

MICROCOPY RESOLUTION TEST CHART  
 NATIONAL BUREAU OF STANDARDS  
 STANDARD REFERENCE MATERIAL 1010a  
 (ANSI and ISO TEST CHART No. 2)

17390025

ENEA



COMITATO NAZIONALE PER LA RICERCA E PER LO SVILUPPO  
DELL'ENERGIA NUCLEARE E DELLE ENERGIE ALTERNATIVE

# **APPLICAZIONI DI UN SISTEMA PER DOSIMETRIA AMBIENTALE A TERMOLUMINESCENZA CARATTERISTICHE E PRESTAZIONI**

S. BORTOLUZZI

ENEA - Dipartimento Ciclo del Combustibile, Centro Ricerche Energia Saluggia

RT/COMB/88/11

**Testo pervenuto nel dicembre 1988**  
***Progetto Enea: Istituti o Centri (IN)***

**I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'Enea  
rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'ente.**

**Summary:**

In this report, we present the characteristics and performances of an ambiental monitoring system with thermoluminescence dosimetry.

Most of this work talk about which are the principal physical parameters necessary for measuraments of ambiental dose.

In the end of this report are illustrated some measures of level dose in the environment around the site of the ENEA Center of Energy Research - Saluggia (Italy).

**Riassunto:**

In questo rapporto, presentiamo le caratteristiche e le prestazioni di un sistema di monitoraggio ambientale con dosimetri a termoluminescenza.

Il lavoro tratta principalmente su quali sono le grandezze fisiche necessarie al misura della dose ambientale.

Infine, sono illustrate alcune misure dei livelli di dose ambientali registrati attorno al sito del Centro Ricerche Energia dell'ENEA - Saluggia (Italia).

## **Premessa**

La Rete di Sorveglianza Ambientale istituita attorno agli impianti nucleari del C.R.E. di Saluggia prevede misure trimestrali di dose, mediante dosimetri a termoluminescenza (TLD). Negli anni scorsi tali misure sono state eseguite dal PAS di Bologna, con TLD a LiF del tipo ad anello, comunemente usati nella dosimetria del personale. Le caratteristiche non ottimali di questi dosimetri, per misure di fondo ambientale, hanno portato alla loro sostituzione con dosimetri a bulbo con cristalli di  $\text{CaF}_2(\text{Mn})$ . Inoltre onde poter procedere in maniera autonoma alle misure si è dotato il nostro Laboratorio (FISM) della strumentazione necessaria per effettuare la lettura dei dosimetri. Pertanto si è provveduto, presso il laboratorio del PAS di Bologna, al controllo della strumentazione e alla determinazione dei parametri necessari per la stima della dose assorbita dal dosimetro.

Gli scopi di questo rapporto tecnico sono di presentare le caratteristiche fondamentali del tipo di TLD adottato, e di descrivere i criteri e le metodologie seguite per la taratura della strumentazione necessaria per la lettura dei dosimetri.

Inoltre, sono riportate le stime sperimentali delle caratteristiche strumentali dei dosimetri e delle apparecchiature utilizzate.

### **A) Caratteristiche dei TLD ad uso ambientale**

Per applicazioni di monitoraggio ambientale, i TLD dovrebbero possedere le caratteristiche seguenti:

- 1) grande precisione e riproducibilità della misura nell'intervallo di interesse (0,1-1 mSv);
- 2) bassa perdita di informazione (fading) nel periodo di esposizione;
- 3) scarsa sensibilità agli agenti ambientali quali luce, temperatura, umidità;
- 4) basso tasso di auto-irraggiamento.

L'American National Standard [1] riporta i criteri per valutare la idoneità dei TLD nelle applicazioni di dosimetria ambientale (Tabella I).

**Tabella I:** *Criteri di valutazione dei TLD*

Uniformità con la partita <sup>1</sup>	±15%
Riproducibilità di un TLD <sup>1</sup>	±5%
Dipendenza dall'energia (30keV-3MeV)	
per E > 80 keV	≤20%
per E < 80 keV	fattore 2
Dipendenza direzionale durante la rotazione tra due piani ortogonali	±10%
Dipendenza dalla luce	≤10%
Dipendenza dall'umidità	≤10%
Autoirraggiamento <sup>2</sup>	≤10μR h <sup>-1</sup>

<sup>1</sup> Per un' intensità di esposizione pari a 10 μR h<sup>-1</sup> durante un ciclo di misura con un livello di confidenza del 95%.

<sup>2</sup> Per un periodo di tempo  $t$ , eguale a quello del periodo di misura in "campo".

I TLD tipicamente usati per il monitoraggio delle radiazioni nell'ambiente, vengono presentati in tabella II, sono altresì date le caratteristiche di massima di ciascun materiale, quali  $Z_{eff}$ , fading, tasso di autoirraggiamento e limite inferiore di esposizione (LDL) [4]-[6].

**Tabella II:** *Caratteristiche dei TLD usati per il monitoraggio ambientale*

cristallo	$Z_{eff}$	Fading (%/mese)	Autoirr. (nSv h <sup>-1</sup> )	LDL (μSv)
LiF(TLD100)	8,2		-	30
Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> :Mn	7,4	≤10	-	-
CaF <sub>2</sub> :Mn	16,3	5	70-220	2,1
CaF <sub>2</sub> natural	16,3		90-138	<1
CaF <sub>2</sub> :Dy(TLD200)	16,3			1,1
CaSO <sub>4</sub> :Dy	15,5	<2		7,1

Tra i materiali termoluminescenti sopra riportati si è preferito il  $\text{CaF}_2(\text{Mn})$ . Questo rispetto al LIF, precedentemente usato, presenta due vantaggi principali:

1) alta sensibilità, tanto che la minima dose determinabile è un inferiore di circa un ordine di grandezza,

2) ampio intervallo di linearità tra equivalente di dose e risposta.

Il cristallo con una singola emissione di luce con  $\lambda=55 \text{ \AA}$ , presenta un campo di linearità di risposta tra  $1 \mu\text{Sv}$  e  $10 \text{ Sv}$ , fenomeni di sovralinearietà e di saturazione intervengono a  $100 \text{ Sv}$ . Il  $\text{CaF}_2$  presenta uno  $Z_{\text{eff}}$ , non equivalente a quello del tessuto molle, inoltre la risposta a fotoni con energie a bassa energia ( $80 \text{ KeV}$ ) [2]-[3], non è costante ed è anche 15 volte più sensibile rispetto alle radiazioni gamma di energia maggiore, ciò comporta l'uso di appropriati schermi.

