# INTERCALIBRAZIONE DEI METODI DOSIMETRICI UTILIZZATI PRESSO GLI IMPIANTI DI IRRAGGIAMENTO INDUSTRIALE IN ITALIA

A. BARTOLOTTA, S. ONORI e M. PANTALONI

Laboratorio di Fisica; Sezione Sanità dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Istituto Superiore di Sanità, Roma

Riassunto. - L'uso delle radiazioni ionizzanti in campo industriale (sterilizzazione di presidi medicali, conservazione di derrate alimentari, ecc.) è una tecnica che da diversi anni si è imposta a livello mondiale. In considerazione dell'importanza che assume un'accurata dosimetria in questo settore, sia dal punto di vista della salute umana che da quello economico, l'Istituto Superiore di Sanità (ISS) ha dato inizio nel 1986 ad un programma finalizzato alla verifica ed alla ottimizzazione delle procedure dosimetriche utilizzate negli impianti di irraggiamento industriale operanti sul territorio nazionale. A tal fine è stata usata, come dosimetria di riferimento, la dosimetria basata sulla tecnica di risonanza di spin elettronico (ESR) messa a punto presso lo stesso ISS. A ciascun impianto, partecipante al programma su base volontaristica, sono stati inviati 30 dosimetri ad alanina per effettuare una serie di prove finalizzate a: a) confrontare la dosimetria di routine utilizzata presso l'impianto con la dosimetria ESR; b) valutare il fattore di omogeneità nel prodotto irradiato; c) valutare il grado di riproducibilità della tecnica di irraggiamento. I risultati ottenuti indicano la necessità di utilizzare procedure dosimetriche standardizzate per una ottimizzazione del trattamento.

Summary (Intercomparison of the dosimetric systems used in industrial irradiation plants in Italy). - Industrial application of ionizing radiation (sterilization of medical supplies, long lasting food preservation, etc.) is a well established technique all over the world. The efficacy of the treatment depends on an accurate dosimetry assuring both the achievement of irradiation purposes at the lowest cost and the safety of consumers. This is why in 1986 the Istituto Superiore di Sanità (ISS) started an intercomparison program among the industrial plants now working in Italy, aimed to optimize the used dosimetric procedures. The electron spin resonance (ESR) alanine-based dosimetry, set up at ISS, was chosen as reference dosimetry. Each plant received 30 dosimeters to be irradiated in prefixed conditions in order to: a) compare the ESR and the routine dosimetry; b) evaluate the homogeneity factor in the irradiated product; c) test the

reproducibility of the irradiation technique. Results support the need of standardized dosimetric procedures for an optimization of the radiation treatment.

#### Introduzione

Da quando, nel 1960, fu realizzato nel Regno Unito il primo impianto prototipo con cobalto-60 per le applicazioni industriali delle radiazioni ionizzanti, tale attività si è non solo affermata, ma è in continua espansione a livello internazionale.

I campi di applicazione sono i più svariati, quali: trattamento degli alimenti a scopo conservativo, sterilizzazione di presidi medico chirurgici, trattamento di rifiuti urbani, modificazione e miglioramento selettivi delle caratteristiche fisico chimiche dei polimeri [1].

Le radiazioni ionizzanti tipicamente utilizzate per tali scopi sono fasci di elettroni con energia compresa tra 1 e 10 MeV, radiazione X di energia tra 1 e 5 MeV e sorgenti radioattive gamma (cesio-137, cobalto-60). L'intervallo di dose utilizzato nei trattamenti è molto ampio, da 10 a 10<sup>5</sup> Gy.

Lo sviluppo tecnologico nella produzione di macchine radiogene e di sostanze radioattive ha consentito l'espandersi degli usi industriali delle radiazioni ionizzanti, sia in termini di numero di impianti operanti, sia di tipo e qualità delle operazioni effettuate; a tale sviluppo hanno certamente contribuito anche il raffinamento delle tecniche dosimetriche che consentono un controllo di qualità sull'efficacia del trattamento, nonché considerazioni di tipo economico in relazione ad altri sistemi non utilizzanti radiazioni.

Tra le esigenze da rispettare nel corso delle applicazioni industriali delle radiazioni ionizzanti vi sono: a) dose al prodotto all'interno dei limiti prestabiliti; b) uniformità di dose all'interno del volume del prodotto irradiato; c) riproducibilità del trattamento nel corso del tempo.

