

# *Fisica in Medicina*

*Periodico trimestrale di formazione,  
informazione e aggiornamento  
dell' Associazione Italiana  
di Fisica Medica*



*Supplemento al  
Numero I - 2018*



FEDERAZIONE ITALIANA RICERCHE SULLE RADIAZIONI



VIII WORKSHOP INTERDISCIPLINARE

# NUOVE PROBLEMATICHE DOSIMETRICHE IN SANITA', AMBIENTE E RICERCA

Aula Magna "Carassa-Dadda"  
Campus Bovisa - Politecnico  
Milano, 1 Dicembre 2017



**FEDERAZIONE ITALIANA RICERCHE SULLE RADIAZIONI**



## **VIII WORKSHOP INTERDISCIPLINARE FIRR**

# **NUOVE PROBLEMATICHE DOSIMETRICHE IN SANITA', AMBIENTE E RICERCA**

### **Programma**

8.15 Registrazione

8.30 Introduzione

*Donatella Tirindelli Danesi (FIRR), Raffaele De Vita (FIRR)*

#### **I Sessione**

*Moderatori: Roberto Moccaldi (AIRM), Francesco Schillirò (SIRM)*

9.15 **La problematica della dose al cristallino alla luce della nuova normativa Europea**

*Mariagabriella Pugliese (SIRR)*

9.45 **Dosimetria al cristallino protocolli operativi nelle aziende Ospedaliere**

*Sergio Salerno (SIRM)*

10.15 discussione

#### **II Sessione**

*Moderatori: Riccardo Santoni (AIRB), Orazio Schillaci (AIMN)*

10.30 **Nuovi aspetti di dosimetria in Diagnostica e Terapia Medico Nucleare**

*Massimo Salvatori (AIMN)*

11.00 **Radioterapia guidata dalle immagini; dosimetria, sistemi di acquisizione e vantaggi e svantaggi delle nuove tecnologie**

*Gianluca Ingrosso (AIRB)*

11.30 discussione

#### **III Sessione**

*Moderatori: Mauro Magnoni (AIRP), Michele Stasi (AIFM)*

11.45 **Problematiche dosimetriche in terapia adronica**

*Mario Ciocca (AIFM), Marco Schwarz (AIFM)*

## 12.15 Sistemi dosimetrici: tarature, type-testing e interconfronti

*Luisella Garlati (AIRP)*


## 12.45 Utilizzo della dosimetria nelle valutazioni del medico autorizzato

*Giuseppe Taino (AIRM)*

13.15 discussione e conclusioni

13.45-14.45 Verifica con questionario e compilazione della scheda di valutazione ECM

### Con il Patrocinio

 Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

 Consiglio Nazionale delle Ricerche

 Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

### Consiglio Direttivo FIRR

*D. Tirindelli Danesi (Presidente), F. Schillirò, (Vice Presidente), Lidia Strigari (Vice Presidente), R. De Vita (Segretario/Tesoriere), M. Stasi, M. Pacilio (AIFM), O. Schillaci, O. Bagni (AIMN), R. Santoni, A. Morganti (AIRB), R. Moccaldi, G. De Luca (AIRM), M. Magnoni, S. Sandri (AIRP), S. Salerno, F. Schillirò, (SIRM), M.G. Pugliese, L. Strigari (SIRR)*

### Comitato Organizzativo FIRR

*R. De Vita (FIRR), M. Pacilio (AIFM), M. Chianelli (AIMN), A. Morganti (AIRB), R. Moccaldi (AIRM), M. Magnoni (AIRP), A. Magistrelli (SIRM), A. Campa (SIRR)*

### Informazioni generali

Il Workshop, è accreditato dall'**AIFM**  
(Provider Nazionale n. 416-210630)

### Crediti formativi ECM n° 6

per tutte le Professioni



### Segreteria Scientifica e Organizzativa FIRR

*Federazione Italiana Ricerche sulle Radiazioni*

*Associazione Scientifica senza fini di lucro*

*c/o Divisione Tecnologie e Metodologie per la Salvaguardia della Salute*

*ENEA - Centro Ricerche Casaccia s.p. 016 - Via Anguillarese 301 - 00123 Roma*

*Tel.: 06 30484671*

*radiazionifirr@enea.it - <http://firr.casaccia.enea.it>*

## INDICE

<b>Nuove problematiche dosimetriche in Sanità, ambiente e ricerca</b> <i>Donatella Tirindelli Danesi (FIRR)</i>	7
<b>La problematica della dose al cristallino alla luce della nuova normativa Europea</b> <i>Mariagabriella Pugliese (SIRR)</i>	8
<b>Dosimetria al cristallino protocolli operativi nelle aziende ospedaliere</b> <i>Sergio Salerno (SIRM)</i>	11
<b>Problematiche dosimetriche in terapia adronica</b> <i>Mario Ciocca (AIFM),</i>	14
<b>Sistemi dosimetrici: tarature, type-testing e interconfronti</b> <i>Luisella Garlati (AIRP)</i>	16
<b>Utilizzo della dosimetria nelle valutazioni del medico autorizzato</b> <i>Giuseppe Taino (AIRM)</i>	20



# “NUOVE PROBLEMATICHE DOSIMETRICHE IN SANITÀ, AMBIENTE E RICERCA”

**Donatella Tirindelli Danesi**

e-mail: donatella.tirindelli@gmail.com

La dosimetria delle radiazioni ionizzanti è indispensabile per pianificare la radioprotezione delle persone sia nei luoghi di lavoro – impianti e ospedali dove sono presenti sorgenti di radiazioni – che nell’ambiente. L’affidabilità della dosimetria è, inoltre, una delle condizioni sia per il successo della radioterapia oncologica che per l’ottimizzazione del rapporto costo-beneficio in radiodiagnostica. In entrambe i settori, quello medico e quello radioprotezionistico, la dosimetria – e in generale la misura delle radiazioni ionizzanti – richiede sovente approfondite conoscenze in campi settoriali diversi.

Inoltre, la conoscenza delle misure di radioattività, l’attività dei radionuclidi e la dose assorbita, è essenziale non solo per la radioprotezione, ma anche per la dosimetria in medicina nucleare che costituisce un settore strettamente complementare a quello della dosimetria in radioterapia e in radiodiagnostica.

I metodi di determinazione della dose assorbita dovuta all’introduzione di sostanze radioattive nel corpo umano rientrano in una particolare disciplina – la dosimetria interna – che per la specificità e la varietà delle tematiche ad essa correlate è tradizionalmente distinta dalla dosimetria delle radiazioni ionizzanti.

Un ulteriore tema riguarda i metodi di calcolo delle distribuzioni di dose finalizzati alla pianificazione del trattamento in radioterapia. I metodi di calcolo Monte Carlo sono ormai uno strumento imprescindibile anche per la dosimetria delle radiazioni ionizzanti, sia in campo medico che radioprotezionistico.

L’accuratezza e la disponibilità di questi metodi ha raggiunto livelli tali da poter essere impiegati, in molti casi, anche in alternativa a diverse tipologie di misure. La determinazione delle distribuzioni di dose in brachiterapia o dei fattori correttivi per effetti spuri in molti tipi di rivelatori di radiazioni sono solo alcuni esempi in cui il calcolo Monte Carlo ha un ruolo di primaria importanza e ben sostituisce le corrispondenti determinazioni sperimentali.

Da tutto ciò si evince il motivo per cui l’argomento della dosimetria delle radiazioni ionizzanti sia stato scelto per il Workshop annuale della FIRR in quanto settore tipicamente trasversale agli interessi scientifici delle Associazioni Federate e in continua evoluzione per l’apporto che forniscono le nuove tecnologie e le acquisizioni della ricerca in radiobiologia e radioprotezione.

# LA PROBLEMATICHE DELLA DOSE AL CRISTALLINO ALLA LUCE DELLA NUOVA NORMATIVA EUROPEA

Mariagabriella Pugliese

Dipartimento di Fisica "E. Pancini", Università degli Studi di Napoli Federico II  
INFN sezione di Napoli

e-mail: pugliese@na.infn.it

## Introduzione

E' ben noto che l'esposizione del cristallino ad alte dosi di radiazioni ionizzanti causi come effetto lo sviluppo di opacità in sede sottocapsulare posteriore, fino alla cataratta. Le opacità della lente si manifestano dopo un periodo di latenza dall'esposizione che può avere durata variabile, fino a qualche decina di anni. La cataratta può essere classificata in base alla posizione delle opalescenze in: cataratta nucleare, cataratta corticale e cataratta posteriore capsulare (fig.1).

La cataratta è la principale causa di cecità nel mondo e l'unico trattamento disponibile è la rimozione chirurgica. Il cristallino è uno dei tessuti più radiosensibili del corpo [1] e quando si confronta la radiosensibilità dei vari tessuti oculari, modificazioni del cristallino sono rilevabili per dosi tra 0.2-0.5 Gy, mentre patologie di altro tipo in altri tessuti oculari compaiono per esposizioni acute o frazionate tra 5-20 Gy.

Chiaramente, maggiore è la dose di esposizione, minore è il periodo di latenza. Poiché l'insorgenza della cataratta è un tipico effetto deterministico, necessita del superamento di una soglia di esposizione alle radiazioni ionizzanti perché si manifesti.

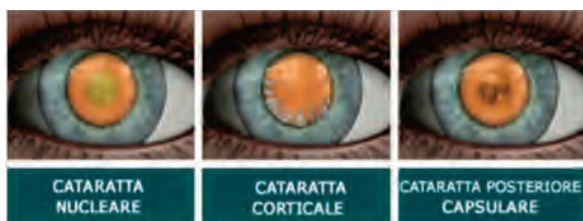


Fig. 1 Classificazione delle cataratte in base alla posizione delle opalescenze.

L'ICRP con la Pubblicazione 118 del 2012 [2], prende in considerazione i risultati degli studi di radiosensibilità del cristallino, abbassando la soglia della dose cumulativa da 2 Gy a 0,5 Gy. Queste indicazioni, insieme a quella dell'abbassamento del limite di dose equivalente al cristallino per i lavoratori esposti, che da 150 mSv/anno passa a 20 mSv/anno, sono state recepite dalla Direttiva 2013/59/Euratom del Consiglio del 5 dicembre 2013 [3] che stabilisce norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti, e che abroga le direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom e 2003/122/Euratom.

In tabella 1 sono riportati i valori di limiti di dose per i lavoratori esposti secondo il D. Lgs. 230/95 (normativa italiana attualmente vigente), e la 2013/59/Euratom. Tale direttiva sarebbe dovuta essere recepita dagli Stati Membri entro il 6 febbraio 2018. L'Italia ancora non ha emanato la nuova normativa in materia di radioprotezione, ma la problematica della dose al cristallino va comunque affrontata con urgenza, mettendo in campo azioni di formazione e informazione del personale professionalmente esposto alle radiazioni, effettuando una dosimetria ad hoc, e munendo i lavoratori esposti di DPI come occhiali di protezione anti X, al fine di evitare il superamento dei 20 mSv/anno.

D. Lgs. 230/95	2013/59/Euratom
Dose efficace: 20 mSv/anno	Dose efficace: 20 mSv/anno (50 mSv/anno in circostanze particolari)
Dose equivalente al cristallino: 150 mSv/anno	Dose equivalente al cristallino: 20 mSv/anno

Tab. 1 Limiti di dose efficace ed equivalente al cristallino per lavoratori esposti.