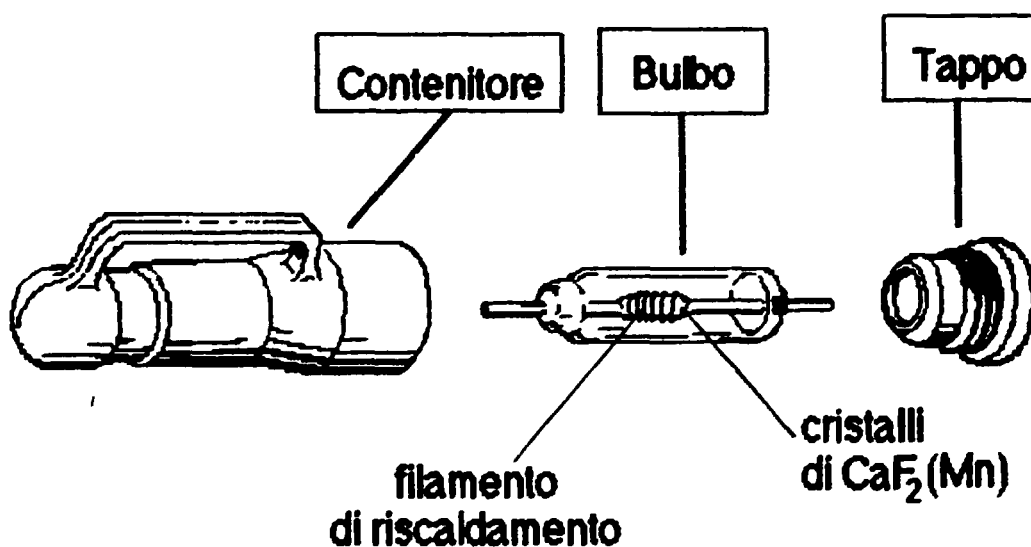
La regressione col tempo dell'informazione accumulata (fading) è contenuta data la mancanza di trappole energeticamente poco profonde, né viene incrementato dalla luce solare o è sensibile alla temperatura ambientale, non è quindi necessario procedere a cicli termici di pre-lettura (pre-annelling) per i picchi di emissione a bassa temperatura.

### **B) Sistema di lettura dosimetrica:**

Il dosimetro consiste in due cristalli di  $\text{CaF}_2(\text{Mn})$  incapsulati in un bulbo di vetro, i cristalli sono avvolti da un filamento che serve per il riscaldamento necessario durante le operazioni di lettura. La capsula di vetro è collocata all'interno di un contenitore di materiale plastico, rivestito internamente con tre materiali diversi: alluminio, stagno e piombo (figura 1).

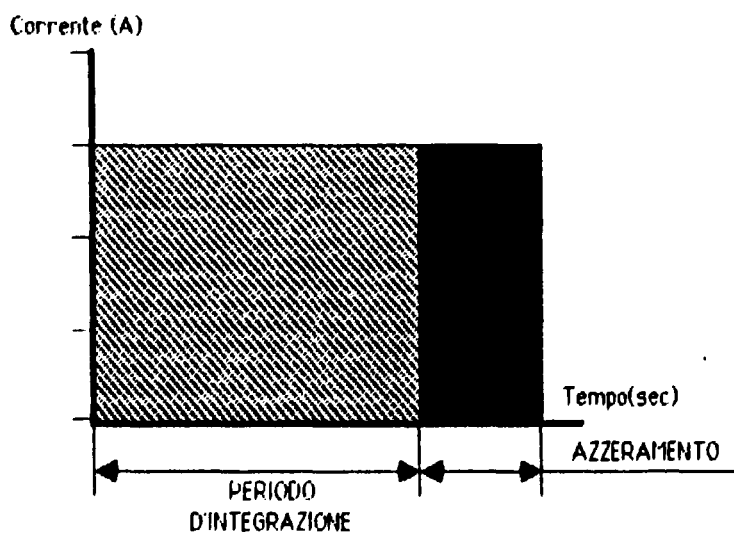
Il sistema di lettura del TLD, costruito dalla Harshaw, consiste nel Thermoluminescence Detector Model 2000P e nell' Automatic Integrating Picoammeter Model 2000B.





*Figura 1: Rappresentazione del dosimetro a bulbo*

Per la lettura il bulbo dosimetrico tolto dal contenitore viene posizionato sul lettore, questo provvede a far circolare, per un dato periodo di tempo, una corrente costante prefissata attraverso il filamento riscaldando così, per effetto Ohm, i cristalli. Il profilo di corrente viene visualizzato in figura 2.



*Figura 2: Profilo di corrente durante la lettura*

Il periodo di integrazione viene scelto dall'operatore, la luce emessa dai cristalli viene raccolta tramite un sistema di lenti e specchi su di un fotomoltiplicatore, il quale la converte in un segnale elettrico integrato dall'elettrometro del 2000B. L'operazione di "azzeramento", successiva alla fase di integrazione della luminescenza emessa, è necessaria per eliminare completamente dal dosimetro gli eventuali segnali residui.

Il "segnale di dose zero", lettura del dosimetro scarico, è dovuto al sommarsi delle correnti di fondo del fototubo (dark current) e delle emissioni infrarosse del filamento e del cristallo. Il segnale di dose zero deve essere determinato per correggere le letture e per valutare la soglia di rilevazione del sistema. Questa viene assunta [5]-[7] pari a 1/10 volte la  $\sigma$  del segnale di dose zero.

### **C) Definizione delle condizioni operative per la lettura del TLD e determinazione delle caratteristiche strumentali**

Per poter effettuare la determinazione della dose assorbita dal dosimetro si devono determinare sperimentalmente le condizioni operative ottimali. Inoltre si devono quantificare e valutare le seguenti grandezze:

- Sensibilità intrinseca relativa
- Sensibilità del sistema
- Curva di calibrazione
- Fading
- Autoirraggiamento dei dosimetri
- Riproducibilità e omogeneità della risposta del dosimetro.

Il lavoro sperimentale necessario per determinare le caratteristiche sopra riportate è stato effettuato presso i laboratori del PAS-DOSI di Bologna.

#### *- Condizioni operative ottimali*

1) intervallo di integrazione del lettore della durata di 14 secondi, questo parametro è stato scelto, onde poter raccogliere l'integrale massimo della "Glow curve", cioè la quantità massima di luce con il minimo contributo dei segnali di fondo;

2) un'intensità di corrente applicata al filamento di riscaldamento di 6 ampere,

3) tensione applicata al fototubo di 590 Volt,

4) il soppressore di corrente regolato in modo tale da avere una corrente di fondo di circa 3 pA.

Utilizzando queste condizioni si è proceduto alle prove di valutazione e taratura del sistema.

- *Sensibilità intrinseca relativa*

I dosimetri sono stati irraggiati tutti ad una stessa dose di 200  $\mu\text{Sv}$ , ogni dosimetro è stato successivamente letto. Dell'intera serie di misure è stato calcolato il valor medio. È stato posto come fattore correttivo per la risposta del dosimetro il termine riportato dalla (1). I risultati dettagliati sono riportati in appendice A.

$$(1) \quad f_i = \frac{\bar{L}}{L_i}$$

dove con  $\bar{L}$  media delle letture dei dosimetri,  $f_i$  fattore correttivo dell' $i$ -esimo dosimetro,  $L_i$  lettura dell' $i$ -esimo dosimetro.