Il rispetto di queste tre condizioni è garanzia dell'efficacia del trattamento; in altre parole, l'irradiazione deve produrre i risultati desiderati senza indurre modificazioni al prodotto tali da diminuirne la qualità o renderlo pericoloso per la salute umana; in ultima analisi si tratta di difendere i diritti e la salute del cittadino utilizzatore dei prodotti irradiati.

Per quanto detto, è indispensabile utilizzare una tecnica dosimetrica accurata che consenta di ottimizzare l'uso dell'impianto che deve lavorare al minimo dei costi, compatibilmente con il raggiungimento delle finalità del trattamento. Caratteristiche peculiari di una tecnica dosimetrica di routine adeguata è che sia di facile uso, poco costosa, con ottime caratteristiche di riproducibilità ed accurata. Poiché usualmente si considera accettabile una dosimetria caratterizzata da una incertezza inferiore a ± 10% [2], è indispensabile la riferibilità ad un campione primario. Ciò si ottiene tramite calibrazione del sistema dosimetrico presso un laboratorio secondario di taratura o tramite interconfronti con dosimetri viaggianti; in questo caso è il laboratorio di riferimento ad inviare presso l'impianto un proprio dosimetro per calibrare sul campo il sistema dosimetrico utilizzato di routine. Quest'ultima soluzione è stata scelta dalla IAEA, che a tale scopo utilizza i dosimetri ad alanina messi a punto presso il GSF di Monaco [3].

Risulta quindi evidente l'esigenza di accertare l'accuratezza con cui viene misurata la dose assorbita dal prodotto irradiato nei vari impianti di trattamento. In Italia l'Istituto Superiore di Sanità (ISS) ha un ruolo di responsabilità diretta in quanto, in base al D.M. 30-8-1973 che autorizza l'irraggiamento di patate, cipolle ed agli a scopo antigermogliativo, all'autorità sanitaria spetta il controllo sulla conformità dei singoli trattamenti, in particolare sul mantenimento della dose entro i limiti stabiliti.

Sulla base di queste considerazioni nel 1982, presso il Laboratorio di Fisica dell'ISS, è stato varato un programma mirato alla realizzazione della dosimetria basata sulla tecnica di risonanza di spin elettronico (ESR). Tale programma ha consentito la realizzazione di dosimetri ad alanina a stato solido, le cui caratteristiche di risposta alla radiazione gamma del cobalto-60 sono tali da consentirne l'uso sia come dosimetri di trasferimento che di routine [4].

Il confronto tra le dosimetrie utilizzate presso gli impianti operanti in Italia, oggetto del presente lavoro e le cui modalità di svolgimento sono descritte nel paragrafo seguente, è stato effettuato utilizzando, appunto, la dosimetria ESR.

### Materiali e metodi

### Tecniche dosimetriche

La dosimetria di riferimento utilizzata nel corso del programma è, come già discusso in precedenza, la dosimetria ESR messa a punto presso l'ISS che utilizza l'amminoacido alanina come materiale sensibile. Tale tecnica dosimetrica si basa sulla rivelazione dei radicali liberi a lunga vita prodotti dalla radiazione ionizzante nell'alanina.

Gli spettri ESR sono stati registrati con uno spettrometro Varian E112 operante in banda X. La Fig. 1 mostra un tipico spettro ESR di un dosimetro irradiato. L'area al di sotto della curva di assorbimento, ottenibile dalla doppia integrazione del segnale ESR, è proporzionale al numero n di centri paramagnetici prodotti dalla radiazione ionizzante nell'alanina. Poiché, in un largo intervallo di dose, la forma del segnale ESR non dipende dalla concentrazione dei radicali liberi, n è proporzionale all'altezza picco-picco (h) del segnale. Quindi, in pratica, è possibile, mediante l'uso di opportuna calibrazione, determinare la dose assorbita dalla misura di h. La Fig. 2 mostra la curva di calibrazione ottenuta nel caso dei raggi gamma del cobalto-60.

I dosimetri ad alanina sono stati realizzati presso il Laboratorio di Fisica dell'ISS seguendo un procedimento originale, oggetto di brevetto industriale, che è stato messo a punto presso lo stesso ISS. Essi vengono ottenuti per compressione da una miscela di alanina (80%) e paraffina (20%) in forma di cilindri solidi di dimensioni

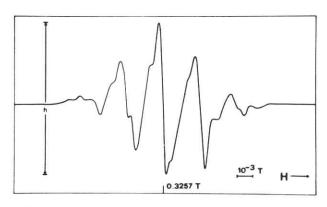


Fig. 1. - Spettro ESR di un dosimetro ad alanina (Dw = 100 Gy).