## L'esposizione del cristallino in Radiologia Interventistica

La radiologia interventistica (RI) è una branca della radiologia che comprende tutte le procedure mini-invasive, diagnostiche e terapeutiche, effettuate mediante la guida delle metodiche di imaging, come la fluoroscopia, la tomografia computerizzata, la risonanza magnetica e l'ecografia. Le tecniche di radiologia interventistica sono considerate mini-invasive in quanto, nella grande maggioranza dei casi, vengono eseguite per via percutanea. L'operatore raggiunge l'organo da trattare direttamente dalla cute del paziente oppure "navigando" all'interno di una struttura anatomica cava, come un vaso, un dotto biliare, la via escrettrice renale, e visualizza, momento per momento, tutti gli strumenti utilizzati attraverso le diverse metodiche di imaging. Questo tipo di approccio mini-invasivo, associato allo sviluppo delle tecniche e dei materiali, ha reso sempre più la radiologia interventistica una valida alternativa al trattamento chirurgico, considerando anche i tanti vantaggi che derivano dall'utilizzo della stessa, come la riduzione dei tassi di complicanze, di morbilità e mortalità, dei tassi di infezione, dei tempi di recupero e dei tempi di ricovero, abbattendo quindi i costi di degenza.



In un reparto di RI le dosi professionali per i radiologi interventisti sono però abbastanza elevate, ed è questo il motivo per cui è fortemente consigliabile, alla luce della nuova Direttiva Euratom l'utilizzo di dispositivi di protezione [4]. In figura 2 è rappresentata l'esposizione delle diverse parti del corpo dell'operatore al variare della distanza dal paziente.

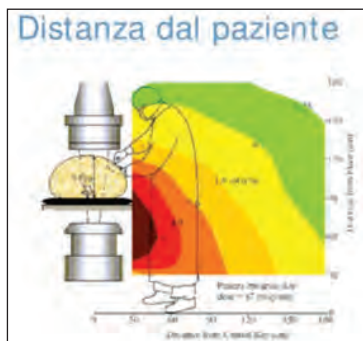


Fig. 2 Esposizione dell'operatore in funzione della distanza dal paziente.

Tra i Dispositivi di Protezione Collettiva (DPC), le protezioni pensili sono quelle che riducono notevolmente l'esposizione del cristallino se posizionate correttamente, ovvero il più vicino possibile al recettore di immagine e il più in basso possibile sul paziente (figura 3a). Un altro DPC utile nel ridurre l'esposizione del cristallino è il telo di copertura sterilizzabile da posizionare direttamente sul paziente. Questi teli contengono elementi schermanti (bismuto o tungsteno-antimonio) che permettono di ridurre la dose agli operatori di circa il 75%. Tra i Dispositivi di Protezione Individuale (DPI), invece, gli occhiali rivestono un ruolo determinante (figura 3b). Ricordiamo che i DPI devono essere impiegati quando i rischi non possono essere evitati o sufficientemente ridotti da mezzi di protezione collettiva, da misure tecniche di prevenzione, da misure, metodi o procedimenti di riorganizzazione del lavoro (art. 74, comma 1 del D. Lgs. 81/2008).

La scelta degli occhiali va fatta tenendo conto dell'equivalenza in piombo, del peso, dell'efficacia, dell'attenuazione offerta, del modello. Quando non sono presenti i dispositivi pensili o non è possibile utilizzarli, devono essere usati occhiali con protezione laterale; se viene utilizzato un sistema biplano, l'utilizzo della protezione laterale è molto importante per la radioprotezione del cristallino.

### La misura della dose al cristallino

Nel caso di dosimetria per irradiazione totale del corpo, la grandezza limite, indicata dalla normativa, è la Dose



Fig. 3a Protezione pensile



Fig. 3b Occhiali di protezione anti X

Efficace E. La grandezza operativa appropriata per la sua valutazione è l'Equivalente di Dose Personale Hp(d), che corrisponde all'Equivalente di Dose in un tessuto molle ad una profondità d sotto uno specifico punto del corpo. L'Equivalente di Dose Personale soddisfa diversi criteri: è unico per tutti i tipi di radiazione; è additivo rispetto alle varie direzioni di incidenza della radiazione; tiene conto dell'assorbimento e della retro-diffusione del corpo (su cui è indossato il dosimetro); è misurabile da un dosimetro indossato sul corpo umano.

Le profondità raccomandate per le radiazioni debolmente penetranti sono 0,07 mm per la pelle e 3 mm per il cristallino, mentre 10 mm è la profondità raccomandata per radiazioni fortemente penetranti per il corpo intero.

La dose equivalente al cristallino, nel caso di misura effettuata all'altezza della fronte o lateralmente, sarà numericamente uguale a:

$E = f \times H_p$  dove  $H_p$  è  $H_p(3)$  o  $H_p(0,07)$  a seconda del dosimetro impiegato, mentre  $f$  è un fattore di trasmissione (variabile da 0,5 a 0,1) che tiene conto dell'uso di occhiali protettivi.

In particolare:

$f = 0,1$  se si utilizzano occhiali ad alta protezione, con schermo laterale e con elevata garanzia di impiego costante;

$f = 0,3$  se si utilizzano occhiali protettivi con schermo laterale ma con scarsa garanzia di impiego costante;

$f = 0,5$  se si utilizzano occhiali senza elevata garanzia di impiego costante.

I dosimetri a termoluminescenza [5], (TLD LiF: Mg, Cu, P) calibrati in  $H_p(3)$ , sono i più adatti per la misura della dose equivalente al cristallino essendo di piccole dimensioni, tessuto equivalente, riutilizzabili previo azzeramento (figura 4).



Fig. 4 Dosimetri TL per cristallino

Il dosimetro per cristallino è realizzato, a scelta dell'utente, in tre tipologie differenti. La prima, ottenuta inserendo un elemento sensibile termoluminescente LiF (Mg, Cu, P) GR200A all'interno delle cards per corpo intero, in corrispondenza della posizione filtrata da 1 mm di ABS. In questo caso il dosimetro è indossato con l'utilizzo di clips per applicazione al berretto operatorio. La seconda, inserendo un elemento sensibile termoluminescente LiF (Mg, Cu, P) GR200A all'interno di involucri in polietilene (circa 12 mg/cm<sup>2</sup>) di dimensione 1×10 cm<sup>2</sup>. In questo caso il dosimetro è applicato su una delle aste degli occhiali anti-X. La terza, inserendo un elemento sensibile termoluminescente LiF (Mg, Cu, P) GR200A all'interno di involucri in polietilene (circa 12 mg/cm<sup>2</sup>) di dimensione 2,5×6 cm<sup>2</sup>. In questo caso il dosimetro è applicato su una fascia frontale per mezzo di nastro biadesivo.

Nel caso in cui la dosimetria al cristallino si faccia estrapolando il dato dalla dose efficace al corpo intero, si utilizza la formula di Martin [6], che consiste nel moltiplicare la dose efficace al corpo intero per un fattore 0.75, ricavato tenendo conto di una serie di fattori tra cui il tipo di fascio, la distanza dell'operatore dal fascio primario, del tipo di procedura eseguita. Evidentemente, in virtù del limite di 20 mSv/anno di dose equivalente, l'utilizzo della formula di Martin non è più opportuno, e sempre più è auspicabile l'utilizzo di dosimetri specifici per il cristallino.

#### **Studi preliminari in Campania**

E' stata effettuata un'indagine in 11 Radiologie Interventistiche in Campania, sull'informazione del personale esposto alle radiazioni. E' stato somministrato un questionario riportante: Tipo di Operatore (I/II, classificato A/B); Conoscenza della nuova Direttiva, nuovi limiti di dose al cristallino (SI/NO); Effettuazione della dosimetria al cristallino (SI/NO) e relativa frequenza in caso affermativo; Utilizzo di DPI; In caso di utilizzo di dosimetro per cristallino, la posizione (frontale, laterale, davanti o dietro l'occhiale anti X).

#### **Risultati**

Su 55 intervistati, solo 11 sono a conoscenza della variazione del limite di dose al cristallino. In 4 radiologie interventistiche su 11 non viene effettuata la dosimetria al cristallino con dosimetri specifici e laddove viene effettuata, con frequenza semestrale. Nel 98% dei casi si fa uso di DPI. In caso di utilizzo di dosimetro

specifico per il cristallino, alcuni lo posizionano davanti agli occhiali piombati, altri dietro.

#### **Bibliografia**

- [1] Ainsbury, E.A., Bouffler, S.D., Dorr, W., et al. Radiation cataractogenesis: a review of recent studies. *Radiat. Res.* 172, 1-9 (2009).
- [2] International Commission on Radiological Protection. ICRP Statement on tissue reactions / early and late effects of radiation in normal tissues and organs a threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. Publication 118. *Annals of the ICRP* 2012;41(1/2).
- [3] Council of the European Union. Council Directive 2013/59/Euratom, 5 December 2013, laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom. *Official Journal of the European Union* L13, 17 January 2014.
- [5] Klein LW, Miller DL, Balter S et al, Occupational health hazards in the interventional laboratory: time for a safer environment. *J Vasc Interv Radiol* 20:147-152 (2009).
- [5] Furetta C., Thermoluminescence . *La Rivista del Nuovo Cimento*, 21, 2 (1998).
- [6] Martin CJ., Personal dosimetry for interventional operator: when and how should monitoring be done? *Br.Radiol.*2011 jul;84: 639-48 (2003).

# DOSIMETRIA AL CRISTALLINO PROTOCOLLI OPERATIVI NELLE AZIENDE OSPEDALIERE

Sergio Salerno, Cecilia Gozzo

Di.Bi.Bi.Med Policlinico, Università degli Studi di Palermo

e-mail: sergio.salerno@unipa.it

Le procedure di radiologia interventistica, che sfruttano le radiazioni ionizzanti (RI) ed in particolare i raggi X, a causa del loro significativo aumento in quantità e complessità, rappresentano uno degli scenari più critici per quanto attiene alla radioprotezione. La radiologia interventistica inizialmente sviluppata dai radiologi, rappresenta oggi una tecnica utilizzata con continuità da molte altre figure mediche nella loro attività clinica tra i quali: cardiologi, chirurghi vascolari, gastroenterologi, neurochirurghi, ortopedici ed urologi. [1-2]

Le norme radioprotezionistiche sono in atto regolare in Italia dal D.Lgs. 230/95 e s.m.i e dal D.Lgs. 187/2000, contenente disposizioni riguardanti i pazienti, la popolazione generale, ed i lavoratori esposti [3-4], non essendo ancora stata recepita la nuova direttiva Euratom Direttiva Europea (DE) 59/2013[5].

Al fine di contenere il rischio di danno tissutale radio-indotto, l'*International Commission on Radiological Protection* (ICRP) ha realizzato un rapporto che fornisce una panoramica degli effetti immediati e tardivi delle radiazioni nei tessuti e negli organi normali [6].

Secondo la nuova EURATOM (59/2013) del Consiglio Europeo, le nuove informazioni scientifiche sulle reazioni a livello tissutale rendono indispensabile applicare i principi di ottimizzazione e limitazione delle dosi equivalenti, ove opportuno, al fine di mantenere le dosi al minimo ragionevolmente ottenibile. Inoltre Stati membri provvedono affinché i lavoratori della categoria A e B siano sistematicamente sorvegliati in base a misurazioni individuali eseguite da un servizio di dosimetria [5].