- *Sensibilità del sistema)*

La soglia di rilevazione di un dosimetro viene definita nel fascicolo UNI 4892 [5] come la minima dose valutata per la quale il valore di lettura di un dosimetro è diverso in modo significativo (al livello di confidenza del 95%) dal valore di un dosimetro non irradiato. Il metodo di prova propone di preparare dieci dosimetri e leggerli. Lo scarto  $\sigma$  delle letture di dose zero è convertito in termini di dose  $\sigma_d$ , dalla definizione ricaviamo  $D \geq 2,3 \cdot \sigma_d$  (dove 2,3 è il valore del  $t$  di Student per 9 gradi di libertà).

Dalle prova precedente possiamo estrarre dieci valori di dose zero, valutati nelle nostre condizioni operative, ricaviamo un valore di sensibilità pari a 8  $\mu\text{Sv}$ .

- *Curva di calibrazione*

Per valutare la risposta del dosimetro in funzione dell'esposizione è stata usata una sorgente monoenergetica ( $\text{Cs}^{137}$ ). Nove gruppi di sei dosimetri sono stati irraggiati con un valore di dose crescente (da 58  $\mu\text{Sv}$  a 1,31 mSv). Dopo aver letto i dosimetri si è calcolato per ogni gruppo il valor medio e la deviazione standard dei valori, corretti per il valore di

zero dei dosimetri e il fattore di correzione per l'omogeneità, secondo la (2).

$$(2) \quad \bar{L} = \frac{\sum_{i=1}^n (L_i - L_i^0) * f_i}{n}$$

con  $L_i^0$  lettura di dose zero dell'iesimo dosimetro.

I risultati finali sono riportati in tabella III mentre nella Appendice B sono raccolti i risultati relativi ai singoli gruppi di dosimetri.

**Tabella n° III: Risposta dei dosimetri**

dose ( $\mu\text{Sv}$ )	Lettura (nC)
5,800E+01	0,472 $\pm$ 0,01
1,100E+02	0,85 $\pm$ 0,023
1,680E+02	1,347 $\pm$ 0,041
2,200E+02	1,715 $\pm$ 0,037
3,300E+02	2,664 $\pm$ 0,072
4,390E+02	3,525 $\pm$ 0,059
6,590E+02	5,406 $\pm$ 0,186
8,780E+02	7,035 $\pm$ 0,193
1,317E+03	10,6 $\pm$ 0,23

L'andamento dei valori di dose in funzione della risposta dei dosimetri è chiaramente, per i valori di dose considerati, lineare. Interpolando i dati con una curva di primo grado possiamo risalire ai parametri della curva e in particolare al coefficiente angolare della retta, il quale fornisce il termine di conversione tra l'integrale della carica elettrica e lo equivalente di dose. Nelle nostre condizioni sperimentali è pari a 0,123 mSv/nC (figura 3).

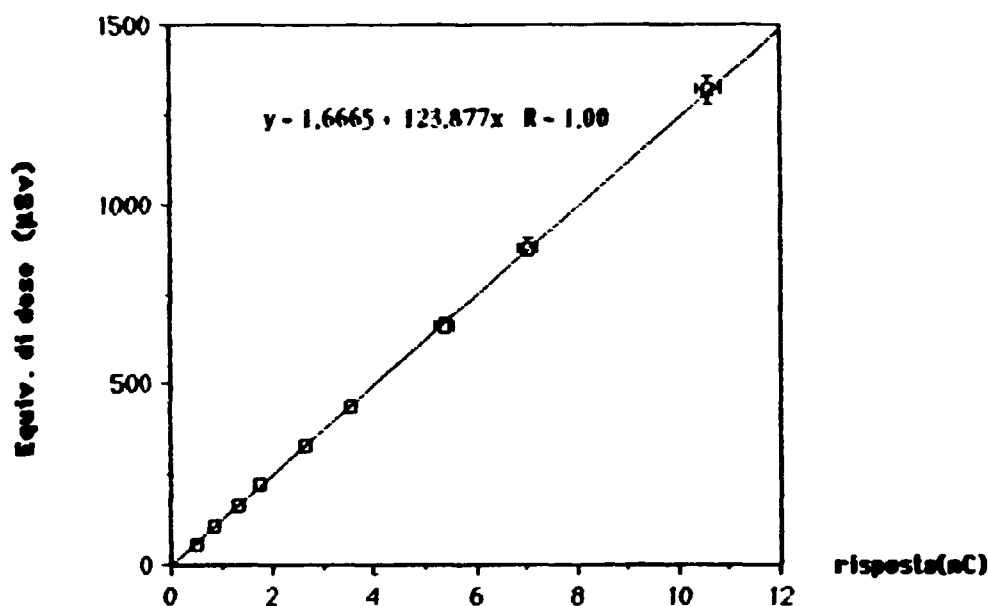


Figura 3: Risposta dei dosimetri a valori di dose crescenti

#### - Fading

La perdita di informazione (Fading) dei dosimetri nel tempo, è stata rilevata irraggiando a 0,878 mSv sei gruppi di cinque dosimetri ciascuno. Per valutare il contributo del fondo ambientale si è azzerato contemporaneamente al momento dell'irraggiamento altrettanti gruppi di cinque dosimetri, per fungere da "testimone". I dosimetri irraggiati e i "testimoni" sono stati letti a intervalli di tempo prefissati, per ogni intervallo di tempo è stato calcolato il valore medio delle letture e la deviazione standard. Il valore di Fading è calcolato con la (3).

$$(3) \quad fd(t) = \frac{\bar{L}(t_0) - [\bar{L}(t) - \bar{B}(t)]}{\bar{L}(t_0)}$$

$fd(t)$  è il fading,  $\bar{L}(t_0)$  lettura al momento dell'irraggiamento,  $\bar{L}(t)$  lettura dei dosimetri irraggiati al tempo  $t$ ,  $\bar{B}(t)$  lettura dei testimoni al tempo  $t$ .

I valori ottenuti sono riassunti nella tabella IV e in figura 4 e sono in accordo con i dati in bibliografia [2]-[3]. Nell'appendice C sono riportati i risultati in dettaglio.

