ISO 4037-1, 1996). La scelta di utilizzare i fasci X è stata dettata anche dall'interesse di indagare le performance dell'algoritmo di lettura per irraggiamenti con radiazione nell'intervallo energetico in cui si ha la dipendenza della risposta dei dosimetri dall'energia incidente.

Per poter irraggiare il maggior numero di dosimetri nella stessa sessione, le singole card non sono state inserite nell'holder, ma utilizzate tal quali. In questo modo si sono potuti irraggiare contemporaneamente otto card inserite in una busta appoggiata sul fantoccio ad acqua (water slab phantom). La dose di riferimento impartita è di circa 1 mSv in termini di $H_p(10)$.

I tempi di ritardo della lettura rispetto al momento dell'irraggiamento sono stati: 2, 5, 10, 15, 30, 45 e 60 minuti. In questo modo si è potuto studiare anche il tempo minimo da far trascorre tra un irraggiamento e una lettura affidabile.

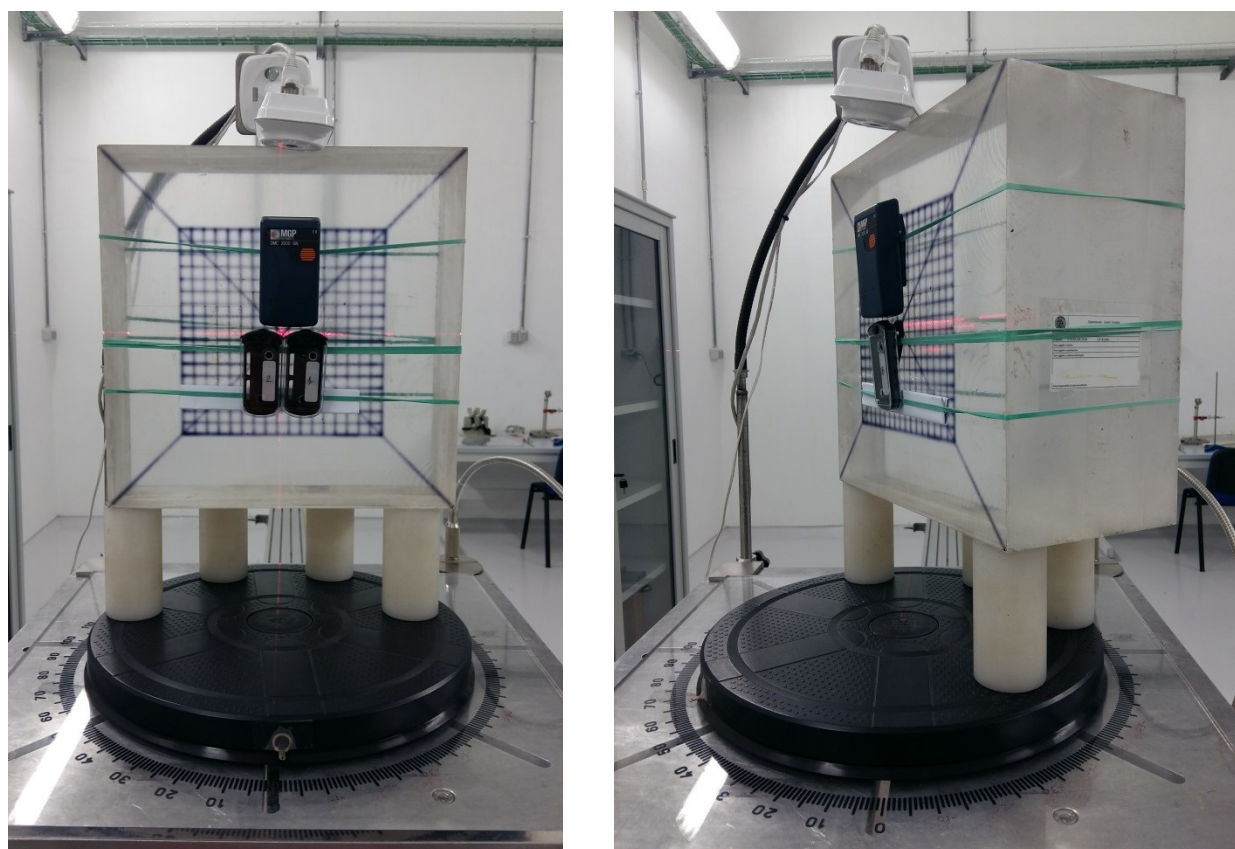
La seconda serie di irraggiamenti è stata condotta in parallelo tra uno o due dosimetri InLight completi (cioè holder + card) e un dosimetro DMC 2000 GN appoggiati al solid slab phantom e utilizzando il fascio gamma da Cs-137 (fig. 2). In questo caso si sono condotti irraggiamenti a dosi diverse e ad angoli differenti, secondo lo schema riportato nella seguente tabella (tab. 1). Le letture sono state effettuate a partire dal giorno successivo all'irraggiamento.