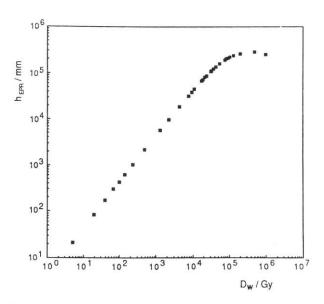


Fig. 2. - Curva di calibrazione dei dosimetri ad alanina determinata nel caso dei raggi gamma del cobalto-60. Le altezze picco-picco sono riferite ad un'amplificazione strumentale pari a 10<sup>4</sup>.

Ø = 4,8 mm, l = 16 mm. Il prodotto finale è un dosimetro a stato solido di elevata resistenza meccanica che può essere maneggiato senza eccessive precauzioni e che può essere inviato ai centri di irraggiamento e/o di lettura per posta. Tale mezzo di trasporto è stato appunto scelto per il trasferimento dei dosimetri utilizzati nella presente indagine. Ciascun dosimetro, inoltre, era posto all'interno di un opportuno contenitore in perspex per l'equilibrio elettronico (Fig. 3). Contenitori e dosimetri sono stati numerati per una facile identificazione degli stessi in rapporto al tipo di prova effettuata.

L'incertezza con cui è possibile determinare la dose assorbita in acqua (D<sub>w</sub>) con i dosimetri ad alanina, dipende dal valore di dose. Il tipo di applicazioni che gli impianti di irraggiamento partecipanti all'indagine effettuano prevede di impartire una dose al prodotto di circa 2,5 10<sup>4</sup> Gy. In tali condizioni l'incertezza complessiva su D<sub>w</sub> è pari al 3,8%; questo valore deriva dalla combinazione quadratica dell'incertezza sistematica dovuta alla calibrazione (3%) e dell'incertezza di tipo stocastico (2,3%) legata alla non riproducibilità strumentale e alla disomogeneità di risposta dei dosimetri ad alanina.

Il corretto uso della dosimetria ad alanina richiede la conoscenza di alcuni fattori correttivi legati, ad esempio, alla temperatura di irraggiamento e alle condizioni di temperatura e umidità durante il periodo di conservazione. Per quanto riguarda il primo, è stato osservato un aumento,  $\Delta h$ , di h all'aumentare della temperatura alla quale si trovano i dosimetri durante la fase di irraggiamento pari a:

## $\Delta h/(h \Delta t) = 0.002 \, ^{\circ}C^{-1}$

Per quanto riguarda invece le variazioni di h associate alle diverse condizioni di temperatura e umidità relativa (U.R.) dell'ambiente in cui i dosimetri vengono conservati nel periodo intercorrente tra l'irraggiamento e la lettura, non si è osservata nessuna variazione significati-

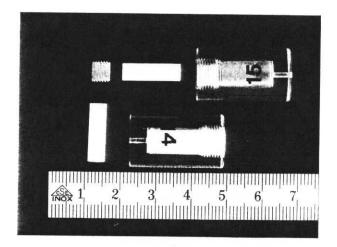


Fig. 3. - Dosimetri ad alanina realizzati presso il Laboratorio di Fisica dell'ISS ed utilizzati come riferimento nella presente indagine. E' mostrato anche il contenitore per l'equilibrio elettronico utilizzato nel caso della radiazione gamma del cobalto-60.

va per valori di temperatura pari a 20 °C e di U.R. pari a 40-60%, per tempi anche superiori a due anni. Piccole variazioni si sono riscontrate in condizioni di temperatura e U.R. superiori, fino a un valore massimo del 5%, per t = 45 °C e U.R. = 85%. Per poter applicare i relativi fattori correttivi, è stato chiesto ad ogni impianto di specificare le condizioni ambientali durante l'irraggiamento e il periodo di conservazione dei dosimetri.