Tabella IV: Fading

Tempo (giorni)	Fading
1	$4,797E-02 \pm 1,391E-03$
2	$6,065E-02 \pm 2,403E-03$
5	$9,332E-02 \pm 2,527E-03$
9	$1,077E-01 \pm 2,890E-03$
15	$1,218E-01 \pm 5,776E-03$
30	$1,425E-01 \pm 6,734E-03$

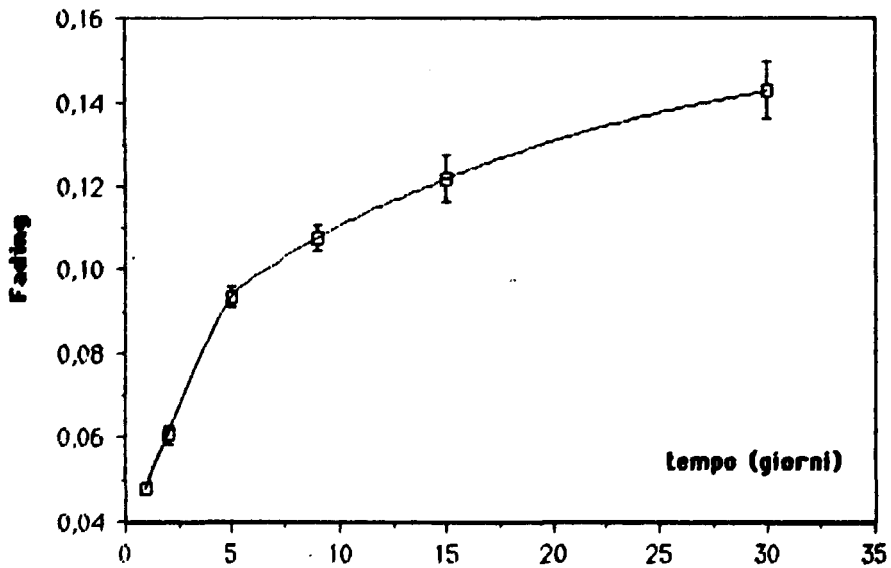


Figura 4: Andamento del Fading in funzione del tempo

*- Autoirraggiamento dei dosimetri*

L'autoirraggiamento consiste nella dose assorbita dal cristallo per effetto della presenza di tracce di radioelementi, essenzialmente il  $K^{40}$  del vetro del bulbo, contenuti nel dosimetro. La misura sperimentale dell'autoirraggiamento è molto complessa, perciò si è preferito assumere il valore determinato in lavori precedenti presso il PAS-DOSI. Detto valore è pari a  $7,7 \text{ nSv/h} \pm (10\%)$ .

*- Riproducibilità e omogeneità della risposta*

Per valutare la riproducibilità e l'omogeneità, due gruppi di dieci dosimetri sono stati irraggiati a due diversi livelli di dose ( $0,11$  e  $0,88 \text{ mSv}$ ) e successivamente sono stati letti, l'operazione sopra riportata è stata ripetuta cinque volte per ogni dosimetro.

In questo modo è stato possibile calcolare per ogni dosimetro e per ogni gruppo di dosimetri gli scarti relativi. In Appendice D sono riportate le misure effettuate, la riproducibilità dei dosimetri è risultata ottima, in perfetto accordo con le qualità intrinseche del cristallo. Infatti ai bassi livelli di irraggiamento lo scarto massimo non supera il  $3,9\%$  della misura con un valore minimo pari allo  $0,1\%$ , per dosi più elevate gli scarti diventano minimi con un massimo dello  $1,7\%$ .

Per quanto riguarda l'omogeneità dei dosimetri è stato notato che, anche non utilizzando la relativa correzione lo scarto delle risposte dei dosimetri, non supera il  $5\%$  a  $0,88 \text{ mSv}$  e ha un massimo con  $6,2\%$  a  $0,11 \text{ mSv}$ . Se si utilizzano i coefficienti di correzione i risultati migliorano e si stabilizzano intorno al  $3\%$  del valore letto (Appendice D).

**D) Modalità operative per la lettura dei dosimetri:**

Ogni qualvolta si deve procedere all'impiego di un dosimetro, questo deve essere preventivamente "azzerato", mediante una normale procedura di lettura, onde eliminare la dose precedentemente assorbita.

Durante le operazioni di lettura occorre attendere che l'indicatore della corrente dell'amperometro si stabilizzi a un valore pressoché costante quindi si può procedere al riscaldamento. Letto il dosimetro si deve effettuare la valutazione del fondo. La lettura di fondo (o di dose zero) deve essere eseguita successivamente alla lettura, ma non immediatamente dopo. Infatti è buona norma per non sopravvalutare questo

valore, facendo raffreddare il dosimetro, onde eliminare l'emissioni infrarosse residue della precedente lettura. Inoltre occorre controllare bene la stabilità delle correnti di fondo del fototubo, in modo da effettuare le misure sempre con le stesse condizioni iniziali.

Per passare alla stima dell'equivalente di dose si devono applicare i valori di conversione, di fading ed autoassorbimento in relazione al periodo di tempo in cui i dosimetri sono rimasti esposti (4). Per il valore di fading qualora il periodo sia superiore al mese, si considera che questi non subisca apprezzabili variazioni, si accetta quindi  $FD_{t=30} \cong FD_{t \rightarrow \infty}$ .

$$(4) \quad D(\Delta t) = \frac{k * \sum_{i=1}^n (L_i - L_i^0) * f_i}{n} - I_a * \Delta t$$

dove  $\Delta t$  è il periodo trascorso tra l'azzeramento e la misura,  $D(\Delta t)$  la dose registrata,  $I_a$  è l'intensità di autodose,  $k$  il fattore di conversione in mSv.

Dalla (4) per ovvie considerazioni di propagazione degli errori possiamo stimare la  $\sigma$  associata al termine di dose calcolato (5).

$$(5) \quad \sigma_D = D(\Delta t) * \sqrt{\frac{(k * \sigma_L)^2 + (\Delta t * \sigma_a)^2}{(k * \bar{L} - I_a * \Delta t)^2} + \frac{\sigma_{fd}^2}{[1 - f(\Delta t)]^2}}$$

con  $\sigma_D$  deviazione standard del valore di dose,  $\sigma_L$  e la dev. standard delle letture,  $\sigma_{fd}^2$  la varianza del termine di fading,  $\sigma_a$  la dev. standard associata al valore dell'intensità di autodose.

### **E) Conclusioni:**

Sulla base delle misure sperimentali effettuate durante il lavoro di calibrazione dei dosimetri e della relativa strumentazione, si può affermare che il tipo di TLD scelto possiede le caratteristiche necessarie per essere utilizzate, in maniera ottimale, nella determinazione del valore del fondo gamma ambientale. In particolare, in accordo con quan-



to riportato in letteratura, il sistema nel suo complesso è in grado di registrare le fluttuazioni e discriminare i possibili contributi dovuti al rilascio nell'ambiente di radionuclidi che emettono radiazioni gamma.

Sono state effettuate alcune misure preliminari in campo utilizzando il tipo di TLD adottato. I valori di intensità di dose (vedi appendice), che sono stati ottenuti collocando i dosimetri in alcune delle stazioni di campionamento fissate dalla rete di sorveglianza ambientale del C.R.E. Saluggia, non si discostano dai quelli determinati in media in Piemonte.