Tra i danni radio indotti negli operatori il cristallino è uno dei tessuti più comunemente interessati e tra i tessuti più radiosensibili. Il danno da radiazioni si esplica sul cristallino mediante lo sviluppo di una cataratta RI indotta e la incidenza di questa cataratta da esposizione alle basse dosi sembra maggiore di quanto ipotizzato a seguito di recenti evidenze della letteratura [7].

L'esposizione alle basse dosi del cristallino rappresenta per gli operatori esposti una esposizione prolungata e può causare nel tempo una cataratta radio-indotta che si configura prevalentemente come cataratta posteriore sub-capsulare. Sebbene i precisi meccanismi della cataratta da radiazioni non siano del tutto noti, il danno principale è considerato quello genomico, risultante in un'alterata divisione cellulare, trascrizione e/o anomala

differenziazione delle fibrocellule del cristallino [7].

La cataratta da radiazioni si sviluppa seguendo una caratteristica sequenza progressiva: precoce visualizzazione di una lucentezza opalescente sulla capsula posteriore del cristallino osservata alla lampada a fessura [8] seguita dalla comparsa di piccoli vacuoli e diffuse opacità puntiformi lungo la sutura posteriore del cristallino [9]. Un approccio comunemente utilizzato per la quantificazione di cataratte di varia eziologia è basato sul "Sistema di classificazione delle opacità del cristallino" (LOCS) versione II [10,11] o III. Il LOCS III offre uno strumento semplice ed accurato per graduare soggettivamente tipo e severità della cataratta mettendo a confronto un'immagine del cristallino in esame con un set di fotografie standard che mostrano stadi di gravità differente di cataratte nucleari, corticali e subcapsulari posteriori [11]. La velocità con cui questi cambiamenti si sviluppano è fortemente dose-dipendente ed età-modulata. Infatti, l'epitelio del cristallino sembra maggiormente sensibile alle radiazioni ionizzanti durante il periodo di crescita rapida del cristallino nell'infanzia e superata l'adolescenza, per dosi inferiori a 3 Gy, la progressione è maggiore negli individui più anziani [7].

I risultati epidemiologici recenti nell'uomo relativi a popolazioni con esposizioni sia acute, che protratte e croniche, suggeriscono che le linee guida ICRP del 2007 che indicavano una soglia di 5 Gy per esposizioni frazionate o prolungate per la comparsa di opacità rilevabili, ed una soglia di 8 Gy per la disabilità visiva [12], possano sottovalutare il rischio. Per questo motivo, la Direttiva Europea 2013/59/EURATOM proprio per il cristallino, ha recepito le ultime indicazioni della ICRP del 2012, imponendo come soglia di dose assorbita per il cristallino un valore di 0,5 Gy, con un limite di dose equivalente di 20 mSv/anno media su periodi definiti di 5 anni, con un valore annuo che non superi i 50 mSv [5,6].

Tali valori soglia possono essere facilmente raggiunti in quelle categorie di lavoratori esposti in maniera prolungata e continuativa alle radiazioni ionizzanti (quali cardiologi emodinamisti, endoscopisti che effettuano procedure interventistiche sulle vie biliari, chirurghi vascolari, neurochirurghi, radiologi interventisti) [7]. Se non viene praticata una corretta protezione dalle radiazioni durante le procedure interventistiche, il valore soglia di

dose al cristallino può essere facilmente superato [13]. La dose cumulativa al cristallino potrebbe arrivare, come segnalato dalla letteratura, anche a 60mSv per i cardiologi interventisti in assenza di protezione per le lenti [14].

L'UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) nel 2010 ha riportato che le esposizioni degli operatori sanitari che effettuano pratiche interventistiche e dei tecnici di radiologia rappresentano la maggiore sorgente di esposizione professionale ai raggi X in ambito lavorativo [15].

Sulla base di quanto riportato nei Rapporti IstiSan 15/41, i fattori che influenzano l'esposizione lavorativa del cristallino sono diversi e correlati sia al tipo di paziente ed indagine (complessità della procedura, tempo di fluoroscopia e numero di immagini), sia al tipo di apparecchio radiogeno utilizzato e ad alla "buona pratica" (utilizzo di occhiali piombati e/o schermi piombati protettivi sospesi, posizione e quindi distanza degli operatori rispetto al tubo e al paziente, proiezioni utilizzate, collimazione, parametri di esposizione) [1].

A tal riguardo, lo studio di Principi del 2016, ha valutato quanto influiscono alcuni fattori come: la posizione dell'operatore, l'altezza e l'orientamento del tubo radiogeno, sull'esposizione del cristallino durante le procedure interventistiche. Generalmente l'occhio sinistro è più esposto rispetto al destro per una distanza dal tubo radiogeno rispettivamente di 40 cm e 70 cm. La rotazione della testa di circa 30° o 45° sarebbe in grado di ridurre l'esposizione di circa il 50%. Per quanto riguarda l'altezza, un rischio minore è, invece, osservato negli operatori 10 cm più alti della media. Tale studio, inoltre, afferma che il posizionamento del monitor lontano dal tubo radiogeno potrebbe ridurre l'esposizione di dose al cristallino dell'operatore [16]. Al contrario, l'utilizzo di sistemi biplani e l'accesso radiale possono far aumentare i valori di dose di esposizione all'operatore [17].

Per ridurre il danno stocastico da radiazioni, quindi, è importante l'utilizzo di dispositivi che riducono notevolmente l'esposizione dei lavoratori, quali protezioni pensili e occhiali anti-X". I sistemi pensili per essere efficaci debbono essere posizionati in modo opportuno [18, Figura 1]; l'efficacia degli occhiali anti X invece dipende dal modello, dalla tipologia della procedura eseguita e dalle abitudini di lavoro degli operatori. Gli occhiali anti-X permettono di ridurre la dose al cristal-

lino di un fattore di circa 8-10 in condizioni di esposizione frontale e di un fattore sicuramente inferiore per le esposizioni laterali o oblique [19]. L'uso combinato di entrambe le protezioni, sia dei sistemi pensili che degli occhiali anti-X, garantisce la massima protezione per il cristallino [19,20].

La metodologia di lavoro ha un significativo impatto nella riduzione della dose al cristallino come peraltro evidenziato nelle raccomandazioni proposte dal gruppo ORAMED. Infatti nelle raccomandazioni sono esaminati fattori quali: l'utilizzo di protezioni sospese al soffitto o di occhiali con protezione laterale; utilizzo di proiezioni con tubo posizionato sotto il tavolo porta paziente (riduzione della dose agli occhi di 2- 27 volte), e accesso femorale (riduzione dose da 2 a 7 volte rispetto all'accesso radiale) [21].

L'efficacia dei sistemi radioprotezionistici sopra menzionati necessita comunque di monitoraggio periodico, effettuato con misurazione dell'equivalente di dose personale Hp (0,07), Hp (3), e Hp (10) per stime di dose superficiale, al cristallino e profonda, rispettivamente [7].

La valutazione della dose al cristallino è divenuta stringente dal momento in cui l'ICRP ha raccomandato una drastica riduzione del limite di dose annuale per i lavoratori professionalmente esposti (da 150 a 20 mSv/anno) [6]; questa riduzione presenta molteplici difficoltà operative e dosimetriche in quanto può essere affetta da numerosi errori o incertezze quali, ad esempio: posizionamento del dosimetro, posizione relativa operatore-centro diffusore, grado di rotazione del capo dell'operatore, stima della attenuazione offerta dagli occhiali di protezione indossati.

Secondo quanto dichiarato dall'INAIL in un documento redatto a Novembre 2014, i nuovi limiti professionali per il cristallino sopra riportati saranno in vigore solo nel momento in cui sarà recepita la specifica direttiva, attualmente non ancora emanata, che stabilisce norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti; per quanto riguarda invece la soglia di induzione di cataratta, le indicazioni dell'ICRP vanno a costituire riferimento per gli aspetti medico- legali. Inoltre la cataratta da radiazioni al momento non è tra le malattie professionali più frequentemente riconosciute dall'ente [22]. La Tabella 1 in allegato mostra le segnalazioni di opacità del cristallino dei lavoratori esposti, riconosciute dall'INAIL dal 2014 al 2016.



Figura 1: L'immagine mostra un mancato uso da parte degli operatori della protezione pensile.

Località	ANNO		
	2014	2015	2016
Nord	9	3	5
Centro	5	8	4
Sud	5	2	6
Isole	3	4	0
<b>Tutte</b>	<b>12</b>	<b>17</b>	<b>15</b>

Tabella 1: Dati INAIL del 30/04/2017 sulle segnalazioni di opacità al cristallino nei lavoratori esposti riconosciute nel triennio 2014-2016.

Per valutare l'incidenza Europea di opacità del cristallino da esposizione professionale a radiazioni, è nato lo studio EURALOC (European epidemiological study on

radiation-induced lens opacities among interventional cardiologists) con lo scopo di raccogliere, con valutazione oftalmologica ed apposito questionario, le testimonianze di Cardiologi interventisti di tutta Europa [23].

In conclusione, il rapporto IstiSan 15/41 fornisce lo stato dell'arte per la valutazione della dose equivalente al cristallino, ma si auspicano più stringenti indicazioni metodologiche da parte degli enti governativi nazionali preposti [7].