Per quanto riguarda i metodi dosimetrici utilizzati presso gli impianti partecipanti si è evidenziata, come dimostrano i dati riportati in Tab. 1, una certa omogeneità di comportamento. In particolare vi è da notare che la totalità degli impianti utilizza come dosimetri di campo i dosimetri "red perspex" mod. 4034W forniti dalla ditta inglese Harwell. In tali dosimetri, in seguito all'interazione con la radiazione ionizzante, si osserva un cambiamento nelle proprietà di assorbimento nel visibile. E' possibile allora, avendo effettuato una opportuna calibrazione, utilizzare tali dosimetri per determinare, dal valore di assorbanza ad una specifica lunghezza d'onda (di solito a 640 nm), la dose assorbita in acqua. Applicando le opportune correzioni, quale quella per lo spessore del dosimetro, l'incertezza complessiva nella misura di dose dovrebbe risultare pari al 5% ad un livello di confidenza del 95% (M.F. Watts, 1987; comunicazione personale).

La Fig. 4 mostra uno schema semplificato di un impianto di irraggiamento industriale che è riconducibile, con le opportune modifiche che caso per caso si renderebbero necessarie, a quello degli impianti partecipanti. Gli elementi essenziali sono: a) la camera calda, che è un bunker schermato dove avviene l'irraggiamento del prodotto; b) la sorgente radioattiva, di attività solitamente compresa tra 370 e 37000 TBq (104 - 106 Ci), in forma di barre di cobalto-60 sostenute da una rastrelliera metallica che può essere portata in due posizioni diverse: on: quando la sorgente si trova nella "camera calda"; off: condizione di riposo durante la quale la sorgente viene collocata in posizione di sicurezza in un apposito locale schermato, usualmente alla profondità di qualche metro in una piscina riempita con acqua; c) il sistema di trasporto del materiale da irradiare che consente il passaggio degli imballi davanti alla sorgente. Tale sistema è realizzato in modo tale da consentire un irraggiamento il più omogeneo possibile dei prodotti e tale da garantire una permanenza in camera calda per il tempo sufficiente per il trattamento previsto. Il sistema di trasporto automatico, inoltre, si estende anche al di fuori della camera calda per consentire il carico e lo scarico delle merci in continua ed in condizioni di sicurezza per il personale addetto.

### Modalità di intercalibrazione

Obiettivo del programma di intercalibrazione dei sistemi dosimetrici utilizzati negli impianti italiani di irraggiamento industriale è quello di analizzare le incertezze di tipo stocastico e sistematico presenti nelle misure di dose assorbita nel prodotto effettuate di routine presso ciascun impianto, in modo da poter individuare, ove pos-

Tabella 1. - Dati dosimetrici

Impianto	Dosimetro utilizzato	Misure sul fascio	Misure sul prodotto	Frequenza delle valutazioni
-	D. J.	No		
1	Red perspex 4034W - Harwell		Si	Ogni giomo su un pacco campione
		No		
2	Red perspex 4034W - Harwell		Si	Ogni settimana su un pacco campione
3	Red perspex 4034W - Harwell	Si		Ogni caricamento di nuove sorgenti
	4034 W - Harwell		Si	Ogni lotto di materiale
4	Red perspex 4034W - Harwell	Si		Ogni caricamento di nuove sorgenti
	4034 W - Harweii		Si	Ogni lotto di materiale
5	Red perspex	N.P.		
5	4034W - Harwell		Si	N.P.

N.P.: dato non pervenuto

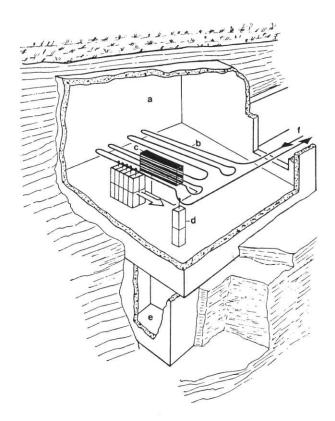


Fig. 4. - Schema di un impianto di irraggiamento industriale: a) camera calda; b) sistema trasporto merce; c) sorgente radioattiva; d) prodotto da irradiare; e) piscina; f) locale carico e scarico merce.

sibile, gli accorgimenti utili a ridurre le incertezze stesse. A tale scopo è stato effettuato un confronto tra la tecnica dosimetrica utilizzata di routine presso l'impianto e la dosimetria ad alanina messa a punto presso l'ISS, secondo la procedura descritta più avanti. Obiettivo ulteriore dell'indagine è quello di valutare la necessità di predisporre raccomandazioni sulle procedure di misura di dose al prodotto in modo da standardizzare le stesse e rendere confrontabili i risultati.