Per completare la valutazione sperimentale delle caratteristiche dei TLD è in corso di svolgimento un confronto diretto con i valori di intensità di dose misurati mediante camera ad ionizzazione. Le misure effettuate contemporaneamente e nello stesso posto con una camera ad ionizzazione del tipo Reuter-Stokes e con dosimetri TLD a  $\text{CaF}_2$ , consentiranno di confrontare, su un periodo di tempo prefissato, il valore medio della dose ambientale con il valore di dose fornito dai dosimetri.

### **BIBLIOGRAFIA**

- [1] America National Standard 1975- *Performance, testing and procedural specifications for thermoluminescence dosimetry (environmental application)* - ANSI N545-1975
- [2] H. Dekker- *Some aspects of a  $\text{CaF}_2\text{Mn}$  Thermoluminescent Dosimeter* -Health Physics 30 1976
- [3] G. Portal - *Preparation and properties of principal TL products* - Ispra Courses ATD/6/88
- [4] G. Scarpa - *Primi risultati di uno studio comparato delle caratteristiche dosimetriche di 10 tipi di TL sinterizzato commerciale* - Atti del II incontro di aggiornamento e di studio sulla dosimetria personale PAS/COORBOL (84) I
- [5] UNI 4892 - *Dosimetri a termoluminescenza per dosimetria personale ed ambientale - caratteristiche e metodi di prova*
- [6] E. Piesch - *Environmental thermoluminescence dosimetry* - Ispra Courses ATD/8/88

17/18

[7] G. Busuoli - *Criteri per la valutazione della soglia di rilevazione* IV Incontro di aggiornamento e di studio della dosimetria personale a termoluminescenza (84).

## MISURE DI DOSE AMBIENTALE 87-88

Data azzeramento	24/7/87
Data ritiro	19/10/87
periodo di misura	87

Punti prelievo	dose (mSv)	dev. standard (mSv)	rateo ( $\mu$ Sv/ora)	dev. standard ( $\mu$ Sv/ora)
1	3,3E-01	6,5E-03	1,6E-01	3,1E-03
2	3,6E-01	1,4E-02	1,7E-01	6,7E-03
3	4,6E-01	1,7E-02	2,2E-01	8,1E-03
4	3,6E-01	1,4E-02	1,7E-01	6,7E-03

Data azzeramento	19/10/87
Data ritiro	9/2/88
periodo di misura	113

Punti prelievo	dose (mSv)	dev. standard (mSv)	rateo ( $\mu$ Sv/ora)	dev. standard ( $\mu$ Sv/ora)
1	4,0E-01	1,0E-02	1,9E-01	4,8E-03
2	4,1E-01	8,5E-03	2,0E-01	4,1E-03
3	5,4E-01	2,2E-02	2,6E-01	1,1E-02
4	4,2E-01	1,2E-02	2,0E-01	5,7E-03

Data azzeramento	9/2/88
Data ritiro	14/4/88
periodo di misura	65

Punti prelievo	dose (mSv)	dev. standard (mSv)	rateo ( $\mu$ Sv/ora)	dev. standard ( $\mu$ Sv/ora)
1	2,3E-01	7,4E-03	1,1E-01	3,5E-03
2	2,4E-01	1,5E-02	1,1E-01	7,2E-03
3	3,2E-01	1,1E-02	1,5E-01	5,3E-03
4	2,4E-01	1,3E-02	1,1E-01	6,2E-03

Data azzeramento	14/4/88
Data ritiro	11/7/88
periodo di misura	88

Punti prelievo	dose (mSv)	dev. standard (mSv)	rateo ( $\mu$ Sv/ora)	dev. standard ( $\mu$ Sv/ora)
1	2,8E-01	5,4E-03	1,3E-01	2,6E-03
2	3,2E-01	8,0E-03	1,5E-01	3,8E-03
3	4,1E-01	1,2E-02	2,0E-01	5,7E-03
4	3,3E-01	1,5E-02	1,6E-01	7,2E-03

\* misura non significativa

## Appendice A

## PARTITA N° 1

dose : 200  $\mu$ Sv

n° dosimetro	lettura (nC)	fondo (nC)	sensibilità intrinseca
10387	1,499	0,057	1,097
10388	1,677	0,043	0,981
10389	1,569	0,043	1,048
10390	1,585	0,046	1,038
10391	1,712	0,047	0,961
10392	1,737	0,044	0,947
10393	1,777	0,056	0,926
10394	1,676	0,050	0,982
10395	1,715	0,047	0,959
10396	1,600	0,047	1,028
10397	1,602	0,045	1,027
10398	1,631	0,050	1,009
10399	1,544	0,043	1,065
10400	1,606	0,045	1,024
10401	1,684	0,051	0,977
10402	1,627	0,044	1,011
10403	1,598	0,042	1,029
10404	1,784	0,044	0,922
10405	1,670	0,043	0,985
10406	1,688	0,041	0,975
10407	1,648	0,044	0,998
10408	1,663	0,046	0,989
10409	1,628	0,051	1,010
10410	1,655	0,044	0,994
10411	1,659	0,047	0,992

media lettura partita (nC)	1,649
fondo medio partita (nC)	0,046
media globale letture (nC)	1,645

## Appendice A

## PARTITA N° 2

dose : 200  $\mu$ Sv

n° dosimetro	lettura (nC)	fondo (nC)	sensibilità intrinseca
10212	1,588	0,046	1,036
10213	1,592	0,044	1,033
10214	1,577	0,045	1,043
10215	1,606	0,048	1,024
10216	1,626	0,051	1,012
10217	1,600	0,044	1,028
10218	1,619	0,045	1,016
10219	1,705	0,049	0,965
10220	1,623	0,052	1,014
10221	1,609	0,047	1,022
10222	1,546	0,043	1,064
10223	1,623	0,044	1,014
10224	1,647	0,051	0,999
10225	1,603	0,046	1,026
10226	1,620	0,044	1,015
10227	1,639	0,044	1,004
10228	1,564	0,047	1,052
10229	1,500	0,044	1,097
10230	1,578	0,043	1,042
10231	1,590	0,043	1,035
10232	1,580	0,040	1,041
10233	1,605	0,042	1,025
10234	1,629	0,042	1,010
10235	1,743	0,049	0,944
10236	1,633	0,050	1,007

media lettura partita (nC)	1,610
fondo medio partita (nC)	0,046
media globale letture (nC)	1,645