## BIBLIOGRAFIA

1. National Council on Radiation Protection & Measurements (NCRP), Report No. 160
2. Reisz JA, Bansal N, Qian J, Zhao W, Furdui CM. Effects of Ionizing Radiation on Biological Molecules—Mechanisms of Damage and Emerging Methods of Detection. *Antioxidants & Redox Signaling*. 2014;21(2):260-292. doi:10.1089/ars.2013.5489.
3. DLgs: 230/1995 DECRETO LEGISLATIVO 17 marzo 1995, n. 230 Attuazione delle direttive 80/836, 84/467, 84/466, 89/618, 90/641 e 92/3 in materia di radiazioni ionizzanti. (GU Serie Generale n.136 del 13-06-1995 - Suppl. Ordinario n. 74).
4. Decreto Legislativo 26 maggio 2000, n. 187 "Attuazione della direttiva 97/43/Euratom in materia di protezione sanitaria delle persone contro i pericoli delle radiazioni ionizzanti connesse ad esposizioni mediche" pubblicato nella Gazzetta Ufficiale n. 157 del 7 luglio 2000 - Supplemento Ordinario n. 105
5. Direttiva 2013/59/EURATOM del Consiglio del 5 Dicembre 2013
6. ICRP Statement on Tissue Reactions / Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs – Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context, 2012
7. Rapporti IstiSan 15/41. Capitolo 3. Radioprotezione dell'operatore
8. Ainsbury, E. A., Bouffler, S. D., Dörr, W., Graw, J., Muirhead, C. R., Edwards, A. A. and Cooper, J. Radiation Cataractogenesis: A Review of Recent Studies. *Radiat. Res.* 172, 1-9 (2009).
9. Worgul BV, Kundiyeve YI, Sergiyenko NM, Chumak VV, Vitte PM, Medvedovsky C, Bakhanova EV, Junk AK, Kyrychenko OY, Musijachenko NV, Shylo SA, Vitte OP, Xu S, Xue X, Shore RE. Cataracts among Chernobyl clean-up workers: implications regarding permissible eye exposures. *Radiat Res.* 2007 Feb;167(2):233-43.
10. Chylack LT Jr, Leske MC, McCarthy D, Khu P, Kashiwagi T, Sperduto R. Lens opacities classification system II (LOCS II). *Arch Ophthalmol.* 1989 Jul;107(7):991-7.
11. Chylack LT Jr, Wolfe JK, Singer DM, Leske MC, Bullimore MA, Bailey IL, Friend J, McCarthy D, Wu SY. The Lens Opacities Classification System III. The Longitudinal Study of Cataract Study Group. *Arch Ophthalmol.* 1993 Jun;111(6):831-6
12. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann. ICRP* 37 (2-4), 2007
13. Ciraj-Bjelac OI, Rehani MM. Eye Dosimetry In Interventional Radiology and Cardiology: Current Challenges and Practical Considerations. 2013 *Radiation Protection Dosimetry*;1-9
14. Vano E, Kleiman NJ, Duran A, Rehani MM, Echeverri D, Cabrera M. Radiation cataract risk in interventional cardiology personnel. *Radiat Res* 2010;174:490-5.
15. Report to the General Assembly, with Scientific Annexes of the Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR 2000 .
16. Principi S, Farah J, Ferrari P, Carinou E, Clairand I, Ginjaume M. The influence of operator position, height and body orientation on eye lens dose in interventional radiology and cardiology: Monte Carlo simulations versus realistic clinical measurements. *Physica Medica* 2016.
17. Vanhavere F, Carinou E, Gualdrini G, Clairand I, Sans Merce M, Ginjaume M, Nikodemova D, Jankowski J, Borden J-M, Rimpler A, Wach S, Martin P, Struelens L, Krim S, Koukorava C, Ferrari P, Mariotti F, Fantuzzi E, Donadille L, Itié C, Ruiz N, Carnicer A, Fulop M, Domienik J, Brodecki M, Daures J, Barth I, Bilski P. ORAMED: optimization of radiation protection of medical staff. Braunschweig: European Radiation Dosimetry e. V.; 2012. (EURADOS Report 2012-02).
18. Thornton RH, Dauer LT, Altamirano JP, Alvarado KJ, St, Germain, J, Solomon SB. Comparing strategies for operator eye protection in the interventional radiology suite. *J Vasc Interv Radiol* 2010;21:1703-7.
19. Vaño E, Fernandez JM, Sanchez R. Occupational Dosimetry in real time. Benefits for interventional radiology. *Radiat Measur* 2011;46:1262-5.
20. Compagnone G, Campanella F, Domenichelli S, Lo Meo S, Bonelli M, delle Canne S, Isoardi P, Marinaro M, Ursetta M, Curini R. Survey of the interventional cardiology procedures in Italy. *Radiat Prot Dosimetry* 2012;150(3):316-324.
21. ORAMED (Optimization of RADIation protection for MEDical staff). WP1: Extremity dosimetry and eye lens dosimetry in interventional radiology and cardiology. Boeretang: SCK-CEN; 2015.
22. I DANNI PER LA SALUTE, INAIL Novembre 2014; Conoscere il rischio del portale Inail, la Consulenza Tecnica Accertamento Rischi e Prevenzione (Contarp) [https://www.inail.it/cs/internet/docs/i\\_danni\\_per\\_la\\_salute\\_pdf.pdf?section=attivita](https://www.inail.it/cs/internet/docs/i_danni_per_la_salute_pdf.pdf?section=attivita)
23. EUROLAC, European epidemiological study on radiation-induced lens opacities among interventional cardiologists. [http://www.euraloc.eu/en/Participation\\_in\\_Euraloc/Eye\\_examination](http://www.euraloc.eu/en/Participation_in_Euraloc/Eye_examination)

# PROBLEMATICHE DOSIMETRICHE IN ADROTERAPIA

**Mario Ciocca**

Unità di Fisica Medica, Fondazione CNAO, Pavia

e-mail: mario.ciocca@Cnao.it

Nel panorama della radioterapia moderna vi è un crescente interesse per i trattamenti con particelle cariche pesanti, in particolare protoni e, in misura minore, ioni carbonio. In Italia si stima che il numero di pazienti affetti da neoplasie che potrebbero beneficiare di un trattamento adroterapico (come i tumori solidi pediatrici, tumori radioresistenti alla radioterapia convenzionale [8], tumori oculari, recidive) sia pari ad almeno 6000/anno; alle tre sole strutture già operanti a livello nazionale (a Catania, limitatamente ai trattamenti oculari, Pavia e Trento) è prevedibile quindi che si affiancheranno altri centri in un futuro prossimo. A livello tecnico, i sistemi di distribuzione della dose di tipo attivo (modalità nota come pencil beam scanning) stanno soppiantando quelli passivi (passive scattering), mentre il ciclotrone continua a rappresentare l'acceleratore più comunemente impiegato per la produzione di fasci di alta energia, rispetto invece al sincrotrone. Quest'ultimo, a fronte di dimensioni molto maggiori (per esempio, quello installato al CNAO di Pavia ha un diametro di oltre 20 m) e di superiore complessità tecnologica, consente la variazione attiva dell'energia del fascio, ad ogni ciclo di estrazione.

Scopo del presente lavoro è illustrare in sintesi alcune delle principali problematiche di carattere fisico-dosimetrico in radioterapia con fasci a scansione di protoni e ioni carbonio di alta energia (tipicamente nel range rispettivamente 60-230 MeV e 120-400 MeV/u, corrispondenti a profondità del picco di Bragg in acqua di 3-30 cm circa [14, 16]).

## 1. Trattamenti oculari con protonterapia

Rispetto ai trattamenti convenzionali di adroterapia, la proton-terapia oculare presenta caratteri molto specifici legati principalmente all'impiego di campi molto piccoli (tipicamente 5-20 mm di diametro), necessità di collimazione finale individualizzata (allo scopo di ridurre la penombra laterale del campo a 1-1,5 mm) e di definizione sub-millimetrica della caduta distale della dose (distal fall-off), obbligo di fissazione dello sguardo del paziente durante le fasi di simulazione e somministrazione della dose. Anche per i trattamenti oculari, la dosimetria in condizioni di riferimento si basa sul protocollo IAEA TRS 398 (2000), ma l'impiego della camera a ionizzazione a piatti paralleli stan-

dard (tipo Markus) non è raccomandato per campi di dimensioni inferiori a circa 1 cm. Per campi molto piccoli occorre invece utilizzare rivelatori ad alta risoluzione spaziale, come le pellicole radiocromiche (il cui uso per la determinazione della dose in acqua è però complesso, al contrario della loro applicazione in dosimetria relativa) oppure micro-diamanti e diodi al silicio [12-13].

Poiché il numero di centri in grado di erogare trattamenti di proton-terapia oculare a livello mondiale è ancora molto limitato (una dozzina) [7], è sorta l'esigenza di garantire l'armonizzazione nella determinazione della dose in acqua tra i centri medesimi ed è stata quindi avviata recentemente una campagna organizzata dall'Institute of Nuclear Physics di Cracovia (IFJ PAN, Polonia), finalizzata a un interconfronto dosimetrico mediante diversi tipi di rivelatori (TLD, alanina, RPL, pellicole radiocromiche) pre-alloggiati in mini-fantocci di PMMA (figura 1). Conclusi gli irraggiamenti da parte dei singoli centri che avevano ricevuto ciascuno un kit, i risultati attesi nei prossimi mesi permetteranno di delineare un quadro molto dettagliato del livello di omogeneità in termini di dosimetria di base su scala mondiale, utile per concordare ulteriori strategie d'azione.

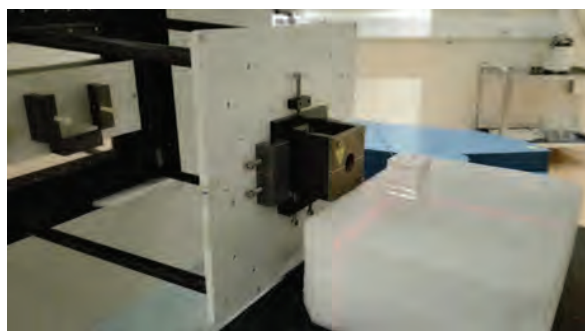


Figura 1. Esempio di set-up sperimentale per l'irraggiamento di un mini-fantoccio di PMMA contenente diversi tipi di rivelatori a stato solido, nell'ambito dell'interconfronto dosimetrico tra i centri mondiali di proton-terapia oculare. Sulla sinistra sono visibili il terminale di una delle linee di fascio orizzontali del CNAO e, in particolare, il collimatore oculare di riferimento (2,5 cm di diametro).

## 2. Interconfronti e audit dosimetrici

Come già riportato nel paragrafo precedente e analoga-

mente a quanto avviene in radioterapia convenzionale (in particolare nelle tecniche più complesse, come l'IMRT), anche in adroterapia risulta importante mettere in atto procedure che garantiscano la qualità e la sicurezza globale dei trattamenti, con particolare riferimento ai cosiddetti end-to-end test in fantoccio uniforme o antropomorfo, che mirano a verificare la correttezza dell'intera catena del processo radioterapico (dalla simulazione TC, al planning, sino all'erogazione della dose), e agli audit dosimetrici, gestiti da Enti riconosciuti (come l'ESTRO o l'IROC di Houston, USA). Nel caso specifico degli ioni carbonio, occorre però individuare dosimetri compatti e che mostrino una risposta indipendente dal LET delle radiazioni [4]: allo stato attuale, nonostante uno studio condotto con rivelatori ad alanina abbia proposto un metodo di correzione della risposta basato su simulazioni Monte Carlo [1], non vi è consenso sul loro impiego e le metodiche per quei tipi di test rimangono un problema aperto, bisognoso di ulteriori studi di convalida per radiazioni ad alto LET.

### 3. Attività di ricerca e sviluppo

Sebbene l'esperienza clinica con ioni carbonio a livello mondiale sia numericamente molto più limitata rispetto ai trattamenti con protoni, gli oltre vent'anni di attività del NIRS di Chiba (Giappone) mostrano risultati promettenti, soprattutto per neoplasie molto aggressive e resistenti alla radioterapia a basso LET (fotoni e protoni), come il tumore avanzato del pancreas e le recidive del retto [8]. D'altra parte, la modellizzazione accurata dell'RBE rappresenta ancora oggi una fonte rilevante di incertezza nella necessaria conversione tra dose fisica e dose biologica, soprattutto nell'ottica di confrontare i risultati clinici ottenuti da centri che utilizzano modelli radiobiologici differenti (LEM e MKM, in particolare). In quest'ottica, le simulazioni Monte Carlo giocano senz'altro un ruolo importante, come evidenziato in parecchi lavori di letteratura [11, 17].

Altri ambiti molto importanti di ricerca e sviluppo riguardano la microdosimetria [5, 10] e la verifica del range delle particelle in vivo, attraverso metodiche non invasive di PET off-line o addirittura on-line [2-3], rivelazione di prompt-gamma [15] o secondari [19], proton-radiography [6].

Infine, accanto alle specie ioniche impiegate oggi nella pratica clinica (appunto, protoni e ioni carbonio), occorre evidenziare il rinnovato interesse per altri ioni, quali ossigeno ed elio [9, 18]; in particolare, in prospettiva futura gli ioni elio sembrano particolarmente favorevoli, come "ponte" tra protoni e ioni carbonio, grazie alle loro caratteristiche intermedie in termini di scattering, frammentazione nucleare e proprietà radiobiologiche [18].