Tabella 1: Schema degli irraggiamenti condotti

	25 μ Sv	50 μ Sv	150 μ Sv	0.5 mSv	1 mSv	4 mSv
0°	x		x	x	x	x
30°	x		x		x	
45°	x	x	x		x	
60°	x		x		x	

Nelle colonne sono riportati i valori di dose di riferimento degli irraggiamenti; nelle righe sono indicati con x gli irraggiamenti effettuati al corrispondente angolo di riferimento.

Figura 2: Set up dei dosimetri durante gli irraggiamenti in doppio su fantoccio e ad angoli differenti



Per gli irraggiamenti frontali è stato possibile utilizzare due dosimetri InLight (foto a sinistra), mentre per gli irraggiamenti ad angoli diversi da 0° si è potuto utilizzare solo un dosimetro posizionato sotto il dosimetro elettronico (foto a destra).

RISULTATI

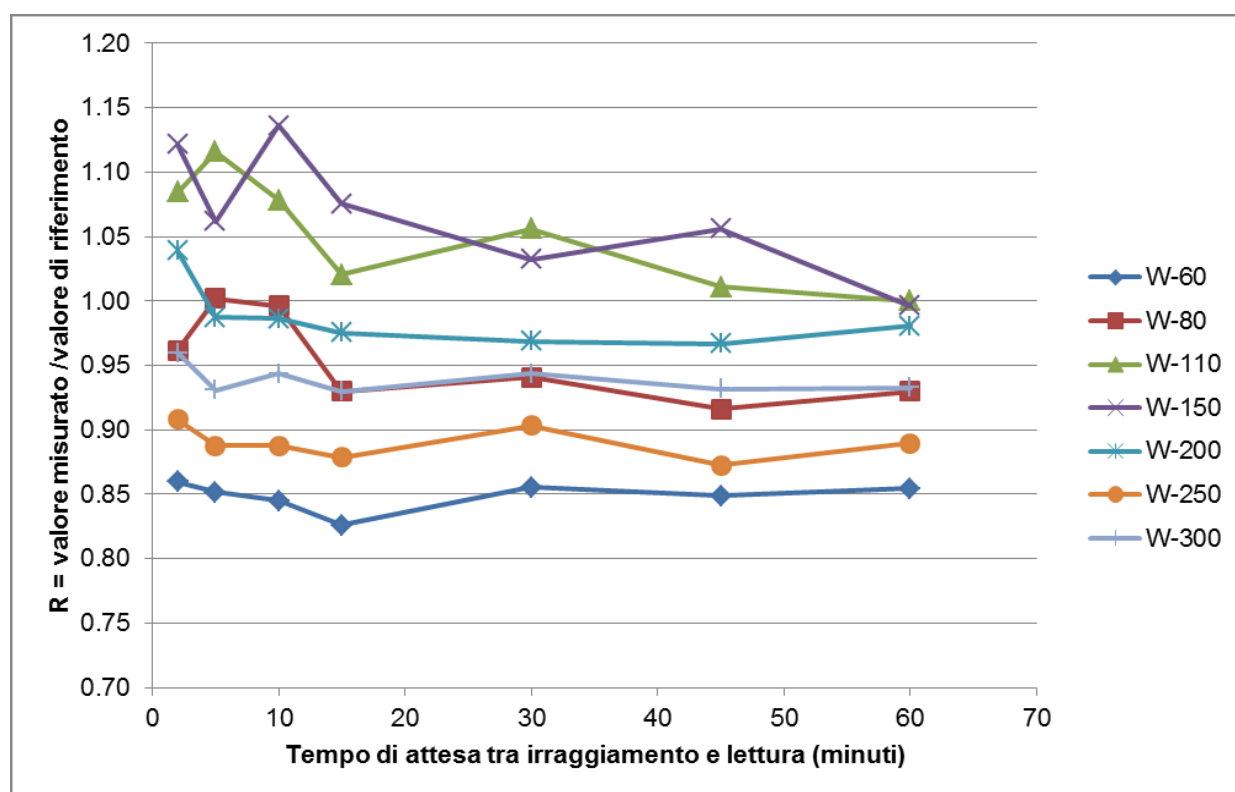
Nella seguente tabella (tab. 2) si riportano i dati relativi alle letture delle card dei dosimetri InLigh: le letture sono divise per fascio d'irraggiamento e in funzione del tempo di attesa tra irraggiamento e lettura. In fig. 3 si riporta il valore del rapporto tra la dose sperimentale e quella di riferimento per i singoli fasci di irraggiamento e in funzione del tempo di lettura.