Il programma si è articolato in diverse fasi: innanzitutto è stato inviato a ciascun impianto operante in
Italia un invito a partecipare, insieme ad un questionario
sulle caratteristiche dell'impianto e della dosimetria
impiegata. Sul territorio nazionale attualmente operano
7 impianti di irraggiamento a fini industriali che
utilizzano sorgenti di cobalto-60 per la sterilizzazione di
presidi medico-chirurgici. Di questi solamente 5 hanno
aderito al presente programma. Inoltre, è attualmente in
fase di realizzazione un impianto per il trattamento
antigermogliativo delle patate. Successivamente sono
stati inviati a ciascun impianto 30 dosimetri ad alanina
per effettuare le prove di irraggiamento richieste finalizzate a:

- confronto fra la dosimetria di routine e la dosimetria
   ESR considerata come riferimento;
  - stima del fattore di omogeneità;
- valutazione del grado di riproducibiltà della dose al prodotto.

Nel corso delle prove, descritte in dettaglio nel seguito, sono stati irradiati anche i dosimetri utilizzati normalmente presso l'impianto. Il responsabile di ciascun impianto ha quindi provveduto ad inviare al Laboratorio di
Fisica dell'ISS sia i dosimetri ad alanina irradiati, sia i
dati dosimetrici ricavati con la propria dosimetria di routine. I dati ottenuti sono stati dapprima analizzati presso
lo stesso ISS e poi discussi con i responsabili dei singoli impianti, con l'impegno di mantenere l'anonimato
nel momento della diffusione dei risultati stessi.

Qui di seguito vengono riassunte le tre prove da effettuare:

Prima prova. - Confronto fra la dose misurata dall'esercente e quella misurata, nelle identiche condizioni di irraggiamento, con il dosimetro ad alanina. A questo scopo è stato richiesto di effettuare un irraggiamento statico ad un valore di dose assorbita in acqua pari a 25 kGy (2,5 Mrad) utilizzando contemporaneamente 3 dosimetri ad alanina. La dose doveva essere valutata per mezzo di misure effettuate con la dosimetria di routine utilizzata presso l'impianto.

Seconda prova. - Determinazione del rapporto di omogeneità nel prodotto irradiato. Dovevano essere individuate due situazioni di irraggiamento significativamente differenti sia per il tipo di prodotto che per il suo confezionamento (Tab. 2, situazioni individuate dalle lettere B e C). Per ogni situazione operativa si dovevano collocare, all'interno del prodotto, un dosimetro ad alanina ed uno di routine sia in una delle zone in cui si riteneva, sulla base della propria esperienza, di avere il massimo della dose, sia in una in cui si riteneva di avere una situazione di minimo. Tale operazione andava ripetuta 3 volte per ciascuna delle due situazioni prescelte. E' stato richiesto, inoltre, che tali operazioni venissero effettuate sufficientemente intervallate nel tempo (ad esempio una al giorno).

Terza prova. - Valutazione del grado di riproducibilità della dose impartita al prodotto. Per le stesse situazioni di irraggiamento B e C individuate nella seconda prova, si dovevano porre un dosimetro ad alanina ed uno di routine in un punto prefissato nel prodotto. Tale operazione andava ripetuta 6 volte per ciascuna delle due situazioni operative prescelte, posizionando i dosimetri sempre

nello stesso punto. Anche in questo caso è stato richiesto che tali operazioni venissero effettuate sufficientemente intervallate nel tempo.

Per effettuare le prove descritte sono necessari 27 dosimetri ad alanina. In realtà ogni impianto ha ricevuto 30 dosimetri, di cui 2 di riserva ed uno di riferimento per tenere in conto eventuali contributi alla dose assorbita derivanti da situazioni non note e non controllabili durante le fasi di trasporto e di conservazione.

Per quanto riguarda le condizioni di conservazione, infine, è stato esplicitamente fatto presente che le condizioni ottimali sono: buio, t = 20 °C, U.R. = 60%.

### Risultati

I risultati ottenuti nel corso della presente indagine sono presentati nelle Figure da 5 a 10 e nelle Tab. 2 e 3. Per chiarezza è opportuno fare riferimento ad ognuna delle tre prove separatamente.

Prima prova (confronto tra le dosimetrie). - La maggior parte degli impianti si è dichiarata non disponibile ad effettuare un irraggiamento statico come quello previsto perché ciò avrebbe comportato l'arresto dell'impianto. Comunque, poiché anche per le altre prove è stato richiesto di utilizzare sempre un dosimetro di routine insieme ad uno ad alanina, è stato possibile effettuare il previsto confronto tra le due dosimetrie, utilizzando tutti i dati disponibili relativi alle tre prove.