### Bibliografia

1. Ableitinger A, Vatnitsky S, Herrmann R, et al. Dosimetry auditing procedure with alanine dosimeters for light ion beam therapy. *Radiother Oncol.* 2013;108(1):99-106.

2. Bauer J, Unholtz D, Sommerer F, et al. Implementation and initial clinical experience of offline PET/CT-based verification of scanned carbon ion treatment. *Radiother Oncol.* 2013;107(2):218-26.
3. Bisogni MG, Attili A, Battistoni G, et al. INSIDE in-beam positron emission tomography system for particle range monitoring in hadrontherapy. *J Med Imaging (Bellingham).* 2017;4(1):011005.
4. Castriconi R, Ciocca M, Mirandola A, et al. Dose-response of EBT3 radiochromic films to proton and carbon ion clinical beams. *Phys Med Biol.* 2017;62(2):377-393.
5. Colautti P, Conte V, Selva A, et al. MICRODOSIMETRIC STUDY AT THE CNAO ACTIVE-SCANNING CARBON-ION BEAM. *Radiat Prot Dosimetry.* 2017:1-5.
6. Farace P, Righetto R, Meijers A. Pencil beam proton radiography using a multilayer ionization chamber. *Phys Med Biol.* 2016;61(11):4078-87.
7. Hrbacek J, Mishra KK, Kacperek A, et al. Practice Patterns Analysis of Ocular Proton Therapy Centers: The International OPTIC Survey. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2016;95(1):336-43.
8. Kamada T, Tsujii H, Blakely EA, et al. Carbon ion radiotherapy in Japan: an assessment of 20 years of clinical experience. *Lancet Oncol.* 2015;16(2):e93-e100.
9. Krämer M, Scifoni E, Schuy C, et al. Helium ions for radiotherapy? Physical and biological verifications of a novel treatment modality. *Med Phys.* 2016;43(4):1995.
10. Magrin G, Mayer R, Verona C, Grevillot L. Radiation quality and ion-beam therapy: understanding the users' needs. *Radiat Prot Dosimetry.* 2015;166(1-4):271-5.
11. Magro G, Dahle TJ, Molinelli S, et al. The FLUKA Monte Carlo code coupled with the NIRS approach for clinical dose calculations in carbon ion therapy. *Phys Med Biol.* 2017;62(9):3814-3827.
12. Marinelli M, Prestopino G, Verona C, et al. Dosimetric characterization of a microDiamond detector in clinical scanned carbon ion beams. *Med Phys.* 2015;42(4):2085-93.
13. McAuley GA, Teran AV, Slater JD, et al. Evaluation of the dosimetric properties of a diode detector for small field proton radiosurgery. *J Appl Clin Med Phys.* 2015;1(6):51-64.
14. Mirandola A, Molinelli S, Vilches Freixas G, et al. Dosimetric commissioning and quality assurance of scanned ion beams at the Italian National Center for Oncological Hadrontherapy. *Med Phys.* 2015;42(9):5287-300.
15. Richter C, Pausch G, Barczyk S, et al. First clinical application of a prompt gamma based in vivo proton range verification system. *Radiother Oncol.* 2016;118(2):232-7.
16. Russo S, Mirandola A, Molinelli S, et al. Characterization of a commercial scintillation detector for 2-D dosimetry in scanned proton and carbon ion beams. *Phys Med.* 2017;34:48-54.
17. Schiavi A, Senzacqua M, Pioli S, et al. Fred: a GPU-accelerated fast-Monte Carlo code for rapid treatment plan recalculation in ion beam therapy. *Phys Med Biol.* 2017;62(18):7482-7504.
18. Sokol O, Scifoni E, Tinganelli W, et al. Oxygen beams for therapy: advanced biological treatment planning and experimental verification. *Phys Med Biol.* 2017;62(19):7798-7813.
19. Traini G, Battistoni G, Bollella A, et al. Design of a new tracking device for on-line beam range monitor in carbon therapy. *Phys Med.* 2017;34:18-27.

# SISTEMI DOSIMETRICI: TARATURE, TYPE-TESTING E INTERCONFRONTI

Luisella Garlati

Politecnico di Milano, Dipartimento di Energia, via La Masa 34 – 20156 Milano

e-mail: luisella.garlati@polimi.it

## ABSTRACT

*All'interno di un programma di monitoraggio dosimetrico individuale risulta importante assicurare la qualità e la riferibilità del dato dosimetrico. Questa assicurazione deve essere data dal servizio di dosimetria, il quale deve garantire prima di tutto di poter ottenere un dato che sia riferibile dal punto di vista metrologico, ottenibile tramite tarature periodiche del sistema dosimetrico (sia esso un dosimetro a corpo intero o un dosimetro per le estremità).*

*Un sistema dosimetrico deve inoltre rispondere a una serie di caratteristiche riportate nella IEC 62387 per poter essere impiegato in tal senso. Questa norma specifica tutta una serie di test da condurre sul dosimetro, in particolare sulla dipendenza lineare dall'energia, la dipendenza dall'angolo d'incidenza della radiazione, l'influenza della temperatura sulla risposta. Alcuni di questi test devono essere svolti dal produttore dell'elemento rivelatore (pellicola fotografica, cristallo TL, elemento OSL), mentre altri test dovrebbero essere condotti periodicamente dai servizi di dosimetria (type-testing).*

*L'affidabilità di un servizio di dosimetria viene ovviamente garantita dall'accreditamento dello stesso secondo lo standard ISO 17025. La partecipazione dei laboratori accreditati a interconfronti è obbligatoria; questo però può essere fatto anche su base volontaria da parte di servizi non accreditati.*

*L'utilizzo di questi strumenti da parte di un servizio dosimetrico, indipendentemente dall'accreditamento, è una forma di garanzia per il servizio stesso di lavorare secondo standard di qualità. L'utilizzatore finale dovrebbe tenerne conto nel momento in cui si trovasse nella condizione di dover scegliere un servizio di dosimetria.*

## Il dato dosimetrico

All'interno della Direttiva Euratom 2013/59<sup>(1)</sup> l'articolo 41 "Sorveglianza individuale" prevede la sorveglianza fisica sistematica con sistema dosimetrico per i lavoratori in categoria A, mentre per i lavoratori in categoria B la sorveglianza dosimetrica deve essere sufficiente a dimostrare la corretta classificazione di questi lavoratori.

Questo ruolo delicato della sorveglianza dosimetrica

implica che il dato dosimetrico debba essere affidabile. Per tale motivo la Direttiva parla di messa in atto di misure per il riconoscimento dei servizi di dosimetria. Un documento importante di riferimento come linea guida per il riconoscimento dei servizi dosimetrici è la raccomandazione tecnica Radiation Protection No 160 "Technical Recommendations for monitoring individuals occupationally exposed to external radiation"<sup>(2)</sup>. Tra gli scopi di questa guida c'è anche quello di fornire strumenti per l'armonizzazione tra gli Stati membri delle procedure per il riconoscimento dei servizi di dosimetria, come per esempio la partecipazione a interconfronti, l'accreditamento del metodo di misura, ecc...

Nella stessa guida si sottolinea come l'implementazione di un sistema di qualità rispondente alla ISO 17025:2005<sup>(3)</sup> (attualmente sostituita dall'edizione del 29 novembre 2017) sia un modo per dimostrare che il servizio di dosimetria operi in qualità, sia tecnicamente competente e sia capace di generare risultati validi da un punto di vista tecnico, ma questo non è sufficiente per garantire l'affidabilità del servizio stesso. Accanto al requisito di qualità, si richiede la produzione di documenti che attestino le procedure del servizio, la partecipazione a prove valutative, l'ispezione dei locali utilizzati dal servizio, la chiara riferibilità metrologica ai campioni nazionali.

In Italia attualmente non c'è un Ente che verifichi o certifichi l'affidabilità di un servizio di dosimetria. Nel tempo sono stati fatti tentativi in tale direzione. Infatti nel 1983 fu fondato il Gruppo Italiano di Esperti in Dosimetria Personale (GIEDP), che in seguito diventò Gruppo ENEA-EDP; il Gruppo si dedicò alla verifica volontaria dell'affidabilità dei servizi e alla stesura di linee guida. A partire dal 1985 il Gruppo istruì in totale 169 pratiche. La verifica doveva essere ripetuta ogni tre anni. In totale furono effettuate 14 sessioni di verifica iniziale e 9 sessioni di verifica triennale. Alla fine del 1998 il gruppo ENEA-EDP fu sciolto. Dell'ultimo elenco, aggiornato al 1° luglio 1998, facevano parte 35 Servizi (su più di 100 di cui si conosceva l'esistenza) con 47 sistemi dosimetrici, di cui 15 per le estremità. Consultando la banca dati dei laboratori di prova di Accredia<sup>(4)</sup>, attualmente (febbraio 2018) solo due servizi di dosimetria sono accreditati secondo la ISO 17025.



In Europa i servizi dosimetrici più importanti risultano essere accreditati secondo la norma ISO, però siamo ancora ben lontani da un'armonizzazione dei servizi. All'interno di Eurados<sup>(5)</sup> opera il WG2 *Harmonisation of individual monitoring*, che si occupa di promuovere interconfronti, ma anche di creare un network tra servizi di dosimetria operanti in tutta Europa per confrontarsi su come vengono gestiti alcuni aspetti del servizio stesso (trasmissione delle dosi, dosimetri non resi, fondo ambientale da valutare, ecc...). Su alcuni aspetti c'è una discrepanza da paese a paese, anche per le diverse modalità di attuazione delle direttive europee.

## Qualità del dato dosimetrico

### Riferibilità metrologica

Per poter garantire la qualità del dato dosimetrico un primo passo è quello di garantire la riferibilità metrologica. Questo indica che un sistema dosimetrico per essere caratterizzato deve essere riferito ai campioni di prima o di seconda linea per le grandezze operative in utilizzo. Ciò implica che è possibile passare dalla lettura sperimentale del dosimetro al valore di dose misurata attraverso algoritmi validati sperimentalmente da dosimetri irraggiati presso centri LAT a dosi ed energie note. Per esempio, per un dosimetro a termoluminescenza il dato di lettura fornisce una glow curve, da cui è possibile ricavare la carica elettrica liberata dal cristallo in fase di riscaldamento e raccolta dal fotomoltiplicatore. Il valore di dose è ricavato dalla seguente equazione:

$$H=L f_1 f_2 h$$

H= dose espressa nella grandezza operativa opportuna ( $H_p(10)$ ,  $H_p(0.07)$ ,  $H_p(3)$ )

L= carica elettrica (Coulomb)

$f_1$ = fattore di sensibilità intrinseco del dosimetro

$f_2$ = fattore di conversione da Coulomb a kerma in aria (è un fattore di taratura)

h= fattori di conversione da kerma a grandezza operativa da misurare (valori tabulati nelle norme ISO).