## Appendice A

**PARTITA N° 3***dose : 200  $\mu$ Sv*

n° dosimetro	lettura (nC)	fondo (nC)	sensibilità intrinseca
10237	1,641	0,043	1,002
10238	1,554	0,042	1,059
10239	1,724	0,041	0,954
10240	1,657	0,045	0,993
10241	1,644	0,044	1,001
10242	1,695	0,044	0,971
10243	1,560	0,043	1,054
10244	1,607	0,050	1,024
10245	1,595	0,043	1,031
10246	1,552	0,041	1,060
10247	1,594	0,045	1,032
10248	1,561	0,042	1,054
10249	1,708	0,041	0,963
10250	1,700	0,047	0,968
10251	1,727	0,043	0,953
10252	1,557	0,044	1,057
10253	1,677	0,044	0,981
10254	1,578	0,041	1,042
10255	1,582	0,040	1,040
10256	1,595	0,044	1,031
10257	1,655	0,048	0,994
10258	1,646	0,043	0,999
10259	1,662	0,041	0,990
10260	1,622	0,039	1,014
10261	1,658	0,040	0,992

media lettura partita (nC)	1,630
fondo medio partita (nC)	0,043
media globale letture (nC)	1,645

## Appendice A

## PARTITA N° 4

dose : 200  $\mu$ Sv

n° dosimetro	lettura (nC)	sensibilità intrinseca
10437	1,568	1,049
10438	1,637	1,005
10439	1,640	1,003
10440	1,565	1,051
10441	1,611	1,021
10442	1,683	0,977
10443	1,628	1,010
10444	1,621	1,015
10445	1,678	0,980
10446	1,645	1,000
10447	1,548	1,063
10448	1,675	0,982
10449	1,593	1,033
10450	1,653	0,995
10451	1,545	1,065
10452	1,571	1,047
10453	1,664	0,989
10454	1,670	0,985
10455	1,722	0,955
10456	1,659	0,992
10457	1,671	0,984
10458	1,589	1,035
10459	1,619	1,016
10460	1,713	0,960
10461	1,625	1,012

media lettura partita (nC)	1,632
media globale letture (nC)	1,645

## Appendice A

## PARTITA N° 5

dose : 200  $\mu$ Sv

n° dosimetro	lettura (nC)	sensibilità intrinseca
10362	1,727	0,953
10363	1,675	0,982
10364	1,586	1,037
10365	1,653	0,995
10366	1,619	1,016
10367	1,671	0,984
10368	1,622	1,014
10369	1,662	0,990
10370	1,752	0,939
10371	1,701	0,967
10372	1,611	1,021
10373	1,733	0,949
10374	1,613	1,020
10375	1,698	0,969
10376	1,649	0,998
10377	1,660	0,991
10378	1,771	0,929
10379	1,722	0,955
10380	1,744	0,943
10381	1,623	1,014
10382	1,592	1,033
10383	1,586	1,037
10384	1,639	1,004
10385	1,712	0,961
10386	1,612	1,020

media lettura partita (nC)	1,665
media globale letture (nC)	1,645



## PARTITA N° 6

dose: 200  $\mu$ Sv

n° dosimetro	lettura (nC)	sensibilità intrinseca
10412	1,609	1,022
10413	1,653	0,995
10414	1,618	1,017
10415	1,674	0,983
10416	1,704	0,965
10417	1,638	1,004
10418	1,638	1,004
10419	1,767	0,931
10420	1,777	0,926
10421	1,827	0,900
10422	1,651	0,996
10423	1,636	1,006
10424	1,680	0,979
10425	1,671	0,984
10426	1,626	1,012
10427	1,578	1,042
10428	1,712	0,961
10429	1,741	0,945
10430	1,788	0,920
10431	1,639	1,004
10432	1,674	0,983
10433	1,715	0,959
10434	1,669	0,986
10435	1,783	0,923
10436	1,612	1,020

media lettura partita (nC)	1,683
media globale letture (nC)	1,645

## Appendice B

## Curva di risposta

dose ( $\mu\text{Sv}$ ):	5,800E+01
--------------------------	-----------

N° dosimetro	lettura (nC)	fondo (nC)	sensibilità	val. netto corretto
10230	0,487	0,046	1,042	0,460
10399	0,498	0,047	1,065	0,480
10394	0,514	0,042	0,982	0,464
10428	0,535	0,046	0,961	0,470
10422	0,534	0,047	0,996	0,485
10457	0,523	0,044	0,984	0,471

media	0,472	dev. standard	0,010
-------	-------	---------------	-------

dose ( $\mu\text{Sv}$ ):	1,100E+02
--------------------------	-----------

N° dosimetro	lettura (nC)	fondo (nC)	sensibilità	val. netto corretto
10231	0,834	0,045	1,035	0,817
10222	0,832	0,045	1,064	0,837
10461	0,867	0,043	1,012	0,834
10252	0,876	0,041	1,057	0,883
10371	0,924	0,053	0,967	0,842
10258	0,898	0,04	0,999	0,857

media	0,845	dev. standard	0,023
-------	-------	---------------	-------

dose ( $\mu\text{Sv}$ ):	1,680E+02
--------------------------	-----------

N° dosimetro	lettura (nC)	fondo (nC)	sensibilità	val. netto corretto
10448	1,412	0,045	0,982	1,342
10459	1,350	0,045	1,016	1,326
10454	1,367	0,045	0,989	1,307
10449	1,360	0,045	1,033	1,358
10457	1,491	0,045	0,984	1,423
10458	1,326	0,045	1,035	1,326

media	1,347	dev. standard	0,041
-------	-------	---------------	-------

dose ( $\mu\text{Sv}$ ):	2,200E+02
--------------------------	-----------

N° dosimetro	lettura (nC)	fondo (nC)	sensibilità	val. netto corretto
10229	1,576	0,047	1,097	1,677
10401	1,848	0,050	0,977	1,757
10400	1,706	0,045	1,024	1,701
10366	1,772	0,044	1,016	1,756
10259	1,784	0,044	0,990	1,723
10436	1,686	0,044	1,020	1,675

media	1,715	dev standard	0,037
-------	-------	--------------	-------

## Appendice B

## Curva di risposta

dose ( $\mu\text{Sv}$ ):	3,300E+02
--------------------------	-----------

N° dosimetro	lettura (nC)	fondo (nC)	sensibilità	val. netto corretto
10448	2,770	0,045	0,982	2,676
10459	2,614	0,045	1,016	2,610
10454	2,669	0,045	0,989	2,595
10449	2,639	0,045	1,033	2,680
10457	2,882	0,045	0,984	2,792
10458	2,586	0,045	1,035	2,630

media	2,664	dev. standard	0,071
-------	-------	---------------	-------

dose ( $\mu\text{Sv}$ ):	4,390E+02
--------------------------	-----------

N° dosimetro	lettura (nC)	fondo (nC)	sensibilità	val. netto corretto
10393	3,783	0,047	0,926	3,460
10458	3,433	0,047	1,035	3,505
10450	3,669	0,046	0,960	3,478
10369	3,646	0,042	0,990	3,568
10452	3,500	0,044	1,047	3,618
10370	3,796	0,047	0,939	3,520