Le Fig. 5-9 riportano i risultati ottenuti per ciascun impianto. Per mantenere il completo anonimato degli impianti partecipanti, a ciascuno è stato associato un numero da 1 a 5. In ascisse è riportato il numero del dosimetro utilizzato ed in ordinate il rapporto (R) fra il valore di dose assorbita in acqua determinato con il dosimetro di routine e quello determinato con il corrispondente dosimetro ad alanina. La linea continua rappresenta il valor medio di R, mentre le due linee tratteggiate delimitano l'intervallo di variabilità attesa (± 5% di R) ottenuto come combinazione quadratica delle incertezze stocastiche associate alle due dosimetrie.

In Fig. 10 è riportato, per ciascun impianto, il valor medio di R con la sua incertezza, valutata al 95% del li-

Tabella 2. - Rapporto di omogeneità

Impianto		1		2		3		4		5
Prodotto	В	С	В	С	В	С	В	С	В	C
Densità media (kg/m³)	88,2	98,8	120		200	100	110	190	N.P.	N.P
Rapporto di omogeneità	1,06	1,06	1,07		1,15	1,15	1,04	1,02	2,90	1,36

vello di confidenza. Le due linee tratteggiate delimitano l'intervallo di variabilità attesa in base alle incertezze sistematiche associate all'uso delle due dosimetrie.

Seconda prova (fattore di omogeneità). - La Tab. 2 riporta, per ciascun impianto e per le due situazioni indicate con le lettere B e C, il valor medio del rapporto di omogeneità, calcolato sulla base dei valori di dose determinati con i dosimetri ad alanina. In tabella è indicata anche la densità media del prodotto irradiato nelle due situazioni.

 $Terza\ prova\$ (riproducibilità). - I risultati ottenuti sono riportati nella tabella 3.  $D_w$  è il valor medio di dose assorbita in acqua, misurato con l'alanina, per i 6 irraggiamenti successivi richiesti. In questa prova, finalizzata

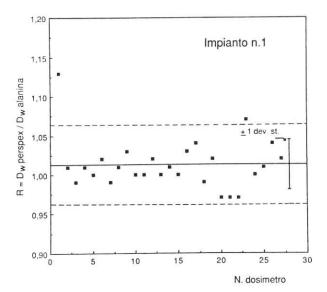


Fig. 5. - Confronto fra la dosimetria di routine ("red perspex") e la dosimetria ad alanina nel caso dell'impianto n. 1. La linea continua rappresenta il valore medio di R, mentre le due linee tratteggiate delimitano l'intervallo di variabilità attesa (± 5% di R) in base alle incertezze di tipo stocastico.

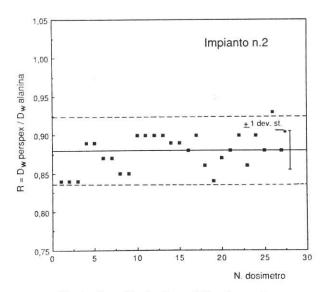


Fig. 6. - Come Fig. 5 nel caso dell'impianto n. 2.

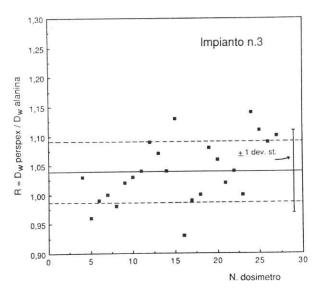


Fig. 7. - Come Fig. 5 nel caso dell'impianto n. 3.

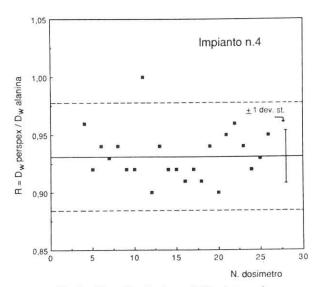


Fig. 8. - Come Fig. 5 nel caso dell'impianto n. 4.

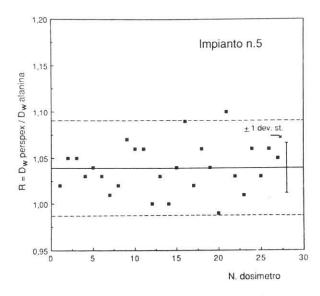


Fig. 9. - Come Fig. 5 nel caso dell'impianto n. 5.