Da questo esempio è possibile capire che per lo stesso elemento rivelatore a seconda dell'utilizzo del dosimetro (a corpo intero, anello, bracciale), e quindi abbinato a un differente holder, è necessario effettuare una caratterizzazione specifica a seconda della radiazione e della grandezza operativa d'interesse. Questo deve essere fatto per i differenti rivelatori (pellicola fotografica, cristallo TL, elemento OSL), perché i risultati di un dosimetro non possono essere trasferiti a un altro dosimetro con diverso elemento rivelatore o con diverso holder. Per quanto riguarda il tipo di radiazione, occorre consultare le norme ISO di riferimento: ISO 4037 (parti 1-4)<sup>(6)</sup> per i fasci X e gamma; ISO 6980 (parti 1-3)<sup>(7)</sup> per i fasci beta; ISO 8529 (parti 1-3)<sup>(8)</sup> per i neutroni. In queste norme sono indicati i metodi di produzione e caratterizzazione dei fasci, i metodi di taratura dei dosimetri e degli strumenti e i fantocci da utilizzare per gli irraggiamenti (slab per il torace, pillar per il braccio e rod per il dito).

A fianco di questa caratterizzazione iniziale di un sistema dosimetrico, è necessario prevedere una serie di

controlli periodici che garantiscano la continuità metrologica. Per esempio, per i dosimetri a film è necessario avere dei film irraggiati a dose nota all'interno dello stesso bagno di sviluppo di dosimetri utilizzati. Questi dosimetri appositamente irraggiati permetteranno di ricavare una curva di taratura apposta per quello specifico bagno di sviluppo, che, per quanto si cerchi di riprodurre le stesse condizioni operative, ha storia a sé (temperatura del bagno, temperatura ambiente, tempo di sviluppo, degrado dei liquidi).

Ovviamente non è sostenibile dal punto di vista economico per un servizio di dosimetria effettuare irraggiamenti presso un centro di taratura ogni volta che si effettua uno sviluppo o la lettura di dosimetri di altro tipo. Questo implica per il servizio la necessità di stabilire delle procedure che permettano di avere a disposizione dosimetri di controllo, per esempio sfruttando delle sorgenti in proprio possesso e creandosi una facility di irraggiamento ben caratterizzata, così da garantire il mantenimento della catena di riferibilità metrologica.

### Type-testing

Per verificare le performance di un elemento rivelatore è necessario eseguire una serie di test ben standardizzati. Le due norme di riferimenti principali per i dosimetri sono la IEC 62387-1<sup>(9)</sup> per i dosimetri passivi e la IEC/EN 61526<sup>(10)</sup> per i dosimetri a lettura diretta.

All'interno di questi documenti vengono elencate una serie di prove e i criteri di accettabilità delle stesse. In figura 1 si riporta una tabella comparativa delle prove richieste dalle varie norme estratta dalla raccomandazione tecnica RP No 160.

Molte di queste prove dovrebbero essere condotte dal produttore stesso degli elementi rivelatori, anche per poter mettere sul mercato un prodotto commercialmente valido. Alcuni dati relativi a queste prove vengono pubblicati oppure forniti dal produttore stesso al cliente, ma altri dati non sono disponibili.

Inoltre alcune prove condotte sull'elemento rivelatore non è detto che siano valide sul dosimetro (rivelatore + holder), come per esempio la risposta angolare, fortemente influenzata dalla presenza di filtri nell'holder.

Alcune prove dovrebbero quindi essere ripetute dai singoli laboratori, almeno nella fase di caratterizzazione del dosimetro e nel momento in cui si apportano dei cambiamenti nel dosimetro. Tra queste prove ci sono la dipendenza energetica e angolare, la dipendenza dalle condizioni ambientali, il segnale residuo, la perdita d'informazione (fading), la riutilizzabilità dei dosimetri, la risposta in campi misti di radiazione. Ovviamente anche in questo caso l'investimento economico non è trascurabile; è possibile però sfruttare irraggiamenti condotti per altri scopi per effettuare anche queste verifiche (interconfronti, prove valutative, tarature).

### Prove valutative e interconfronti

Al fine di assicurare la qualità dei risultati di prova (dato dosimetrico) la norma ISO 17025 pone la partecipazione a programmi di confronti interlaboratorio o prove valutative tra i requisiti obbligatori.

La stessa raccomandazione tecnica RP No 160 definisce tre tipi di prove valutative:

(Influence) quantity	passive dosimetry systems			direct reading dosimeters
	ISO 1757	ISO 12794	IEC 62387-1	
Type of detector and type of dosimeter	film, whole body	TLD, extremity	all passive; TLD, whole body	all active, whole body
Radiation energy <sup>1</sup>	0.65 ≤ responses ≤ 1.35	0.5 ≤ response ≤ 1.5	any energy and angle: 0.71 ≤ response ≤ 1.67	any energy and angle: 0.71 ≤ response ≤ 1.67
Angle of incidence <sup>1</sup>	at two energies: 0.7 ≤ response ≤ 1.3	at one energy: 0.85 ≤ responses ≤ 1.15		
Linearity	0.2 mSv to 1 Sv: check only at limits <sup>2</sup>	1 mSv to 1 Sv: 0.9 ≤ response ≤ 1.1	0.1 mSv to 1 Sv: 0.91 ≤ response ≤ 1.11	4 orders of magnitude: 0.85 ≤ response ≤ 1.15
Coefficient of variation	optical dens.: 2% to 5% homogeneity of filters: 2%	reproducibility: 10% batch homogeneity: 15%	from 15% to 5% at higher dose values	from 15% to 5% at higher dose values
Environmental conditions and others	temperature up to +50°C: 0.8 ≤ response ≤ 1.2 humidity up to 90%: 0.9 ≤ response ≤ 1.1 fading: 0.9 ≤ response ≤ 1.1	temperature up to +40°C and humidity up to 90%: 0.9 ≤ response ≤ 1.1 light exposure: 0.9 ≤ response ≤ 1.1	temp.: -10°C to +40°C, humidity 40% to 90%, fading, light, reader stability and power supply combined: 0.83 ≤ responses ≤ 1.25	temp.: -10°C to +40°C: 0.85 ≤ response ≤ 1.15 humidity 40% to 90%: 0.9 ≤ response ≤ 1.1 power supply: 0.9 ≤ response ≤ 1.1 atmospheric pressure: 0.9 ≤ response ≤ 1.1 dose rate for dose meas.: 0.8 ≤ response ≤ 1.2
Additivity <sup>3</sup>	no requirement	no requirement	0.91 ≤ response ≤ 1.11	0.9 ≤ response ≤ 1.1
Electromagnetic compatibility	no requirements	no requirements	IEC 61000-6-2 deviation <sup>4</sup> limited	IEC 61000-6-2 deviation <sup>4</sup> limited
Mechanics	no requirements	no requirements	IEC 60068-2-32 deviation <sup>4</sup> limited	IEC 60068-2-32 deviation <sup>4</sup> limited
Software	no requirements	no requirements	WELMEC Guide 7.2 <sup>5</sup>	no requirements

- <sup>1</sup> Values valid for photon radiation including X-rays and gamma rays with energies of at least up to those of <sup>60</sup>Co (1.25 MeV).
- <sup>2</sup> Requirements are specified for optical density, not for dose values.
- <sup>3</sup> Additivity of measured values for different irradiation conditions. It is important for the type test being valid for workplace fields.
- <sup>4</sup> Deviation is an additional indication which is due to the influence quantity, e.g. to additional or lost pulses as a result of EMC.
- <sup>5</sup> A guide to software requirements from the European Corporation in Legal Metrology, recommended for application all over Europe.

Fig. 1: Estratto dalla raccomandazione tecnica RP No 160, tabella comparativa delle prove richieste dalle varie norme o standard sui differenti tipi di dosimetri.

1 – *Blind test*: il servizio non è a conoscenza del test e non può utilizzare dosimetri selezionati o particolari procedure (*dummy customer*: a volte sono gli stessi utenti che simulano degli irraggiamenti o un incidente);

2 – *Surprise test*: il servizio è a conoscenza del test, ma non conosce la data in cui verrà eseguito. Si possono selezionare dosimetri, ma le procedure utilizzate per la lettura sono quelle standard;

3 – *Announced test*: il servizio è a conoscenza del test, del periodo in cui viene effettuato e può selezionare i dosimetri (rientrano in questa categoria gli interconfronti).

Le caratteristiche principali degli interconfronti sono:

- Il valore convenzionalmente vero ha un riferimento metrologico ben definito; spesso l'esecuzione avviene in laboratori metrologicamente riferibili al campione primario (laboratori primari o secondari);
- Simulazione delle condizioni di utilizzo dei dispositivi, compatibilmente con i tempi di realizzazione;
- L'ente organizzatore fornisce indicazioni operative ben precise ai partecipanti, così da avere a disposizione tutte le informazioni necessarie all'elaborazione dei dati finali;
- I dati vengono elaborati secondo degli indicatori, che permettono di valutare le performance dei partecipanti;
- I partecipanti sono anonimi: ad ogni set di dispositivi viene attribuito un codice alfanumerico, cui riferirsi in caso di presentazione dei risultati.

All'interno di un sistema di riconoscimento dell'affidabilità dei sistemi dosimetrici la partecipazione a queste prove dovrebbe essere richiesta con una certa periodicità. Il problema fondamentale è quello di avere un'offerta adeguata di queste prove.

Attualmente in Italia non sono organizzate prove di questo tipo: è possibile eseguire soltanto dei blind test con i laboratori LAT, a cui il servizio di dosimetria spedisce i dosimetri, che vengono irraggiati a una certa dose non comunicata al laboratorio; dopo che il laboratorio ha inviato il dato dosimetrico ottenuto, il centro LAT comunica i valori di irraggiamento. In questo caso il protocollo degli irraggiamenti è stabilito tra il centro LAT e il cliente.

In ambito europeo l'associazione Eurados organizza periodicamente interconfronti per dosimetri a corpo intero (ogni due anni) e saltuariamente quelli per dosimetri alle estremità e per dosimetri per neutroni. I risultati di questi interconfronti sono pubblicati sul loro sito<sup>(11)</sup>.

La partecipazione a questi lavori è un'occasione per i servizi di dosimetria o per i laboratori di verificare le proprie procedure e i metodi di elaborazione dei dati. Inoltre questi esercizi aiutano a mettere in luce errori sistematici propri del laboratorio o del tipo di elemento rivelatore, oppure possono essere utilizzati a ritroso, cioè come tarature per il proprio sistema.

## Conclusioni

Il controllo radioprotezionistico dei lavoratori parte da un dato fondamentale: la dose ricevuta dal lavoratore. Per questo motivo questo dato deve essere affidabile. E' dovere dello Stato garantire un sistema che verifichi

l'affidabilità dei servizi di dosimetria, senza lasciare al caso o alla buona volontà dei singoli servizi i controlli necessari a garantire la qualità dei dati dosimetrici.

In mancanza di un organismo ufficiale, gli utenti dovrebbero chiedere garanzia di qualità del dato dosimetrico tramite tarature periodiche e partecipazione a qualche interconfronto da parte del servizio di dosimetria.

Dall'altra parte per un servizio di dosimetria una buona caratterizzazione del sistema dosimetrico, anche tramite prove interne e la partecipazione a prove valutative o a interconfronti, permette di migliorare il servizio stesso.