media	3,525	dev. standard	0,059
-------	-------	---------------	-------

dose ( $\mu\text{Sv}$ ):	6,590E+02
--------------------------	-----------

N° dosimetro	lettura (nC)	fondo (nC)	sensibilità	val. netto corretto
10448	5,596	0,045	0,982	5,451
10459	5,154	0,045	1,016	5,191
10454	5,376	0,045	0,989	5,272
10449	5,270	0,045	1,033	5,397
10457	5,870	0,045	0,984	5,732
10458	5,257	0,045	1,035	5,394

media	5,406	dev. standard	0,186
-------	-------	---------------	-------

dose ( $\mu\text{Sv}$ ):	8,780E+02
--------------------------	-----------

N° dosimetro	lettura (nC)	fondo (nC)	sensibilità	val. netto corretto
10378	7,055	0,054	1,009	7,064
10367	7,363	0,064	0,984	7,182
10459	6,675	0,054	1,016	6,727
10430	7,748	0,058	0,92	7,075
10427	7,023	0,057	1,042	7,259
10431	6,929	0,053	1,004	6,904

media	7,035	dev. standard	0,193
-------	-------	---------------	-------

## Appendice B

## Curva di risposta

dose ( $\mu\text{Sv}$ ):	1,317E+03
--------------------------	-----------

N° dosimetro	lettura (nC)	fondo (nC)	sensibilità	val. netto corretto
10368	10,8	0,053	1,014	10,9
10228	9,952	0,060	1,052	10,4
10227	10,8	0,054	1,004	10,8
10261	10,5	0,057	0,992	10,4
10257	10,9	0,051	0,994	10,8
10260	10,4	0,060	1,014	10,5

media	10,6	dev. standard	0,230
-------	------	---------------	-------

Dose ( $\mu\text{Sv}$ )	lettura (nC)	dev. standard (nC)
5,800E+01	0,472	0,01
1,100E+02	0,85	0,023
1,680E+02	1,347	0,041
2,200E+02	1,715	0,037
3,300E+02	2,664	0,072
4,390E+02	3,525	0,059
6,590E+02	5,406	0,186
8,780E+02	7,035	0,193
1,317E+03	10,6	0,23

fattore di calibrazione	1,239E+02
-------------------------	-----------

## Appendice C

periodo dall'irr.(giorni):	0	dose ( $\mu\text{Sv}$ )	878
----------------------------	---	-------------------------	-----

N° dosimetro	lettura (nC)	fondo (nC)	sensibilità	valore corretto(nC)
10437	7,185	0,047	1,049	7,488
10438	7,139	0,049	1,005	7,125
10439	7,152	0,050	1,003	7,123
10440	6,835	0,046	1,051	7,135
10441	7,298	0,047	1,021	7,403

valore medio:	7,255	dev. standard	0,177
---------------	-------	---------------	-------

periodo dall'irr.(giorni):	1	dose ( $\mu\text{Sv}$ )	878
----------------------------	---	-------------------------	-----

N° dosimetro	lettura (nC)	fondo (nC)	sensibilità	valore corr.(nC)
10442	7,219	0,045	0,977	7,009
10443	7,013	0,045	1,010	7,038
10444	6,918	0,043	1,015	6,978
10445	6,971	0,047	0,980	6,786
10446	6,895	0,046	1,000	6,849

valore medio:	6,932	dev. standard	0,109
---------------	-------	---------------	-------

periodo dall'irr.(giorni):	2	dose ( $\mu\text{Sv}$ )	878
----------------------------	---	-------------------------	-----

N° dosimetro	lettura (nC)	fondo (nC)	sensibilità	valore corr.(nC)
10242	7,331	0,037	0,971	7,082
10243	6,609	0,035	1,054	6,929
10244	6,849	0,038	1,024	6,974
10245	6,373	0,035	1,031	6,534
10246	6,425	0,036	1,060	6,772

valore medio:	6,659	dev. standard	0,213
---------------	-------	---------------	-------

periodo dall'irr.(giorni):	5	dose ( $\mu\text{Sv}$ )	878
----------------------------	---	-------------------------	-----

N° dosimetro	lettura (nC)	fondo (nC)	sensibilità	valore corr.(nC)
10237	6,716	0,042	1,002	6,687
10238	6,470	0,044	1,058	6,799
10239	6,966	0,038	0,954	6,609
10240	6,725	0,043	0,993	6,635
10241	6,778	0,039	1,001	6,746

valore medio:	6,695	dev. standard	0,078
---------------	-------	---------------	-------

## Appendice C

periodo dall'irr. (giorni):	9	dose ( $\mu\text{Sv}$ )	878
-----------------------------	---	-------------------------	-----

N° dosimetro	lettura (nC)	fondo (nC)	sensibilità	valore corr. (nC)
10447	6,361	0,038	1,063	6,721
10448	6,937	0,046	0,982	6,767
10449	6,575	0,044	1,033	6,747
10450	6,729	0,040	0,995	6,656
10451	6,228	0,041	1,065	6,589

valore medio:	6,696	dev. standard:	0,073
---------------	-------	----------------	-------

periodo dall'irr. (giorni):	15	dose ( $\mu\text{Sv}$ )	878
-----------------------------	----	-------------------------	-----

N° dosimetro	lettura (nC)	fondo (nC)	sensibilità	valore corr. (nC)
10452	6,806	0,040	1,047	7,084
10453	6,820	0,044	0,989	6,701
10454	6,534	0,044	0,985	6,393
10455	7,018	0,045	0,955	6,659
10456	6,989	0,044	0,992	6,889

valore medio:	6,745	dev. standard	0,259
---------------	-------	---------------	-------

periodo dall'irr. (giorni):	30	dose ( $\mu\text{Sv}$ )	878
-----------------------------	----	-------------------------	-----

N° dosimetro	lettura (nC)	fondo (nC)	sensibilità	valore corr. (nC)
10457	7,403	0,040	0,984	7,245
10458	6,816	0,041	1,035	7,014
10459	6,520	0,041	1,016	6,583
10460	7,183	0,042	0,960	6,855
10461	6,723	0,036	1,012	6,767

valore medio:	6,893	dev. standard	0,251
---------------	-------	---------------	-------

Dosimetri di "zero" periodo (giorni):	1
---------------------------------------	---

N° dosimetro	lettura (nC)	fondo (nC)	sensibilità	valore corr. (nC)
10247	0,070	0,041	1,032	0,030
10248	0,069	0,052	1,054	0,018
10249	0,071	0,047	0,963	0,023
10250	0,073	0,045	0,968	0,027
10251	0,071	0,044	0,953	0,026

valore medio:	0,025	dev. standard	0,005
---------------	-------	---------------	-------

## Appendice C

Dosimetri di "zero" periodo (giorni):	2
---------------------------------------	---