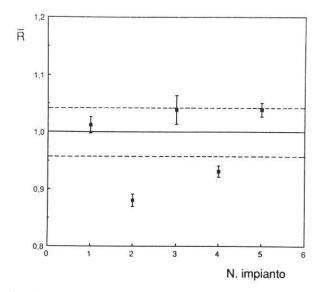


Fig. 10. - Valore medio del rapporto (R) fra la dose misurata con il dosimetro di routine del singolo impianto ("red perspex") e quella misurata con il dosimetro ad alanina. Le linee tratteggiate delimitano la zona di variabilità attesa in base alle incertezze sistematiche. Le barre verticali indicano l'incertezza, calcolata al 95% del livello di confidenza, che caratterizza ogni valore di R.

Tabella 3. - Test di riproducibilità

Impianto	Prodotto	D <sub>w</sub> /kGy	D.S. (%)
1	В	26,8	2,7
	C	26,4	2,4
2	В	28,8	2,4
	С	27,4	2,6
3	В	22,9	3,8
	С	16,4	2,9
4	В	30,2	1,7
	C	29,3	1,8
5	В	26,3	4,2
	C	27,1	2,5

D.S.: deviazione standard

a valutare la capacità di ciascun impianto di impartire sempre la stessa dose al prodotto, il parametro significativo è rappresentato dalla deviazione standard (D.S.) dei 6 valori di dose ottenuti per ciascun impianto.

#### Discussione

Dai dati riportati nelle Fig. 5-9 è possibile trarre alcune conclusioni relative alla riproducibilità del sistema dosimetrico utilizzato presso ciascun impianto. Nell'ipotesi di un loro corretto impiego, la riproducibilità dei dosimetri "red perspex" può essere contenuta entro il 4% al 95% del livello di confidenza [5]; questo valore, combinato con quello relativo alla dosimetria ESR (3%), è

stato utilizzato per delimitare una banda di oscillazione prevista, pari al 5%, del valore di R. Un esame delle Fig. 5-9 mostra che tale previsione non è sempre verificata. Ciò può essere attribuito a vari fattori, quali:

- mancata o non corretta applicazione, per ciascun dosimetro "red perspex", del fattore correttivo che tiene conto del suo spessore reale, rispetto a quello nominale per cui è valida la curva di calibrazione;
- uso di uno spettrofotometro con scarse caratteristiche di riproducibilità;
- uso di procedure che non tengono in conto eventuali effetti dovuti a variazioni di temperatura, umidità relativa, intervallo di tempo tra l'irraggiamento e la lettura dei dosimetri, condizioni di conservazione dei dosimetri.

A queste cause di non riproducibilità, che possono almeno parzialmente essere controllate, vanno aggiunte altre fonti che invece non possono essere eliminate, quali le condizioni di irraggiamento. Infatti non è raro che il dosimetro venga irradiato per un periodo lungo, a ratei di esposizione variabili e a temperature diverse da quelle di calibrazione. E' evidente, allora, che uno sforzo può e deve essere fatto per raggiungere un livello di riproducibilità del sistema dosimetrico vicino al valore ottimale; il miglioramento della riproducibilità può essere raggiunto sviluppando una procedura standardizzata per l'utilizzo dei dosimetri, con particolare attenzione a quelle fasi che più possono contribuire a fare aumentare l'incertezza di tipo stocastico.

Da un esame della Fig. 10 si possono, invece, trarre alcune conclusioni riguardo alla accuratezza con cui viene misurata la dose assorbita presso i vari impianti.

Nel caso dell'impianto n. 1 per cui il valore medio di R, con la sua incertezza, rientra nell'intervallo di variabilità atteso, si può affermare che non esistono differenze significative tra i valori di dose misurati con la dosimetria di routine e quelli determinati con la dosimetria ad alanina; in altri termini l'utente non introduce contributi all'incertezza sistematica tipica della dosimetria con "red perspex".

All'estremo opposto si collocano invece gli impianti n. 2 e n. 4 per i quali il valor medio di R è significativamente diverso da 1. Ciò significa che esiste una fonte di incertezza sistematica dovuta ad un uso non corretto del sistema dosimetrico; in particolare, la dose assorbita viene sempre sottostimata e ciò ha implicazioni sia di tipo economico, in quanto il prodotto viene irradiato per un tempo superiore a quello necessario, che di tipo sanitario, in quanto si può avere una diminuizione di qualità o di salubrità del prodotto stesso.