Tabella 2: Risposta dei dosimetri OSL in funzione dell'energia del fascio d'irraggiamento e del tempo t di ritardo della lettura dall'irraggiamento.

Fascio	En media del fascio (keV)	Dose di riferimento Hp(10) (mSv)	Dose registrata dopo un ritardo temporale di t minuti (mSv)						
			2	5	10	15	30	45	60
W-60	44.5	1.018	0.860	0.852	0.845	0.826	0.856	0.849	0.855
W-80	56.3	1.015	0.962	1.002	0.996	0.930	0.941	0.916	0.930
W-110	78.5	1.019	1.084	1.116	1.079	1.021	1.056	1.011	1.000
W-150	104	1.022	1.121	1.062	1.136	1.075	1.032	1.056	0.996
W-200	136.4	1.024	1.039	0.987	0.986	0.976	0.969	0.967	0.980
W-250	171.7	1.013	0.908	0.887	0.887	0.879	0.903	0.873	0.889
W-300	199	1.012	0.959	0.931	0.944	0.930	0.944	0.932	0.933

La dose registrata è il valore medio degli 8 dosimetri irraggiati contemporaneamente; la deviazione standard della media delle varie letture varia da un minimo di 1.3% a un massimo di 14.0%.

Figura 3: Andamento del rapporto tra valore misurato e valore di riferimento in funzione del ritardo temporale nella lettura per i vari fasci di radiazione X utilizzati per gli irraggiamenti.



Questi dati confermano che nei primi 10-15 minuti la risposta non è stabile e in genere sovrastimata. Da questi dati non è possibile stabilire se la risposta relativa varia in funzione

dell'energia, dal momento che l'algoritmo di calcolo della dose si basa su irraggiamenti effettuati sul dosimetro completo (card + holder), mentre in questo caso si è utilizzata solo la card. Comunque la sovrastima nei primi minuti dopo l'irraggiamento non è così elevata: si mantiene per tutti i fasci all'interno del 15%.

I risultati degli irraggiamenti in doppio sono riportati nelle tab. 3, 4, 5 e 6, suddivisi per angolo di irraggiamento. Le dosi misurate coi due metodi sono paragonabili a partire da 0.5 mSv, anche ad angoli differenti. Ulteriori irraggiamenti a dosi comprese tra 0.2 e 0.5 mSv potrebbero dare indicazioni migliori sulla minima dose affidabile. Per valori di dose inferiori a 0.2 mSv, le performance degli OSL sono ben peggiori dei dosimetri elettronici: in questo intervallo c'è la forte influenza dello "zero" dei dosimetri, dello stesso ordine di grandezza della dose misurata.

Tabella 3: Risultati per l'irraggiamento con Cs-137 in doppio a 0° di angolo d'incidenza

Dose di riferimento (mSv)	Dose misurata con OSL (mSv)	Scarto tipo	Dose misurata con DMC (mSv)	Scarto tipo
0.025	0.120	375%	0.025	-1%
0.025	0.120	375%		
0.153	0.210	37%	0.164	7%
0.153	0.200	31%		
0.502	0.480	-4%	0.545	9%
0.502	0.530	6%		
1.001	0.960	-4%	1.081	8%
1.001	0.950	-5%		
4.003	3.670	-8%	4.33	8%
4.003	3.600	-10%		

Tabella 4: Risultati per l'irraggiamento con Cs-137 in doppio a 30° di angolo d'incidenza

Dose di riferimento (mSv)	Dose misurata con OSL (mSv)	Scarto tipo	Dose misura con DMC (mSv)	Scarto tipo
0.025	0.100	295%	0.025	-1%
0.153	0.220	44%	0.169	10%
1.003	1.030	3%	1.094	9%