N° dosimetro	lettura (nC)	fondo (nC)	sensibilità	valore corr.(nC)
10252	0,079	0,032	1,057	0,050
10253	0,082	0,033	0,981	0,048
10254	0,075	0,031	1,042	0,046
10255	0,067	0,036	1,040	0,032
10256	0,078	0,033	1,031	0,046

valore medio:	0,044	dev. standard	0,007
---------------	-------	---------------	-------

Dosimetri di "zero" periodo (giorni):	5
---------------------------------------	---

N° dosimetro	lettura (nC)	fondo (nC)	sensibilità	valore corr.(nC)
10257	0,166	0,040	0,994	0,125
10258	0,154	0,041	0,999	0,113
10259	0,162	0,042	0,990	0,119
10260	0,154	0,047	1,014	0,108
10261	0,160	0,040	0,992	0,119

valore medio:	0,117	dev. standard	0,006
---------------	-------	---------------	-------

Dosimetri di "zero" periodo (giorni):	9
---------------------------------------	---

N° dosimetro	lettura (nC)	fondo (nC)	sensibilità	valore corr.(nC)
10362	0,269	0,039	0,953	0,219
10363	0,282	0,042	0,982	0,236
10364	0,252	0,041	1,037	0,219
10365	0,262	0,040	0,995	0,221
10366	0,258	0,046	1,016	0,215

valore medio:	0,222	dev. standard	0,008
---------------	-------	---------------	-------

Dosimetri di "zero" periodo (giorni):	15
---------------------------------------	----

N° dosimetro	lettura (nC)	fondo (nC)	sensibilità	valore corr.(nC)
10367	0,419	0,044	0,984	0,369
10368	0,411	0,038	1,014	0,378
10369	0,436	0,041	0,990	0,391
10370	0,433	0,041	0,939	0,368
10371	0,419	0,041	0,967	0,366

valore medio:	0,374	dev. standard	0,010
---------------	-------	---------------	-------

## Appendice C

Dosimetri di "zero" periodo (giorni)	30
--------------------------------------	----

N° dosimetro	lettura (nC)	fondo (nC)	sensibilità	valore corr.(nC)
10372	0,689	0,039	1,021	0,664
10373	0,736	0,041	0,949	0,660
10374	0,721	0,036	1,020	0,699
10375	0,704	0,038	0,969	0,645
10376	0,733	0,041	0,998	0,691

valore medio:	0,672	dev. standard	0,022
---------------	-------	---------------	-------

Tempo (giorni)	L1 dosimetri	dev. standard L1	L0 "zeri"	dev. standard "zeri"
1	6,932	0,109	0,025	0,005
2	6,859	0,213	0,044	0,007
5	6,695	0,078	0,117	0,006
9	6,696	0,073	0,222	0,008
15	6,745	0,259	0,374	0,01
30	6,893	0,251	0,672	0,022

Tempo (giorni)	L1-L0	dev. st L1-L0	Fading	dev. standard Fading
1	6,907	0,109	4,80E-02	3,09E+04
2	6,815	0,213	6,06E-02	2,40E-03
5	6,578	0,078	9,33E-02	2,53E-03
9	6,474	0,073	1,08E-01	2,89E-03
15	6,371	0,259	1,22E-01	5,78E-03
30	6,221	0,252	1,43E-01	6,73E-03



## Appendice D

## Omogeneità e Riproducibilità

Dose 110 µGy

n° dosimetro	1°	2°	3°	4°	5°	Media	dev. stand.
10394	0,906	0,888	0,886	0,883	0,884	0,847	1,2%
0,981	0,041	0,043	0,046	0,041	0,042		
10388	0,901	0,926	0,902	0,900	0,883	0,855	1,6%
0,981	0,047	0,054	0,042	0,045	0,048		
10387	0,803	0,849	0,806	0,791	0,791	0,763	3,0%
1,097	0,044	0,048	0,041	0,040	0,051		
10425	0,899	0,884	0,900	0,894	0,965	0,861	3,9%
0,984	0,053	0,051	0,044	0,045	0,046		
10409	0,952	0,920	0,901	0,896	0,892	0,867	2,9%
1,010	0,042	0,048	0,046	0,044	0,044		
10395	0,930	0,913	0,951	0,933	0,934	0,888	1,9%
0,959	0,045	0,050	0,041	0,046	0,041		
10403	0,877	0,879	0,877	0,877	0,871	0,832	0,1%
1,029	0,044	0,046	0,044	0,046	0,039		
10406	0,928	0,925	0,930	0,922	0,915	0,878	0,6%
0,975	0,044	0,043	0,051	0,049	0,044		
10412	0,892	0,906	0,891	0,898	0,865	0,845	1,8%
1,022	0,049	0,048	0,042	0,044	0,045		
10419	0,978	0,964	0,944	0,950	0,956	0,914	1,5%
0,931	0,044	0,045	0,045	0,048	0,042		
Media	0,861	0,858	0,855	0,850	0,851		
dev. stand.	5,6%	3,8%	4,7%	4,8%	6,2%		
Media corretta	0,857	0,854	0,850	0,845	0,847		
dev. stand.	3,0%	2,6%	1,8%	1,8%	3,1%		

Dose 880 µGy

n° dosimetro	1°	2°	3°	4°	5°	Media	dev. stand.
10434	7,236	7,252	7,089	7,099	7,145	7,116	1,0%
0,986	0,053	0,050	0,045	0,045	0,047		
10427	7,201	7,244	7,139	7,136	7,160	7,128	0,6%
1,042	0,054	0,047	0,048	0,046	0,046		
10431	6,915	7,015	6,974	7,022	6,959	6,930	0,6%
1,004	0,047	0,045	0,045	0,047	0,051		
10221	7,416	7,420	7,361	7,283	7,302	7,308	0,9%
1,022	0,053	0,047	0,046	0,049	0,046		
10229	6,423	6,484	6,385	6,476	6,480	6,402	0,7%
1,097	0,044	0,052	0,047	0,048	0,047		
10219	7,450	7,509	7,533	7,409	7,512	7,435	0,7%
0,965	0,046	0,048	0,047	0,046	0,049		
10232	6,981	6,866	6,880	6,944	6,885	6,863	0,7%
1,041	0,051	0,048	0,045	0,048	0,049		
10216	7,491	7,432	7,233	7,396	7,418	7,347	1,3%
1,012	0,044	0,047	0,051	0,046	0,046		
10231	6,747	6,960	6,788	6,845	6,650	6,750	1,7%
1,035	0,053	0,045	0,043	0,050	0,047		
10236	7,109	7,006	7,174	7,094	7,207	7,068	1,1%
1,007	0,051	0,047	0,047	0,050	0,054		
Media	7,047	7,071	7,009	7,023	7,024		
dev. stand.	4,8%	4,5%	4,6%	4,0%	4,7%		
Media corretta	7,188	7,213	7,149	7,164	7,164		
dev. stand.	3,3%	2,9%	2,7%	2,5%	3,0%		