La situazione è invece diversa per gli impianti n. 3 e n. 5 in cui si ha una sovrastima sistematica significativa della dose al prodotto; considerando anche l'incertezza su R, in questi casi si possono verificare situazioni in cui parte del prodotto riceve una dose inferiore a quella ritenuta ottimale per il trattamento previsto.

I contributi alla incertezza sistematica introdotti nell'uso della dosimetria di routine possono provenire da:

- uso di uno spettrofotometro non tarato:
- procedure di lettura dei dosimetri di routine sistematicamente differenti da quelle utilizzate per la determinazione della curva di taratura;

 condizioni di irraggiamento dei dosimetri di routine differenti da quelle usate per la calibrazione (rateo di dose, temperatura di irraggiamento, ecc.).

E' allora necessario non solo che l'utente ricavi sperimentalmente la curva di calibrazione per il proprio spettrofotometro alle stesse condizioni in cui vengono utilizzati i dosimetri, ma anche che sia a conoscenza delle caratteristiche del campo di radiazione utilizzato per la calibrazione stessa; solo così potranno essere applicate, per i dosimetri di routine, le opportune correzioni se le condizioni di calibrazione differiscono da quelle di routine.

I dati ottenuti nel corso delle prove n. 2 e n. 3 hanno fornito alcune indicazioni sulla dose al prodotto trattato. In particolare i valori ottenuti per il rapporto di omogeneità (Tab. 2) dimostrano che in un solo caso (impianto n. 5) la differenza tra il valore massimo e minimo di dose all'interno del prodotto è così elevata da prefigurare situazioni in cui parte del prodotto può non ricevere la dose prevista. I risultati ottenuti, tuttavia, non sono da considerare definitivi, in quanto non è stato effettuato uno studio dettagliato della distribuzione di dose all'interno del prodotto, come sarebbe necessario per una corretta valutazione del rapporto di omogeneità.

Per quanto riguarda la prova di riproducibilità (Tab. 3), si può affermare che nella maggior parte dei casi tali variazioni rientrano nei valori di fluttuazione previsti.

Un'analisi globale dei risultati ottenuti nel corso dell'indagine, indica l'esistenza di una probabilità finita, variabile da impianto ad impianto, che non tutto il prodotto irradiato nel corso di un trattamento abbia ricevuto una dose compresa nell'intervallo previsto, e quindi che, per una parte del prodotto, non siano stati raggiunti gli scopi prefissati. E' allora indispensabile che presso gli impianti di irraggiamento industriale venga dedicata una maggiore attenzione ai problemi dosimetrici e che vengano stabilite delle procedure standardizzate per l'uso delle tecniche dosimetriche di routine, in modo che l'esercente possa essere in grado di garantire, con un certo livello di confidenza, che tutto il prodotto trattato abbia ricevuto una dose superiore al minimo richiesto e inferiore al valore al di sopra del quale il prodotto potrebbe subire modificazioni non volute.

Si sottolinea infine come, per il raggiungimento degli obiettivi suddetti, la attuazione di programmi di interconfronto come il presente sia di primaria importanza al fine di individuare le fonti di errore e quindi di intervenire per la ottimizzazione dell'uso dell'impianto.

Ricevuto il 12 luglio 1988. Accettato il 2 novembre 1988.

#### BIBLIOGRAFIA

- MC LAUGHLIN, W.L. 1985. Standardization of high-dose measurement of electron and gamma ray absorbed doses and dose rates. In: High-dose dosimetry. Proceedings of a Symposium. Vienna, 8-12 ottobre 1984. IAEA-SM 272/44: 357-371.
- PANTA, P.P. & BULHAK, Z. 1985. Statistical and metrological aspects of 20 years' experience of radiation processing in Poland. In: High-dose dosimetry. Proceedings of a Symposium. Vienna, 8-12 ottobre 1984. IAEA-SM 272/26: 47-60. Research in radiation processing dosimetry. 1984. IAEA-TECDOC-321
- 3. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. 1984. Research in radiation processing dosimetry. IAEA- TECDOC-321.
- BARTOLOTTA, A., INDOVINA, P.L., ONORI, S. & ROSATI, A. 1984. Dosimetry for cobalt-60 gamma rays with alanine. Radiat. Prot. Dosim. 9: 227-281.
- CADWICK, K.H. 1977. Precision and accuracy in radiation processing and sterilization. In: Ionizing radiation metrology. E. Casnati (Ed.). Editrice Compositori, Bologna. pp. 475-487.