## Bibliografia

- 1 – Gazzetta ufficiale dell'Unione Europea (2013) "Direttiva 2013/59/Euratom del Consiglio"
- 2 – European Commission (2009) "Radiation Protection No 160 - Technical recommendations for monitoring individuals occupationally exposed to external radiation"
- 3 - UNI CEI EN ISO/IEC 17025 (2005) "Requisiti generali per la competenza dei laboratori di prova e di taratura";
- 4 - <https://www.accredia.it/banche-dati/>
- 5 - <http://www.eurados.org/>
- 6 - ISO 4037 (1996) "X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy"
- 7 - ISO 6980 (2006) "Nuclear energy - Reference beta-particle radiation Methods of production"
- 8 – ISO 8529 (2001) "Reference neutron radiations"
- 9 – IEC 62387-1 (2012) "Radiation protection instrumentation – Passive integrating dosimetry systems for environmental and personal monitoring – Part 1: General characteristics and performance requirements"
- 10 - IEC/EN 61526 (2010) "Radiation protection instrumentation – Measurement of personal dose equivalents Hp(10) and Hp(0,07) for X, gamma, neutron and beta radiations – Direct reading personal dose equivalent meters and monitors"
- 11 - [http://www.eurados.org/en/Documents\\_Publications/Reports\\_documents](http://www.eurados.org/en/Documents_Publications/Reports_documents)

# L'UTILIZZO DEI DATI DOSIMETRICI DA PARTE DEL MEDICO AUTORIZZATO

Giuseppe Taino<sup>1</sup>, Alberto Delogu<sup>1</sup>, Marcello Imbriani<sup>2</sup>

<sup>1</sup> IRCCS Istituti Clinici Scientifici Maugeri – Pavia

<sup>2</sup> Università degli Studi di Pavia – IRCCS Istituti Clinici Scientifici Maugeri – Pavia

e-mail: giuseppe.taino@icsmaugeri.it

## Introduzione

La protezione dalle radiazioni ionizzanti (o radioprotezione) è basata su un complesso di azioni finalizzate a minimizzare, con l'ausilio di mezzi fisici e di procedure operative, il rischio radiologico per le persone. Alla base delle attività di radioprotezione vi è un quadro normativo che indica, fra le altre cose, i limiti che si raccomanda di non superare nelle esposizioni delle persone alle radiazioni ionizzanti. Questi limiti sono stabiliti in modo da evitare gli effetti non stocastici delle radiazioni ionizzanti e minimizzare o rendere trascurabili quelli stocastici (ICRP 1991, ICRP 2008). Per quantificare questi limiti sono utilizzate alcune grandezze, le grandezze radioprotezionistiche, che hanno la duplice proprietà di essere da un lato dipendenti dalle grandezze del campo di radiazione (fluenza, energia ecc.), dall'altro di contenere quelle informazioni essenziali per poter correlare al loro valore una stima del rischio radiologico per le persone coinvolte. Le grandezze radioprotezionistiche presuppongono quindi che il mezzo soggetto a un'esposizione di radiazioni sia un essere umano vero e proprio e non un materiale che possa simularne le caratteristiche. Sia le grandezze del campo di radiazione sia le grandezze dosimetriche non hanno la duplice proprietà delle grandezze radioprotezionistiche. L'equivalente di dose, che pur contiene un'informazione indiretta sull'efficacia biologica delle radiazioni (il fattore di qualità Q), è una grandezza riferita genericamente a un mezzo costituito da tessuto biologico, ma non a un preciso organo del corpo umano o al corpo umano nella sua interezza. Le grandezze di campo e quelle dosimetriche (incluso l'equivalente di dose) sono grandezze fisiche normalmente misurabili senza eccessive difficoltà. Le grandezze radioprotezionistiche riferite al soggetto esposto sono grandezze che, per come sono definite, sono difficilmente misurabili. Il loro valore è di fatto determinabile solo mediante stime o calcoli basati su dati sia teorici che sperimentali, oppure come approssimazione della misura di un'altra famiglia di grandezze dosimetriche, le grandezze dosimetriche operative. Queste ultime grandezze, anch'esse descritte nel seguito, si configurano concettualmente come un ponte che collega le grandezze dosimetriche di base con le grandezze radioprotezionistiche.

La International Commission on Radiological Protec-

tion (ICRP) è l'organismo internazionale che svolge le analisi ed emette le raccomandazioni su questa materia. Tali raccomandazioni sono poi recepite dalla normativa del settore nei diversi Paesi. In passato era raccomandato l'uso di una sola grandezza radioprotezionistica: l'equivalente di dose efficace, HE. Successivamente sono state introdotte per maggior completezza informativa e in sostituzione di HE, due altre grandezze: la dose equivalente, HT, e la dose efficace, E. Queste grandezze, tuttavia, non vengono misurate direttamente. Le grandezze HT ed E possono essere stimate con accettabile approssimazione mediante la misura di altre grandezze: le grandezze dosimetriche operative e l'attività dei radionuclidi. Entrambi questi gruppi di grandezze svolgono il ruolo di grandezze operative, nel senso che dalla loro misura si può ottenere una ragionevole stima delle grandezze radioprotezionistiche. Un gruppo di grandezze dosimetriche operative caratterizzate da queste proprietà è stato elaborato (e accettato a livello internazionale) dalla International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) per due tipologie di misura: il monitoraggio di area e il monitoraggio individuale. In particolare, l'equivalente di dose ambientale e l'equivalente di dose direzionale sono le grandezze dosimetriche operative per il monitoraggio di area, mentre per il monitoraggio individuale la grandezza dosimetrica operativa è l'equivalente di dose personale. Le grandezze dosimetriche operative devono avere una dipendenza da variabili quali l'angolo di incidenza e l'energia della radiazione, in misura analoga alla dipendenza che le grandezze HT ed E hanno da queste variabili, nelle diverse condizioni di irraggiamento. Il valore di HT e di E può infatti dipendere dall'orientazione dell'individuo nel campo di radiazione e da quanto la radiazione è penetrante. La definizione di H tiene infatti implicitamente conto, tramite il fattore di qualità Q, della radiazione considerata. Il monitoraggio di area in radioprotezione si effettua in ambienti dove è presente (o si suppone che lo sia) un campo di radiazioni ionizzanti. Lo scopo del monitoraggio di area è di ottenere dati dosimetrici relativi ai campi di radiazione ambientale per poter poi stimare, a partire da questi dati, il valore delle grandezze protezionistiche HT o E per le persone eventualmente esposte a quel campo di radiazioni. Durante tali misure le persone sono di soli-

to assenti dall'ambiente in questione e perciò l'informazione fornita dalla misura deve essere tale da consentire la conoscenza dell'equivalente di dose che si avrebbe in quel dato campo di radiazione con la persona presente. Il monitoraggio di area permette quindi di assegnare un valore di HT o di E a una persona che, o è stata per un certo periodo esposta a quel campo di radiazioni precedentemente alla misura o potrebbe essere esposta al medesimo campo in una fase successiva alla misura, supposto che il campo di radiazioni non cambi le sue caratteristiche durante le fasi di esposizione e di misura. Le grandezze HT ed E sono riferite a una dose assorbita media in un organo o tessuto umano, ma le misure per ottenere HT o E non sono fatte, nel monitoraggio di area, in mezzi che simulino gli organi umani, né evidentemente all'interno degli organi medesimi. Le misure per il monitoraggio ambientale sono fatte tipicamente mediante strumenti posti in un punto in aria libera e devono poter essere poi utilizzate per ottenere valori di dose assorbita riferita a un punto in un mezzo equivalente al tessuto umano. Le grandezze di misura usate per il monitoraggio ambientale devono perciò essere correlate a una dose assorbita in un mezzo che non solo simuli le proprietà di diffusione e di attenuazione dell'organismo umano (mezzo "tessuto-equivalente") ma che abbia forma e dimensioni che approssimano l'organo umano considerato. Un mezzo che abbia la funzione di simulare alcune proprietà del corpo umano (o di sue parti) è comunemente denotato in dosimetria come "fantoccio". Il fantoccio adottato per definire il mezzo di riferimento delle grandezze operative per il monitoraggio di area è la sfera ICRU, introdotta dalla International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). Si tratta di una sfera del diametro di 30 149 cm costituita da materiale "tessuto-equivalente". Un materiale tessuto equivalente è un materiale con densità e numero atomico medio uguali a quello del tessuto muscolare umano. In generale nel contesto della dosimetria, un materiale si definisce equivalente a un altro se ha, rispetto all'altro, le medesime proprietà di assorbimento e di diffusione per un dato tipo di radiazione ionizzante in un dato intervallo di energia. Quindi il concetto di equivalenza fra due materiali non ha valore assoluto, in quanto si applica a un dato tipo di radiazione e a un dato intervallo della sua energia.

Sulla base di questi presupposti il Medico autorizzato riceve periodicamente dall'esperto qualificato, per ogni lavoratore, il dato dosimetrico (dose efficace) che rappresenta la misura più vicina alla reale esposizione del lavoratore nello svolgimento della consueta attività di lavoro e che può e deve essere utilizzata con finalità differenti da parte del Medico Autorizzato.

### **Il dato dosimetrico come strumento per la valutazione del rischio**

I dati dosimetrici costituiscono la "vera" valutazione del rischio espositivo per il singolo Lavoratore, e rappresentano il criterio concettuale (e, si badi bene, "epidemiologico", giacché l'attribuzione precede temporalmente l'esposizione) alla base della ripartizione in categorie imposta dalla normativa attualmente vigente

(D.Lgs. 230/95 e successive modifiche e integrazioni). Lasciando in secondo piano gli aspetti normativi e considerando lo stato della ricerca in merito agli effetti deleteri delle radiazioni ionizzanti sull'organismo umano, se ormai v'è un completo consenso circa il comportamento della relazione dose-risposta nell'ambito degli effetti deterministici, sussistono tuttavia modelli concorrenti (e talora considerevolmente discordanti) per relazionare gli effetti stocastici alle basse dosi.

A fini preventivi, il principale organismo internazionale (ICRP) ha proposto l'adozione di un modello di risposta lineare senza soglia (modello LNT, Linear Non-Threshold); tuttavia il medesimo organismo riconosce come tale modello non sia sostenuto da una base epidemiologica sufficientemente robusta, e pertanto cautela contro un utilizzo epidittico del medesimo.

Fatta questa debita premessa, il principale ruolo delle dosimetrie nella gestione del rischio è quello di confermare l'attribuzione della categoria di rischio espositivo, o di determinare l'attivazione delle misure straordinarie di contenimento: una prospettiva se si vuole speculare rispetto a quanto di regola avviene in altri settori della Medicina del Lavoro, ma pienamente comprensibile considerando la peculiare natura della Radioprotezione, ove l'atto preventivo è posto in essere senza avere alcuna conferma quantitativa del rischio. La dosimetria individuale (e ambientale) si configura pertanto come una sorta di "controllo di qualità" interno al sistema, testimoniandone il funzionamento e allo stesso tempo condizionandolo.

In altre parole, il campo della Radioprotezione si differenzia dagli altri ambiti occupazionali per il fatto che la valutazione dell'esposizione al rischio avviene preventivamente rispetto ad un rischio potenziale che diventa quantificabile e valutabile solo a posteriori, attraverso la misura dell'effettiva esposizione del lavoratore documentata dai dati dosimetrici relativi al periodo (anno o semestre) precedente.