Tabella 5: Risultati per l'irraggiamento con Cs-137 in doppio a 45° di angolo d'incidenza

Dose di riferimento (mSv)	Dose misurata con OSL (mSv)	Scarto tipo	Dose misura con DMC (mSv)	Scarto tipo
0.025	0.120	375%	0.026	3%
0.050	0.130	162%	0.053	7%
0.152	0.220	44%	0.17	11%
1.001	1.120	12%	1.106	10%

Tabella 6: Risultati per l'irraggiamento con Cs-137 in doppio a 60° di angolo d'incidenza

Dose di riferimento (mSv)	Dose misurata con OSL (mSv)	Scarto tipo	Dose misura con DMC (mSv)	Scarto tipo
0.025	0.110	335%	0.026	3%
0.154	0.230	50%	0.171	11%
1.002	0.970	-3%	1.12	12%

Un primo confronto tra le performance degli OSL e i dosimetri passivi tradizionali (TLD e film badge) permette di concludere che la minima dose rivelabile con una certa affidabilità è paragonabile tra OSL e film badge, mentre è inferiore per alcuni tipi di TLD (McKeever S., 1995). A dosi molto basse (inferiori a 0.05 mSv) e per irraggiamento frontale, le performance degli OSL

sono inferiori anche a quelle dei dosimetri a film (Abate S., 2011). Certamente i vantaggi dell'utilizzo dei dosimetri OSL a differenti angoli d'irraggiamento e per dosi superiori a 0.5 mSv rispetto ai dosimetri a film sono notevoli.

CONCLUSIONI

Scopo di questo lavoro è stato presentare il sistema dosimetrico basato sui dosimetri luminescenti stimolati otticamente, presente da un paio di decenni sul mercato, ma non ancora così diffuso in Italia. Tale sistema ha dei notevoli vantaggi: il materiale di cui è costituito è stabile nel tempo; la lettura e l'azzeramento sono molto semplici, veloci e indipendenti dal lotto di appartenenza del dosimetro; è possibile ripetere la lettura in tempi successivi.

Queste caratteristiche rendono il dosimetro una valida alternativa ad un dosimetro elettronico in quelle situazioni in cui si ha un potenziale rischio (incidente), ma non un numero elevato di dosimetri elettronici a disposizione del personale. Per il fascio gamma da Cs-137 le performance dei due sistemi sono paragonabili per dosi superiori a 0.5 mSv, anche a diversi angoli d'irraggiamento. Ulteriori indagini andrebbero condotte nell'intervallo 0.2 – 0.5 mSv per stabilire la minima dose rilevabile corretta.

Irraggiamenti in doppio simili a quelli eseguiti in questo lavoro andrebbero ripetuti con i fasci X, utilizzando il dosimetro InLight completo e il DMC 2000 XB, così da conoscere le performance anche per questi fasci.

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro si colloca all'interno di un più ampio lavoro sperimentale di caratterizzazione del sistema InLight® con lettore microStar® secondo la norma IEC 62387:2012. Si ringrazia lo studente Matteo Spinelli per le letture eseguite.

BIBLIOGRAFIA

Abate S., Caresana M., Garlati L., Tambussi O., Studio della risposta dei dosimetri a film a basse dosi, Convegno Nazionale di Radioprotezione, Reggio Calabria (2011) ISBN 978-88-88648-29-3;

Bøtter-Jensen L., McKeever S., Wintle A., Optical Stimulated Luminescence Dosimetry, Elsevier (2003);

Etherington G., Jourdain J-R., Zhang W., Harrison J., Dosimetry and risks to health for Fukushima workers, Eurados Annual Meeting AM2015 (http://www.eurados.org/en/Events/Winter_schools);

EURADOS, <http://www.eurados.org/en/Events/Intercomparisons> (2016);

ISO 4037-1, X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy -- Part 1: Radiation characteristics and production methods (1996);

Landauer, <http://www.landauer.com/Dosimeters.aspx> (2016);

McKeever S., Moscovitch M., Townsend P., Thermoluminescence dosimetry materials: properties and uses, Nuclear Technology Publishing (1995);

Mirion, <https://www.mirion.com/products/dmc-2000gn-neutron-dosimeter/> (2016);

Yukihara E., McKeever S., Akselrod M., State of art: Optically stimulated luminescence dosimetry - Frontiers of future research, Radiation Measurements 71 (2014) 15-24.