### **Il dato dosimetrico come strumento di prevenzione per la tutela della salute dei lavoratori**

Il D.Lgs 230/95 e le sue successive integrazioni individuano i limiti di dose per categorie definite di Lavoratori e valori di dose o condizioni comportanti l'attivazione di sorveglianza medica eccezionale: già da quest'impostazione risulta evidente come la scheda dosimetrica individuale e la comunicazione della dose assorbita, si configurino quali essenziali strumenti di lavoro per il Medico Autorizzato il quale, proprio sulla base dei dati dosimetrici relativi al periodo precedente, deve valutare i livelli espositivi e verificare l'eventuale raggiungimento di valori tali da controindicare o condizionare l'esposizione al rischio da radiazioni ionizzanti nel periodo di riferimento successivo.

Quindi, la sorveglianza sanitaria, in ambito radioprotezionistico, è essenzialmente un atto sanitario di natura preventiva, natura che si manifesta anche in relazione al dato dosimetrico, sia nei casi ordinari che nei casi straordinari ove, stanti le dosi rilevate, lo scopo è principalmente la diagnosi precoce (ovvero in fase pre-subclinica) di eventuali eventi avversi o l'individuazione di

alterazioni non correlabili con l'esposizione, ma che ne possono controindicare l'esposizione a radiazioni ionizzanti.

I dati quantitativi dosimetrici mantengono inoltre, almeno a livello teorico (tenendo a mente le necessarie premesse), un ruolo guida per la prevenzione terziaria (o trattamento) degli effetti deterministici.

### **Il dato dosimetrico come strumento per la valutazione dell'origine espositiva (sospetta origine professionale) di una malattia oncologica**

La malattia professionale strictu sensu si colloca, sotto l'aspetto normativo, in un territorio ove s'interfacciano e sovrappongono le istanze del diritto civile e penale, con i propri schemi interpretativi della realtà, solo parzialmente sovrapponibili (e in taluni casi confliggenti), e un'inevitabile inerzia ad aggiornarsi per accogliere i progressi della conoscenza scientifica.

In particolare, l'aspetto forse più noto e "problematico" nasce dalla configurazione penale della malattia professionale come delitto perseguibile d'ufficio, aspetto tendente a ridurre il margine d'autonomia decisionale del Medico che, posta la diagnosi di malattia (ma non, ovviamente, di malattia professionale!), si può trovare obbligato a procedere meccanicamente in quanto l'identificazione del nesso causale è attribuita all'Ufficiale di Polizia Giudiziaria.

L'applicazione in ambito radioprotezionistico di un raffinato strumento matematico quale il calcolo della probabilità causale (PC), la cui introduzione nel nostro Paese è avvenuta nel 1987 sotto gli auspici dell'AIRM, che da allora ne ha sempre promosso la conoscenza e applicazione anche con il personale impegno dei vertici della Società, consente di stabilire, su basi probabilistiche riproducibili, la sussistenza del nesso causale tra patologia neoplastica e storia espositiva del Paziente, purché quest'ultima sia nota; e se esula dagli ambiti del presente intervento (e dalle competenze degli Autori) discutere la teoria della causalità legale nelle differenti declinazioni, si ricorda come l'orientamento prevalente veda la causalità nei termini d'espressione probabilistica, con soglie di rigetto differenti a seconda dei differenti ambiti del diritto.

Il sofisticato modello di calcolo della PC consente di misurare la porzione del rischio attribuibile esclusivamente all'effetto delle radiazioni ionizzanti, a patto che sia possibile ricostruire con sufficiente precisione la storia espositiva, e l'identificazione quantitativa della soglia di rigetto consente di adattare il modello ai differenti presupposti di causalità applicati in ambito civile o penale; tutto ciò garantendo l'assoluta ripetibilità del risultato e l'indipendenza da qualsivoglia valutazione o interpretazione soggettiva.

Questa considerazione rende pertanto manifesto come il dato dosimetrico costituisca in ultima analisi la pietra angolare su cui erigere l'edificio della causalità, essendo un presupposto essenziale per il calcolo della PC; il calcolo della PC è (o quantomeno dovrebbe essere) lo strumento principale a disposizione dell'Ufficiale di Polizia Giudiziaria, o del Consulente (di parte o d'Ufficio) per determinare la sussistenza di un nesso causale logicamente plausibile (si ricorda infatti che il calcolo

della PC è un metodo matematico per esprimere numericamente la verosimiglianza dell'ipotesi formulata) tra patologia neoplastica ed esposizione a radiazioni ionizzanti, ma è pure un utile strumento a disposizione del Sanitario che si trovi a dover porre diagnosi di neoplasia (o a supportare, in vario modo, i Colleghi che tale diagnosi abbiano formulato, con particolare riferimento ai Servizi o Unità Operative Ospedaliere di Medicina del Lavoro attivi presso i maggiori centri ospedalieri della Lombardia) in Pazienti con storia di esposizione a radiazioni ionizzanti per ragioni professionali.

Quanto illustrato diventa ancora più rilevante rispetto alla dimensione che la malattia oncologica ha ormai assunto nel nostro Paese e nel mondo Occidentale e rispetto alla necessità sempre più sentita di interventi mirati nello studio dei diversi fattori di rischio chiamati in causa come agenti eziologici. Per lo studio del ruolo oncogeno della esposizione occupazionale a radiazioni ionizzanti nell'insorgenza della malattia neoplastica, la Probabilità di causa (PC), matematicamente definita come il rischio oncogeno attribuibile alla specifica radiazione (RadRisk) diviso la somma del rischio di base della popolazione generale attribuibile ad altre cause (BasRisk) più il rischio attribuibile all'esposizione della specifica radiazione (RadRisk), rappresenta un "modo ragionevole per indirizzare il problema della valutazione della verosimiglianza che una precedente esposizione a radiazioni ionizzanti (RI) sia responsabile di un evento oncogeno" (Committee on Radiation Protection and Measurements - NCRP- Statement n° 7 del 30/09/92). La PC è infatti capace di valutare in termini probabilistici quale sia la responsabilità di una specifica pregressa esposizione a RI rispetto alle altre possibili cause. In Italia il metodo della PC è divenuto uno strumento a disposizione del medico autorizzato sia nella fase valutativa e decisionale della denuncia di sospetta malattia professionale (ai sensi del DPR 1124/65), sia come elemento di giudizio da considerare nel percorso di valutazione dell'inserimento occupazionale di un lavoratore con pregressa patologia neoplastica in attività a rischio da RI.

Il metodo della PC è stato introdotto per la prima volta negli anni '80 negli USA per poter affrontare con strumenti scientifici il problema medicolegale del riconoscimento della correlazione tra esposizione a radiazioni ionizzanti e patologia neoplastica in popolazioni civili, successivamente militari e lavorative. Risulta quindi lo strumento più avanzato da applicare nel processo medico-legale di attribuzione all'esposizione occupazionale a radiazioni ionizzanti di una malattia oncologica in ambito assicurativo professionale (INAIL).

Concludendo, la storia dosimetrica rappresenta l'ineludibile presupposto per poter confermare scientificamente il nesso causale tra una determinata neoplasia e una determinata storia espositiva. Vale tuttavia ricordare il fatto che, allo stato attuale della normativa, il percorso razionale descritto (diagnosi, ricostruzione della storia espositiva, calcolo della probabilità causale) non esime il Medico autorizzato/competente dall'obbligo di segnalazione/referto nelle condizioni di malattie tabellate.

## Bibliografia

1. Associazione Italiana Radioprotezione Medica, Linee guida AIRM: sorveglianza medica d lavoratori esposti a radiazioni ionizzanti. IPSOA , 2013
2. Campurra G. Medicina del Lavoro. IPSOA 2009.
3. Chiappino G, Tomasini M. Medicina del lavoro. Raffaello Cortina Editore, 1994.
4. IAEA Safety standards series. Occupational Radiation Protection. 2004.
5. Iaccarino S et al, Capitolo 11: Radiazioni ionizzanti. In ISPRA Annuario dei dati ambientali 2005-2006. Roma
6. Institut de France, Accadémie des Sciences – Accadémie de Médecine. La relation dose-effect et l'estimation des effects cancérogènesdes faibles doses de rayonnements ionisants, Rapport adopté à l'unanimité par l'Accadémie des Sciences, Paris, 2005
7. National Council on Radiation Protection and Measurements. Evaluation of the linear-non threshold dose-respon-  
se model for ionizing radiation NRC Report 136, Bethesda Maryland 2001
8. National Research Council. Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR V. Washington, DC: The National Academies Press, 1990.
9. Orsini S. Radiazioni negli ambienti di lavoro. PI-ME Editrice, 1989.
10. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection . ICRP 60. 1991.
11. Recommendations of the international Commission on Radiological Protection. ICRP 103. 2007.
12. Testo integrale del D.Lgs. 230/05 e s.m.i. : <http://www.camera.it/parlam/leggi/052301.htm>
13. Testo integrale della Direttiva 2013/59/Euratom: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2014:013:0001:0073:IT:PDF>

the 1990s, the number of people in the world who are under 15 years of age has increased from 1.1 billion to 1.5 billion. The number of people aged 65 and over has increased from 200 million to 350 million.

There are a number of reasons why the world population is increasing. One of the main reasons is that the number of children born to each woman has increased. This is due to a number of factors, including:

- Improved medical care, which has reduced the number of children who die before the age of five.
- Improved nutrition, which has led to an increase in the number of children who survive to the age of five.
- Improved education, which has led to an increase in the number of children who are enrolled in school.

Another reason why the world population is increasing is that the number of people who are living longer is increasing. This is due to a number of factors, including:

- Improved medical care, which has led to an increase in the number of people who survive to old age.
- Improved nutrition, which has led to an increase in the number of people who survive to old age.
- Improved education, which has led to an increase in the number of people who survive to old age.

The increase in the world population is a major challenge for the world. It is necessary to find ways to provide food, water, and shelter for the growing number of people. It is also necessary to find ways to provide education and employment for the growing number of people.

There are a number of ways to address the challenge of the growing world population. One way is to improve agricultural production. This can be done by using better farming techniques and by using more land for agriculture.

Another way to address the challenge of the growing world population is to improve water management. This can be done by building dams and canals, and by using water more efficiently.

A third way to address the challenge of the growing world population is to improve housing. This can be done by building more houses and by improving the quality of existing houses.

There are a number of other ways to address the challenge of the growing world population. It is important to find ways to provide food, water, and shelter for the growing number of people. It is also important to find ways to provide education and employment for the growing number of people.

The world population is increasing rapidly. It is necessary to find ways to provide food, water, and shelter for the growing number of people. It is also necessary to find ways to provide education and employment for the growing number of people.

There are a number of ways to address the challenge of the growing world population. It is important to find ways to provide food, water, and shelter for the growing number of people. It is also important to find ways to provide education and employment for the growing number of people.

The world population is increasing rapidly. It is necessary to find ways to provide food, water, and shelter for the growing number of people. It is also necessary to find ways to provide education and employment for the growing number of people.

There are a number of ways to address the challenge of the growing world population. It is important to find ways to provide food, water, and shelter for the growing number of people. It is also important to find ways to provide education and employment for the growing number of people.

The world population is increasing rapidly. It is necessary to find ways to provide food, water, and shelter for the growing number of people. It is also necessary to find ways to provide education and employment for the growing number of people.

There are a number of ways to address the challenge of the growing world population. It is important to find ways to provide food, water, and shelter for the growing number of people. It is also important to find ways to provide education and employment for the growing number of people.

The world population is increasing rapidly. It is necessary to find ways to provide food, water, and shelter for the growing number of people. It is also necessary to find ways to provide education and employment for the growing number of people.